

Kemal KAYA



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**HİDROJEN YAKIT HÜCRELİ
ARAÇLARDA KONTROL
STRATEJİSİ GELİŞTİRİLMESİ**

Kemal KAYA

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

HAZİRAN 2018

HAZİRAN 2018



HİDROJEN YAKIT HÜCRELİ ARAÇLARDA KONTROL STRATEJİSİ GELİŞTİRİLMESİ

Kemal KAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2018

Kemal KAYA tarafından hazırlanan "HİDROJEN YAKIT HÜCRELİ ARAÇLARDA KONTROL STRATEJİSİ GELİŞTİRİLMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ekin ASLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 13/06/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Doc. Dr. Tolga DEPCI
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kemal KAYA

13/06/2018



HİDROJEN YAKIT HÜCRELİ ARAÇLARDA KONTROL STRATEJİSİ
GELİŞTİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Kemal KAYA

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2018

ÖZET

Hidrojen yakıt hücreli araçların gelişim sürecinin hızlanmasıyla, araçta depolanan enerjiyi en üst düzeye çıkarmak ve aracı yüksek verimlilikle kullanmak oldukça önemli hale gelmiştir. Bir hidrojen yakıt hücreli araçta bulunan yakıt hücresi, ani ve yüksek güç taleplerinde tek başına yeterli değildir. Bu sorunun çözümü için yakıt hücresiyle birlikte yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya ve yüksek güç yoğunluğuna sahip süperkapasitör teknolojileri, aracın ekstra güç ve enerji taleplerini karşılamak için kullanılır. Bu çalışmada birincil enerji kaynağı olarak bir proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC) ve enerji depolama teknolojisi olarak da bir lityum iyon batarya ile bir süperkapasitör kullanılmıştır. Bu teknolojiler, aracın çekiş motorunun ihtiyacı olan gücü uygun şekilde sağlamak için DC/DC güç dönüştürücüleri ile DC baraya bağlanmıştır. Böylece aracın sistem performansı, elektrik şebekesinden bağımsız olarak incelenmiştir. Burada uygun bir enerji yönetim sistemi ile iyi tasarlanmış bir kontrol stratejisi geliştirilmiş ve bu da hem verimliliği hem de araç dinamiklerini artırmıştır. Sonuçlar hidrojen yakıt tüketimi, enerji verimliliği ve kontrol sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Hidrojen yakıt hücreli araç, yakıt hücresi, batarya, süperkapasitör,
DC/DC dönüştürücüler, kontrol stratejisi
Sayfa Adedi : 104
Danışman : Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

DEVELOPMENT OF CONTROL STRATEGY IN THE
HYDROGEN FUEL CELL VEHICLES

(M. Sc. Thesis)

Kemal KAYA

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

June 2018

ABSTRACT

With the acceleration of the development process of hydrogen fuel cell vehicles, it has become very important to maximize the energy stored in the vehicle and to use the vehicle with high efficiency. The fuel cell in a hydrogen fuel cell vehicle alone is not sufficient in sudden and high power demands. To solve this problem, the fuel cell, the battery with high energy density and the supercapacitor with high power density are used to supply the vehicle's extra power and energy demands. In this study, a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) was used as the primary energy source, and also lithium-ion battery and a supercapacitor were used as the energy storage technology. These technologies are connected to DC-bus with DC/DC power converters to provide the power needed by the vehicle's traction motor. Thus, the system performance of the vehicle has been examined independently of the power grid. Here, a well-designed control strategy was developed with an appropriate energy management system, which increased both efficiency and vehicle dynamics. The results have been analyzed in terms of the sustainability of hydrogen fuel consumption, energy efficiency and control systems.

Key Words : Hydrogen fuel cell vehicle, fuel cell, battery, supercapacitor, DC/DC converters, control strategy

Page Number : 104

Supervisor : Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

TEŐEKKÖR

Bu tezin fikir altyapısının oluşturulmasında ve hazırlanmasında değerli bilgi ve tecrübeleriyle sonsuz destek veren ve yetişmemde büyük emekleri bulunan çok saygıdeğer bilim adamı danışman hocam Sayın Prof. Dr. Yakup HAMEŞ'e ve tezimin belirlenmesinde ve hayata geçirilmesinde fikirleriyle bana ilham kaynağı olan çok değerli Sayın Makine Yüksek Mühendisi Mehmet GÖRZ'e teőekkörü bir borç bilirim. Tezimin her aşamasında daima yanımda bulunan çok kıymetli sevgili eşime ve beni yetiőtirip bugünlere getiren, maddi manevi destekleriyle koşulsuz her zaman arkamda olan biricik aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC) Dinamik Modeli	31
3.2. Lityum İyon (Li-ion) Batarya Teknolojisi Dinamik Modeli	40
3.3. Süperkapasitör (Ultrakapasitör) Teknolojisi Dinamik Modeli	43
3.4. DC/DC Güç Biçimlendirme Üniteleri (Konvertörler)	46
3.5. DC/AC Dönüştürücü (İnverter)	50
3.6. Üç Fazlı Çekiş Motoru	51
3.7. Yol Modelleri.....	56
3.8. Hidrojen Yakıt Hücreli Araç Sistemi için Oluşturulan Kontrol Stratejisi	58
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	63
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR.....	87
EKLER	99
EK-1. MATLAB ortamında oluşturulan kontrol stratejisi yazılım kodları	100
ÖZGEÇMİŞ.....	103
DİZİN.....	104

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Yakıt hücresi teknolojilerinin karşılaştırılması.....	15
Çizelge 1.2. Batarya teknolojilerinin karşılaştırılması.....	20
Çizelge 1.3. Batarya ve süperkapasitör paketlerinin karşılaştırılması.....	23
Çizelge 4.1. PEM yakıt hücresi parametreleri	63
Çizelge 4.2. Üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motorunun parametreleri	65
Çizelge 4.3. Lityum-iyon batarya parametreleri	73
Çizelge 4.4. Süperkapasitör parametreleri	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Erimiş Karbonlu Yakıt Hücresi (MCFC) çalışma prensibi	5
Şekil 1.2. Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC) çalışma prensibi.....	6
Şekil 1.3. Alkalın Yakıt Hücresi (AFC) çalışma prensibi	7
Şekil 1.4. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC) çalışma prensibi	9
Şekil 1.5. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC) çalışma prensibi	11
Şekil 1.6. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (DMFC) çalışma prensibi.....	13
Şekil 1.7. Kurşun-asit batarya diyagramı.....	17
Şekil 1.8. Nikel-metal hidrür (NiMH) batarya diyagramı	17
Şekil 1.9. Lityum-iyon batarya diyagramı	18
Şekil 1.10. Süperkapasitör hücresinin yapısı	22
Şekil 3.1. Hidrojen yakıt hücreli araç sisteminin konfigürasyonu.....	31
Şekil 3.2. PEM yakıt hücresinin eşdeğer devresi.....	34
Şekil 3.3. Yakıt hücresi güç modülü.....	35
Şekil 3.4. Yakıt hücresi güç modül kontrolcüsü	36
Şekil 3.5. Yakıt hücresi yığını.....	37
Şekil 3.6. Yakıt hücresi yığınının detaylı modeli	38
Şekil 3.7. Yakıt hücresinin hücre voltaj modülü.....	39
Şekil 3.8. Batarya sisteminin eşdeğer devresi.....	40
Şekil 3.9. Batarya nominal akım deşarj eğrisi	42
Şekil 3.10. Lityum iyon batarya dinamik modeli	42
Şekil 3.11. Süperkapasitör elektriksel eşdeğer devresi	43
Şekil 3.12. Süperkapasitör şarj karakteristiği	45
Şekil 3.13. Süperkapasitör dinamik modeli	45
Şekil 3.14. Yakıt hücresi DC/DC boost konvertörünün yapısı	46

Şekil	Sayfa
Şekil 3.15. Yakıt hücresi DC/DC boost konvertörü	47
Şekil 3.16. Buck/boost çift yönlü DC/DC konvertörün yapısı	47
Şekil 3.17. Buck/boost çift yönlü DC/DC konvertörünün akım-gerilim grafik eğrileri .	48
Şekil 3.18. Buck/boost çift yönlü DC/DC konvertör	49
Şekil 3.19. Üç fazlı çift yönlü DC/AC inverterin elektriksel devre şeması	50
Şekil 3.20. Üç fazlı çift yönlü DC/AC inverterin dinamik modeli	51
Şekil 3.21. Üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motorunun eşdeğer devresi (q eksen) 52	52
Şekil 3.22. Üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motorunun eşdeğer devresi (d eksen) 53	53
Şekil 3.23. Üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motoru	55
Şekil 3.24. Üç fazlı çekiş motorunun elektriksel modeli	55
Şekil 3.25. Üç fazlı çekiş motorunun mekanik modeli	56
Şekil 3.26. Dur-kalk yol modeli.....	57
Şekil 3.27. Yokuş iniş-çıkış yol modeli	57
Şekil 3.28. Güç profilleri: a) Dur-kalk yol modeli, b) Yokuş iniş-çıkış yol modeli.....	58
Şekil 3.29. Hafif hidrojen yakıt hücreli aracın yük profili.....	59
Şekil 3.30. Güç sistemlerinin elektronik kontrol akış şeması	60
Şekil 3.31. Bir hidrojen yakıt hücreli aracın enerji yönetim sistemi	62
Şekil 4.1. Yakıt hücresi gerilim, akım ve güç karakteristiği.....	64
Şekil 4.2. Asenkron makine motor olarak çalıştırıldığında oluşan rotor hızı (rpm)	66
Şekil 4.3. Üç fazlı çekiş motorunun fazlar arası gerilimi (V_{ab})	66
Şekil 4.4. Asenkron makine motor olarak çalıştırıldığında oluşan rotor akımı (i_{ar})	67
Şekil 4.5. Asenkron makine motor olarak çalıştırıldığında oluşan stator akımı (i_{as})	67
Şekil 4.6. Asenkron makine motor olarak çalıştırıldığında oluşan tork (N.m).....	68
Şekil 4.7. Asenkron makine generatör olarak çalıştırıldığında oluşan rotor hızı (rpm) .	68

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. Çekiş motoru generatör olarak çalıştırıldığında oluşan rotor akımı (i_{ar})	69
Şekil 4.9. Çekiş motoru generatör olarak çalıştırıldığında oluşan stator akımı (i_{as})	69
Şekil 4.10. Asenkron makine generatör olarak çalıştırıldığında oluşan tork (N.m)	70
Şekil 4.11. Hidrojen yakıt hücreli aracın talep ettiği güç	70
Şekil 4.12. Yakıt hücresi gerilim, akım ve yakıt tüketimindeki değişimler	71
Şekil 4.13. Yakıt hücresi gerilimi	71
Şekil 4.14. Yakıt hücresi akımı.....	72
Şekil 4.15. Yakıt hücresi gücü	73
Şekil 4.16. Lityum iyon batarya gerilimi	74
Şekil 4.17. Lityum iyon batarya akımı.....	74
Şekil 4.18. Lityum iyon batarya şarj durumu (SOC).....	75
Şekil 4.19. Lityum iyon batarya gücü.....	75
Şekil 4.20. Süperkapasitör gerilimi.....	77
Şekil 4.21. Süperkapasitör akımı	77
Şekil 4.22. Süperkapasitör gücü.....	78
Şekil 4.23. Hafif çekişli bir hidrojen yakıt hücresindeki güç değişimleri	79
Şekil 4.24. Hidrojen yakıt hücreli aracın hidrojen yakıt tüketimi (g).....	79
Şekil 4.25. Hidrojen yakıt hücreli aracın hidrojen yakıt tüketimi (litre/dk)	80
Şekil 4.26. Hidrojen yakıt hücreli aracın dur-kalk yol modelindeki güç değişimleri.....	80
Şekil 4.27. Hidrojen yakıt hücreli aracın dur-kalk yol modelindeki batarya şarj durumu	81
Şekil 4.28. Hidrojen yakıt hücreli aracın dur-kalk yol modelindeki yakıt tüketimi (g)..	82
Şekil 4.29. Hidrojen yakıt hücreli aracın yokuş iniş-çıkış yol modelindeki güç değişimi	82
Şekil 4.30. Yakıt hücreli aracın yokuş iniş-çıkış yol modelindeki batarya şarj durumu	83
Şekil 4.31. Yakıt hücreli aracın yokuş iniş-çıkış yol modelindeki yakıt tüketimi.....	84

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\%SOC_0$	Başlangıç şarj durumu
$\%SOC$	Şarj durumu
C_{bat}	Batarya kapasitesi [Amper-saat]
C_s	Süperkapasitör ana kapasitesi [F]
$E_{0,hücre}^0$	Standart referans gerilimi [V]
$E_{hücre}$	Nernst anlık gerilimi [V]
E_i	Yüksüz durumdaki gerilim [V]
$E_{o,hücre}$	Teorik gerçek gerilim [V]
H_2	Hidrojen
$H_2O(l)$	Su
I_{bat}	Batarya akımı [A]
I_{fc}	Yakıt hücresi akımı [A]
I_{limit}	Sınırlama akımı [A]
$N_{hücre}$	Yakıt hücresi yığınındaki hücre sayısı
O_2	Oksijen
$R_{şarj}$	Batarya şarj direnci [Ω]
$R_{deşarj}$	Bataryadeşarj direnci [Ω]
R_{ohm}	Yakıt hücresi iç direnci [Ω]
R_{ohm0}	Yakıt hücresi iç direncinin ampirik sabiti [Ω]
R_p	Süperkapasitör paralel direnci [Ω]
R_s	Süperkapasitör seri direnci [Ω]
V_{R_s}	Süperkapasitör seri direncinin uç gerilimi [V]
V_{c_s}	Süperkapasitör ana kapasitesinin uç gerilimi [V]
$V_{çıkış}$	Yakıt hücresi çıkış gerilimi [V]
$V_{hücre}$	Yakıt hücresi gerilimi [V]

Simgeler**Açıklamalar**

V_L	Süperkapasitör endüktansının uç gerilimi [V]
V_{SC}	Süperkapasitör çıkış gerilimi [V]
$V_{akt,hücre}$	Aktivasyon gerilim düşümü [V]
V_{bat}	Batarya gerilimi [V]
V_{cf}	Süperkapasitör deşarj son gerilimi [V]
V_f	Süperkapasitör deşarj başlangıç gerilimi [V]
$V_{kons,hücre}$	Konsantrasyon gerilim düşümü [V]
V_{max}	Maksimum süperkapasitör gerilimi [V]
$V_{ohm,hücre}$	Omik gerilim düşümü [V]
c_p	Polarizasyon kapasitesi [F]
i'_{ar}	Rotorun a faz akımı [A]
i_{as}	Stator a faz akımı [A]
i'_{br}	Rotorun b faz akımı [A]
i_{bs}	Stator b faz akımı [A]
i'_{cr}	Rotorun c faz akımı [A]
i_{cs}	Stator c faz akımı [A]
k_E	Nernst geriliminin ampirik sabiti [V/K]
k_{RI}	Yakıt hücresi iç direncinin ampirik sabiti [Ω/A]
k_{RT}	Yakıt hücresi iç direncinin ampirik sabiti [Ω/K]
m_{H_2}	Yakıt hücresinin hidrojen tüketim miktarı [kmol/s]
$p_{H_2}^*$	Hidrojen basıncının etkin değeri [Pa]
$p_{O_2}^*$	Oksijen basıncının etkin değeri [Pa]
η_o	Aktivasyon gerilim düşümünün sıcaklık katsayısı [V]
i'_{dr}	d eksen rotor akımı [A]
i_{ds}	d eksen stator akımı [A]
i'_{qr}	q eksen rotor akımı [A]
i_{qs}	q eksen stator akımı [A]
L'_{lr}	Rotor sızıntı endüktansı [H]
L_{ls}	Stator sızıntı endüktansı [H]
L_m	Manyetik endüktans [H]
L'_r	Toplam rotor endüktansı [H]

