

**T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**

**YENİ TEKNOLOJİLERİN SÜRDÜRÜLEBİLİR
TOPLU TAŞIMACILIKTA KULLANIMININ
ÖNEMİ: HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞIT
KULLANIMININ FAYDA-MALİYET ANALİZİ**

Yüksek Lisans Tezi

SEDA ERBAŞ

İSTANBUL, 2013

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KENTSEL SİSTEMLER VE ULAŞTIRMA YÖNETİMİ

**YENİ TEKNOLOJİLERİN SÜRDÜRÜLEBİLİR
TOPLU TAŞIMACILIKTA KULLANIMININ
ÖNEMİ: HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞIT
KULLANIMININ FAYDA-MALİYET ANALİZİ**

Yüksek Lisans Tezi

SEDA ERBAŞ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Göksel DEMİR

İSTANBUL, 2013

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KENTSEL SİSTEMLER VE ULAŞTIRMA YÖNETİMİ
YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

Tezin Adı : Yeni Teknolojilerin Sürdürülebilir Toplu
Taşımacılıkta Kullanımının Önemi: Hibrid Elektrikli
Taşıt Kullanımının Fayda-Maliyet Analizi

Öğrencinin Adı Soyadı : Seda ERBAŞ

Tez Savunma Tarihi : 05.06.2013

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğu Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanmıştır.

Doç. Dr. Tunç BOZBURA
Enstitü Müdürü
İmza

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa ILICALI
Program Koordinatörü
İmza

Bu Tez tarafımızca okunmuş, nitelik ve içerik açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak yeterli görülmüş ve kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmzalar

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Göksel DEMİR

Üye
Yrd. Doç. Dr. Nilgün CAMKESEN

Üye
Doç. Dr. Kurtuluş ÖZCAN

ÖNSÖZ

Yüksek lisans bitirme tezi kapsamında yardımlarından dolayı danışmanım Sayın Hocam Doç. Dr. Göksel Demir'e, teze katkılarından dolayı Doç. Dr. Kurtuluş ÖZCAN'a, Yrd. Doç. Dr. Nilgün CAMKESEN'e ve yüksek lisans programında dersini aldığım tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Çalışmamda desteğini esirgemeyen, eğitim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen ve yanımda olan babam Ali Erbaş'a, annem Sakibe Erbaş'a ve kardeşlerime bu çalışmayı armağan ederim.

Haziran 2013

Seda Erbaş

ÖZET

YENİ TEKNOLOJİLERİN SÜRDÜRÜLEBİLİR TOPLU TAŞIMACILIKTA KULLANIMININ ÖNEMİ: HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞIT KULLANIMININ FAYDA-MALİYET ANALİZİ

Seda Erbaş

Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Göksel Demir

Haziran, 2013, Sayfa: 94

Uluslararası alanda küresel ısınmanın etkileri ve iklim değişikliği kapsamında yapılan çalışmaların başında sera gazı emisyonlarını azaltma çalışmaları gelmektedir. Özellikle küresel ısınmaya sebep olan emisyonların büyük bir çoğunluğu karayolu ulaşımı kaynaklıdır. Karayolu ulaşımında motorlu taşıtlarda kullanılan fosil yakıtlardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması, küresel ısınma ve tükenen fosil yakıtlara karşı, araçlarda daha az emisyon yayan, daha az yakıt tüketen alternatif yakıtların ve teknolojilerin kullanılmasını gündeme getirmiştir. Bu alternatif sistemler içerisinde alternatif yakıtlar, hibrid, elektrikli ve yakıt pilli tahrik sistemleri gibi değişik çözümler, dünya genelinde özel araç kullanımının dışında, toplu taşımada kullanılan otobüslerde de yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

Toplu taşıma, sürdürülebilir bir çevre ve toplumun olmazsa olmazlarından biridir. Toplu taşıma sürdürülebilir gelişmeye katkıda bulunarak gelecek nesillere daha sağlıklı bir dünya sunar. Ancak toplu taşıma araçlarının büyük bir çoğunluğu dışa bağımlı ve tükenmekte olan fosil yakıtlar kullanarak çevreye zararlı emisyonlar üretirler ve bu şekilde sürdürülebilirliği sağlayamazlar. Bu yüzden günde milyonlarca insanın taşındığı ve yılda binlerce kez sefer yapan toplu taşıma araçlarının daha az emisyon yaymaları ve daha az yakıt tüketmeleri önemlidir.

Özellikle İstanbul gibi büyük metropollerde şehir içi toplu taşımada büyük oranda otobüsler kullanılmaktadır. Şehir içi trafiğin yoğun olduğu bu gibi kentlerde sık dur-kalklar nedeniyle önemli oranda yakıt tüketimi ve kirlenici emisyonlar oluşmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada, frenleme sırasında açığa çıkan enerjiyi yakalayıp depolayarak ve içten yanmalı motorun rölanti durumunda çalışmasını önleyerek yakıt ekonomisi sağlayan ve emisyonları azaltan şehir içi toplu taşımada kullanılan hibrid otobüs teknolojileri üzerinde durulmuştur. Bu çalışmanın amacı, özellikle şehir içi toplu taşımada kullanılan alternatif otobüs tahrik teknolojilerini inceleyerek, mevcut sistemlerle karşılaştırmak ve bu sistemlerin işletme ve yatırım maliyetlerine dair bir fayda-maliyet analizi yapmaktır.

Anahtar Kelimeler: Alternatif Otobüs Teknolojileri, Hibrid ve Yakıt Pili Otobüsler, Fayda-Maliyet Analizi

ABSTRACT

THE IMPORTANCE OF THE USE OF NEW TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE PUBLIC TRANSPORT: COST-BENEFIT ANALYSIS OF HYBRID ELECTRIC VEHICLE USE

Seda Erbaş

Urban Systems and Transportation Management

Supervisor: Doç. Dr. Göksel Demir

June, 2013, Page: 94

Effects of global warming and climate change in the scope of international studies at the beginning of the work is to reduce greenhouse gas emissions. The vast majority of the emissions that cause global warming, especially road transport-related. Road transport, reducing greenhouse gas emissions from fossil fuels used in motor vehicles, to global warming and the consumption of fossil fuels, vehicles emitting less emissions, less fuel consuming technologies and the use of alternative fuels has raised. The alternative fuels, hybrid, electric and fuel cell drive systems such as various solutions around the world in this alternative systems, as well as the use of private vehicles, buses used in public transportation began to be used widely.

Public transport, a sustainable environment and society's necessities. Public transport in sustainable development by contributing to a healthier world for future generations. But a large majority of the public transport system dependent and produce harmful emissions to the environment by using the fossil fuels running out, and in this way can not provide sustainability. So, public transport vehicles that transported millions of people a day and operated thousands of times per year is important to consume less fuel and less emissions.

Especially in large metropolitan areas such as Istanbul, city public transport buses are used to a great extent. This is common in cities such as heavy traffic in the city due to the start-stop consists of significant fuel consumption and pollutant emissions. For this purpose, in this study, we have been focused on hybrid bus technologies used in urban public transport which provides fuel economy and reduce emissions by capturing and storing the energy during braking and preventing operation of the internal combustion engine at idle mode. The purpose of this study, especially for urban public transportation bus used alternative drive technologies, examining existing systems and to compare the operating and capital costs of these systems is to make a cost-benefit analysis.

Key Words: Alternative Bus Technology, Hybrid and Fuel Cell Buses, Cost-Benefit Analysis

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLAR.....	3
2.1. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARIN GENEL TANIMI.....	3
2.2. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARIN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ	4
2.3. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞIT BİLEŞENLERİ.....	5
2.3.1 Güç Üretim Sistemi.....	5
2.3.2 Tahrik Sistemleri	7
2.3.3 Enerji Depolama Sistemleri	9
2.3.3.1 Bataryalar	9
2.3.3.1.1 Hibrid Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Batarya Çeşitleri	10
2.3.3.2 Yakıt Pilleri	13
2.3.3.3 Volanlar	14
2.3.3.4 Ultrakapasitörler	15
2.3.3.5 Bazı Elektrik Tahrikli Otobüslerde Kullanılan Enerji Depolama Cihazları.....	16
2.3.3.6 Enerji Depolama Cihazlarının Bugünkü Durumu ve Gelecekteki Gelişimi	17
2.3.4 Güç Kontrol Sistemleri.....	19
2.3.5 Güç Yönetim Sistemleri.....	20
2.4. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞIT TÜRLERİ.....	23
2.4.1 Seri Hibrid Elektrikli Taşıtlar.....	25
2.4.2 Paralel Hibrid Elektrikli Taşıtlar.....	26
2.4.3 Seri-Paralel Hibrid Elektrikli Taşıtlar	27
2.4.4 Plug-in Hibrid Elektrikli Taşıtlar	29
2.5. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI.....	30

2.6. ŞEHİR İÇİ OTOBÜSLERDE HİBRİD ELEKTRİKLİ TAHRİK TEKNOLOJİLERİNİN UYGULANMASI	31
2.6.1 Hibrid Elektrikli Otobüs Yapısı.....	31
2.6.2 Hibrid Elektrikli Otobüs Bileşenleri	33
2.6.3 Hibrid Sistemlerin Başlıca Ana Üreticileri.....	36
2.6.4 Hibrid Elektrikli Otobüslerin Değerlendirmesi	36
2.6.5 Farklı Otobüsler Arasında Karşılaştırma Analizi	37
2.6.6 Hibrid Elektrikli Otobüs Çözümleri	41
2.7. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAHRİK TEKNOLOJİSİ VE EMİSYONLAR ...	45
3. YAKIT PİLLİ ARAÇLAR.....	47
3.1. YAKIT PİLLİNİN GENEL TANIMI	47
3.2. YAKIT PİLİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	47
3.3. YAKIT PİLİNİN BİLEŞENLERİ	48
3.3.1. Yakıt İşleme Ünitesi.....	49
3.3.2. Güç Üretim Sistemi.....	49
3.3.3. Güç Dönüşüm Ünitesi.....	49
3.3.4. Kontrol Sistemi Ünitesi.....	49
3.4. YAKIT PİLİ ÇEŞİTLERİ	49
3.4.1. Proton Değişimli Membran (PEM) Yakıt Pili (PEMFC).....	50
3.4.2. Direkt Metanol Yakıt Pili (DMFC)	50
3.4.3. Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)	51
3.4.4. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC)	51
3.4.5. Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC).....	51
3.4.6. Alkalin Yakıt Pili (AFC)	52
3.5. YAKIT PİLİNİN MOTORLU TAŞITLARDA UYGULANMASI.....	53
3.5.1. Hibrid Yakıt Pili Taşıtlar.....	53
3.6. ŞEHİR İÇİ OTOBÜSLERDE YAKIT PİLLİ TAHRİK TEKNOLOJİLERİNİN UYGULANMASI.....	54
3.6.1. Yakıt Pili Otobüs Yapısı.....	54
3.6.1.1. Yakıt Pili Sistemi	55
3.6.1.2. Enerji Depolama Sistemi	56

3.6.1.3. Hidrojen Depolama Sistemi.....	56
3.6.1.4. Tekerlek Tahriki	56
3.6.1.5. Soğutma Sistemi	57
3.6.1.6. Yardımcı Sistemler.....	57
3.6.2. Yakıt Pili Otobüslerin Değerlendirmesi.....	57
3.6.3. Yeni Nesil Yakıt Pili Otobüsler.....	58
3.6.4. Yakıt Pili Otobüslerin İşletme Maliyeti ve Yakıt Ekonomisi.....	60
4. ŞEHİR İÇİ TOPLU TAŞIMADA KULLANILAN ALTERNATİF OTOBÜS TAHRİK TEKNOLOJİLERİNİN FAYDA-MALİYET ANALİZLERİ	63
4.1. DÜNYADA YAPILAN ÖRNEK ÇALIŞMALAR.....	63
5. ŞEHİR İÇİ ULAŞIMDA KULLANILACAK 100 ADET DİZEL, CNG'Lİ VE HİBRİD-ELEKTRİKLİ OTOBÜSÜN ÖMÜR BOYU MALİYET ANALİZİ	72
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	86
KAYNAKÇA	88

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1: Motor tiplerinin avantaj ve dezavantajları	8
Tablo 2.2: Mevcut batarya sistemlerinin karşılaştırması	13
Tablo 2.3: Değişik otobüs çözümlerinin enerji depolama cihazlarının karakteristikleri	16
Tablo 2.4: Hibridleştirme dereceleri	24
Tablo 2.5: Hibrid sistemlerin majör üreticileri	36
Tablo 2.6: Farklı teknolojilere sahip şehir içi otobüslerin karşılaştırılması.....	38
Tablo 2.7: Kuzey Amerikada üretilen hibrid elektrikli otobüsler	41
Tablo 2.8: Avrupada üretilen hibrid elektrikli otobüsler	42
Tablo 2.9: İstanbul’da metrobüs hattında kullanılan Hollanda üretimi Phileas marka hibrid otobüslerin teknik özellikleri	43
Tablo 2.10: DOE/NREL transit otobüs değerlendirme projesi sonuçları	46
Tablo 2.11: Hibrid ve konvansiyonel otobüs emisyonlarının karşılaştırılması	46
Tablo 3.1: Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri	52
Tablo 3.2: Farklı tip otobüslerin km başına işletme maliyetleri	60
Tablo 3.3: Farklı lokasyonlardaki yakıt pilli otobüslerin yakıt ekonomisi	61
Tablo 3.4: Farklı tip otobüslerin NOx ve PM emisyonlarının karşılaştırması.....	62
Tablo 4.1: Araç sistem tanımlamaları	66
Tablo 4.2: Toplam bakım maliyetleri.....	69
Tablo 4.3: Mil başına işletme maliyetlerinin özeti	69
Tablo 4.4: Balata değişim karşılaştırması	70
Tablo 5.1: Otobüs başına toplam yatırım maliyetleri.....	73
Tablo 5.2: Otobüs başına 12 yıllık toplam işletme maliyetleri	78
Tablo 5.3: Otobüs km başına yatırım maliyetleri.....	79
Tablo 5.4: Otobüs km koltuk başına yatırım maliyetleri (40 koltuk)	80
Tablo 5.5: Otobüs km başına işletme maliyetleri.....	81
Tablo 5.6: Otobüs km koltuk başına işletme maliyetleri (40 koltuk)	82
Tablo 5.7: 100 adet otobüsün toplam ömür boyu maliyeti (life cycle cost)	83
Tablo 5.8: Otobüs km başına ömür boyu maliyet (60.000 km)	84
Tablo 5.9: Otobüs km koltuk başına ömür boyu maliyet (40 koltuk).....	85

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Hibrid elektrikli araç yapısı	4
Şekil 2.2: Bir volan sisteminin şematik görünümü	14
Şekil 2.3: Seri hibrid elektrikli araç çalışma modları.....	21
Şekil 2.4: Paralel hibrid elektrikli araç çalışma modları	22
Şekil 2.5: Seri-paralel hibrid elektrikli araç çalışma modları	23
Şekil 2.6: Seri hibrid elektrikli araç yapısı.....	25
Şekil 2.7: Paralel hibrid elektrikli araç yapısı	27
Şekil 2.8: Seri-paralel hibrid elektrikli araç yapısı.....	28
Şekil 2.9: Plug-in hibrid elektrikli araç yapısı	29
Şekil 2.10: Seri hibrid tahrik sistemi.....	32
Şekil 2.11: Hibrid elektrikli otobüste kullanılan bir dizel motor	33
Şekil 2.12: Hibrid elektrikli otobüste kullanılan güç kontrol sistemi	34
Şekil 2.13: Hibrid elektrikli otobüste kullanılan bir elektrik motoru.....	35
Şekil 2.14: Hibrid elektrikli otobüste kullanılan enerji depolama sistemi	35
Şekil 2.15: Farklı teknolojilere sahip otobüslerin ömür boyu maliyetlerinin karşılaştırılması	39
Şekil 2.16: Farklı teknolojilere sahip otobüslerin yakıt ekonomisi ve emisyonlarının karşılaştırılması	40
Şekil 2.17: Phileas marka hibrid otobüslerin teknik resimleri	44
Şekil 2.18: Phileas marka hibrid otobüslerin resimleri	44
Şekil 2.19: Benzinli ve dizel içten yanmalı motorlu araçlarla hibrid elektrikli araçların emisyon bakımından karşılaştırması	45
Şekil 3.1: Yakıt pilinin çalışma prensibi	48
Şekil 3.2: Yakıt pili sisteminin genel yapısı ve elemanları.....	48
Şekil 3.3: Yakıt pilli hibrid taşıt.....	53
Şekil 3.4: Yakıt pilli hibrid otobüsün anahtar bileşenleri.....	55
Şekil 3.5: Yeni Citaro yakıt pilli hibrid otobüs.....	59
Şekil 3.6: Yeni Van Hool yakıt pilli otobüs.....	59
Şekil 4.1: New York’ da kent içi ulaşımda kullanılan hibrid otobüs yapısı	64
Şekil 4.2: Tüm otobüs sistemleri için ortalama yakıt ekonomisi.....	68
Şekil 5.1: Otobüs km başına yatırım maliyetleri (yıllık 60.000 km)	79
Şekil 5.2: Otobüs km koltuk başına yatırım maliyetleri (40 koltuk).....	80
Şekil 5.3: Otobüs km başına işletme maliyetleri (60.000 km).....	81
Şekil 5.4: Otobüs km koltuk başına işletme maliyetleri (40 koltuk).....	82
Şekil 5.5: Otobüs km başına ömür boyu maliyet (60.000 km)	84
Şekil 5.6: Otobüs km koltuk başına ömür boyu maliyet (40 koltuk).....	85

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
İYM	: İçten Yanmalı Motor
UK	: Ultrakapasitör
HEB	: Hibrid Elektrikli Otobüs
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
CNG	: Sıkıştırılmış Doğal Gaz
PHEA	: Plug-in (Şarj edilebilir) Hibrid Elektrikli Araç
PM	: Partikül Madde
NO _x	: Azot Oksitler
CO ₂	: Karbon Dioksit
CO	: Karbon Monoksit
CH ₃ OH	: Metanol
HC	: Hidrokarbon
Li-ion	: Lityum İyon
PEM	: Proton Değişimli Membran
PEMFC	: Proton Değişimli Membran Yakıt Pili
NaNiCl	: Sodyum Nikel Klorid
DMFC	: Direkt Metanol Yakıt Pili
PAFC	: Fosforik Asit Yakıt Pili
MCFC	: Erimiş Karbonat Yakıt Pili
SOFC	: Katı Oksit Yakıt Pili
AFC	: Alkalin Yakıt Pili
Ni-Cd	: Nikel Kadmiyum
WVU	: West Virginia University (Batı Virginia Üniversitesi)
DOE	: U.S. Department of Energy (ABD Enerji Departmanı)
NREL	: National Renewable Energy Laboratory (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı)
NiMH	: Nikel Metal Hidrid

HEA	: Hibrid Elektrikli Araç
MTV	: Manhattanville
MCH	: Mother Clara Hale
WF	: West Farms
EGR	: Egzos Gazı Resirkülasyon Sistemi

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve çevresel sorunları alternatif araç tahrik sistemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Toplu taşıma aracı olarak kullanılan otobüsler yeni teknikler ve teknolojilere sahip araç tahrik sistemlerinin kullanımı ile kentsel alanlarda trafikten kaynaklanan sorunları önemli ölçüde azaltabilir.

Bu çalışmanın konusu, şehir içi toplu taşıma araçlarından olan otobüslere yönelik daha az emisyon yayan ve daha az yakıt tüketen, daha iyi performans gösteren, daha az bakım maliyetleri olan yeni, alternatif teknolojileri incelemek ve mevcut sistemlerle kıyaslama yapmaktır. Bu amaçla bu çalışmada özellikle hibrid otobüs teknolojileri üzerinde durulmuştur.

Çalışma giriş bölümü hariç beş bölümden oluşmakta ve 5. bölümde sonuca ilişkin bilgiler verilmektedir. Birinci bölümde hibrid elektrikli taşıtlara ait genel bilgiler verilmekte olup, hibrid elektrikli taşıtların çalışma prensipleri, bileşenleri, kullanılan enerji depolama cihazları, türleri, avantajları ve dezavantajları anlatılmaya çalışılmıştır. Ayrıca şehir içi otobüslerde hibrid elektrikli tahrik teknolojilerinin uygulanmasına yönelik örnekler verilmiş ve farklı tip otobüslerle karşılaştırma analizi yapılmıştır. Bu bölümün sonunda da hibrid tahrik teknolojisi ve emisyonlarla ilgili bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde bir diğer alternatif teknoloji olan yakıt pilli taşıtlar anlatılmaya çalışılmıştır. Öncelikle yakıt pilinin genel bir tanımı yapılarak, çalışma prensibi anlatılmıştır. Daha sonra yakıt pili sistemini oluşturan bileşenler ve yakıt pili çeşitlerinden bahsedilmiştir. Yakıt pilinin motorlu taşıtlarda uygulanması ile ilgili olarak hibrid yakıt pilli taşıtlar ele alınmış ve şehir içi otobüslerde yakıt pilli tahrik teknolojilerinin uygulanmasına yönelik örnekler verilmiştir. Bir yakıt pilli otobüsün yapısı ana hatları ile anlatılarak, işletme maliyetleri ve yakıt ekonomisi incelenmiştir.

Üçüncü bölümde ise şehir içi toplu taşımada kullanılan alternatif otobüs tahrik teknolojilerinin fayda-maliyet analizleri New York ve Londra kentlerindeki mevcut otobüslerle hibrid otobüsler arasında yapılan örnek karşılaştırmalı analiz çalışmaları

anlatılarak ele alınmıştır. Özellikle bu iki kentin seçilmesinin nedeni, hibrid otobüslerin yaygın bir şekilde kullanılması ve hibrid otobüs teknolojisinin ülkemize göre çok önceden yerleşmiş olmasıdır.

Dördüncü bölümde ise çalışmanın amacını teşkil eden şehir içi ulaşımda kullanılacak olan dizel, CNG ve hibrid-elektrikli üç tip otobüs teknolojisi için 2013-2025 yıllarını kapsayan 12 yıllık bir zaman dilimindeki ömür boyu maliyetler (Life Cycle Cost) belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle her bir teknolojinin yatırım ve işletme maliyetlerinin nelerden oluştuğu belirtilmiş ve bu maliyetler her bir sistem için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, özellikle şehir içi ulaşımda kullanılan otobüslere yönelik daha az emisyon yayan ve iyileştirilmiş yakıt ekonomisi ile enerji verimliliği sağlayan alternatif teknolojilerin mevcut otobüslerle fayda ve maliyetlerinin karşılaştırmasını yaparak, bu sistemlere geçmeye değer olup olmadığını araştırmaktır.

2. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLAR

Bu bölümde, hibrid elektrikli taşıtlara ait genel bilgiler verilmiştir.

2.1. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARIN GENEL TANIMI

Hibrid taşıt iki ya da daha fazla tahrik organı kullanan bir araçtır. Tipik bir hibrid elektrikli taşıtta bir içten yanmalı motorla (İYM) birlikte bir de elektrik motoru taşıtı tahrik etmek üzere kullanılmaktadır. İki farklı tahrik organı kullanımında hedef her iki tahrik organının da en avantajlı yanlarını bir arada değerlendirmektir.

Hibrid elektrikli araçlar (HEA) tipik olarak bir enerji depolama cihazı, bir güç kaynağı ve bir tahrik sisteminin bileşiminden oluşmaktadır. Enerji depolama cihazları genellikle akülerdir, fakat ultrakapasitörler ve volanlar gibi başka olanakları da vardır. Güç kaynakları İYM' ler, dizel motorlar, gaz türbinleri veya yakıt hücreleri olabilir.

Verilen bir hat üzerindeki bir hibrid sistemin verimliliği, alt sistemlerin özel kombinasyonu, sistemlerin nasıl birleştirileceği ve kullanılan kontrol stratejisi gibi birçok faktöre bağlıdır. Hibrid araçların faydalarından olan yakıt ekonomisi, frenleme altında kaybolacak olan enerjiyi aküde depolayan rejeneratif frenleme kabiliyetinden elde edilir. Bu enerji daha sonra aracı hareket ettirmek için kullanılır.

Hibrid elektrikli taşıtlara yönelimin gerekçeleri

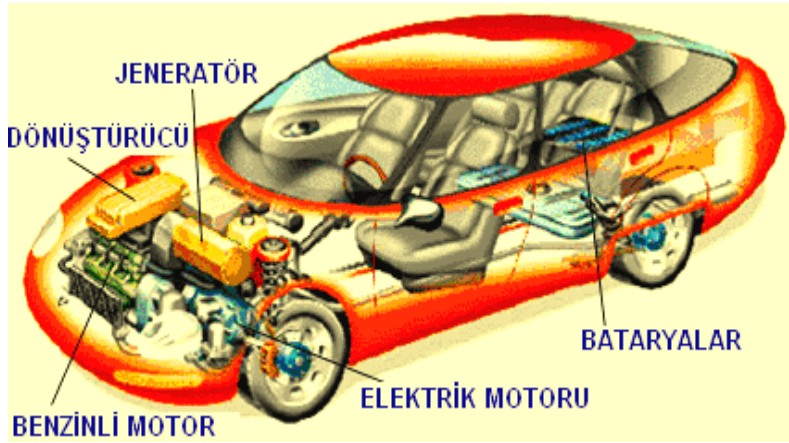
- i. Yakıt ekonomisi
- ii. Egzoz emisyonları
- iii. Yönetmelikler
- iv. Uzun menzil
- v. Yüksek performans

Şekil 2.1' de HEA yapısı görülmektedir. HEA' lar konvansiyonel araçlardan daha fazla yakıt ekonomisi sağlayabilir. İYM ve elektrik motorunun kombinasyonundan oluşan

HEA' lar, tüketiciye bir konvansiyonel araçtan beledikleri uzun bir menzil ve hızlı yakıt ikmali de sunarlar. HEA' ların bireysel taşımacılıktan ticari taşımacılığa kadar (kamyon taşımacılığı gibi) geniş bir kullanım alanı vardır.

HEA' lar aküyü şarj etmek için bir priz gerektirmez, bunun yerine İYM ve rejeneratif frenlemeyi kullanarak aküyü şarj eder. Frenleme boyunca kaybolan enerjiyi yakalar, elektrik motorunu bir jeneratör olarak kullanır ve yakalanan enerjiyi aküde depolar. Aküden gelen enerji ivmelenme boyunca ve rölantideyken ekstra yardımcı güç sağlar.

Şekil 2.1: Hibrid elektrikli araç yapısı



Kaynak: http://data.obitet.net/obitet/hibrit_otomobiller/hev2.htm

2.2. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARIN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

- i. Araç kalkarken sadece elektrik motoru çalışır. Bu esnada İYM kapalıdır. İYM' ler düşük devirlerde elektrik motorları kadar yüksek tork üretmezler. Bu yüzden kalkışta kullanılan elektrik motoru sayesinde iyi karşılık veren ve oldukça yumuşak bir kalkış elde edilir (Özen 2008).
- ii. Düşük ve orta hızda sürüşlerde İYM' ler enerji bakımından verimli değildir. Öte yandan elektrikli motorlarda aksine daha verimlidir. Bu yüzden düşük ve orta

hızlarda araç, elektrik motorlarını kullanmak için akülerde depolanan enerjiyi kullanır (Özen 2008).

- iii. Araç sabit bir hızda yol alırken İYM devrededir. İYM tarafından üretilen güç tekerlekleri tahrik etmek için kullanılır. Aynı zamanda üretilen gücün bir kısmı jeneratörde toplanır. Jeneratördeki enerji ya aküleri şarj etmek için kullanılır ya da doğrudan elektrik motoruna enerji sağlar.
- iv. İvmelenme durumunda yani araç hızlanırken, akülerde depolanan enerji elektrik motorunu çalıştırır ve elektrik motoru İYM ile birlikte tekerlekleri tahrik etmek üzere kullanılır.
- v. Frenleme ve yavaşlama sırasında elektrik motorunun dönmesine izin veren tekerlekler rejeneratör görevi yapar ve aracın kinetik enerjisinden faydalanılır. Normalde sürtünme ve ısıya dönüşen yavaşlamadaki bu enerji yeniden kullanılmak üzere akülerde depolanmış olur. Duraklama sırasında ise İYM, elektrik motoru ve jeneratör kapanır. Böylece gereksiz enerji kullanımının önüne geçilmiş olur (Özen 2008).

