

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAKIT PİLLİ-BATARYALI HİBRİD BİR ELEKTRİKLİ ARAÇTA ENERJİ
YÖNETİMİNİN SAĞLANMASI**

FATMA KESKİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. İBRAHİM ŞENOL**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAKIT PİLLİ-BATARYALI HİBRİD BİR ELEKTRİKLİ ARAÇTA ENERJİ
YÖNETİMİNİN SAĞLANMASI

Fatma KESKİN tarafından hazırlanan tez çalışması 06.06.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

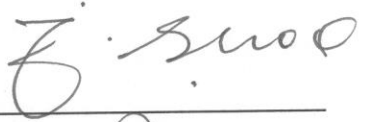
Prof. Dr. İbrahim ŞENOL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi







ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince ilminden faydalandığım; değerli bilgi birikimi ve yardımları ile beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Sayın İbrahim ŞENOL'a,

Çalışmalarım boyunca benden hiçbir zaman desteğini ve emeğini esirgemeyen, birlikte çalışmaktan onur duyduğum hocam Arş. Gör. Sayın Ahmet Yiğit ARABUL'a,

Tez çalışmalarım süresince değerli yardımlarını eksik etmeyen hocam Arş. Gör. Sayın Ali Rifat BOYNUEĞRİ'ye,

Y.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Makinaları Anabilim Dalı'ndaki tüm hocalarıma,

Bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan ve her zaman bir kale gibi dimdik arkamda duran başta biricik babam ve annem olmak üzere tüm aileme saygı, şükran ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Haziran, 2014

Fatma KESKİN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	
ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TARİHÇESİ.....	5
2.1 Elektrikli Araçların Tarihsel Gelişimi	5
2.2 Elektrikli Araçların İçten Yanmalı Motorlu Araçlara Göre Avantaj ve Dezavantajları	9
BÖLÜM 3	
ELEKTRİKLİ ARAÇ ÇEŞİTLERİ	11
3.1 Tümü Elektrikli Araçlar	11
3.2 Hibrid Elektrikli Araçlar	13
3.2.1 Seri Hibrid Elektrikli Araçlar	15
3.2.2 Paralel Hibrid Elektrikli Araçlar	17
3.3 Yakıt Pili Elektrikli Araçlar.....	19
3.4 Elektrik Hatlarını Kullanan Elektrikli Araçlar	20

3.5	Güneş Enerjisi ile Çalışan Elektrikli Araçlar	21
3.6	Volanlı ve Süperkapasitörlü Elektrikli Araçlar	21

BÖLÜM 4

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN KAYNAK VE ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTELERİ	23
---	----

4.1	Bataryalar	23
4.1.1	Batarya Parametreleri	24
4.1.1.1	Hücre ve Batarya Gerilimleri	24
4.1.1.2	Dolum Kapasitesi	25
4.1.1.3	Depolanan Enerji	25
4.1.1.4	Spesifik Enerji	25
4.1.1.5	Enerji Yoğunluğu	25
4.1.1.6	Spesifik Güç	25
4.1.1.7	Enerji Verimliliği	26
4.1.1.8	Diğer Önemli Parametreler	26
4.1.2	Kurşun Asit Bataryalar	26
4.1.3	Nikel Bazlı Bataryalar	28
4.1.3.1	Nikel Kadmiyum Bataryalar	28
4.1.3.2	Nikel Metal Hidrür Bataryalar	29
4.1.4	Sodyum Bazlı Bataryalar	30
4.1.4.1	Sodyum Sülfür Bataryalar	30
4.1.4.2	Sodyum Nikel Klorür Bataryalar	31
4.1.5	Lityum Bataryalar	31
4.1.5.1	Lityum Polimer Bataryalar	31
4.1.5.2	Lityum İyon Bataryalar	32
4.1.6	Metal-Hava Bataryaları	33
4.1.6.1	Alüminyum Hava Bataryaları	33
4.1.6.2	Çinko Hava Bataryaları	34
4.1.7	Bataryanın Şarj Edilmesi ve Dolum Eşitleme İşlemi	35
4.2	Alternatif Enerji Kaynakları ve Depoları	35
4.2.1	Volanlar	36
4.2.2	Süperkapasitörler	36
4.2.3	Güneş Fotovoltaikleri	37

BÖLÜM 5

YAKIT PİLLERİ	39
---------------------	----

5.1	Yakıt Pilinin Tarihsel Gelişimi	39
5.2	Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensibi	41
5.3	Yakıt Pili Çeşitleri	42
5.3.1	Alkali Yakıt Pili (AYP)	43
5.3.2	Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP)	44
5.3.3	Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)	45
5.3.4	Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)	46
5.3.5	Proton Geçirgen Zarlı Yakıt Pili (PEMYP)	47
5.3.6	Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMYP)	49

5.4	Yakıt Pillerinin Karşılaştırılması	50
5.5	Yakıt Pillerinin Tercih Edilme Sebepleri	54
5.6	Yakıt Pillerinin Ulaşım Araçlarında Kullanılması.....	55
BÖLÜM 6		
BENZETİM ÇALIŞMALARI.....		57
6.1	Benzetim Çalışmalarında Kullanılan Güç Koşullandırma Üniteleri ve Kontrol Yöntemleri.....	59
6.1.1	Yükseltici DC-DC Dönüştürücü.....	59
6.1.2	Çift Yönlü DC-DC Dönüştürücü	64
6.2	Benzetim Çalışmaları Sonuçları.....	69
BÖLÜM 7		
SONUÇ VE ÖNERİLER		74
KAYNAKLAR		77
ÖZGEÇMİŞ		81

SİMGE LİSTESİ

V	Volt
P_{HEV}	HEA'nın maksimum itiş gücü
P_{EM}	Elektrik motorunun gücü
$P_{İYM}$	İYM'nin gücü
A-saat	Amper-saat
R	Direnç
I	Akım
C	Batarya dolum kapasitesi
J	Atalet momenti
ω	rad/s cinsinden dönme hızı
E	Joule cinsinden depolanan enerji
C	Farad cinsinden kapasitans değeri
ϵ	Kondansatör plakaları arasındaki malzemenin elektriksel geçirgenliği
A	Kondansatör plakalarının alanı
d	Kondansatör plakaları arası uzaklık
L	Endüktans
λ	Doluluk oranı
T_d	Güç anahtarının iletimde olduğu süre
T_p	Çalışma periyodu
μ	Mikro

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
Ah	Amper-saat
AYP	Alkali Yakıt Pili
BAT	Batarya
BG	Beygir Gücü
DC	Doğru Akım
DMYP	Direk Metanol Kullanılan Yakıt Pili
DoD	Deşarj Derinliği (Depth of Discharge)
EA	Elektrikli Araç
EKYP	Erimiş Karbonatlı Yakıt Pili
FAYP	Fosforik Asit Yakıt Pili
HD	Hibridleştirme Derecesi
HEA	Hibrid Elektrikli Araç
İYM	İçten Yanmalı Motor
KDV	Katma Değer Vergisi
KOYP	Katı Oksitli Yakıt Pili
MTV	Motorlu Taşıtlar Vergisi
PEMYP	Proton Geçirgen Zarlı (Proton Exchange Membrane) Yakıt Pili
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
SoC	Batarya Doluluk Oranı (State of Charge)
UDDS	Standart Şehir İçi Sürüş Çevrimi (Urban Dynamometer Driving Schedule)
Wh	Watt-saat
YP	Yakıt Pili

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Thomas Parker tarafından 1880’li yıllarda geliştirilen elektrikli araç [2].....	6
Şekil 2. 2 Çin’de kullanılan bir trolleybüs örneği [13]	7
Şekil 2. 3 Dünyada en çok tercih edilen hibrid elektrikli araç “Toyota Prius” [14]	8
Şekil 3. 1 Tümü elektrikli araç sistemi	12
Şekil 3. 2 Hibrid elektrikli araç [17]	14
Şekil 3. 3 Seri hibrid elektrikli araç sistemi	15
Şekil 3. 4 TÜBİTAK-MAM tarafından TOFAŞ için yapılan seri hibrid otomobil Fiat Doblo [5]	16
Şekil 3. 5 Honda Insight Hybrid [20]	17
Şekil 3. 6 Paralel hibrid elektrikli araç sistemi	18
Şekil 3. 7 Mercedes A Serisi Ballard yakıt pilli elektrikli araç [21]	19
Şekil 3. 8 Taksim-Tünel nostaljik tramvay hattındaki iki tramvay [23]	20
Şekil 3. 9 1996 Yılında Avustralya’da düzenlenen Dünya Güneş Yarışması kazananı Honda Dream Solar [24]	21
Şekil 4. 1 Altı adet hücreden oluşan bataryanın eşdeğer devresi.....	24
Şekil 4. 2 Lityum iyon batarya kullanılarak geliştirilen Ford Ka [30]	33
Şekil 5. 1 William Robert Grove tarafından geliştirilen yakıt pili [37].....	40
Şekil 5. 2 Mond ve Langer’in tasarladığı yakıt pili [37]	41
Şekil 5. 3 Alkali yakıt pili	44
Şekil 5. 4 Erimiş karbonat yakıt pili	45
Şekil 5. 5 Fosforik asit yakıt pili	46
Şekil 5. 6 Katı oksit yakıt pili	47
Şekil 5. 7 PEM yakıt pili	48
Şekil 5. 8 Doğrudan metanol kullanılan yakıt pili.....	49
Şekil 5. 9 Bütün yakıt pili çeşitlerinin çalışma şekilleri	52
Şekil 6. 1 PEM YP ve batarya kullanılarak yapılan sistemin blok şeması	57
Şekil 6. 2 UDDS sürüş çevrimine göre hafif bir elektrikli aracın güç talebi	58
Şekil 6. 3 Yükseltici DC-DC dönüştürücü devre şeması	60
Şekil 6. 4 Güç anahtarı iletimde iken yükseltici dönüştürücünün eşdeğer devresi	60
Şekil 6. 5 Güç anahtarı kesimde iken yükseltici dönüştürücünün eşdeğer devre şeması	61
Şekil 6. 6 DC PWM kontrol tekniğine ait dalga şekilleri	62
Şekil 6. 7 Yükseltici DC-DC dönüştürücüde kullanılan kontrol yöntemi	63
Şekil 6. 8 Çift yönlü DC-DC dönüştürücü devre şeması	64

Şekil 6. 9 Çift yönlü DC-DC dönüştürücünün ileri yönde yükseltici dönüştürücü olarak çalışması.....	65
Şekil 6. 10 İleri yönde T_2 güç anahtarı iletimde iken çift yönlü dönüştürücünün eşdeğer devre şeması	65
Şekil 6. 11 İleri yönde T_2 güç anahtarı kesimde iken çift yönlü dönüştürücünün eşdeğer devre şeması	66
Şekil 6. 12 Çift yönlü DC-DC dönüştürücünün geri yönde düşürücü dönüştürücü olarak çalışması.....	66
Şekil 6. 13 Geri yönde T_1 güç anahtarı iletimde iken çift yönlü dönüştürücünün eşdeğer devre şeması	67
Şekil 6. 14 Geri yönde T_1 güç anahtarı kesimde iken çift yönlü dönüştürücünün eşdeğer devre şeması	67
Şekil 6. 15 Çift yönlü DC-DC dönüştürücüde kullanılan kontrol yöntemi	69
Şekil 6. 16 Toplam güç ve YP'nin güç değişimi grafiği.....	69
Şekil 6. 17 Toplam güç ve bataryanın güç değişimi grafiği	70
Şekil 6. 18 Batarya şarj durumunun zamana göre yüzdesel değişimi.....	71
Şekil 6. 19 YP'nin akım ve gerilimi.....	71
Şekil 6. 20 Bataryanın akım ve gerilimi	72
Şekil 6. 21 DC baranın gerilim-zaman grafiği	72
Şekil 6. 22 Çift yönlü ve yükseltici dönüştürücülere ait akım-zaman grafiği	73

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4. 1 Kurşun asit batarya parametreleri.....	27
Çizelge 4. 2 Nikel kadmiyum batarya parametreleri.....	28
Çizelge 4. 3 Nikel metal hidrür batarya parametreleri.....	29
Çizelge 4. 4 Sodyum sülfür batarya parametreleri.....	30
Çizelge 4. 5 Sodyum nikel klorür batarya parametreleri.....	31
Çizelge 4. 6 Lityum polimer batarya parametreleri.....	32
Çizelge 4. 7 Lityum iyon batarya parametreleri.....	32
Çizelge 4. 8 Alüminyum hava batarya parametreleri.....	34
Çizelge 4. 9 Çinko hava batarya parametreleri.....	34
Çizelge 5. 1 Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri [6]	51
Çizelge 5. 2 Yakıt pillerinin kimyasal reaksiyonları.....	51
Çizelge 5. 3 Yakıt pili çeşitlerinin karşılaştırılması [42]	53
Çizelge 6. 1 YP parametreleri	58
Çizelge 6. 2 Lityum-iyon batarya parametreleri	59
Çizelge 6. 3 Benzetim çalışmasında kullanılan yükseltici DC-DC dönüştürücü parametreleri	63
Çizelge 6. 4 Benzetim çalışmasında kullanılan çift yönlü DC-DC dönüştürücü parametreleri	68

YAKIT PİLLİ-BATARYALI HİBRİD BİR ELEKTRİKLİ ARAÇTA ENERJİ YÖNETİMİNİN SAĞLANMASI

Fatma KESKİN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim ŞENOL

Fosil kökenli yakıtların tükeneceği endişesi ve bu yakıtların çevreye karşı olumsuz etkilerinden dolayı alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Bununla birlikte ulaşımın insan hayatındaki önemi de dikkate alınarak, petrol ve türevi yakıtlarla çalışan içten yanmalı motorlara sahip olan araçlar yerine, elektrik enerjisi ile çalışan ve çevreye duyarlı olan elektrikli araçlar geliştirilmeye başlanmıştır.

Günümüzde birçok alanda enerji üretimi için en önemli adaylardan biri, yakıt olarak hidrojen kullanan yakıt pilleridir. Yakıt pilleri, diğer enerji dönüşüm sistemlerine göre daha sessiz ve daha temiz çalışmaktadırlar. Ayrıca yakıt pillerinin verimleri, içten yanmalı motorlar ile karşılaştırıldığında daha yüksek olmakla birlikte çalışmalarını esnasında emisyon üretmemeleri ve hareketli parçalara sahip olmama gibi avantajlara da sahiptir.

Elektrikli araçların içten yanmalı motorlu araçlara göre dezavantajı menzillerinin sınırlı, performans ve verimlerinin düşük olmasıdır. Bu problemi ortadan kaldırmak amacıyla süregelen çalışmalarda, elektrikli araçlarda faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılmasına ve enerji yönetim stratejisinin geliştirilmesine önem verilmektedir.

Bu tez çalışmasında yakıt pilli ve bataryalı hibrid bir elektrikli araçta faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılması ve enerji yönetiminin sağlanmasına yönelik bir benzetim çalışması yapılmıştır. Yük paylaşımı, aracın güç talebinin büyük kısmı YP tarafından, ani

ve negatif güçler ise batarya tarafından karşılanacak şekilde sağlanmıştır ve elde edilen sonuçlar irdelenerek sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, yakıt pili, batarya, faydalı frenleme, enerji yönetimi

**PROVIDING ENERGY MANAGEMENT OF A FUEL CELL-BATTERY HYBRID
ELECTRICAL VEHICLE**

Fatma KESKİN

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. İbrahim ŞENOL

On account of the concern of the fossil fuel is depleting and its negative effects on the environment, interest in alternative energy sources is increasing day by day. However, considering the importance of transport in human life, instead of oil and its derivatives fueled vehicles with internal combustion engines, electrical vehicles which is sensitive to the environment and working with electrical energy has begun to development.

Nowadays, , one of the most important candidate in many areas for energy production is fuel cells which using hydrogen as a fuel. Fuel cells work quieter and cleaner than the other energy conversion systems. Additionally efficiency of fuel cells as compared with the internal combustion engines are high and fuel cells has advantages such as not producing emissions during operation and not having moving parts.

Electrical vehicles has disadvantages as limited range, poor performance and low efficiency compared with the internal combustion engine vehicles. In order to eliminate these problems, recovering regenerative braking and to develop the energy management strategy in electrical vehicles are attached importance to ongoing studies.

In this study, simulation study was carried out for providing energy management and recovering regenerative braking in fuel cell-battery hybrid electrical vehicle. Load sharing is provided in that much of the power demand of the vehicle by the fuel cell

and instantaneous and negative power demand of the vehicle by the battery. Obtained results of the study are given.

Keywords: Electrical vehicles, fuel cell, battery, regenerative braking, energy management

1.1 Literatür Özeti

Elektrikli araç kavramı ilk kez 1930'lu yıllarda ortaya çıkmış ve 19. yüzyılda elektrikli araçlar ticarileştirilmeye başlamıştır. Bugünlerde elektrikli araçlar iki asırlık ticari bir ürün olarak yer almaktadır [1].

Elektrikli araçlar, bir veya daha fazla elektrik motoru kullanarak, bataryalardan ve diğer enerji depolama ünitelerinden elde ettiği elektrik enerjisi ile tahrik edilen araçlardır. 19. Yüzyılın sonlarında ve 20. Yüzyılın başlarında elektrikli araçlar oldukça ilgi görmekteydi fakat içten yanmalı motorlar (İYM) konusundaki ilerlemeler ve petrol ve türevi yakıtları kullanan araçların düşük maliyetli seri üretimi, elektrikli araçlara olan ilgiyi düşürmüştür [2].

Elektrikli araçlara olan ilgiyi azaltan bir diğer faktör de o yıllarda bataryalarının fiyatlarının çok pahalı olması ve bataryaların henüz gelişim sürecini tamamlayamamasından kaynaklanan enerji ve güç yoğunluklarının, petrol ve türevi yakıtlarinkine göre düşük olmasıdır. Bu da; elektrikli taşıtların benzer boyut ve nitelikteki İYM'li araçlar ile karşılaştırıldığında, hem menzilin düşük olması hem de daha pahalı olması demektir [3].

1970 ve 1980'li yıllarda meydana gelen enerji krizleri nedeniyle elektrikli araçlar, kısa süreliğine tekrar ilgi görmeye başlamıştır. 2000'li yılların ortalarından beri batarya ve güç elektroniğindeki süregelen gelişmeler, petrol rezervlerinin tükeneceği endişesi ve elektrikli araçların çevre dostu olması, elektrikli araçları yeniden gündeme getirmiş ve farklı çeşitlerde elektrikli araçlar üretilmeye başlanmıştır [2].

Elektrikli araçların, İYM'li araçlara göre; en temel avantajı elektrikli araçların çalışmaları sırasında gürültü yapmaması ve emisyon üretmemesidir, en temel dezavantajı ise batarya maliyetlerinin pahalı olması ve elektrikli araçların menzillerinin daha düşük olmasıdır [4].

Elektrikli araçların, ilk üretildiği zamanlardan bugünlere kadar geçen sürede kaydedilen ilerlemeler ile birlikte, çeşitleri altı başlıkta toplanmaktadır. Bunlar; tümü elektrikli araçlar, hibrid elektrikli araçlar, yakıt pilli elektrikli araçlar, elektrik hatlarından beslenen elektrikli araçlar, güneş enerjisi ile çalışan elektrikli araçlar ve volanlı ve süperkapasitörlü elektrikli araçlardır.

Tümü elektrikli araçlar; genel olarak bir batarya, bir elektrik motoru ve bir güç koşullandırma ünitesinden meydana gelmektedir. Bu araçlarda gerektiğinde birden fazla elektrik motoru ve ana bataryaya ek olarak ikinci bir batarya veya yardımcı başka bir enerji depolama sistemi de kullanılmaktadır [5].

Hibrid elektrikli araçlar; tümü elektrikli araçlardaki menzil problemini aşmak için düşünülmüş İYM ile elektrikli motorunun bir arada kullanıldığı araçlardır [6]. Hibrid elektrikli araçlar geleneksel olarak seri ve paralel hibrid olarak ikiye ayrılmaktadır [7].

Yakıt pilli elektrikli araçlar yapı itibarıyla, tümü elektrikli araçlara benzemektedirler fakat bu araçlarda batarya yerine yakıt pilleri bulunmaktadır.

Elektrik hatlarını kullanan elektrikli araçlar, elektrik enerjisini elektrik hatlarından sağlayan araçlardır. Tramvay ve trolleybüsler bu tip elektrikli araçlara en iyi örnektir [1].

Güneş enerjisi ile çalışan elektrikli araçlar, fotovoltaik hücrelerin pahalı olmasından dolayı maliyeti çok yüksek olan ve güneş ışığının yoğun olduğu bölgelerde verimli olarak çalışan araçlardır [1].

Volanlı ve süperkapasitörlü elektrikli araçlar ise enerji depolama için volan veya süperkapasitör kullanılan araçlardır. Bu araçların sahip oldukları güç yoğunluğu yüksek olmasına rağmen depolayabildikleri enerji miktarları düşüktür [5].

Elektrikli araçlarda kullanılan başlıca enerji depolama üniteleri; bataryalar, volanlar, süperkapasitörler, güneş fotovoltaikleri ve yakıt pilleridir.

Bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların; uzun ömürlü, yüksek spesifik güç, yüksek spesifik enerji ve uzun çevrim ömrüne sahip olması beklenmektedir. Bataryalardan beklenen bu özelliklerden dolayı, lityum-iyon bataryalar, hafif olmaları, enerji yoğunluklarının yüksek olması ve CO₂ salınımını azalttığından dolayı günümüz elektrikli araçlarında tercih edilmektedir. [8].

21. yüzyılda pek çok alanda enerji üretimi için en önemli adaylardan biri yakıt pilleridir. Yakıt pilleri (YP) diğer enerji dönüşüm sistemlerine göre daha sessiz ve sorunsuz çalışmaktadırlar. Yakıt pilli araçlar, İYM'li araçlara göre yüksek olan verimlerinin yanında, düşük emisyon, oynar parçaların olmaması ve kullanıma göre tasarım olanaklarıyla birçok avantaja sahiptir [9].

Yakıt pilleri, kullandıkları yakıtta, çalışma sıcaklıklarına ve kullandıkları elektrolit tipine göre çeşitli sınıflara ayrılırlar. Yakıt pilleri arasında, verimlerinin yüksek olması, düşük hacim ve ağırlıkları nedeniyle PEM tipi yakıt pilleri araç uygulamaları için en uygun yakıt pili [10]. Ayrıca PEM yakıt pilleri, diğer yakıt pillerine kıyasla daha düşük sıcaklıklarda çalışmakta ve buna bağlı olarak ilk çalışma anında daha hızlı devreye girebilmektedirler [11].

Toyota, Daimler, Honda, Nissan, GM, BMW, Opel gibi otomobil üreticileri yakıt pilini yıllardır araçlarında denemektedirler. Teknolojideki bu ilerlemeler ile birlikte, bu araçlarda, hareketli parçaların olmaması, aracın sessiz çalışması, düşük emisyon ve yüksek verimliliğin sağlanması gibi avantajlarla, yakıt pili kullanımını cazip hale getirmektedir [12].

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde, fosil kökenli yakıtların rezervlerinin tükeneceği endişesi ve bu yakıtların olumsuz çevresel etkileri, birçok alanda alternatif enerji kaynaklarının kullanımına önem kazandırmaya başlamıştır. Ulaşım alanında da; petrol ve türevi yakıtlarla çalışan İYM'li araçlar yerine, elektrik enerjisi ile çalışan elektrikli araçlara olan ilgi, gün geçtikçe artmaktadır. Yakıt pillerinin gelişimiyle elektrikli araçlarda ana enerji kaynağı olarak kullanılması, bu araçların İYM'li araçlara göre daha sessiz, sorunsuz çalışmalarının yanı

sıra daha yüksek verimlere de sahip olmasını sağlamaktadır. Elektrikli araçlarda, dezavantaj olarak görülen menzil problemini ortadan kaldırmak ve yakıttan tasarruf sağlamak, dolayısıyla; kullanım maliyetini azaltmak amacıyla, faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılmasına ve enerji depolama sistemleri arasında güç paylaşımı yapılmasına yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Bu amaçla; bu tez çalışmasında, yakıt pilli ve bataryalı bir elektrikli araçta faydalı frenleme enerjisinin geri kazanılması sağlanmış ve anlık güç değişimlerinde iki enerji depolama ünitesi arasında enerji yönetim stratejisi geliştirilmiştir.

1.3 Hipotez

Elektrikli araçlarda; menzil problemini azaltmak, performans ve verimi artırmak amacıyla, frenleme enerjisinin geri kazanılması ve enerji yönetiminin sağlanması gerekir. Yakıt pilli ve bataryalı bir elektrikli araçta, YP, sistemin temel yükünü, batarya ise, anlık güç değişimlerini karşılamak ve frenleme enerjisini geri kazanmak amacıyla kullanılmalıdır.

ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TARİHÇESİ

Elektrikli araçların tanıtımı ilk defa 1830'lu yıllarda yapılmıştır ve ancak 19. Yüzyılın sonlarına doğru ticari bir ürün olarak yer almaya başlamıştır. Fakat yine de elektrikli araçlar, çok daha uzun menzilli ve temin edilmesi daha kolay olan içten yanmalı motorlu araçların başarısına ulaşamamıştır [1]. Günümüzde, çevre kirliliğinde büyük payı olan egzoz emisyonu ve gürültü ile ilgili problemlerin çözülmesi amacıyla, batarya ve yakıt pilleri elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve bunlardaki gelişmelere bağlı olarak elektrikli araçlar da İYM'li araçların başarısına ulaşmaya başlamıştır.