Simgeler**Açıklamalar**

L_s	Toplam stator endüktansı [H]
R_{akt}	Aktivasyon gerilim düşümünün eşdeğer direnci [Ω]
R_{kons}	Konsantrasyon gerilim düşümü eşdeğer direnci [Ω]
R'_r	Rotor direnci [Ω]
R_s	Stator direnci [Ω]
T_e	Elektromanyetik tork [N.m]
T_m	Mekanik tork [N.m]
V'_{dr}	d eksenli rotor gerilimi [V]
V_{ds}	d eksenli stator gerilim [V]
V'_{qr}	q eksenli rotor gerilimi [V]
V_{qs}	q eksenli stator gerilimi [V]
φ'_{dr}	d eksenli rotor akısı [Wb]
φ_{ds}	d eksenli stator akısı [Wb]
φ'_{qr}	q eksenli rotor akısı [Wb]
φ_{qs}	q eksenli stator akısı [Wb]
ω	Rotorun açısal hızı [rad/s]
ω_r	Elektriksel açısal hız [rad/s]
F	Faraday sabiti [C/mol]
I	Akım [A]
R	Gaz sabiti [J/mol.K]
T	Çalışma sıcaklığı [K]
a	Tafel eşitliğindeki a katsayısı [V/K]
b	Tafel eşitliğindeki b katsayısı [V/K]
d	d eksenli sayısı
l	Sızıntı endüktansı
q	q eksenli sayısı
r	Rotor sayısı
s	Stator sayısı
t	Batarya çıkış gerilimi örnekleme zamanı (dk)
z	Hareketli elektron sayısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif Akım
AFC	Alkalin Yakıt Hücresi
BERS	Frenleme Enerjisi Rejenerasyon Stratejisi
BEV	Bataryalı Elektrikli Araç
DC	Doğru Akım
DMFC	Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi
ECMS	Eşdeğer Tüketim Minimizasyon Stratejisi
FLC	Bulanık Mantık Kontrolü
HFC	Hidrojen Yakıt Hücresi
HFCEV	Hidrojen Yakıt Hücreli Araç
HP	Beygir Gücü
ICE	İçten Yanmalı Motor
IGBT	İzole Edilmiş Kapılı İki Kutuplu Transistör
KOH	Potasyum Hidroksit
MCFC	Erimiş Karbonlu Yakıt Hücresi
Ni-Cd	Nikel-kadmiyum
NiMH	Nikel Metal Hidrür
Ni-Zn	Nikel-çinko
OMC	Çalışma Modu Kontrolü
PAFC	Fosforik Asit Yakıt Hücresi
PDA	Kişisel Dijital Asistan
PEMFC	Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi
PI	Oransal ve İntegral Kontrol
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
SOC	Batarya Şarj Durumu
SOFC	Katı Oksit Yakıt Hücresi
TTCAN	Zaman Tetiklemeli Kontrolör Alan Ağı

1. GİRİŞ

Dünyadaki enerji ihtiyacının artması, gelecekte insanoğlunun karşılaşılabileceği en önemli tehditlerden birisidir. Bugün, enerji kaynakları dünyadaki bu hızla artan enerji talebini sağlayamamaktadır (Dutta, 2014; Chu, Cui ve Liu, 2017). Artan enerji talebini karşılamak için gereken konvansiyonel yakıtların rezervleri sınırlıdır ve tükenmektedir (Rodatz, Paganelli, Sciarretta, ve Guzzella, 2005). Bu yakıtların kullanımı ile küresel ısınma sorunu gün geçtikçe artmakta ve iklim koşulları olumsuz etkilenmektedir. Dünyadaki küresel ısınma sorununa bir çözüm yolu bulmak için ise fosil yakıtlara olan talebi en aza indirmek ve emisyonları azaltmak büyük önem taşımaktadır (Ball ve Weeda, 2015; Fayaz ve diğerleri, 2012; Kakosimos, Ole, Matthias ve Berkowicz, 2010; Balat, 2008; P. P. Edwards, Kuznetsov, David ve Brandon, 2008; Barnwal ve Sharma, 2005; Pollet, Staffell ve Shang, 2012; Bozoglan, Midilli ve Hepbasli, 2012). Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan eğilim artmaya başlamıştır. Bu eğilim için akla gelen ilk çözüm, fosil yakıtların sebep olduğu küresel ısınmayı azaltabilecek alternatif bir enerji kaynağı olan hidrojendir (Cecal ve Humelnicu, 2011; Chung, Y. Z. Chen, Y. P. Chen ve Chang, 2015). Çünkü hidrojen, katalitik olarak yakılan veya bir yakıt hücresi vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilen bir enerji taşıyıcısıdır (Jain, 2009).

Hidrojenin sürdürülebilir bir yakıt olmasıyla birlikte hidrojen yakıt hücreli araçlar (HFCEV), geleneksel içten yanmalı motora (ICE) sahip araçlara göre daha avantajlıdır. Hidrojen yakıt hücrelerinin (HFC) enerji verimliliği yüksek olduğu için, içten yanmalı motorların hidrojen yakıt hücreleriyle yer değiştirmesi gelişen teknolojiye katkıda bulunacaktır (Hames, Kaya, Baltacıoğlu ve Turkoş, 2018). Bu sebeple otomotiv sektöründeki hidrojen yakıt hücreli araçlara olan eğilim hızla artmaktadır (Cropper, Geiger ve Jollie, 2004; Bauer, Hofer, Althaus, Duce ve Simons, 2015; Gurz, Baltacıoğlu, Hames ve Kaya, 2017). Genel olarak hidrojen yakıt hücreleri, gelen hidrojenin kimyasal enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen ve yenilenebilir enerjiye katkıda bulunan çevre dostu bir teknolojidir (Dusastre, 2001; Schultz, Diehl, Brasseur ve Zittel, 2003; Winter ve Brodd, 2004; Jacobson, Colella ve Golden, 2005; Ay, Midilli ve Dincer, 2006; Bashyam ve Zelenay, 2006; C. Wang, Nehrir ve Gao, 2006; Thounthong, Raël ve Davat, 2009; Y. Devrim, H. Devrim ve Eroğlu, 2015; Saygılı, Eroğlu ve Kincal, 2015). Ayrıca yüksek enerji verimliliğine, düşük emisyon ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilir olma özelliklerine sahip olmasıyla

gelecek için umut vaat etmektedir (Ahmed ve Krumpelt, 2001; Khaligh ve Li, 2010; Marzougui, Amari, Kadri, Bacha ve Ghouili, 2017).

Alternatif bir güç kaynağı olan ve küresel önem kazanarak devam eden yakıt hücresi araştırma ve geliştirme programlarının genel amacı, geleneksel otomobil çeşitliliğine sahip hidrojen yakıt hücreli araç geliştirmek ve bu araçları çevreye duyarlı bataryalar ile çalışan elektrikli araçlara göre daha avantajlı hale getirmektir (Emadi, Rajashekara ve Williamson, 2005). Hidrojen yakıt hücreli araçlar, uzun sürede pil şarjı olmaksızın daha uzun bir sürüş mesafesi ve yüksek enerji verimliliği sayesinde bataryalı elektrik araçlar (BEV) ile yarışabilir ve çok daha düşük emisyon sayesinde içten yanmalı motora (ICE) sahip araçlar ile rekabet edebilir (Mourad, 2014; W. Liu ve Christopher, 2015; Walker, Fowler ve Ahmadi, 2015). Otomotiv endüstrisinde, temiz emisyon salınımı sağlayan hidrojen yakıt hücreli araçların oranı, önemli ölçüde artmaktadır. Verimlilik açısından bu avantajlara rağmen hidrojenli araç teknolojisine geçiş önemli bir teknolojik değişiklik olacağından, fizibilitesinin önündeki engeller büyüktür. Bu engelleri azaltabilmek için depolama teknolojilerinde, yakıt hücresi kimyasında, ömründe, emniyetinde, maliyetinde ve elektrikselleşmiş güç yoğunluğunda iyileştirme gerekmektedir. Özellikle hibrid araçlarda hidrojen yakıt hücrelerinin hızla yaygınlaştırılması, batarya performansını önemli ölçüde arttırmaya ve üretim maliyetlerini düşürmeye bağlıdır (White, Steeper ve Lutz, 2006; Tie ve Tan, 2013). Bütün bunlarla birlikte hidrojen yakıt hücreleri, düşük güç yoğunluğu ve yavaş güç tepkisi gibi çözülmesi gereken sorunları da beraberinde getirmektedir (Chan, 2007; Garcia, Torreglosa, Fernandez ve Jurado, 2013). Özellikle hidrojen yakıt hücreli araçlarda birincil enerji kaynağı olarak yakıt hücresi kullanılmasıyla araçtaki enerji yönetimini tek başına üstlenmesi sonucu aracın yakıt tüketimi ve maliyeti yüksek olmaktadır (C. H. Zheng, Oh, Park ve Cha, 2012; W. Zhang, Li, Xu ve Ouyang, 2017). Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için araçlarda hidrojen yakıt hücresi ile birlikte süperkapasitör ve batarya gibi enerji depolama teknolojileri kullanılabilir (W. Gao, 2005; Burke, 2007; Bauman ve Kazerani, 2008; Ahmadi, Bathaee ve Hosseinpour, 2018; Fathabadi, 2018). Bu çözüm, enerji verimliliğini artıracak, yakıt tüketimini azaltacak, hidrojen yakıt hücresinin ömrünü uzatacak ve maliyetleri düşürecektir. Tabii ki burada en önemli hedef bu kompakt yapıyı tasarlayarak yakıttan ve enerjiden tasarruf etmektir.

Hidrojen yakıt hücreli araçların enerji ve depolama teknolojileri birbirleriyle uyumlu çalışmalıdır. Bunun için, sistem kontrolü ve enerji yönetimi çok önemlidir. Bu araçların

avantajlarını elde etmek ve dezavantajlarını azaltmak için uygun kontrol stratejileri gereklidir. Bataryaların süperkapasitörlere göre daha yüksek spesifik enerjiye sahip olmaları ve süperkapasitörlerin ise bataryalara göre daha yüksek spesifik güce sahip olmaları sayesinde bu teknolojilerin uygun kontrol stratejileriyle çalıştırılması, sistem verimliliğini önemli ölçüde artıracaktır (L. Gao, Dougal ve Liu, 2005; Camara, Gualous, Gustin ve Berthon, 2008; Bauman ve Kazerani, 2009; Camara, Gualous, Gustin, Berthon ve Dakyo, 2010; Ayad, Becherif ve Henni, 2011; Cao ve Emadi, 2012). Elbette, bir aracın aküsünü harici bir kaynak olmadan şarj etme yeteneği, bunu başarmak için bir elektronik devre ve kontrol stratejisi gerektirir (Ehsani, Gao, Gay ve Emadi, 2005; Fernandez, Cilleruelo ve Martinez, 2016). Dahası, geliştirilen kontrol stratejilerinin araca uygulanabilmesini sağlayacak kontrolörlerin de tasarlanması gerekmektedir. Aracın sistem verimliliğini artırarak diğer ihtiyaçlarını karşılayabilecek elektronik güç devrelerinin tasarımı son derece önem arz etmektedir (Amjad, Neelakrishnan ve Rudramoorthy, 2010; Ehsani, Gao ve Miller, 2010; Bayindir, Gözüküçük ve Teke, 2011). Burada yapılması gereken, aracın taleplerine göre enerji ve güç dağılımını doğru şekilde kontrol ederek yönetebilecek kontrolörleri, aynı zamanda yakıt tasarrufu ve enerji verimliliğine katkı sağlayabilecek kontrol stratejileriyle birlikte geliştirmektir (Khan ve Iqbal, 2005; Lai ve Nelson, 2007; Ferreira, Pomilio, Spiazzi ve Silva, 2008; Hajizadeh ve Golkar, 2010; Lagorse, Paire ve Miraoui, 2010; Zandi ve diğerleri, 2011).

Bu tez çalışmasının hedefi, teknolojik gelişmelere ayak uydurmak amacıyla her geçen gün önemi katlanarak artan hidrojen yakıt hücreli araçlar için enerji yönetimi, yakıt tasarrufu ve sistem verimliliğini optimum seviyede tutacak bir kontrol stratejisi belirlemektir. Bunun için öncelikle araçta kullanılacak enerji kaynağı, enerji depolama teknolojileri, elektrik motoru ve güç elektroniği bileşenleri uygun bir şekilde seçilmiştir. Daha sonra bu bileşenler için doğru kontrol stratejisi geliştirilmiş ve literatürdekilerle karşılaştırılıp sonuçlar analiz edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, hidrojen yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör teknolojileri hakkında genel bilgiler verildikten sonra bir hidrojen yakıt hücreli araçtaki kompakt yapının genel mekanizması anlatılmıştır. Sistemde kullanılacak kontrol stratejilerinin farklı modelleri incelenip MATLAB/Simulink ortamında simülasyon sonuçlarının sistem verimliliği bakımından karşılaştırılması ve en iyi kontrol stratejisinin geliştirilmesi planlanmıştır. Ayrıca sonuçların sunulan kontrol stratejileriyle aracın optimum performansına etkisi

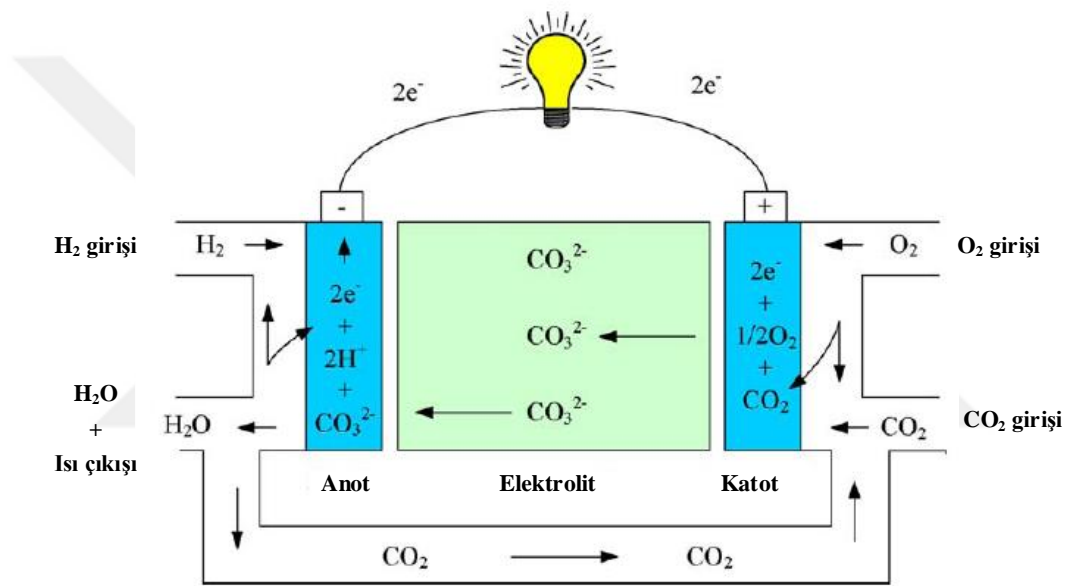
gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bir hidrojen yakıt hücreli aracın yol şartları ve yol modelleri belirlenerek kullanılacak uygun kontrol stratejisinin enerji yönetim sistemi ve yakıt tasarrufu üzerindeki kontrolü sağlanmıştır. Çalışmanın simülasyon sonuçları, araştırma bulguları ve tartışmalar detaylı bir şekilde anlatılarak literatür çalışması sonucu elde edilen verilerle karşılaştırmalı sonuçlar analiz edilmiştir. Son olarak, geliştirilecek kontrol stratejilerinin gelecekteki “Yeşil Enerji” ve “Hidrojen Ekonomisi” kavramlarına sağlayacağı katkılara değinilmiştir.