2.3. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞIT BİLEŞENLERİ

2.3.1. Güç Üretim Sistemi

Güç üretim sistemi, aracın elektrik ihtiyacını tek başına veya farklı enerji kaynakları ile birlikte karşılamaktadır. Elektrikli tahrik motoru ve motoru besleyen elektrik şebekesi, güç üretim sistemine doğrudan bağlıdır. Güç üretim sistemi araç için gerekli olan alternatif akım (AC) ya da doğru akım (DC) elektrik enerjisini sağlamaktadır (Keskin 2009).

Aşağıda HEA' ların güç üretim sisteminde kullanılan bazı enerji kaynakları anlatılmıştır:

Bataryalar

Bataryalar, elektrikli ve hibrid araçlarda en yaygın kullanılan güç üretim sistemleridir. Bataryalarda elektrokimyasal olarak depolanan enerji doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılır.

Yakıt Pilleri

Yakıt pili sisteme dışarıdan sağlanan yakıt ve elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olan oksitleyicinin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik ve ısı formunda kullanılabilir enerjiye çeviren güç üretim elemanıdır.¹ Yakıt pilli taşıtlarda yakıt beslendiği sürece elektrik enerjisi elde edilmektedir. Yan ürün olarak ise su ve ısı açığa çıkar.

Isı makinaları

Isı makinası bir yakıtın kimyasal enerjisini ısı enerjisine dönüştüren ve bu ısı enerjisini kullanarak faydalı iş üreten aygıttır.² Elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan ısı makinası İYM' lerdir. İYM' lerde yanma, iş yapan akışkanın içerisinde olmaktadır. İYM' lere örnek olarak benzinli ve dizel motorlar ve gaz türbinleri verilebilir. Orta ve yüksek devirlerde (1800-5000 d/d) motorların kullanıldığı elektrikli araçlarda güç seviyeleri genellikle 50 kW aralığında yoğunlaşmaktadır. (Ünlü vd. 2003).

Bir diğer ısı makinası olan gaz türbinleri dönen parçalardan oluşmaktadır. Bu sayede pistonlu motorlardan ayrılmaktadır. Gaz türbinlerinin en önemli özelliği motorlara kıyasla daha yüksek güç yoğunluğuna ve daha basit bir yapıya sahip olmalarıdır. Mikrotürbinler ise, tahrik ünitesi olarak bir gaz türbini ve yüksek hızlarda çalışan sürekli mıknatıslı jeneratörlerin birlikte çalıştığı bir güç üretim ünitesinden oluşmaktadır. 20-100 kW gibi küçük güç kapasitelerinde çalışan mikrotürbinlerin devir

¹ http://yakitpili.com/page_id=7

² https://dosya.sakarya.edu.tr/Dokumanlar/2013/312/305788162_motor-sunum1.pdf

hızları 100.000 d/d seviyelerine kadar çıkmaktadır. Türbin kuyruk miline bağlanan jeneratörlerden AC elektrik enerjisi elde edilmektedir. AC elektrik enerjisi doğrultucular aracılığı ile DC elektrik enerjisine dönüştürülerek sistemi beslemektedir. Mikrotürbinler ağırlık açısından hafif olduğundan elektrikli araçlar için gelecek vaad etmektedir (Keskin 2009).

Jeneratörler

Isı makinaları tarafından tahrik edilen jeneratörler mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Hibrid araçlarda İYM tarafından üretilen mekanik enerjinin bir kısmı daha sonra akülerde depolanması veya elektrik motorunu tahrik etmesi için jeneratör tarafından elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

2.3.2. Tahrik Sistemleri

Tümü-elektrikli ve HEA' larda kullanılan tahrik sistemleri elektrik motoru, güç elektroniği ve kontrol ünitelerinden oluşur. Ayrıca paralel hibrid elektrikli taşıtlarda İYM de tekerlekleri tahrik etmektedir. Ünlü ve arkadaşlarına göre, tümü-elektrikli ve HEA motorlarından beklenen özellikler şunlardır: (Ünlü vd. 2003)

- i. Yüksek anlık güç ve yüksek güç yoğunluğu,
- ii. Kalkış ve yokuş tırmanma durumları için düşük hızlarda yüksek moment,
- iii. Normal seyir sırasında yüksek hızlarda yüksek güç,
- iv. Sabit moment ve sabit güç bölgelerini içeren çok geniş hız aralığı,
- v. Moment ihtiyacına hızlı cevap verebilme,
- vi. Geniş hız ve moment aralıklarında yüksek verim,
- vii. Rejeneratif frenleme için yüksek verim,
- viii. Değişik çalışma koşulları için yüksek güvenilirlik ve sağlamlık,
- ix. Kabul edilebilir seviyede maliyet.

Elektrikli araçların ilk uygulamalarında tahrik motoru olarak DC motorlar kullanılmıştır. Bu tip makinalar moment-hız karakteristiği açısından taşıt uygulamaları için uygun olsa da, düzenli olarak bakıma gereksinim duymaktadırlar. Zaman içinde gelişen teknolojiyle birlikte önce asenkron motorlar, günümüzde de sürekli mıknatıslı fırçasız motorlar ve anahtarlamalı relüktans motorları tahrik sistemleri için uygun birer alternatif olmaktadır (Çınar vd. 2004).

Anahtarlamalı relüktans motorları, yapılarının oldukça basit olması nedeniyle DC motorlarına ve asenkron motorlara göre büyük avantaj sağlar. Yapılarının basit olmasından dolayı üretimleri kolaydır ve bu sayede işletme maliyetleri düşüktür. Bununla birlikte en büyük problemleri momentte oluşan dalgalanmalar ve gürültülü çalışmalarıdır. Teknolojik gelişmelerle birlikte güç ve enerji yoğunlukları artan sürekli mıknatıslı malzemelerde elektrik tahrikli motorlarda kullanılmaktadır. Sürekli mıknatıslı motorlarda fırça-kolektör düzeneği yoktur ve bu sayede uzun süre bakım ihtiyacı olmadan çalışabilirler. Bu motorlar diğer alternatiflerine göre daha hafif ve küçük boyutludur ve güç yoğunlukları yüksektir (Çınar vd. 2004). Elektrik tahrikli taşıtlarda kullanılan motor tiplerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 2.1’ de verilmiştir.

Tablo 2.1: Motor tiplerinin avantaj ve dezavantajları

Motor Tipi	Avantajları	Dezavantajları
DC Motor	Sadece 1 veya 2 DC/DC konvertörle kontrol	Bakım Düşük güç yoğunluğu (300W/kg)
İndüksiyon Motoru (Asenkron)	Yüksek kullanılabilirlik Yüksek güç yoğunluğu (750 W/kg) Kolay bakım Verim ~ % 90	Elektronik maliyeti Yüksek rotor sıcaklığı
Sargılı rotor senkron motor	~ 500W/kg ve maliyet Elektronik olarak basitlik İyi verim haritası	Bakım Rotor sıcaklığı Fazla bilinmeyen teknoloji
Sürekli mıknatıslı senkron motor (PM motor)	Güç yoğunluğu (1Wh/kg) Tork yoğunluğu (5Nm/kg) Yüksek verim > % 90 Kolay dinamik frenleme	Maliyet (rotor + konvertör)
Relüktans motor	Tork yoğunluğu	Yüksek frekans Düşük verim Elektronik maliyet

Kaynak: Keskin 2009

2.3.3. Enerji Depolama Sistemleri

HEA' lar için enerji depolama sistemi olarak genellikle aküler kullanılmaktadır. Aküler, birim ağırlık ve birim maliyet bakımından yüksek bir enerji depolama kapasitesine sahip olmalıdır. Çünkü akü, elektrik tahrikli sistemler içindeki en pahalı bileşendir. Akü maliyetini azaltmak düşük maliyetli elektrik tahrikli araç üretmek açısından çok önemlidir.

HEA' lardaki enerji depolama üniteleri, araç için yeterli enerji (kWh) depolamak, aracın belirli bir ivmelenme performansına sahip olması için uygun pik gücü (kWh) sağlamak ve uygun sürüş çevrimini karşılama kabiliyetine sahip olmak için boyutlandırılmış olmalıdır. Enerji depolama üniteleri uygun çevrim ve ömür boyu gereksinimleri karşılamalıdır. Bu gereksinimler araç tipine bağlı olarak (bataryalı, yakıt pilli veya hibrid elektrikli) önemli ölçüde değişiklik gösterir.

2.3.3.1. Bataryalar

Bataryalar kimyasal enerjiden elektrik enerjisi üreten cihazlardır. Bir hücre, temel olarak pozitif ve negatif elektrotlardan, elektrolitten ve elektrotları birbirinden ayıran bir ayırıcıdan oluşmaktadır (Kınav 2007). Bataryalar çevrim ömrü, enerji ve güç yoğunluğu ve enerji verimi ile karakterize edilir. Çevrim ömrü faydalı şarj yeteneğini (genellikle başlangıç kapasitesi % 80' in altına düştüğü zaman) kaybetmeden mümkün olan şarj ve deşarj çevrimi sayısını ifade eder. Batarya şarj ve deşarj olduğunda enerjinin tamamı bataryada olabilecek kayıplardan dolayı bataryaya verilemez. Bu da batarya verimliliği olarak ifade edilir. Özgül güç ve özgül enerji sırasıyla batarya ağırlığının bir fonksiyonu olarak enerji içeriğini (aracın sınıfını belirleyen) ve maksimum gücü (aracın hızlanma performansını belirleyen) tanımlar. Bir batarya yüksek enerji içeriğine sahip olarak veya yüksek güç yeteneğine sahip olarak optimize edilebilir. Hibrid araçlar için başlıca yüksek güç yeteneğine sahip olarak optimize gereklidir (Keskin 2009).

Araç tahriki için akü seçimi yapılırken, maliyet, uygulama, akü parametreleri, kullanılabilirlik, çevresel etkiler ve geri dönüştürülebilirlik gibi birçok faktöre dayanılarak karar verilir.

2.3.3.1.1. Hibrid Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Batarya Çeşitleri

Kurşun Asit Bataryalar

Kurşun-asit bataryalar elektrik enerjisinin depolanması hususunda en eski ve en olgunlaşmış batarya teknolojisidir. Düşük yatırım maliyeti, bütün tekrar şarj edilebilir (sekonder) bataryalar arasında en düşük self-deşarja sahip olması ve diğer bataryalara göre daha kolay bakım gibi avantajları sayesinde kurşun-asit bataryalar oldukça yüksek bir yoğunlukta kullanılmaktadırlar. Bu teknolojinin dezavantajları ise sınırlı çevrim ömrü, nispeten düşük enerji yoğunluğu, düşük ve yüksek ortam sıcaklıklarında azalan performans, derin deşarja karşı hassasiyet ve çevresel olarak zararlı kurşun bileşenini ve asit elektroliti bünyesinde barındırmasıdır. Bunun yanı sıra her bir kurşun-asit batarya hücresi yaklaşık 2 V'luk bir çıkış gerilimine sahiptir. Bu durum da hücre başına daha yüksek gerilim seviyesine sahip olan lityum-iyon (Li-ion) bataryalara kıyasla dezavantaj yaratmakta, aynı gerilim seviyesine sahip olmak için Li-ion bataryalara göre daha çok sayıda kurşun-asit batarya hücresinin kullanımını gerektirmektedir (Erdinç vd. 2011). Bu da bataryanın dolayısıyla aracın ağırlığını artırmaktadır.

Nikel Kadmiyum Bataryalar

Nikel kadmiyum (Ni-Cd) bataryaların bünyesinde kullanılan her türlü çelik bağlantı malzemeleri nikel kaplıdır ve bu suretle hem korozyon (aşınma) önlenir hem de iletkenlik arttırılır. Ni-Cd bataryaların en büyük avantajı; enerji yoğunluklarının düşük ve başlangıç maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, yüzlerce kez şarj edilebildiklerinden uzun vadede çok ekonomik olmalarıdır. Uzun ömürlü ve özellikle güvenilir olmaları nedeniyle askeri amaçlı kullanımlarda her zaman tercih edilirler. Ni-Cd bataryaların dezavantajı ise, zehirli kadmiyum maddesini içermeleridir. Çevre

kirlenmesine verilen önem Ni-Cd bataryaların üretim ve kullanımını büyük ölçüde azaltmıştır.¹

Nikel Metal Hidrid Bataryalar

Nikel metal hidrid (NiMH) bataryalar, geliştirilmiş performansları ve çevresel etki bakımından avantajları sayesinde kullanışlı bir batarya alternatifi olarak görülmektedir. NiMH kadmiyum, kurşun veya civa gibi zararlı maddeler içermediğinden kurşun-asit ve Ni-Cd bataryalara kıyasla çevre dostu bir yapıya sahiptirler. NiMH bataryalar, Ni-Cd bataryalara kıyasla %25-30 daha yüksek enerji yoğunluğu sağlamaktadırlar. Ancak lityum-iyon bataryalara kıyasla bu konuda dezavantajlıdırlar. Ayrıca self-deşarj konusundaki problemleri, NiMH bataryaları uzun zamanlı enerji depolaması açısından oldukça dezavantajlı konuma getirmektedir. Ancak maliyet açısından lityum-iyon bataryalardan daha avantajlı konumdadırlar (Erdinç vd. 2011).

Sodyum Sülfür Bataryalar

Kurşun asit bataryaya göre 4 kat daha fazla enerji depolayabildiklerinden kullanımları yaygınlaşmıştır. Günümüzdeki piller gibi dizayn edilen bu bataryalar, çok miktarda seri ve paralel bağlanarak taşıdı tahrik için gerekli enerji elde edilir. Bataryanın kullanımı sırasında sodyum iyonları, sülfüre doğru hareket ederek sodyum sülfat oluşturur. Bu esnada açığa çıkan elektronlar sayesinde elektrik üretilir. Çalışma sıcaklığı 350-380 °C'dir. Böylece iyonlar elektrolitten geçerken herhangi bir dirençle karşılaşmaz ve sodyum sülfatın erimiş halde bulunmasını sağlar. Çalışma sıcaklığının elde edilmesi için akü ısıtıcısına ihtiyaç vardır. Şarj süresi 4-5 saat olup, ömürleri kurşun asit bataryadan daha fazladır. Kolay bakım yapılabilmesi ve sıcaklığın tehlike oluşturmaması için yalıtmanın iyi yapılması gerekir. Sodyum sülfür bataryasının ömrü 160.000 km olup

¹ <http://www.cygm.gov.tr/CYGM/Files/yayinlar/kitap/pilaku.pdf>

taşıda sağladığı menzil 280 km'dir. Ancak bataryanın yapımında kullanılan maddeler sağlığa zararlıdır.¹

Sodyum Nikel Klorit Bataryalar

Sodyum-nikel klorit (NaNiCl) bataryaların prensibi Güney Afrika'da ortaya çıkartılmıştır ve bu konudaki ilk patent 1978'de alınmıştır. NaNiCl bataryalara 'ZEBRA batarya' da denilmektedir. ZEBRA bataryaların yüksek enerji yoğunlukları, bataryaların kullanıldığı sistemlerde batarya kullanımının neden olduğu en büyük sorun olan büyük hacim kaplama konusunda önemli bir alternatif olmuştur. ZEBRA batarya teknolojisi de yüksek sıcaklıkta çalışabilen bir başka sistemdir. ZEBRA bataryalar sodyum ve nikel klorit elektrotlar içermektedir. Sodyum-sülfür tabanlı bataryalara kıyasla ZEBRA bataryalar yüksek hücre gerilimi ve aşırı şarj-deşarja daha yüksek dayanıklılık gibi avantajlara sahiptir. Bu teknoloji özellikle taşıt uygulamalarında kullanılmak üzere sıklıkla araştırılmaktadır (Erdinç vd. 2011).

Lityum-iyon Bataryalar

Li-ion bataryaların laptoplar, MP3 çalarlar ve cep telefonları gibi taşınabilir elektronik cihazlardaki kullanımının son derece yaygın olmasının yanı sıra elektrikli taşıtlarda da kullanımları mevcuttur. Li-ion bataryalar %100' e yakın bir enerji depolama verimliliğine ve diğer batarya teknolojilerine kıyasla en yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Li-ion bataryalar, NiMH ve kurşun asit bataryalara göre daha hafif bir yapıya sahiptir. Li-ion bataryalar hücre başına yaklaşık 4 V' luk nispeten yüksek bir gerilim seviyesine ve 100-150 Wh/kg' lık bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Li-ion bataryaların dezavantajları ise yüksek ilk yatırım maliyetleri ve hassas çalışma limitlerinden ötürü karmaşık şarj yönetim sistemidir. Bunun yanı sıra, aşırı şarj durumu Li-ion bataryaların

1

http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/motorlu_araclar/moduller/alternatif_motorlar_ve_yakitlar.pdf

yapısında oldukça kalıcı hasarlara yol açabilmektedir. Ayrıca Li-ion bataryalar düşük bir çevrim ömrüne sahiptir ve performansları sıcaklıktan oldukça fazla etkilenmektedir (Erdoğan vd. 2011).

Tablo 2.2: Mevcut batarya sistemlerinin karşılaştırması

Parametre (Birim)	Batarya Tipi		
	NiMH	ZEBRA (NaNiCl)	Lityum-iyon
Hücre Gerilimi (V)	1.4	2.6	3.6
Özgül Enerji Yoğunluğu (Wh/Kg)	70	90	150-200
Enerji/Hacim (Wh/l)	170	160	250-500
Özgül Güç (W/kg)	250	155	180
Çevrim sürekliliği (çevrim)	1500	3000	1200
Şarj-Deşarj Verimliliği (%)	65-75	N.A.	95

Kaynak: Vishnu ve Ajaykrishna 2011

Burada, özgül enerji yoğunluğu enerji kaynağının birim kütlesinde depolanan enerji miktarını göstermektedir. Özgül güç ise yine enerji kaynağının birim kütlesinin verdiği güç olarak ifade edilmektedir. HEA uygulamalarında bataryaların yüksek özgül güç, yüksek özgül enerji ve uzun çevrim ömre sahip olması beklenmektedir (Ünlü vd. 2003).

NiMH batarya tipi sabit bir hızda çalışan araç için sürekli yüksek çıkış gücü sağlamak üzere derin şarj uygulamaları için seçilir. Kurşun asit batarya tipi ise kısa bir süre için çok yüksek akım veren kalkış uygulamasında seçilir (Vishnu ve Ajaykrishna 2011).

2.3.3.2. Yakıt Pilleri

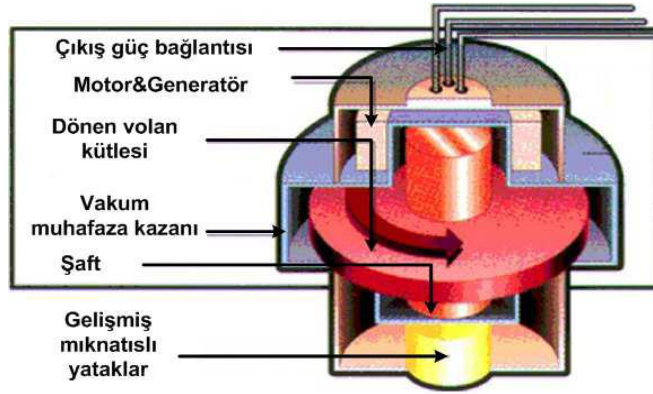
Yakıt pili (fuel cell) elektrik üretmek için hidrojen ve oksijeni birleştiren elektrokimyasal bir cihazdır. Yan ürün olarak su ve ısı açığa çıkar. Yakıt pili teknolojisinde yakıtın enerjiye dönüşümü elektrokimyasal olur, yanma ile değil. Yakıtın

yanmasına göre daha fazla verimlidir. Enerji üretiminde hiçbir döner parçanın bulunmaması tamamen sessiz çalışmasını sağlar. Aynı zamanda sıfır emisyonludur. Yakıt pili gelecek vaad eden bir teknolojidir.

2.3.3.3. Volanlar

Volanlar kinetik enerjinin depolanmasında kullanılan enerji depolama yöntemlerinden biridir. Volan, mekanik sistemlerde darbeli çalışan yüklerde, tahrik gücünün fazla olduğu periyotlarda fazla enerjiyi üzerine alır, yük talebinin arttığı periyotlarda ise bu enerjiyi yüke aktararak yük dengelemesi yapar. Özellikle doğrusal hareketin dönme hareketine çevrildiği mekanik tahrik sistemleri için ideal bir çözümdür. HEA' larda kullanılan volanlar, enerjiyi kinetik enerji formunda mekanik olarak depolayan bir batarya görevi üstlenmektedir (Gemici 2006).

Şekil 2.2: Bir volan sisteminin şematik görünümü



Kaynak: Erdinç vd. 2011

Şekil 2.2' de temel bileşenleri görülen volan sistemleri düşük hızlı (6000 rpm'den küçük) veya yüksek hızlı (50000 rpm'e kadar) olarak üretilebilmektedir (Erdinç vd. 2011). Volan girişteki elektrik enerjisini alır ve motorun dönme hareketi ile bu enerjiyi kinetik enerjiye dönüştürür. İhtiyaç halinde bu enerjiyi jeneratörü çalıştırarak tekrar elektrik enerjisi şeklinde çıkış olarak verir. Volanlar yüksek bir güç yoğunluğuna ve

uzun bir çevrim ömrüne sahiptirler ve enerjiyi yüksek verimlilikte depolarlar. Çevre sıcaklığından etkilenmezler. Daha kısa şarj zamanı ile daha fazla güç verebilirler. Volanlar çok kısa bir sürede tam şarja ulaşabilirler. Bununla beraber düşük özgül enerji yoğunluğu, ağırlıklarının fazla olması, yüksek maliyet, yüksek motor hızları, kırılma olasılığı gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Gemici 2006).

2.3.3.4. Ultrakapasitörler

Ultrakapasitörler (UK) enerji depolamak için farklı bir teknoloji sunarlar. Teknoloji bataryalardan farklı olan karakteristiklerle sonuçlanan fiziksel proseslere dayanmaktadır. UK' lar, elektrik enerjisinin depolandığı elektro-kimyasal çift katmanlı bir yapı üzerinde çok sayıdaki yüzeysel elektrotlardan ve bir ayırıcı yüzeyden oluşmaktadırlar. Ayırıcı yüzey, elektrotlar arasında teması fiziksel olarak engellemekte, fakat iyon geçişine izin vermektedir. UK' nın yapısındaki yüzeysel elektrotlar nano boyutlarda olup yüzey alanını ve buna bağlı olarak kapasite değerini çok yüksek değerlere çıkarmaktadır. UK' ların iç yapılarında kimyasal bir reaksiyon gerçekleşmediğinden, taşıtlarda oldukça hızlı gerçekleşen frenleme durumunda ortaya çıkan enerjiyi verimli bir şekilde geri kazanmada (rejeneratif frenleme), kimyasal yapıya sahip bataryalardan çok daha etkindirler. UK' lar hızlı değişen yüklere çabuk cevap verirler. UK' lar bataryalara göre oldukça yüksek bir ömre sahiptirler. UK' ların en önemli avantajlarından biri de çalışmasının sıcaklık değişimlerinden neredeyse hiç etkilenmemesidir. UK' lar, bataryalar için en kötü çalışma şartlarından biri olan -40°C ' lik sıcaklıklarda bile başarıyla çalışabilmektedirler (Erdoğan vd. 2011).

UK' lar, aynı boyut veya ağırlıktaki bir batarya ile kıyaslandığında oldukça fazla bir güç yoğunluğuna sahiptir. Ancak enerji yoğunlukları göz önüne alındığında, UK' lar bataryalara göre dezavantajlıdır. Aynı boyut veya ağırlıktaki bir batarya ile karşılaştırıldığında UK' nın depolayabildiği enerji miktarı, bataryanın depolayabildiği enerji miktarının ancak %5' i kadardır (Erdoğan vd. 2011). Ayrıca UK' lar bataryalara göre oldukça pahalı sistemlerdir.

2.3.3.5. Bazı Elektrik Tahrikli Otobüslerde Kullanılan Enerji Depolama Cihazları

Enerji depolama cihazlarının ana karakteristiklerinin özeti değişik tipteki otobüsler için Tablo 2.3' de verilmiştir. Tablo 2.3' den de görülebileceği gibi, Li-iyon aküler gerçekleşen otobüs çözümleri içinde en yaygın olanıdır. Batarya elektrikli otobüslerin enerji depolama cihazlarının enerji kapasitelerinin hibrid elektrikli ve yakıt pilli otobüslerden önemli ölçüde yüksek olduğu göze çarpmaktadır.

Tablo 2.3: Değişik otobüs çözümlerinin enerji depolama cihazlarının karakteristikleri

HİBRİD ELEKTRİKLİ OTOBÜSLER		
Otobüs	MAN Lion's City Hibrid	MERCEDES-BENZ Citaro G BlueTec Hibrid
Enerji depolama	Kapasitörler Enerji içeriği: yaklaşık 0,5 kWh, Max. şarj/deşarj gücü: 200 kW, Voltaj: 400-750 V	Lityum-iyon akü Enerji içeriği: 19,4 kWh, Maksimum 240 kW çıkış gücü ve çatı üstüne yerleştirilmiş
Otobüs	VOLVO 7700 Hibrid	SCANIA Etanol hibrid otobüs
Enerji depolama	Nikel Metal Hidrid akü Enerji içeriği: yaklaşık 4,8 kWh, Ağırlık yaklaşık 350 kg, Nominal gerilim: 600 Volt, Çatı üstüne yerleştirilmiş	Ultrakapasitörler Kullanılabilir enerji: "/400 Wh, 4x125-Volt Maxwell BOOSTCAP® modül, hava- soğutmalı, tasarım ömrü: 10-15 yıl
Otobüs	SOLARIS Urbino 18 DIWA Hibrid	Orion VII Hibrid elektrikli otobüs
Enerji depolama	Süperkapasitörler Enerji içeriği : 0,5 kWh, Maxwell, 5x125 V, Ağırlık 410 kg	Lityum-iyon akü Enerji içeriği: 32 kWh, Ağırlık 364 kg, 6 yıl tasarım ömrü Çatıya monteli
YAKIT PİLLİ OTOBÜSLER		
Otobüs	Mercedes-Benz Citaro Yakıt Pili Hibrid Otobüs	Van Hool Yakıt Pili Hibrid Otobüs
Enerji Depolama	Lityum-iyon akü Enerji içeriği: 26 kWh, Enerji depolama gücü 250 kW	Lityum-iyon akü Enerji içeriği: 17,4 kWh, Nominal güç: 76 dan 125 kW a kadar
Otobüs	New Flyer Yakıt Pili Otobüs	Van Hool Yakıt Pili Hibrid Otobüs
Enerji Depolama	Lityum-iyon akü Enerji içeriği: 47 kWh	NaNiCl (ZEBRA) akü Enerji içeriği: 53 kWh

BATARYA ELEKTRİKLİ OTOBÜSLER		
Otobüs	Optare Solo EV Batarya Elektrikli Otobüs	Solaris Urbino Elektrikli Otobüs
Enerji Depolama	Lityum-iyon akü Enerji içeriği: 80 kWh	Lityum-iyon akü Enerji içeriği: 120 kWh, Anma gerilimi: 600 V
Otobüs	BYD eBus-12 Batarya Elektrikli Otobüs	Tindo Güneş Enerjili Elektrikli Otobüs
Enerji Depolama	Lityum Demir-Fosfat veya “Demir” akü Enerji içeriği: 324 kWh Menzil: Tek şarj ile 300 km	Lityum-iyon akü Akü içeriği: 261,8 kWh

Kaynak: Živanović ve Nikolić 2012

2.3.3.6. Enerji Depolama Cihazlarının Bugünkü Durumu ve Gelecekteki Gelişimi

Günümüzde çok sayıda farklı batarya (akü) teknolojisi vardır. Kurşun asit batarya yıllardır araç elektriği tedarik etmede kullanılmıştır. 1980’ lerde ilk modern elektrikli araçların piyasaya girişi ile, daha güçlü batarya ihtiyacı doğdu. İlk olarak Ni-Cd bataryalar kullanılmıştı, sonrasında ise bu bataryalar yerini hibrid araçlarda kullanılan NiMH bataryalara bıraktı. Bununla birlikte, bu batarya teknolojilerinin hiçbirisi yalnız elektrik modunda yeterli sürüş mesafesi için gereken enerji yoğunluğunu sağlayamaz. Son zamanlarda, bahsedilenlerin dışında, başka enerji depolama cihazlarında yoğun büyüme ve genişleme vardır: Li-ion aküler ve UK’ lar.