2.1 Elektrikli Araçların Tarihsel Gelişimi

1830'lu yıllardaki ilk elektrikli araçlarda, tekrar şarj edilemeyen piller kullanılmıştır. Ancak; tekrar şarj edilebilen pillerde yaşanan gelişmelere bağlı olarak, 19. Yüzyılın sonlarına doğru elektrikli araçların kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

Elektrikli araçlar 20. Yüzyılın ilk zamanlarında ise karayolu ulaşımında geleceğin araçları olarak görülmüştür. İYM'li araçlar bu yıllarda elektrikli araçlar kadar güvenilir olmamakla birlikte, çalışmaları esnasında koku yapmaları nedeniyle pek tercih edilmemişlerdir. Elektrikli araçlar ise İYM'li araçlarla karşılaştırıldığında hem daha güvenilir hem de hemen hareket etme becerisine sahiptir.



Şekil 2. 1 Thomas Parker tarafından 1880'li yıllarda geliştirilen elektrikli araç [2]

1920'li yıllarda elektrikli otomobil, elektrikli kamyonet ve elektrikli otobüsler üretilmiştir. Fakat elektrikli araçların bu avantajlarına rağmen, ucuz petrolün yaygınlaşması ile İYM'li araçlar daha cazip hale gelmiştir [1].

Bilindiği gibi İYM'li araçlarda yakıt olarak petrol kullanılmaktadır ve petrolün bir kilogramda depoladığı enerji miktarı bataryalara nazaran oldukça fazladır. Bu nedenle İYM'li araçlar elektrikli araçlar ile kıyaslandığında daha avantajlı durumdadır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtlarda kilogram başına depolanan enerji miktarı yaklaşık olarak 9000 Wh/kg iken, bir kurşun asit bataryada kilogram başına depolanan enerji miktarı 30 Wh/kg'dir. Bu enerji miktarları araçların verimleri ile birlikte içten yanmalı motorlar için yaklaşık 1800 Wh/kg değerine, kurşun asit batarya kullanılan elektrikli araç için ise yaklaşık 27 Wh/kg değerine düşmektedir. Bu değerler göz önüne alındığında içten yanmalı motor ile bir kurşun asit bataryanın enerji yoğunlukları arasındaki fark yaklaşık 70 kattır. Diğer bir ifadeyle, kurşun asit bataryanın, içten yanmalı motorun sağladığı enerjiyi sağlaması için elektrikli araçta 70 adet batarya kullanılması gerekmektedir. Bu da hem aracın taşınması gereken ağırlığını ve hacmini hem de maliyetini artırmaktadır.

Bataryalardan kaynaklanan bir diğer sorun ise bataryaların şarjı esnasında geçen süredir. Bir bataryayı tamamen şarj etmek için geçen süre birkaç saati bulabilmektedir. Bazı bataryaların dolum süresi bir saate indirilmiş olsa da İYM'li araç için gerekli olan

yakıtın birkaç dakika içerisinde doldurulabildiği göz önüne alındığında bu konuda da, İYM'li araç daha avantajlı durumdadır.

Elektrikli araçların kullanımının inişe geçmesine neden olan bir diğer dezavantajı da batarya maliyetlerinin fazla olmasıdır. Bu da, elektrikli taşıtların benzer boyut ve nitelikteki İYM'li araçlar ile karşılaştırıldığında, hem menzilin düşük olması hem de daha pahalı olması demektir [3].

19. yüzyıldan itibaren bataryaların depolayabildikleri enerji miktarının sınırlı olmasından dolayı çeşitli yöntemlere başvurulmuştur. Bunların en iyi örneği trolleybüs uygulamalarıdır [1]. Trolleybüsler elektrik enerjisini üstlerinden geçen enerji besleme kablolarından sağlamışlardır ancak bu besleme kablolarının oldukça pahalı olması da bunların başlıca dezavantajı olmuştur.



Şekil 2. 2 Çin'de kullanılan bir trolleybüs örneği [13]

1960'lı yıllarda; İYM'li araçların sayısının artmasından kaynaklanan çevre kirliliğinin yaygınlaşması ve petrol fiyatlarının yükselmesinden dolayı, elektrikli araçlara olan ilgi ve elektrikli araçlara yönelik çalışmalar yeniden artmaya başlamıştır [3]. 1970'li yıllarda, bütün dünyayı olumsuz olarak etkileyen petrol krizinin meydana gelmesiyle otomotiv üreticilerinin elektrikli araçlara yatırım yapmasına ve bunların farklı tip ve modellerde prototiplerinin geliştirilmesie neden olmuştur [3].

Elektrikli araçların gelişiminin ilk zamanlarında, tümü elektrikli araçların, menzil problemini aşmak üzere, bir jeneratörü çalıştıran içten yanmalı motorun, bir veya birden fazla elektrik motoruyla birlikte kullanıldığı hibrid elektrikli araç kavramı üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu araçlar 20. Yüzyılın ilk zamanlarında uygulanmış ve son zamanlarda ise tekrar ön plana çıkmıştır [3]. Hibrid elektrikli araçlarda; içten yanmalı motor ile elektrik motorunun üstün yönlerinin birleştirilmesi amaç edinilmiştir. Böylece, içten yanmalı motorun çevreye karşı olumsuz etkileri azaltılırken hem araç verimi artırılmış ve hem de elektrik motoru frenleme esnasında generatör olarak çalıştırılarak yakıttan tasarruf sağlanmaya çalışılmıştır. Şimdiye kadar en çok tercih edilen modern hibrid araç “Toyota Prius” olmuştur.



Şekil 2. 3 Dünyada en çok tercih edilen hibrid elektrikli araç “Toyota Prius” [14]

Hibrid elektrikli araçların birçok üstünlüğü olmasına rağmen araç sistemleri için uzun vadede, tümü elektrikli donanımdan oluşturulmuş araçlara geçilmesi ve ana enerji kaynağı olarak da lityum-iyon bataryaların kullanılması hedeflenmektedir [6]. Fakat yakıt pilleri konusundaki gelişmeler son zamanlarda yakıt pilli elektrikli araçların ön plana çıkmasına neden olmuştur.

2.2 Elektrikli Araçların İçten Yanmalı Motorlu Araçlara Göre Avantaj ve Dezavantajları

Elektrikli araçlar, İYM'li araçlar ile karşılaştırıldığında birtakım avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Elektrikli araçların temel avantajlarından bazıları, buldukları çevrede egzoz emisyonu üretmemeleri ve sessiz olmalarıdır. Bu özellikler elektrikli araçların İYM'li araçlara göre çevre dostu olduğunu göstermektedir.

Elektrikli araçlar (EA) ile ilgili gelişmeler, bataryalar, yakıt hücreleri, motor ve güç elektroniği sistemlerinde ilerleme kaydedilmesi ile sağlanmaktadır. Bataryaların ve Grove tarafından icat edilen yakıt hücrelerinin elektrikli araçlarda kullanılması elektrikli araçlar açısından büyük bir gelişmedir. Bu gelişmeler de elektrikli araçların İYM'li araçlara göre daha avantajlı duruma geçmesini sağlamaktadır.

Elektrikli araçların İYM'li araçlara göre avantajları:

- EA'lar daha sessiz çalışmaktadırlar.
- Elektrik motoru yüksek torka sahip olduğundan dolayı aracın hızlanması daha kısa sürede olmaktadır.
- EA'lar çalışmaları esnasında emisyon üretmezler.
- Yüksek verim ile çalışmaktadırlar.
- EA'lar vites kutusu, egzoz sistemi, soğutma ve yağlama gibi kısımlara ihtiyaç duymamaktadır.
- EA'ların periyodik bakım giderleri daha düşüktür.
- EA'ların motorları daha ucuz, daha uzun ömürlü, kolay değiştirilebilmektedir.
- EA'lar içten yanmalı motorlara adapte edilebilirler.
- Petrol türevi yakıtların rezervleri sınırlı iken, elektrik üretimi varlığını sürdürebilecektir.
- Pek çok ülke KDV, MTV gibi vergi oranlarını düşürerek EA'ların satışını desteklemektedir [4].

Elektrikli araçlar İYM'li araçlar ile karşılaştırıldığında pek çok avantaja sahip olmasına rağmen birtakım dezavantajlara da sahiptir. Bunlar:

- Bataryaların ağırlıkları çok fazladır.
- EA'lar, bataryalarının şarj problemlerinden dolayı, uzun yol kullanımına uygun değildir.
- EA'ların menzilleri İYM'li araçlara göre daha düşüktür.
- Batarya fiyatları pahalıdır.
- Bataryaların ömürleri kısadır.
- Bataryaların performansı sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir, şeklinde söylenebilir [4].

ELEKTRİKLİ ARAÇ ÇEŞİTLERİ

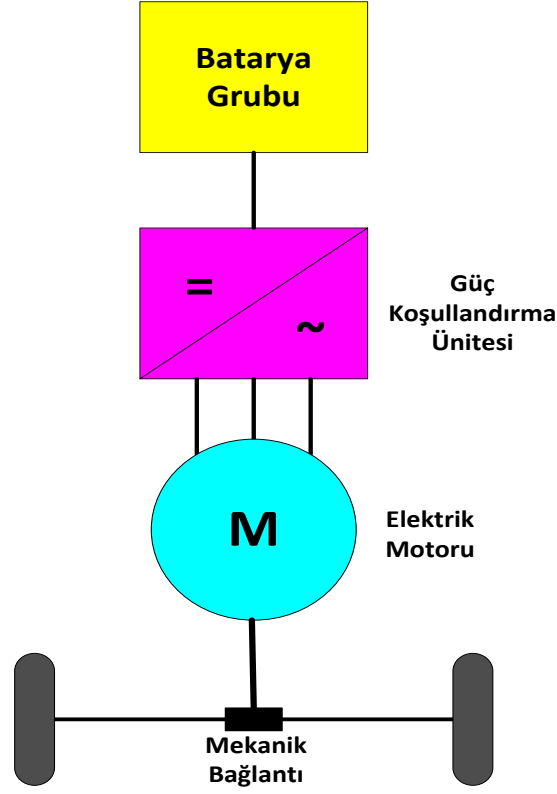
Son yıllarda kaydedilen ilerlemeler ile birlikte elektrikli araçların yeni çeşitleri ortaya çıkmıştır.

Elektrikli araç çeşitleri altı ayrı başlıkta incelenmektedir. Bunlar:

- Tümü elektrikli araçlar,
- Hibrid elektrikli araçlar,
- Yakıt pilli elektrikli araçlar,
- Elektrik hatlarından beslenen elektrikli araçlar,
- Güneş enerjisi ile çalışan elektrikli araçlar,
- Volanlı ve süperkapasitörlü elektrikli araçlardır.

3.1 Tümü Elektrikli Araçlar

Tümü elektrikli araçlarda, taşıtın enerji depolayabilmesi için bir bataryaya, bir elektrik motoruna ve güç koşullandırma ünitesine ihtiyaç vardır. Bu araçlarda bataryalardan elde edilen elektrik enerjisi, güç koşullandırma ünitesine gönderilmektedir. Güç koşullandırma ünitesinde de elektrik motoruna aktarılacak güç miktarı kontrol edilmektedir. Bu sayede aracın hareketi sağlanmaktadır.



Şekil 3. 1 Tümü elektrikli araç sistemi

Batarya, şebeke üzerinden veya batarya dolum merkezi üzerinden şarj edilebilmektedir. Güç koşullandırma ünitesi ise motoru besleyen gücü ve aracın ileri ve geri hızlanmasını kontrol etmektedir.

Tümü elektrikli araçlarda itme kuvvetinin yüksek miktarda sağlanabilmesi için gerektiğinde birden fazla elektrik motoru da kullanılabilir. Ayrıca ana bataryaya ek olarak ikinci bir batarya veya yardımcı başka bir enerji depolama sistemi de kullanılmaktadır [5].

Tümü elektrikli araçlarda enerji depolama sistemi olarak batarya kullanıldığından dolayı emisyon açığa çıkmamaktadır. Ayrıca tümü elektrikli araçlar, çalışmaları esnasında İYM gibi gürültü oluşturmamaktadır. Ayrıca, bu araçlarda frenleme enerjisi geri kazanılarak bataryalara aktarılabilir ve böylece bataryaların şarj olması sağlanabilmektedir.

Tümü elektrikli araçların dezavantajlarından bazıları ise:

- Maliyetlerinin yüksek olması,
- Aracın bakım ve onarımının yapılacağı servis sayısının yeterli olmaması,

- Bataryaların ağırlığının fazla olması,
- Batarya şarj sürelerinin, yakıtın doldurulma süresi göz önüne alındığında, uzun olması olarak söylenebilir.

Tümü elektrikli araçlara örnek, elektrikli bisikletler, üç tekerlekli taşıtlar, küçük banliyö taşıtları, golf arabaları, tekerlekli iskemleler, elektrikli arabalar ve otobüsler verilebilir [1].

3.2 Hibrid Elektrikli Araçlar

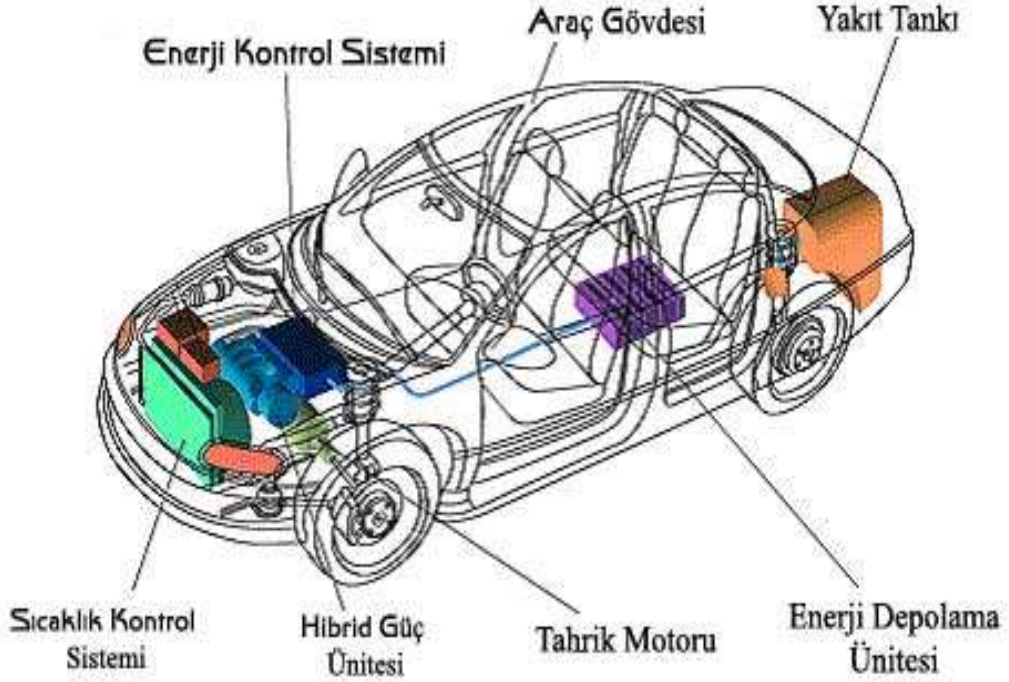
Uluslararası Elektroteknik Komisyonu'nun tanımına göre hibrid araçlar en az iki adet güç kaynağına sahip olan araçlardır. Hibrid elektrikli araçların enerjisi iki veya daha fazla enerji deposundan sağlanmakta ve bu enerji depolarından en az bir tanesi elektrik enerjisi sağlamaktadır [15]. Daha fazla kabul gören diğer tanımlama ise hibrid elektrikli araç, içten yanmalı motor ve elektrik motorunun birlikte kullanıldığı araç türüdür. Hibrid elektrikli araç, tümü elektrikli araca içten yanmalı bir motorun eklenmesiyle oluşturulmaktadır ve amacı aracın menzilini ve gücünü artırmaktır [5].

Hibrid elektrik aracın yapısı genel olarak, içten yanmalı bir motor, bir batarya ve bir elektrik motorundan oluşmaktadır.

Hibrid elektrikli araçlar geleneksel olarak seri ve paralel hibrid olarak ikiye ayrılmaktadır [7].

Hibrid elektrikli araçlar, taşıtın hareketi için elektrik motoru ve İYM'den sağlanan güçlerin oranına göre de sınıflandırılmaktadır. Buna göre hibrid araçlar tam hibrid, orta hibrid ve hafif hibrid olmak üzere üç sınıfta incelenmektedir.

Tam hibrid elektrikli araçlarda kullanılan elektrik gücünün toplam araç gücüne oranı en az %30'dur. Orta hibrid elektrikli araçlarda bu oran %10 ile %30 arasındadır. Yardımcı hibrid olarak da isimlendirilen orta hibrid araçlarda ilk önce İYM çalışmakta elektrik motoru ile ek güç sağlanmaktadır. İYM araç boşta iken durmakta ve frenleme enerjisi geri kazanılmaktadır. Hafif hibrid elektrikli araçlarda elektrik gücünün toplam araç gücüne oranı diğerlerine kıyasla çok düşüktür. Hafif hibrid araçlarda da araç boşta olduğu zaman İYM durmakta ve frenleme enerjisi geri kazanılmaktadır [16].



Şekil 3. 2 Hibrid elektrikli araç [17]

Hibrid elektrikli araçlar, güç koşullandırma üniteleri, enerji depolama ünitesi ve taşıt itici sisteminden oluşmaktadır. Enerji depolama ünitesi olarak bataryalar, süperkapasitörler ve volanlar kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan enerji depolama ünitesi ise bataryalardır [18].

Hibrid araçların geliştirilmesinin en önemli katkılarından biri, petrol ve türevi olan yakıtların tüketimini azaltmaktır. Bu nedenle aracın fazla hızlanma yapmadığı durumlarda İYM yerine elektrik motoru kullanılmakta ve böylece neredeyse sıfır emisyon salınmakta ve gürültü ortaya çıkmamaktadır. Elektrik motorunun çalışması için gerekli olan enerji ya İYM çalıştığı zaman ya da bataryalardan elde edilen enerji ile sağlanmaktadır.

Hibrid elektrikli araçların avantajları arasında:

- Çalışmaları esnasında emisyon oluşumunu en aza indirmeleri,
- Frenleme enerjisinin geri kazanılarak bataryaları şarj edebilmesi,
- Bu araçlarda kullanılan motorların daha hafif olması,
- Petrol ve türevi yakıtlara bağımlı olmaması,

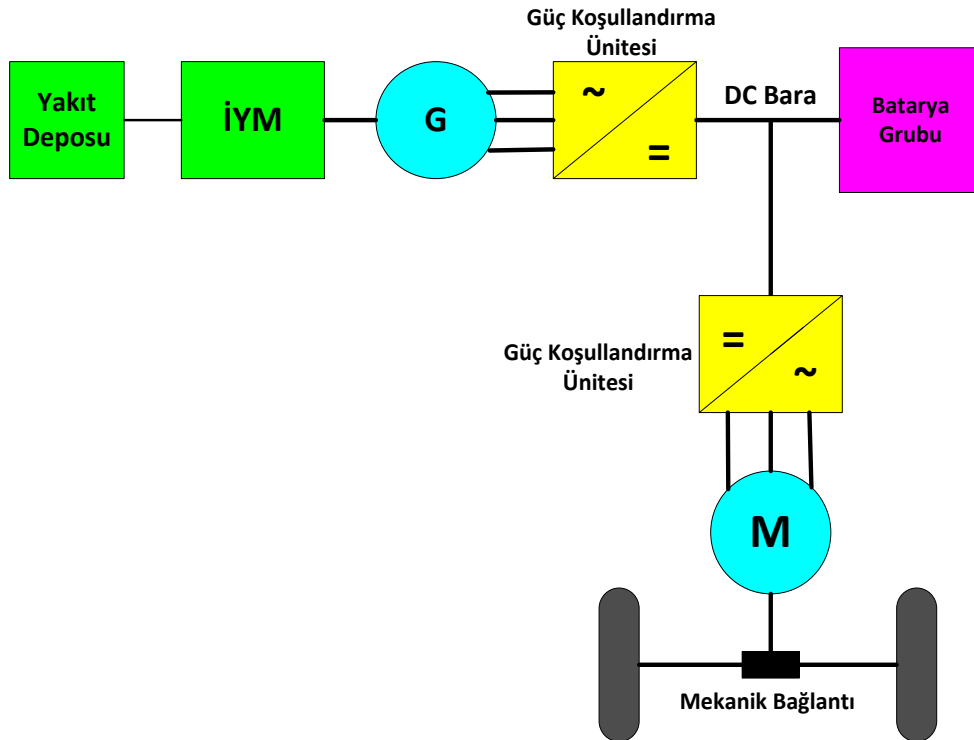
- Sessiz çalışmalarını gösterilebilir [5].

3.2.1 Seri Hibrid Elektrikli Araçlar

Seri hibrid elektrikli araç, İYM, generatör ve elektrik motoru olmak üzere üç adet tahrik sistemine sahip olan araçlardır. Bu araçlarda İYM ve generatör bataryaları şarj etmekle görevlidir. İYM'den elde edilen güç generatöre aktarılarak bataryaların şarjı sağlanmaktadır. Elektrik motoru ise bataryalardan aldığı elektrik enerjisi ile aracın çalışmasını sağlamaktadır. Seri hibrid elektrikli araçlar, tümü elektrikli araçlar gibi elektrik motorundan elde edilen güç ile çalışan araçlardır.

İYM, yakıt deposundan aldığı enerjiyi mekanik enerjiye çevirerek generatöre aktarmakta ve bu enerji generatörde elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu enerji bataryaları şarj etmekle kullanıldığı gibi, bataryalardan gelen güç ile birlikte elektrik motorunun çalışmasını da sağlamaktadır.

Seri hibrid elektrikli araçlarda frenleme enerjisi geri kazanılarak bataryaların şarjı sağlanmaktadır. Bataryaların şarjı, hem araç çalışma halindeyken İYM ve generatör grubu tarafından hem de frenleme enerjisinin geri kazanılması ile sağlanmaktadır.



Şekil 3.3 Seri hibrid elektrikli araç sistemi

Generatöre bağlı olan güç koşullandırma ünitesi, İYM ve generatör grubu ile bataryaları belirli sürelerde, belirli sınırlara kadar şarj etmektedir. Bataryanın doluluğu bu belirli sınırın altına düştüğünde İYM çalışmaya başlamaktadır. Eğer batarya üst sınıra kadar dolu ise bu takdirde İYM durmaktadır. Bazı seri hibrid elektrikli araçlarda motorun ihtiyaı olan elektriksel güç hem bataryalardan hem de içten yanmalı motor ve generatör grubundan sağlanmaktadır [5].

Seri tahrik sisteminin paralel tahrik sistemine göre dezavantajı elektrik enerjisi üretmek için generatöre sahip olmasıdır. Araçta paralel tahrik sistemine göre fazladan generatör bulunduğundan aracın hem ağırlığı hem de maliyeti artmaktadır. Seri tahrik sisteminin bir diğer dezavantajı da; İYM, generatör ve elektrik motoru olmak üzere üç adet tahrik sistemine sahip olduğundan dolayı enerji üç kere şekil değiştirmekte ve böylece sistemin toplam verimi azalmaktadır.

Seri hibrid elektrikli araçlara Türkiye’den şekil 3.4’te gösterilen Tübitak-Mam tarafından Tofaş için yapılan Fiat Doblo örnek olarak verilebilir.



şekil 3. 4 Tübitak-Mam tarafından Tofaş için yapılan seri hibrid otomobil ‘‘Fiat Doblo’’ [5]

3.2.2 Paralel Hibrid Elektrikli Araçlar

Paralel hibrid araçlar, İYM ve elektrik motoru ile birlikte tahrik edilen elektrikli araçlardır. Bu araçlarda İYM'nin sağladığı enerjinin bir bölümü tekerlekleri hareket etmek için kullanılırken, bir bölümü de elektrik motoru üzerinden bataryayı şarj etmek amacıyla kullanılmaktadır. Tahrik esnasında ise yük durumunda göre, İYM ve elektrik motoru birlikte veya elektrik motoru tek olarak da çalıştırılabilmektedir [19].

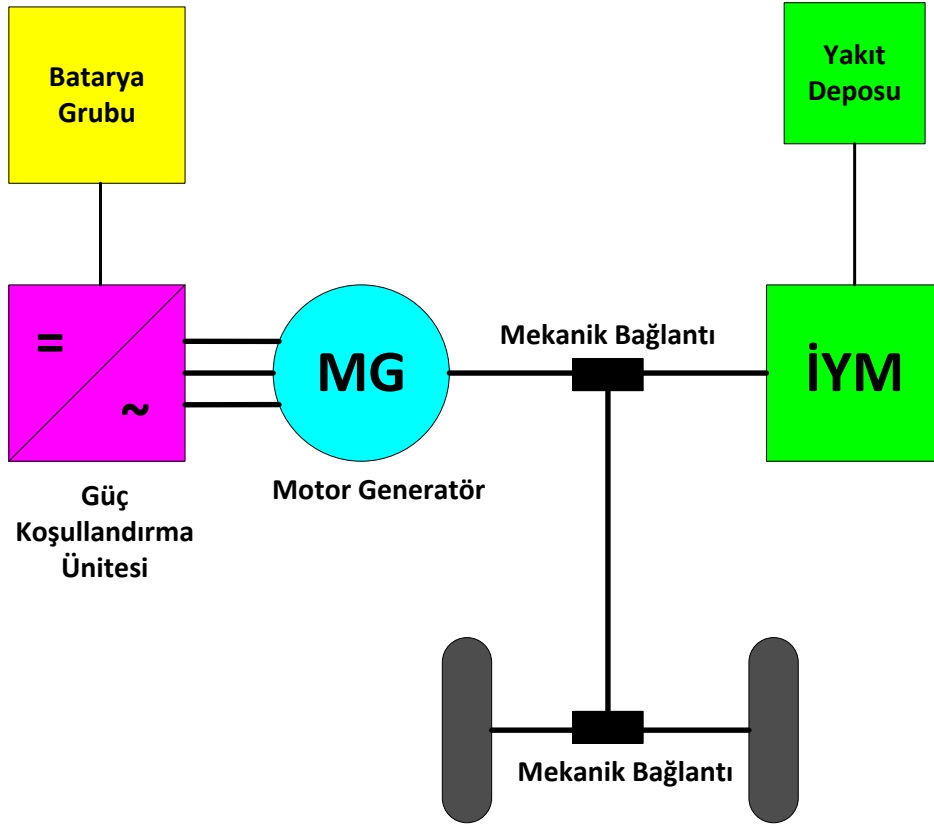
Paralel hibrid elektrikli araçlara otomotiv sektöründen Toyota Prius, Honda Insight ve Honda Civic örnek olarak verilebilir.