Hidrojen Yakıt Hücresi

Yakıt hücresi genel olarak hidrojenin kimyasal enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren basit yapıya sahip statik bir cihazdır (Doddathimmaiah ve Andrews, 2009; Tie ve Tan, 2013; Abd El Monem, Azmy ve Mahmoud, 2014; Dutta, 2014; Sharaf ve Orhan, 2014; Ball ve Weeda, 2015; Bauer ve diğerleri, 2015; Chung ve diğerleri, 2015; Gurz ve diğerleri, 2017). Ayrıca, yanma olmadan elektrik üretebilen ve dışarıya sadece su veren üretken bir cihazdır (Jain, 2009; Dutta, 2014; Chung ve diğerleri, 2015). Hidrojen yakıt hücrelerinin içten yanmalı motorlardan 2.5 kat daha verimli olmaları, bu teknolojiyi içten yanmalı motor teknolojilerinden çok daha üstün kılar (Hoffmann ve Dorgan, 2012). Yakıt hücreleri, enerjiyi depolayan pillerin aksine bir enerji dönüştürücü olduğu için daima kendini besleyen harici bir kaynağa ihtiyaç duyar. Yakıt hücreleri, kendisine yakıt verildiği sürece güç üretebilirler. Mekanik ve yanma süreçleri temel alındığında ara dönüşümün olmaması da yakıt hücresi teknolojisine büyük avantaj sağlar (P. Garcia, Fernandez, C. A. Garcia ve Jurado, 2010).

Yakıt hücreleri elektrolit türlerine ve yakıt tiplerine göre genellikle, Erimiş Karbonlu Yakıt Hücresi (MCFC), Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC), Alkalın Yakıt Hücresi (AFC), Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC), Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC) ve Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (DMFC) şeklinde sınıflandırılırlar (Andujar ve Segura, 2009; Kirubakaran, Jain ve Nema, 2009; Sørensen, 2012; Mekhilef, Saidur ve Safari, 2012; Raza ve diğerleri, 2016). Erimiş Karbonlu Yakıt Hücreleri (MCFC'ler) yüksek sıcaklıkta çalışırlar ve bu nedenle başlama süreleri fazladır. Verimleri yüksek olmakla beraber hızlı reaksiyona sahiptirler. Daha fazla geliştirmek için, kararlı boyutta ve korozyona dirençli malzemeler kullanılarak tasarlanmaları gerekir. Çalışmaya başlamadan önce ön ısıtmaya ihtiyaç duymaları dezavantajlarındandır (Andrea ve diğerleri, 2017; Chang-Whan ve diğerleri, 2017; Mehdi, Shahradd ve Masood, 2017; Won-Jun ve diğerleri, 2017; Won-Jun,

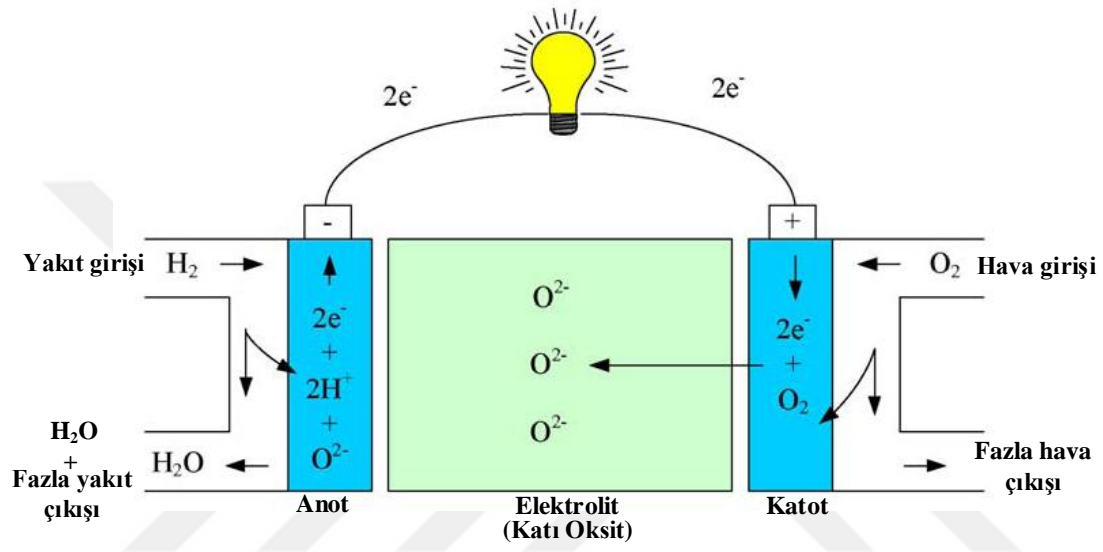
You-Shick, Jae-Oh, Hyun-Seog ve Wang, 2018). Farklı yakıt türleri ile çalışma yetenekleri göz önüne alındığında, MCFC'ler büyük ilgi görmektedir. Büyük güç çıkışına sahip olan sabit enerji santralleri oluşturmak için, bu yakıt hücrelerinin elektriksel ve işletme özellikleri uygundur. Burada tek sorun, çalışma periyodunun yeterince uzun olmamasıdır. Büyük ve maliyetli bir elektrik santralinin çalışması gereken minimum süre en az 40000 saattir. Bu anlamda MCFC'ler, yoğun araştırma ve mühendislik çalışması sonucu binlerce saat çalıştırılarak oluşturulmuştur (Bischoff ve Huppmann, 2002). Bir Erimiş Karbonlu Yakıt Hücresi çalışma prensibi Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Erimiş Karbonlu Yakıt Hücresi (MCFC) çalışma prensibi

Katı Oksit Yakıt Hücreleri (SOFC'ler), yüksek sıcaklıkta katı seramik malzemelerin bir elektrolitini kullanan ve enerji üretimi için geçerli bir seçenek haline gelen yakıt hücresi çeşitlerindedir (Mahato, Banerjee, Gupta, Omar ve Balani, 2015). Daha geniş bir seramik yakıt hücresi kategorisinin parçası olmaları ve katı hal bileşenlerinden oluşmaları SOFC'lerin kullanılmasını cazip hale getirmektedir (Sengodan ve diğerleri, 2015). SOFC'ler, yüksek sıcaklıklı MCFC'lerin aksine, bir katı hal elektrodu, anodu, katodu ve hücre ara bağlantılarına sahiptir (Y. Wang, Leung, Xuan ve H. Wang, 2017). Ayrıca kendiliğinden içsel reformasyon yakıtı sağlarlar. Oksit iyonları elektrolitten geçtiğinden yakıt hücresi yanıcı gazları oksitlemek için kullanılabilir. Çok fazla ısı üretirler ve verimleri yüksektir (Prakash, Kumar ve Aruna, 2014; Papurello, Lanzini, Tognana, Silvestri ve Santarelli, 2015). Mevcut yoğunluklarda MCFC'lerden daha yüksek akım yoğunluklarında

çalışabilirler. Elektroliti katı olduğu için sıvı taşıma problemleri yoktur. SOFC'lerin tüm bu avantajlarına rağmen, toplam pazar penetrasyonu için, işlem sıcaklıklarında katı kalan, boyutsal olarak kararlı ve yüksek dirençli olan, hücrenin diğer bileşenleriyle kimyasal olarak uyumlu ve yeterli iletkenliğe sahip malzemeler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu teknolojinin araç uygulamalarında tercih edilebilirliğinin artması için yeterince olgunlaşıp geliştirilmesi gerekmektedir. Bir Katı Oksit Yakıt Hücresi çalışma prensibi Şekil 1.2'de gösterilmiştir.

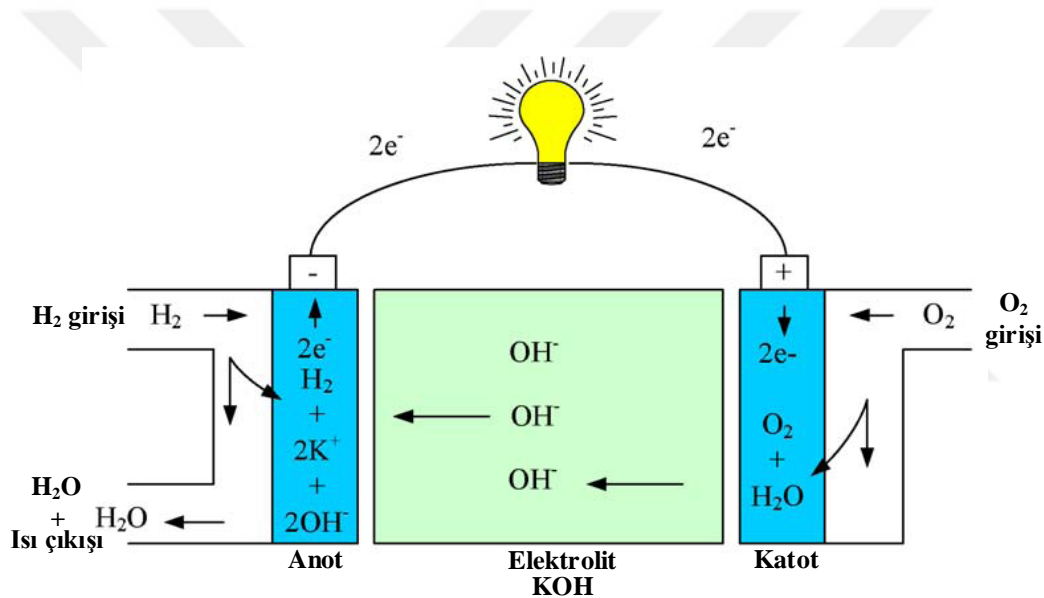


Şekil 1.2. Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC) çalışma prensibi

SOFC, bir elektrolit sandviç ve iki gözenekli elektrotlardan oluşmaktadır (Sunarso, Hashim, Zhu ve Zhou, 2017). Hava katot boyunca akmaktadır. Bir oksijen molekülü katot/elektrolit ara yüzeyiyle temas ettiğinde, katottan elektron almaktadır (Z. Gao, Mogni, Miller, Railsback ve Barnett, 2016). Oksijen iyonları elektrolit materyaline yayılarak anotla temas ettikleri hücrenin diğer tarafına geçmektedirler. Oksijen iyonları, yakıtı anot/elektrolit ara yüzeyinde görerek su, karbondioksit, ısı ve elektronları vermektedir ve böylece katalitik olarak reaksiyona girmektedir. Elektronlar ise, elektrik enerjisi sağlayan harici devre üzerinden taşınmaktadır. SOFC'ler yüksek sıcaklık nedeniyle anot veya katotta değerli metaller gerektirmezler. Ayrıca, çok çeşitli yakıtları kullanabilme yeteneği SOFC'leri gelecek vaat eden bir teknoloji kılmaktadır.

Alkalin Yakıt Hücreleri (AFC'ler), kimyasal reaksiyon ve çalışma sıcaklığında diğer yakıt hücrelerinden farklıdır (Wilberforce, Alaswad, Palumbo, Dassisti ve Olabi, 2016). Yapısında sıvı potasyum hidroksit çözeltisi elektroliti bulunur. Çalışma sıcaklığı $65\text{ }^\circ\text{C}$ ve

220 °C ile 1 atm basınç arasında değişir (Yang, Wang, Zheng, Li ve Zhang, 2014). Her hücre yaklaşık 1.1–1.2 V gerilim sağlayabilir. Düşük sıcaklıklarda çalışabilmeleri, başlatma sürelerinin hızlı olması, yüksek verimliliğe sahip olmaları, çok az miktarda katalizör kullanmaları ve böylece maliyetlerini düşürmeleri, korozyon problemlerinin olmaması, ağırlık ve hacimlerinin düşük olması, katottaki aktivasyon aşırı geriliminin genel olarak bir asit elektrolitinden daha düşük olması, elektrolitinde kullanılan potasyum hidroksitinin çok düşük maliyetli bir malzeme oluşu, elektrotlarının, özellikle katotun, kıymetli olmayan metallere yapılabilir olması ve özellikle egzotik materyallere ihtiyaç duyulmaması AFC'lerin en önemli avantajlarından biridir (McLean, Niet, Prince-Richard ve Djilali, 2002). Bir Alkalın Yakıt Hücresi çalışma prensibi Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Alkalın Yakıt Hücresi (AFC) çalışma prensibi

AFC'nin yapısındaki tüm hücreler elektrolit akışı yoluyla diğer hücrelere bağlanır ve elektrotlar arasında yüksek voltajlar üretilir (X. Zhang ve diğerleri, 2018). KOH çözeltisi, yakıt hücresinin etrafına pompalanır (Marino ve Kreuer, 2015). Hidrojen anotta beslenir, ancak suyun üretildiği anotta olduğu gibi sirküle edilmelidir (Oshiba, Hiura, Suzuki ve Yamaguchi, 2017). Hidrojen suyu buharlaştıracak, daha sonra hidrojenin sirküle edildiği soğutma ünitesinde yoğunlaşacaktır. Hidrojen, sıkıştırılmış bir gaz silindirinden gelir ve bir boşaltıcı vasıtasıyla dolaşımı sağlanır. Bu işlem başka sistemlerde bir pompa ile yapılabilir.