Mevcut analizlere ve bugünkü batarya verilerine dayanarak, bugünkü batarya ömrünün yedi yılı aşacağı ve belkide ‘ortalama’ kullanım için 10 yıl civarında olacağı görünmektedir. Li-iyon teknolojisi henüz tam potansiyele ulaşmamıştır, hâlâ daha fazla iyileştirme gereklidir. Kapasite ve ömrünü iyileştirmesi, hacim ve maliyetleri azaltması (bugün NiMH için yaklaşık €250-€500/kWh ve Li-iyon için €700-€1.400/kWh), emniyetli ve güvenilir olması için daha fazla geliştirmeye ihtiyaç vardır.¹ Hem bugünkü hem de yakın gelecekteki akü teknolojileri hâlâ toplam araç maliyeti ve performansını

¹ <http://www.iea-etsap.org/web/Demand.asp>

iyileştirmek amacıyla irdelenmesi gereken bir dizi soruna sahiptir. Bu sorunlar şunları içermektedir:¹

- a) *Akü depolama kapasitesi:* Elektrikli araçlar için kullanılan akülerin, enerji depolama kapasitelerini optimize edecek şekilde tasarlanmış olması gerekmekte iken, şebeke şarjlı (plug-in) hibrid elektrikli araçların genellikle daha yüksek güç yoğunluklarına ihtiyacı vardır.
- b) *Akü görev (deşarj) döngüleri:* Çeşitli elektrikli araçların kullandığı aküler farklı görev döngülerine sahiptir. Aküler plug-in hibrid elektrikli araçlardaki derindeşarj döngüsüne (tüm elektrik modunda) bağlı olabilir veya HEA' lardaki rejeneratif frenleme aracılığıyla sık şarj döngüsüne bağlı olabilir. Elektrikli araçların kullandığı aküler birçok ara döngü yapmaksızın tekrarlanan derindeşarj döngüsüne bağlı olacaklar. Mevcut akülerin derindeşarj sürekliliğinin sağlanması için önemli iyileştirmelerin olması gerekecek.
- c) *Süreklilik, beklenen ömür ve diğer konular:* Aküler süreklilik, beklenen ömür, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, sıcaklık hassasiyeti, şarj sürelerinin azalması ve maliyetlerin azalması gibi bir dizi yönden iyileştirilmelidir. Akü sürekliliği ve beklenen ömür yakın gelecekteki ticari uygulamalar için muhtemelen en büyük teknik engellerdir.

¹ http://www.iea.org/papers/2011/EV_PHEV_Roadmap.pdf.

2.3.4. Güç Kontrol Sistemleri

Elektrikli araç teknolojisi içerisinde güç elektroniği devreleri ve bu sistemlerin otomasyonu önemli bir yer tutmaktadır. Tahrik sisteminin kontrolü, üretilen AC gerilimin DC' ye çevrilmesi, yakıt pili çıkış geriliminin düzenlenmesi, akü şarjının uygun yöntemlerle sağlanması, klasik güç elektroniği devrelerinin çeşitli kontrol yöntemleri kullanılarak kontrol edilmesiyle başarılmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan güç kontrol sistemleri, klasik güç elektroniği devreleri olan doğrultucular (AC/DC), çeviriciler (DC/DC) ve invertörlerden (DC/AC) oluşmaktadır (Keskin 2009).

Doğrultucular (AC/DC), alternatif gerilimin doğru gerilime dönüştürülmesinde kullanılmaktadır. HEA' larda kullanılan doğrultucuların, AC/DC dönüşümünün yanında bir diğer önemli özelliği de enerji yönetim (energy management) sistemi olarak görev yapmasıdır (Ünlü vd. 2003).

DC-DC çevirici olarak da tanımlanan çeviriciler çoğunlukla regüle edilmemiş DC gerilim kaynağının, kontrollü bir biçimde sabit DC gerilime dönüştürülmesi için kullanılırlar. Aküler ve yakıt pilleri de regüle edilmemiş DC gerilim kaynağıdır. Çeviricilerin genel çalışma prensibi belirli bir periyot içerisinde yarı iletken anahtarın iletme ve kesime geçmesi ve sonucunda da ortalaması giriş geriliminden farklı bir çıkış geriliminin sağlanmasıdır. DC-DC çeviriciler HEA uygulamalarında genellikle farklı gerilim seviyesine sahip DC sistemlerin birbirlerine bağlanması amacıyla kullanılırlar (Köklükaya vd. 2011).

HEA' larda akü grubu çıkışında kullanılan DC-DC çeviriciler, çift yönlü güç akışını sağlarlar. HEA' larda kullanılan aküler, gerektiğinde sürüş ve yol şartlarına bağlı olarak sistemi besler ve duruma göre tekrar şarj edilir. Bu sebeple bu işlem için kullanılacak çevirici çift yönlü çalışabilmelidir. DC-DC çeviriciler bir, iki, üç ve dört bölgede çalışabilen sürücüler olarak sınıflandırılırlar. Birinci bölge motoru çalıştırmak için kullanılır ve akımın akış yönü kaynaktan yüke doğrudur. İkinci bölge ise geri kazanımlı frenleme içindir ve bu esnada elektrik motoru jeneratör olarak çalışarak akımın kaynağa doğru akmasına neden olur. Rejeneratif frenleme denilen bu olay özellikle elektrikli

araçlarda sürüş menziline artırılması için çok önemlidir. Bu nedenle elektrikli araçlarda DC motor sürücülerini en azından iki bölgede çalışabilmelidir. İntertörler ise, DC giriş gerilimini AC' ye çeviren güç elektroniği devreleridir. İntertörler, elektrikli araçlarda motor hız kontrolü için kullanılır (Ünlü vd. 2003).

2.3.5. Güç Yönetim Sistemleri

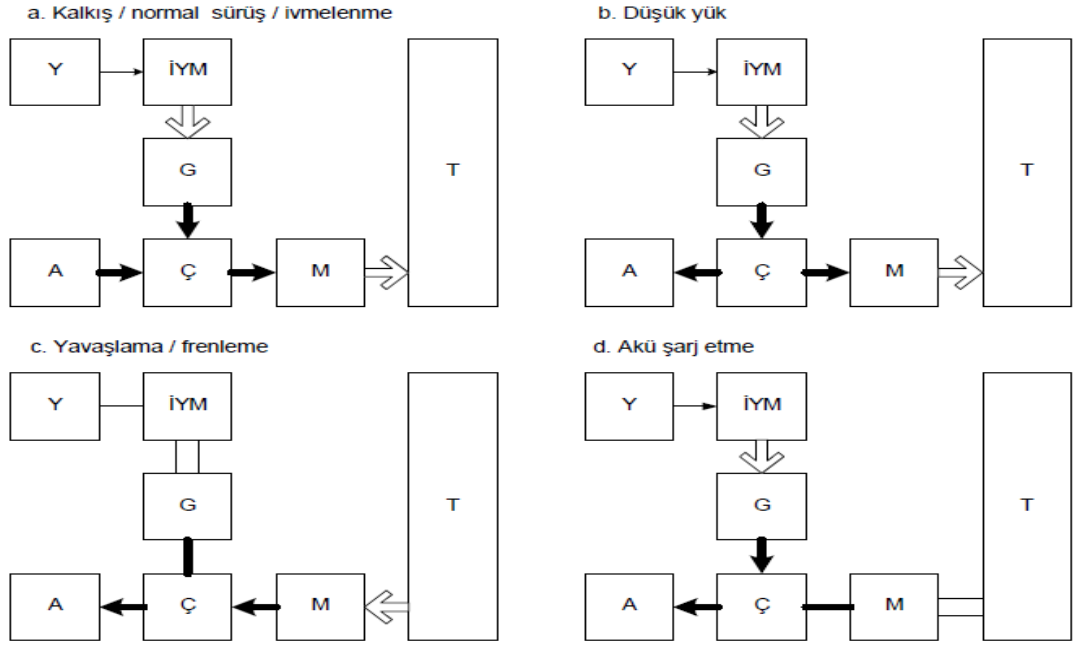
HEA' ları oluşturan bileşenler arasındaki enerji akışını düzenlemek için farklı güç kontrol stratejileri gereklidir. Hibrid sistemlerden tam anlamıyla faydalanabilmek için bu kontrol stratejilerinin yerine getirmesi gereken bazı hedefler vardır. Bunlar;

- i. Daha düşük yakıt tüketimi ve dolayısıyla daha yüksek yakıt ekonomisi
- ii. Düşük emisyonlar
- iii. Daha az bakım ve buna bağlı olarak düşük işletme ve bakım maliyetleri
- iv. İyi bir sürüş performansı

Seri Hibrid Güç Yönetim Sistemi

Seri HEA' larda hibrid güç ünitesi İYM ve jeneratörden oluşmaktadır. Hibrid güç ünitesi yakıtın kimyasal enerjisini önce mekanik sonra da elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Şekil 2.3'de Seri HEA' daki çalışma durumları gösterilmiştir. Seri HEA' larda elektrik enerjisi kalkış, normal sürüş ve aracın hızlanması sırasında, İYM ve akü tarafından çeviriciye iletilir. Çeviriciden de gerekli olan güç dönüşümleri yapıldıktan sonra tekerlekleri tahrik etmesi için elektrik motoruna iletilir. Düşük yüklerde İYM tarafından üretilen enerjinin bir kısmı aküleri şarj etmede kullanılır. Aracın frenleme ya da yavaşlaması sırasında (normalde konvansiyonel araçlarda ısı şeklinde kaybolan frenleme enerjisi) elektrik motoru jeneratör olarak çalışarak frenleme enerjisini geri kazanır. Geri kazanılan bu enerji aküleri şarj etmede kullanılır.

Şekil 2.3: Seri hibrid elektrikli araç çalışma modları



Kaynak: Ünlü vd. 2003

A : Akü
Ç : Çevirici (Konvertör)
G : Generator
İYM : İçten Yanmalı Motor, T: Transmisyon, Y: Yakıt Deposu

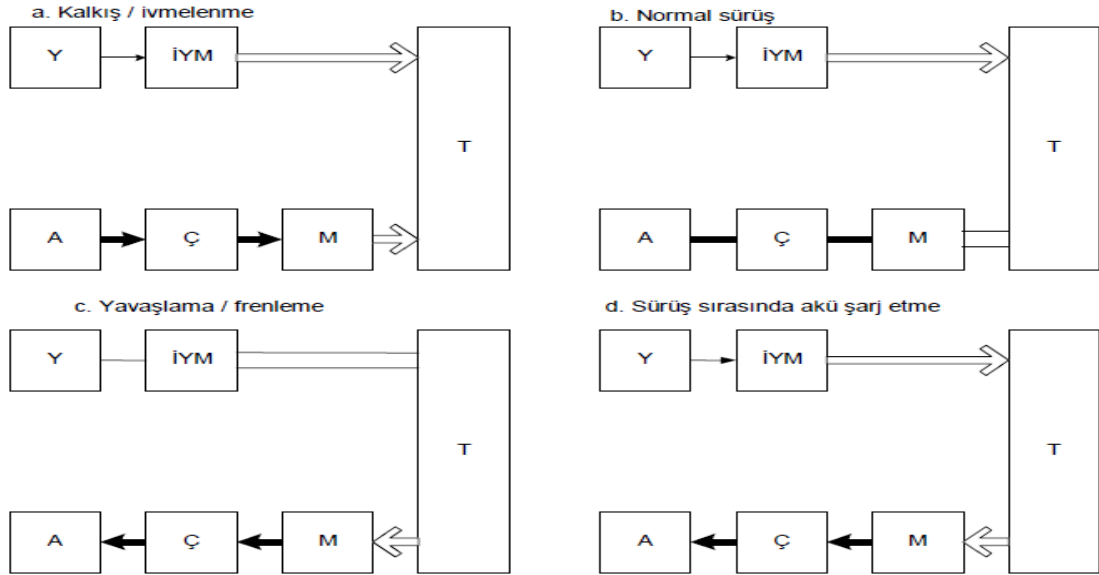
— Hidrolik Hat
— Elektriksel Hat
— Mekanik Hat

Paralel Hibrid Güç Yönetim Sistemi

Paralel hibrid sistemde seri hibrid sistemden farklı olarak tekerlekleri hem İYM hem de elektrik motoru tahrik edebilmektedir. Bu yüzden seri hibrid sisteme göre transmisyon ve güç yönetim sistemi karmaşıktır. Şekil 2.4' de Paralel HEA' daki çalışma durumları gösterilmiştir. Aracın kalkışı ya da hızlanması sırasında hem İYM hem de elektrik motoru aynı mil üzerinden aracı tahrik etmektedir. Normal sürüş sırasında elektrik motoru kapalıdır, İYM araca tek başına güç sağlamaktadır. Paralel HEA' larda elektrik motoru aynı zamanda jeneratör görevi görür. Aracın frenleme ya da yavaşlaması (yokuş aşağı seyir) sırasında elektrik motoru jeneratör olarak çalışarak frenleme enerjisini geri kazanır ve bu enerjiyi aküleri şarj etmede kullanır. Aynı zamanda İYM ve elektrik

motoru aynı mil üzerinde olduğundan araç düşük yüklerdeyken aküler İYM' nin elektrik motorunu tahrik etmesi ile şarj edilebilir.

Şekil 2.4: Paralel hibrid elektrikli araç çalışma modları



Kaynak: Ünlü vd. 2003

A : Akü
 Ç : Çevirici (Konvertör)
 G : Generator
 İYM : İçten Yanmalı Motor, T: Transmisyon, Y: Yakıt Deposu

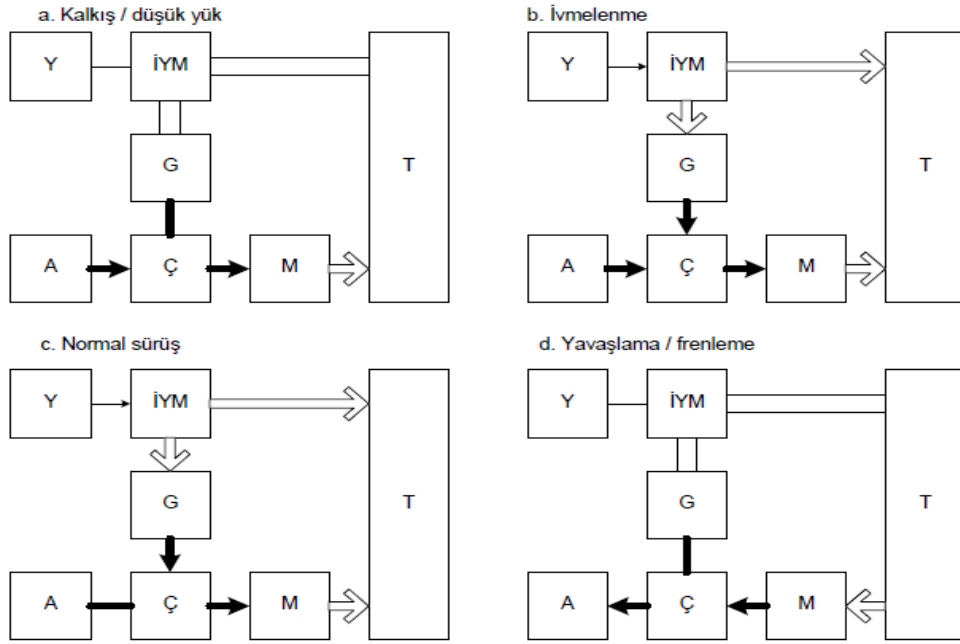
— Hidrolik Hat
 — Elektriksel Hat
 — Mekanik Hat

Seri-Paralel Hibrid Güç Yönetim Sistemi

Şekil 2.5, seri-paralel hibrid sistemin değişik sürüş şartlarındaki çalışma durumlarını göstermektedir. Aracın kalkışında ve düşük hızlarda, aküler tarafından beslenen elektrik motoru aracı tahrik etmektedir. Bu esnada İYM kapalı durumdadır. İvmelenme ve normal sürüş durumunda, elektrik motoru aracı tek başına sürmek için yeterli gücü sağlayamadığından İYM de devreye girerek her iki motorda aracı tahrik etmektedir. İvmelenme için kullanılan elektrik enerjisi, hem jeneratör hem de aküden gelirken, normal sürüş sırasında yalnızca İYM tarafından tahrik edilen jeneratör tarafından gelir.

Planet dişli (planetary gear) denilen güç ayırıcı ünite sistemi İYM' nin çıkışı ayırmak için kullanılarak, aracı ve jeneratörü tahrik etmede kullanılır. Frenleme ya da yavaşlama sırasında elektrik motoru jeneratör olarak çalışarak aküleri çevirici (konvertör) üzerinden şarj eder (Ünlü vd. 2003).

Şekil 2.5: Seri-Paralel hibrid elektrikli araç çalışma modları



Kaynak: Ünlü vd. 2003

2.4. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞIT TÜRLERİ

Hibrid elektrikli araçlar, hibridleştirme seviyesine göre, mikro, hafif ve tam hibrid olmak üzere üç, güç organlarının birbirleri ile olan ilişkisine göre üç grupta sınıflandırılmaktadır. Hibridleştirme oranı araçta kullanılan elektrik motoru gücünün toplam araç gücüne oranı olarak tanımlanabilir (Boyalı 2008). Hibrid araçların hibridleştirme derecesine göre sınıflandırılması Tablo 2.4'de gösterilmiştir.

Mikro Hibrid Araçlar

Mikro hibrid araçlarda elektrik motoru bir kayış kasnak mekanizması ile İYM' ye bağlanmaktadır. Mikro hibridler araç üzerinde bulunan tüm yardımcı yükleri karşılamaktadır. Araca konulan elektrik motoru, İYM rölanti devrinde iken motorun açılıp kapatılması için kullanılmaktadır. Bilindiği gibi İYM' ler ilk çalıştırma anında ve rölantideyken yüksek yakıt tüketmektedir. Mikro hibrid araçlar ile ilk çalışma anında harcanan fazla yakıttan tasarruf edilmektedir (Boyalı 2008).

Tablo 2.4 : Hibridleştirme dereceleri

	Mikro Hibrid	Hafif Hibrid	Tam Hibrid
Motor Durdurma, Yardımcı Yüklerin Paylaşımı	√	√	√
Yalnız Elektrikli Motor ile Araç Sürme	-	-	√
Fren Enerjisinin Geri Kazanımı	√	√	√
Seyir Gücü Paylaşımı	-	√	√

Kaynak: Boyalı 2008

Hafif Hibrid Araçlar

Hafif hibrid araçlarda elektrik motoru İYM' ye destek verebilir ancak aracı tek başına sürebilecek güçte değildir. Rejeneratif frenleme ile enerji geri kazanımı vardır.

Tam Hibrid Araçlar

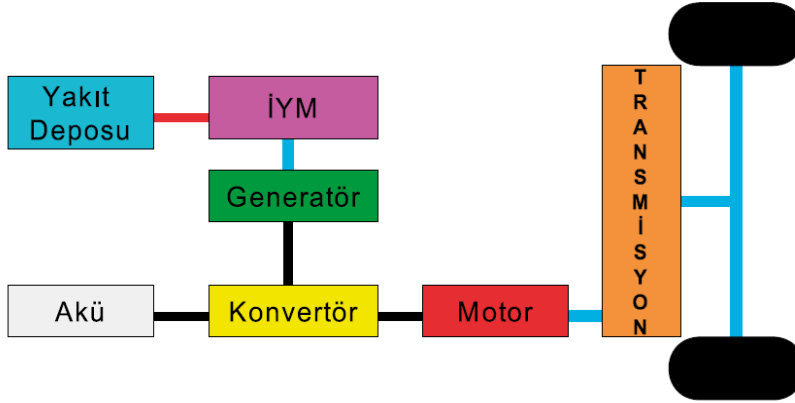
Tam HEA' larda elektrik motoru tek başına İYM' den destek almaksızın aracı hareket ettirebilir. Ancak bunun için daha güçlü elektrik motorları ve daha büyük bataryalar gerektirir. Tamamen kendi ürettiği enerjiyi kullandığından ve İYM kullanılmadığından diğer hibridlere göre daha fazla yakıt tasarrufu sağlar.

Hibrid araçlar, güç organlarının birbirleri ile ilişkisine göre, seri, paralel ve seri-paralel şeklinde üç grupta incelenmektedir.

2.4.1. Seri Hibrid Elektrikli Taşıt

Şekil 2.6' da bir Seri HEA yapısı gösterilmektedir. Seri hibrid düzende, İYM jeneratöre bağlıdır ve mekanik enerjiyi jeneratör üzerinden elektrik enerjisine çevirir. Jeneratördeki enerjinin bir kısmı konvertör tarafından dönüştürülerek elektrik motoruna verilir ve diğer kısmı ise akülerde depolanır. Bu sistemde aracı sadece elektrik motoru tahrik etmektedir. İYM' nin görevi jeneratörü tahrik etmektir.

Şekil 2.6: Seri hibrid elektrikli araç yapısı



Kaynak:Tuncay ve Üstün 2012

Seri Hibrid Çalışma Prensipleri

- Elektrik motoru ana güç kaynağıdır ve tekerlekleri tahrik eder.
- Motor (İYM) jeneratörü tahrik ederek elektrik üretiminde kullanılır. Motor paralel hibride göre daha küçüktür.
- Paralel hibride göre transmisyon çok daha basittir.

- d) Frenleme esnasındaki rejeneratif frenleme enerjisi akülerde depolanır ve paralel hibride göre daha fazla fren enerjisi geri kazanılır.
- e) Rölantide ve sürüşte düşük gürültü seviyesi sağlar.
- f) Paralel hibride göre daha büyük kapasitede akü gerektirir ve elektrik şebekesinden şarj olanağı vardır.
- g) Yakıt tasarrufu sürüş şartlarına göre değişir.

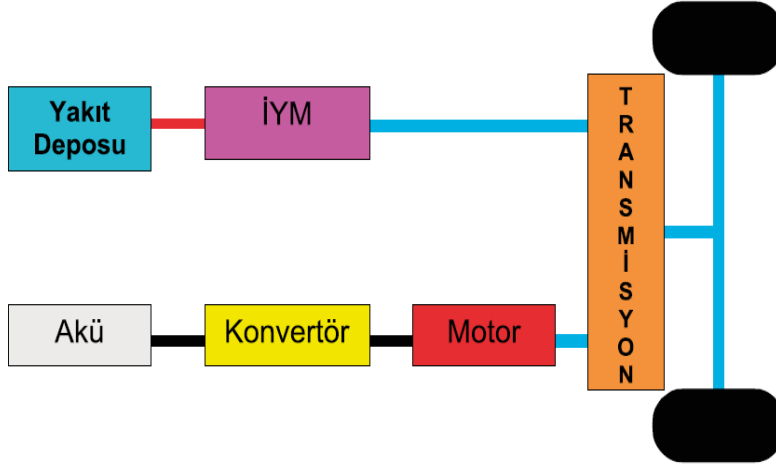
Bunun yanında, elektrik enerjisinin hidrojenle elde edildiği yakıt pili (fuel cell) bulunduran tahrik sistemleri de tamamen seri hibrid yapısındadır. Şekil 2.6' da gösterilen yakıt deposunun yerine hidrojen tankı bulunmaktadır. Bu sistemde İYM ve jeneratör yoktur bunun yerine gereken enerjiyi yakıt pili sağlamaktadır. Yakıt pili tarafından üretilen elektrik enerjisi, elektrik motorunu tahrik etmekte ve bataryayı doldurabilmektedir.

2.4.2. Paralel Hibrid Elektrikli Taşıt

Şekil 2.7' de bir Paralel HEA yapısı gösterilmektedir. Paralel hibrid düzende, aracı hem İYM hem de elektrik motoru tahrik edebilir. Çünkü her iki motorda transmisyon aracılığı ile tekerleklere bağlıdır. Bu sistemde aküler hem İYM tarafından hem de rejeneratif frenleme ile geri kazanılan enerji ile elektrik motoru üzerinden beslenebilir.

Hem seri hibrid hem de paralel hibrid yapılarda elektrik motoru tekerlekleri döndürebildiği gibi, araç yokuş aşağı giderken veya frenleme yaparken elektrik motoru jeneratör olarak çalışarak akü bataryasını doldurabilmektedir (Tuncay ve Üstün 2012).

Şekil 2.7: Paralel hibrid elektrikli araç yapısı



Kaynak: Tuncay ve Üstün 2012

Paralel Hibrid Çalışma Prensipleri

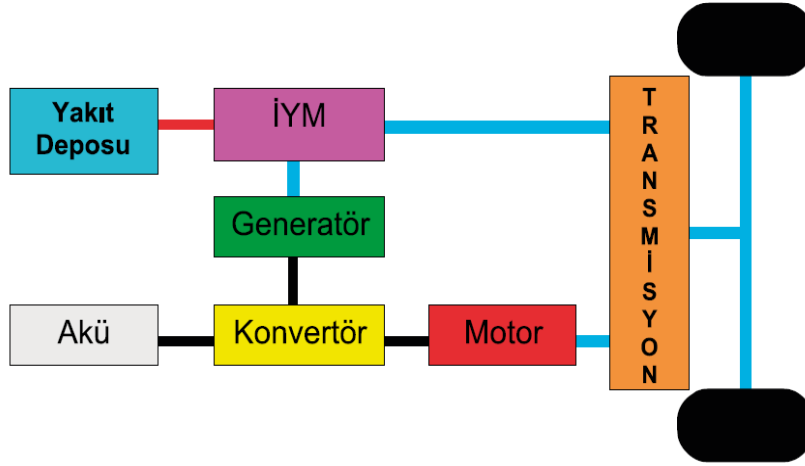
- a) Elektrik motoru ilk kalkış ve hızlanmada kullanılır.
- b) İvmelenmeden sonra motor (İYM) durur.
- c) Frenleme esnasındaki rejeneratif enerji akülerde depolanır.
- d) Kalkışlarda düşük gürültü seviyesi sağlar.
- e) Duruşlarda motorun (İYM) rölantide çalışması önlenir.
- f) Yakıt tasarrufu sürüş şartlarına göre değişir.

2.4.3. Seri-Paralel Hibrid Elektrikli Taşıt

Seri-Paralel HEA, hem seri hem de paralel hibrid teknolojilerin olumlu özelliklerini taşır. Şekil 2.8’ de görüldüğü üzere, İYM hem tekerlekleri döndürecek tahrik momentini sağlamakta, hem de güç ayırma ünitesi olan planet dişlisi üzerinden bir jeneratörü

döndürerek elektrik enerjisi üretmektedir. Üretilen bu enerji ya akü bataryasını doldurmak için kullanılır ya da tekerleklere yardımcı güç sağlayan elektrik motorunu beslemekte kullanılır (Tuncay ve Üstün 2012). Seri-paralel hibrid sistem diğer sistemlere göre daha pahalı ve karmaşıktır. Seri-paralel hibrid sistemde elektrik motorunun ve İYM' nin yaklaşık aynı güce sahip olmasından dolayı sürüş sırasında hangi motorun kullanılacağına karar verilmesinin önemi büyüktür. Bunun için kontrolörün çok iyi programlanması gereklidir. Gücünün yettiği her yerde elektrik motorunun kullanılması avantaj sağlamaktadır. İYM ise aküleri şarj sırasında daha düzgün devir bandında çalışabildiği için sadece gerekli durumlarda araç tahrik amaçlı kullanılmalıdır.¹

Şekil 2.8: Seri-Paralel hibrid elektrikli araç yapısı



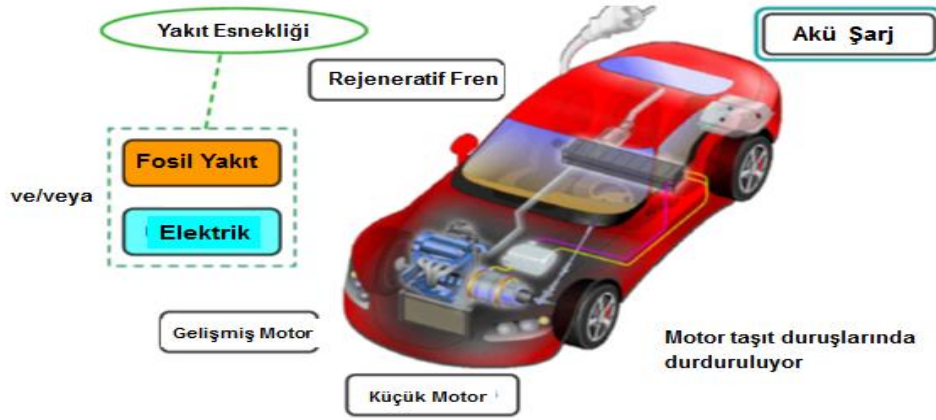
*Kaynak:*Tuncay ve Üstün 2012

¹ <http://ototeknikveri.com/icerik/359/36-karma-hibrid-elektrikli-arac.html>

2.4.4. Plug-in Hibrid Elektrikli Taşıt

Plug-in hibrid elektrikli araçlar (PHEA) seri hibrid yapıya sahip olup, şarj edilebilen HEA' lardır. Şebekeye bağlanarak şarj olabilmektedirler. Plug-in hibridler hem yakıt hem de yerli enerji kaynağı elektrik kullanarak yeni nesil yakıtlara geçişte olanak sağlar. Şekil 2.9' da PHEA yapısı görülmektedir.