Şekil 3. 5 Honda Insight [20]

Paralel hibrid elektrikli araçlarda istenildiği zaman sadece elektrik motoru veya sadece İYM çalıştırılabilmektedir. Şehir içinde veya trafik sıkışıklığında yapılan dur-kalk sürüşleri esnasında sadece elektrik motoru kullanılarak sessiz çalışma sağlanıp, egzoz salınımı sorunu ortadan kaldırılabilir. Hızlı sürüş durumuna geçildiğinde, yokuş yukarı veya ivmelenme gerektiren yerlerde ise İYM ve elektrik motoru aracı birlikte tahrik etmektedir [16].

Paralel hibrid elektrikli araçların tahrik sistemleri, seri hibrid elektrikli araçların tahrik sistemlerine göre daha karmaşıktır. Paralel tahrik sistemlerinde içten yanmalı motorun tekerleklere kuvvet verilebilmesi için transmisyon mekanizmasına ihtiyaç vardır. Paralel hibrid elektrikli araçlarda daha küçük İYM kullanılmaktadır [5].



Şekil 3. 6 Paralel hibrid elektrikli araç sistemi

Paralel hibrid elektrikli araçlarda, seri hibrid elektrikli araçlarda olduğu gibi bataryalar frenleme enerjisi geri kazanılarak şarj olmaktadır. Buna ek olarak sürüş esnasında elektrik motoru, generatör olarak çalışarak bataryaları şarj etmektedir. Paralel hibrid elektrikli araçlarda bataryalar ve elektrik motoru daha küçüktür.

Paralel hibrid elektrikli araçların dezavantajları arasında:

- Sessiz çalışmanın tam olarak sağlanamaması,
- İYM ve elektrik motorundan gelen gücün, düzgün bir şekilde tekerleklere iletilmesi için karmaşık bir mekanizmaya ihtiyaç duymaları sayılabilir [16].

Paralel hibrid elektrikli araçlarda, elektrik motorunun gücünün ve elektrik motoru ile İYM güçlerinin toplamına oranı, hibridleştirme derecesi (HD) olarak tanımlanmaktadır [1].

$$HD = \frac{P_{EM}}{P_{EM} + P_{İYM}} = \frac{P_{EM}}{P_{HEV}} \quad (3.1)$$

P_{HEV} , hibrid elektrikli aracın maksimum itiş gücü olarak tanımlanır. Hibridleşme derecesi arttıkça İYM kullanımı artmaktadır.

3.3 Yakıt Pilleri Elektrikli Araçlar

Yakıt pilleri, yakıtın kimyasal enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Yakıt pilli elektrikli araçlar yapı itibariyle tümü elektrikli araçlara benzemektedirler, fakat bu araçlarda batarya yerine yakıt pilleri bulunmaktadır.



Şekil 3. 7 Mercedes A Serisi Ballard, yakıt pilli elektrikli araç [21]

Yakıt pilli elektrikli araçlar diğer araçlara nazaran daha yüksek verime sahiptir, daha düşük emisyon üretirler ve çalışmaları daha sessizdir.

Yakıt pili ile çalışan araçların menzili, yakıt pilinde depolanan enerji miktarı ile doğru orantılıdır. Yakıt pilli araçlarda enerji üretimi esnasında hareketli parçalar kullanılmadığından dolayı verim %60 ile %70 arasında değişmektedir [5].

Yakıt pili ile çalışan elektrikli araçlar; sessiz çalışmaları, verimlerinin yüksek olması ve emisyon değerlerinin düşük olması gibi önemli avantajlara sahip olsa da, seri üretime geçme esnasında bazı teknik ve ekonomik problemler ile karşılaşmaktadırlar. Teknik sorunların en önemlisi, hidrojen depolama problemi ve yakıt sistemleridir.

Yakıt pilli elektrikli araçlar, yakıt depolama sistemi, yakıt hücresi, güç koşullandırma ünitesi ve kontrol sistemi ile tahrik sisteminden meydana gelmektedirler. Yakıt

depolama sisteminde depo edilen hidrojen, doğrudan veya fosil kökenli yakıtların işlenmesi ile elde edilir. Bir yakıt hücresinin gerilimi 0,7 V civarındadır ve bu gerilim yakıt hücrelerinin seri olarak birbirine bağlanmaları ile arttırılabilmektedir [1].

Son yıllarda, ülkeler arasında yakıt pillerinin elektrikli araçlara uygulanması konusunda bir rekabet başlamıştır. Yakıt pilli elektrikli araçların ticarileştirilmesi ile İYM'li araçların yol açtığı çevre kirliliği büyük oranda azalacak ve aynı zamanda ekonominin gelişmesi sağlanacaktır.

Son zamanlarda üretilen yakıt pilli elektrikli araçlara; General Motors tarafından geliştirilen Precept, Ford tarafından geliştirilen Ford Focus FCV ve P2000, Nissan tarafından geliştirilen Xterra FCV örnek olarak verilebilir [22]. Ayrıca Honda'nın FCX Clarity modeli, ilk seri üretim yakıt pilli elektrikli araçtır.

3.4 Elektrik Hatlarını Kullanan Elektrikli Araçlar

Elektrik hatlarını kullanan elektrikli araçlara örnek, günümüzde çok yaygın olarak kullanılmayan, tramvay ve trolleybüslerdir [1]. Bu araçlar şehir içi ulaşımında maliyetlerinin düşük olması ve çevre dostu olmalarından dolayı çok fazla tercih edilmişlerdir. Bu tip araçlarda elektrik enerjisi, elektrik hatlarından sağlanmaktadır. Ayrıca trolleybüslerde, sınırlı bir mesafe için elektrik hattından ayrılma gibi bir durumun yaşanması söz konusu olabileceğinden, batarya da bulunmaktadır.



Şekil 3. 8 Taksim-Tünel nostaljik tramvay hattındaki iki tramvay [23]

3.5 Güneş Enerjisi ile Çalışan Elektrikli Araçlar

Güneş enerjisi ile çalışan elektrikli araçların maliyeti yüksektir ve bu tip araçlar, güneş ışığının yüksek olduğu bölgelerde verimli olarak çalışmaktadırlar. Fotovoltaik hücrelerin maliyetleri azalırken verimlerinin arttığı göz önüne alındığında, güneş enerjili elektrikli araçların uygulamalarında artış beklenmektedir. Güneş enerjisi ile çalışan elektrikli araçlara otomotiv sektöründen, 1996 yılında Dünya güneş yarışmasını kazanan “Honda Dream” örnek olarak verilebilir [1].



Şekil 3. 9 1996 Yılında Avustralya’da düzenlenen Dünya Güneş Yarışması kazanan “Honda Dream Solar” [24]

3.6 Volanlı ve Süperkapasitörlü Elektrikli Araçlar

Volanlar ve süperkapasitörler birçok hibrid elektrikli araçta kullanılmaktadır. Volanlı ve süperkapasitörlü enerji depolama sistemine sahip elektrikli araçlar, yüksek güç yoğunluğuna sahip olan araçlardır. Fakat bu tip araçların depolayabildikleri enerji miktarları sınırlıdır. Kısacası, bu araçların sahip oldukları güç yoğunluğu yüksek olmasına rağmen depolayabildikleri enerji miktarları düşüktür.

Enerji depolama aracı olarak volan kullanılan elektrikli araçlardan bir tanesi, John Parry tarafından tasarlanan bir tramvaydır. Volanın enerji depolayabilmesi için gerekli olan güç tramvay yolcu duraklarında durduğu zaman sağlanmıştır [1]. Volan sistemlerinin en önemli avantajları; yüksek çevrim ömrü, yüksek güç yoğunluğu, iyi depolama verimi ve

tekrar şarj zamanının kısa olmasıdır [5]. Volanlı elektrikli araçların bataryalardan üstün yanı enerjiyi alıp vermesinin kolay ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Volanların uygulamasındaki en büyük dezavantaj çalışmaları için ek donanıma ihtiyaç duymasındır. Ek donanımlar da araca hem maliyet hem de ekstra ağırlık kazandırmaktadır.

Gücü depolamak için kullanılan süperkapasitörler, normalde hibrid elektrikli aracın bir parçası olarak kullanılmaktadır. Süperkapasitörler, ivmelenme ve yokuş çıkma gibi ani güç gereksinmelerinde bataryalara veya yakıt piline ilave enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır [5].

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN KAYNAK VE ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTELERİ

Elektrikli araçlarda kullanılan başlıca enerji depolama üniteleri:

- Bataryalar,
- Volanlar,
- Süperkapasitörler,
- Güneş fotovoltaikleri,
- Yakıt pilleridir.

Bu bölümde yukarıda sayılan enerji depolama ünitelerinden bataryalar, volanlar, süperkapasitörler ve güneş fotovoltaikleri incelenmektedir. Benzetim çalışmasında da kullanılan yakıt pilleri ayrı bir başlık altında bir sonraki bölümde incelenecektir.

4.1 Bataryalar

Bataryalar, kimyasal enerjii elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bataryalar hücrelerden, hücreler de bir elektrolit ile pozitif ve negatif anotlardan oluşmaktadır. Elektrolit ve elektrotlar arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu DC elektrik üretilmektedir [1].

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların uzun ömürlü, yüksek spesifik güç, yüksek spesifik enerji ve uzun çevrim ömrüne sahip olması beklenmektedir.

Günümüz teknolojisinde elektrikli araçlarda enerji depolama ünitesi olarak kullanılan bataryaların başında lityum-iyon bataryalar gelmektedir. Lityum-iyon bataryalar diğer

bataryalara nazaran daha hafif olup, enerji yoğunlukları oldukça yüksektir. Menzilleri 150 km civarında da olsa lityum-iyon bataryalar, CO₂ salınımını ciddi oranda azalttığından, şehir içi kullanım için ideal görülmektedir [8].

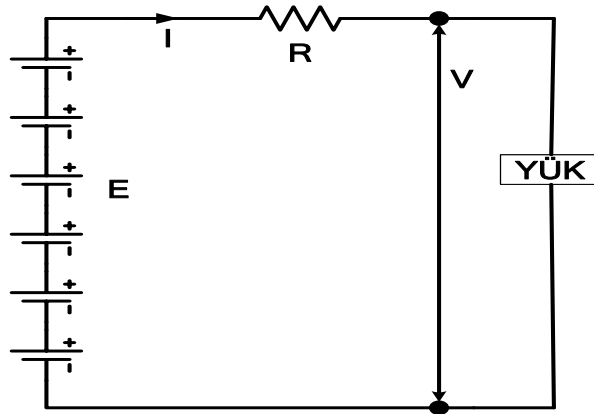
4.1.1 Batarya Parametreleri

Bir bataryanın performansını belirleyen en önemli parametreler aşağıda sıralanmıştır.

4.1.1.1 Hücre ve Batarya Gerilimleri

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların gerilimleri 6 V veya 12 V olmaktadır. Bu gerilim pratikte değişmektedir. Akım verildiğinde gerilim düşmekte, batarya doldurulurken gerilim yükselmektedir.

Hücre ve batarya gerilimlerinin ifadesi iç direnç terimi ile gösterilmektedir. Bu terim ile batarya sabit bir E gerilimine sahip olarak gösterilmekte fakat terminallerdeki gerilim iç direnç R'nin gerilimini nedeniyle farklı bir V gerilimidir. Şekil 4.1'deki bataryanın eşdeğer devresinden I akımının geçtiği göz önüne alınarak aşağıdaki bağıntı yazılabilmektedir [1].



Şekil 4. 1 Altı adet hücreden oluşan bataryanın eşdeğer devresi

$$V = E - IR \quad (4.1)$$

Eğer devre akımı sıfır ise terminal gerilimi E'ye eşit olacaktır. Eğer batarya dolum işleminde ise gerilim IR kadar yükselecektir. Elektrikli araç bataryalarında iç direncin mümkün olduğunca küçük olması tavsiye edilmektedir.

4.1.1.2 Dolum Kapasitesi

Dolum kapasitesi, A-saat (Ah) veya mA-saat (mAh) olarak ifade edilir ve batarya ömrü ile şarjları arasındaki derecelendirme faktörü olarak isimlendirilir. Batarya akımı C-Oranı birimi ile tanımlanmaktadır. C, Ah veya mAh cinsinden dolum kapasitesini, C-Oranı ise C/1 saat olarak ifade edilmektedir. 1000 mA'lık bir batarya için 1 C'ye karşılık gelen akım 1000 mA, 0.1 C'ye karşılık gelen akımı 100 mA, 2 C'ye karşılık gelen akım ise 2000 mA'dir [25].

4.1.1.3 Depolanan Enerji

Bataryanın görevi enerjiyi depolamaktır. Bir bataryada depolanan enerji bataryanın gerilimi ve dolum kapasitesi ile orantılıdır. Depolanan enerji watt-saat (Wh) olarak ifade edilmektedir.

$$\text{Enerji} = \text{Gerilim} \times Ah \quad (4.2)$$

4.1.1.4 Spesifik Enerji

Spesifik enerji, batarya bir kilogramında depolanan elektrik enerjisi miktarı olarak ifade edilir. Birimi Wh/kg'dir.

4.1.1.5 Enerji Yoğunluğu

Enerji yoğunluğu, bataryanın bir metreküpünde depolanan elektrik enerjisi olarak ifade edilmektedir. Birimi Wh/m³tür.

4.1.1.6 Spesifik Güç

Spesifik güç, bataryanın bir kilogramından elde edilen güç miktarını ifade etmektedir. Spesifik güç bataryaya bağlı olan yük ile ilişkilidir. Birimleri W/kg'dir. Bazı bataryalar yüksek spesifik enerjiye sahip olmalarına rağmen, düşük spesifik güce sahiptirler. Bu da bu tip bataryaların fazla enerji depolamaları fakat bu enerjiyi yavaşça vermeleri anlamına gelmektedir [1].

4.1.1.7 Enerji Verimliliği

Enerji verimliliği, bataryanın sağladığı elektrik enerjisi miktarının, deşarjdan önceki duruma dönmesi için gerekli olan enerjiye oranı olarak ifade edilmektedir [26].

Elektrikli araçlarda, enerji verimliliği ve düşük emisyon en önemli faktörler olduğundan dolayı enerji verimliliğinin mümkün olduğunca yüksek olması istenmektedir. Bataryaların hızlı şarj ve deşarj olması enerji verimliliğini düşürmektedir.

4.1.1.8 Diğer Önemli Parametreler

Bataryaların doluluk oranı (SoC), bataryanın bir çeşit yakıt göstergesidir. SoC yüzdesel olarak ifade edilir. %0, bataryanın boş; %100 bataryanın dolu olduğu anlamına gelmektedir. Aynı ölçüm değerinin bir başka biçimi olan deşarj derinliği (DoD) ise SoC'un tersidir. SoC; kullanımda olan bataryanın mevcut durumu, DoD; tekrar kullanımdan sonra bataryanın ömrü hakkında yorum yapılırken kullanılır [27].

Bataryaların bir kısmı kullanılmadığı zaman kendi kendine boşalmaktadır. Buna kendi kendine boşalım denilmektedir. Bu parametre, bazı bataryaların doldurulmadan uzun süre bırakılmaması gerektiğini gösterdiğinden dolayı önemlidir.

Bataryaların çoğu ortam sıcaklığında çalışmasına rağmen bazıları farklı sıcaklıklarda çalışmaktadır. Bataryayı çalıştırmak için ısıtmaya, kullanım esnasında soğutmaya ihtiyaç duyulabilmektedir. Batarya sıcaklığı performans açısından önemli bir faktördür.

Bir diğer önemli parametre ise bataryaların ömrüdür. Bataryanın ömrü elektrikli aracın maliyetine yansıyan bir faktördür.

4.1.2 Kurşun Asit Bataryalar

Bataryalarda, özellikle kurşun asitli bataryalar, yaygın kullanım ve maliyetinin düşük olması sebebiyle tercih edilmektedir [28].

Kurşun asit bataryalar; bakım gerektirmeyen, ucuz, fakat ağır ve enerji yoğunluğu düşük olan bataryalardır. Kurşun asit bataryalar İYM'li araçlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat elektrikli araçlarda kullanılan kurşun asit bataryalar, İYM'li

araçlarda kullanılan bataryalara göre daha uzun ömürlüdür, tasarımları da daha farklı ve pahalıdır [5].

Kurşun asit bataryaların pozitif plakaları kurşun dioksit malzemeye, negatif plakaları kurşuna sahiptir. Plakalar, sülfürik asit elektrolit içerisine daldırılarak, elektrik enerjisi üretilmektedir.

Çizelge 4. 1 Kurşun asit batarya parametreleri

Spesifik Enerji	35-40 Wh/kg
Spesifik Güç	75-300 W/kg
Hücre Gerilimi	2 V
İç Direnç	Çok düşük
İşletme Sıcaklığı	Ortam sıcaklığı
Enerji Yoğunluğu	54-95 Wh/m ³
Yeniden Dolum Süresi	8 saat

Kurşun asit bataryaların yaygın kullanılmasının sebepleri; kurşun ve sülfürik asit olan ana bileşenlerinin ucuz olması, güvenli bir şekilde çalışması ve her hücre için yaklaşık 2 V'luk bir gerilime sahip olmalarıdır. Genellikle altı adet hücre seri bağlanarak 12 V'luk gerilim elde edilmektedir. Ayrıca kurşun asit bataryaların iç direnci oldukça düşüktür.

Kurşun asit bataryalar, 35-40 Wh/kg spesifik enerji ve 75-300 W/kg spesifik güce sahiptirler. Bu özelliklerin çoğu, genel uygulamalarda taşıt çalıştırılması, ivmelenmesi, kesintisiz güç kaynakları ve diğer tüketici uygulamalarında kullanılabilir. Fakat bilindiği gibi teknoloji ilerledikçe talep artmaktadır. Artan talepleri karşılamak amacıyla da daha yüksek spesifik güce veya enerjiye gereksinim vardır. Bu nedenle son yıllarda kurşun asit bataryanın geliştirilmesi amacıyla pek çok çalışma yapılmıştır [28].

Kurşun asit bataryalar, kW-saat dolum açısından en ucuz olan yeniden şarj edilebilen bataryalardır. Fakat spesifik enerjileri düşük olduğundan dolayı uzun menzilli araçlarda kullanımı zordur [1].

4.1.3 Nikel Bazlı Bataryalar

Nikel bazlı bataryalar; nikel demir, nikel çinko, nikel kadmiyum ve nikel metal hidrürdür.

4.1.3.1 Nikel Kadmiyum Bataryalar

Nikel kadmiyum bataryalar, kurşun asit bataryaların sahip olduğu spesifik enerjiden daha fazla spesifik enerjiye sahiptirler.

Nikel kadmiyum bataryaların; pozitif elektrotunda nikel, negatif elektrotunda kadmiyum, elektrolit olarak potasyum hidroksit kullanılmaktadır [26].

Nikel kadmiyum bataryalar elektrikli araçlarla birlikte diğer birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu bataryalar yüksek spesifik güç, uzun ömür ve iyi denilebilecek uzun menzilli depolama avantajlarına sahiptirler. Ayrıca sarsıntılara karşı oldukça dayanıklıdır. Yüksek sayıda şarj ve deşarj oranları, yüksek akım değeri gibi özellikler istendiğinde aranan bir batarya çeşididir. Bu özelliklere sahip olduğundan elektrikli araçlarda da kullanılabilir. Ni-Cd batarya, Avrupa'da elektrikli taşıt pazarındaki en donanımlı bataryadır. Ni-Cd pillerin en büyük avantajı; enerji yoğunluklarının düşük ve başlangıç maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, yüzlerce kez şarj edilebildiklerinden, uzun vadede çok ekonomik olmalarıdır [29].

Çizelge 4. 2 Nikel kadmiyum batarya parametreleri

Spesifik Enerji	40-60 Wh/kg
Spesifik Güç	150-300 W/kg
Hücre Gerilimi	1.2 V
İç Direnç	Çok düşük
İşletme Sıcaklığı	-40 °C - +80 °C
Enerji Yoğunluğu	70-90 Wh/m ³
Yeniden Dolum Süresi	1 saat

Bu bataryaların dezavantajları ise; her hücrenin gerilimi yaklaşık 1,2 V olduğundan 12 V'luk gerilim elde edebilmek için on adet hücreye ihtiyaç duymalarından dolayı elektrikli araçlarda maliyeti artırmaları ve kadmiyumun çevreye zararlı olmasından dolayı geri dönüşümde yaşanan problemlerdir [1].

4.1.3.2 Nikel Metal Hidrür Bataryalar

Nikel metal hidrür bataryalar, çevreye karşı daha duyarlı olduklarından dolayı son yıllarda nikel kadmiyum bataryalara nazaran, daha fazla kullanım alanına ve daha iyi performansa sahiptirler. Ayrıca nikel kadmiyum bataryalara göre daha fazla enerji depolama kapasitesine sahip olup, daha hızlı doldurulabilirler. Nikel metal hidrür bataryalar kurşun asit bataryalara göre çok daha pahalıdır [5].

Nikel metal hidrür bataryalar; aktif malzemesi nikel hidroksit olan pozitif elektrot, metal hidrür karışımı olan negatif elektrot ve potasyum hidroksit elektrolitten oluşmaktadır [26].

Çizelge 4. 3 Nikel metal hidrür batarya parametreleri

Spesifik Enerji	55-85 Wh/kg
Spesifik Güç	100-300 W/kg
Hücre Gerilimi	1.2 V
İç Direnç	Çok düşük
İşletme Sıcaklığı	Ortam sıcaklığı
Enerji Yoğunluğu	150 Wh/m ³
Yeniden Dolum Süresi	1 saat

Nikel metal hidrür bataryaların dolum işlemi hızlı olduğundan soğutmaya ihtiyaç duyabilirler. Bu amaçla kutularının üzerlerinde fanlar bulunabilmektedir. Bu bataryalar ticari olarak küçük boyutlarda bulunmaktadır, fakat elektrikli araçlar için daha uygun olan büyük boyutlu çeşitleri de üretilmektedir [1].

4.1.4 Sodyum Bazlı Bataryalar

Sodyum bazlı bataryaların çalışma sıcaklıkları yüksek olduğundan dolayı elektrikli araçlar için uygundur.

4.1.4.1 Sodyum Sülfür Bataryalar

Bu bataryalar, kurşun asit bataryalar ile karşılaştırıldıklarında, spesifik enerjilerinin daha fazla olduğu görülmektedir.

Batarya, negatif sıvı sodyum elektrotu ve pozitif sıvı sülfür elektrotundan meydana gelmektedir. Elektrolit ise sodyum iyonlarını yönlendiren ve iki elektrotu ayıran bir çeşit katı seramiktir. Elektrolitin seramik olması güvenlikle ilgili birtakım endişelerin oluşmasına neden olmuştur ve bu endişeler denemeler sırasında oluşan yangınlar ile birlikte desteklendiğinden, bu batarya ticari olarak fazla gelişmemiştir [1].

Sodyum sülfür bataryalar 300-350 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadırlar. Batarya sıcaklığı 200 °C'nin altına düştüğü zaman sodyumun donması nedeniyle çalışması durmaktadır [5].

Çizelge 4. 4 Sodyum sülfür batarya parametreleri

Spesifik Enerji	150-240 Wh/kg
Spesifik Güç	90-230 W/kg
Hücre Gerilimi	2 V
İç Direnç	Çok düşük
İşletme Sıcaklığı	300-350 °C
Enerji Yoğunluğu	150 Wh/m ³
Yeniden Dolum Süresi	8 saat

Bataryanın ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının tasarımcı açısından iyi bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir.

4.1.4.2 Sodyum Nikel Klorür Bataryalar

Sodyum nikel klorür bataryalar, pozitif elektrot olarak nikel klorüre, negatif elektrot olarak sodyuma sahiptirler.

Sodyum nikel klorür bataryalar, kurşun asit bataryalar ile karşılaştırıldıklarında daha yüksek spesifik enerji ve enerji yoğunluğuna sahip oldukları görülmektedir.

Sodyum nikel klorür bataryalar ile birlikte, sodyum sülfür bataryalarda yaşanan güvenlik problemlerinin aşıldığı düşünülmektedir [1].