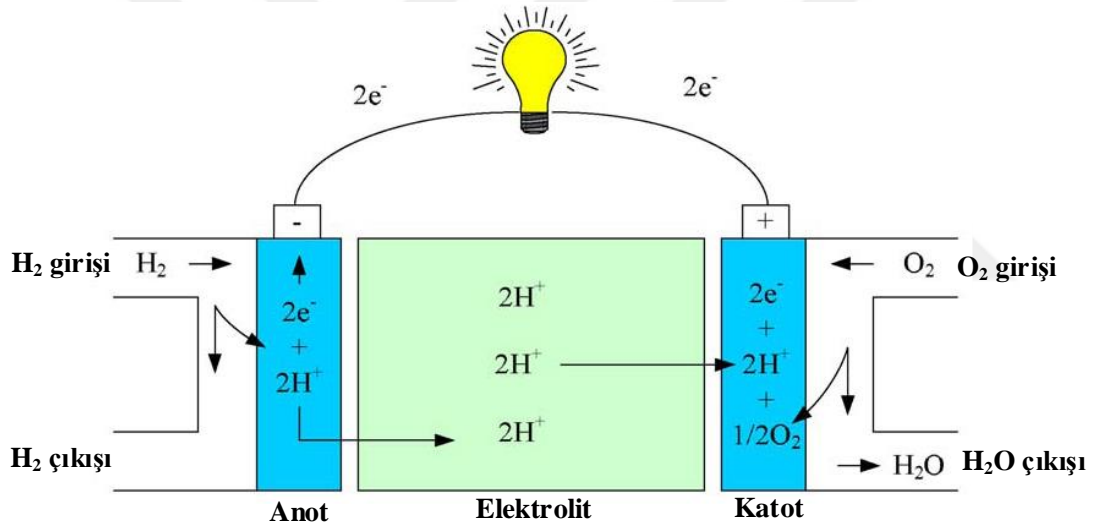
Uzay uygulamalarında AFC kullanımı yaygın olarak bilinir (Geeter, Mangan, Spaepen, Stinissen ve Vennekens, 1999; Lucia, 2014). Ancak, karasal uygulamalarda bazı zorluklarla

karşılaşmıştır. Alkalın yakıt hücreleri, kolayca çözülemeyen maliyet, güvenilirlik, kullanım kolaylığı, dayanıklılık ve güvenlik gibi birçok problemle karşılaşmıştır (Kordesch ve diğerleri, 2000). Bu sorunları çözmeye girişimleri, diğer enerji kaynakları göz önünde bulundurulduğunda ekonomik olmamıştır. Mobil ve sabit karasal uygulamalar için AFC'lere olan yakın ilginin çoğu, düşük maliyetli hücre bileşenlerinin geliştirilmesini ele almıştır (Acres, 2001). Bu bağlamda, karbon temelli gözenekli elektrotlar öne çıkmaktadır (Fang, Lyu, Wang, Wu ve Zhao, 2015). Ayrıca karbondioksit ve karbonmonoksit aşırı derecede toleranssız oluşunun hem oksidan hem de yakıtı sınırlaması (X. Liu ve diğerleri, 2018), oksitleyicisinin saf oksijen veya karbondioksit içermeyen hava olması gerekliliği, yakıtının saf hidrojen olması, sıvı elektrolit kullanılmasının sorunlara yol açması ve kısa ömürlü olmaları gibi dezavantajlara sahip olmaları AFC'lerin özellikle araç uygulamalarında kullanılmasını kısıtlamaktadır (Sharaf ve Orhan, 2014).

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC), yüksek güç yoğunluklarını verimli bir şekilde üreterek mobil ve taşınabilir uygulamalar için teknolojiyi potansiyel olarak çekici hale getirmektedir. Özellikle PEMFC'in otomobiller için birincil enerji kaynağı olarak kullanılması, alternatif enerji kaynaklarının kullanımına yeni bir örnek teşkil ederek birçok kişinin hayal dünyasını gerçeğe dönüştürmektedir. PEMFC teknolojisi, hücre yakıtı/elektrolit olarak katı faz polimer membranın kullanılmasıyla kendisini diğer yakıt hücresi teknolojilerinden ayırır. Hücre ayırıcısı bir polimer film olduğundan ve hücre nispeten düşük sıcaklıklarda çalıştığı için (yaklaşık 60–80 °C), sızdırmazlık, montaj ve kullanım gibi konular diğer yakıt hücrelerinden daha az karmaşıktır. PEMFC'lerin düşük sıcaklıklarda çalışmaları, daha yüksek sıcaklıktaki yakıt hücrelerinden daha hızlı başlatma sağlar.

Düşük sıcaklıklarda çalışabilme, yüksek güç yoğunluğu, basit yapı, daha fazla duyarlılık karakteristiği, hızlı kalkış süresi, küçük boyutlarda olma ve fazla bakım gerektirmeme gibi özelliklere sahip olan PEMFC'ler, hidrojen kullanılan taşıt uygulamaları için en uygun yakıt hücresi tipidir (Mekhilef ve diğerleri, 2012; Kumar ve Jain, 2014; Salvi ve Subramanian, 2015). Ayrıca doğal gaz veya benzin gibi geleneksel yakıtların kullanımına izin verecek şekilde yakıt işlemcilerinin geliştirilmiş olması ve karbondioksit toleranslı olmaları sayesinde de atmosferik havayı kullanabilmeleri PEMFC'lerin önde gelen aday bir teknoloji olmasını sağlamaktadır.

Tüm bu avantajlarına rağmen PEMFC'lerin yakıt hücresi uygulamalarında kullanılması esnasında karşılaşılabileceği olumsuzluklar da mevcuttur. Örneğin hidrojen saflıklarına karşı çok hassas olmalarından dolayı diğer konvansiyonel yakıtları kullanabilmek için bir dizi reform geliştirmelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Karbonmonoksit ve sülfür partiküllerine karşı çok fazla toleransları yoktur. Reaktif gaz birimlerine ihtiyaç duyarlar. Gazların nemlendirilmesi için su kullanılıyorsa, yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı suyun kaynama sıcaklığından daha az olmalı ve kojenerasyon potansiyelini sınırlandırmalıdır. Ayrıca çok pahalı bir katalizör (platin) ve bir membran (katı polimer) kullanırlar. Fakat bu dezavantajlar diğer yakıt hücreleri ile kıyaslandığında çok azdır ve gelişen teknolojiyle birlikte üstesinden gelenebilecek seviyededir. Bununla birlikte bir Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi çalışma prensibi Şekil 1.4'te gösterilmiştir.

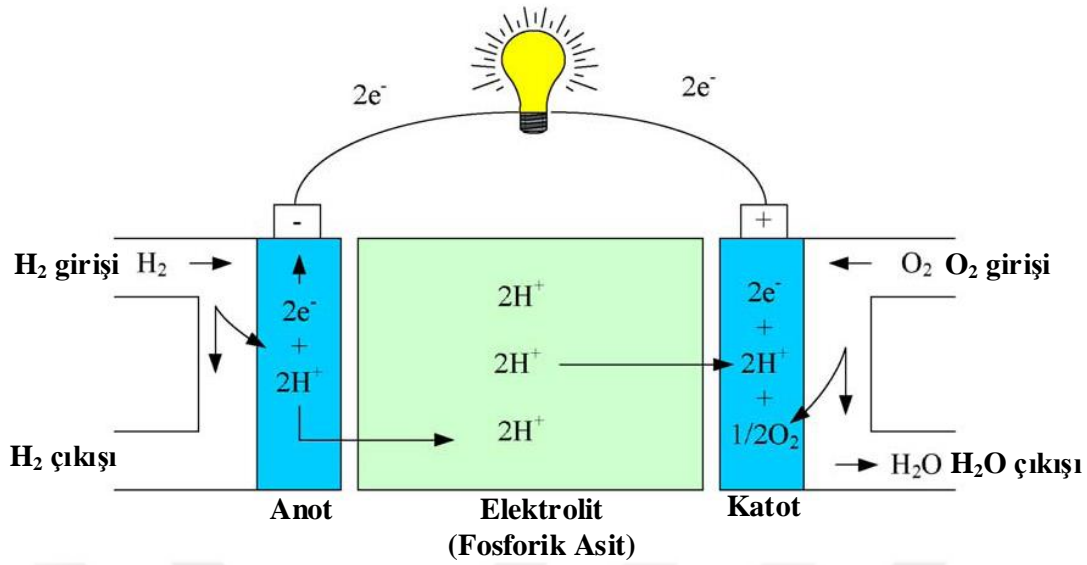


Şekil 1.4. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC) çalışma prensibi

PEMFC'nin yapısı temel olarak anot ve katot terminalleri arasında yerleştirilmiş bir elektrolit içerir (Kirubakaran ve diğerleri, 2009; Mekhilef ve diğerleri, 2012). Tipik bir yakıt hücresinde; anot (negatif terminal) sürekli olarak gaz yakıtlarla beslenirken, katot (pozitif terminal) oksijen içeren hava ile beslenir (Dincer, 2002; EG&G Technical Services, 2004; Pei, Chang ve Tang, 2008). Reaksiyon sırasında hidrojen molekülleri, platinyum gibi bir katalizör varlığında proton ve elektrona ayrılır (Larminie ve Dicks, 2001). Yakıt hücresindeki protonlar elektrolitten karşı tarafa geçer, elektronlar yük boyunca devreden geçerler ve katoda ulaşırlar (Kendall ve Pollet, 2012). Böylece elektrotlar arasında elektrokimyasal reaksiyon ile elektrik akımı oluşur.

Günümüzde, PEMFC'ler yüksek bir mükemmellik derecesine ulaşmıştır. Güvenilir bir şekilde çalışırlar, oldukça iyi elektriksel özellikler gösterirler ve kullanımları kolaydır. Bu tipteki yakıt hücrelerinin daha geniş bir uygulama alanı hafif elektrikli araçlarda ve taşınabilir elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. Bu yönde başarı elde edebilmek için, doğabilecek problemlerin üstesinden gelmek gerekmektedir (Antunes, Mikalsen ve Roskilly, 2009). Enerji santralleri için daha uzun ömür, katalizör ve membranların daha iyi stabilitesi gereklidir. PEMFC için daha düşük üretim maliyeti, platin yerine kullanılacak katalizörlerin geliştirilmesi ve daha ucuz membranlara ihtiyaç vardır. Hidrojendeki karbonmonoksit safsızlığı için PEMFC'in daha yüksek toleranslı olması ve özellikle daha yüksek sıcaklıklarda çalışan bu yakıt hücrelerinin teknolojik olarak yeni sürümlerinin oluşturulması, gelişmekte olan PEMFC teknolojisine katkıda bulunacaktır. Ayrıca PEMFC teknolojisinin kamyonlar, tırlar, elektrikli gemiler, şehirlerarası yük trenleri, dronlar, pervaneli uçaklar, lüks otomobiller ve uzay araçları için son zamanlarda geldiği seviye oldukça umut vericidir.

Fosforik Asit Yakıt Hücreleri (PAFC'ler), Proton Değişim Membranlı yakıt hücrelerine çok benzemektedirler. Proton iletken bir elektrolit kullanırlar (Wu, Zhang, Zhao, Wang ve Yuan, 2018). Kimyasal reaksiyonlarda karbon siyahı içinde yüksek oranda dağınmış elektro katalizör parçacıkları kullanılır. Elektrot malzemesi genellikle platindir. Elektrolit olarak yoğunlaştırılmış fosforik asitin bir inorganik asidi kullanılır ve PAFC ismini buradan alır. PAFC'ler hastanelerde, otellerde, ofis binalarında, okullarda, su arıtma tesislerinde ticari olarak yaygın kullanılmaktadır (H. Zhang, Lin ve Chen, 2012; Dodds ve diğerleri, 2015). Bu tip yakıt hücrelerinin verimliliği, elektrik üretiminde % 40'a ve kojenerasyonda % 85'e ulaşmaktadır. 150-200 °C ve 1 atm basınçta çalışırlar (Ansari, Tucker ve Angell, 2013; X. Li ve diğerleri, 2016). Her bir hücre yaklaşık 1,1 V gerilim üretebilir (Pachauri ve Chauhan, 2016). Karbondioksiti %30'a kadar tolere edebilirler, bu nedenle havayı doğrudan atmosferden kullanabilirler. Orta sıcaklıkta çalışırken, kojenerasyon için atık ısıyı kullanabilirler. 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar için bile sabit karakteristiklere sahip bir elektrolit kullanırlar (Sammes, Bove ve Stahl, 2004). Tüm bu avantajlarıyla birlikte bir Fosforik Asit Yakıt Hücresi çalışma prensibi Şekil 1.5'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC) çalışma prensibi

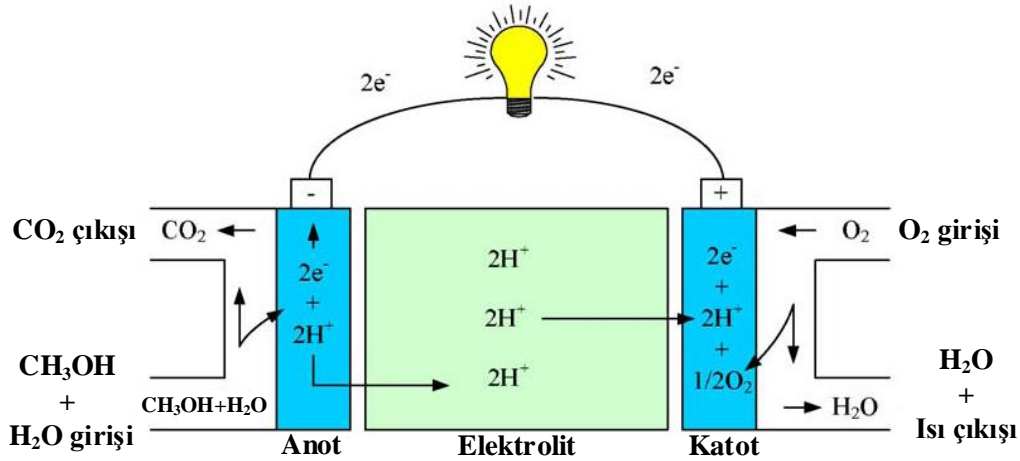
PAFC'lerde hidrojen iyonlarını (H^+) anottan katoda ileten bir elektrolit kullanır (Sammes ve diğerleri, 2004). Elektrolit olarak fosforik asit kullanılır, çünkü fosforik asit gerekli termal, kimyasal ve elektrokimyasal stabilite ve ehemmiyetli olarak kullanılmaya yetecek kadar düşük uçuculuk sergileyen bir inorganik asittir (Santos ve diğerleri, 2017). Fosforik asit, alkalın yakıt hücrelerinde olduğu gibi karbonat iyonları oluşturmak için karbondioksit ile reaksiyona girmez. Bu nedenle karbonat oluşumu fosforik asit yakıt hücrelerinde bir problem oluşturmaz. Fosforik asit, diğer yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolit malzemelere kıyasla yüksek olan $42\text{ }^\circ\text{C}$ 'lik bir donma noktasına sahiptir (Rayment ve Sherwin, 2003). Elektrolit donar ve genişledikçe, kapatma sisteminde iç gerilmelere neden olur; bu nedenle bu gerilimlerle ilişkili potansiyel problemlerden kaçınmak için yakıt hücresi elektroliti $42\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde bir sıcaklıkta tutulur. Asit elektrolitin küçük miktarlarda çalışması sırasında kaybolur, bu nedenle ya fazla asitler başlangıçta yakıt hücresine konulmalı ya da asit tekrar doldurulmalıdır (Melchior, Majer ve Kreuer, 2017).

Fosforik asit yakıt hücresinin yapısında bir istif kullanılır. Yığın, nervürlü bipolar levha, anot, elektrolit matrisi ve katodu içeren birçok hücreden oluşur (Zervas, Tatsis, Sarimveis ve Markatos, 2008). Bipolar plâka hücrelerin seri olarak bağlanmasını sağlayarak gazın anot ve katoda ulaşmasına izin verir. Fosforik asit yakıt hücrelerinde çok bileşenli bipolar plakaların kullanımı yaygındır (Hirata, Aoki ve Nakajima, 2012). Bu iki kutuplu levhalar, daha önceki yöntemlere göre daha kolay ve daha ucuz olarak üretilmelerine izin veren katmanlardan imâl edilir. Bipolar plakalar, her iki tarafta işlenmiş gaz kanalları ile grafitten

yapılmıştır. Çok bileşenli plakalarda, komşu hücrelerde reaktif gazları ayırmak ve gaz dağıtımını için gözenekli nervürlü plakaları ayırmak için ince bir karbon levha kullanılır. Bu, nervürlü bir alt tabaka yapısı oluşturur. Katalizör tabakası ve substrat arasındaki düz yüzeyler, elektroda daha iyi ve homojen bir gaz difüzyonu sağlar. Her bir alt tabakadaki kaburgalar sadece tek yönde çalıştığı için sürekli üretim sürecine uygundur. Fosforik asit nervürlü alt tabakada depolanabilir ve böylece yığının ömrünü uzatabilir (Chen, Wang, Cai ve Zhou, 2015).