Şekil 2.9: Plug-in hibrid elektrikli araç yapısı



Kaynak: http://www.nrel.gov/learning/avf_plugin_hybrid_electric.html

Bir PHEA, bir elektrik motoru ile klasik bir İYM' nin tahrik yeteneğinin birleşimidir. PHEA' lar aslında HEA ile aynı teknolojiyi kullanır fakat elektrik motorunu güçlendirmek için daha yüksek voltajlı akülere ihtiyacı vardır. Yalnızca İYM ve diğer teknolojiler tarafından şarj edilen HEA' lardaki akülerin aksine, PHEA' lardaki aküler bir harici güç kaynağı kullanılarak da (örn; bir ev prizi gibi...) şarj edilebilir. PHEA' lar HEA' lara göre daha büyük akü bataryalarına sahiptir. PHEA' lar, aracın İYM' nin minimum kullanımı ile seyahat edebildiği mesafe ile tarif edilir. Örneğin, bir PHEA 30, araçla tüm elektrik modunda 30 mil yolculuk edilebileceği anlamına gelir.¹ PHEA' lar

¹ http://www.fuelsandenergy.com/presentations/PHEV_Grid_Study.PDF

özellikle nominal mesafelerdeki (şehir içi trafikte veya işe giderkenki) seyahat edebilme yeteneğinden dolayı popülerlik kazanmaktadır. Ayrıca PHEA' ları çalıştırmak konvansiyonel araçlara göre daha az pahalı olabilir. Çünkü aracı şarj etmek için kullanılan elektrik petrol yakıtlarından önemli ölçüde daha ucuzdur.

2.5. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

HEA' ların konvansiyonel araçlara göre birçok avantajı vardır:

- i. Daha yüksek işletme verimliliğine sahiptirler. Çünkü HEA' lar, enerji kayıplarını minimize eden, yavaşlarken ve araç dururken enerjisi geri kazanan rejeneratif frenleme enerjisini kullanırlar.
- ii. Daha hafif motor kullanılır. Çünkü HEA motorları pik yüke göre değil motorun ağırlığını azaltan ortalama yükü sağlamak için boyutlandırılmıştır.
- iii. Daha yüksek yakıt verimliliği sağlar. Araç rölantideyken İYM' nin durması ile ve rejeneratif frenleme enerjisi ile konvansiyonel araçlara göre önemli oranda yakıt tasarrufu elde edilir.
- iv. Daha temiz bir işletme sağlar. HEA' lar, alternatif yakıtlarla (daha düşük emisyonlu) çalıştırılabilir, dolayısıyla fosil yakıtlara olan bağımlılık azalır.
- v. Daha hafif araç ağırlıklarına sahiptirler. Çünkü araçların imalatında özel hafif malzemeler kullanılır.

HEA' lar benzer konvansiyonel araçlarla maliyet-rekabetçi hale gelmektedir. Giderlerin çoğu, yakıt tasarrufu ve vergi teşvikleri ile dengelenebilir. Bazı devletler tüketicilere HEA' ları satın almaları için teşvikler sunmaktadır. Son yapılan çalışmalarla HEA' lar konvansiyonel İYM ile çalışan araçlarla aynı veya daha uzun menzile çıkabilmektedir.

HEA' lar konvansiyonel araçlardaki menzil ve güç ile, düşük emisyon ve yüksek yakıt verimliliği gibi faydaların birleşimidir.

HEA' ların dezavantajları ise şunlardır:

- i. Yüksek ilk yatırım maliyeti.
- ii. Akü ömrünün kısa olması ve bu sebeple ortaya çıkan akü değiştirme maliyeti. Aynı zamanda kullanılan akülerin ağırlıklarının fazla olması araca extra bir yük bindirir.

2.6. ŞEHİR İÇİ OTOBÜSLERDE HİBRİD ELEKTRİKLİ TAHRİK TEKNOLOJİLERİNİN UYGULANMASI

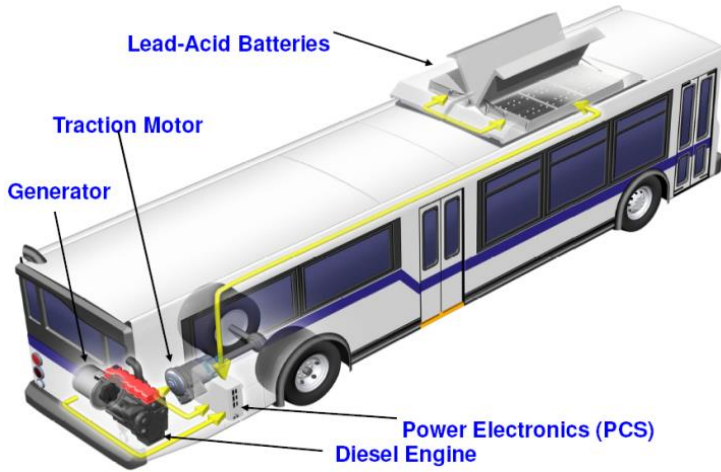
1969 yılında Frankfurt da, Daimler hibrid tahrik teknolojisinin ilk örneklerinden olan elektrikli test otobüsünü tanıttı. 1979 yılında, Daimler, toplam 13 Mercedes-Benz OE 305 elektrikli-dizel hibrid otobüsleri ile beş yıllık bir model denemesi başlattı. 2008 yılından bu yana Orion hibrid otobüsler, büyük ABD şehir içi yollarında hizmet vermektedir ayrıca 2009 yılından bu yanada Mercedes-Benz Citaro BlueTec Hibrid günlük işletmede hizmet vermektedir. Japonyada seri hibrid kent içi otobüslerin ilk satışları 1991 yılında başladı. 1997' den bugüne kadar ticari kullanımda hibrid otobüs sayısına göre liderler Amerika ve Kanada olmuştur (Živanović ve Nikolić 2012).

2.6.1. Hibrid Elektrikli Otobüs Yapısı

Bir hibrid elektrikli otobüs (HEB) genellikle bir İYM ile akü (batarya) ve bir elektrik motorunun birleşimidir. İYM benzin, dizel veya diğer (doğal gaz, biyoyakıt) alternatif yakıtlar ile çalıştırılabilir ve elektrik motoru ile gerek seri gerekse de paralel çalıştırılabilir. HEB' lerdeki rejeneratif frenleme yeteneği yavaşlarken ya da aracı durdururken kullanılan kinetik enerjinin bir kısmını geri kazanarak enerji kayıplarını minimize eder.

Şekil 2.10’ da gösterilen seri hibrid düzende, İYM elektrik motorunu beslemek ve aküleri şarj etmek için bir jeneratörü tahrik eder. Frenleme enerjisi yakalanır ve aküde depolanır (rejeneratif frenleme). Motor aynı performanstaki bir konvansiyonel aktarma organına göre küçültülebilir. Bunun anlamı, daha düşük İYM ağırlığı ve daha yüksek enerji verimliliğidir.

Şekil 2.10: Seri hibrid tahrik sistemi



Kaynak: <http://ebookbrowse.com/04-comprows-hb-labouff-pdf-d296145507>

Elektrik motoru, ya akülerde depolanan enerjiyi kullanarak ya da motordan gelen ya da gerektiğinde her ikisinin de kullanarak tahrik sistemine güç sağlar. Motor düşük hızlarda ve yüksek yükte daha verimlidir, bu yüzden seri hibrid yapı yavaş ve dur-kalk şehir içi sürüşlerde tercih edilir.

Paralel hibrid düzende ise, hem motor hem de elektrik motoru transmisiyona bağlıdır ki aynı anda ikisinden biri veya her ikisi tekerlekleri döndürmek için güç sağlayabilmektedir. Paralel hibrid düzen ayrıca doğrudan bir mekanik yolla motorun tekerlekleri tahrik etmesine izin verdiği için, seri hibrid düzenden daha iyi bir verimlilik ve daha fonksiyonel ve esnek bir tasarım sunar.

2.6.2. Hibrid Elektrikli Otobüs Bileşenleri

Temel HEB bileşenleri şunlardır:

1. Yardımcı Güç Ünitesi
2. Kontrolör ve invertör
3. Tahrik motoru
4. Enerji depolama cihazı
5. Diğer yardımcı sistemler, klima ve aydınlatma gibi.

Yardımcı Güç Üniteleri: HEB' lerde kullanılan yardımcı güç ünitelerinde İYM' ler, yakıt pilleri ve dizel, benzin, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) gibi farklı yakıtlar içeren bir dizi konfigürasyon mevcuttur. Motor tipik olarak enerji depolama cihazı ek güç sağladığı için pik güç ihtiyacına göre değil ortalama otobüs güç ihtiyacına göre boyutlandırılır. Optimum güç ihtiyacına göre boyutlandırma sayesinde hibrid otobüslerde kullanılan motorlar, konvansiyonel otobüslerde kullanılan motorlara göre daha küçük boyutludur. Bu durum İYM kaynaklı bakım maliyetlerinin azaltılması bakımından önemlidir.

Şekil 2.11: Hibrid elektrikli otobüste kullanılan bir dizel motor



Kaynak: <http://www.hybridrive.com/hybrid-transit-bus.asp>

Kontrolör ve İvertör: Elektronik kontrolör enerji miktarını ayarlar, (akü durumunda DC güç), bu enerji invertör tarafından aktarılır veya ivmelenme için (AC motorlarda) AC güce dönüştürülür. Ayrıca motoru çalıştırmak için gerekli olan özellikleri içinde gerilim değerlerinin sürdürülmesini sağlar. Bir elektronik kontrolör rejeneratif frenleme ile aracın kinetik enerjisini yakalamak amacı ile motoru bir jeneratör gibi çalıştırarak elektrik enerjisini geri kazanabilir. Kontrolör ayrıca, rejeneratif akımın aküyü fazla doldurmamasını sağlar (Živanović ve Nikolić 2012).

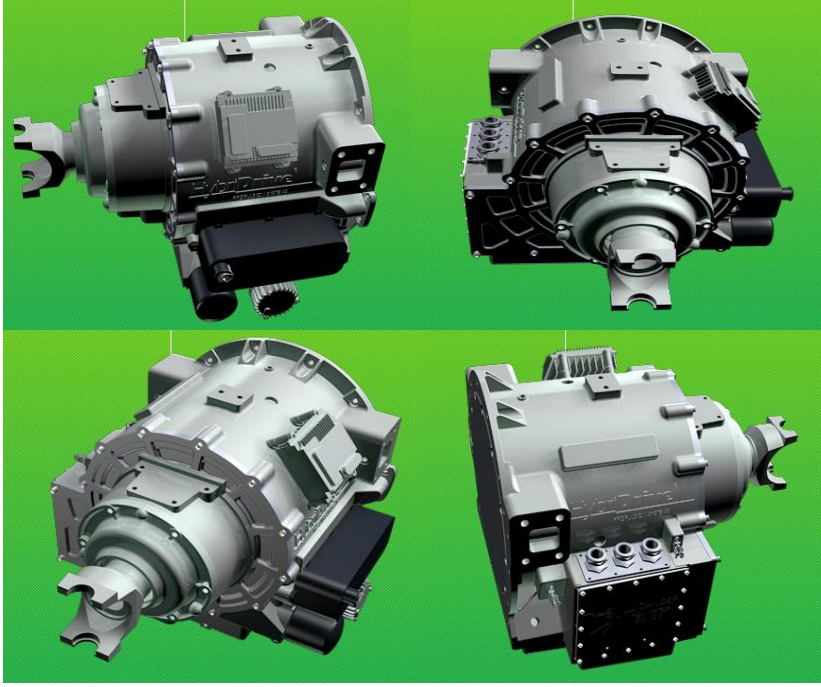
Şekil 2.12: Hibrid elektrikli otobüste kullanılan güç kontrol sistemi



Kaynak: <http://www.hybridrive.com/hybrid-transit-bus.asp>

Tahrik Motorları: Elektrik motorlarının başlıca iki tipi elektrikli araçlarda kullanılabilir, DC motorlar ve AC motorları. Bir güç karşılaştırması temelinde, bir AC motor genellikle yüksek verimlilik sergiler, boyut/ağırlık oranına göre faydalı bir güce sahiptir, daha az pahalıdır ve bir DC motordan daha verimli rejeneratif frenleme enerjisi üretir. Elektrikli tahrik motorları araç tekerleklerine ya doğrudan, tekerlek motorları olarak adlandırılan, ya da bir transmisyon ve diferansiyel grubu ile bağlanır. Tekerlek motorları mekanik iletim ve diferansiyel kayıplarını ortadan kaldırarak hem sürüş döngüsünde hem de rejeneratif döngüde daha verimlidir. Bununla birlikte, tekerlek motorları pahalıdır (Živanović ve Nikolić 2012).

Şekil 2.13: Hibrid elektrikli otobüste kullanılan bir elektrik motoru



Kaynak: <http://www.hybridrive.com/hybrid-transit-bus.asp>

Enerji Depolama Cihazları: Enerji depolama cihazları yüksek bir talep (örneğin, durağandan hızlanırken, hız arttırırken ve yokuş yukarı çıkarken) olduğu zaman yardımcı güç ünitesine enerji takviyesi yapmak ve yavaşlama sırasında (örneğin, frenleme, yokuş aşağı inerken) üretilen enerjiyi geri kazanmak ve depolamak için HEB' lere gerekli olan enerjiyi sağlar.

Şekil 2.14: Hibrid elektrikli otobüste kullanılan enerji depolama sistemi



Kaynak: <http://www.hybridrive.com/hybrid-transit-bus.asp>

2.6.3. Hibrid Sistemlerin Başlıca Ana Üreticileri

Hibrid sistemlerin ana üreticileri Tablo 2.5’ de gösterilmiştir:

Tablo 2.5: Hibrid sistemlerin majör üreticileri

Üretici	Tahrik Sistemi	Tip	Ülke
BAE	HybriDrive	Seri	ABD
Allison	E ^P 40/E ^P 50	Seri-Paralel	ABD
ISE	ThunderVolt	Seri	ABD
Siemens	ELFA	Seri	Almanya
Eaton	EHPS	Paralel	ABD
Volvo	I-SAM	Paralel	Kanada
Voith	DIWAhybrid	Paralel	Almanya

Kaynak: Živanović ve Nikolić 2012

2.6.4. Hibrid Elektrikli Otobüslerin Değerlendirmesi

Bir HEB’ in konvansiyonel bir otobüse göre avantajı teorik olarak daha iyi yakıt ekonomisi ve daha düşük egzoz emisyonlarıdır.

Yatırım, Bakım ve İşletme Maliyeti: Hibrid otobüsler 500.000\$’ a kadar mal olabilir. HEB’ ler, maliyeti 300.000\$’ a yaklaşan standart bir dizel şehir içi otobüse göre önemli bir artış göstermektedir.¹ Hibrid otobüslerle ilgili asıl maliyet akülerin değiştirilmesidir, çünkü bugün akülerin şehir içi otobüslerde 12 yıllık bir kullanım ömrüne sahip olması beklenmemektedir.

Otobüsün kullanım ömrü boyunca yakıt ve bakım (işletme) maliyet tasarruflarının yüksek ilk yatırım maliyetini geri kazanmaya yardımcı olması beklenmektedir. Özellikle, yandaki özellikler sayesinde işletme maliyetlerinde tasarruf beklenmektedir: artan yakıt ekonomisi, uzun balata ömrü, daha az hareketli parçalara sahip olduğundan daha az motor aşınması ve daha az bakım ve daha az pahalı motor.

¹ <http://www.hybridcenter.org/hybrid-transit-buses.html>

Emisyonlar ve yakıt ekonomisi: Emisyonlarla ilgili olarak, HEB' ler sıfır emisyon sağlayamazlar. Bununla birlikte, hibrid otobüsler üzerinde yapılan bazı testler hibridlerin, temiz dizel ve CNG' li otobüslerden daha iyi veya karşılaştırılabilir emisyon avantajları sunduğunu göstermiştir. HEB' ler içinde bulunan dört temel emisyon azaltma ve verimlilik kaynağı vardır: küçük motor boyutu, rejeneratif frenleme, ihtiyaç üzerine güç, sabit motor hızları ve güç çıkışı.¹ HEB' lerde elektrik motoru da aracı tahrik etmek için kullanılır. Bu durum İYM' nin boyutunun küçültülmesine olanak tanır. Rejeneratif frenleme ise, normalde frenleme sırasında ısı olarak kaybolan enerjiyi geri kazanır ve daha sonra elektrik motoru tarafından kullanılmak üzere akülerde depolar. HEB' lerdeki enerji tasarrufu ve emisyon azaltımının diğer bir özelliği motor rölantideyken veya vites boştayken İYM' yi geçici olarak kapatma kabiliyetidir.

2.6.5. Farklı Otobüsler Arasında Karşılaştırma Analizi

Farklı teknolojilere sahip otobüslerin karşılaştırması teknolojik, finansal, çevresel, yakıt fiyatı, menzil, egzoz gazı emisyonları, gürültü, altyapı ihtiyaçları gibi birçok parametreye dayanır. Tablo 2.6' da şehir içinde kullanılan üç tip otobüs teknolojisinin avantajları ve dezavantajları özetlenmiştir. Yeşil renkli olanlar avantajları, kırmızı renkli olanlar ise dezavantajları belirtmektedir.

¹ http://www.eesi.org/files/eesi_hybrid_bus_032007.pdf

Tablo 2.6: Farklı teknolojilere sahip şehir içi otobüslerin karşılaştırılması

Dizel Otobüs	CNG'li Otobüs	Hibrid Elektrikli Otobüs
Tecrübe edilmiş	Yeni yakıt doldurma istasyonu	Kısmen tecrübe edilmiş (ABD de Avrupa'dan daha fazla)
Yüksek menzil	Azaltılmış menzil	Yüksek menzil+
Kirlilik (PM+NO_x)	Düşük emisyon/PM yok	Düşük emisyon, azaltılmış CO₂
Gürültü	Düşük yakıt maliyetleri	Azaltılmış gürültü seviyeleri
Artan yakıt fiyatları	Araç maliyetleri (+30.000€)	Daha yüksek araç maliyetleri (+150.000€)
Petrol yağına bağımlılık	Doğal gaz bağımlılık	Azaltılmış yakıt tüketimi

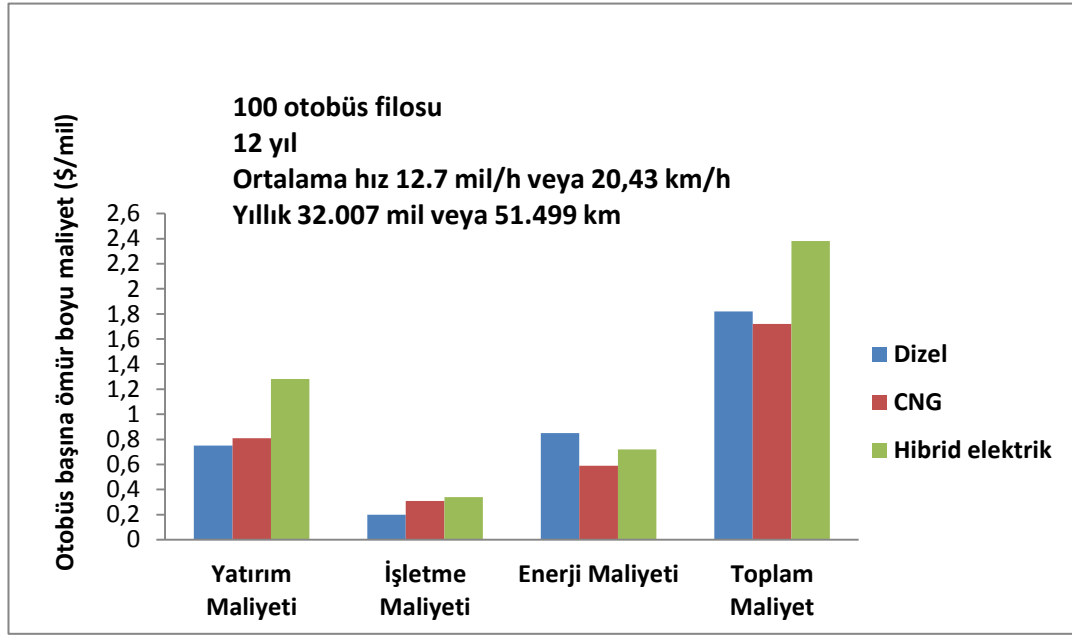
Kaynak: http://www.compro-eu.org/doc/COMPRO_deliverable_D2.3_final.pdf

Bir diğer karşılaştırma West Virginia Üniversitesi' nin (WVU) şehir içi otobüs ömür boyu maliyeti (life cycle cost) üzerine yapmış olduğu bir çalışmaya dayanmaktadır. Bu çalışma yandaki otobüs tiplerini kapsamaktadır: ultra düşük kükürlü dizel kullanan dizel otobüsler, CNG' li otobüsler ve HEB' ler (Živanović ve Nikolić 2012). Ömür boyu maliyet etmenleri yatırım maliyetlerini (otobüs alımları, altyapı ve emisyon ekipmanları) ve işletme maliyetlerini (yakıt, tahrikle ilişkili sistem bakımı, tesis bakımı ve akü değişimi) içermektedir.

100 otobüs büyüklüğündeki bir filo için WVU tarafından toplanan yakıt ekonomisi verilerine dayanarak bir otobüsün 12 yıllık ömür boyu maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Yalnızca teknoloji-bağımlı faktörlerin otobüs tahriki ile ilgili olduğu kabul edilmiş; sürücü ve yönetim maliyeti hariç tutulmuştur. Otobüslerin 12.7 mil/h (20.48 km/h) bir ortalama hızda çalışacakları, yılda 32.007 mil (yaklaşık 51.500 km) yol yapacağı ve hesaplama amacıyla 40 yolcunun oturacağı kabul edilmiştir.¹

¹ http://www.fta.dot.gov/documents/WVU_FTA_LCC_Second_Report_11-03-2008.pdf

Şekil 2.15: Farklı teknolojilere sahip otobüslerin ömür boyu maliyetlerinin karşılaştırılması



Kaynak: Živanović ve Nikolić 2012

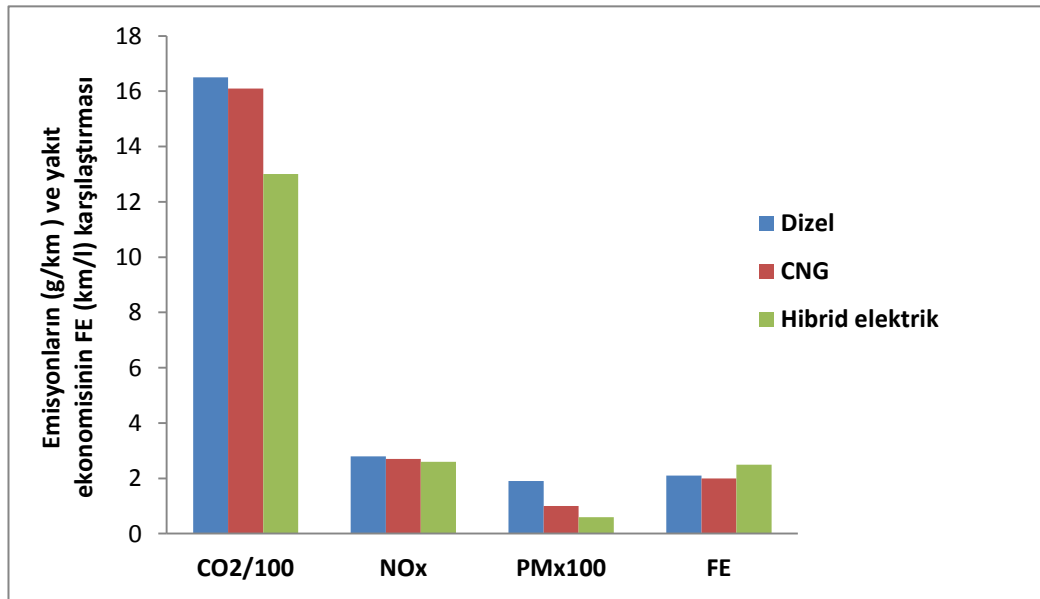
Araç alımlarındaki yatırım maliyetleri yakıt doldurma istasyonu (CNG' li otobüs için), depo modifikasyonu ve emisyon azaltım ekipmanını (dizel otobüs için) içerir. CNG otobüs teknolojisi için altyapı maliyetleri iki kısımdan oluşur: depo modifikasyonu ve yakıt doldurma istasyonları. İşletme maliyetleri ise, basınçlandırma (CNG' li otobüs için), tesis bakımı, tahrikle ilişkili sistem bakımı, akü değişimi (hibrid otobüs için) ve yakıt tüketimini içerir. Yakıt maliyetleri yıllık ortalama alınan yol, tahmini yakıt ekonomisi ve yakıt fiyatı kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm fiyatlarda 2008 yılı dolar kuru baz alınmış ve CNG fiyat verisinin tümü dizel (enerji) eşdeğeri bazında dönüştürülmüştür (Živanović ve Nikolić 2012).

Şekil 2.15, her otobüsün mil başına yatırım ve işletme maliyetleri (yakıt tüketimi hariç), ve enerji maliyeti için oluşturulan toplam ömür boyu maliyeti temsil eder. Hibrid otobüslerin yatırım maliyetinin CNG' li ve dizel otobüslerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, işletme maliyeti açısından bakıldığında bu üç tip otobüs teknolojisinin işletme maliyetleri arasında çok büyük farklar olmadığı

görülmektedir. Toplam ömür boyu maliyet açısından baktığımızda, hibrid otobüslerin ömür boyu maliyetlerinin CNG' li ve dizel otobüslere göre daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Hibrid otobüslerin en iyi yakıt ekonomisini sunmalarına rağmen, akü değiştirme maliyetleri ömür boyu maliyetlerin yüksek olmasına sebep olmuştur. Genellikle, ömür boyu maliyet analizindeki toplam maliyet dizel otobüslerin hâlâ en ekonomik teknoloji olduğunu göstermiştir.

Bu üç tip otobüs teknolojisine emisyon ve yakıt ekonomisi açısından bakarsak, şekil 2.16' dan da görüldüğü gibi, hibrid otobüsler diğer otobüslerle karşılaştırıldığında daha düşük CO₂, NO_x ve PM emisyonları sunmaktadır. Ayrıca diğer otobüs teknolojilerine göre özellikle dizel otobüse göre daha yüksek bir yakıt ekonomisi sağladığı görülmektedir.

Şekil 2.16: Farklı teknolojilere sahip otobüslerin ömür boyu maliyetlerinin karşılaştırılması (yakıt ekonomisi ve emisyonlar)



Kaynak: Živanović ve Nikolić 2012

2.6.6. Hibrid Elektrikli Otobüs Çözümleri





Hibrid otobüslerin kullanımı son yıllarda daha popüler bir hâle gelmiştir. Hibrid çözümler özellikle dizel, CNG ve yakıt hücresel vb. tüm ana tahrik tipleri için uygundur. Tablo 2.7 ve Tablo 2.8 İYM' li önemli otobüs üreticilerinin bazı tipik HEB çözümlerini göstermektedir.