Çizelge 4. 5 Sodyum nikel klorür batarya parametreleri

Spesifik Enerji	80-120 Wh/kg
Spesifik Güç	130-160 W/kg
Hücre Gerilimi	~ 2 V
İç Direnç	Çok düşük
İşletme Sıcaklığı	300-350 °C
Enerji Yoğunluğu	150 Wh/m ³
Yeniden Dolum Süresi	8 saat

4.1.5 Lityum Bataryalar

Lityum bataryalar diğer tekrar şarj edilebilen bataryalara nazaran daha yüksek maliyete sahiptirler. Fakat enerji yoğunlukları oldukça iyileştirilmiştir.

4.1.5.1 Lityum Polimer Bataryalar

Lityum polimer bataryalarda, negatif elektrot katı lityumdan ve pozitif elektrot metal oksitten oluşmaktadır. Kimyasal reaksiyon sonucu lityum, lityum metal oksit oluşturacak şekilde metal oksitle birleşmekte ve böylece enerji açığa çıkmaktadır [26].

Çizelge 4. 6 Lityum polimer batarya parametreleri

Spesifik Enerji	155 Wh/kg
Spesifik Güç	100-315 W/kg
İşletme Sıcaklığı	120 °C

4.1.5.2 Lityum İyon Bataryalar

Lityum iyon bataryalar, pozitif elektrot olarak lityumlu bir metal oksit ve negatif elektrot olarak lityumlu karbondan oluşmaktadır.

Lityum iyon bataryaların en önemli özelliği, hücreler doldurulurken gerilimin belli bir değerde olması gerektiğidir. Bu nedenle batarya ile birlikte şarj aletleri de geliştirilmektedir [1].

Lityum iyon bataryalar diğer bataryalara nazaran daha hafiftirler ve yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Bu nedenle gelişimini tamamladıklarında, elektrikli araç uygulamalarında en çok tercih edilen bataryalar olacağı öngörülmektedir.

Çizelge 4. 7 Lityum iyon batarya parametreleri

Spesifik Enerji	90 Wh/kg
Spesifik Güç	300 W/kg
Hücre Gerilimi	3.5 V
İç Direnç	Çok düşük
İşletme Sıcaklığı	Ortam sıcaklığı
Enerji Yoğunluğu	150 Wh/m ³
Yeniden Dolum Süresi	2-3 saat

Lityum iyon bataryaları, elektrikli araç uygulamalarında kullanmak üzere daha uygun şartlara getirebilmek amacıyla, Japonya'da Sony ve Panasonic, Avrupa'da SAFT ve Varta, Amerika'da da Duracell çeşitli çalışmalar sürdürmektedir. Sony, 35 kWh kapasiteli ve enerji yoğunluğu 120 Wh/kg bir lityum iyon batarya yaptığını bildirmiştir [5].

Lityum iyon batarya kullanılarak geliştirilen elektrikli araç uygulamalarından en dikkat çekici olanı, 2001 yılında üretilen Ford Ka'nın elektrikli otomobilidir.



Şekil 4. 2 Lityum iyon batarya kullanılarak geliştirilen Ford Ka [30]

4.1.6 Metal-Hava Bataryaları

Elektrikli araçlarda kullanılan diğer bir batarya türü metal-hava bataryalarıdır. Çinko ve alüminyum bu bataryalarda en fazla kullanılan metal elektrotlardır. Metal hava bataryalarında, ince gaz geçirgen katot ve potasyum hidroksit gibi alkali su bazlı elektrolit kullanılmaktadır [5].

Metal hava bataryalarında bulunan metal elektrotlar tükendikleri zaman yenileriyle değiştirilmektedir. Bu nedenle metal elektrotlar bir çeşit yakıt gibi düşünülmektedir [1].

4.1.6.1 Alüminyum Hava Bataryaları

Alüminyum hava bataryalarında bulunan alüminyum, havadaki oksijen ve suyla birleşerek alüminyum hidroksit oluşturmakta ve bu kimyasal reaksiyon sonucu elektrik enerjisi açığa çıkmaktadır [26].

Bu tip bataryaların negatif elektrotu alüminyumdan oluşur. Kullanılmış olan negatif elektrotların değiştirilmesi ile batarya yeniden doldurulmuş olmaktadır.

Alüminyum hava bataryalarının en büyük dezavantajı düşük spesifik güce sahip olmalarıdır. Elektrikli araç için gerekli olan güce erişebilmek için çok ağır bataryalar kullanılması gerektiğinden kullanışlı değildir.

Çizelge 4. 8 Alüminyum hava batarya parametreleri

Spesifik Enerji	225 Wh/kg
Spesifik Güç	10 W/kg
Hücre Gerilimi	1.4 V
İç Direnç	Yüksek
İşletme Sıcaklığı	Ortam sıcaklığı
Enerji Yoğunluğu	195 Wh/m ³
Yeniden Dolum Süresi	10 dakika

4.1.6.2 Çinko Hava Bataryaları

Çinko hava bataryalarında bulunan çinko, havadaki oksijenle birleşerek çinko oksidi oluşturmakta ve böylece enerji üretilmektedir.

Çinko hava bataryaları, alüminyum hava bataryalarına nazaran daha yüksek spesifik güce sahiptirler. Bu nedenle alüminyum hava bataryalarına göre daha kullanışlıdır.

Çizelge 4. 9 Çinko hava batarya parametreleri

Spesifik Enerji	230 Wh/kg
Spesifik Güç	105 W/kg
Hücre Gerilimi	2 V
İç Direnç	Çok düşük
İşletme Sıcaklığı	Ortam sıcaklığı
Enerji Yoğunluğu	270 Wh/m ³
Yeniden Dolum Süresi	10 dakika

4.1.7 Bataryanın Şarj Edilmesi ve Dolum Eşitleme İşlemi

Elektrikli araçlarda ana enerji kaynağı veya birinci dereceden yardımcı enerji kaynağı olarak kullanılan bataryaların performansları, yalnızca batarya hücrelerinin tasarımına bağlı değil, bununla birlikte bataryaların nasıl şarj edildiğine de bağlıdır [31].

Bataryaların şarjı, sorunsuz çalışmanın sağlanması ve arızaların önlenmesinde önemli faktörlerden biridir.

Bir batarya şarj cihazı, elektrik enerjisi kaynağından enerjiyi alıp bataryaya uygun formda elektrik enerjisi sağlar [32].

Şarj olayı, deşarj olayının tersi olduğundan akım vererek deşarj olan batarya, dışarıdan akım uygulanarak kimyasal reaksiyonun ters çevrilmesiyle tekrar şarj olur. Bir bataryanın şarj ve deşarj olma işlemi bataryanın tasarımı, şarj durumu, sıcaklığı ve kullanımı gibi pek çok unsura bağlıdır. En çok kullanılan batarya şarj yöntemleri; sabit akımda şarj, sabit gerilimde şarj ve sabit akım-gerilimde şarjdır [31].

Bataryaların şarj cihazları ile ilgili önemli olan konulardan biri de araçların doldurulması için şarj istasyonlarının sağlanmasıdır. Fakat asıl sağlanması gereken, tüm elektrikli araçların bu istasyonlara güvenli bir şekilde bağlanabilmesi için gerekli olan şartların sağlanmasıdır [33].

Bataryalarda ciddi bir hasara neden olmamak için bütün bataryalara düzenli olarak dolum eşitleme işlemi yapılması gerekir.

Bataryalardaki problemlerden biri akım çekildiği zaman bütün hücrelerin eşit miktarda dolum kaybetmemesidir. Bu olay, kendi kendine boşalım etkilerinin farklı hücrelerde farklı oranlarda olması sebebiyle meydana gelmektedir. Bunu önlemenin yolu her batarya hücresi tamamen dolana kadar bataryayı düzenli aralıklarla tamamen doldurmaktır [33].

4.2 Alternatif Enerji Kaynakları ve Depoları

Elektrikli araçlar için gerekli olan güç kaynakları, sadece bataryalar ve yakıt hücreleri ile sınırlı değildir. Batarya ve yakıt hücrelerine ek olarak volanlar, süperkapasitörler ve güneş fotovoltaikleri gibi alternatif enerji kaynakları da mevcuttur.

4.2.1 Volanlar

Volanlar, dönen bir ağırlık sayesinde kinetik enerji depolayan ünitelerdir.

Volanlar, içten yanmalı motorlara sahip araçlarda enerji depo etmek amacıyla, hibrid elektrikli araçlarda içten yanmalı motor ile birlikte yardımcı güç ünitesi olarak, elektrikli araçlarda da bataryaların yerine veya bataryalar ile birlikte kullanılmaktadır.

Volanların avantajları, spesifik güçlerinin yüksek olması ve volanların şarj sürelerinin kısa olmasıdır.

Volanların, büyük ve ağır olmalarından dolayı enerji yoğunlukları düşüktür. Volanların enerji yoğunlukları dönme hızı ile doğru orantılıdır. Bir volanda depolanan enerji miktarı:

$$E = 0.5J\omega^2 \quad (4.3)$$

Bu eşitlikte; J atalet momentini, ω rad/s cinsinden dönme hızını ifade eder [1].

Volanların spesifik enerjilerinin düşük olması ve çarpışma esnasında patlama riskine sahip olmaları en büyük dezavantajlarıdır. Ayrıca sistemin çalışması için ek donanıma ihtiyaç duymaları maliyeti artırmakta ve araca ekstra ağırlık kazandırmaktadır.

4.2.2 Süperkapasitörler

Kapasitörler, iki iletken plakanın yalıtkanla ayrıldığı elemanlardır. Plakalardan birine pozitif, diğerine negatif olmak üzere DC gerilim bağlanır. Plakalardaki zıt dolular birbirini çekerek enerji depolama işlemi gerçekleştirilir [1].

Normal olarak kapasitörler güç elektroniği elemanları olarak küçük boyutlu enerji depolama işlemlerinde kullanılmasına rağmen volanlar gibi büyük miktarda enerji depolama işlemlerinde de kullanılırlar. Böyle büyük miktarda enerji depolama kapasitesine sahip olan geniş plakalı kapasitörler, süperkapasitörler olarak adlandırılır. Bir kapasitörde depolanan enerji miktarı:

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \quad (4.4)$$

Bu eşitlikte; E, Joule cinsinden depolanan enerji; C kapasitörün Farad cinsinden kapasitansı; V gerilimin Volt cinsinden değerini ifade eder. Kapasitörlerde depolanan enerji miktarı plakaların alanına ve aralarındaki uzaklığa bağlıdır:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (4.5)$$

Bu eşitlikte ϵ , plakalar arasındaki malzemenin elektriksel geçirgenliğidir. A, plaka alanı ve d, plakalar arasındaki uzaklıktır. Süperkapasitörlerde plakalar arasındaki uzaklık çok kısadır [1].

Süperkapasitörlerin karakteristikleri volanlara benzer, yüksek spesifik güce ve düşük spesifik enerjiye sahiptirler. Süperkapasitörler, araçlarda tek başlarına kullanılabilmelerine rağmen hibrid araçlarda frenleme ve hızlanma durumlarında da batarya veya yakıt hücrelerine yardımcı enerji kaynağı olarak da kullanılabilirler. Ayrıca süperkapasitörler, volanlara nazaran mekanik bozulma problemlerini engellediklerinden dolayı daha güvenilirlerdir [5].

4.2.3 Güneş Fotovoltaikleri

Güneş fotovoltaikleri güneş ışığını doğrudan elektrik akımına çeviren cihazlardır. Güneş fotovoltaikleri genellikle düz paneller şeklinde binalarda, yol ekipmanlarında, elektronik ekipmanlarda kullanılırlar. Ayrıca, ince filmler şeklinde üretilerek arabalarda da enerji kaynağı olarak bulunabilirler [1].

Güneş radyasyonu, atmosferin üst kısımlarında en yüksek 1300 W/m^2 değerinde bulunmaktadır, fakat bunun bir kısmı atmosferde kaybolur ve dünya yüzeyine ulaştığı zaman bu değer azalır. Sürekli güneşe bakan düz bir plaka yüzeyinde tropik bölgelerde bu değer yaklaşık olarak 750 W/m^2 civarındadır. Araba tavanına yerleştirilmiş olan güneş paneli de düz bir yüzeye sahip olduğundan dolayı güneş gökyüzünde hareket ettikçe plakaya farklı açılardan düşecektir ve böylece enerji miktarı tropik bölgelerde yarı yarıya inerek yaklaşık 375 W/m^2 değerinde olacaktır [34].

Güneş panelleri bütünleşik ve harici olmak üzere iki ayrı şekilde kullanılır. Araba yüzeyinin tamamı güneş hücreleri ile kaplandığı zaman dahi çok sınırlı miktarda güç elde edileceği açıkça görülmektedir. Harici güneş panelleri ise gerektiği kadar güç

sağlayabilmektedirler. Ayrıca kullanılmayan fazla güç elektrik şebekesine geri verilebilmektedir [1].

Güneş panellerinin metrekare başına düşük güç sağlaması ve pahalı olmaları en büyük dezavantajlarıdır.

Güneş panellerinin verimlerinin artırılıp, maliyetinin düşürülmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Güneş panelleri, sadece aracı sürmek için gerekli olan gücü sağlamayıp, bataryaların kendi kendine boşalmalarının giderilmesi ve araç beklemedeyken aracı soğutmak veya ısıtmak gibi amaçlarla da kullanılabilirler [35].

YAKIT PİLLERİ

Yirmi birinci yüzyılda birçok alanda enerji üretimi için en önemli adaylardan biri, yakıt olarak hidrojen kullanan yakıt pilleridir. Yakıt pilleri diğer enerji dönüşüm sistemlerine göre daha sessiz ve daha temiz çalışmaktadırlar. YP'ler İYM'lere göre iki ya da üç kat verimlerinin yanında, düşük emisyon, oynar parçaların olmaması ve kullanıma göre tasarım olanaklarıyla birçok avantaja sahiptir [9].

Temel olarak yakıt hücreleri, yakıtın kimyasal enerjisini, doğru akım elektrik enerjisine çeviren bir elektrokimyasal enerji dönüştürücüsüdür.

YP'ler, performans, çevre duyarlılığı ve yakıt ekonomisi gibi nedenlerden dolayı otomotiv şirketlerinin ilgisini çekmektedir [10].

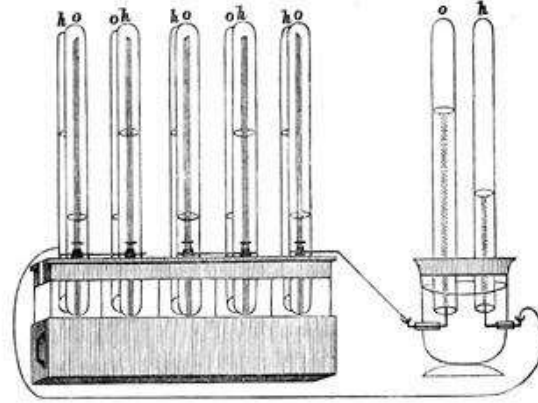
YP, basit bir batarya gibi düşünülebilir. Batarya ile YP arasındaki fark, bataryanın sürekli şarja ihtiyaç duymasıdır, fakat YP'lerde şarj etme durumu bulunmamaktadır.

5.1 Yakıt Pili'nin Tarihsel Gelişimi

Yakıt pillerinin icadı 1840'lı yıllara kadar uzanmaktadır. William Robert Grove, 1938 yılında ters elektroliz işlemi düşüncesini ortaya atarak, YP kavramı ile ilk bağlantıyı kuran bilim adamıdır. Grove, kendi adını taşıyan ıslak-hücre bataryasını geliştirmiştir. Bu hücre, çinko sülfat içerisine çinko elektrot ve nitrik asit içerisine platin elektrot daldırılarak oluşturulmuştur. Hücrenin gerilimi yaklaşık 1,8 V olup, 12 A civarında da akım üretmiştir. Grove, platin elektrotlardan birini sülfürik asit kabına, diğerini oksijen ve hidrojen kabına daldırdığı takdirde, elektrotlar arasında sabit bir akım aktığını

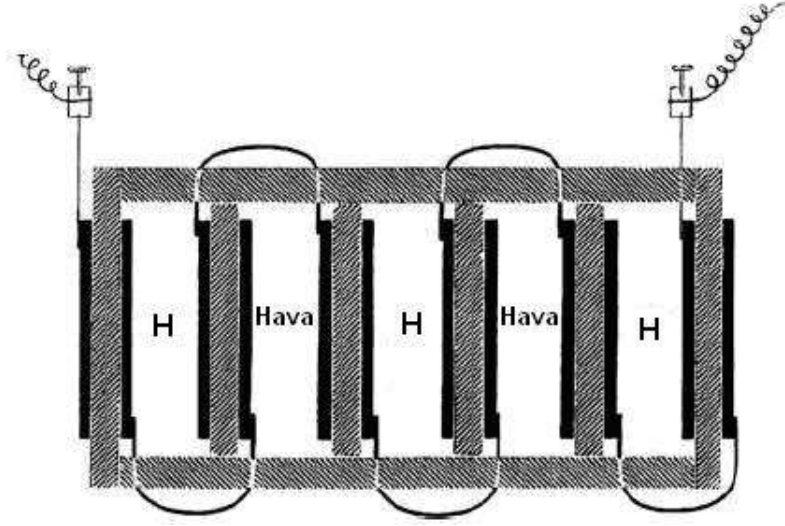
gözlemlemiştir. Sızdırmaz kaplar kullanarak hem suyu hem de gazları tutmuş ve böylece akım aktığı sürece her iki tüpte de su seviyesinin arttığını kanıtlamıştır [36].

1800'lü yıllarda Willam Nicolas ve Anthony Carlisle, elektrik vasıtasıyla, suyun bileşenleri olan hidrojen ve oksijene ayrılabilceğini ispatlamışlar, fakat elektrik ve su üretmek için iki gazın birleştirilmesini çözememişlerdir. Grove, birkaç elektrotu seri devre ile bağlayarak bileşimini ayarladığı takdirde suyun ayrıştırılmasını etkileyebileceğini keşfetmiştir. Bunu gaz bataryası adını verdiği ve ilk YP olarak tanımlayabileceğimiz Şekil 5.1'de gösterilen aygıt ile başarmıştır [37].



Şekil 5. 1 William Robert Grove tarafından geliştirilen yakıt pili [37]

Grove'den sonra pek çok bilim adamı yakıt pilinin gelişimi için çaba sarf etmiştir. 1882 yılında Lord Rayleigh platin elektrotların verimini artırmak için birtakım çalışmalar yapmıştır. Bunun için katı elektrot, gaz ve sıvı arasındaki işlem kesitini arttırmış hidrojenin yanı sıra kömür gazı da kullanmıştır. 1889'da kimyager Ludwing Mond ve Carl Langer tarafından Grove'un çalışmaları tekrarlanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, oksijen kaynağı olarak havayı, hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanarak 1,5 Watt güç üreten ve %50 verimle çalışan bir YP geliştirmişlerdir. Bu YP'den 1,47 V gerilim elde etmeyi beklerken bu değer 0,97 V olarak ölçülmüştür [38]. Şekil 5.2'de Mond ve Langer'in tasarladığı YP görülmektedir.



Şekil 5. 2 Mond ve Langer'in tasarladığı yakıt pili [37]

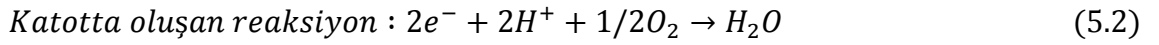
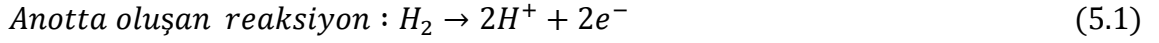
1894 yılında Friedrich Wilhelm Oswald kömür türevli yakıtlar ile çalışan bir elektrokimyasal pil yapmıştır. 1932'de Francis T. Bacon, ilk başarılı yakıt pilini geliştirmiştir. Bu YP'de, hidrojen-oksijen hücre ve alkalın elektrolit kullanılmıştır. Bu proje daha sonra NASA programlarında kullanılmaya başlanmıştır. 1959 yılında Bacon ve birkaç bilim adamı 5 kW'lık güç üreten bir yakıt pili yapmıştır. Aynı yıl, Harry Karl Ihring yaklaşık 15 kW gücünde yakıt piliyle çalışan traktör tasarlamıştır. Bu icat, günümüzdeki modern yakıt piliyle çalışan makinelerin başlangıcı olmuştur [36].

Son elli yılda YP'ler; büyük otomotiv üreticileri ve federal ajanslar tarafından, yakıt pilli otomobiller ve diğer uygulamalarda kullanılmak üzere gelişim göstermeye devam etmiştir. Gelecekte yakıt pillerinin geleneksel güç kaynaklarının yerini alması beklenmektedir [39].

5.2 Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensibi

Yakıt pilleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çeviren, yüksek verimli ve çevre dostu sistemlerdir. YP'de meydana gelen kimyasal reaksiyon elektroliz olayının tersidir. Elektroliz olayında, saf suya iki adet elektrot bırakılıp, bu elektrotlara 12 V gerilimde elektrik akımı uygulandığı zaman su kendisini oluşturan hidrojen ve oksijen iyonlarına ayrılmaktadır. Yakıt pilleri ise biri negatif (anot) ve diğeri pozitif (katot) olmak üzere iki elektrottan oluşmaktadır. Elektrotlar genellikle katı metallere imal edilirler. Elektrotların görevi hidrojen ve oksijen arasında oluşan reaksiyonu aşınma ve

korozyon olmadan sağlamaktır. Elektrotların ortasında iletken bir elektrolit bulunmaktadır. Hidrojen, yakıt pilinin anot kısmına, oksijen ise katot kısmına giriş yapmaktadır. Katalizörün etkisiyle hidrojen atomları proton ve elektronlarına ayrılmaktadır. Ayrılan elektronlar bir elektrik devresinin içerisinde geçerek elektrik akımı oluşturmaktadır. Protonlar ise elektrolit arasından katoda doğru hareket etmektedirler. Devresini tamamlayan elektronlar tekrar hidrojenin protonuna bağlanır ve oksijenle birleşerek saf su buharı ve ısı meydana getirirler [40].



Yakıt pilleri, hidrojen (H) ve oksijen (O) gazlarının elektrokimyasal reaksiyonu ile elektrik üreten sistemlerdir. Bu reaksiyonda kimyasal yanma yoktur. Yakıt olarak hidrojen kullanılır. YP'lerin kimyasal reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan ürünler su ve enerjidir. YP'li araçların menzil ve performansı, İYM'li araçlarla mukayese edilebilirken, İYM'li araçlara göre sessiz ve emisyonuz çalışma vaat ederler.

5.3 Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt hücreleri hidrojenin elde edilmiş şekline göre, elektrolit tipine ve çalışma sıcaklığına göre sınıflandırılmaktadır.

Yakıt pilleri, hidrojenin elde edilmiş şekline göre:

- Proton geçirgen zarlı yakıt pili (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC, PEMYP),
- Direk metanol yakıt pili (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC, DMYP),
- Alkali yakıt pili (Alkaline Fuel Cell, AFC, AYP),
- Fosforik asit yakıt pili (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC, FAYP),
- Erimiş karbonatlı yakıt pili (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC, EKYP),
- Katı oksitli yakıt pili (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC, KOYP),

- Rejeneratif yakıt pili (Regenerative Fuel Cell, RFC, RYP),
- Silindirik yakıt pili (Cylindrical Fuel Cell, CFC, SYP).

Çalışma sıcaklıklarına göre:

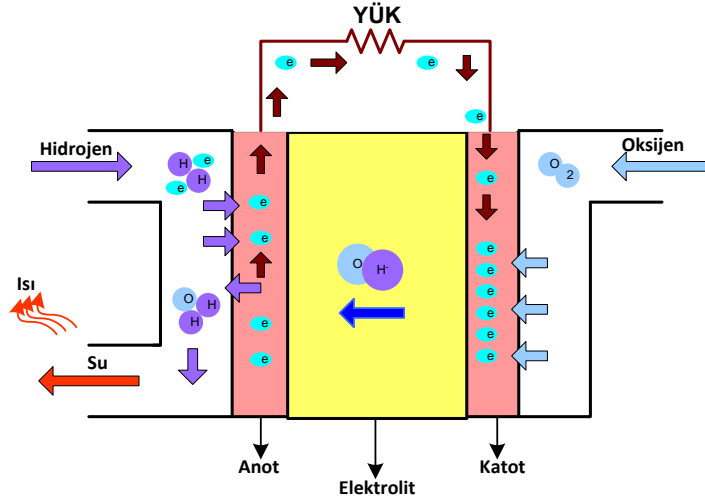
- Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (0-100 °C),
- Orta sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (100-500 °C),
- Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (500-1000 °C).

Kullandıkları elektrolite göre:

- Alkali elektrolitli yakıt pilleri,
- Katı polimerili yakıt pilleri,
- Fosforik asit yakıt pilleri,
- Erimiş karbonatlı yakıt pilleri,
- Katı oksitli yakıt pilleri olarak sınıflandırılmaktadır [41].

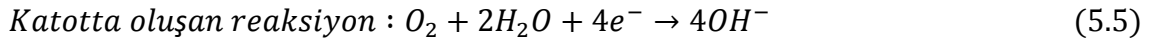
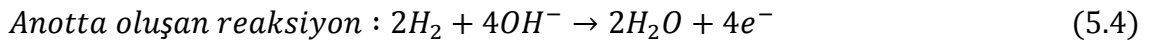
5.3.1 Alkali Yakıt Pili (AYP)

Alkali yakıt pilleri ilk YP teknolojilerindendir. AYP'lerde elektrolit olarak suda eriyik halinde bulunan potasyum hidroksit (KOH) kullanılmaktadır. Anot ve katot bölümünde ise katalizör olarak Ni (nikel), Ag (gümüş), metal oksitler veya özel bazı metaller kullanılabilir. Çalışma sıcaklıkları 100 °C ile 250 °C arasında değişmektedir. Performansları yüksek olmakla birlikte verimleri yakıtın, oksidantın kalitesine ve anot ile katot malzemesine bağlı olarak değişmekle beraber %70 civarındadır [42].