PAFC'lerin karbonmonoksit toleransı maksimum % 2 civarındadır. Asit elektrolitini seyreltebilecek su girişine izin verirler. Çalışmaya başlamadan önce belirli bir sıcaklığa ulaşmaları gerekir. Yakıtı otomatik olarak reform edemezler. Bu yakıt hücresi tipleri oldukça büyük ve ağırdır. Çok sayıda ara elektrik santrali ve birkaç megawatt büyüklüğünde elektrik santralinin kurulmasıyla PAFC'lere olan eğilim azalmıştır. Bu tür işletmelerin yüksek maliyeti, teknik sorunlar ve uzun vadede işletme güvenilirliği yetersizliği PAFC'leri geri planda bırakmıştır. Özellikle PEMFC teknolojisinde teknik ilerlemelerin kaydedilmesi, birçok kuruluşun faaliyetlerini PAFC'lerde rafa kaldırmasına sebep olmuştur. Ancak uzun vadede hangi teknolojinin ticari başarıya ulaşacağı da tamamen teknolojik ilerlemelere bağlı olacaktır.

Doğrudan Metanol Yakıt Hücreleri (DMFC'ler), birçok uygulamalarda geleneksel bataryaların yerini almaktadır. Özellikle lityum iyon bataryalara göre yüksek bir kullanım ömrüne sahip olmaları ve yakıt kartuşlarının değişmesiyle yeniden şarj edilebilmeleri sayesinde piyasada önemli bir yer kazanması beklenmektedir (Kamarudin, Achmad ve Daud, 2009). Bu tür yakıt hücreleri Samsung (Kore), Toshiba, Hitachi, NEC ve Sanyo (Japonya) gibi büyük teknoloji şirketleri tarafından geliştirilmektedir. Bu yakıt hücrelerinde, PEMFC'deki gibi bir polimer elektrolit membranı kullanılır (Aricò, Srinivasan ve Antonucci, 2001). Bununla birlikte, DMFC anot katalizöründe sıvı metanolden hidrojeni özütleyerek bir yakıt dönüştürücüsüne olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Yaklaşık % 40 oranında verimlilik gösterir ve 130 °C civarında çalışır. DMFC uygulamaları, cep telefonlarına ve dizüstü bilgisayarlara güç sağlamak için küçük ve orta boyda kullanılmaktadır (Mehmood, Scibioh, Prabhuram, An ve Ha, 2015). Bununla birlikte bir Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi çalışma prensibi Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (DMFC) çalışma prensibi

Yakıt hücrelerinde saf hidrojenin kullanılması, hidrojeni faydalı elektrik enerjisine dönüştürmenin tek yolu değildir. Çeşitli reaksiyonlar dolaylı olarak hidrojen üretebilir ve böylece klasik hidrojen yakıt hücresi kimyasal reaksiyonunun gerçekleşmesini sağlar. Hidrojenin depolanması, dağıtımı ve üretimi henüz tamamlanmayan görevler olduğu için, bazı sanayi ve devlet üyeleri alternatif hidrojen kaynakları çağrısında bulunmaktadır. Her ne kadar birçok seçenek mümkün olsa da, hidrojen hemen hemen her hidrokarbondan (fossil yakıt veya yenilenebilir yakıt) alınabileceğinden, birçok kişi metanolün doğrudan kullanımı için yüksek umutlar barındırmaktadır. DMFC'lerde kullanılan metanol $65\text{ }^\circ\text{C}$ 'de ve 1 atm'de kaynayan sıvı bir yakıt olduğundan, benzin gibi bir kaptaki kolayca depolanabilir ve doğal gaz, kömür ve biyokütle gibi çeşitli karbon temelli hammaddelerden üretilebilir (X. Ren, Zelenay, Thomas, Davey ve Gottesfeld, 2000). DMFC'lerin yakıt hücresi boyutu daha küçüktür ve mevcut altyapı hizmetlerinden yararlanabilirler. Herhangi bir reform sürecine ihtiyaç duymazlar. Yakıt hücresi sistemi ayrıca saf hidrojen yakıt hücrelerine göre başka tasarım avantajlarına da sahiptir. Yakıt buharlaştırıcılarına ve onunla ilişkili tüm ısı kaynaklarına ihtiyaç bırakmazlar. Bu, esas olarak, metanolün düşük bir sıcaklıkta kaynatıldığı gerçeğinin bir sonucudur. Ayrıca, karmaşık çalışma ortamının ve termal yönetim sistemlerinin ortadan kaldırılması, yine düşük işletme sıcaklığının ve yerleşik bir soğutucunun da bir sonucudur (Ramesh ve Krishnamurthy, 2018). Yakıt, bir metanol ve su birleşimi olduğundan (yaklaşık %5 su) hücre içindeki yakıt deposunun tasarımı da hücre soğutucuya izin verir. Bununla birlikte genel sistemin küçük boyutlu olması ve ağırlığının daha az olması bir avantajdır (Heinzel ve Barragán, 1999). Tüm bu özellikler, onu bir yakıt hücresi sisteminde kullanmak için çok çekici bir seçenek haline getirmektedir.

DMFC ile ilgili en büyük sorun, yakıt anot reaksiyonlarının hidrojen ile olduğundan çok daha yavaş ilerlemesidir. Hidrojenin oksidasyonu kolayca oluşurken metanolün oksidasyonu çok daha karmaşık bir reaksiyondur ve çok daha yavaş ilerler (Casalegno, Grassini ve Marchesi, 2007). Bu, belirli bir boyut için çok daha düşük bir güce sahip bir yakıt hücresi demektir. İkinci önemli sorun, yakıt geçişi ile ilgilidir. Kullanılan elektrolit genellikle bir proton değişim membranıdır. Bu da su ile iyice karışan ve hızla katoda ulaşan metanolü kolayca emer (Munjewar, Thombre ve Mallick, 2017). Bu kendini azaltılmış bir açık devre voltajı olarak gösterir, ancak tüm geçişlerde yakıt hücresinin performansını etkiler. Her iki problemin de sonucu, DMFC'nin performansının, hidrojenle çalışan bir PEMFC gibi diğer yakıt hücresi türlerinden belirgin şekilde daha düşük olmasıdır (H. Liu ve diğerleri, 2006). DMFC'ler ayrıca anotta metanolün elektro-oksidasyonu için büyük miktarda katalizöre (soy metal) ihtiyaç duyarlar.

DMFC ile ilgili sorunlar çözümlerse, motorlu taşıtlar gibi yüksek güç uygulamaları dâhil olmak üzere tüm mobil yakıt hücresi uygulamalarında kullanılabilirler. DMFC'nin ilk uygulamaları, neredeyse sadece birkaç watt'lık bir gücün yeterli olduğu durumlarda olmaktadır ancak yüksek bir enerji yoğunluğu gereklidir (J. Lee, S. Lee, Han, Gwak ve Ju, 2017). DMFC'nin çeşitli uygulamalarına örnekler; cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar (notebook-laptop computers), iletişim donanımları, trafik sistemleri, uzaktan izleme ve algılama donanımları, navigasyon sistemleri ile birleşen yüksek özellikli kişisel dijital asistanlar (PDA) ve dijital film kameralarıdır (Mallick, Thombre ve Shrivastava, 2016; Krathumkhet ve diğerleri, 2018). DMFC, bu tür elektronik cihazlarda neredeyse evrensel olarak kullanılan bir batarya türü olan şarj edilebilir lityum-iyon bataryalara daha iyi bir alternatif sunabilmelidir. Eğer DMFC'ler bu konuda önemli bir gelişme sağlayabilirse, o zaman büyük bir pazardaki ciddi etki garanti edilebilir. Ancak, henüz güvenilirlik, enerji yoğunluğu ve maliyet açısından rekabetçi olmadıklarından PEMFC'lerin aksine DMFC'ler hala ticari üretimde veya kullanımda çok pratik değildir. Şimdiye kadar, elektrikli araçlar için güç kaynakları olarak DMFC'nin potansiyel uygulama alanı çok uzak görülmektedir. Ancak gelecekte bu uygulamaları geliştirebilmek için DMFC ömrünü uzatabilmek ve verimliliğini artırabilmek için çok ciddi çalışmalar gerekmektedir. Başlıca yakıt hücresi teknolojilerinin karşılaştırılması Çizelge 1.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1.1. Yakıt hücresi teknolojilerinin karşılaştırılması

Karşılaştırma	MCFC	SOFC	AFC	PEMFC	PAFC	DMFC
Elektrolit	Erimiş Lityum-karbonat çözeltilisi	Katı oksit seramik elektrolit	Potasyum hidroksit	Polimer membran	Fosforik asit	Polimer membran
İşletim sıcaklığı (°C)	600-700	800-1000	60-100	60-80	160-220	110-130
Elektriksel verim(%)	45-60	45-60	60-70	40-60	40-45	35-60
Sistem çıkışı (kW)	1-1000	<1-3000	10-100	1-250	50-1000	<1-10
Uygulamalar	Büyük dağıtılmış üretim sistemleri	Sabit güç üretim sistemleri yardımcı güç sistemleri	Uzay ve askeri sistemler, dağıtılmış üretim sistemleri	Elektrikli araçlar, taşınabilir güç uyg.	Dağıtılmış üretim sistemleri, otomotiv tahrik sistemleri	Taşınabilir güç uyg., hafif çekişli araçlar

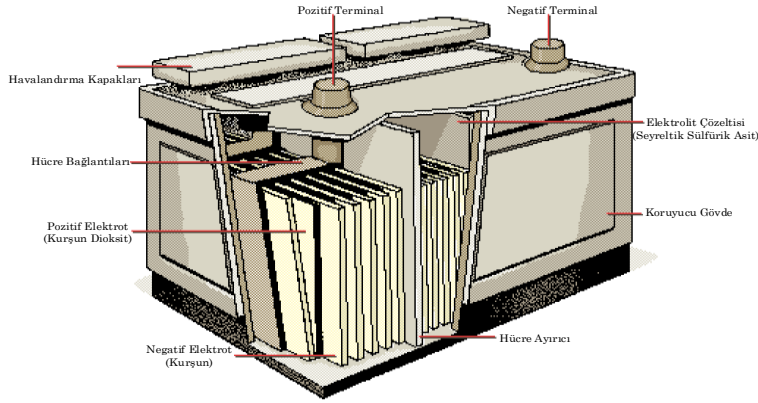
Yakıt hücreleri birçok sisteme avantajlarıyla beraber katkı sağlar. Özellikle ulaşım (otomobil, otobüs, kamyon, denizaltı, gemi, uzay aracı vb.), sabit güç (uzak yerlere güç aktarımı, yedek güç, şehirlerdeki elektrik santralleri, binalarda dağıtılmış üretim ve kojenerasyon) ve taşınabilir güç (cep telefonları, radyolar, dizüstü bilgisayarlar vb.) uygulamalarında daha fazla kullanım alanları oluşmuştur. Bu uygulamalarda yakıt hücrelerinin verimliliği herhangi bir yanma işlemi gerçekleştirmediklerinden dolayı oldukça yüksektir. Ayrıca çevreyi kirletici maddeler üretmezler ve yan ürün olarak sadece su açığa çıkarırlar. Yapıları oldukça basit, güvenilir ve gürültüsüzdür. Oldukça uzun ömürlü olmalarının yanında güç taleplerini karşılamak için modüler formda istiflenebilirler. Bu avantajları sayesinde araç uygulamalarında yakıt hücrelerinin performans, maliyet, güvenilirlik ve dayanıklılık gibi özellikleri dikkate alınarak doğru modelleri belirlemek gereklidir. Araçlarda özellikle batarya ve süperkapasitör teknolojileriyle birlikte kullanılmasını sağlayacak sistem parametreleri çok iyi belirlenmeli ve araçtaki enerji yönetim sistemine uygun prototipler seçilmelidir. Tüm bu sistemler için uygun bir kontrol stratejisi belirlenerek yakıt hücresi güç bileşenleri analiz edilmelidir.

Batarya Teknolojisi

Bataryalar, kimyasal enerjiyi depolayıp çeşitli uygulamalara güç sağlamak için doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bağımsız bir ya da daha fazla hücre topluluğudur. Bir bataryanın anodu ve katodu bir devreye bağlandığında, anot ve elektrolit arasında bir kimyasal reaksiyon gerçekleşir. Bu reaksiyon, elektronların devrenin içinden geçmesine ve

başka bir kimyasal reaksiyonun meydana geldiği katoda geri dönmesine neden olur. Katot veya anottaki materyal tüketildiğinde veya artık reaksiyonda kullanılmadığında, batarya elektrik üretemez. Bu noktada bataryanın ömrü tükenmiş olur. Bataryaların bir kez kullanılıp boşaltılan ve atılan, kullanıldıktan sonra tekrar şarj edilebilen ve belirli bir amacı yerine getirmek için özel tasarlanan farklı çeşitleri ve uygulamaları vardır. Kullanımdan sonra atılması gereken bataryalar birincil bataryalar olarak bilinir. Yeniden şarj edilebilen bataryalar ise ikincil bataryalar olarak adlandırılır. Bataryaların kapasitesi amper-saat (Ah) ve enerjileri ise watt-saat (Wh) cinsinden ölçülür. Kullanılabilir şarj durumu yüzde olarak ifade edilir. Batarya ömrünün uzaması için bataryalar belirli bir şarj durumunda (SOC) tutulmalıdır. Batarya kapasitesi maksimum deşarj akımı ile orantılıdır. Kimyasal reaksiyon ve bataryanın sıcaklığı da maksimum deşarj akımını belirler (Wilberforce ve diğerleri, 2017). Bataryaların yüksek enerji yoğunluğu, kompakt boyut ve güvenilirlik gibi özelliklerinden dolayı ulaşım araçlarında kullanımları yaygın olarak benimsenmiştir.

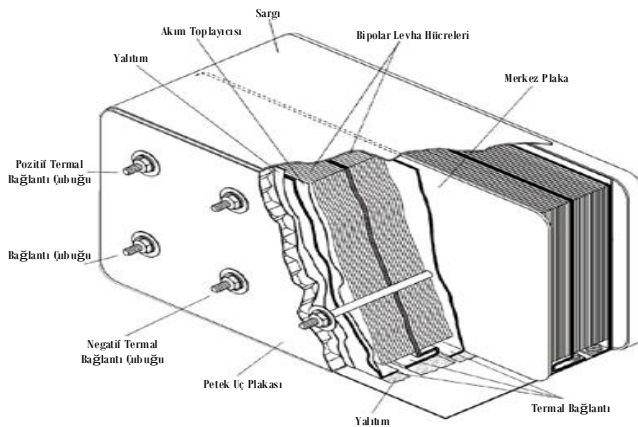
Yapısında kullanılan kimyasal maddelere göre çeşitli batarya türleri vardır. Kurşun-asit bataryalar, kurşun oksitinin pozitif aktif madde olması ve seyreltilmiş sülfürik asit elektrolite sahip olmasından dolayı süngersi kurşun bataryanın negatif aktif maddesi olarak çalışırlar. Bataryanın boşalması için, hem pozitif hem de negatif malzemeler kurşun sülfat haline dönüştürülür (Caumont, Moigne, Rombaut, Muneret ve Lenain, 2000). Kurşun-asit batarya, hibrit elektrikli araç ve hidrojen yakıt hücresel araç uygulamaları için çeşitli avantajlar sunar. Günümüzde üretimi devam etmekte ve diğer batarya türlerine nispeten düşük maliyetli bir güç kaynağı olarak üretilmektedir. Ayrıca kurşun-asit batarya teknolojisi, son 50 yıldaki yaygın kullanımı nedeniyle gelişmiş bir teknolojidir (Olson ve Sexton, 2000). Ancak kurşun-asit batarya, nominal kapasitesinin %20'sinden fazla deşarj için uygun değildir. Şarj durumunu (SOC) fazla aşarak çalıştırıldığında, bataryanın ömrü sınırlı olacaktır. Bir kurşun-asit batarya diyagramı Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Kurşun-asit batarya diyagramı

Kurşun-asit bataryaların enerji ve güç yoğunluğu, kurşun toplayıcıların ağırlığına bağlı olarak düşüktür (D. B. Edwards ve Kinney, 2001; Cooper ve Moseley, 2006). Çeşitli araştırmalar sonucu enerji yoğunluğunun daha hafif korozif olmayan kollektörler kullanılarak geliştirilebileceği ortaya çıkmıştır (Saakes, Woortmeijer ve Schmal, 2005).