Tablo 2.7: Kuzey Amerika' da üretilen hibrid elektrikli otobüsler

Hibrid Otobüs	Orion VII Hibrid elektrikli otobüs	New Flyer Hibrid elektrikli otobüs
Otobüsün resmi		
Hibrid tahrik tipi	Seri hibrid	Seri hibrid
Motor	5.9 litre, 120 kW çekiş gücü jeneratörü ile 194 kW' lık motor	
Elektrik motoru/jeneratör	AC Endüksiyon motoru, Nominal Güç 250 hp sürekli (320 hp pik)	İkili AC Endüksiyon motoru, Nominal Güç 170 kW, maksimum güç 300 kW
Enerji depolama	Lityum-iyon akü	Ultrakapasitör
Otobüs karakteristikleri	%30 iyileştirilmiş yakıt ekonomisi ve emisyon azaltımı: %90 PM, %40 NO _x , %30 CO ₂	Emisyon azaltımı: %25 PM, %32 NO _x ve daha düşük yakıt tüketimi ve CO ₂ emisyonu

Kaynak: Živanović ve Nikolić 2012

Tablo 2.8: Avrupa’ da üretilen hibrid elektrikli otobüsler

Hibrid Otobüs	MAN Lion’s Şehir İçi Hibrid	MERCEDES-BENZ Citaro G BlueTec Hibrid
Otobüsün resmi		
Hibrid tahrik tipi	Siemens, Seri hibrid	Seri hibrid
Motor	6.9 litre, 191 kW/260 hp	4.8 litre, 160 kW/218 hp
Elektrik motoru/jeneratör	2x75 kW Siemens asenkron elektrik motoru. 150 kW bir çıkış gücü ile senkronize jeneratör	Otobüsün arka akslarında ve merkezinde dört elektrikli tekerlek merkezi motoru (hub motoru), 320 kW (4x80 kW) çıkış gücü. 160 kW jeneratör çıkış gücü
Enerji depolama	Ultrakapasitör	Lityum-iyon akü
Otobüs karakteristikleri	%30 a kadar daha düşük yakıt tüketimi ve CO ₂ emisyonu	%30 a kadar azaltılmış dizel tüketimi ve CO ₂ emisyonları
Hibrid Otobüs	VOLVO 7700 Hibrid	SOLARİS Urbino 18 Hibrid
Otobüsün resmi		
Hibrid tahrik tipi	Paralel Hibrid	Paralel hibrid
Motor	5 litre kapasite, 210 hp	181 kW, (246 hp), 6.7 litre kapasite
Elektrik motoru/jeneratör	AC sürekli mıknatıs motor, 160 hp güç değeri ve 90 hp lik sürekli bir değer	Motor 150 kW lık maksimum bir çıkış gücüyle sürekli 85 kW güç sağlar.
Enerji depolama	Nikel Metal Hidrid akü	Ultrakapasitör
Otobüs karakteristikleri	%35 e kadar yakıt tasarrufu daha düşük egzoz emisyonu	%16 ya kadar ortalama yakıt tasarrufu

Kaynak: Živanović ve Nikolić 2012

Tablo 2.9’ da İstanbul’ da metrobüs hattında kullanılan hibrid otobüslerin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.9: İstanbul’da metrobüs hattında kullanılan Hollanda üretimi Phileas marka hibrid otobüslerin teknik özellikleri

Model	Phileas 18 m	Phileas 24 m	Phileas 26 m
Boyutlar			
Uzunluk	18.48 m	24.49 m	26.04 m
Genişlik	2.55 m	2.55 m	2.55 m
Yükseklik	3.20 m	3.20 m	3.20 m
Ulaşılabilirlik			
Çökme	-70 mm	-70 mm	-70 mm
Taban yüksekliği	340 mm	340 mm	340 mm
Kapıların pozisyonu	esnek	esnek	esnek
Seçenek	Her iki taraftan	Her iki taraftan	Her iki taraftan
Kapı boyutları (GxH)	1.20 x 2.00 m	1.20 x 2.00 m	1.20 x 2.00 m
Sürülebilirlik			
Dönme yarıçapı	< 12.50 m	< 12.50 m	< 12.50 m
Süpürme yolu	< 4.40 m	< 4.40 m	< 4.40 m
Hafif ağırlıklı gövde			
Yan modüller	Kompozit polyester	Kompozit polyester	Kompozit polyester
Döşeme, tavan ve bölmeler	Kompozit alüminyum	Kompozit alüminyum	Kompozit alüminyum
İç kısım			
Koltuk ayarlaması	uyarlanabilir	uyarlanabilir	uyarlanabilir
Ağırlık			
Maksimum toplam ağırlık	27,000 kg	37,350 kg	37,350 kg
Performans			
Maksimum hız	> 90 km/h	> 90 km/h	> 90 km/h
Eğim	> 14 %	> 14 %	> 14 %

Kaynak: <http://www.aps-phileas.com/>

Standart tahrik sistemi Cummins dizel motorlu paralel hibrid Allison transmisyondur. Yakıt tüketimi bir konvansiyonel dizel araçla kıyaslandığında % 20 daha azdır. 26 m uzunluğunda olan bir Phileas 2 dakikalık bir sıklıkla tek yönde saatte 6,000 yolcuya kadar taşıyabilir.¹ Şekil 2.17’ de ve Şekil 2.18’ de Phileas marka hibrid otobüslere ait resimler verilmektedir.

¹ <http://www.aps-phileas.com/>

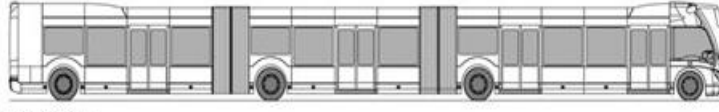
Şekil 2.17: Phileas marka hibrid otobüslerin teknik resimleri



Phileas 18 m



Phileas 24 m



Phileas 26 m

Kaynak: <http://www.aps-phileas.com/>

Şekil 2.18: Phileas marka hibrid otobüslerin resimleri



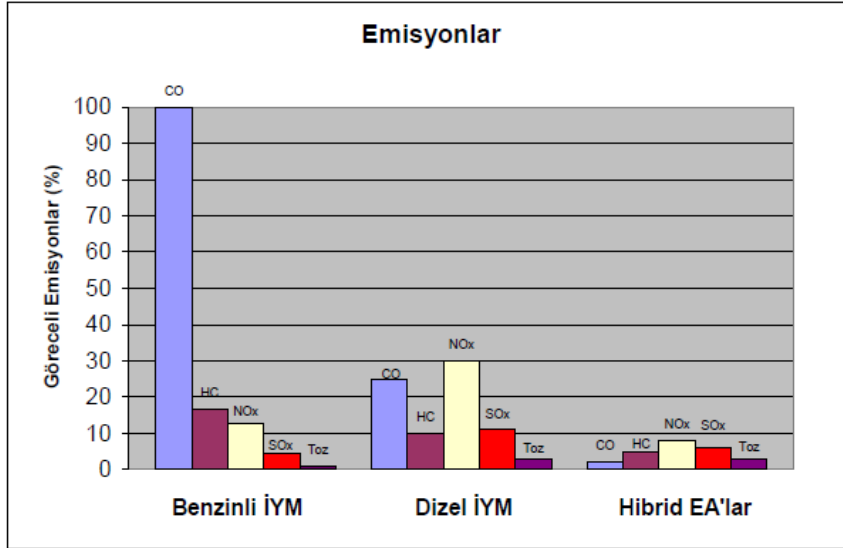
Kaynak: <http://www.aps-phileas.com/>

2.7. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAHRİK TEKNOLOJİSİ VE EMİSYONLAR

Büyük metropollerin en önemli sorunlarının başında gelen hava kirliliği üzerinde toplu taşıma sistemleri büyük rol oynamaktadır. İYM kaynaklı emisyonlar birtakım çevre standartlarının ve yönetmeliklerinin getirdiği önlemler ile azaltılmaya çalışılmaktadır. Fosil kökenli yakıtların, İYM' lerde yanması neticesinde ortaya çıkan kirleticiler, atmosferde dağılmakta ve güneş ışığının etkisi ile reaksiyonlara girerek ozon ve sera gazlarının oluşumuna neden olmaktadır. Küresel ısınmaya neden olan gazlar arasında başta karbondioksit olmak üzere metan ve kloroflorokarbon yer almaktadır. Diğer gazlara nazaran, kara taşımacılığı kaynaklı karbondioksit küresel ısınmada daha baskındır (Ünlü vd. 2003).

Şekil 2.19' da benzinli ve dizel İYM' li araçlar ile HEA' lar emisyon bakımından karşılaştırılmıştır.

Şekil 2.19: Benzinli ve dizel içten yanmalı motorlu araçlarla hibrid elektrikli araçların emisyon bakımından karşılaştırması



Kaynak: Ünlü vd. 2003

Şekil 2.19' dan görüldüğü gibi benzinli motorlarda yakıtın yanması ile oluşan CO miktarı dizel ve HEA' lardan oldukça fazladır. Ayrıca en fazla emisyonu benzinli motorlar oluşturmaktadır. Dizel yakıtlı İYM' lerde ise yakıtın yanması ile oluşan emisyon miktarlarına baktığımızda NO_x' in daha fazla olduğu görülmektedir. HEA' lar ise tamamen sıfır emisyonlu araçlar olmamakla birlikte dizel ve benzinli İYM' li araçlara göre oldukça düşük emisyon miktarlarına sahiptir.

Tablo 2.10' da ABD Enerji Departmanı (DOE) ile Ulusal Yenilenebilir Enerji Labovatuvarı (NREL) tarafından hazırlanan otobüs değerlendirme sonuçları verilmektedir. Dizel motorlu HEB' lerin klasik dizel motorlu otobüslere göre emisyon ve yakıt tüketiminde sağlamış olduğu iyileştirmeler yüzdesel olarak verilmiştir. Özellikle CO ve PM emisyonlarında yüzde yüze yakın azalma sağlandığı görülmektedir.

Tablo 2.10: DOE/NREL transit otobüs değerlendirme projesi sonuçları

Dizel Motorla Karşılaştırıldığında Hibrid-Dizel Motor Emisyonları	
Hidrokarbonlar	% 28 azalma
Karbon Monoksit	% 98 azalma
Karbon Dioksit	% 33 azalma
Nitrojen Oksitler	% 44 azalma
Partikül Madde	% 99 azalma
Yakıt Tüketimi	% 16 azalma

Kaynak: Christidis vd. 2005

Tablo 2.11' de hibrid ve konvansiyonel otobüs emisyonlarının g/km değerleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.11: Hibrid ve konvansiyonel otobüs emisyonlarının karşılaştırılması

Emisyonlar (g/km)	Hibrid Otobüs	Konvansiyonel Otobüs
HC	0.433	3.622
CO	3.466	20.566
NO _x	6.66	25.472
Partikül Madde	0.333	3.259

Kaynak: Christidis vd. 2005

3. YAKIT PİLLİ TAŞITLAR

Bu bölümde, yakıt pilli taşıtlara ait genel bilgiler verilmiştir. Yakıt pilli taşıtlarda, HEA' lardaki İYM' nin yerini yakıt pili almıştır. Yani aracı tahrik eden sistem yakıt pilidir. Yakıt pili sistemi taşıtın güç aktarma organlarına elektrik enerjisi sağlamaktadır.

3.1. YAKIT PİLİNİN GENEL TANIMI

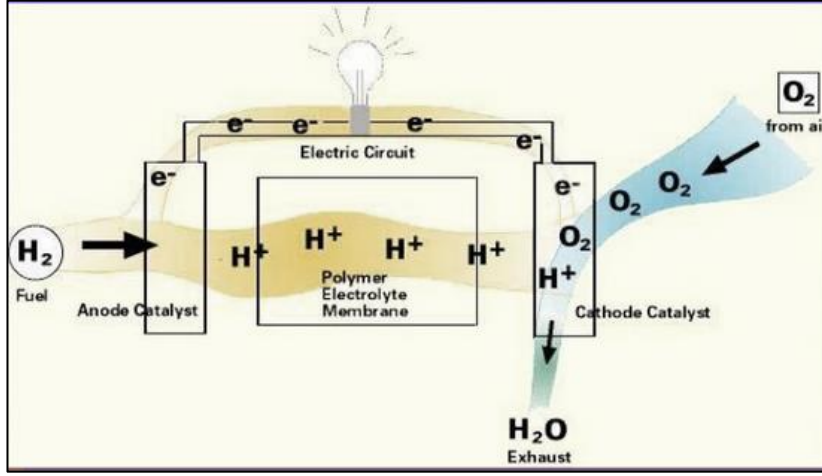
Yakıt pili (fuel cell) elektrik üretmek için hidrojen ve oksijeni birleştiren bir elektrokimyasal bir cihazdır. Yan ürün olarak su ve ısı açığa çıkar. Yakıt pili teknolojisinde yakıtın enerjiye dönüşümü elektrokimyasal olur, yanma ile değil. Yakıtın yanmasına göre daha verimlidir.

3.2. YAKIT PİLİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Çalışma prensibi pilinkine çok benzer, fakat pildeki gibi enerjisinde ne zamanla düşme olur ne de şarj gerektirir. Yakıt sağlandığı sürece enerji ve ısı üretir. Yakıt pili iki katalizör kaplı elektrot ve onları çevreleyen elektrolitten oluşur. Elektrotlardan biri anot, diğeri katotdur. Süreç hidrojen moleküllerinin anota girmesi ile başlar. Katalizör kaplama hidrojenin negatif yüklü elektronlarını pozitif yüklü protonlardan ayırır. Elektrolit, protonların katoda geçmesine izin verirken, elektronların geçmesini engeller. Bunun yerine elektronlar elektrik akımı oluşturan bir dış devreye yönlendirilir. Elektronlar dış devreden geçerken, oksijen molekülleri katoda geçer. Elektronlar dış devre üzerinden geçtikten sonra oksijen ve protonlarla birleşir. Oksijen ve protonlar elektronlarla birleştiğinde su ve ısı üretilir.¹ Yakıt pilleri seri olarak yerleştirilerek yakıt pili grupları oluşturulur. Pil grupları bir sistem içinde kullanılarak bir taşıta güç sağlayabileceği gibi sabit güç kaynağı olarak binalarda da kullanılabilir.

¹ <http://www.slideshare.net/muratsena/yakit-pili>

Şekil 3.1: Yakıt pilinin çalışma prensibi

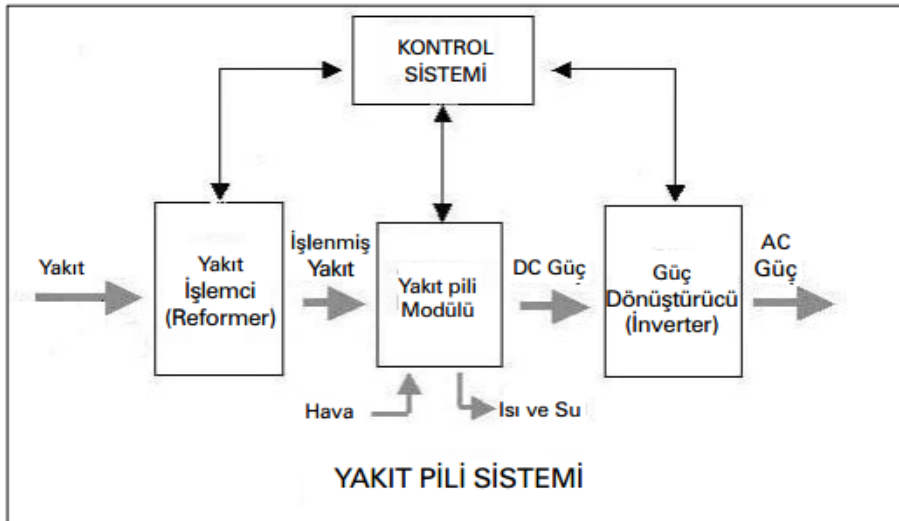


Kaynak: <http://www.slideshare.net/muratsena/yakit-pili>

3.3. YAKIT PİLİNİN BİLEŞENLERİ

Genel olarak bir yakıt pili sistemi Şekil 3.2’ de gösterildiği gibi dört üniteden oluşmaktadır. Bunlar; yakıt işleme ünitesi, güç üretim sistemi (yakıt pili grubu-modül), güç dönüştürücü (inverter) ve kontrol sistemi (Oral ve Çelik 2005).

Şekil 3.2: Yakıt pili sisteminin genel yapısı ve elemanları



Kaynak: Oral ve Çelik 2005

3.3.1. Yakıt İşleme Ünitesi

Yakıtın yakıt piline gönderilmesi öncesinde hazırlandığı, eğer doğrudan hidrojen kullanılmıyorsa, kullanılan yakıttan hidrojenin ayrıştırıldığı, saflaştırıldığı ve koşullandırıldığı ünedir (Oral ve Çelik 2005).

3.3.2. Güç Üretim Sistemi

Güç üretim sistemi sistemde güç üretiminin gerçekleştirildiği ünedir. Bir veya birden fazla yakıt pili modülünden meydana gelebilmektedir.

3.3.3. Güç Dönüşüm Ünitesi

Güç dönüşüm ünitesinde hücrede üretilen doğru akım ticari kullanım için düzenlenir (regüle edilir) ya da dönüştürücüler (inverter) yardımı ile alternatif akıma çevrilir (Yıldırım 2011).

3.3.4. Kontrol Sistemi Ünitesi

Kontrol sistemi ünitesinde, sistemin tüm işleyişi denetlenir ve kontrol edilir. Bu noktada en önemli kontrol; başta nemlendirme, yakıt pili sıcaklık kontrolü, yakıt-hava debi kontrolü, gerilim-akım kontrolü, atık ısı, atık su kontrolü, soğutucu akışkan kontrolü vb. gibi sıralanabilir (Yıldırım 2011).

3.4. YAKIT PİLİ ÇEŞİTLERİ

Genel olarak tüm yakıt hücrelerinde elektrolit ve iki elektrottan oluşan aynı temel yapılandırma vardır. Farklı tipteki yakıt pilleri, kullanılan elektrolit türüne göre sınıflandırılır. Kullanılan elektrolit türü gerçekleşecek kimyasal reaksiyonları ve çalışma sıcaklık aralığını belirler. Başlıca yakıt pili türleri şunlardır:

3.4.1. Proton Değişimli Membran (PEM) Yakıt Pili (PEMFC)

Bu yakıt pili tipi 1950' li yıllarda General Elektrik tarafından bulundu ve ilk olarak NASA'nın Gemini Uzay Projesinde uygulandı. Polimer elektrolit membran ya da proton geçirgen membran olarak da adlandırılmaktadır. PEM yakıt hücresinin elektrolit kısmı kalınlığı 50 µm seviyesinde katı polimer membran zardan meydana gelir. Bu zarın özelliği; protonlara karşı geçirgen olması, elektronlara karşı ise geçirgen olmamasıdır. Çalışma sıcaklığı 80 °C civarındadır ve bu sıcaklık seviyesinde reaksiyon hızının yavaş oluşu katalizör kullanımını gerektirir. Her bir hücrede oluşan gerilim 0,7 volt seviyesinde olup yüksek gerilimlere ulaşabilmek için hücreler seri olarak bağlanarak; yakıt hücresi (yakıt pili) grubu oluşturulur. PEM yakıt pilleri; düşük sıcaklık seviyesinde çalışma, çabuk cevap hızı, yüksek güç yoğunluğu ve kompakt yapı gibi avantajlara sahiptir. Verimleri ise % 40-50 aralığındadır (Oral ve Çelik 2005). PEM yakıt pilleri otomobillerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.4.2. Direkt Metanol Yakıt Pili (DMFC)

Direkt Metanol Yakıt Pili (DMFC), PEM yakıt pillerinin bir çeşidi olmakla beraber, bir ön reformlamaya ihtiyaç duyulmadan metanolün doğrudan kullanımına imkan tanıyan bir yapıya sahiptir. Bu hücreler, PEM yakıt pillerinden daha yüksek bir çalışma sıcaklığına sahip olup, 120 °C civarında çalışabilmektedirler. Verimleri ise % 40 civarındadır. Metanolün düşük sıcaklıkta CO₂ ve hidrojene dönüşümü, PEM yakıt pillerinden farklı olarak, daha yüksek miktarda platin katalizörüne ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Bu durum ise maliyetleri arttırmakta ve DMFC için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Sıvı yakıt kullanımına imkan sağlaması ve reformlama ünitesi olmadan çalışabilir olması ise önemli avantajlarıdır (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu 2003).

3.4.3. Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)

Fosforik Asit Yakıt Pilleri (PAFC) ticari olarak en çok geliştirilen yakıt pilidir. Verimliliği % 40' in üzerindedir. Elde edilen buharın % 85' i kojenerasyon için kullanılabilir. Elektrolit olarak sıvı fosforik asit kullanılır ve çalışma sıcaklığı yaklaşık 450 F (230 derece) tır. Bir önemli avantajı ise yakıt olarak saf olmayan hidrojen kullanılabilmesidir.¹ PAFC' ler, modern yakıt hücrelerinin ilk nesli olarak kabul edilmektedir. Bu tip hücreler tipik olarak sabit güç üretimi için kullanılmakla birlikte şehir otobüsleri gibi büyük araçlara güç üretmek için uygulamaları da mevcuttur (Yıldırım 2011).

3.4.4. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC)

Erimiş karbonat yakıt hücreleri (MCFC), PEMFC ve PAFC' lerin sınırlı olan çalışma sıcaklıklarına alternatif olarak geliştirilmiş sistemlerdendir. Bu hücreler 600-650 °C arasında çalışmakta olup yüksek verimliliklerinden dolayı diğer sistemler arasında çok önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu tür yakıt hücreleri elektrolit olarak karbonat tuzlarını kullanırlar (Kuyumcu 2008). Çok yüksek sıcaklıklardan dolayı anot ve katotda değerli olmayan metallerin kullanılması maliyeti azaltır. Dezavantajı uzun ömürlü olmamasıdır.

3.4.5. Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)

Elektrolit olarak sert, gözeneksiz seramik bileşiği kullanılır. Oldukça yüksek sıcaklıkta çalışma katı oksit yakıt pillere (SOFC) avantaj ve dezavantaj sağlar. SOFC' nin yüksek sıcaklıkta çalışması sayesinde kojenerasyon için gerekli ısı girişi sağlanmış olur. Dezavantajı ise yüksek çalışma sıcaklığı yüzünden uzun süreli çalıştırma zamanı, diğer sistem parçalarını korumak için ısı yalıtımı gereksinimi, yakıt pili içinde kullanılan

¹ <http://www.slideshare.net/muratsena/yakit-pili>

değişik maddeler boyunca uygunsuz ısı dağılımı, yüksek elektrik direnci ve zor imal edilmesidir (Çamcı 2005).

3.4.6. Alkalın Yakıt Pili (AFC)

Ağırlıklı olarak askeri ve uzay programlarında kullanılır. Verimi %70' e kadar ulaşır fakat taşıt uygulamaları için pahalı bulunmaktadır. Apolla uzay aracında elektrik ve içme suyu sağlamak için kullanılmıştır. Elektrolit olarak sulu potasyum hidroksit çözeltisi kullanılır. Anot ve katotda katalizör olarak değerli olmayan çeşitli metaller kullanılabilir. Karbon kirliliğine duyarlı olduğundan saf hidrojen ve oksijen gerektirir. Hidrojen ve oksijen arıtma işlemi oldukça pahalıdır. Kirlenmeye karşı hassasiyet pilin ömrünü etkiler ve dolayısıyla maliyet artar.¹

Tablo 3.1'de yakıt pili çeşitleri ve özellikleri belirtilmektedir.

Tablo 3.1: Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri

Yakıt Pili	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı	Elektriksel Verim	Yakıt/Oksitleyici
Alkalın	Potasyum Hidroksit çözeltisi	Oda sıcaklığı-250 °C	% 60-70	H ₂ /O ₂
PEM	Proton iletken elektrolit membran	Oda sıcaklığı-80 °C	% 40	60% H ₂ /O ₂ , hava
Direkt Metanol	Polimer iletken membran	Oda sıcaklığı-130 °C	% 20-30	CH ₃ OH/O ₂ , hava
Fosforik Asit	Sıvı fosforik asit	160-220 °C	% 55	Doğalgaz, biyogaz, H ₂ /O ₂ , hava
Erimiş Karbonat	Alkali karbonatlar	620-660 °C	% 65	Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H ₂ /O ₂ , hava
Katı Oksit	Erimiş Alkali Metal Karışımı	800-1000 °C	% 60-65	Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H ₂ /O ₂ , hava

Kaynak: Yıldırım 2011

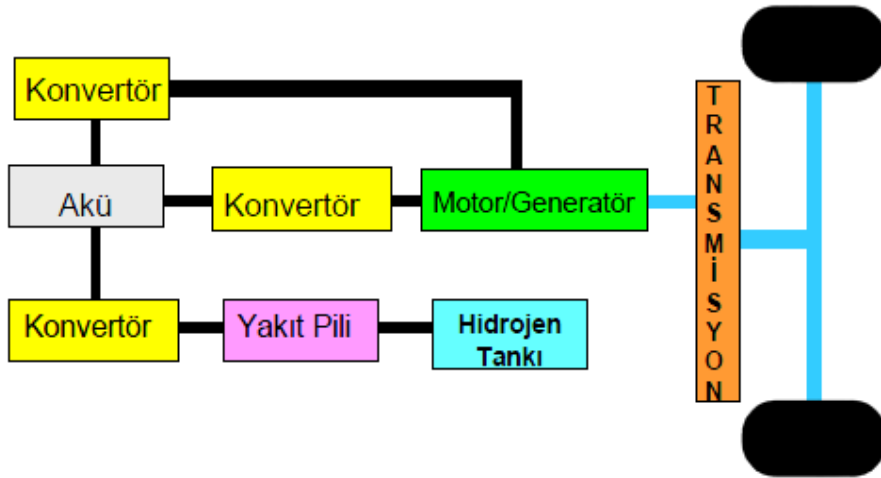
¹ <http://www.slideshare.net/muratsena/yakit-pili>

3.5. YAKIT PİLİNİN MOTORLU TAŞITLARDA UYGULANMASI

3.5.1. Hibrid Yakıt Pili Taşıt

Yakıt pili sistemi, araç için gereken gücü sağlarken batarya yalnızca aracın kalkışında ve maksimum gücü sağlamak için kullanılır. Bununla beraber bazı durumlarda hibrid sistem içinde meydana gelen ani yük değişimlerinde yakıt pili yerine bataryada bu güç ihtiyacını karşılayabilir. Şekil 3.3' de bir yakıt pilli hibrid taşıt yapısı görülmektedir. Burada diğer hibrid sistemlerden farklı olarak İYM' nin yerini yakıt pili almıştır. Yakıt pilli taşıt, yakıt pili, hidrojen tankı, batarya, elektrik motoru, transmisyon ve kontrol sisteminin (konvertör) bulunduğu güç aktarma sisteminden oluşur. Yakıt pili sistemi hava sağlama, yakıt sağlama ve soğutma sisteminden oluşur (Çamcı, 2005).

Şekil 3.3: Yakıt pilli hibrid taşıt



Kaynak: Tuncay ve Üstün 2004

Yakıt pilli hibrid taşıtlarda diğer hibrid yapılarda olduğu gibi bataryanın birtakım görevleri vardır. Bunlar; yakıt pili tarafından üretilen enerjiyi ve frenleme sırasında açığa çıkan enerjiyi (rejeneratif frenleme) depolamak, gerekli hallerde elektrik motoruna enerji beslemek ve yakıt pili gücüne yardım etmek (Çamcı, 2005).

Yakıt pilli taşıtlar, yakıtın enerjiye dönüşümü sırasında yanma olayı gerçekleşmediğinden İYM' lere göre daha verimlidirler. Enerji dönüşümünde herhangi bir hareketli parçanın olmaması sessiz çalışmasını sağlar. Ayrıca konvansiyonel araçlardaki gibi yağ değiştirme ve bunun gibi diğer bakım gereksinimleri yoktur. Yakıt pilli taşıtlar alternatif yakıtların kullanılmasına olanak tanıdığından yakıt esnekliği sağlarlar. Emisyon bakımından ise diğer hibrid sistemlere göre oldukça iyi konumdadırlar, neredeyse sıfır emisyonlu araçlardır. Yüksek maliyetli oluşları en büyük dezavantajlarıdır.

3.6. ŞEHİR İÇİ OTOBÜSLERDE YAKIT PİLLİ TAHRİK TEKNOLOJİLERİNİN UYGULANMASI

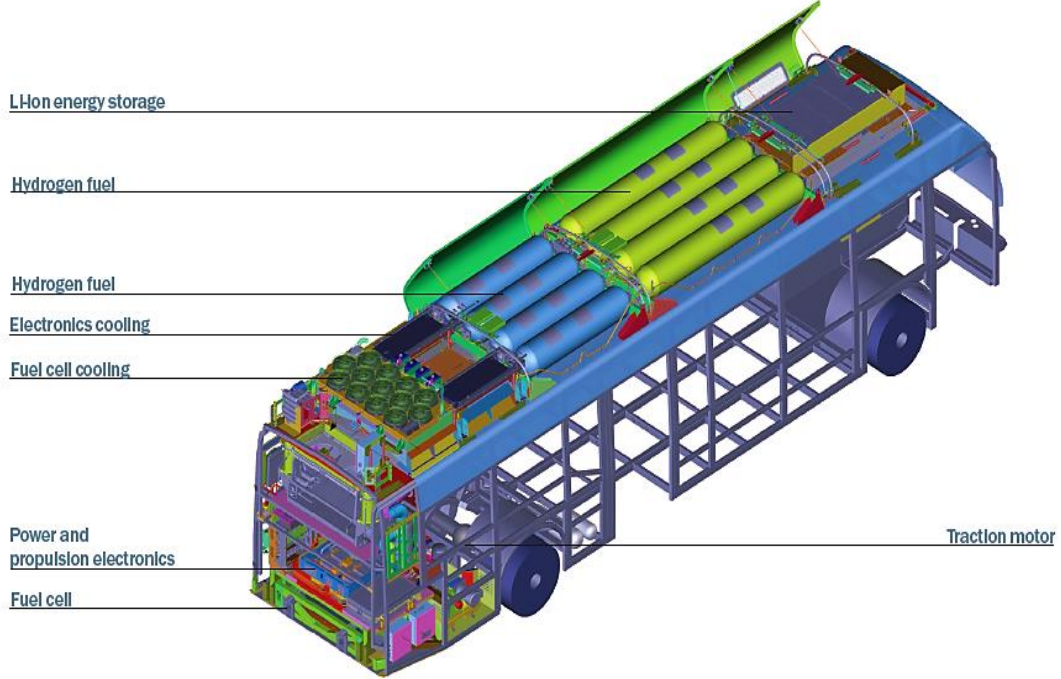
Otobüs uygulamaları için yakıt pilleri artık fosil yakıtlara bağımlı olmayan, temiz ve verimli bir ulaşım sistemi vaad ettiği için son birkaç yıldır çok büyük bir ilgi uyandırmıştır. Yakıt pili bir İYM ömrünün yaklaşık yarısı kadar ömre sahiptir. Bu yüzden, tüketiciler geleneksel bir motora eşdeğer bir araç işletim ömrü elde etmek için yakıt pilini iki kez değiştirmek zorunda kalacaklardır. Yakıt pilli otobüsler önemli yeni altyapı, destek ve eğitim gereksinimleri gerektirirler ve bu gereksinimler yakıt pilleri için ne tip yakıt kullanıldığına bağlıdır. Mevcuttaki ve gösterimdeki otobüslerin çoğu sıkıştırılmış gaz formunda depolanmış saf hidrojen kullanır (Živanović ve Nikolić 2012).