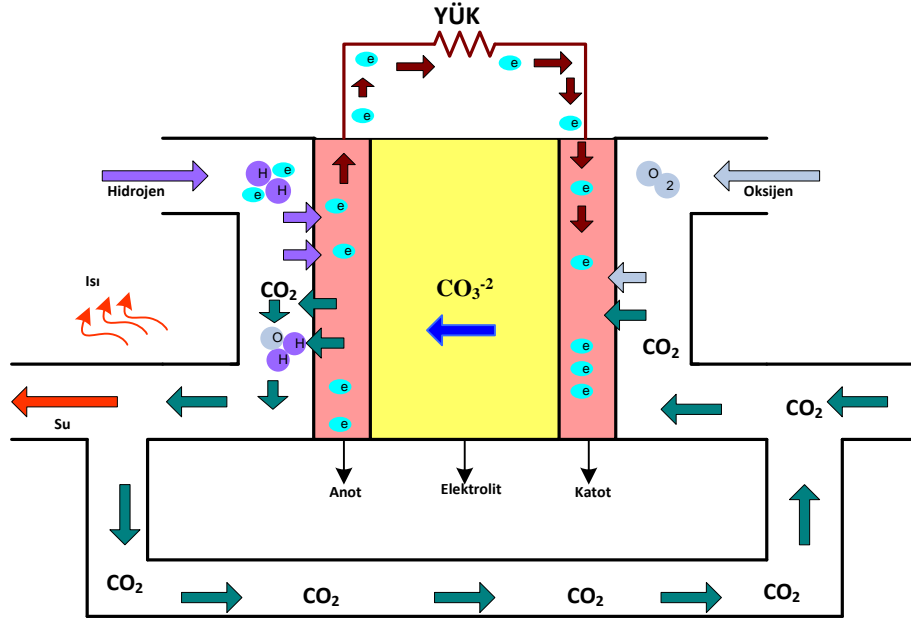
Şekil 5. 3 Alkali yakıt pili

Şekil 5.3'ten görüldüğü gibi hidroksil (OH^-) iyonları katottan anoda doğru geçmektedir. Anoda ulaşan hidroksil iyonları hidrojen ile tepkimeye girerek su oluşturmakta aynı zamanda elektronlar da açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan elektronlar harici elektrik devresine enerji sağlamakta ve bu devre üzerinden katoda ulaşmaktadırlar. Katottaki elektronlar su ve oksijenle tepkimeye girerek tekrar hidroksil (OH^-) iyonu üretilmekte ve reaksiyon bu şekilde devam etmektedir.



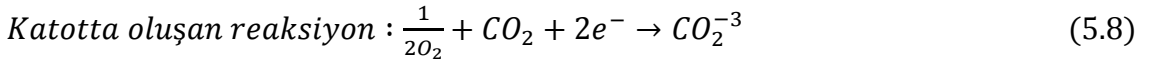
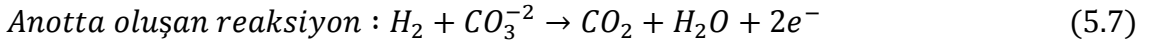
5.3.2 Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP)

Erimiş karbonat yakıt pillerinde elektrolit olarak Li (lityum), Na (sodyum), K (potasyum) gibi alkali karbonatlarının LiAlO_2 biçimindeki seramikleri kullanılır. Çalışma sıcaklıkları oldukça yüksek olup 600°C ile 700°C arasındadır. Yüksek sıcaklıklarda çalıştıklarından dolayı elektrotların korozyona karşı dayanıklı olmaları gerekmektedir. Yaklaşık olarak %60 seviyelerinde elektrik verimi sağlamaktadırlar. Çok yüksek çalışma sıcaklıklarına ihtiyaç duyduğundan ancak sabit ve büyük santrallerde yerleşimleri mümkün olmaktadır. Bu sebeple dünyada uygulama alanları sınırlıdır [38].



Şekil 5. 4 Erimiş karbonat yakıt pili

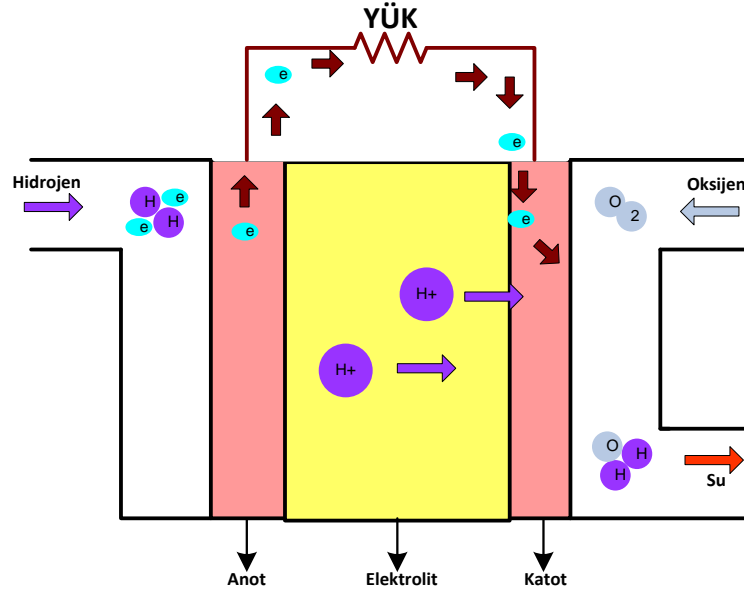
EKYP'de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar şu şekildedir:



5.3.3 Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)

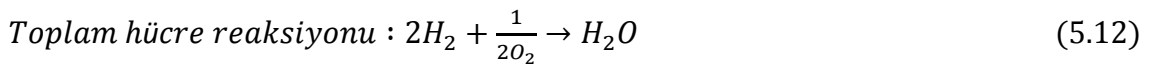
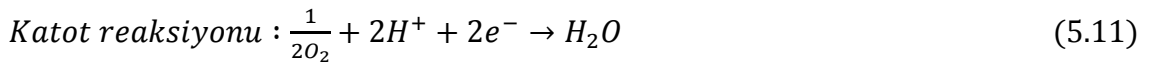
Fosforik asit yakıt pillerinde, elektrolit olarak fosforik asit (H_3PO_4) kullanılmakta olup katalizör olarak ise platin ve platin alaşımlar kullanılmaktadır.

Fosforik asit yakıt pillerinin çalışma sıcaklığı $150\text{ }^\circ\text{C}$ ile $220\text{ }^\circ\text{C}$ arasında değişmektedir. Bu piller, maliyetleri ve çalışma sıcaklıklarının yüksek olmasından dolayı pek tercih edilmemektedir. FAYP'nin verimi ise %40-50 civarlarındadır [38].



Şekil 5. 5 Fosforik asit yakıt pili

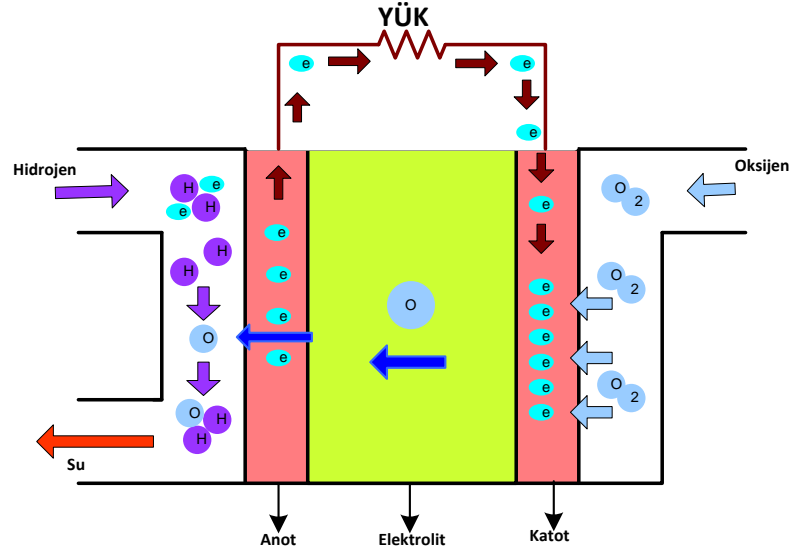
Şekil 5.5'te FAYP'nin çalışma şekli gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi hidrojen anot elektrotuna verilmekte ve burada elektron ve protonlarına ayrılmaktadır. Pozitif yüklenen hidrojen iyonları elektrolit yardımı ile anottan katoda geçmektedir. Anotta üretilen elektronlar ise yük üzerinden devrelere tamamlayarak elektrik enerjisi üretip, katoda ulaşmaktadırlar. Katotta da elektronlar hidrojen iyonları ve oksijen ile birlikte suyu oluşturmaktadır. FAYP'de meydana gelen reaksiyonlar şu şekildedir:



5.3.4 Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)

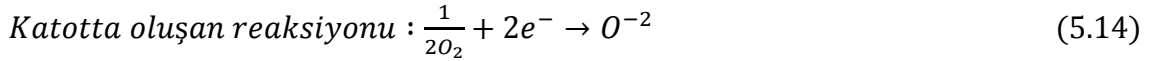
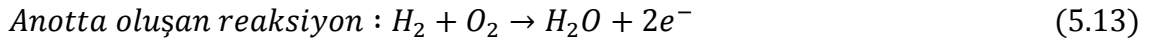
Katı oksit yakıt pillerinde, elektrolit olarak stabilize edilmiş zirkonyum kullanılmaktadır. Bu elektrolit, yüksek sıcaklıkta, oksijen iyonlarının katottan anoda ulaştırılmasını sağlar. Çalışma sıcaklıkları 1000 °C dir. Bu yakıt pillerinin verimi ise %60 seviyelerindedir [41].

KOYP'de yakıt olarak hidrojen veya doğalgaz da kullanılabilir. Çalışma sıcaklığının yüksek olmasından dolayı doğalgaz hidrojene kolaylıkla dönüşebilmektedir.



Şekil 5. 6 Katı oksit yakıt pili

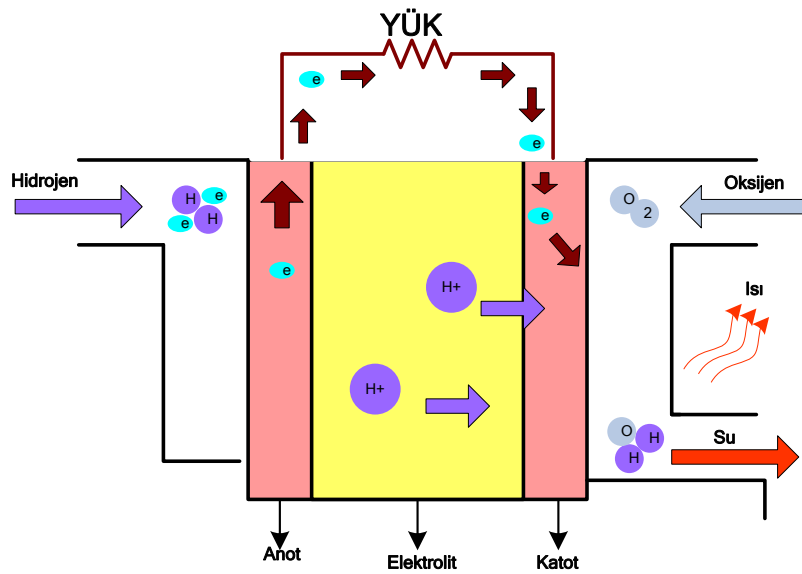
Şekil 5.6'da KOYP'nin çalışma şekli gösterilmektedir. Bu YP çeşidinde, yakıt anoda verildiği zaman katotta bulunan oksijen iyonları elektrolitten geçmekte ve anotta hidrojen ile birlikte reaksiyona girmektedir. Anotta oluşan reaksiyon sonucunda elektronlar ayrılmakta ve anot katot arasındaki devreden geçerek elektrik enerjisini oluşturup katoda geri dönmektedirler. KOYP'de meydana gelen reaksiyonlar şu şekildedir:



5.3.5 Proton Geçirgen Zarlı Yakıt Pili (PEMYP)

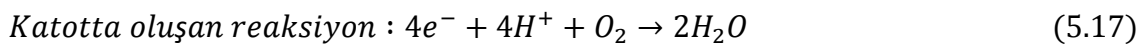
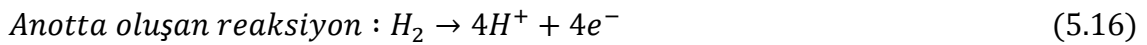
PEM tipi yakıt pillerinde, elektrolit olarak yapısında flor bulunduran ve sulfonik asit polimerleri gibi iyon değiştirebilen çok ince polimer zar kullanılır. Bu zarın kalınlığı 12-20 mikron seviyesindedir ve inceldikçe verimliliği artar. Anot ve katotta katalizör olarak Pt (platin) veya Pd (paladyum) gibi metaller kullanılmaktadır. PEMYP'de yakıt olarak hidrojen, oksitleyici olarak da havada bulunan oksijen kullanılır. Çalışma sıcaklığı genellikle 100 °C altında olan bu pillerin tipik çalışma sıcaklığı ise 60-80 °C civarındadır [41].

PEMYP’de, birbirlerinden polimer membran elektrot ile ayrılmış anot ve katot olmak üzere iki elektrot bulunmaktadır. Bu elektrotların bir kenarında ince platinyum katalizör bulunmaktadır. Pilin anot tarafına verilen hidrojen atomları burada iyonize olmaktadır. Protonlar, pozitif yüklenerek geçirgen zardan geçip, katoda yönelmektedirler. Elektronlar ise anottan katoda geçerken harici bir yol izlerler ve elektrik enerjisinin oluşmasına neden olurlar. Katoda geçen elektronlar burada hidrojen protonları ve havadan alınan oksijen ile birleşerek su meydana getirir. Bu YP türünün çalışması için polimer zar, hidrojen protonlarının geçmesine izin verirken, elektronların ve daha başka ağır gazların geçişini engellemelidir [38].



Şekil 5. 7 PEM yakıt pili

PEMYP’nin çalışması esnasında anot, katot ve pil de toplam meydana gelen kimyasal reaksiyon aşağıda verilmiştir:



PEMYP’nin içerisinde hareketli parçalar bulunmadığından dolayı aşınma problemleri yoktur, sessiz çalışırlar ve herhangi bir atık ortaya çıkarmazlar. Verimleri oldukça

yüksek olup yaklaşık olarak %50'dir. PEMYP düşük güç seviyelerinde daha verimli çalışmaktadırlar ve verimlilikleri gücün artırılmasıyla lineer olarak azalmaktadır [42].

Yakıt pilleri arasında yüksek verimliliğin yanı sıra, hacim ve ağırlık açısından sahip olduğu avantajları sebebiyle, PEMYP'ler günümüzde taşıt uygulamaları için en uygun yakıt pili sistemleridir [10].

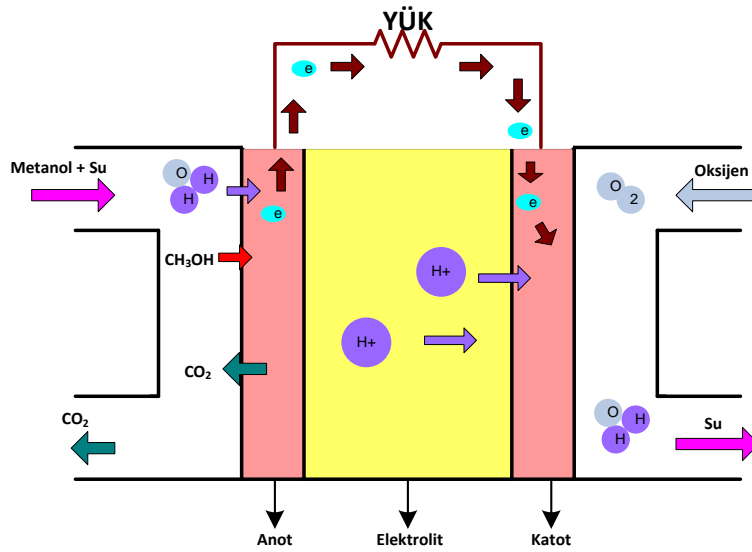
Ayrıca PEMYP, diğer YP türlerine nazaran daha düşük sıcaklıklarda çalışmakta ve buna bağlı olarak ilk çalışma anında daha hızlı devreye girebilmektedirler [11].

5.3.6 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMYP)

DMYP, özellikleri ve çalışma prensipleri bakımından PEMYP'ye benzemektedir. Aralarındaki fark doğrudan metanol kullanan yakıt pilinin yakıt olarak, saf hidrojen kullanmayıp hidrojen elde edilebilen metanol kullanmasıdır [37].

Bu tip yakıt pillerinde elektrolit olarak, PEM yakıt pilindeki geçirgen zar kullanılmaktadır. Ancak doğrudan metanol kullanılan bu tip pillerde, hidrojen doğrudan sıvı metanolden elde edildiğinden, yakıtın yakılarak hidrojen elde edildiği üniteye ihtiyaç duyulmamaktadır.

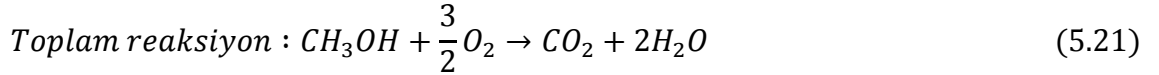
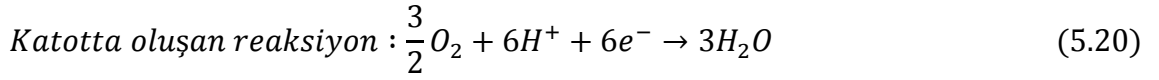
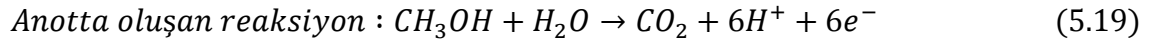
50 °C ile 100 °C arasında çalışma sıcaklığı bulunan bu yakıt pillerinin verimleri yaklaşık %40 civarındadır [41].



Şekil 5. 8 Doğrudan metanol kullanılan yakıt pili

Yakıt hücresinin anodunda bulunan metanol ve su karışımı katot üzerinde oluşan su ile elektrokimyasal bir reaksiyon meydana getirmekte ve metanolün parçalanması sonucu protonlar, elektronlar ve karbondioksit meydana gelmektedir. Reaksiyon sonucu oluşan protonlar diğer ürünlerden ayrılarak seçiciliğe sahip elektrolit zarından geçerek katoda doğru hareket etmekte ve katot üzerinde beslenen havadan sağlanan oksijen ile reaksiyona girerek suyu oluşturmaktadır. Bunların sonucunda meydana gelen termodinamik potansiyeller, dış devre bağlantısı ile gerilim oluşmasını ve elektrik üretilmesini sağlamaktadır [38].

DMYP'nin çalışması esnasında katot, anot ve hücre de toplam meydana gelen kimyasal reaksiyon aşağıda verilmiştir.



DMYP'nin en önemli avantajı yakıtın sıvı olarak kullanılabilmesidir. Gelişim sürecinde olan bu yakıt pillerinin gelecekte cep telefonları, diz üstü bilgisayarlar ve taşınabilir güç kaynakları için büyük bir potansiyel oluşturacağı görülmektedir [38].

5.4 Yakıt Pillerinin Karşılaştırılması

Yakıt pillerinin en yaygın olarak kullanılan çeşitleri ve özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelgede bütün yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları incelendiği takdirde en düşük, uygulamanın en kolay olduğu ve soğutma kolaylığına sahip olan yakıt pili çeşidinin, PEM tipi yakıt pili olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. 1 Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri [6]

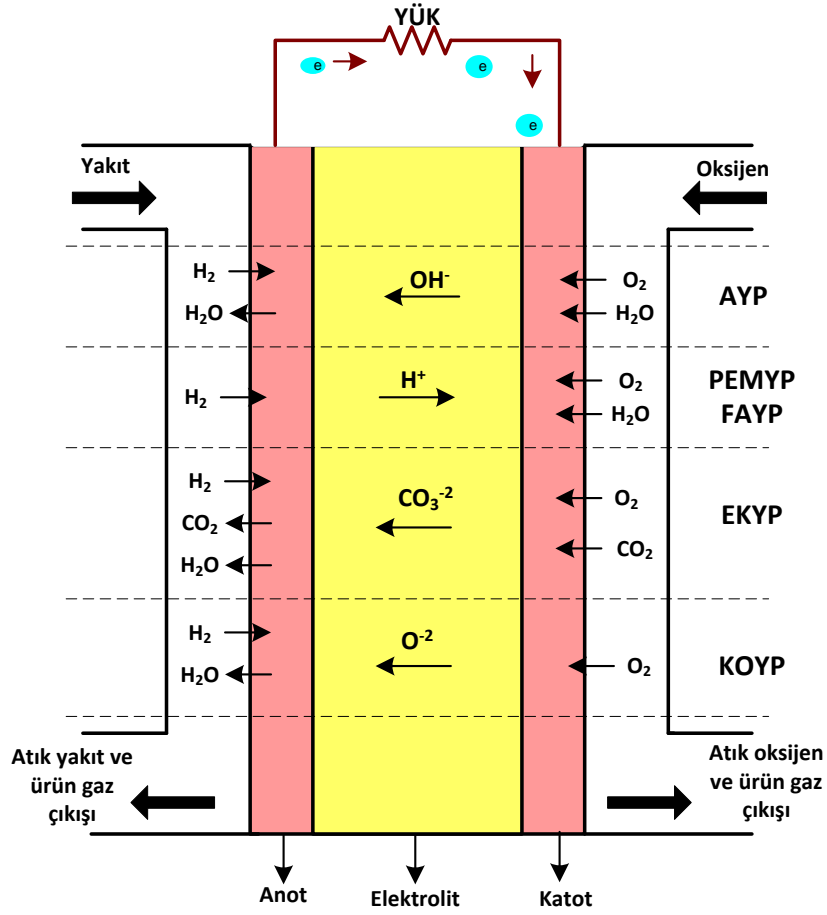
YP Türü	Çalışma Sıcaklığı [°C]	Elektrolit Türü	Yakıt Türü	Yük Taşıyıcısı	Oksitleyici Türü	Verim (%)
Alkali YP	70-100	Potasyum hidroksit	Doğrudan hidrojen	OH^-	Saf oksijen	50-70
Erimiş Karbonat YP	650	Erimiş karbon çözeltilisi	Doğal gaz ya da hava gazından elde edilen hidrojen ve karbonmonoksit	CO_3^{2-}	Havadan elde edilen oksijen	40-55
Fosforik Asit YP	160-210	Dengelenmiş fosforik asit	Doğal gazdan elde edilen hidrojen	H^+	Havadan elde edilen oksijen	35-50
Katı Oksit YP	800-1000	Seramik katı oksit	Doğal gaz ya da hava gazından elde edilen hidrojen ve karbonmonoksit	O_2^{2-}	Havadan elde edilen oksijen	45-60
PEM YP	50-100	Proton geçirgen polimer	Doğrudan hidrojen	H^+	Saf ya da havadan elde edilen oksijen	35-60

Şekil 5.9'da bütün yakıt pillerinin çalışma şekilleri gösterilmektedir. Bu şekilde bütün yakıt pillerinde kullanılan anot, katot ve elektrolit çeşitleri görülmektedir.

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi yakıt pillerinin kimyasal tepkimeleri kullanılan anot, katot ve elektrolit çeşitlerine göre farklılık göstermektedir. Çizelge 5.2'de tüm yakıt pillerinde meydana gelen kimyasal tepkimeler tablo halinde sunulmaktadır.

Çizelge 5. 2 Yakıt pillerinin kimyasal reaksiyonları

YP türü	Anot reaksiyonu	Katot reaksiyonu
Alkali YP	$2H_2 + 4OH^- \rightarrow 2H_2O + 4e^-$	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
Erimiş Karbonat YP	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow CO_2 + H_2O + 2e^-$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
Fosforik Asit YP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Katı Oksit YP	$H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$	$1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
PEM YP	$H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$	$4e^- + 4H^+ + O_2 \rightarrow 2H_2O$



Şekil 5. 9 Bütün yakıt pili çeşitlerinin çalışma şekilleri

YP'ler çalışma sıcaklıklarına göre de sınıflandırılmaktadırlar. Bu sınıflamaya göre yakıt pilleri, farklı çalışma sıcaklıklarında çalışırken, uygulama alanına göre bazı avantaj ve dezavantajlara sahip olmaktadır. Çalışma sıcaklıklarının farklı olması yakıt pillerinin farklı uygulamalarda kullanılacağını ifade etmemektedir. Farklı çalışma sıcaklıklarına sahip yakıt pilleri benzer uygulamalarda da kullanılabilir.

En yaygın kullanılan yakıt pillerinden biri, fosforik asit pilleridir. Bu teknoloji yüksek uygulama derecelerinde sıvı asiti kontrol edebilmek için düşük dereceli destek sistemlerinde, çok pahalı materyallerin kullanımında ve daha iyi durumda muhafaza edilmesinde başarıyla uygulanır [42].