Nikel-metal hidrür (NiMH) bataryalar elektrolit olarak alkali bir solüsyon kullanırlar. NiMH bataryanın pozitif elektrodu nikel hidroksitten oluşur ve negatif elektrodu ise nikel, kobalt, titanyum, mangan, alüminyum, zirkonyum, krom, demir ve diğer metallerin tasarlanmış bir alaşımından oluşur. Bir Nikel-metal hidrür batarya diyagramı Şekil 1.8’de gösterilmiştir.

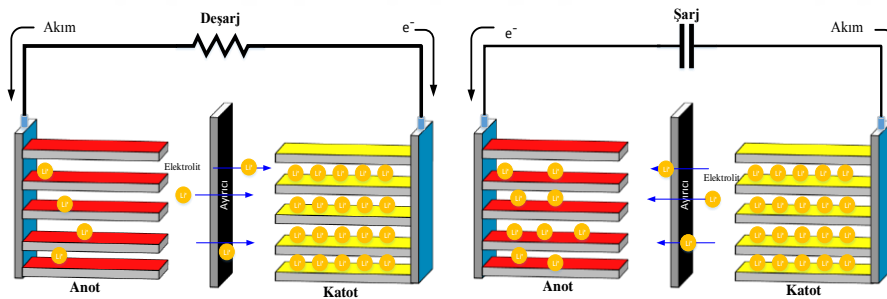


Şekil 1.8. Nikel-metal hidrür (NiMH) batarya diyagramı

NiMH bataryanın enerji yoğunluğu kurşun-asit bataryanın yaklaşık iki katıdır. Nikel-metal hidrür bataryanın bileşenleri çevreye zararsızdır ve geri dönüştürülebilir (Fetcenko ve diğerleri, 2007). NiMH bataryalar yüksek voltajda güvenli olarak çalışabilirler. Aynı zamanda volumetrik enerji ve güç depolama, uzun çevrim ömrü, geniş çalışma sıcaklık

aralıkları ve aşırı şarj-deşarj direnci gibi farklı avantajlara sahiptirler (H. Li, Liao ve Wang, 2009). Öte yandan, yüksek yük akımlarında tekrar tekrardeşarj edilirse, NiMH'nin ömrü yaklaşık 200-300 döngüye düşer. En iyi çalışma performansı, nominal kapasitenin %20 ile %50'sini boşaltırken elde edilir (Wehrey, 2004).

Lityum-iyon bataryalar, Sony tarafından 1990 yılında ticarileştirilmesinden bu yana büyük bir pazar payı elde etmiştir (F. Zheng, Kotobuki, Song, Lai ve Lu, 2018). Ayrıca lityum-iyon bataryaların taşınabilir elektronik ve tıbbi cihazlarda mükemmel performans gösterdiği kanıtlanmıştır (Venkatesetty ve Jeong, 2002). Diğer enerji depolama cihazları ile karşılaştırıldığında şarj edilebilir lityum-iyon bataryaların yüksek gravimetrik ve volumetrik enerjileri, yüksek güç yoğunlukları, uzun çevrim ömürleri ve kendi kendinedeşarj özelliklerinin düşük olması gibi önemli avantajları vardır (Scrosati ve Garche, 2010; Kim ve diğerleri, 2012). Dahası, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar ve dijital elektronik cihazlar gibi birçok taşınabilir uygulamalar için en verimli enerji depolama stratejisi olduklarını kanıtlamışlardır (Goriparti ve diğerleri, 2014). Lityum-iyon batarya diyagramı Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Lityum-iyon batarya diyagramı

Pozitif elektrot oksitlenmiş kobalt malzemeden yapılır ve negatif elektrot bir karbon malzemeden yapılır. Elektrolit olarak bir organik çözücü içindeki lityum tuzu kullanılır. Lityum-iyon bataryaların ümit verici özellikleri arasında 300 W/kg'lık yüksek özgül güç, 100 Wh/kg'lık yüksek özgül enerji ve 1000 çevrim uzun batarya ömrü bulunmaktadır (Chalk ve Miller, 2006). Bununla birlikte, hibrit elektrikli araçlarda ve hidrojen yakıt hücreli araçlarda lityum-iyon bataryaların kullanılması, mevcut lityum batarya teknolojisinden iki ila beş kat daha fazla enerji yoğunluğuna ihtiyaç duyulmasını beraberinde getirmiştir (Thackeray, Wolverton ve Isaacs, 2012). Lityum-iyon bataryaların enerji yoğunluğunun

artması, ya yüksek voltajlı katot aktif maddelerinin elektrotlar olarak kullanılmasıyla ya da yüksek kapasiteli anot ve katot elektrot materyallerinin geliştirilmesiyle sağlanabilir.

Nikel-çinko (Ni-Zn) bataryalar, yüksek enerji-güç yoğunluğuna, düşük maliyetli malzemelere, geniş çevrim özelliğine sahiptir ve çevre dostudur. Nikel-çinko bataryaların çalışma sıcaklığı -10 °C ile 50 °C arasında değişebilir, bu da ciddi çalışma koşullarında kullanılabileceği anlamına gelir. Bununla birlikte, taşıt uygulamalarında nikel-çinko bataryaların gelişmesini engelleyen uzantıların hızlı büyümesi nedeniyle yaşam döngüleri oldukça kısadır (Balch, Burke ve Frank, 2001).

Nikel-kadmiyum (Ni-Cd) bataryalar uzun ömürlüdür ve zarar görmeden tamamen boşaltılabilir. Bu bataryaların özgül enerjisi 55 Wh/kg civarındadır. Bu bataryalar geri dönüştürülebilir, ancak kadmiyum uygun şekilde imha edilmezse çevre kirliliğine neden olabilecek bir tür ağır metaldir. Nikel-kadmiyum bataryaların bir diğer dezavantajı maliyettir. Genellikle bu bataryaları araçlara monte etmek 20.000 dolardan daha pahalıya mal olmaktadır (Y. Gao ve Ehsani, 2002; Viera ve diğerleri, 2006).

Bataryalar enerji depolama cihazları olarak birçok uygulamada kullanılmaktadır. Hidrojen yakıt hücreli araçlarda lityum-iyon bataryaların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Diğer bataryalara göre daha iyi tepki vermeleri, daha fazla enerji depolayabilmeleri, ağırlık bakımından daha hafif olmaları ve daha fazla dayanıklılığa sahip olmaları lityum-iyon bataryaların hidrojen yakıt hücreli araçların enerji depolama sisteminde tercih edilmesini oldukça cazip hale getirmektedir. Bir hidrojen yakıt hücreli araçta yakıt hücresine ilaveten enerji depolama sistemi olarak batarya kullanılmasıyla bu bataryanın yüksek şarj verimi elde etmek için bataryanın şarj durumu kapasitesinin % 40 ile % 80 arasında tutulması gerekmektedir (Thounthong ve diğerleri, 2014). Bunun için tasarlanacak kontrol stratejisi, bataryanın bu çalışma aralığında performans göstermesini sağlamalıdır. Eğer batarya için tasarlanan kontrol mekanizmasında bir hata oluşursa bataryanın şarj durumu referans değerinden sapacaktır. Bu hatayı önlemek için yakıt hücresinin akım, gerilim ve güç değerlerini ayarlamak gerekir. Tüm bu değerlerin ayarlanması, sistem için istenen batarya şarj durumunun kontrol edilmesiyle sağlanır. Başlıca batarya teknolojilerinin karşılaştırılması Çizelge 1.2'de verilmiştir. Özellikle spesifik enerji yoğunluğu ve düşük toksikliği sayesinde lityum-iyon bataryaların araç uygulamalarında tercih edilebilirliği oldukça yüksektir.

Çizelge 1.2. Batarya teknolojilerinin karşılaştırılması

Özellikler	Lityum-iyon					
	Kurşun-Asit	Ni-Cd	NiMH	Kobalt	Manganez	Fosfat
Spesifik Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	150-190	100-135	90-120
İç Direnç (mΩ/V)	<8.3	17-33	33-50	21-42	6.6-20	7.6-15
Yaşam Döngüsü	200-300	1000	300-500	500-1000	500-1000	1000-2000
Hızlı Şarj (saat)	8-16	Tek tip	2-4	2-4	<1	<1
Hücre Voltajı (V/hücre)	2.0	1.2	1.2	3.6	3.8	3.3
Tepe Yük Akımı (A)	500	2000	500	>300	>3000	>3000
İdeal Tepe Yük Akımı (A)	20	100	50	<100	<1000	<1000
Şarj Sıcaklığı (°C)	-20 – 50	0 – 45	0 – 45	0 – 45	0 – 45	0 – 45
Deşarj Sıcaklığı (°C)	-20 – 50	-20 – 65	-20 – 65	-20 – 60	-20 – 60	-20 – 60
Bakım Gereksinimi	3-6 Ay	30-60 Gün	60-90 Gün	-	-	-
Toksiklik	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük

Süperkapasitör Teknolojisi

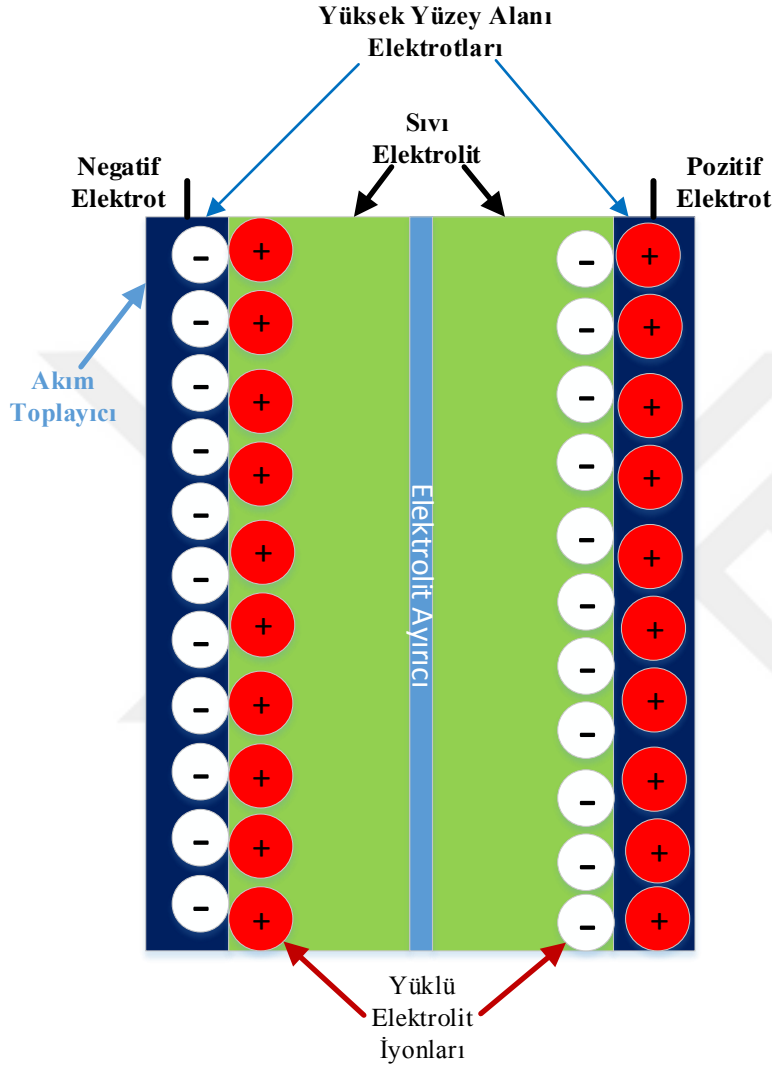
Yüksek yoğunluğa sahip bir enerji depolama sistemi olan süperkapasitörler geleneksel kondansatörlerin bir türevidir. Süperkapasitörler aynı zamanda ultrakapasitör veya elektrokimyasal kondansatör olarak da tanımlanabilirler (Burke, 2000). Süperkapasitör kapasite ölçü birimi Farad (F)'tır. Geleneksel kondansatörlerin kapasiteleri ise genellikle mili-Farad (mF), mikro-Farad (μ F) veya piko-Farad (pF) ile ifade edilir. Bununla birlikte süperkapasitör enerji yoğunluğunun artması güç yoğunluğunu da etkiler. Geleneksel bir kondansatör için güç yoğunluğu 10^{12} W/m³ ve enerji yoğunluğu 50 Wh/m³ iken, bir süperkapasitörün güç yoğunluğu 10^6 W/m³ ve enerji yoğunluğu ise yaklaşık 104 Wh/m³ civarındadır (Husain, 2011).

Süperkapasitörler bataryalardan daha yüksek bir güç yoğunluğuna sahiptir. Çünkü süperkapasitörler elektrik yüklerini özel olarak oluşturulmuş elektrotlarda saklarlar ve daha düşük iç dirence sahiptirler (Bauman ve Kazerani, 2008; Khaligh ve Li, 2010; G. Ren, Ma, ve Cong, 2015). Yüksek güç yoğunluklarına ek olarak süperkapasitörler, yüksek verimlilik, uzun ömür ve hızlı şarj özelliklerine sahiptir (Y. Zhang, Wu, Hu ve Liang, 2008). Ayrıca süperkapasitörlerin terminal voltajları doğrudan şarj durumu ile orantılıdır. Düşük iç direnç değerleri ve yüksek çıkış akımları çok küçük bir şarj durumu ile yüklendiklerinde patlamalara neden oldukları için süperkapasitörlerin dezavantajları arasındadır (Ribeiro, Johnson, Crow, Arsoy ve Liu, 2001; Lukic, Cao, Bansal, Rodriguez ve Emadi, 2008). Mevcut süperkapasitör teknolojileri şu şekilde özetlenebilir:

- Metal folyo teknolojisi üzerine metal oksit kaplamaların karışımı,
- Bağlayıcı madde teknolojisi olarak karbon parçacıklarının kullanılması,
- Karbon/metal teknolojisine sahip fiber kompozitler,
- Karbon kumaş teknolojisine katkı yapan polimer filmler,
- Köpüklü karbon teknolojisi.

Süperkapasitörler pozitif ve negatif yükleri fiziksel olarak ayırarak enerjiyi depolarlar. Yükler bir yalıtkanla bölünen iki paralel plaka üzerinde depolanır. Elektrotlar üzerinde hiçbir kimyasal varyasyon olmadığı için süperkapasitörler uzun bir çevrim ömrüne sahiptir fakat

enerji yoğunlukları düşüktür. Bir süperkapasitör hücresinin yapısı Şekil 1.10'da gösterilmektedir.