3.6.1. Yakıt Pili Otobüs Yapısı

Tüm yakıt pilli araç konseptleri tipik bir elektrik enerjisi depolama sistemi akü ve aracın üstüne yerleştirilmiş bir hidrojen yakıt pilinin kombinasyonu aracılığıyla tekerleklere güç iletmek için elektrik motorları kullanır. Hibridleşme derecesine bağlı olarak, akü (batarya ya da pil) aracı belli bir mesafe sürmek için elektrik sağlayabilir. Şekil 3.4 yakıt pilli otobüs bileşenlerinin tipik düzenini gösterir. Yakıt pilli otobüsün anahtar sistem

bileşenleri şunlardır: yakıt pili sistemi, enerji depolama sistemi, hidrojen depolama sistemi, tekerlek tahriki, soğutma sistemi ve yardımcı sistemler.¹

Şekil 3.4: Yakıt pilli hibrid otobüsün anahtar bileşenleri



Kaynak: <http://www.hybridrive.com>

3.6.1.1. Yakıt Pili Sistemi

Yakıt pili son kullanım için elektrik enerjisine geri dönüştürülmek üzere enerjinin hidrojen olarak depolanmasına izin veren bir enerji dönüştürme teknolojisidir. Bir yakıt pilli araç içinde bir çekiş gücü invertörü, elektrik motoru ve şanzımandan oluşan elektrikli tahrik sistemi yer almaktadır. İntertör, yakıt pili sistemi tarafından üretilen elektriği otobüsü hareket ettirmek için gerekli olan çekiş gücüne (cer gücüne) dönüştürür. Yakıt pili sistemi genellikle otobüsün çatısı üzerine yerleştirilir.

¹ http://hyfleetcute.com/data/HyFLEETCUTE_Brochure_Web.pdf

Ađır hizmet uygulamaları için yakıt pilli g¼¼ kaynakları tedarik eden bazı önemli yakt pili üreticileri şunlardır: Ballard Power Systems ve Hydrogenics (Kanada), United Technologies Corporation (UTC) Fuel Cells, Enova Systems (ABD), Shanghai Shen-Li High Tech Co. Ltd. (Çin), Siemens ve Proton Motor Fuel Cell GmbH (Almanya), Toyota (Japonya), Hyundai Motor Co. (Güney Kore) (Živanović ve Nikolić 2012).

3.6.1.2. Enerji Depolama Sistemi

Enerji depolama sistemleri genellikle akü grupları ve/veya ultrakapasitörlere dayanmaktadır. Maksimum çıkış gücü ve depolama kapasitesi hibrid yapısına bağlı olarak değişir. Lityum-iyon akü teknolojisi otobüsler için kullanılan en uygun enerji depolama teknolojisidir. Aküler genellikle otobüs tavanının üstüne yerleştirilir. Yakıt pilli otobüsler rejeneratif frenleme ile donatılmıştır.

3.6.1.3. Hidrojen Depolama Sistemi

Gaz halindeki hidrojen yakıt olarak görev yapar. Hidrojen basınçlandırılmış gaz tankları içinde depolanır, sayıları konusunda maksimum menzil belirleyicidir, fakat aynı zamanda yolcu kapasitesini sınırlamaktadır. Hidrojen depolama sisteminin boyutu iyileştirilmiş aktarma organları verimliliğinin bir sonucu olarak küçültülmüştür. Bu da otobüsün toplam ağırlığında azalmaya yol açmıştır. Hidrojen depolama için silindirler 350 bar'lık artan bir basınçta çalışırlar (Živanović ve Nikolić 2012).

3.6.1.4. Tekerlek Tahriki

Elektrik motoru ya tek bir ana motor olabilir ya da tekerleklere monte edilmiş (motorun tekerleklerin içinde tasarlandıđı) olabilir. Otobüs arka sol tarafında yer alacak bir merkezi çekiş sistemi ile teçhiz edilebilir. Arka aks 2 tekerlek merkezi motoruna sahiptir ve özellikle gerekli hızları, yük kapasitelerini ve enerji verimliliđini eşleştirmek için geliştirilmiştir (Živanović ve Nikolić 2012). Ayrıca frenleme sırasında enerji rejenerasyonu için bir jeneratör olarak hizmet vermektedir.

3.6.1.5. Soğutma Sistemi

Bir yakıt pili içinde hidrojen reaksiyona girerken, su üretilir. Bu suyun bir kısmı buharlaşır ve oldukça kolay bir şekilde otobüsün arkasındaki buhar havalığı olarak görülen yerden sistemi terk eder. Bununla birlikte, PEM hücreleri yüksek sıcaklığa karşı duyarlı oldukları için, hücre (pil) yığınları serinletilmelidir. Elektrik üretiminden kaynaklı yan ürün her zaman kısmen hücre yığını içinde birikebilen ve süreci yavaşlatabilen sıvı suya dönüşecektir. Bu durum boşta çalışırken veya tam hızda gerçekleşebilir. Bu yüzden tüm PEM hücreleri (pilleri) arada bir yığınları temizleyen bir mekanizmaya gerek duymaktadır, aksi halde elektrik üretimi yavaşlayacaktır. Yığın üreticilerinin çoğu ısı dağılımı için radyatörler ile birlikte sıvı soğutmalı sistemler kullanır (Živanović ve Nikolić 2012).

3.6.1.6. Yardımcı Sistemler

Yakıt pilli otobüsün yardımcı bileşenleri elektrikle çalıştırılabilir. Yardımcı sistemler sadece talep edildiğinde çalışırlar. Bu hibrid konseptte dayalı yakıt pilli otobüsler için tipik bir çözümdür. Böylece bu durum daha yüksek bir verimlilik ve daha az bileşen bakımı sağlamaktadır.

3.6.2. Yakıt Pili Otobüslerin Değerlendirmesi

Yakıt pilleri yüksek verimlilik, sessiz ve sarsıntısız çalışma ve saf hidrojen kullanıldığında işletmede sıfır emisyon ve uzatılmış balata ömrü gibi ulaşımda kullanılmalarını cazip hale getiren bir dizi potansiyel fayda sunar. Hidrojen yakıt pilleri ile ilişkili altyapı, otobüs, yakıt ve bakım maliyetleri oldukça pahalıdır. Bir bakım tesisi, yakıt istasyonu ve otobüs yıkama gibi tesislerin maliyeti birkaç yüz bin dolardan 4.4 milyon dolara kadar değişmektedir.¹ Şu anda, otobüsler için yakıt pilleri ticari bir ürün

¹ <http://www.middlebury.edu/media/view/255373/original/BUSFINALREPORT.pdf>.

değildir. Mevcut yakıt pilli otobüsler oldukça küçük sayılarda üretilen prototiplerdir. Yakıt pilli otobüsler 1 milyon dolardan 3 milyon dolara kadar (veya daha fazlası) mal olmaktadır (Callaghan ve Lynch 2005).

Ayrıca hidrojen yakıtının kendisinde şu anda çok pahalıdır. Maliyetler hidrojen üretim metoduna bağlı olarak değişir. Yakıt pilli otobüslerin kullanımındaki en büyük kısıtlamalardan birisi hidrojen otobüsleri için yakıt ikmal süresidir. 30 kg hidrojeni 5 dakikadan daha az bir zamanda doldurmak hidrojene ön soğutma (bu yüksek doldurma oranlarında sıcaklık arttıkça hidrojen tanklarına zarar verir) yapmaksızın şimdilik mümkün değildir. Seyahat edilen km başına CO₂ emisyonları bakımından farklı otobüs teknolojileri (dizel, dizel-hibrid ve yakıt pilleri) ile yapılan bazı karşılaştırmalarda yakıt pilli otobüsler önemli faydalar göstermiştir. Yakıt pilli otobüslerin CO₂ emisyonları 0 ila 1,8 kg/km arasında değişmektedir. Sıfır emisyon yenilenebilir hidrojen ve elektrik ile ilgilidir. Dizel hibrid otobüslerin emisyonları 0,69 ila 1,2 kg/km iken, dizel otobüslerin emisyonları 1,05 ila 1,5 kg/km dir (Zaetta ve Madden 2011).

3.6.3. Yeni Nesil Yakıt Pilli Otobüsler

Şekil 3.5’de gösterilen yeni Mercedes-Benz Citaro yakıt pilli hibrid otobüs, pek çok yeni önemli özellikler getirmiştir: enerji geri kazanımı ile hibridleşme ve lityum-iyon akülerde enerji depolama, tekerlek merkezinde 120 kW’lık sürekli çıkış gücü ile güçlü elektrik motorları, elektrikli güç kalkış üniteleri ve daha gelişmiş yakıt pilleri. Bunlar en az 6 yıl veya 12.000 çalışma saati olan uzatılmış bir hizmet ömrü elde etmelidir. Geri kazanılan enerjiyi depolamak için Li-iyon aküler eklenmiştir. Depolanan güç ile yeni Citaro FuelCELL Hybrid tek başına akü ile birkaç kilometre çalışabilir. Genelde, yeni yakıt pilli otobüslerin tasarımı düzenli seferlerde çalışan Mercedes-Benz Blue Tec hibrid otobüslerinki gibi büyük ölçüde aynıdır; bu otobüsler ayrıca elektrik enerjisini bir dizel jeneratörden alırlar. İyileştirilmiş yakıt pili bileşenleri ve Li-iyon akülerle hibridleşme sayesinde yeni Citaro FuelCELL Hybrid önceki üretimle karşılaştırıldığında hidrojen kullanımında hemen hemen %50 tasarruf sağlamıştır.

Toplam yakıt pili sistem verimliliği de iyileştirilmiştir. Yakıt pilli otobüs 250 km civarında bir menzile sahiptir.¹

Şekil 3.5: Yeni Citaro FuelCELL (yakıt pilli) hibrid otobüs



Kaynak: <http://www.daimler.com/> Mercedes-Benz Citaro FuelCELL Hybrid

Şekil 3.6' da Batı Avrupa' daki yolcu otobüslerinin en büyük üreticisi olan VAN HOOL marka otobüs görülmektedir. Belçika menşei olan şirket büyük bir çoğunluğu Avrupa olmak üzere birçok kıtaya yakıt pilli otobüs ihraç etmektedir.

Şekil 3.6: Yeni Van Hool yakıt pilli otobüs



Kaynak: <http://www.vanhool.be/FRA/transport-public/hybride-pile-a-combustible/folderFuelCell.pdf>

¹ <http://www.greencarcongress.com/2011/08/hamburg-putting-itsfirst-citaro-fuelcell-hybrid-buses-into-service-hamburger-hochbahn-ag-has-acquiredfour-mercedes-benz.html>.

3.6.4. Yakıt Pili Otobüslerin İşletme Maliyeti ve Yakıt Ekonomisi

Birçok ulaşım işletmecisi yakıt pilli otobüs endüstrisinin gelişmesine ve ileri ulaşım teknolojilerinin optimize edilmesine yardım etmeye devam etmektedir. Bu kullanımdaki gösteri programları şimdiki üretim yakıt pilli sistemlerin performansını doğrulamak ve çözüm gerektiren meseleleri belirlemek için gereklidir. 2011 Haziran ayının sonuna kadar, on iki yeni Van Hool yakıt pilli otobüsün dokuzu teslim edildi ve bunlarında yedisi hizmete girdi. Otobüsler 80.000 milden (128.000 km) fazla mil ve yakıt pili sistemlerinde toplam 7.653 saat topladılar. Burada sunulan sonuçlar AC Transit' de hizmete sokulan ilk beş yakıt pilli otobüsten gelen erken/ön bilgilerden oluşmaktadır (Chandler ve Eudy 2011).

Tablo 3.2 yakıt pilli ve dizel otobüsler için değerlendirme süresince karşılaştırmalı test sonuçlarını sunar.

Tablo 3.2: Farklı tip otobüslerin kilometre başına işletme maliyetleri

	Yakıt Pili	Dizel
Yakıt Maliyeti (\$/km)	0.96	0.42
Toplam Bakım Maliyeti (\$/km)	0.91	0.41
Toplam İşletme Maliyeti (\$/km)	1.87	0.83

Kaynak: Chandler ve Eudy 2011

Tablo 3.2' yi incelediğimizde, yakıt pilli otobüslerin dizel otobüslere göre toplam işletme, bakım ve yakıt maliyetlerinin neredeyse iki katından fazla olduğu görülmektedir. Yakıt maliyetinin bu kadar fazla olmasının sebebi muhtemelen hidrojenin elde edilmesinin çok pahalı ve karmaşık bir sistem olmasındandır.

Tablo 3.3 aynı temel tasarımlara sahip farklı lokasyonlardaki otobüslerin yakıt ekonomisini göstermektedir. Veriler dizel galon eşdeğeri başına mil ve km/litre olarak

verilmiştir (1 mil/galon=0.425 km/lt).¹ Üç lokasyondaki yakıt pilli otobüsler dizel ve CNG' li otobüsler ile karşılaştırıldığında yakıt ekonomisinde % 48 ile % 133 arasında değişen oranlarda iyileşme göstermiştir. Bu tablo ayrıca sonuçların filodan filoya değiştiğini göstermektedir. Sonuçlar hizmet çevrimi karakteristiklerini içeren (ortalama durma sayısı, ortalama hız ve boşta çalışma zamanı) gibi birçok faktörden etkilenmektedir. AC Transit için ortalama hız 9,8 mil/h (15,8 km/h); CTTRANSIT için 6,5 mil/h (10,4 km/h); SunLine için ise 13 mil/h (20,9 km/h) (Eudy 2011).

Tablo 3.3: Farklı lokasyonlardaki yakıt pilli otobüslerin yakıt ekonomisi

	Yakıt Pilleri Otobüs		Dizel Otobüs		CNG li Otobüs	
	mil/galon	km/litre	mil/galon	km/lt	mil/galon	km/litre
AC Transit	6,8	2,9	4,2	1,8	-	-
CTTRANSIT	5,5	2,3	3,7	1,6	-	-
SunLine	8,0	3,4	-	-	3,5	1,5

Kaynak: Živanović ve Nikolić 2012

Van Hool tarafından üç farklı otobüs filosu için sunulan NO_x ve PM emisyonları (yıl başına) ile ilgili veriler Tablo 3.4' de gösterilmiştir. Bu veriler yılda 50.000 km, ortalama hız 20 km/h ve güç tüketimi 50 kW/h alınarak hesaplanmıştır. 100 hibrid yakıt pilli otobüsün eşdeğer emisyon azaltım potansiyeli 3100 hektarlık bir orman alımına eşit bir CO₂ azaltımı ve 10 km' lik 4 şeritlik bir yolda giden arabalara eşit bir NO_x azaltımı verir.² Aşağıdaki sonuçlar yakıt pilli teknolojisi kullanan otobüslerin tüm çevresel faydalarını göstermektedir.

¹ <http://www.aqua-calc.com/convert/fuel-consumption/mile-per-gallon-to-liter-per-100-kilometer>

² <http://www.vanhool.be/FRA/transport-public/hybride-pile-a-combustible/Resources/folderFuelCell.pdf>

Tablo 3.4: Farklı tip otobüslerin NO_x ve PM emisyonlarının karşılaştırması

	NO _x (yılda)	PM (yılda)
100 Dizel Euro III otobüs	62,5 ton	1,25 ton
100 CNG li otobüs	25 ton	0,25 ton
100 Hibrid yakıt pilli otobüs	sıfır	sıfır

Kaynak: <http://www.vanhool.be/FRA/transport-public/hybride-pile-a-combustible/folderFuelCell.pdf>

4. ŞEHİR İÇİ TOPLU TAŞIMADA KULLANILAN ALTERNATİF OTOBÜS TAHRİK TEKNOLOJİLERİNİN FAYDA-MALİYET ANALİZLERİ

4.1. DÜNYADA YAPILAN ÖRNEK ÇALIŞMALAR

Bu bölümde hibrid otobüslerle ilgili dünyada yapılan örnek fayda-maliyet analizleri incelenmiştir. Bu amaçla National Renewable Energy Laboratory'nin (NREL) New York kent içi ulaşımında kullanılan dizel, CNG' li ve hibrid elektrikli toplu taşıma otobüslerinin performanslarını değerlendirdiği çalışma incelenmiştir. Bu çalışmada CNG' li ve birinci ve ikinci versiyon (Gen I ve Gen II) hibrid elektrikli tahrik sistemleri yakıt ekonomisi, mil başına bakım ve işletme maliyetleri bakımından kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar, CNG ve Gen II hibridler için hizmetteki ikinci yılları, Gen I hibridler için ise hizmetteki ikinci ve üçüncü yılları baz alınarak yapılmıştır. Konvansiyonel dizel otobüsler de diğer otobüsler ile yakıt ekonomisi kıyaslaması yapmak için dahil edilmiştir. Bu amaçla, Manhattanville (MTV) garındaki 10 adet Gen II hibrid otobüs değerlendirilmiştir. Bu 10 adet Gen II hibrid otobüs (değerlendirme yılı 1), Mother Clara Hale (MCH) garından 10 adet Gen I hibrid otobüsle (değerlendirme yılı 1 ve 2) kıyaslanmıştır. West Farms (WF) garındaki 10 adet CNG' li otobüs (değerlendirme yılı 1) ve MCH' den toplam 10 dizel otobüs ve WF' den 10 dizel otobüs karşılaştırılmıştır. Bu değerlendirmeye tabi tutulan otobüslerin tümü 40 ft'tir ve bu otobüsler tüm güzergahlara rasgele gönderilmiştir (Barnitt 2008). Hem CNG' li hem de hibrid tahrikli sistemler, standart dizel otobüslere alternatiftir ve petrol kullanımının ve emisyonların (genellikle partiküler madde ve azot oksitlerin) azaltılmasına izin verir. Ayrıca hibrid otobüslerin rejeneratif frenleme sayesinde sık balata değişimlerini azaltması beklenir.

Farklı tip otobüsler arasında değerlendirme yaparken birtakım verilere ihtiyaç vardır. Otobüslerin değerlendirilmesi için gerekli olan parametrelerden bazıları şunlardır:

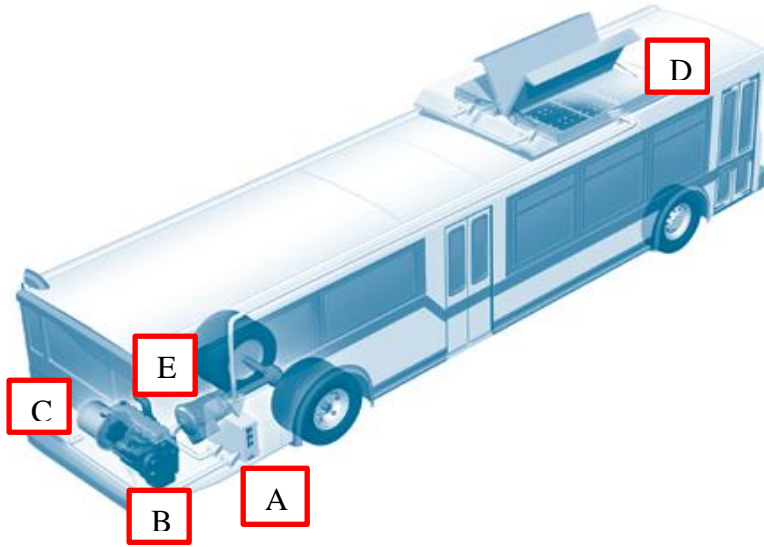
- i. 100 km'deki dizel yakıt tüketimi
- ii. 100 km'deki CNG yakıt tüketimi

- iii. Otobüslerin toplam aldıkları yol
- iv. Koruyucu bakım iş eylemleri, parça listeleri, işgücü kayıtları ve ilgili bakım ve arıza dokümanları

Bu parametrelerden özellikle bakım ve arıza dokümanları otobüslere ait işletme maliyetlerinin hesaplanmasında önem arz etmektedir.

New York' daki ulaşım otoritesinin kullandığı hibrid otobüsler 'Orion Bus Endüstrisi' tarafından üretilir ve aşağıda belirtilen 'BAE Systems HybriDrive' tahrik sistemini kullanmaktadır. Bu tahrik sistemi dizel olup, 5.9 lt motor hacmine sahiptir.¹ Şekil 4.1' de New York' da kent içi ulaşımında kullanılan hibrid otobüs yapısı görülmektedir. Burada kullanılan otobüsler seri hibrid yapıya sahiptir.

Şekil 4.1: New York' da kent içi ulaşımında kullanılan hibrid otobüs yapısı



Kaynak: <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/33397.pdf>

¹ <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/33397.pdf>

- A. Tahrik kontrol sistemi tüm sistem bileşenlerini yönetir. Sistem bileşenleri arasındaki enerji akışını kontrol eder. Araç için gerekli olan optimum gücü belirler. Yakıt ekonomisinin sağlanması ve emisyonların azaltılması bakımından bu sistemin yönetimi önemlidir.
- B. İYM, jeneratörü tahrik ederek elektrik motoru için gerekli olan enerjiyi sağlar.
- C. Jeneratör elektrik motoruna elektrik enerjisi sağlar ve aküleri şarj eder. Jeneratör sadece seri hibrid sistemlerde bulunmaktadır. Paralel hibrid sistemde jeneratör yoktur.
- D. Aküler jeneratörden gelen fazla enerjiyi depolarlar. Ayrıca frenleme sırasında kaybolan enerjiyi yakalayarak depolarlar. Aküler depoladıkları bu enerjiyi daha sonra araç hızlanırken ve yokuş çıkarken elektrik motoruna enerji beslemede kullanırlar.
- E. Elektrik motoru tekerlekleri tahrik etmekte kullanılır. Frenleme sırasında elektrik motoru bir jeneratör gibi davranarak kaybolan enerjiyi geri kazanır ve bu enerjiyi akülerde depolar. Bu olaya “rejeneratif frenleme” denir.

Gen II ve Gen I hibridler arasında pek çok farklılık vardır. Bu farklılıklardan bazıları (gölgelenmiş olanlar) Tablo 4.1’ de sunulmuştur. Ayrıca CNG’ li ve dizel otobüslere ait detaylarda karşılaştırmaya dahil edilmiştir.

Tablo 4.1: Araç sistem tanımlamaları

Otobüs Çalışma Grubu	Gen II Hibrid	Gen I Hibrid	CNG	Dizel
Otobüs İmalatçısı ve modeli	Orion VII, düşük tabanlı	Orion VII, düşük tabanlı	Orion VII, düşük tabanlı	Orion V, yüksek tabanlı
Model yılı	2004	2002	2002	1994, 1999
Uzunluk/genişlik/Yükseklik	40 ft/102 in./132 in.	40 ft/102 in./132 in.	40 ft/102 in./135 in.	40 ft/102 in./121 in.
Brüt araç ağırlığı/yüksüz araç ağırlığı	42,540/31,840 lb	42,540/31,840 lb	42,540/31,400 lbs	40,000/28,500 lb
Motor İmalatçısı ve modeli	Cummins ISB (EGR ile donatılmış)	Cummins ISB (EGR ile donatılmamış)	DDC S50G (EGR ile donatılmamış)	DDC S50 (EGR ile donatılmamış)
Emisyon sertifikasyon seviyesi (g/bhp-hr)	NO _x 2.5 PM 0.05	NO _x 4.0 PM 0.05		
Nominal beygircü	270 bhp @ 2,500rpm	270 bhp @ 2,500rpm	275 bhp @ 2,100rpm	275 bhp @ 2,100rpm
Nominal tork	660 lb-ft @ 1,600 rpm	660 lb-ft @ 1,600 rpm	900 lb-ft @ 1,200 rpm	890 lb-ft @ 1,200 rpm
Emisyon malzemesi	Johnson Matthey CRT	Engelhart DPX	Yok	Retrofit DFP, Johnson Matthey
Hız kesici, yavaşlatıcı fren/rejeneratif frenleme	Rejeneratif frenleme	Rejeneratif frenleme	Hız kesici, yavaşlatıcı	Hız kesici, yavaşlatıcı
Jeneratör montajı	Direk monteli (kaplin yok)	Kaplin	NA	NA
Yakıt kapasitesi	100 gal	100 gal	125 dizel galon eşdeğeri	125 galon
Otobüs satın alma maliyeti (\$)	385,000	385,000	313,000	290,000

Kaynak: Barnitt 2008

Tablo 4.1' i incelediğimizde, Gen I hibridlerin geliştirilmiş versiyonu olan Gen II hibridlerde egzoz gazı emisyonlarını azaltma konusunda birtakım iyileştirmeler yapıldığını görmekteyiz. Gen I hibridlerde egzoz gazı resirkülasyon (EGR) sistemi bulunmazken, Gen II hibridler EGR sistemi ile donatılmıştır. EGR sistemi bir egzoz gazı dönüşüm sistemidir. Yanma sonucu yanma odasında yüksek sıcaklıklarda ve yüksek basınç altında, azot oksitleri meydana gelir. Bunu önlemek için egzoz gazlarının küçük bir bölümü emme manifolduna geri gönderilerek yanma odasında meydana gelen

sıcaklık ve basınç düşürülür.¹ Ayrıca Gen II hibridlerdeki NOx seviyesi EGR sisteminin varlığından dolayı Gen I hibridlere göre azalmıştır.

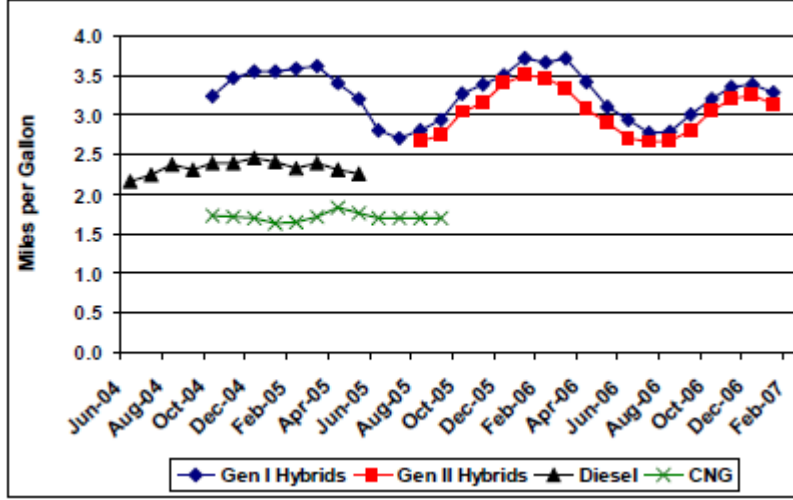
Araç ağırlıkları açısından incelediğimizde hibrid otobüslerin konvansiyonel dizel otobüslerden daha ağır oldukları görülmektedir. Bunun sebebi ise hibrid sistemlerdeki extra akü ağırlıklarıdır. Ayrıca Gen II hibridlerdeki jeneratör montajında kaplin kullanılmaması bakım maliyetleri açısından bir avantajdır.