Alkali yakıt pilleri, NASA uygulamalarında ve uzay çalışmalarında üzerinde en fazla durulan yakıt pili çeşididir. Yer uygulamalarında kullanılması zordur çünkü havada

bulunan karbon oksitlere karşı oldukça duyarlıdırlar. Büyük güç santralleri ve yeniden üretim tesisleri kullanım yerlerine örnek olarak verilebilir [38].

Çizelge 5.3'te YP çeşitlerinin; uygulamaları, avantajları ve dezavantajları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5. 3 Yakıt pili çeşitlerinin karşılaştırılması [42]

Yakıt Pili Çeşitleri	Yakıt Pili Uygulamaları	Avantajları	Dezavantajları
PEM YP	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrik • Taşınabilir güç • Ulaşım 	<ul style="list-style-type: none"> • Katı elektrolit aşınma ve kontrol sorunlarını azaltır • Düşük sıcaklık • Çabuk çalışma • Yüksek akım ve güç yoğunluğu 	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük sıcaklık pahalı katalizörlere ihtiyaç duyar • Yakıt içindeki pisliklere karşı aşırı duyarlılık
Alkali YP	<ul style="list-style-type: none"> • Ordu • Uzay • Sabit güç 	<ul style="list-style-type: none"> • Alkali elektrolit kullanımında katot tepkimesi daha hızlı gerçekleşir • Yüksek performans 	<ul style="list-style-type: none"> • Yakıt ve havadaki karbondioksitin ortadan kaldırılması maliyeti arttırır
Fosforik Asit YP	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrik • Kojenerasyon • Ulaşım • Sabit güç 	<ul style="list-style-type: none"> • Bileşik elektrik ısı üretiminde %85'e varan verim • Yakıt olarak saf olmayan hidrojen kullanabilme 	<ul style="list-style-type: none"> • Pt katalizörler • Düşük akım ve güç • Büyük boyut, kütle
Katı Oksit YP	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrik • Kojenerasyon • Sabit güç 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek sıcaklık avantajları 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek sıcaklık, pil bileşenlerinin aşınmasına ve kırılmasına sebep olur.

Belirli bir YP türü belli bir uygulama için mükemmel bir seçim olarak düşünülebilir, ancak hidrojenin depolanması ve dönüştürücü sistem de hesaba katıldığında böyle olmama ihtimali de görülür. Buna örnek olarak, dahili dönüştürücü konfigürasyonu içermekte olan ve hidrokarbon yakıt kullanan yüksek sıcaklık yakıt pillerinin düşük sıcaklık pillerine göre daha basit sistem dizaynı gerektirdiği verilebilir [42].

Her çeşit uygulama için kullanılabilir ideal bir YP sistemi bulunmamaktadır. Uygulamanın gereksinimlerine göre amaca en uygun YP sistemi değişmektedir. Özel amaçlı kullanımlar için karar verilirken yalnızca YP değil, tüm sistem incelenerek karar verilmelidir [38].

PEM tipi YP'ler düşük çalışma sıcaklıklarında çalışmalarından, ayrıca hacim ve ağırlık bakımından düşük olmalarından dolayı, diğer yakıt pillerine nazaran daha avantajlı durumdadırlar. Günümüzde en çok kullanılan yakıt pili PEM YP'dir. Özellikle otomotiv sektöründe çok fazla tercih edilmektedirler.

5.5 Yakıt Pillerinin Tercih Edilme Sebepleri

Dünya nüfusunun hızlı bir şekilde artış içerisinde olmasından dolayı enerji ve enerji kaynaklarına olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Dünya üzerinde İYM'lerin sayısı da gitgide artmaktadır. Dolayısıyla bu motorların çalışmasını sağlayacak farklı enerji kaynakları gerekmektedir. Petrol türevi enerji kaynaklarının miktarının azalacağı veya tükeneceği düşüncesi ve buna ek olarak petrolün bir yerden bir yere veya uzak bölgelere dağıtımının zahmetli ve pahalı olmasından dolayı diğer enerji kaynaklarına olan yönelim gün geçtikçe artmaktadır.

Buna ek olarak hızlı iklim değişikliklerinden dolayı 1997 yılında Japonya'da yapılan "Kyoto Protokolü"nde çevreye atılan sera gazlarının azaltılması ve yerine diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması önerilmiştir [40].

Yukarıda bahsedilen bu unsurları karşılayacak en önemli teknoloji olarak yakıt pilleri görülmektedir.

Yakıt pillerinin avantajları şunlardır:

- Yakıt pillerinde elektrik üretimi esnasında atık olarak sadece su ve ısı açığa çıkmaktadır. Günümüzdeki yakıt sistemlerinin çevre kirliliğine ve insan sağlığına ne kadar zararlı olduğu düşünülür ise bu sistemin yan ürün olarak su açığa çıkararak çevre dostu olması çok değerli bir alternatif yakıt olmasına sebep olmaktadır,
- Enerji üretim verimleri benzinli ve dizel motorlara göre daha yüksektir,

- Yakıt pillerinde hareketli parça bulunmamaktadır. Bu nedenle gürültü kirliliği oluşturmada sessiz çalışırlar,
- Yakıt olarak kullanılabilir çeşit çok fazladır. Doğada bol bir şekilde bulunan saf hidrojenin yanı sıra fosil ve alternatif yakıtlar kullanılabilir,
- Çok düşük güçlerden yüksek güçlere kadar istenilen kapasitede üretilebildiği gibi boyutları da çantada taşınabilecek kadar küçük veya buzdolabı kadar büyük olabilir,
- Modüler olmaları ihtiyaç olan her yerde kullanılabilir ve yerleştirilebilir olmalarını sağlar. Böylece istenildiğinde kullanıcıya yakın inşa edilebilirler,
- Basit bir yapıları vardır. Montaj süresi de bu sebeple kısadır,
- Yakıt pillerinin yüksek sıcaklıkta çalışan çeşitlerinde elektrik üretiminin yanı sıra yan ürün olarak meydana gelen atık ısı geri kazanılabilir ve buhar santrallerinde kullanılır,
- Dayanıklı ve güvenilir bir sistem oluştururlar,
- Geleceğe yönelik potansiyeli en yüksek alternatif enerji kaynaklarından [38].

Yakıt pillerinin uygulamaya geçildiğinde bazı dezavantajlar ile karşılaşılacağı bilinen bir gerçektir. Yakıt pillerinin dezavantajları şu şekilde sıralanmaktadır:

- Günümüzde yeterli sayıda üreticisi bulunmamaktadır,
- Hidrojenin depolanmasında bazı sorunlar bulunmaktadır. Ayrıca hidrojen üretim tesisleri hala az sayıdadır,
- Yeni gelişen bir teknoloji olduğu için diğer sistemler ile karşılaştırıldığında onlara nazaran maliyetleri çok yüksektir,
- Hidrojen başta olmak üzere bazı yakıtların üretim ve dağıtımını pahalıdır.

5.6 Yakıt Pillerinin Ulaşım Araçlarında Kullanılması

Dünya üzerinde bir milyardan fazla kişi İYM bulunmakta ve bu sayı gün geçtikçe artmaktadır. Hava kirliliğinin başlıca nedenlerinden biri olan içten yanmalı motorların

emisyonlarında bulunan ve küresel ısınmaya sebep olan karbondioksit miktarı oldukça fazladır. Araçların kilometre başına 150 gram karbondioksit attığı 2006 yılında yapılan bir araştırmada tespit edilmiştir. Üretici firmalar bu miktarı her geçen yıl biraz daha düşürmeyi amaçlamaktadırlar.

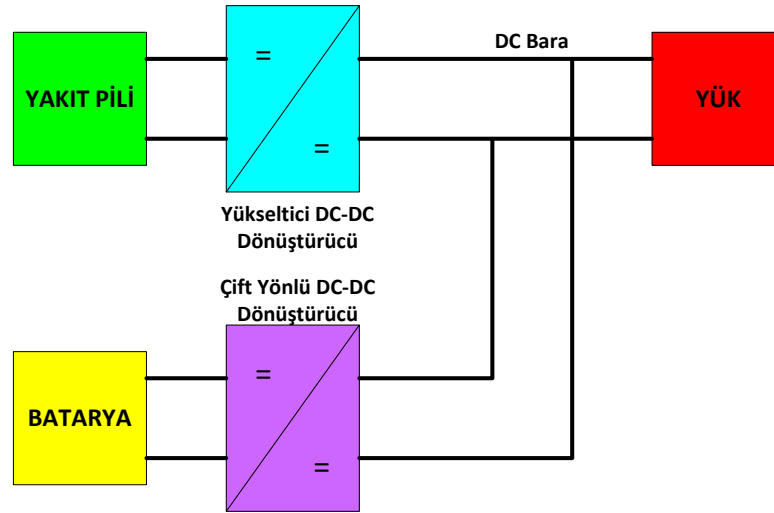
Toyota, Daimler, Honda, Nissan, GM, BMW, Opel gibi dev otomobil üreticileri senelerdir yakıt pilini araçlarda denemektedirler. Yakıt pili teknolojisi ile birlikte araçlarda piston, silindir, krank mili gibi hareketli parçalar olmaması, aracın sessiz çalışması, düşük emisyon ve otto veya dizel motora kıyasla daha yüksek verimlerinin olması otomobillerde yakıt pili kullanımını çekici hale getirmektedir [12].

Araçlarda istenilen özelliklere bakıldığında; hızlı yanma, yakıt ekonomisi, düşük oranda egzoz gazı miktarı ve aracın istenilen gücü sağlamasıdır. Yakıt hücrelerinden bugünkü araç karakteristiklerine göre elde edilen güç ortalama 80-90 kW'tır. Yakıt pili ile çalışan bir araç 160 litre saf hidrojen ile yaklaşık 400-430 km yol gidebilmektedir ve 160 km/h maksimum hıza ulaşabilmektedir [40].

Yakıt yüksek basınç altında bulunan tanklarda tutulmakta ve bu tanklar aracın arka koltuğunun altına yerleştirilmektedir. Araç durduğu zaman elektrikli alıcılar batarya tarafından beslenmektedir. Hidrojen tanklardan kılcal borular aracılığıyla yakıt hücresine girmekte ve buradan elde edilen elektrik enerjisi güç kontrol ünitesine geçmektedir. Elde edilen elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirmek için bir elektrik motoru kullanılmaktadır. Elektrik motoru aracılığıyla araca hareket verilmektedir. Yakıt hücreleri küçük araçların dışında otobüsler gibi büyük araçlarda da kullanılmaktadır. Londra gibi gelişmiş şehirlerde şehir içi ulaşımında bu tür taşıma araçları hizmet vermektedir [40].

BENZETİM ÇALIŞMALARI

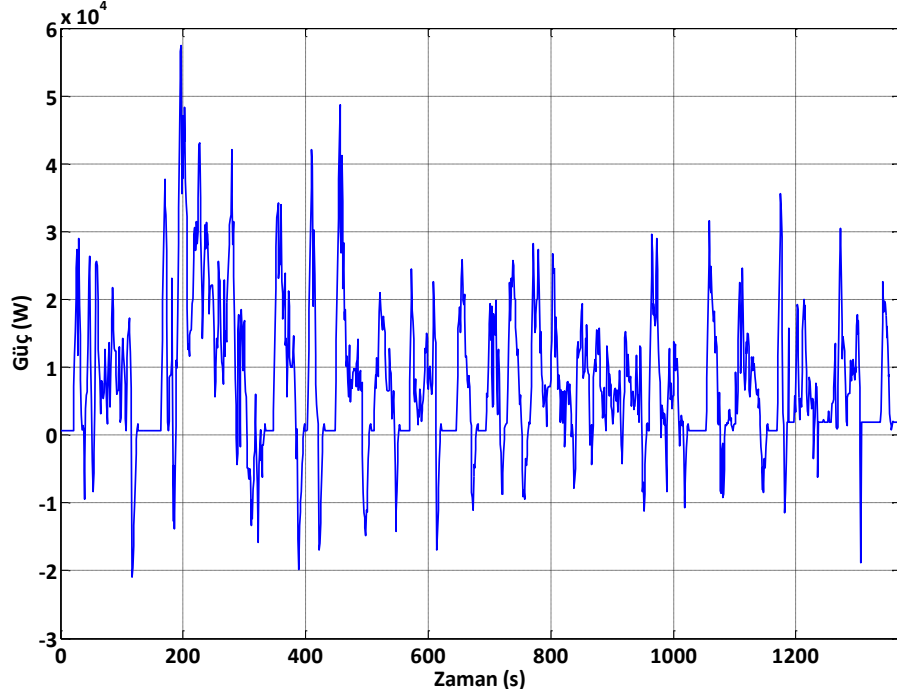
Bir elektrikli aracın şehir içi kullanımda maruz kalacağı şartları test edebilmek amacıyla, MATLAB/Simulink programı kullanılarak Şekil 6. 1'de blok şeması verilen benzetim çalışması yapılmıştır.



Şekil 6. 1 PEM YP ve batarya kullanılarak yapılan sistemin blok şeması

Bu amaçla düşük ağırlıklı elektrikli aracı test etmek için; Şekil 6. 2'de gösterilen, gelişmiş bir taşıt simulator programı olan ADVISOR'dan elde edilen UDDS Standart Şehir İçi Sürüş Çevrimi (Urban Dynamometer Driving Schedule) kullanılmıştır [43]. Gerçekleştirilen sistemde 50 kW'lık bir PEMYP ve bir lityum-iyon batarya kullanılarak elektrikli araçta enerji yönetimi sağlanmıştır. Ani yüklenme değişimleri yakıt pilinde kalıcı hasarlara yol açabilmektedir. Ayrıca elektrikli araçlarda bütün gücün yakıt pilinden elde edilmesi sistemin boyut ve maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Bu duruma ek olarak frenleme enerjisinin geri kazanılması mevcut yakıt pilleri ile mümkün olmamaktadır [6]. Bu sebeple yakıt pili, lityum-iyon batarya sistemi ile desteklenmiştir.

Yakıt pilinin düşük gerilimini yükseltmek amacıyla yakıt pilinin çıkışında yükseltici dönüştürücü kullanılmıştır. Batarya çıkışında ise çift yönlü DC-DC dönüştürücü kullanılarak bataryanın hem ani yüklenme durumlarında yükü beslemesi hem de rejeneratif frenleme enerjisinin kazanılması sağlanmıştır.



Şekil 6. 2 UDDS sürüş çevrimine göre hafif bir elektrikli aracın güç talebi

Elektrikli araçlarda kullanılmaya yapı itibari ile en uygun olan YP türü PEMYP kaynak olarak seçilmiştir. Şekil 6. 2'den de görüldüğü üzere elektrikli aracın maksimum güç talebi 57.4 kW değerine çıkmaktadır. MATLAB/Simulink benzetim ortamında modellenmiş YP'ler arasında bu yük talebini karşılayabilmeye en uygun olan YP modeli seçilmiştir. YP parametreleri Çizelge 6. 1'de verilmiştir.

Çizelge 6. 1 YP parametreleri

Yakıt pili çeşidi	PEMYP
Yakıt pili gücü	50 kW
Yakıt pili gerilimi	625 Vdc

Bahsi geçen yakıt pilinin ani yük ihtiyaçlarını karşılamadaki dezavantajını gidermek amacıyla YP, parametreleri Çizelge 6. 2'de verilen lityum-iyon batarya ile desteklenmiştir.

Çizelge 6. 2 Lityum-iyon batarya parametreleri

Batarya tipi	Lityum-iyon
Batarya nominal gerilimi	500 V
Batarya dolun kapasitesi	10 Ah
Batarya başlangıç SoC değeri	%70

6.1 Benzetim Çalışmalarında Kullanılan Güç Koşullandırma Üniteleri ve Kontrol Yöntemleri

Yakıt pilinden elde edilen güç, DC bir güçtür. Bu gücü AC güce çevirmek veya araç uygulamalarında kullanmak amacıyla güç koşullandırma ünitelerine gereksinim vardır. Tipik bir yakıt pilinin, DC çıkış gerilimi geniş bir aralıkta yük akımı ve yakıt pilinin kullanım süresine göre değişkenlik göstermektedir ve sınırlı aşırı yükleme kapasitesi vardır [44]. Bu sebeple yakıt pilinin gerilimini yükseltmek ve düzenlemek amacıyla DC-DC dönüştürücü kullanılması gerekmektedir. DC-DC dönüştürücüler girişinden DC gerilim verilip, çıkışından da girişteki DC gerilimden daha farklı seviyede DC gerilim elde edilen dönüştürücülerdir.

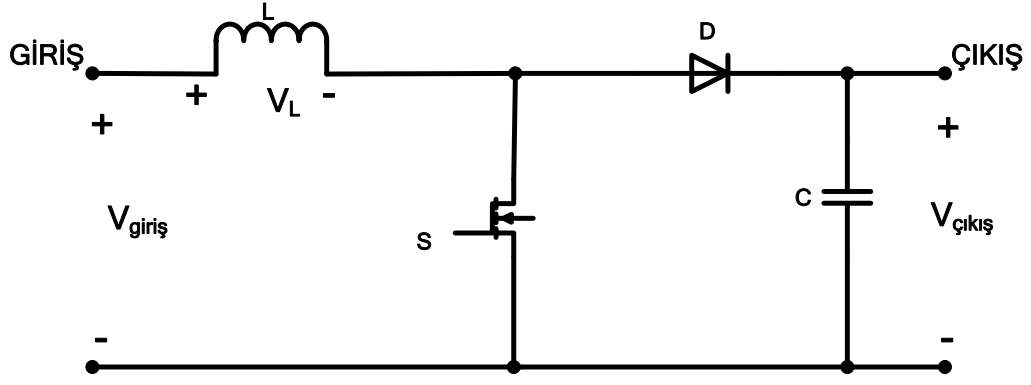
6.1.1 Yükseltici DC-DC Dönüştürücü

Yükseltici tip DC-DC dönüştürücüler, giriş geriliminden daha yüksek çıkış gerilimi elde etmek amacıyla kullanılırlar.

Yükseltici tip DC-DC dönüştürücüler, kaynağı yakıt pili ve güneş gibi çıkış gerilimi sabit olmayan cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [45].

Bu çalışmada kaynak yakıt pili olduğundan ve yapılacak olan işlem düşük gerilimden yüksek gerilim elde etmek olduğundan dolayı yükseltici tip DC-DC dönüştürücü kullanılmaktadır.

Şekil 6.3'te yükseltici DC-DC dönüştürücünün devre şeması sunulmaktadır.



Şekil 6. 3 Yükseltici DC-DC dönüştürücü devre şeması

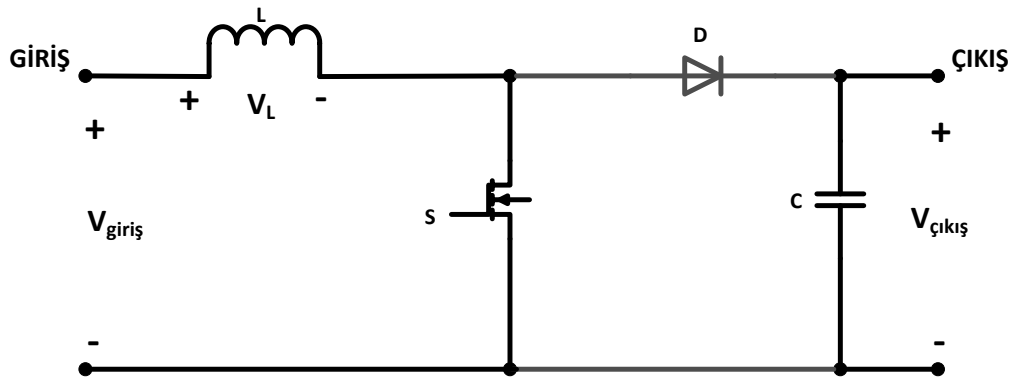
Şekil 6.3'te; $V_{giriş}$ giriş gerilimini, L endüktansı, V_L endüktans gerilimini, S anahtarlama elemanını, D diyotu, C kondansatörü ve $V_{çıkış}$ çıkış gerilimini ifade etmektedir.

Şekil 6. 3'te S olarak ifade edilen anahtarlama elemanı (Transistör, IGBT veya MOSFET) kontrol tekniğine bağlı olarak iletme veya kesime girerek, çıkışta girişten daha yüksek seviyede ve regüleli gerilim elde edilmektedir. Güç anahtarının iletimde olduğu süre T_d , çalışma periyodu T_p ve bunların oranı olan doluluk oranı da λ ile ifade edilmektedir.

λ , 0 ile 1 arasında olmak koşulu ile eşitlik 6.1'deki gibidir:

$$\lambda = \frac{T_d}{T_p} \quad (6.1)$$

Güç anahtarı iletimde olduğu zaman devrenin çalışması Şekil 6.4'te gösterildiği gibidir.



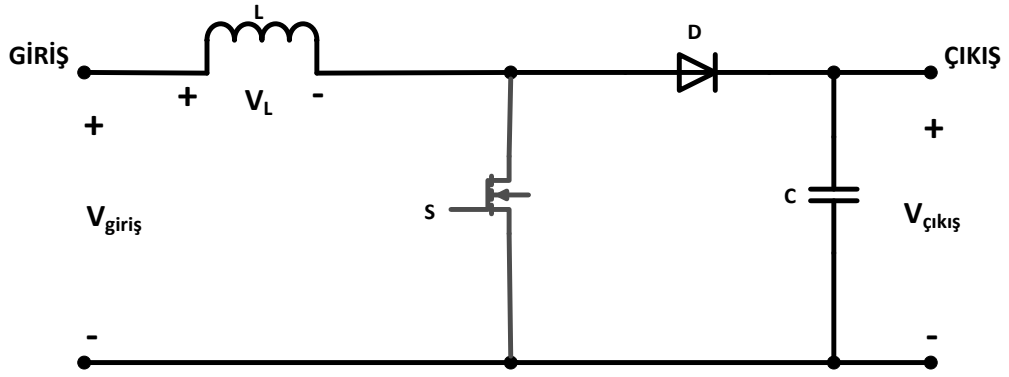
Şekil 6. 4 Güç anahtarı iletimde iken yükseltici dönüştürücünün eşdeğer devresi

Güç anahtarı iletimde iken giriş enerji kaynağı tarafından endüktans beslenir, endüktansın gerilimi giriş gerilimine eşit olur. Endüktans akımı lineer olarak artar ve

endüktansın enerji seviyesi de yükselir. Bu aralıkta yük, kondansatör tarafından beslenir. Diyot ise bu esnada kesim durumundadır [46].

$$V_L = V_{giriş} \quad (6.2)$$

Güç anahtarı kesimde iken devrenin çalışması Şekil 6. 5'te gösterildiği gibidir.

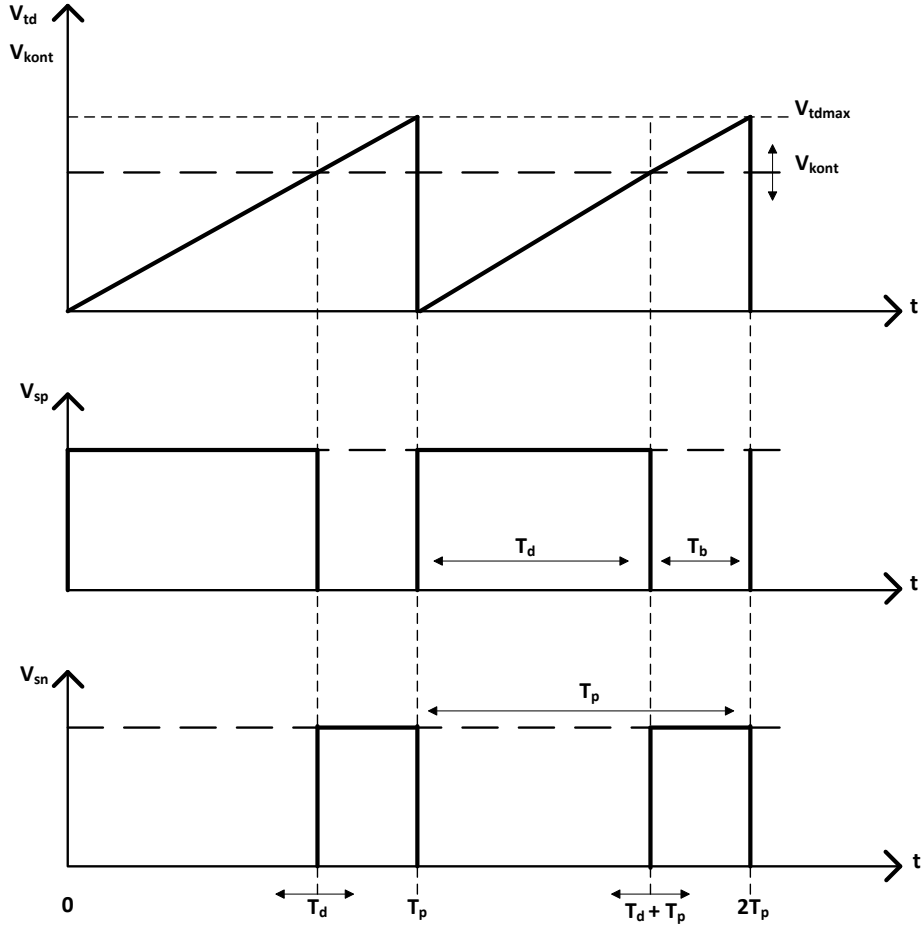


Şekil 6. 5 Güç anahtarı kesimde iken yükseltici dönüştürücünün eşdeğer devre şeması

Güç anahtarı kesimde olduğu zaman diyot iletimdedir. Bu esnada giriş gerilimi ve endüktansta biriken enerji çıkışa aktarılmakta ve aynı zamanda çıkış kondansatörü de şarj olmaktadır.

$$V_L = V_{giriş} - V_{çıkış} \quad (6.3)$$

DC-DC dönüştürücülerde kontrol tekniği olarak DC Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM, PWM) tekniği kullanılmaktadır. Yakıt pilinin çıkışında bulunan yükseltici dönüştürücüde de kontrol tekniği olarak PWM tekniği kullanılmıştır. Şekil 6. 6'da, DC PWM kontrol tekniğine ait dalga şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 6. 6 DC PWM kontrol tekniğine ait dalga şekilleri

Şekilden de görüldüğü üzere bu teknikte bir testere dişi sinyal ile bir referans kontrol gerilimi karşılaştırılmış ve buna bağlı olarak pozitif ve negatif olmak üzere iki adet kontrol sinyali elde edilmiştir. Çıkış geriliminin kontrolü ise, referans gerilimin değiştirilmesi ile sağlanmaktadır. Genellikle sabit tutulan testere dişi sinyalin frekansı, anahtarlama frekansı olarak da adlandırılmaktadır ve bu frekans aynı zamanda devrenin çalışma frekansıdır [46].