Şekil 1.10. Süperkapasitör hücresinin yapısı

Bir dielektrik malzeme, geleneksel bir kapasitörde iki iletken elektrodu ayırır, ancak bir süperkapasitörde elektrotlar bir elektrolit içine kapatılır ve aralarında bir elektrolit ayırıcı ile ayrılır. Süperkapasitörlerdeki elektrolitlerin kullanılma sebepleri elektrostatik yüklerin iyon biçiminde depolanmasını sağlamaktır. Süperkapasitörlerin elektrot yüzey alanları, geleneksel batarya ve kapasitör elektrotlarından daha yüksektir. Elektrotlar iyonları emer ve mevcut kapasitörlerden çok daha yüksek yük yoğunluğu sağlarlar. Yine iyonların süperkapasitörlerdeki hareketi elektronlardan daha yavaştır ve elektrolitik kapasitörlere göre daha yüksek şarj ve deşarj süresine sahip olurlar, dolayısıyla bu yöntemle kapasite artırılır.

Yüksek kapasiteye, yüksek verimliliğe ve yüksek çalışma sıcaklığına sahip oldukları için günümüzde süperkapasitörler bataryalara kıyasla tercih edilmektedir. Süperkapasitörlerin ilk uygulamaları savaş tankı motorlarının ve denizaltıların ateşlenmesine yönelik askeri projelerde kullanılmıştır. Nano malzeme teknolojisinin ve ticarileştirilmiş üretimin gelişmesiyle birlikte süperkapasitörlerin maliyetleri önemli ölçüde azalmış ve aynı zamanda kapasitansları da artmıştır. Bu, süperkapasitörlerin kullanılabilirliğini artırmıştır. Süperkapasitörler dizel motorlar, lokomotifler, kanat kontrolü için rüzgâr türbinleri, aktüatörler ve hafıza birimleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Hızlı şarj etme yetenekleri sayesinde rejeneratif fren enerjisi uygulamalarında da yer almaktadırlar.

Süperkapasitörler günümüzde hibrit elektrikli araçlarda ve hidrojen yakıt hücreli araçlarda yardımcı enerji depolama teknolojisi olarak kullanılmaktadırlar. Kentsel sürüşte birçok dur-kalk sürüş koşulları vardır ve gereken toplam güç nispeten düşüktür. Süperkapasitörler, rejeneratif frenlemeden elektrik elde etmek için çok uygundur ve hızlı şarj ve deşarj özellikleri sayesinde hızla ivme kazanmak için araca güç sağlarlar. Çizelge 1.3.'te batarya ve süperkapasitör paketlerinin bir karşılaştırması sunulmaktadır.

Çizelge 1.3. Batarya ve süperkapasitör paketlerinin karşılaştırılması (Khaligh ve Li, 2010)

Özellikler	ZEBRA Batarya Paketi	Thunderpack II UC Paketi
Kullanılabilir Enerji (kWh)	23.5	0.3
Maksimum Deşarj Akımı (A)	224	400
Spesifik Enerji (Wh/kg)	113	4
Spesifik Güç (W/kg)	174	1500
Yaşam Döngüsü (Yıl)	2.5 – 5	10 – 12
Sistem Maliyeti (\$/kW)	400	100
Yaşam Döngüsü Maliyeti (\$/kW)	1200	100

Bu tabloda ZEBRA bataryası seramik ve nikelden yapılmış bir tür yüksek enerjili bataryadır. Thunderpack UC paketi, Maxwell şirketinin BOOSTCAP ürünlerini kullanan bir süperkapasitör paketidir. Bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna sahipken, süperkapasitörler daha yüksek güç yoğunluklarına sahiptir. Uzun ömür ve düşük bakım özellikleri sayesinde maliyetten tasarruf sağlarlar. Hibrit ve hidrojen yakıt hücreli araç uygulamalarında, her iki bileşenin de faydalarını en üst düzeye çıkarmak için hem bataryalar hem de süperkapasitörler birleştirilebilir.

Hidrojen yakıt hücreli araçlarda kullanılan süperkapasitörler, batarya ve yakıt hücresine ek olarak yardımcı olan enerji depolama üniteleridir. Yüksek güce ihtiyaç duyulduğu durumlarda, aracın güç gereksinimi için devreye girerler. Bunu kontrol etmek için sistemde bir kontrol stratejisi gereklidir. Kontrol stratejisi, doğrusal olmayan bölgelerden kaçınmak için süperkapasitörün tamamen boşalmasını önlemek üzere tasarlanmalıdır. Hidrojen yakıt hücreli araçlarda bir enerji depolama aygıtı olarak bir süperkapasitörün kullanılmasının nedeni, spesifik güç oranının yüksek olması ve şarj süresinin çok kısa olmasıdır. Süperkapasitörler araçta sistem verimliliği ve enerji tasarrufu sağlarlar. Özellikle rejeneratif frenleme enerjisiyle birlikte sistem performansına katkıda bulunurlar. Süperkapasitör voltaj referansı, kullanıcı veya yardımcı güç ünitelerinden gelen hızlanma veya yavaşlama komutlarına göre değişir. Özellikle yük geçişlerinde, süperkapasitör bataryadan çok daha hızlı tepki verir. Bu nedenle, süperkapasitör kontrol stratejisi belirlendiğinde, iyi bir sistem performansı elde etmek için yakıt hücresi kontrol stratejisiyle kademeli bir kontrol döngüsüne sahip olmalıdır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Chan (2007) elektrikli araçların, hibrit elektrikli araçların ve yakıt hücreli araçların modelleme ve simülasyonlarını ileri düzeyde kontrol teorileriyle birlikte sunmuştur. Bu araçlarda kullanılan tipik güç elektronik devreleri, doğrultucuları, invertörleri ve DC/DC dönüştürücüleri ele almıştır. Ana anahtarlama devresi ve kontrol devresi tasarımlarını, anahtarlama cihazı seçimini, anahtarlama frekansı optimizasyonunu ve kayıp hesaplamalarını elektrik tasarımı olarak ele almıştır. Çıkışta istenen voltaj, akım ve frekansı elde etmek ve çift yönlü güç akışını gerçekleştirmek için kontrol algoritması tasarımını incelemiştir. Manyetik tasarım olarak filtreleme, anahtarlama ve kapı sürücü üniteleri için gerekli olan indüktörlerin, kapasitörlerin ve diğer manyetik bileşenlerin tasarımlarını sunmuştur. Ayrıca mekanik ve termal tasarım olarak güç cihazlarının ve manyetik bileşenlerin kaybını modelleme, soğutma sisteminin tasarımı, ısı emicisi ve muhafazası ve güç elektroniği ünitesi entegrasyonunu incelemiştir.

Burke (2007) hibrit araçların birincil enerji dönüştürücüleri olarak hem içten yanmalı motorların hem de hidrojen yakıt hücrelerinin kullanımını değerlendirmiş ve karşılaştırmıştır. Özellikle lityum-iyon bataryaların ve karbon/karbon süperkapasitörlerin araçlarda enerji depolama teknolojileri olarak kullanılmasına odaklanmıştır. Bu enerji depolama teknolojileri için tasarım gereksinimlerini tartışmış ve enerji depolama teknolojilerinin mevcut durumu ile karşılaştırmıştır. Hidrojen yakıt hücreli araçlarda enerji depolama teknolojisi olarak bataryalar, süperkapasitörler veya her iki teknolojinin birlikte kullanılmasıyla birlikte elde edilen simülasyon sonuçlarını ortaya koymuştur. Bu sonuçlara göre hidrojen yakıt hücreli araçların eşdeğer yakıt tasarrufunun aynı ağırlık ve yol yüküne sahip benzinle çalışan bir içten yanmalı motorlu araçtan 2-3 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca bir elektrik motora sahip hibrit elektrikli araç ile karşılaştırıldığında ise hidrojen yakıt hücreli aracın eşdeğer yakıt ekonomisinin 1.67-2.00 kat daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Xu ve diğerleri (2009), bir polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücresi/nikel-metal hidrit (Ni-MH) bataryalı şehir içi zaman tetiklemeli kontrolör alan ağı (TTCAN) sistemine dayanan optimal bir araç kontrol stratejisi sunmuştur. Bir şehir otobüsünün yakıt tasarrufunu sağlamayı hedefleyen kontrol stratejisini iki türlü belirlemiş ve uygulamıştır. Bunlardan birinci olarak eşdeğer tüketim minimizasyon stratejisini (ECMS) ve ikinci olarak ise

frenleme enerjisi rejenerasyon stratejisini (BERS) kullanmıştır. Araç test sonuçları, ECMS'nin hidrojen tüketimini % 2.5 ve BERS'in ise % 15.3 düşürdüğünü göstermiştir. Ayrıca BERS ile kinetik enerjinin bir kısmının geri dönüştürülebilir olduğunu açıklamıştır. Araç performansını artırmak için yakıt hücresi kontrol sistemini optimize ederek yakıt tüketimini azaltıp daha fazla kinetik enerjiyi rejeneratif frenleme ile geri dönüştürerek yakıt hücresi verimliliğini iyileştirmeye odaklanmıştır.

Thounthong ve diğerleri (2009) ana güç kaynağı olarak bir polimer elektrolit membran yakıt hücresi (PEMFC) ve depolama sistemi olarak da batarya ve süperkapasitör kullanan araçları incelemiş ve bu hibrit sistemdeki enerjinin DC bara geriliminin regülasyonu ile dengelenmesini konu almışlardır. Yüksek dinamik ve yüksek güç yoğunluğuna sahip bir depolama teknolojisi olan süperkapasitör modülü, bir DC bara voltajını düzenleyerek enerji sağlamak için işlev görür. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir depolama teknolojisi olan batarya modülü ise şarj tutarak bir süperkapasitör bankasına enerji sağlamak için çalışır. Bu sistemde en yavaş dinamik bir kaynak olan yakıt hücresi, şarj edilmesini sağlamak için bir batarya bankasına enerji sağlamaya çalışır. Bataryaların ve süperkapasitörlerin kombine kullanımı, yüksek enerji yoğunluğunun ve yüksek güç yoğunluğunun mükemmel hibridizasyon sistemidir. Çalışma esas olarak enerji yönetim stratejisinde bu kaynakların içsel enerjik özelliklerini dikkate alarak yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitöre odaklanmıştır. Bu nedenle kontrol prensibi, yakıt hücresi ve batarya güçlerinin hızlı geçişinden nasıl uzak duracağını ve yakıt hücresi ve batarya gerilmelerinin nasıl azaltılacağını göstermiştir.

Yu ve diğerleri (2011) yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitörden oluşan üç bileşenli hibrid bir yakıt hücreli elektrikli aracın optimal tasarımını sunmuştur. İlk olarak bu hibrid kombinasyonun faydalarını analiz etmişlerdir. Daha sonra toplam enerji maliyeti ile batarya ömrünü optimize ederek farklı araç yüklerinin talebini karşılamak için optimal kontrol teorisine dayanan her bir enerji kaynağının aktif bir güç akış kontrol stratejisini açıklamışlardır. Aynı zamanda bu çalışmada istenen değişken ayarları ile mevcut algılanan değerler arasındaki kare hatasını en aza indiren bir maliyet fonksiyonu geliştirilmiştir. Geliştirilen bir kazanç dizisi, en uygun yolu takip etmek için tüm cihazlardan çekilen gücün seçimini zorlamış ve bu da farklı hedefler arasında değişim yapmıştır. Ayrıca harcanan toplam enerji de en aza indirilmiştir. Bununla birlikte küresel optimizasyonu gerçek zamanlı bir kontrol sistemi haline getirmek için yeni bir yöntem tanıtılmıştır. Enerji depolama

sistemleri simüle edilirken oluşturulan kontrol stratejisi mevcut kontrol stratejileri ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları yakıt hücresinin ve bataryanın harcanan toplam enerjinin uzun sürüş döngüleri boyunca iyi bir şekilde kaydedildiğini göstermiştir. Dahası tüm güç sistemindeki doğrusal olmayan noktalar göz önünde bulundurulduğunda, güçlü kontrolörün yanı sıra batarya/süperkapasitör hibrid sistemi için bir başka anlık kontrol sistemi programlanmıştır. Bataryayı desteklemek ve batarya yükünü daha iyi bir şekilde çalıştırmak için daha küçük boyutlu bir süperkapasitör kullanılmıştır. Çalışmada MATLAB/Simulink kullanılarak farklı sürüş çevrimlerine göre tüm araç enerji akışını simüle edilmiş ve enerji verimliliği, yakıt hücreli elektrikli araç için mevcut diğer kontrol stratejileriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın simülasyon sonuçları önerilen optimal kontrolün, ortak termostatik kontrollerden daha iyi olduğunu göstermiştir. Yazarlar burada kullanılan yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör teknolojilerinin en uygun çalışma noktalarına yaklaştırmakla birlikte aynı zamanda birkaç farklı sürüş çevriminde de önemli ölçüde enerji tasarrufu sağladığını gözlemlemiştir.

Garcia ve diğerleri (2013) her bir enerji kaynağının kaynak gücünü kontrol etmek için bir DC/DC dönüştürücüsü kullanan yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör ile çalışan yüksek güçlü elektrikli araçlar için en uygun kontrol stratejisini seçmek amacıyla karşılaştırmalı bir çalışma sunmuştur. Çıkış voltajını, araç yüklerinin verildiği ortak DC bara gerilimine uyarlamışlardır. Bu tür hibrid araçlar için beş farklı kontrol tanımlanmıştır. Bunlar: bataryanın şarj durumuna (SOC) bağlı olarak hibrid aracın üç çalışma moduna dayalı bir temel kontrol (çalışma modu kontrolü); amacı bataryayı ve süperkapasitör şarj durumunu (kaskad kontrolü) kontrol etmek olan kaskata bağlı kontrol halkalarına dayanan bir kontrol stratejisi; eşdeğer tüketim minimizasyon stratejisi (ECMS) olarak adlandırılan eşdeğer yakıt tüketimi tekniğine dayalı bir kontrol; ve günümüzde çok kullanılan kontrol tekniklerinden bulanık mantık kontrolü ile bir öngörücü kontroldür. Bu kontrol stratejileri, gerçek bir kentsel demiryoluna uygulanarak test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları sunulan kontrol stratejilerinin optimal performansını yansıtmış ve bu tip yüksek güçlü elektrikli araçlarda kullanılmaya en uygun olanı seçmeye izin vermiştir. Bu çalışmada sunulan beş kontrol stratejisinin her biri farklı şekillerde yakıt hücresi ve batarya referans güçlerini belirlerken, süperkapasitör DC bara gerilimini kontrol etmek için kullanılmıştır. Çalışma modu kontrolü (OMC), elektrikli aracın çalışma modlarına dayanır. Kaskad kontrolü, referans güçlerini oluşturmak için kaskad kontrol döngülerini kullanır. Üçüncüsü eşdeğer tüketim minimizasyon stratejisi (ECMS) kavramına dayanmaktadır. Son olarak,

dördüncü ve beşinci kontrol stratejileri, bulanık mantık ve tahmine dayalı kontrolden referans güçler üretir. Bu kontrol stratejileri karakterize edilmiş, test edilmiş ve 400 kW'lık bir nominal çekiş gücü ile gerçek bir kentsel sokak demiryoluna (Urbos 3) uygulanmıştır. Demiryolu sistemi 150 kW PEM-FC, 90 Ah Li-ion batarya ve toplam 12.6 F kapasiteli bir süperkapasitör bankasından oluşmuştur. Genel olarak, tüm kontroller tarafından elde edilen nihai sonuçlar çok benzerdir, ancak ECMS en düşük hidrojen tüketimine ve güç aktarımının eşdeğer hidrojen kütle tüketimine ulaşmıştır. Her kontrolün karmaşıklığı, yüksek hesaplama süresini etkilemiştir. Aslında bulanık mantığın ve tahmine dayalı kontrollerin hesaplama zamanları diğer kontrollerden çok daha yüksektir. ECMS, OMC ve kaskad kontrolleri uygulanacak en basit kontroldür. Böylece başka bir elektrikli araca uygulanması gerektiğinde sadece birkaç değişiklik gereklidir. Bununla birlikte, bulanık mantık ve öngörücü kontroller daha karmaşıktır ve başka bir elektrikli araca uygulanabilmesi için önemli değişiklikler gerektirir. Sonuç olarak tüm karşılaştırılan kontroller arasında ECMS kontrolü, yüksek güçlü hibrid elektrikli araçlarda kullanılmak üzere en uygun kontrol stratejisi olarak belirlenmiştir. Bu kontrol, hidrojen tüketimini ve eşdeğer tüketimi en aza indirmiş, bu da elektrikli aracın içinde depolanacak hidrojen hacminin ve dolayısıyla ilgili ağırlığın azaltılmasını sağlamıştır. Dahası uygulamanın basitliği, bu kontrolü diğer hibrid elektrikli araçlarda kullanmak için uygun hale getirmiştir.