Otobüslerin satın alma maliyetlerinin dışında birtakım altyapı ve yardımcı ekipman gereksiniminden kaynaklı maliyetlerde bulunmaktadır. Örneğin NREL' nin yapmış olduğu değerlendirme analizine konu olan hibrid otobüsler kurşun asit akü kullanmaktadır. BAE Systems tarafından kullanılan kurşun-asit aküler, tahmini 3 yıllık bir kullanım ömrüne sahip olacak şekilde nitelendirilir ve bu akülerin 6 aylık aralıklarla şartlandırma ihtiyacı vardır. Hibrid otobüs işleten istasyonlar, her birinin birim maliyeti yaklaşık olarak 70,000 \$ olan iki adet akü şartlandırıcısı ile donatılmıştır. Kurşun-asit akülerin şartlandırılması (havalandırılması) önleyici bakımın bir parçasıdır (Barnitt 2008). Kurşun asit aküler için NiMH ve Li-iyon akülere kıyasla birtakım ek yatırım maliyetleri gerekmektedir. CNG' li otobüslerde ise doğalgazın otobüslere kısa bir sürede doldurulması için bir basınçlandırma istasyonuna ihtiyaç vardır. Basınçlandırma istasyonu tesisi yer gereksinimi gibi birtakım sorunları da beraberinde getirmektedir.

1

http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/motorlu_araclar/moduller/benzinli_motorlar_in_yakit_ve_atesleme_sistemleri3.pdf

Şekil 4.2: Tüm otobüs sistemleri için ortalama yakıt ekonomisi



Kaynak: Barnitt 2008

Şekil 4.2 New York’ da kent içi ulaşımda kullanılan dizel, CNG’ li, Gen I ve Gen II hibrid otobüsler için aylık ortalama yakıt ekonomisini göstermektedir. Aylık yakıt ekonomisi CNG’ li otobüsler için mil/dizel galon olarak gösterilmiştir. Şekil 4.2’ yi incelediğimizde, Gen I hibrid otobüsler, CNG’ li ve konvansiyonel dizel otobüslere göre daha yüksek yakıt ekonomisi sergilemiştir. Gen I ve Gen II hibrid otobüsleri karşılaştırdığımızda ise Gen I hibrid otobüslerin Gen II hibrid otobüslere göre az da olsa daha iyi bir yakıt ekonomisi sergilediklerini görmekteyiz. Ayrıca Şekil 4.2’ den de görüldüğü gibi Gen I ve Gen II hibrid otobüslerin yakıt ekonomisinde mevsimsel dalgalanma görülmektedir. Bu dalgalanma dizel ve CNG’ li otobüsler için belirgin değildir. Hibrid otobüsler için ise yakıt ekonomisindeki mevsimsel dalgalanmada belirgin bir fark vardır. Gen II, Gen I, CNG’ li ve dizel otobüs gruplarında yaz ayları süresince yakıt ekonomisinde sırasıyla belli oranlarda azalmalar olmuştur. Barnitt’ e göre bu dalgalanmanın sebebi klima yükleridir. Çünkü hibrid otobüsler CNG’ li ve konvansiyonel dizel otobüslere göre daha küçük boyutlu motor kullanırlar. Bu nedenle klima yükü, küçük olan motor üzerinde daha belirgin bir etkiye sahiptir (Barnitt 2008).

Tablo 4.2 Gen II hibrid, Gen I hibrid ve CNG’ li otobüsler için toplam bakım maliyetini gösterir. Tablo 4.2’ yi incelediğimizde değerlendirme yılı 1 süresince, Gen II hibridlerin

mil başına toplam bakım maliyetlerinin Gen I hibridlerden ve CNG' li otobüslerden daha düşük olduğu görülmektedir. Daha düşük Gen II hibrid bakım maliyetleri muhtemelen Gen I' den Gen II' ye geçişte yapılan iyileştirmelerden kaynaklanmış olabilir. Ayrıca her iki hibrid otobüs grubunun bakım maliyetlerinin CNG' li otobüslerin bakım maliyetinden daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 4.2: Toplam bakım maliyetleri

Otobüs Tipi	Değerlendirme Yılı	Mil (Bakım esası)	Parçalar (\$)	İşgücü Saatleri	Maliyet (\$/mil)
Gen II Hibrid	1	250,460	32,389	3,096	0.75
Gen I Hibrid	1	285,349	61,408	5,793	1.23
Gen I Hibrid	2	268,750	86,918	5,869	1.42
CNG	1	275,444	99,980	5,133	1.29

Kaynak: Barnitt 2008

Tablo 4.3 Gen II ve Gen I hibrid çalışma gruplarının mil başına yakıt ve işletme maliyetlerini özetlemektedir. Gen II hibrid otobüsler için mil başına toplam işletme maliyeti, Gen I hibridlerden ve CNG' li otobüslerden daha azdır. Tablo 4.3' e bakıldığında Gen II hibridlerin işletme maliyetinin Gen I hibridlere göre daha az olduğu görülmektedir. Barnitt' e göre Gen I hibridlerle olan bu farklılık, işletmedeki Gen II hibridlerin daha düşük bakım maliyeti ile çalışmasındandır. CNG' li otobüslerle olan fark ise hem yakıt hem de bakım maliyetlerinden kaynaklanmaktadır (Barnitt 2008).

Tablo 4.3: Mil başına işletme maliyetinin özeti

Çalışma Grubu	Değerlendirme Yılı	Yakıt \$/Mil	Bakım \$/Mil	Toplam \$/Mil
Gen II Hibrid	1	0.66	0.75	1.41
Gen I Hibrid	1	0.62	1.23	1.85
Gen I Hibrid	2	0.62	1.42	2.04
CNG	1	1.02	1.29	2.31

Kaynak: Barnitt 2008

Hibrid tahrik sistemlerindeki rejeneratif frenleme ile balata sistemi bakım maliyetlerinin daha da azalması beklenmektedir. Tablo 4.4’ de Gen I hibridler ile CNG’ li otobüsler balata değişimi açısından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada Gen I hibrid otobüslerin ilk balata değişimi gerektirmesinden önce CNG’ li otobüslerden 2 kat daha fazla mil biriktirdiği görülmektedir. Bu durum, rejeneratif frenlemenin balata değişimi üzerindeki etkisini ve dolayısı ile bakım maliyetlerinin azaltılması bakımından ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.4: Balata değişim karşılaştırması

Otobüs Numarası	Tarih	Değişim Tipi	Odyometre Ölçümü
Gen I Hibrid Otobüsler			
6367	02/21/2006	4 tekerlek	50,807
6368	07/25/2006	2 tekerlek	66,455
6368	12/28/2006	2 tekerlek	74,523
6369	05/04/2005	2 tekerlek	57,073
6375	04/11/2006	4 tekerlek	54,685
6378	09/26/2006	4 tekerlek	68,444
6379	03/13/2006	4 tekerlek	49,272
6380	01/26/2006	2 tekerlek	48,685
6381	02/28/2006	4 tekerlek	50,267
6382	11/02/2005	4 tekerlek	45,217
6387	07/07/2006	4 tekerlek	59,769
	Ortalama	İlk Değişim	55,067
CNG li Otobüsler			
7657	07/08/2004	4 tekerlek	20,288
7662	09/22/2004	2 tekerlek	20,043
7666	01/01/2005	4 tekerlek	28,759
7670	10/08/2004	2 tekerlek	25,924
7677	01/14/2005	2 tekerlek	24,730
7688	06/22/2005	4 tekerlek	33,581
	Ortalama	İlk Değişim	25,554

Kaynak: Barnitt 2008

Londra' da hibrid otobüsler üzerine yapılan bir sistem mühendisliği araştırmasına göre konvansiyonel dizel otobüslerle kıyaslandığında, hibrid otobüsler önemli çevresel faydalar sağlamaktadır, bu faydalar aşağıda belirtilmiştir: (Emes vd. 2009)

- i. NO_x miktarını %89 oranında azaltma
- ii. CO miktarını %83 oranında azaltma
- iii. Yakıt kullanımını %40 azaltma
- iv. CO₂ miktarını %38 oranında azaltma
- v. Algılanan ses seviyelerinde %30 oranında azalma (gürültü %78 desibelden %74 desibebe kadar azalmıştır)

Hibrid otobüslerin özellikle NO_x ve CO miktarını önemli ölçüde azalttığı göze çarpmaktadır. Yakıt tüketimine baktığımızda ise kayda değer bir azalma sağlanmıştır.

5. ŞEHİR İÇİ ULAŞIMDA KULLANILACAK 100 ADET DİZEL, CNG'Lİ VE HİBRİD ELEKTRİKLİ OTOBÜSÜN ÖMÜR BOYU MALİYET ANALİZİ

Bu çalışmanın amacı, Şehir içi ulaşımda kullanılacak dizel, CNG ve dizel hibrid-elektrikli üç tip otobüs teknolojisini için 2013-2025 yıllarını kapsayan 12 yıllık bir zaman dilimindeki ömür boyu maliyetlerin (Life Cycle Cost) belirlenmesi ve karşılaştırılmasıdır.

Otobüslerin ömür boyu maliyet hesaplamalarında kullanılacak varsayımlar Şunlardır:

- i. Hesaplamalarda yakıt pilli otobüslere ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olduğundan bu analizde yer verilmemiŐtir. Yakıt pilli otobüsler 1 milyon dolar ile 3 milyon dolar gibi bir fiyata mal olmaktadır (Callaghan ve Lynch 2005).
- ii. Otobüslerin tümü düşük taban tasarımı ve 12 m uzunluğa sahiptir.
- iii. Sürücü ve mekanik eğitim faaliyetlerinin maliyeti dikkate alınmamıŐtır, fakat mekanik zaman bakım maliyetlerinde dikkate alınmıştır.
- iv. Sürücü işletme maliyetleri dikkate alınmamıŐtır.
- v. Bakım maliyetlerinin 12 yıl boyunca sabit olduğuna varsayılmıştır.
- vi. Karşılaştırmada 100 adet dizel otobüs, 100 adet CNG' li otobüs ve 100 adet dizel hibrid-elektrikli otobüs baz alınmıştır.

ÖMÜR BOYU MALİYET MODELİ (Life Cycle Cost Model) BİLEŞENLERİ

1. Yatırım Maliyetleri

- a) Otobüs satın alma maliyeti
- b) Altyapı maliyetleri (doğal gaz dolum istasyonu, depo modifikasyonları, özel aletler)

Tablo 5.1: Otobüs başına toplam yatırım maliyetleri

	CNG	Dizel	Dizel Hibrid
Toplam Yatırım Maliyeti	676.308 TL	535.650 TL	895.252 TL
Depo Modifikasyonu	15.638 TL	0 TL	2.502 TL
Dolum İstasyonu	35.745 TL	0 TL	0 TL
Araç Satın Alma Maliyeti	624.925 TL	535.650 TL	892.750 TL

NOT:

- i. Depo modifikasyonu ve dolum istasyonu maliyetleri ‘Transit Bus Life Cycle Cost and 2007 Emissions Estimation Final Report 2007/U.S. Department of Transportation’ adlı rapordan alınmıştır ve TL’ ye çevrilmiştir.
- ii. Dizel ve dizel hibrid-elektrikli otobüs satın alma maliyetleri “Hallmark, Wang, Oui and Sperry, Ekim 2012, IOWA State University, TECH BRIEF/Assessing the Costs for Hybrid Versus Regular Transit Buses” adlı çalışmadan alınmıştır ve TL ye çevrilmiştir (40ft (12 m) lik bir dizel otobüs 300.000 \$ ve 40 ft lik bir dizel hibrid-elektrikli otobüs 500.000 \$).
- iii. Hesaplamalarda dolar kuru 1.78 TL olarak alınmıştır.

- iv. CNG' li otobüsün satın alma maliyetinin bir dizel otobüsün satın alma maliyetinden 50.000 \$ fazla olduğu (350.000 \$) varsayılmıştır.

2. İşletme Maliyetleri

- a) Basınçlandırma için elektrik gereksinimi (doğalgazı araca basmak için kullanılan kompresörlerin elektrik tüketim maliyeti)
- b) Tesis bakımı
- c) Tahrikle ilgili sistemlerin maliyeti
- d) Akü (batarya ya da pil) değiştirme maliyeti
- e) Yakıt tüketim maliyeti

Yakıt Tüketim Maliyetleri

Yakıt Tüketim Maliyeti Hesaplamasında Kullanılacak Veriler:

- i. Her bir otobüsün kullanım ömrü $T=12$ yıl olarak alınmıştır.
- ii. Hesaplama 100 adet CNG' li, 100 adet dizel ve 100 adet dizel hibrid-elektrikli otobüs baz alınmıştır.
- iii. Bir dizel hibrid-elektrikli otobüsün konvansiyonel bir dizel otobüse göre %33 yakıt tasarrufu sağladığı kabul edilmiştir.
- iv. Tüm otobüsler 12 m (40 ft) uzunluğa sahiptir.
- v. Otobüslerin 1 yıl boyunca $X=60.000$ km yol yaptıkları varsayılmıştır.

- vi. Konvansiyonel bir dizel otobüsün 100 km başına yakıt tüketimi $YT=48.7$ lt alınmıştır. Standart bir hibrid dizel otobüsün 100 km başına yakıt tüketimi $YT=32.8$ lt alınmıştır (Gören 2012).
- vii. Bir CNG' li otobüsün yakıt tüketimi 100 km başına 32 m^3 alınmıştır. (Yetişken ve Ekmekçi 2009).
- viii. 1 lt dizel pompa satış fiyatı (SF) 4.10 TL alınmıştır.¹
- ix. 1 m^3 CNG satış fiyatı dizel pompa satış fiyatının yarısı kabul edilerek 2.05 TL alınmıştır.

Yukarıdaki verilerden yola çıkarak her bir otobüs teknolojisi için toplam yakıt tüketimini hesaplayalım:

1 adet dizel hibrid-elektrikli otobüsün yıllık yakıt tüketimi:

$$\begin{aligned}
 \text{Dizel Hibrid-Elektrikli Otobüs YT} &= \text{Alınan Yol} \left(\frac{\text{km}}{\text{yıl}} \right) \times \text{YT} \left(\frac{\text{lt}}{100 \text{ km}} \right) \\
 &= 60.000 \left(\frac{\text{km}}{\text{yıl}} \right) \times \frac{32.8 \text{ lt}}{100 \text{ km}} \\
 &= 19680 \frac{\text{lt}}{\text{yıl}}
 \end{aligned}$$

1 adet dizel hibrid-elektrikli otobüsün yıllık yakıt tüketim maliyeti:

$$\text{YTM} = \text{Yıllık toplam YT} \left(\frac{\text{lt}}{\text{yıl}} \right) \times \text{SF} \left(\frac{\text{TL}}{\text{lt}} \right)$$

¹ <http://www.shell.com.tr> (16.04.2013 dizel pompa satış fiyatı)

$$= 19680 \frac{\text{lt}}{\text{yil}} \times 4.10 \frac{\text{TL}}{\text{lt}}$$

$$= 80688 \frac{\text{TL}}{\text{yil}}$$

100 adet dizel hibrid-elektrikli otobüsün 12 yıllık yakıt tüketim maliyeti:

$$\text{YTM}^1 = \text{YTM} \left(\frac{\text{TL}}{\text{yil}} \right) \times n \text{ (adet)} \times T \text{ (yıl)}$$

$$= 80688 \left(\frac{\text{TL}}{\text{yil}} \right) \times 100 \times 12 \text{ yıl}$$

$$= 96.825.600 \text{ TL}$$

1 adet dizel otobüsün yıllık yakıt tüketimi:

$$\text{Dizel Otobüs YT} = \text{Alınan Yol} \left(\frac{\text{km}}{\text{yil}} \right) \times \text{YT} \left(\frac{\text{lt}}{100 \text{ km}} \right)$$

$$= 60.000 \left(\frac{\text{km}}{\text{yil}} \right) \times \frac{48.7 \text{ lt}}{100 \text{ km}}$$

$$= 29220 \frac{\text{lt}}{\text{yil}}$$

1 adet dizel otobüsün yıllık yakıt tüketim maliyeti:

$$\text{YTM} = \text{Yıllık toplam YT} \left(\frac{\text{lt}}{\text{yil}} \right) \times \text{SF} \left(\frac{\text{TL}}{\text{lt}} \right)$$

$$= 29220 \frac{\text{lt}}{\text{yil}} \times 4.10 \frac{\text{TL}}{\text{lt}}$$

$$= 119802 \frac{\text{TL}}{\text{yil}}$$

100 adet dizel otobüsün 12 yıllık yakıt tüketim maliyeti:

$$\begin{aligned} \text{YTM}^1 &= \text{YTM} \left(\frac{\text{TL}}{\text{yıl}} \right) \times n \text{ (adet)} \times T \text{ (yıl)} \\ &= 119802 \left(\frac{\text{TL}}{\text{yıl}} \right) \times 100 \times 12 \text{ yıl} \\ &= 143.762.400 \text{ TL} \end{aligned}$$

1 adet CNG li otobüsün yıllık yakıt tüketimi:

$$\begin{aligned} \text{CNG li Otobüs YT} &= \text{Alınan Yol} \left(\frac{\text{km}}{\text{yıl}} \right) \times \text{YT} \left(\frac{\text{m}^3}{100 \text{ km}} \right) \\ &= 60.000 \left(\frac{\text{km}}{\text{yıl}} \right) \times \frac{32 \text{ m}^3}{100 \text{ km}} \\ &= 19200 \frac{\text{m}^3}{\text{yıl}} \end{aligned}$$

1 adet CNG li otobüsün yıllık yakıt tüketim maliyeti:

$$\begin{aligned} \text{YTM} &= \text{Yıllık toplam YT} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{yıl}} \right) \times \text{SF} \left(\frac{\text{TL}}{\text{m}^3} \right) \\ &= 19200 \frac{\text{m}^3}{\text{yıl}} \times 2.05 \frac{\text{TL}}{\text{m}^3} \\ &= 39360 \frac{\text{TL}}{\text{yıl}} \end{aligned}$$

100 adet CNG li otobüsün 12 yıllık yakıt tüketim maliyeti:

$$\text{YTM}^1 = \text{YTM} \left(\frac{\text{TL}}{\text{yıl}} \right) \times n \text{ (adet)} \times T \text{ (yıl)}$$

$$= 39360 \left(\frac{\text{TL}}{\text{yıl}} \right) \times 100 \times 12 \text{ yıl}$$

$$= 47.232.000 \text{ TL}$$

Akü Değişirme Maliyeti:

Bu analizde dizel hibrid elektrikli otobüslerin NiMH batarya kullanacağı varsayılmıştır. NiMH bataryanın 5 ila 7 yıl kadar bir kullanım ömrü vardır (Callaghan ve Lynch 2005). Yalnızca dizel hibrid otobüsler için geçerli olan akü değişirme maliyeti hesaplamasında; 12 yıl boyunca otobüslerin % 50 sinin 2 akü değişimi yapacağı ve diğer % 50 lik kısmının ise 1 akü değişimi yapacağı varsayılmış ve akü değişirme maliyeti 40.000 \$ alınmıştır.¹ Buna göre:

$$\text{Akü değişirme maliyeti} = 40.000 (0.5 \times 2 + 0.5 \times 1)$$

$$= 60.000 \$ (107.331 \text{ TL})$$

Tablo 5.2: Otobüs başına 12 yıllık toplam işletme maliyetleri

	CNG	Dizel	Dizel Hibrid
Toplam	661.666 TL	1.593.197 TL	1.220.350 TL
Kompresör elektrik tüketim maliyeti	33.937 TL	0 TL	0 TL
Tesis Bakımı	43.634 TL	37.000 TL	31.200 TL
Tahrikle ilgili sistemlerin bakımı	111.775 TL	118.573 TL	113.563 TL
Akü değişirme	0 TL	0 TL	107.331 TL
Yakıt tüketim maliyetleri	472.320 TL	1.437.624 TL	968.256 TL

¹ Transit Bus Life Cycle Cost and 2007 Emissions Estimation Final Report 2007

Kompresör elektrik tüketim maliyeti, tesis bakımı ve tahrik sistemi ile ilgili maliyetler, ‘Transit Bus Life Cycle Cost and 2007 Emissions Estimation Final Report 2007/U.S. Department of Transportation’ adlı rapordan alınmıştır ve TL’ ye çevrilmiştir.

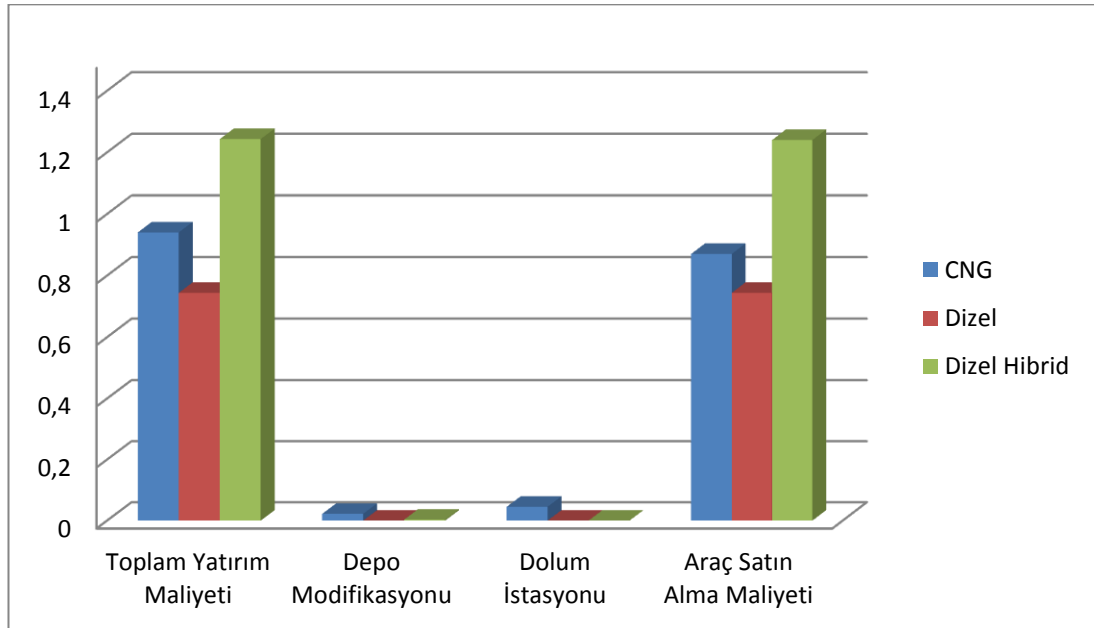
Otobüs km başına yatırım maliyetleri

$$\text{Otobüs km başına yatırım maliyetleri} = \frac{\text{Yatırım Maliyeti}}{12 \text{ yıl} \times 60000 \text{ km}}$$

Tablo 5.3: Otobüs km başına yatırım maliyetleri

	CNG	Dizel	Dizel Hibrid
Toplam Yatırım Maliyeti	0.940 TL	0.744 TL	1.243 TL
Depo Modifikasyonu	0.022 TL	0 TL	0.003 TL
Dolum İstasyonu	0.045 TL	0 TL	0 TL
Araç Satın Alma Maliyeti	0.870 TL	0.744 TL	1.240 TL

Şekil 5.1: Otobüs km başına yatırım maliyetleri (yıllık 60.000 km)



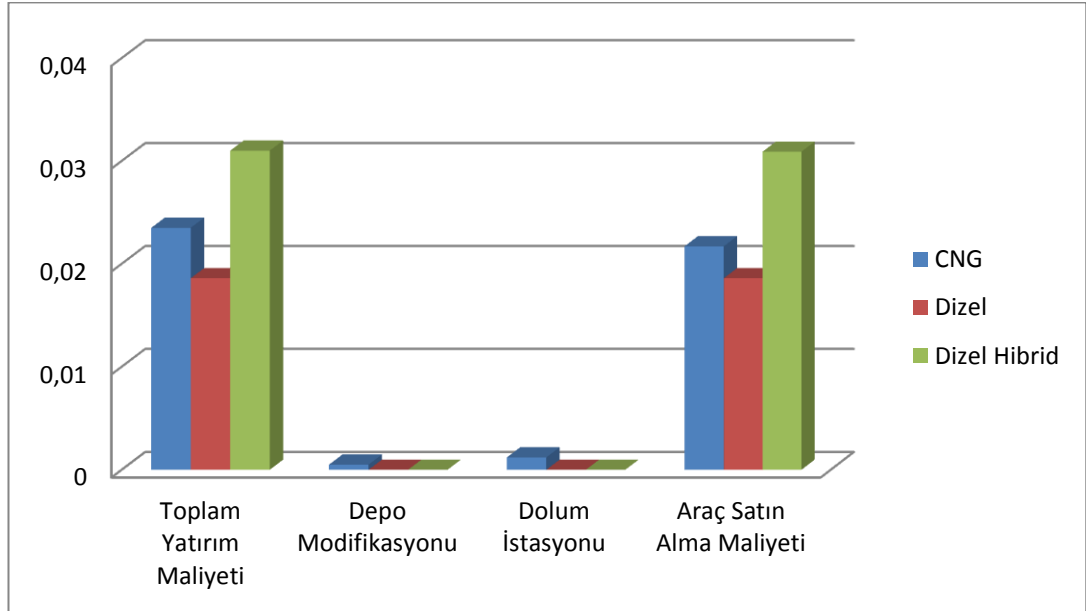
Otobüs km koltuk başına yatırım maliyetleri

$$\text{Otobüs km koltuk başına yatırım maliyetleri} = \frac{\text{Yatırım Maliyeti}}{12 \text{ yıl} \times 40 \text{ koltuk} \times 60000 \text{ km}}$$

Tablo 5.4: Otobüs km koltuk başına yatırım maliyetleri (40 koltuk)

	CNG	Dizel	Dizel Hibrid
Toplam Yatırım Maliyeti	0.0235 TL	0.0186 TL	0.0310 TL
Depo Modifikasyonu	0.0005 TL	0.0000 TL	0.0000 TL
Dolum İstasyonu	0.0012 TL	0.0000 TL	0.0000 TL
Araç Satın Alma Maliyeti	0.0217 TL	0.0186 TL	0.0309 TL

Şekil 5.2: Otobüs km koltuk başına yatırım maliyetleri (40 koltuk)



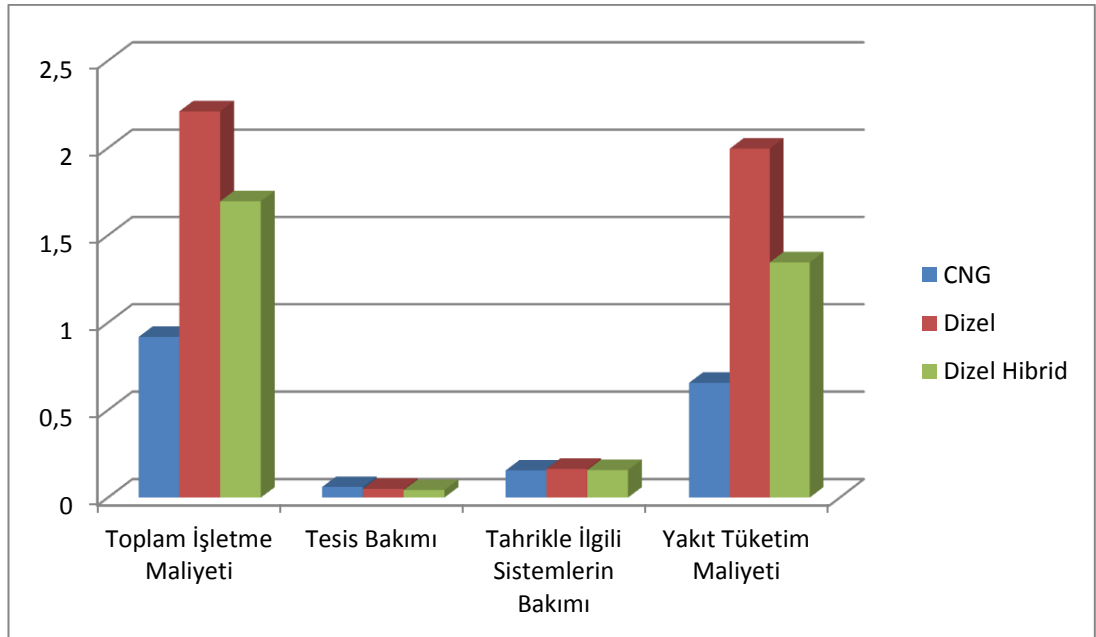
Otobüs km başına işletme maliyetleri

$$\text{Otobüs km başına işletme maliyetleri} = \frac{\text{İşletme Maliyeti}}{12 \text{ yıl} \times 60000 \text{ km}}$$