Bu kontrol tekniğinde, doluluk oranı ayarlanarak DC-DC dönüştürücülerin güç anahtarının iletme ve kesime girme işlemi sağlanmaktadır. Güç anahtarına pozitif kontrol sinyali uygulanarak iletme girme ve negatif sinyal uygulanarak kesime girme işlemi kontrol edilmektedir.

Yükseltici dönüştürücülerde güç anahtarının iletimde olduğu ilk aralık boyunca DC kaynak tarafından endüktansa enerji aktarılmakta ve kondansatör yükü beslemektedir.

Güç anahtarının kesimde, diyodun iletimde olduğu ikinci aralık boyunca ise yük, endüktansa ilk aralıkta aktarılan enerji ve aynı zamanda DC kaynak tarafından beslenmektedir. Yükseltici dönüştürücüde çıkışta, giriş geriliminden daha yüksek seviyede bir gerilim elde edilmektedir.

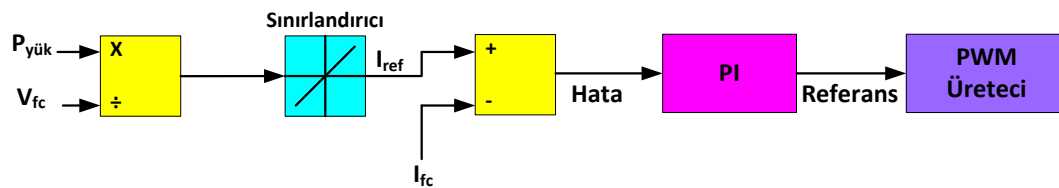
Benzetim çalışmasında kullanılan yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün parametreleri Çizelge 6. 3'te verilmektedir.

Çizelge 6. 3 Benzetim çalışmasında kullanılan yükseltici DC-DC dönüştürücü parametreleri

Dönüştürücü endüktansı	1 [mH]
Dönüştürücü kapasitansı	1 [mF]
Yarı-iletken tipi	MOSFET
Ortalama anahtarlama frekansı	20 [kHz]
PI akım kontrol sisteminin oransal kazancı	0.01
PI akım kontrol sisteminin integral kazancı	0.001

Benzetim çalışmasında kullanılan yükseltici dönüştürücü akımı sınırlandırmak amacıyla akım kontrollü olarak çalışmaktadır ve dönüştürücü girişine akım değişimlerini sınırlandırmak amacıyla bir LC filtre konulmuştur.

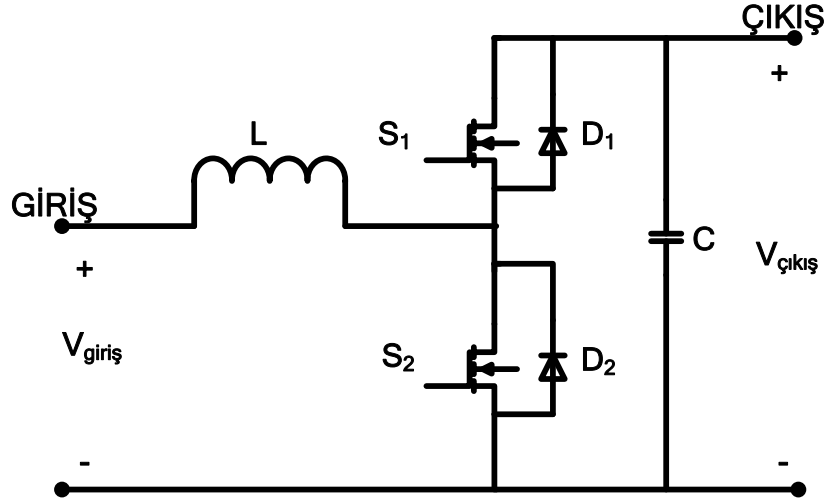
Yükün gücü yakıt pili ve bataryadan gelen güçlerin toplamından oluşmaktadır. Bu güç değeri yakıt pilinin gerilimine bölünerek akım elde edilmektedir. Elde edilen bu akım bir sınırlayıcıdan geçirilerek akımın yükselme ve düşme hızlarının sınırlandırılması sağlanmaktadır. Elde edilen bu akım değeri ile yakıt pilinin akımı karşılaştırılarak hata değeri PI bloğundan geçirilip, böylece PWM sinyalleri üretilmektedir. Üretilen PWM sinyallerine bağlı olarak da güç anahtarı olarak kullanılan MOSFET'in iletime ve kesime girme işlemleri sağlanarak yükseltici dönüştürücünün kontrolü sağlanmaktadır.



Şekil 6. 7 Yükseltici DC-DC dönüştürücüde kullanılan kontrol yöntemi

6.1.2 Çift Yönlü DC-DC Dönüştürücü

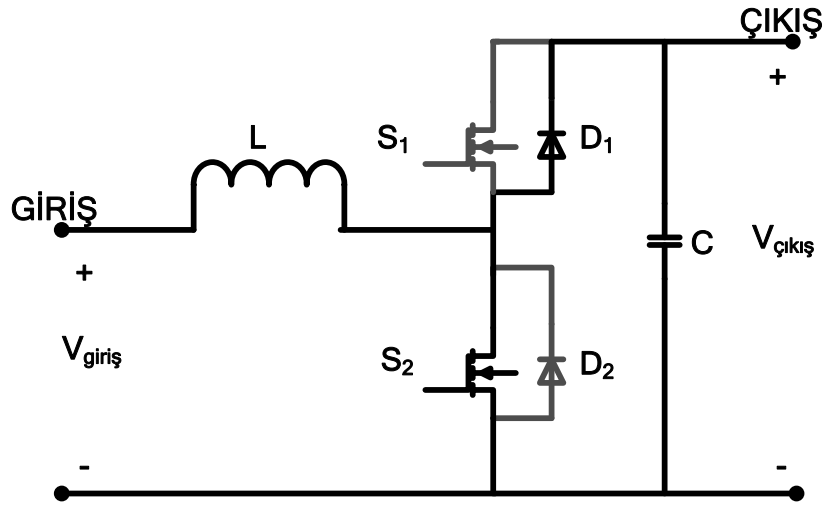
Bu çalışmada, enerji depolama ünitesi olarak kullanılan bataryanın, faydalı frenleme ile frenleme enerjisinin geri kazanılarak şarj olması ve DC bara gerilimini 900 V'ta sabit tutmak amacıyla bir çift yönlü DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır.



Şekil 6. 8 Çift yönlü DC-DC dönüştürücü devre şeması

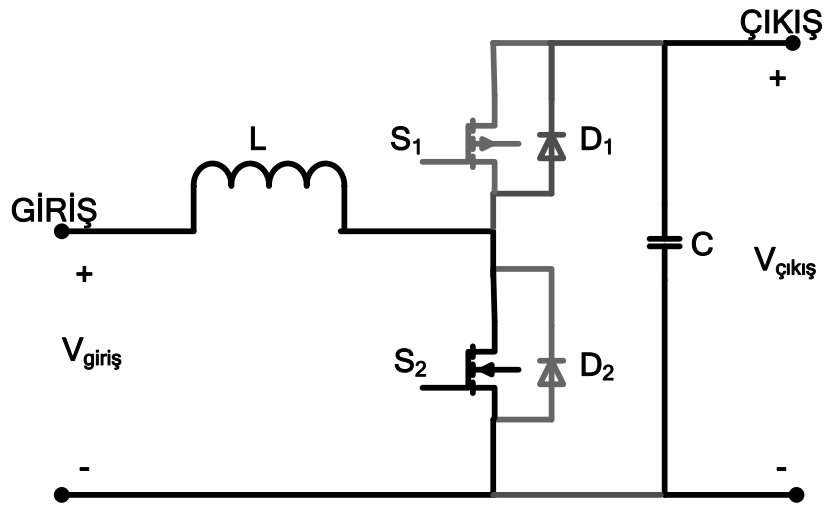
Kullanılan çift yönlü DC-DC dönüştürücü gerilim kontrollü olarak çalışmaktadır. İleri yönde, DC bara gerilimi 900 V'tan düşük olduğunda, yükseltici dönüştürücü olarak çalışmakta ve enerji akışı bataryadan DC baraya doğru olmaktadır. Geri yönde ise, DC bara gerilimi 900 V'tan daha yüksek olduğunda, düşürücü dönüştürücü olarak çalışıp, bataryayı şarj etmektedir.

Çift yönlü DC-DC dönüştürücü yükseltici dönüştürücü olarak çalıştığı zaman dönüştürücünün elemanları L-S₂-D₁'dir. Yükseltici dönüştürücüde olduğu gibi girişteki DC gerilimden daha yüksek ve regüleli bir DC çıkış gerilimi elde edilmekte ve güç anahtarının iletme ve kesime girme işlemleri PWM tekniği ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 6. 9 Çift yönlü DC-DC dönüştürücünün ileri yönde yükseltici dönüştürücü olarak çalışması

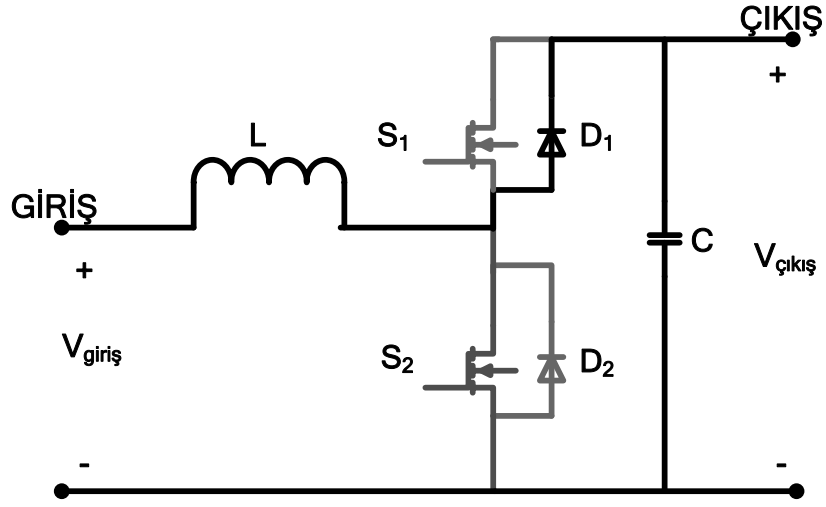
İleri yönde çalışmanın ilk aralığında S_2 'ye sinyal verildiğinde D_1 diyodu kesime girmektedir.



Şekil 6. 10 İleri yönde S_2 güç anahtarı iletimde iken çift yönlü dönüştürücünün eşdeğer devre şeması

Bu aralıkta giriş kaynağı tarafından endüktansa enerji aktarılmakta ve yük kondansatör tarafından beslenmektedir. Güç anahtarının kontrol sinyali kesildiği anda güç anahtarı kesime girmekte ve enerjili olan endüktansın ürettiği emk ile birlikte D_1 diyodu iletime girmektedir [46].

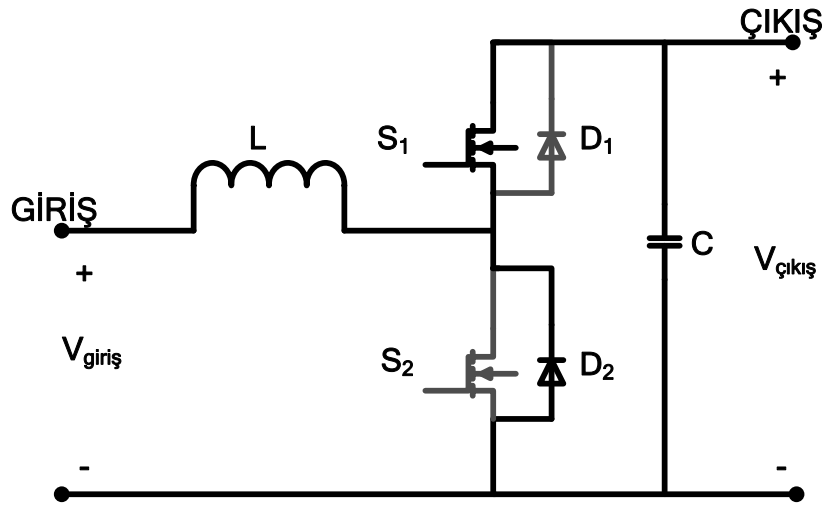
İleri yönde çalışmanın ikinci aralığında S_2 güç anahtarının sinyali kesildiğinde D_1 diyodu iletime girmektedir.



Şekil 6. 11 İleri yönde S_2 güç anahtarı kesimde iken çift yönlü dönüştürücünün eşdeğer devre şeması

Bu aralıkta yük, giriş kaynağı ve endüktans tarafından beslenmektedir. Çalışmanın ilk aralığında yükü besleyerek boşalan kondansatör, bu aralıkta dolmaktadır.

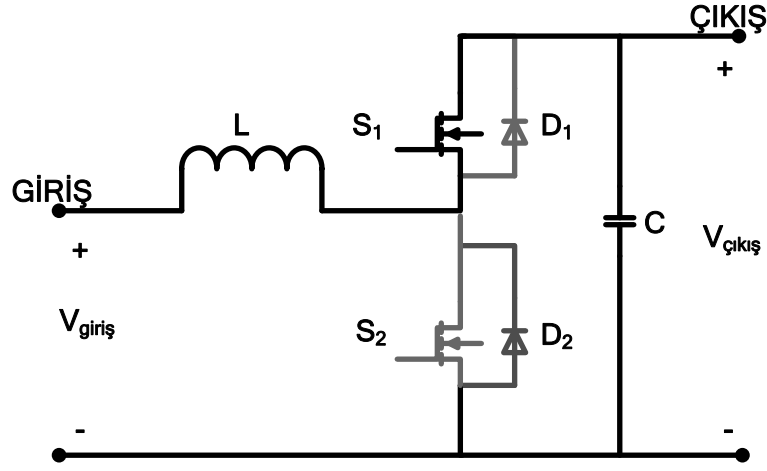
Çift yönlü DC-DC dönüştürücü, DC bara gerilimi 900 V'tan fazla ise düşürücü dönüştürücü olarak çalışmaktadır. Bu dönüştürücü, düşürücü dönüştürücü olarak çalıştığında dönüştürücünün elemanları $L-S_1-D_2$ 'dir.



Şekil 6. 12 Çift yönlü DC-DC dönüştürücünün geri yönde düşürücü dönüştürücü olarak çalışması

Düşürücü DC-DC dönüştürücüler, çıkışında, girişteki DC gerilimden daha düşük seviyede ve regüleli DC gerilim elde edilen dönüştürücülerdir.

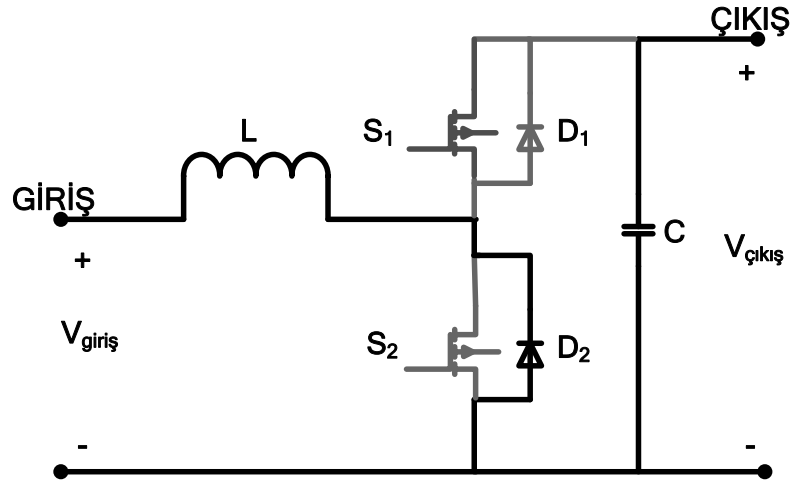
Düşürücü dönüştürücü çalışmasının ilk aralığında S_1 güç anahtarına kontrol sinyali uygulanarak, iletme girmektedir. D_2 diyodu ise kesimdedir.



Şekil 6. 13 Geri yönde S_1 güç anahtarı iletimde iken çift yönlü dönüştürücünün eşdeğer devre şeması

Bu aralıkta enerji kaynağı tarafından endüktansa enerji aktarılmakta, aynı zamanda yük beslenmektedir. Endüktanstan geçen akım lineer olarak artmakta ve endüktansın enerji seviyesi de yükselmektedir [46].

Düşürücü dönüştürücünün ilk aralığı S_1 güç anahtarının kontrol sinyalinin kesilip, D_2 diyodunun iletme girmesi ile sonlanır ve çalışmanın ikinci aralığı başlar.



Şekil 6. 14 Geri yönde S_1 güç anahtarı kesimde iken çift yönlü dönüştürücünün eşdeğer devre şeması

Bu aralıkta S_1 transistörü kesime girerek, enerjili olan endüktansın ürettiği emk ile D_2 diyodu iletme girmektedir. Yük, endüktansta biriken enerji ile beslenmektedir.

Benzetim çalışmasında kullanılan çift yönlü DC-DC dönüştürücünün parametreleri Çizelge 6. 4'te verilmektedir.

Çizelge 6. 4 Benzetim çalışmasında kullanılan çift yönlü DC-DC dönüştürücü parametreleri

Dönüştürücü endüktansı	1 [mH]
Dönüştürücü kapasitansı	5 [mF]
Yarı-iletken tipi	MOSFET
Ortalama anahtarlama frekansı	5 kHz
PI gerilim kontrol sisteminin oransal kazancı	0.05
PI gerilim kontrol sisteminin integral kazancı	0.01
Referans gerilim	900 V

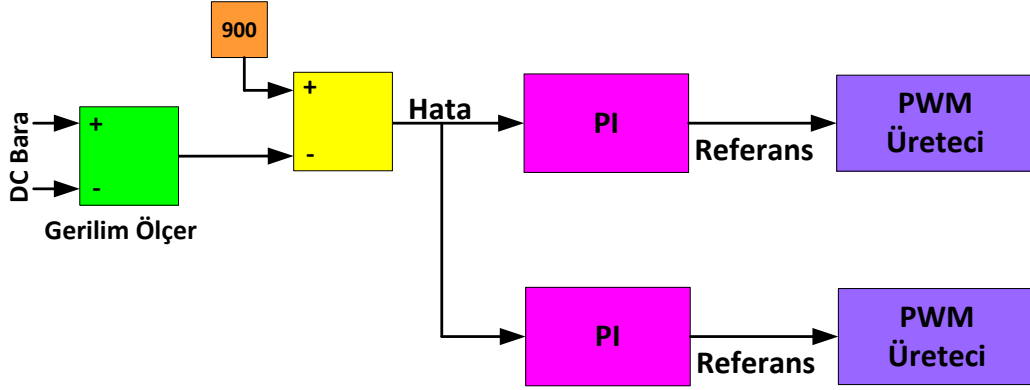
Çift yönlü DC-DC dönüştürücüdeki iki adet güç anahtarının iletme ve kesime girme işlemleri PWM tekniği ile gerçekleştirilmektedir. Bunun için benzetim çalışmasında iki adet PWM üretici kullanılmıştır.

Güç anahtarları için gerekli olan PWM sinyalleri, DC bara geriliminin ölçülmesiyle sağlanmaktadır. DC bara geriliminin 900 V'ta sabit tutulması istenmektedir. Karşılaştırıcı yardımıyla bara geriliminin 900 V'tan yüksek veya alçak olması durumuna göre çift yönlü dönüştürücü yükseltici veya alçaltıcı modda çalışmaktadır.

Eğer gerilim 900 V'tan düşük ise dönüştürücü yükseltici modda çalışmaktadır. Batarya yükü beslemektedir. Bara geriliminin 900 V'tan farkı alınarak, hata değeri PI denetleyicisinden geçirilerek PWM sinyalleri üretilmektedir. Üretilen PWM sinyalleri ile dönüştürücünün yükseltici moda ait olan güç anahtarının iletme ve kesime girme işlemi kontrol edilmektedir.

Gerilim 900 V'tan yüksek ise dönüştürücü düşürücü moda çalışmaktadır. Düşürücü modda çalışmada, enerjinin yönü DC baradan bataryaya doğrudur ve bataryanın şarj olması sağlanmaktadır. Yükseltici modda olduğu gibi, 900 V ile DC bara geriliminin farkı hata değeri olarak PI denetleyicisinden geçirilerek, PWM sinyalleri üretilmekte ve

böylece dönüştürücünün düşürücü moda ait olan güç anahtarının ilettime ve kesime girme işlemi kontrol edilmektedir.

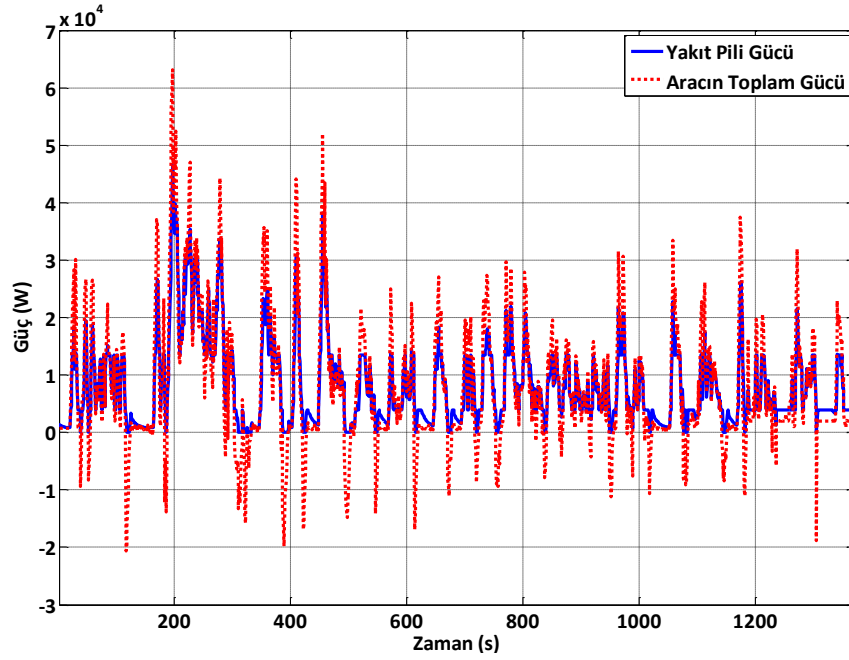


Şekil 6. 15 Çift yönlü DC-DC dönüştürücüde kullanılan kontrol yöntemi

6.2 Benzetim Çalışmaları Sonuçları

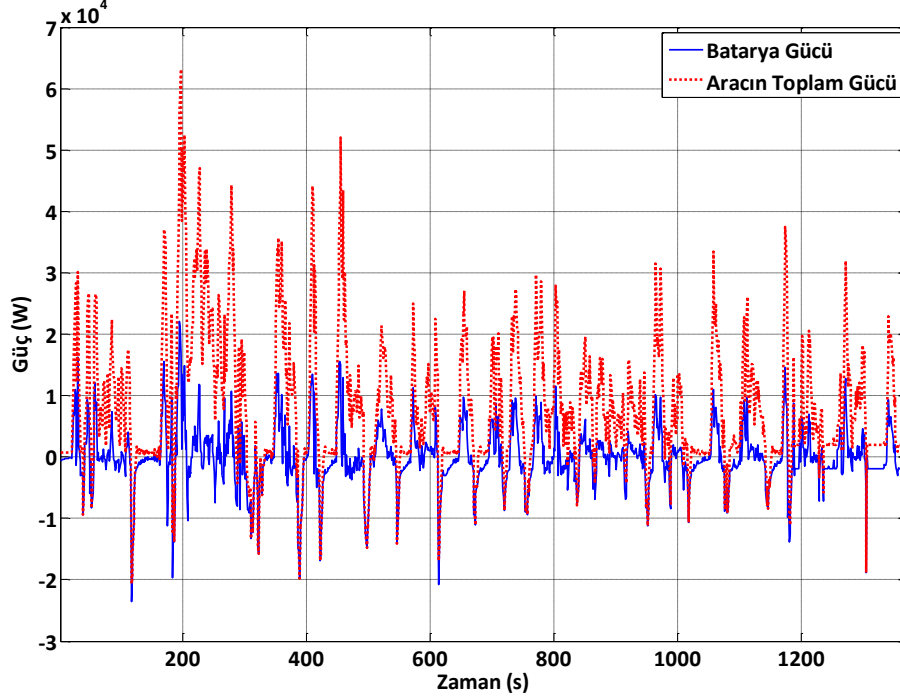
Simülasyon 5 μ s örnekleme zamanı ile 1370 saniye çalıştırılmıştır. Yük paylaşımı Bölüm 6.1'de açıklandığı gibi aracın güç talebinin büyük kısmı YP tarafından, ani ve negatif güçler ise batarya tarafından karşılanacak şekilde sağlanmıştır. Bu şartlar altında toplam güç ve YP'nin güç değişimi

Şekil 6. 16'da verilmiştir.



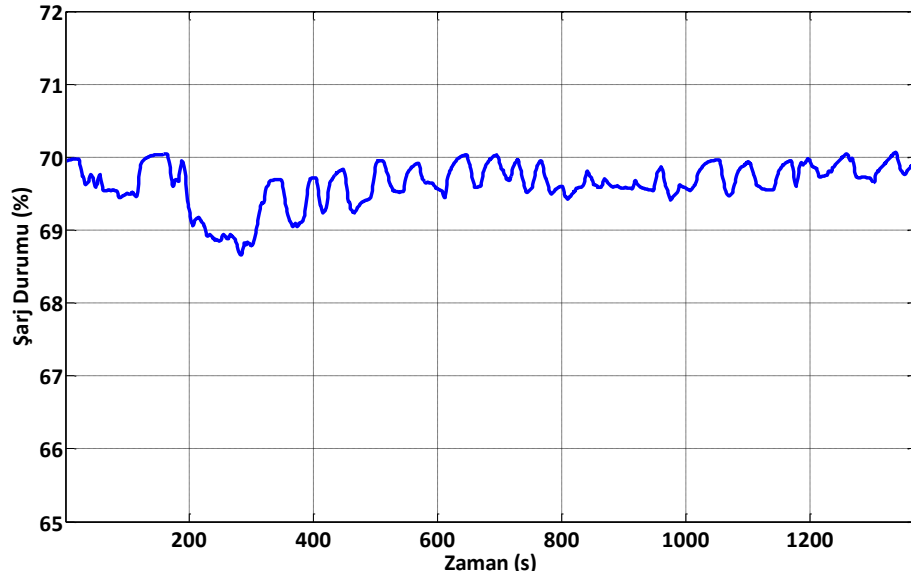
Şekil 6. 16 Toplam güç ve YP'nin güç değişimi grafiği

YP gücü görüldüğü gibi toplam güç talebini takip etmiştir. Ancak ani değişimlerin olduğu noktalarda güç artış hızı sınırlandırıldığından ihtiyaç olan gücün bir kısmı bataryadan karşılanmıştır. Bataryanın gücü ve toplam gücün değişimi Şekil 6. 17'de verilmiştir.



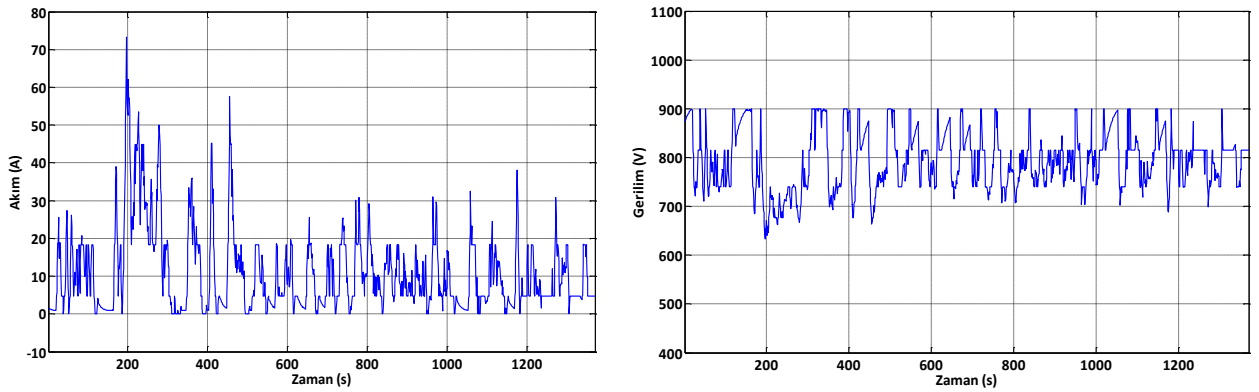
Şekil 6. 17 Toplam güç ve bataryanın güç değişimi grafiği

Bataryanın ortalama güç değişimi oldukça düşük (72 W) olmakla beraber ani güç ihtiyaçlarının batarya tarafından karşılandığı gözlemlenebilmektedir. Buradan kolaylıkla söylenebilir ki önerilen sistem sayesinde ani güç ihtiyaçları büyük oranda faydalı frenleme ile kazanılan enerji ile sağlanmıştır. Bu durum Şekil 6. 18'de bataryanın doluluk oranının başlangıç ve bitiş değerlerinin aynı olmasından gözlemlenebilmektedir.



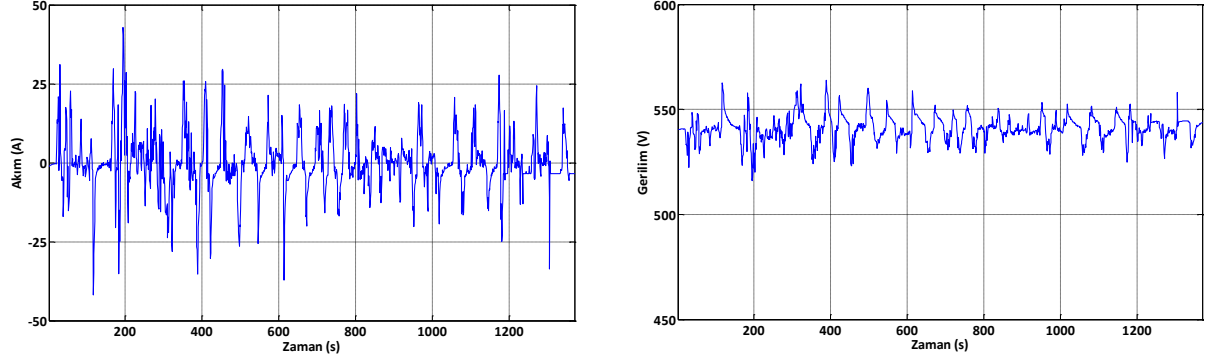
Şekil 6. 18 Batarya şarj durumunun zamana göre yüzdesel değişimi

YP'nin akım ve gerilim değerlerinin benzetim çalışması boyunca değişimi Şekil 6. 19'da verilmiştir. Görüldüğü gibi YP'den yüksek akım çekildiğinde YP gerilimi kayıplara bağlı olarak azalmaktadır. Böylelikle UDSS çevriminde maksimum gücün çekildiği 196. saniyede YP'den 73,35 A akım çekilmiştir ve YP gerilimi buna bağlı olarak 633,28 V'a düşmüştür.



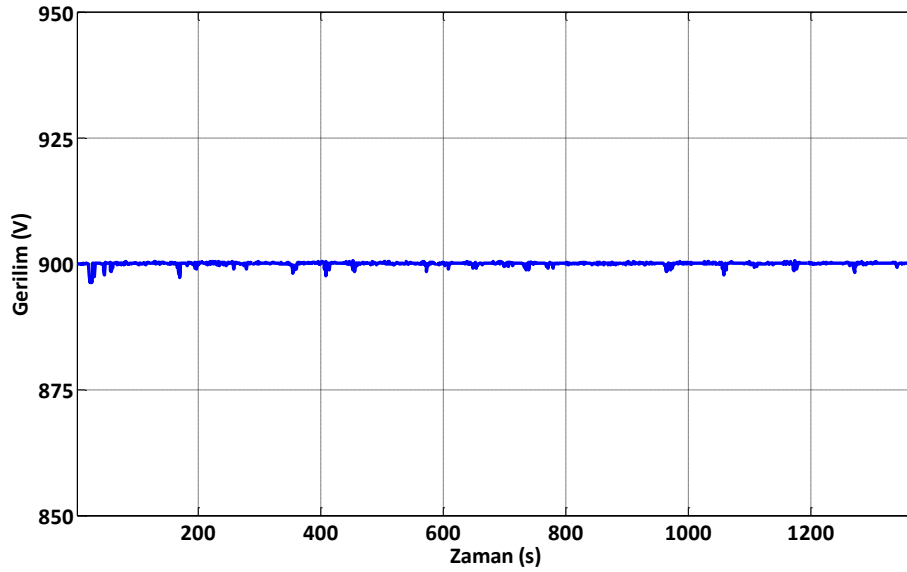
Şekil 6. 19 YP'nin akım ve gerilimi

Aynı şekilde batarya akım ve geriliminin değişimi Şekil 6. 20'de verilmiştir. UDSS çevriminde maksimum gücün çekildiği anda, batarya akımının en yüksek değeri olan 42,8 A ve geriliminin en düşük seviyesi olan 516 V değerleri görülmektedir.



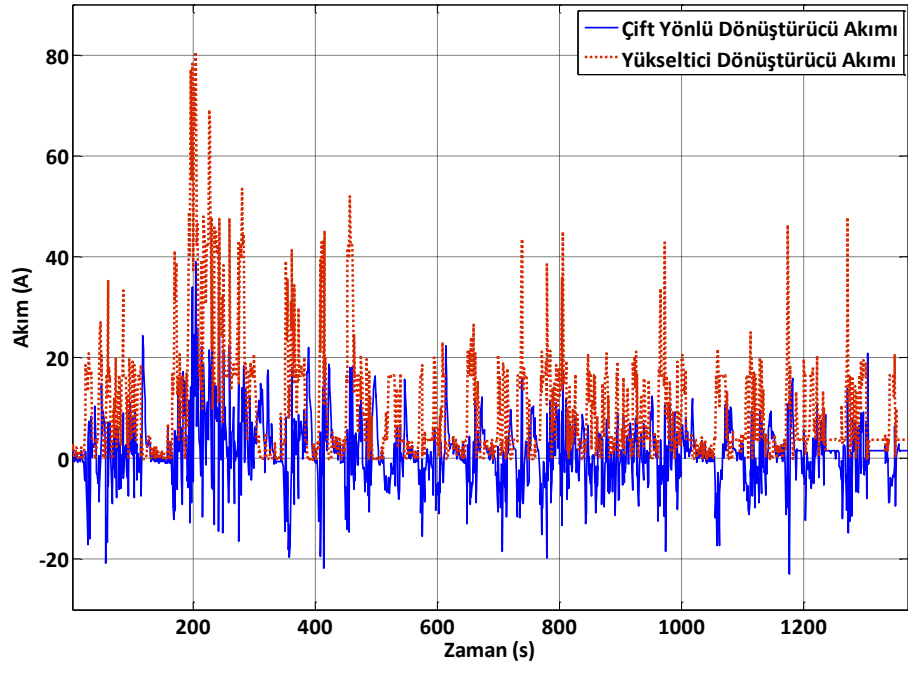
Şekil 6. 20 Bataryanın akım ve gerilimi

Aynı zamanda güç yönetimi yapılırken DC bara gerilimi de Şekil 6. 21’de görüldüğü gibi 900 V değeri civarında tutulmuştur. DC bara geriliminin sabit olması bu baraya bağlı olan sürücü gibi güç elektroniği elemanlarının performansının artmasına sebep olacaktır.



Şekil 6. 21 DC baranın gerilim-zaman grafiği

DC bara gerilimini sabit tutmak için bataryaya bağlı olan çift yönlü dönüştürücü yüksek frekanslı güç değişimlerini karşılamak zorunda kalmıştır. Bu durum Şekil 6. 22’de gözlemlenmektedir. Aynı şekilde yakıt piline bağlı yükseltici dönüştürücünün akımı ise düşük frekanslı bir değişim göstermekte ve yük akımının büyük kısmını karşılamaktadır.



Şekil 6. 22 Çift yönlü ve yükseltici dönüştürücülere ait akım-zaman grafiği

SONUÇ VE ÖNERİLER

İnsan toplumsal bir varlıktır. İnsanların birbirleriyle etkileşiminde ve ihtiyaçlarının giderilmesinde ulaşım çok büyük bir önem arz etmektedir. Başka bir ifadeyle insanların toplumsal ve bireysel hayatını idame edebilmesi amacıyla ulaşım temel bir ihtiyaçtır. Bu nedenle ulaşımın rahat, hızlı ve ekonomik olması amacıyla teknolojinin ilerlemesine bağlı olarak birçok çalışma yapılmaktadır.

Dünya nüfusunun her geçen gün artması ve teknolojinin gün geçtikçe ilerlemesinden dolayı enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Fosil kökenli yakıtların gelecekte tükeneceği endişesi ve çevresel kaygılar nedeniyle alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi ve ihtiyaç giderek artmaktadır. Ulaşımda da petrol ve türevi yakıtlarla çalışan ve çevreye yaydıkları CO₂ emisyonunun olumsuz etkilerinden dolayı İYM'li araçlar yerine, yüksek verimlilik ve düşük emisyonlu elektrikli araçların geliştirilmesine yönelik çalışmalar hızla devam etmektedir.

Elektrikli araçlar; menzillerinin sınırlı olması, YP ve batarya fiyatlarının pahalı olması ve bataryaların şarj sürelerinin nispeten uzun olması gibi dezavantajlara sahiptir. Bu olumsuzlukların iyileştirilmesi ile birlikte elektrikli araçların İYM'li araçlara göre daha fazla tercih edileceği öngörülmektedir.

Elektrikli araçların menzil problemini azaltmak, performans ve verimlerini artırmak amacıyla son zamanlarda pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların odak noktası frenleme enerjisinin kazanılmasına ve elektrikli araçta enerji yönetiminin sağlanmasına dayalıdır.

Bu çalışmada da enerji yönetim stratejisinin PEMYP/BAT taşıt sistemine adapte edilmesini içeren bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Yapılan sistemde YP sistemin temel yükünü karşılamak amacıyla kullanılırken, batarya ise anlık yük değişimlerini karşılamak ve frenleme enerjisini kazanmak amacıyla kullanılmıştır.

Bu doğrultuda yapılan PEMYP/BAT hibrit güç sisteminin benzetim çalışmasında, UDDS sürüş çevrimi baz alınarak bir yük modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan yük talebini karşılamak amacıyla YP'nin çıkışında bir yükseltici DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır. Yükseltici DC-DC dönüştürücü ile YP'nin çıkış gerilimi belli bir değere yükseltilerek yükün beslenmesi sağlanmıştır. Lityum-iyon bataryanın çıkışında ise bir çift yönlü DC-DC dönüştürücü kullanılmış ve bu dönüştürücü yüklenme durumuna göre düşürücü veya yükseltici moda çalıştırılmıştır. Benzetim çalışmasında çift yönlü dönüştürücü, faydalı frenlemede frenleme enerjisini kazanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Çift yönlü DC-DC dönüştürücü ek bir maliyet getirmekle birlikte sistemin performansını ve verimliliğini arttırdığı görülmüştür.

YP ve bataryanın ani yüklenmelerde verimleri ve ömürleri azalmaktadır. YP'lerde anlık yüklenmelerde aşırı nemlenme ve membran kuruması gibi olumsuzluklar meydana gelmektedir. Ayrıca güçteki anlık ve büyük değişimler bataryaların ömürlerini azaltmakta ve bataryanın iç direncine bağlı olarak bataryanın ısınmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzlukların yaşanmaması için, sistemde YP ve bataryanın doğal özelliklerine uygun olarak güç paylaşımı gerçekleştirilmektedir. Bataryanın ortalama güç değişiminin oldukça düşük olduğu ve ani güç ihtiyaçlarının batarya tarafından karşılandığı benzetim çalışmalarının sonuçlarında gözlemlenmiştir. Önerilen sistem ile birlikte ani güç ihtiyaçları büyük oranda faydalı frenlemede kazanılan frenleme enerjisi ile elde edilmiştir. Böylece UDDS sürüş çevriminde yakıt tasarrufunda artış elde edilmiştir. Ayrıca bataryanın doluluk oranı belli bir seviyede tutularak, bataryanın güç taleplerini karşılamaya her an hazır olması sağlanmıştır.

Tez çalışması boyunca, gerçekleştirilen tüm çalışmalar ve elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, elektrikli araçlar ile ilgili gerçekleştirilecek çalışmalar için şu öneriler dikkate alınmalıdır:

- Elektrikli araçlarda enerji depolama kapasitesi sınırlı olan YP'nin tek başına kullanılması yerine, BAT ile birlikte kullanılması daha uygun olacaktır,
- Faydalı frenleme enerjisini kazanabilmek amacıyla, BAT ile birlikte çift yönlü DC-DC dönüştürücü gerekmektedir. Ayrıca bu dönüştürücü düşürücü ve yükseltici modlarda çalıştırılmalıdır,
- Elektrikli araçlarda enerji depolama ünitelerinin ömürlerini ve verimlerini artırmak amacıyla YP ve BAT arasında güç paylaşımı yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Larminie, J. ve Lowry, J., (2003). "Electric Vehicle Tecnology Explained", John Wiley&Sons,West Sussex, England.
- [2] Wikipedia, The Free Encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car, 3 Mayıs 2014.
- [3] Wakefield, E.H., (1994). "History of the Electric Automobile, The Society of Automobile Engineers, Warrandale.
- [4] Hızal, G. ve Aras, M., (2010). "Elektrikli Otomobil", <http://www.gokhanhizal.com/wp-content/uploads/pdf/bitirme-odevi-2010.pdf>, 8 Ocak 2014.
- [5] Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F., ve Tiris, M., (2003). "Elektrikli Araçlar", http://www.normenerji.com.tr/menus/elektrikli-araclar_190220120138391025288910.pdf, 25 Kasım 2013.
- [6] Vural, B., (2010). Elektrikli Taşıtlarda Enerji Yönetim Stratejisinin, Güç Dönüştürücülerinin ve Bağlantı toplojilerinin Performans ve Verimlilik Üzerine Etkisi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Chau, K.T, ve Wong, Y.S., (2002). "Owerview of Power Management in Hybrid Electric Vehicles", <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890401001480>, 8 Ocak 2014.
- [8] Akın B., (2012). "Elektrikli Arabalarda Kullanılan Li-ion Akülerin Tek Fazdan Hızlı ve Verimli Şarjı için Güç Faktörü Düzeltmeli Yükselticilerin Karşılaştırılması", http://www.emo.org.tr/ekler/1d533b6f6693312_ek.pdf?dergi=883, 2 Ocak 2014.
- [9] Haraldsson, K. Ve Alvfors, P., (2005). "Effects of Ambient Conditions on Fuel Cell Vehicle Performance", <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305002697>, 22 Kasım 2013.
- [10] Barbir, F., (2005). "PEM Fuel Cells (Theory and Practise)", Elsevier Academic Press, California, USA.

- [11] Larminie, J. Ve Dicks, A., (2005). "Fuel Cells Systems Explained", John Wiley&Sons, West Sussex, England.
- [12] Davis, C., Edelstein B., Evenson, B., Cox, D. ve Brecher A., (2003). Hydrogen Fuel Cell Vehicle Study, American Pysical Society.
- [13] Wikipedia, The Free Encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Trolleybus>, 3 Mayıs 2014.
- [14] Wikipedia, The Free Encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_electric_vehicle, 3 Mayıs 2014.
- [15] Köklükaya, E., Yıldız, M. ve Bağcı, S., (2011). "Hibrit Araçlarda Güç Elektroniği Sistemlerinin Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama Yöntemiyle Modellenmesi", Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, 5-7 Ekim 2011, Elazığ.
- [16] Keskin, A., (2009). "Hibrid Taşıt Teknolojileri ve Uygulamaları", Mühendis ve Makina, 50(597):12-20.
- [17] Aşkar Yakıt Hücreli Elektrikli Araç Projesi, http://www.askar.itu.edu.tr/yhe_araclar.htm, 3 Mayıs 2014.
- [18] Koç, C., (2012). Hibrid Araçlarda Değişik Parametrelere göre Elektrik Motoru Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] Uçarol, H., Kural, E., Bahar, D.M., Özsu, E., Elcik, E., Çimen, M.A., Demirci, M., Güler, M., Ararat, Ö., Biliroğlu, Ö., Kütük O., Solak, Y., Ergin, C. ve Tırıs, M., "Hibrid ve Elektrikli Araçlar, Ulaşımında Enerji Verimliliği İçin Bir Alternatif", http://www.emo.org.tr/ekler/29ffd3b980b5b35_ek.pdf, 3 Mayıs 2014.
- [20] Wikipedia, The Free Encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Honda_Insight, 3 Mayıs 2014.
- [21] Alter, Lloyd., (2007). "Ballard Throws In The Towel on The Hydrogen Car", <http://www.treehugger.com/cars/ballard-throws-in-the-towel-on-the-hydrogen-car.html>, 3 Mayıs 2014.
- [22] Senol R., Uçgul I. ve Acar M., (2006). "Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi", Mühendis ve Makine, 47 (563): 37-50.
- [23] Vikipedi, Özgür Ansiklopedi, http://tr.wikipedia.org/wiki/Nostaljik_tramvay, 12 Mayıs 2014.
- [24] Honda Car Classics, <http://hondaoldies.de/Korbmacher-Archiv/Honda/Prototypen/Dream/dream2.htm>, 12 Mayıs 2014.
- [25] Uzun, T., "Şarj Edilebilen Bataryalar ve Şarj Devreleri", <http://www.yildiz.edu.tr/~uzun/images/MkBatarya1.pdf>, 22 Şubat 2014.
- [26] Vincent, C.A., ve Scrosati, B., (1997). "Modern Batteries", Arnold, London.
- [27] Wikipedia, The Free Encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/State_of_charge, 7 Mayıs 2014.

- [28] Kuşdoğan, Ş. Ve Demirel, B., (2007). “Enerji Depolama Sistemlerine Bir Uygulama Olarak Kurşun Asit Bataryaların Çift Katlı Olarak Yeniden Tasarlanması ve Verimlerinin Değerlendirilmesi”, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi ve Fuarı, 14-18 Kasım 2007, Eskişehir.
- [29] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, <http://www.cygm.gov.tr/CYGM/Files/yayinlar/kitap/pilaku.pdf>, 12 Mayıs 2014.
- [30] Electrical Vehicles World, <http://www.evworld.com/article.cfm?storyid=1489>, 12 Mayıs 2014.
- [31] Satılmış, O. ve Meşe, E., (2011). “Elektrikli ve Hibrit Elektrikli Araçlar için Batarya Şarj Cihazları”, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, 5-7 Ekim 2011, Elazığ.
- [32] Khan, I.A., (1994). “Battery Charges for Electric and Hybrid Vehicles”, Power Electronics in Transportation, 103-112.
- [33] Sweigert, G.M., Eley, K. ve Childers C., (2001). “Standartisation of Charging Systems for Battery Electric Vehicles”, Proceedings of the 18th International Electric Vehicle Symposium, CD-ROM.
- [34] Kumagi, N. ve Tatamoto, M., (1989). “Application Of Solar Cells To The Automobile”, Proceedings of an SAE conference published as Recent Advances in Electric Vehicle Technology, Society of Automotive Engineers, 117-121.
- [35] Fujinnaka, M., (1989). “Future Vehicles Will Run With Solar Energy”, Proceedings of an SAE conference published as Recent Advances in Electric Vehicle Technology, Society of Automotive Engineers, 31-39.
- [36] Bıyıkoğlu, A., (2003). “Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri ve Bugünkü Durumu”, G.U. Journal of Science, 16(3):523-542.
- [37] Yıldızbilir, F., (2006). Yakıt Pili İle Elektrik Enerjisi Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
- [38] Arabul, A.Y., (2010). Yakıt Pillerinin Şebekeden Bağımsız Ev Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [39] Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, F., (2003). “Türkiye Enerji Profili ve Hidrojen”, 2. Ulusal Hidrojen Kongresi, 9 Temmuz 2003, Ankara.
- [40] Alkaya, L., Behçet, R. ve İlkılıç, C., (2008). “Yakıt Pilleri ve Uygulama Alanları”, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi, 7 (1): 67-71, Elazığ.
- [41] Oğuz, A.E., (2006). Hidrojen Yakıt Pilleri ve PEM Yakıt Pili Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [42] Doğan, İ.M., (2008). Güneşin Yakıt Pillerinde Enerji Kaynağı Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

- [43] Erdiñ, O., (2008). Dalgacık Dönüşümü/Bulanık Mantık Tabanlı Enerji Yönetim Stratejisi Kullanılarak Yakıt Hücresi/Ultra-Kapasitörlü Hibrit Taşıt Sisteminin Modellenmesi ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [44] Çelik, Y., (2007). Yakıt Pilleri Uygulamaları için Düşük Maliyetli ve Yüksek Verimli DC-DC Dönüştürücü Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [45] Özkan, G., (2007). Yakıt Pilleri Uygulamaları için Dijital Kontrollü D.A.-D.A. Dönüştürücü Devre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [46] Bodur, H., (2010). "Güç Elektroniğı", Birsen Yayınevi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Fatma KESKİN
Doğum Tarihi ve Yeri :02.07.1989 - Fatih
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :fkeskin@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Fen Bilimleri	Şehit Osman Altinkuyu Anadolu Lisesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2013	Schneider Electric	Proje Müdürü

YAYINLARI

Bildiri

1. Arabul, A.Y., Senol, İ., Kumru, C.F., Boynuegri, A.R. ve Keskin, F., (2014). "An Experimental Study For Comparing The Effect Of The Magnetic Field On Human Health Around Transformers In Sinusoidal And Non-Sinusoidal Current Conditions", International Symposium on Sustainable Development, 15-18 Mayıs 2014, Bosnia and Herzegovina.