Tablo 5.5: Otobüs km başına işletme maliyetleri

	CNG	Dizel	Dizel Hibrid
Toplam İşletme Maliyeti	0.918 TL	2.210 TL	1.695 TL
Kompresör elektrik tüketim maliyeti	0.047 TL	0.000 TL	0.000 TL
Tesis Bakımı	0.060 TL	0.050 TL	0.043 TL
Tahrikle ilgili sistemlerin bakımı	0.155 TL	0.164 TL	0.157 TL
Akü değiştirme	0.000 TL	0.000 TL	0.150 TL
Yakıt tüketim maliyetleri	0.656 TL	1.996 TL	1.345 TL

Şekil 5.3: Otobüs km başına işletme maliyetleri (60.000 km)



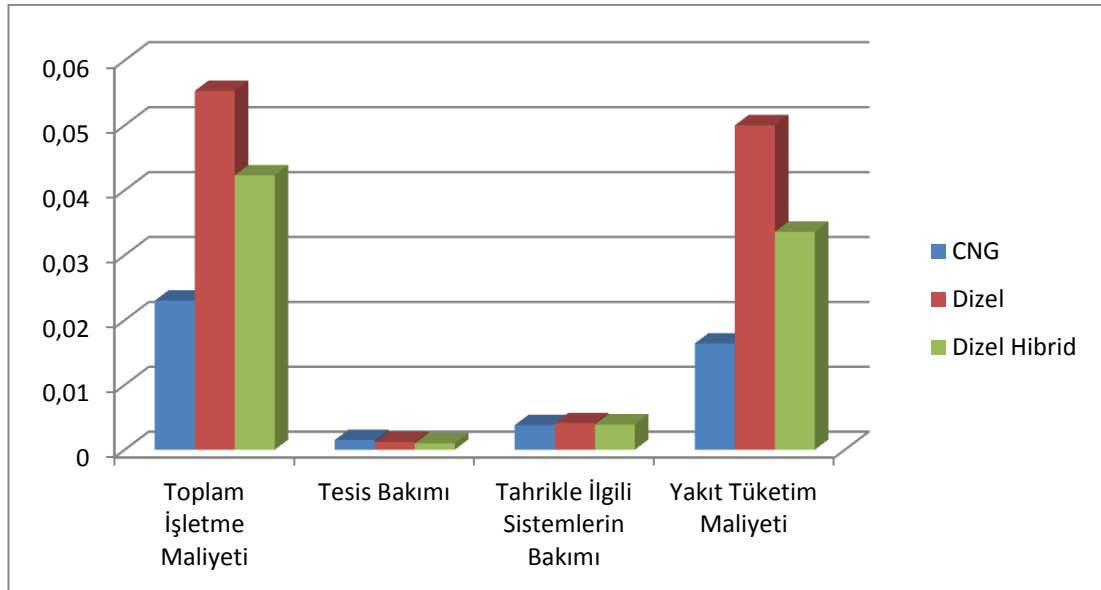
Otobüs km koltuk başına işletme maliyetleri

$$\text{Otobüs km koltuk başına işletme maliyetleri} = \frac{\text{İşletme Maliyeti}}{12 \text{ yıl} \times 40 \text{ koltuk} \times 60000 \text{ km}}$$

Tablo 5.6: Otobüs km koltuk başına işletme maliyetleri (40 koltuk)

	CNG	Dizel	Dizel Hibrid
Toplam İşletme Maliyeti	0.0230 TL	0.0553 TL	0.0423 TL
Kompresör elektrik tüketim maliyeti	0.0012 TL	0.0000 TL	0.0000 TL
Tesis Bakımı	0.0015 TL	0.0012 TL	0.0010 TL
Tahrikle ilgili sistemlerin bakımı	0.0038 TL	0.0041 TL	0.0039 TL
Akü değiştirme	0.0000 TL	0.0000 TL	0.0037 TL
Yakıt tüketim maliyetleri	0.0164 TL	0.0500 TL	0.0336 TL

Şekil 5.4: Otobüs km koltuk başına işletme maliyetleri (40 koltuk)



Tablo 5.7: 100 adet otobüsün toplam ömür boyu maliyeti (life cycle cost)

	CNG	Dizel	Dizel Hibrid
Toplam Yatırım ve İşletme Maliyetleri	133.797.400 TL	212.884.700 TL	211.560.200 TL
Depo Modifikasyonu	1.563.800 TL	0 TL	250.200 TL
Dolum İstasyonu	3.574.500 TL	0 TL	0 TL
Araç Satın Alma Maliyeti	62.492.500 TL	53.565.000 TL	89.275.000 TL
Kompresör Elektrik Tüketim Maliyeti	3.393.700 TL	0 TL	0 TL
Tesis Bakımı	4.363.400 TL	3.700.000 TL	3.120.000 TL
Tahrikle ilgili Sistemlerin Bakımı	11.177.500 TL	11.857.300 TL	11.356.300 TL
Akü Değişirme	0 TL	0 TL	10.733.100 TL
Yakıt Tüketim Maliyetleri	47.232.000 TL	143.762.400 TL	96.825.600 TL

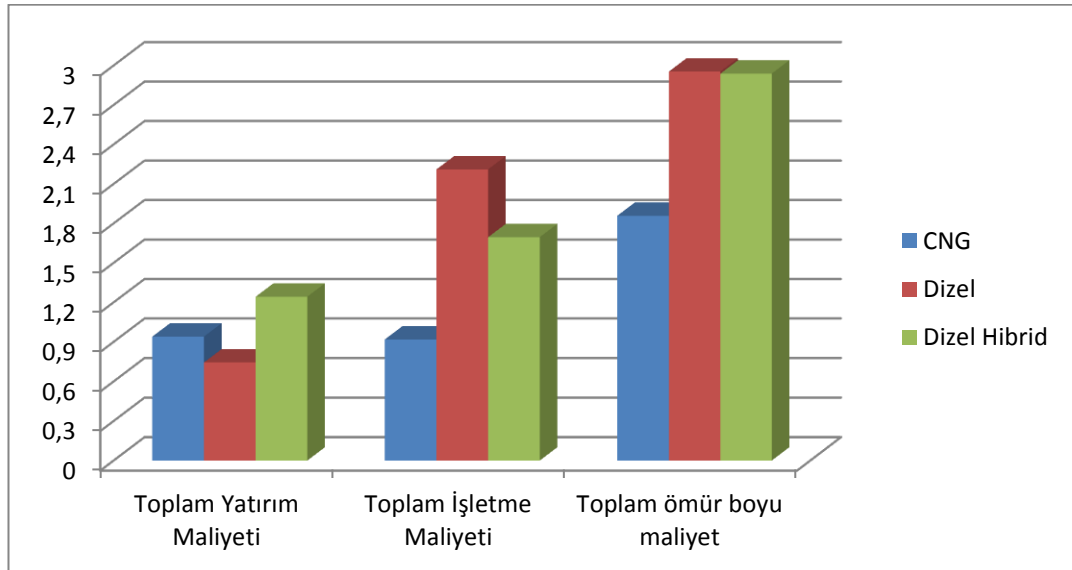
Otobüs km başına ömür boyu maliyet:

$$\text{Otobüs km başına ömür boyu maliyet} = \frac{\text{Toplam yatırım} + \text{işletme maliyeti}}{12 \text{ yıl} \times 100 \text{ adet} \times 60000 \text{ km}}$$

Tablo 5.8: Otobüs km başına ömür boyu maliyet (60.000 km)

	CNG	Dizel	Dizel Hibrid
Toplam Yatırım ve İşletme Maliyetleri	1.8580 TL	2.9540 TL	2.9380 TL
Depo Modifikasyonu	0.0220 TL	0.0000 TL	0.0030 TL
Dolum İstasyonu	0.0450 TL	0.0000 TL	0.0000 TL
Araç Satın Alma Maliyeti	0.8700 TL	0.7440 TL	1.2400 TL
Kompresör Elektrik Tüketim Maliyeti	0.0470 TL	0.0000 TL	0.0000 TL
Tesis Bakımı	0.0600 TL	0.0500 TL	0.0430 TL
Tahrikle ilgili Sistemlerin Bakımı	0.1550 TL	0.1640 TL	0.1570 TL
Akü Değişirme	0.0000 TL	0.0000 TL	0.1500 TL
Yakıt Tüketim Maliyetleri	0.6560 TL	1.9960 TL	1.3450 TL

Şekil 5.5: Otobüs km başına ömür boyu maliyet (60.000 km)



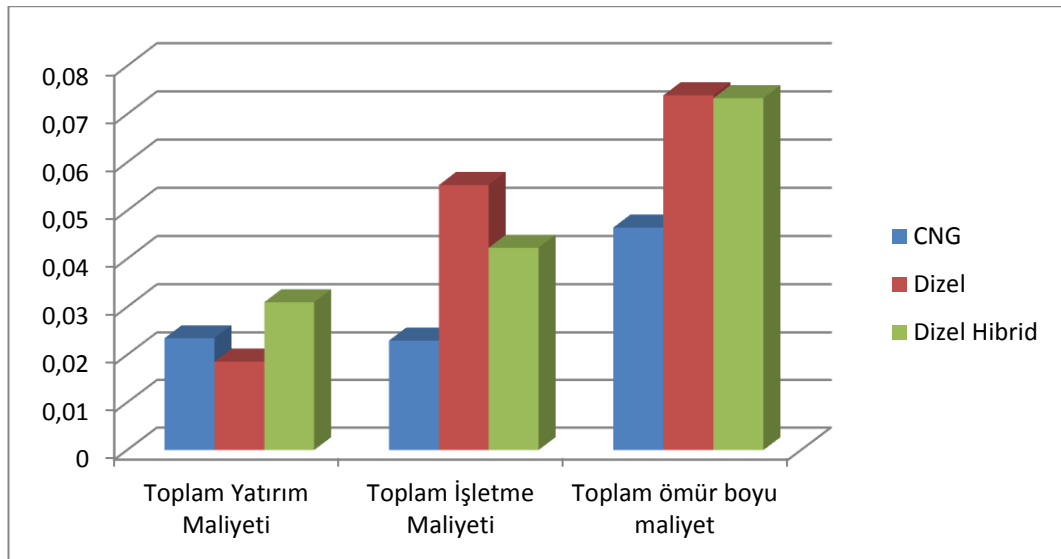
Otobüs km koltuk başına ömür boyu maliyet:

$$\text{Otobüs km koltuk başına ömür boyu maliyet} = \frac{\text{Toplam yatırım+işletme maliyeti}}{12 \text{ yıl} \times 100 \text{ adet} \times 40 \text{ koltuk} \times 60000 \text{ km}}$$

Tablo 5.9: Otobüs km koltuk başına ömür boyu maliyet (40 koltuk)

	CNG	Dizel	Dizel Hibrid
Toplam Yatırım ve İşletme Maliyetleri	0.0465 TL	0.0739 TL	0.0733 TL
Depo Modifikasyonu	0.0005 TL	0.0000 TL	0.0000 TL
Dolum İstasyonu	0.0012 TL	0.0000 TL	0.0000 TL
Araç Satın Alma Maliyeti	0.0217 TL	0.0186 TL	0.0309 TL
Kompresör Elektrik Tüketim Maliyeti	0.0012 TL	0.0000 TL	0.0000 TL
Tesis Bakımı	0.0015 TL	0.0012 TL	0.0010 TL
Tahrikle ilgili Sistemlerin Bakımı	0.0038 TL	0.0041 TL	0.0039 TL
Akü Değiştirme	0.0000 TL	0.0000 TL	0.0037 TL
Yakıt Tüketim Maliyetleri	0.0164 TL	0.0500 TL	0.0336 TL

Şekil 5.6 Otobüs km koltuk başına ömür boyu maliyet (40 koltuk)



6. SONUÇLAR

100 adet dizel, CNG' li ve dizel hibrid elektrikli otobüs teknolojisi arasında yapılan ömür boyu maliyet analizi, hibrid otobüslerin klasik dizel otobüslere göre daha yüksek yatırım maliyetleri gerektirdiğini ortaya koymuştur. CNG' li otobüslerin yatırım maliyeti ise dizel otobüslerden biraz daha yüksektir. İşletme maliyetlerine baktığımızda, en düşük işletme maliyetinin CNG' li otobüslerde olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, CNG' li otobüslerde yakıt fiyatının dizel yakıt fiyatına göre düşük olmasıdır. Bu fiyat farkı yatırım maliyeti dizel otobüslere göre yüksek olan CNG' li otobüslerin aradaki farkı kapamasını sağlamıştır. Hibrid otobüsler dizel otobüslere göre daha iyi yakıt ekonomisi sağlamalarına karşın, batarya değiştirme maliyetlerinden dolayı dizel otobüslere göre istenilen işletme maliyetini yakalayamamıştır.

Yakıt maliyetleri ulaşım işletmelerinin işletme maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Hibrid otobüsler ise özellikle şehir içi trafiğin yoğun olduğu sık dur-kalkların olduğu güzergâhlarda frenleme sırasında açığa çıkan enerjiyi yakalayarak depolar ve gerekli olduğu hallerde bu enerjiyi kullanır. Rejeneratif frenleme enerjisi denilen bu olayla hem yakıt tüketimi hem de emisyonlar azaltılmış olur. Dizel otobüsler ise frenleme sırasında açığa çıkan enerjiyi ısı şeklinde kaybetmektedir. Hibrid otobüslerdeki rejeneratif frenleme ile artan yakıt fiyatları karşısında önemli bir yakıt ekonomisi sağlanmış olur. Hibrid otobüslerin yakıt tüketimini azaltmalarından dolayı dizel otobüslere göre işletme maliyetleri daha düşüktür.

Hibrid otobüslerde her iki güç kaynağı da optimumda çalışır ve bu sayede enerji kayıpları minimize edilmiş olur. Hibrid otobüslerin dizel otobüslere göre enerji verimlilikleri yüksektir. Hibrid otobüslerde rejeneratif frenleme enerjisinin maksimum düzeyde geri kazanımı için hibrid bileşenlerinin boyutlarının iyi belirlenmesi gereklidir. Paralel hibrid sistemlerde İYM ile şanzıman arasında bir elektrik motoru bulunur. Bu elektrik motoru frenleme sırasında açığa çıkan enerjiyi geri kazanır ve akülerde depolar. Akülerde enerji olduğu sürece elektrik motoru da aracı hareket ettirebilir. Ancak paralel hibrid sistemde elektrik motorunun boyutu küçüktür ve bu sebeple rejeneratif frenleme ile kazanılan enerjide az olacaktır. Şehir içi trafiğin yoğun olduğu sık dur-kalk yapılan

güzergâhlarda kullanılması yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlamaz. Seri hibrid sistemlerde ise, rejeneratif frenleme enerjisinin tamamı elektrik motoru üzerinden geri kazanılabilir. Daha fazla enerji depolayabilir. Dolayısı ile şehir içi trafikte enerji verimliliği açısından seri hibrid tahrikli otobüslerin kullanılması önemlidir.

Dizel hibrid, dizel ve CNG' li otobüsleri toplam ömür boyu maliyetleri açısından incelediğimizde, dizel otobüslerin çok az bir farkla dizel hibrid otobüslere göre ömür boyu maliyetinin yüksek olduğu görülmüştür. Dizel hibrid otobüsler konvansiyonel dizel otobüslere göre % 30 oranında daha az bir yakıt tüketimi sağlamalarına karşın, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu ve akü değiştirme maliyetlerinden dolayı aradaki fark kapanmıştır. CNG' li otobüslerin ise toplam ömür boyu maliyetlerinin diğer otobüslere göre düşük çıkması CNG yakıt fiyatının dizele göre (neredeyse yarısı) daha düşük olmasıdır.

Sonuç olarak, bu üç tip otobüs teknolojisine toplam ömür boyu maliyetler açısından baktığımızda hibrid otobüslerin çok az bir farkla dizel otobüslere göre daha ekonomik oldukları gözükmemektedir. En ekonomik teknolojinin ise CNG' li otobüsler olduğu gözükmemektedir. Ancak CNG' li otobüslerin dışa bağımlı ve kaynakları tükenen fosil yakıt kullandığı unutulmamalıdır. Bununla birlikte, artan yakıt fiyatları karşısında hibrid otobüslerin önemli oranda yakıt ekonomisi sağlaması, fosil yakıtlara olan bağımlılığı ve emisyonları azaltması, hibrid otobüsleri konvansiyonel otobüslere göre üstün kılmaktadır. Ayrıca daha düşük yakıt tüketimi otobüs işletmeleri için ekonomik olarak işletme maliyetlerini azaltma anlamına gelir. Bir hibrid otobüsten gelen faydaları maksimuma çıkarmak için, otobüsün rotası için hibrid sistemi optimize etmek, otobüs yolculuklarının yapıldığı yerleri, güzergâhtaki ortalama hız ve durma sıklığı gibi parametreleri göz önünde bulundurmak gereklidir.

KAYNAKÇA

Kitaplar

Živanović, Z. ve Nikolić, Z., 2012. *The application of electric drive technologies in city buses*. New Generation of Electric Vehicles, DOI: 10.5772/51770. (<http://www.intechopen.com/books/new-generation-of-electric-vehicles/the-application-of-electric-drive-technologies-in-city-buses>)

Ünlü, N., Karahan, Ş., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F. ve Tırıs, M., 2003. Elektrikli Araçlar. *TÜBİTAK MAM Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze*.

Sürekli Yayınlar

- Gören, E., 2012. Hibrid ve elektrikli araçlar ile enerji tasarrufu. *İş Makinaları Mühendisliği Dergisi*. Sayı 38, ISSN 1306-6943.
- Çınar, M.A., Gündoğan, Ç. ve Erfan Kuyumcu, F., 2004. Elektrik tahrikli araçlar için çekiş gücü kontrol sistemi simülasyonu. *ELECO'2004 Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Kongresi*. PP.296-300.
- Hallmark, Shauna., Wang, B., Oui, Y., ve Sperry, B., 2012. Assessing the costs for hybrid versus regular transit buses. *TECH BRIEF IOWA State University*. PP.1-6.
- Erdoğan, O., Uzunoğlu, M. ve Vural, B., 2011. Hibrid alternatif enerji sistemlerinde kullanılan enerji depolama üniteleri. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*. PP.116-121.
- Vishnu, P. ve Ajaykrishna, R. 2011. Cost efficient and optimized energy solution in plug-in hybrid vehicles (PHEV) for public transport system. *Bonfring International Journal of Power Systems and Integrated Circuits*. ISSN 2250 – 1088 Vol. 1, Special Issue, pp: 52-55.
- Köklükaya, E., Yıldız, M. ve Bağcı, S., 2011. Hibrid araçlarda güç elektroniği sistemlerinin geliştirilmiş durum uzay ortalama yöntemiyle modellenmesi. *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*.
- Keskin, A. 2009. Hibrid taşıt teknolojileri ve uygulamaları. *Mühendis ve Makina*. Cilt 50, Sayı:597, pp: 12-20.
- Barnitt, R., 2008. In-use performance comparison of hybrid electric, CNG, and diesel buses at New York City Transit. *NREL/CP-540-42534. Posted with Permission. Presented at the 2008 SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants Conference, Shanghai, China, 2008-01-1556*, pp:1-10.
- Oral, E. ve Çelik, V. 2005. Hidrojen yakıtlı motor teknolojisi. *Mühendis ve Makina*. Cilt 46, Sayı:540.
- Emes, M., Smith, A., Tyler, N., Bucknall, R., Westcott, P. Ve Broatch, S., 2009. Modelling the costs and benefits of hybrid buses from a 'whole-life' perspective. *7th Annual Conference on Systems Engineering Research*.

Tuncay, R. N. ve Üstün, Ö., 2012. Elektrikli araçlarda geçmişten geleceğe bakış. *MÜSİAD Araştırma Raporları. 77, Otomotiv Sektör Kurulu Raporu*, ISBN 978-605-4383-22-1.

International Energy Agency (IEA). 2011. *Technology Roadmap. Electric and plug-in hybridelectricvehicles*. http://www.iea.org/papers/2011/EV_PHEV_Roadmap.pdf. [Erişim Tarihi: 9 Mart 2013]

Tuncay, R. N. ve Üstün, Ö., 2004. Otomotiv Elektroniğindeki Son Gelişmeler. *ELECO' 2004*. http://www.emo.org.tr/ekler/eee9fe5195586bf_ek.pdf [Erişim Tarihi: 26 Şubat 2013].

Eudy, L., 2011. VII.5 Technology Validation: Fuel Cell Bus Evaluations. *FY Annual Progress Report, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program*. http://www.hydrogenenergy.gov/pdfs/progress11/vii_5_eudy_2011.pdf, [Erişim Tarihi: 19 Nisan 2013], pp:1037-1038.

Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, F., 2003. Yakıt pilleri. *Tesisat Mühendisliği/Mayıs-Haziran 2003*. <http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/11920.pdf>, [Erişim Tarihi: 2 Şubat 2013], s.25,26.

Diğer Yayınlar

- Christidis, P., Hernandez, H., Georgakaki, A. ve Peteves, S., 2005. Hybrids for road transport. *Status and Prospects of Hybrid Technology and The Regeneration Of Energy In Road Vehicles*. Spain: European Commission, Directorate- General Joint Research Center Technical Report EUR 21743EN.
- Kınav, E., 2007. Hidrojenin ulaşımda yakıt olarak kullanılması: Hibrid elektrikli şehir içi kişisel ulaşım aracı konsepti. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi FBE.
- Boyalı, A., 2008. Hibrid elektrikli yol taşıtlarının modellenmesi ve kontrolü. *Doktora Tezi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi FBE.
- Zaetta, R. ve Madden, B. 2011. Hydrogen Fuel Cell Bus Technology State of the Art Review. *Project EC FCH-JU-2008-1 Grant Agreement Number 245133, Report Version 3.1*, http://nexthilight.eu/Publications/Clean-3_D3-1_WP3_EE_State_of_the_Art_23rd-FEB-2011.pdf [Erişim Tarihi: 24 Şubat 2013].
- Clark, N., Zhen, Feng., Wayne, W. ve Lyons, D., 2007. Transit Bus Life Cycle Cost and Year 2007 Emissions Estimation. *U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration Final Report*. U.S: Department of Transportation FTA-WV-26-7004.2007.1.
- Yıldırım, Y. 2011. ÇEV 346 yakıt pilleri ders notları. *T.C. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü*.
- Çamcı, Ö., 2005. Yakıt Pilinin Motorlu Taşıtlarda Uygulanması. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi FBE.
- Callaghan, L. ve Lynch, S., 2005. Analysis of Electric Drive Technologies for Transit Applications: Battery-Electric, Hybrid Electric and Fuel Cells. *U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration Final Report*. U.S: Department of Transportation FTA-MA-26-7100-05.1.
- Kuyumcu, A., 2008. Hidrojen Yakma Sistemi Dizaynı Yakıt Hücresi ve Hesapları. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi FBE.

- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı ÇYGM Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Kılavuz, 2009, <http://www.cygm.gov.tr/CYGM/Files/yayinlar/kitap/pilaku.pdf>, [Erişim Tarihi: 8 Ocak 2013], s.15,16.
- Clark, N., Zhen, Feng., Wayne, W. ve Lyons, D., 2008. Additional Transit Bus Life Cycle Cost Scenarios Based on Current and Future Fuel Prices. *U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration Final Report*. U.S: Department of Transportation FTA-WV-26-7006.2008.1. http://www.fta.dot.gov/documents/WVU_FTA_LCC_Second_Report_11-03-2008.pdf [Erişim Tarihi: 13 Nisan 2013].
- T.C. MEB Megep Motorlu Taşıtlar Teknolojisi Alternatif Yakıtlı Motorlar, Ders Notları, 2006, http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/motorlu_araclar/moduller/alternatif_motorlar_ve_yakitlar.pdf [Erişim Tarihi: 19 Ocak 2013], s.30.
- Gemici, S., 2006. Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Enerji Depolama Yöntemlerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi FBE.
- Chandler, K. ve Eudy, L. 2011. Zero Emission Bay Area (ZEBA). *Fuel Cell Bus Demonstration: First Results Report, Technical Report, NREL/TP-5600-52015*.
- Bard, A., Cox, S., Panci, H., Polfus, C. ve Race, K. 2008. The Feasibility of Alternative Fuels and Technologies. *An Assessment of Addison County Transit Resources' Current and Future Options*, Middlebury College, <http://www.middlebury.edu/media/view/255373/original/BUSFINALREPORT.pdf> [Erişim Tarihi: 23 Şubat 2013].
- ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program). 2012. *TECHDS Energy Technology Briefs*, <http://www.iea-etsap.org/web/Demand.asp>, [Erişim Tarihi: 6 Mart 2013].
- Zamboni, S, & Normanno, A. 2008. D2.3 Cost/effectiveness analysis of the selected technologies (CNG and HYBRIDS). *COMmon PROcurement of collective and public service transport clean vehicles*, http://www.compro-eu.org/doc/COMPRO_deliverable_D2.3_final.pdf [Erişim Tarihi: 14 Mart 2013].
- New York City Hybrid Bus Overview. 2012. <http://ebookbrowse.com/04-comprows-hb-labouff-pdf-d296145507> [Erişim Tarihi: 15 Ocak 2013].

Hybrid Transit Buses, Cost and Maintance. 2010. The Union of Concerned Scientists' *Hybridcenter.org*, <http://www.hybridcenter.org/hybrid-transit-buses.html> [Erişim Tarihi: 10 Mayıs 2013].

Hybrid Buses, Costs and Benefits. 2012. *Environmental and Energy Study Institute (EESI)*, http://www.eesi.org/files/eesi_hybrid_bus_032007.pdf [Erişim Tarihi: 25 Mart 2013].

Özen, Y. 2008. Hibrid motorlar ve hidrojen yaktlı motorlar. *T.C. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü*. <http://kisi.deu.edu.tr/userweb/atilay.yesil/HİBRİT%20MOTORLAR%20ve%20HİDROJEN%20YAKITLI%20MOTORLAR.ppt>. [Erişim Tarihi: 5 Aralık 2012].

T.C. MEB Megep Motorlu Taşıtlar Teknolojisi Benzinli Motorlar Yakıt ve Ateşleme Sistemleri 3, 2006, http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/motorlu_araclar/moduller/benzinli_motorlarin_yakit_ve_atesleme_sistemleri3.pdf [Erişim Tarihi: 5 Ocak 2013], s.21.

Yetişken, Y. ve Ekmekçi, İ., 2009. Alternatif enerji ve enerji verimliliği yönüyle otobüslerde sıkıştırılmış doğalgaz kullanımı. *1. Ulusal Enerji Verimliliği Forumu, 15-16 Ocak 2009, İstanbul*. <http://www.uevf.com.tr/uevf1/sunumlar/ot03-01.doc>, [Erişim Tarihi: 12 şubat 2013].

<http://www.slideshare.net/muratsena/yakit-pili> [Erişim Tarihi: 12 Mart 2013]

<http://www.hybridrive.com/hybrid-transit-bus.asp> [Erişim Tarihi: 8 Nisan 2013]

http://data.obitet.net/obitet/hibrit_otomobiller/hev2.htm [Erişim Tarihi: 28 Ocak 2013]

http://www.nrel.gov/learning/avf_plugin_hybrid_electric.html [Erişim Tarihi: 21 Aralık 2012]

<http://www.greencarcongress.com/2011/08/hamburg-putting-itsfirst-citaro-fuelcell-hybrid-buses-into-service-hamburger-hochbahn-ag-has-acquiredfour-mercedes-benz.html> [Erişim Tarihi: 5 Ocak 2013]

<http://www.daimler.com/Mercedes-Benz-Citaro-FuelCELL-Hybrid> [Erişim Tarihi: 3 Nisan 2013]

<http://www.vanhool.be/FRA/transport-public/hybride-pile-a-combustible/Resources/folderFuelCell.pdf> [Erişim Tarihi: 15 Mart 2013]

<http://ototeknikveri.com/icerik/359/36-karma-hibrid-elektrikli-arac.html> [Erişim Tarihi: 24 Nisan 2013]

<http://www.shell.com.tr> [Erişim Tarihi: 16 Nisan 2013]

<http://www.apt-phileas.com/> [Erişim Tarihi: 2 Ocak 2013]

http://www.fuelsandenergy.com/presentations/PHEV_Grid_Study.PDF
[Erişim Tarihi: 22 Nisan 2013]

http://hyfleetcute.com/data/HyFLEETCUTE_Brochure_Web.pdf [Erişim Tarihi: 13 Nisan 2013].

<http://www.aqua-calc.com/convert/fuel-consumption/mile-per-gallon-to-liter-per-100-kilometer> [Erişim Tarihi: 16 Mart 2013]

http://yakitpili.com/page_id=7 [Erişim Tarihi: 18 Ocak 2013].

https://dosya.sakarya.edu.tr/Dokumanlar/2013/312/305788162_motor-sunum1.pdf
[Erişim Tarihi: 1 Mart 2013].

<http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/33397.pdf> [Erişim Tarihi: 29 Nisan 2013].