Li ve diğerleri (2015) yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör temeline dayanan şebekeden bağımsız bir hibrid güç aktarım yapılandırmasını tramvay hattı için tasarlamışlardır. Güç talebini hızlı bir şekilde değiştirmenin önüne geçmek ve mekanizma performansını bozmadan yüksek verim elde etmek için enerji yönetim sistemi olarak bulanık mantık kontrolü (FLC) ve Haar dalgacık dönüşümü (Haar-WT) kombinasyonuna dayanan bir güç paylaşım stratejisini önermişlerdir. Sonuçlar önerilen enerji yönetim sisteminin güç talebine ait düşük frekanslı bileşenlerin önemli kısmının PEMFC ile ilgili olabileceğini göstermiştir. Batarya, PEMFC yüküne zarar verebilecek tüm yüksek frekanslı bileşenleri beslerken PEMFC yükünü azaltmak için güç talebine ait pozitif düşük frekanslı bileşenlerin bir kısmının sağlanmasına yardımcı olabileceği belirlenmiştir. Bu nedenle yüksek güçlü hibrid tramvay enerji yönetim sistemi, PEMFC için geçici olarak güvenli bir çalışma koşulunu garanti edebilmiş ve her bir güç kaynağının ömrünü uzatabilmiştir. Ayrıca diğer kontrol stratejileri ile yapılan karşılaştırmalar, önerilen enerji yönetim sisteminin genel hibrid tramvay yolunun daha iyi enerji verimliliği sağlayabildiğini doğrulamıştır.

Odeim ve diğerkleri (2015) modelleme, güç yönetimi tasarımı ve optimizasyonu açısından deneysel bir yakıt hücresi/batarya/süperkapasitör hibrid sistemini araştırmışlardır. Güç yönetimi stratejisi hibrid güç kaynağının her bileşeninin oynaması gereken role dayalı olarak tasarlanmıştır. Süperkapasitör tepe gücü taleplerinden sorumludur. Batarya sistemin enerji durumunu kontrol ederek geçici güç ihtiyacının karşılanmasında süperkapasitöre yardımcı olurken, yavaş akımlı yakıt hücresi sistemi bataryanın şarj durumunu kontrol eder. Güç yönetimi stratejisinin parametreleri, hidrojen tüketimi, batarya yüklenmesi ve hızlanma performansı dikkate alınarak çok amaçlı bir optimizasyon çerçevesinde bir genetik algoritma ve Pareto ön analizi ile optimize edilmiştir. Optimizasyon sonuçları bir yakıt hücresi sistemi (1.2 kW, 26 V), lityum polimer batarya (30 Ah, 37 V) ve bir süperkapasitörden (167 F, 48 V) oluşan test tezgâhında onaylanmıştır. Burada ilk olarak, batarya ile süperkapasitör arasındaki şarj alışverişinden kaçınılması gerektiği ve ikinci olarak da batarya gücünün süperkapasitör durumuna ek olarak güç talebini de hesaba katmak gerektiği gözlemlenmiştir. Bu iki özelliğin batarya yüklenmesi, hidrojen tüketimi ve hızlanma açısından gayet uygun bir performansa sebep olduğu belirlenmiştir.

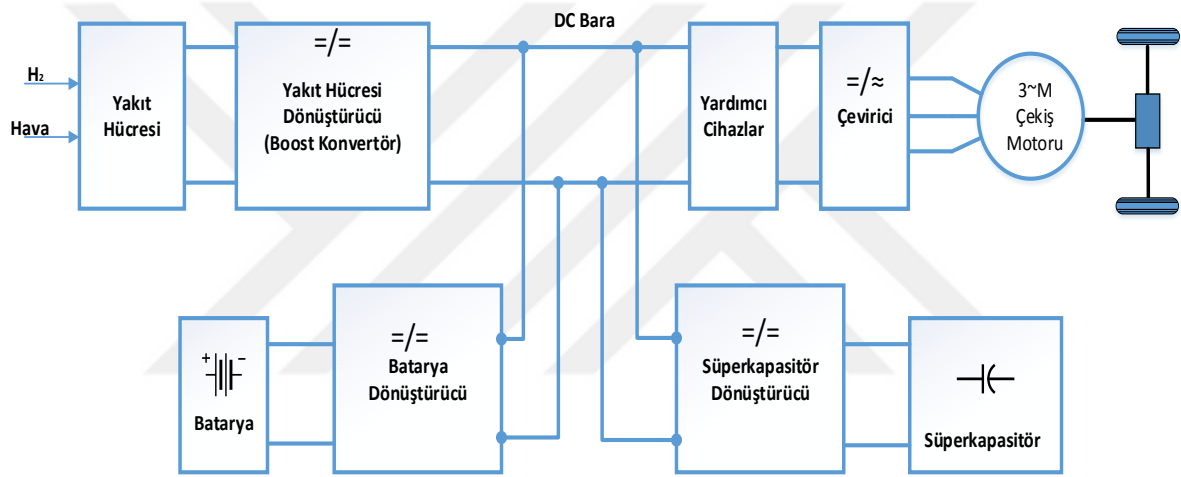
Fathabadi (2018) yakıt hücreli hibrid elektrikli araçlarda yeni bir yakıt hücresi/batarya/süperkapasitör hibrid güç kaynağı kullanılmasını önermiştir. Yakıt hücresi/batarya/süperkapasitör hibrid güç kaynağının bir prototipini oluşturmak için 90 kW bir PEMFC yığını, 600 F bir süperkapasitör bankası ve 19.2 kW bir Li-ion bataryayı kullanmıştır. Deneysel sonuçlarıyla nominal gücün % 96.2'sinin, yüksek doğrulukta DC bara voltaj regülasyonunun ve PWM tekniği kullanılarak çekiş motorunun statorunu besleyen uygun bir üç fazlı akımın sağlanmasının güç verimliliğine katkılarını göstermiştir. 1880 kg ağırlığındaki bir yakıt hücreli hibrid elektrikli araç için önerilen güç kaynağı 5.4 kg yakıt kapasitesi ile 5000 psi'lik bir tank basıncı ve maksimum 161 km/s'lik bir hız ile bir hidrojen tankı üzerinde toplam 545 km'lik bir seyir aralığı sağlamıştır. Ayrıca önerilen hibrid güç kaynağı yakıt hücreli hibrid elektrikli araçlarda kullanılan son teknoloji güç kaynakları ile karşılaştırılmış ve literatürde daha yüksek hız ve ivme gibi daha iyi parametrelere açıklık getirmiştir.

Hames ve diğerkleri (2018) yakıt tasarrufu için bir hidrojen yakıt hücreli araçtaki çeşitli kontrol stratejilerini karşılaştırarak incelemiş ve güvenli, düşük maliyetli, yüksek verimli en iyi hidrojen yakıt hücreli araç konfigürasyonları için kontrol stratejilerini sunmuşlardır. Buna göre bir hidrojen yakıt hücreli araçta kontrol stratejileri ile birlikte yakıt hücresi,

batarya, süperkapasitör, kontrolör ve akıllı kontrol üniteleri yer alır. Yakıt hücresinin düşük güç yoğunluğu ve yavaş güç cevabı gibi dezavantajlarını azaltmak için yakıt hücresiyle birlikte batarya ve süperkapasitör teknolojilerinin kullanılmasıyla aracın enerji kontrol sistemini yönetecek çeşitli kontrol stratejilerine odaklanmışlardır. Aracın ani yüklenmelerinde yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitörün verimlilikleri ve ömürleri azalacaktır. Bu sebeple güç paylaşımı, anlık ve yüksek güç değişimleri sırasında ortaya çıkabilecek problemlerden kaçınmak için uygun kontrol stratejileri ile gerçekleştirilmelidir. Karşılaştırılan çeşitli kontrol stratejilerinde birincil güç kaynağı olarak yakıt hücresi kullanılmıştır. Yakıt hücresi ve batarya arasındaki güç değişimi ve süperkapasitörün DC bara voltajını izlemesi, bu kontrol stratejilerini birbirinden farklı kılmıştır. DC/DC yakıt hücresi dönüştürücüsü, batarya dönüştürücüsü ve süperkapasitör dönüştürücüsü bu kaynakları DC barasına bağlamakla görevlidir. DC/DC dönüştürücüler, her bir enerji depolama sistemi arasında güç paylaşımı sağlamak için voltaj düzenlemesi yaparlar. Bu güç paylaşımı sürücünün hızlanma, yavaşlama, ani frenleme ve durdurma gibi taleplerine göre elektronik kontrolörler aracılığıyla değerlendirilip oluşturulan kontrol stratejilerinin araca uygulanmasıyla yapılmıştır. Karşılaştırılan kontrol stratejilerinin hemen hemen hepsinin benzer sonuçlara sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Özellikle eşdeğer tüketim minimizasyon stratejisi (ECMS) olarak incelenen kontrol stratejisinde yakıt hücresinin hidrojen tüketimi ve batarya-süperkapasitör eşdeğer hidrojen tüketiminin diğer kontrol stratejilerine göre en aza indirildiğini sunmuşlardır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında bir hidrojen yakıt hücreli araç sistemi için geliştirilen PEM yakıt hücresi, lityum-iyon batarya ve süperkapasitör modelleri ile birlikte sistem için tasarlanan kontrol stratejisi, güç biçimlendirme ve dönüştürme üniteleri bu bölümde tanıtılmaktadır. Sistem tasarımı bir yakıt hücresi, yakıt hücresi dönüştürücü, batarya, batarya dönüştürücü, süperkapasitör, süperkapasitör dönüştürücü, yardımcı cihazlar, DC bara ve üç faz çekiş motoru bileşenlerini içermektedir. Bir hidrojen yakıt hücreli araç sisteminin konfigürasyonu Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Hidrojen yakıt hücreli araç sisteminin konfigürasyonu

3.1. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC) Dinamik Modeli

Hidrojen yakıt hücreli araçlarda birincil enerji kaynağı olarak kullanılan yakıt hücresinin temel bileşenleri matematiksel denklemlerle desteklenerek MATLAB ve Simulink programlarıyla dinamik modelin benzetimi yapılmıştır. Modelin tasarlanmasında denklem ve analizleri basitleştirmek için bazı varsayımlar yapılmıştır.

- Tüm gazlar ideal şekilde davranır ve eşit olarak dağılır.
- Yakıt ve oksidan olarak nemlendirilmiş hidrojen ve hava kullanılır.
- Termodinamik özellikler ortalama yığın sıcaklığında değerlendirilir, yığın boyunca sıcaklık değişimleri ihmal edilir ve yığının genel özgül ısı kapasitesi sabittir.

- Hücre performans parametreleri bir yakıt hücresi yığınının temsil etmek için birlikte toplanabilir.
- Tüm değerler tek boyutlu işlem şeklinde sadece anot ve katot yüzeylerine ortogonal yönde değişir.
- Ünitenin gaz akış kanallarındaki basınçlar sabittir.
- Yakıt hücresi yığınının parametreleri, tek tek hücrelerin parametreleri artırılarak elde edilir.

Bir PEMFC'nin işletme aralığında herhangi bir yük durumu için, çıktıyı belirli faktörler belirler. Yakıt hücreleri yığınındaki tek bir yakıt hücresi için gözlenen bu faktörler aşağıda gösterilmiştir. Bir PEM yakıt hücresindeki genel tepki Eş. 3.1'deki gibi basit bir şekilde yazılabilir.



Tersine çevrilebilir potansiyeli hesaplamak için kullanılan ilgili Nernst denklemi Eş. 3.2'de gösterilmiştir.

$$E_{hücre} = E_{o,hücre} + \frac{RT}{2F} \ln[p_{H_2}^* \cdot \sqrt{p_{O_2}^*}] \quad (3.2)$$

Denklemden $E_{o,hücre}$ bir sıcaklık işlevidir ve Eş. 3.3'de ifade edilmiştir.

$$E_{o,hücre} = E_{o,hücre}^0 - k_E(T - 298) \quad (3.3)$$

Eş. 3.2'de hesaplanan $E_{hücre}$ aslında yakıt hücresinin açık devre voltajıdır. Bununla birlikte normal çalışma koşullarında yakıt hücresi çıkış voltajı $E_{hücre}$ 'den daha düşüktür. Aktivasyon kaybı, omik voltaj düşüşü ve aşırı konsantrasyon potansiyeli Eş. 3.4'te gösterildiği gibi yakıt hücresindeki voltaj düşüşleridir.

$$V_{hücre} = E_{hücre} - V_{akt,hücre} - V_{ohm,hücre} - V_{kons,hücre} \quad (3.4)$$

Yakıt hücresi yığınının çıkış voltajı Eş. 3.5'teki gibi elde edilebilir.

$$V_{\text{çıkış}} = N_{\text{hücre}} * V_{\text{hücre}} = E - V_{\text{akt}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{kons}} \quad (3.5)$$

Düşük güç talepleri altında, elektrokimyasal reaksiyon, kinetiğin doğası gereği elektrot yüzeyinde yavaştır. Aşağıda verilen Eş. 3.6 denklemleri, bir yakıt hücresindeki aktivasyon voltaj düşüşünü hesaplamak için kullanılır.

$$V_{\text{akt}} = \eta_0 + a(T - 298) + bT \ln(I) \quad (3.6)$$

Burada a , b ve η_0 pozitif sabit katsayılarıdır. Bu nedenle aktivasyon polarizasyonu, akım yükleri aralığı boyunca doğal bir logaritma eğrisine sahiptir.

Bir PEM yakıt hücresinin omik direnci, polimer membranın direncinden, membran ve elektrotlar arasındaki iletkenlik direncinden ve elektrotların dirençlerinden oluşur. Genel omik voltaj düşüşü Eş. 3.7'deki gibi ifade edilebilir.

$$V_{\text{ohm}} = IR_{\text{ohm}} \quad (3.7)$$

Burada R_{ohm} , akım ve sıcaklığın bir fonksiyonudur.

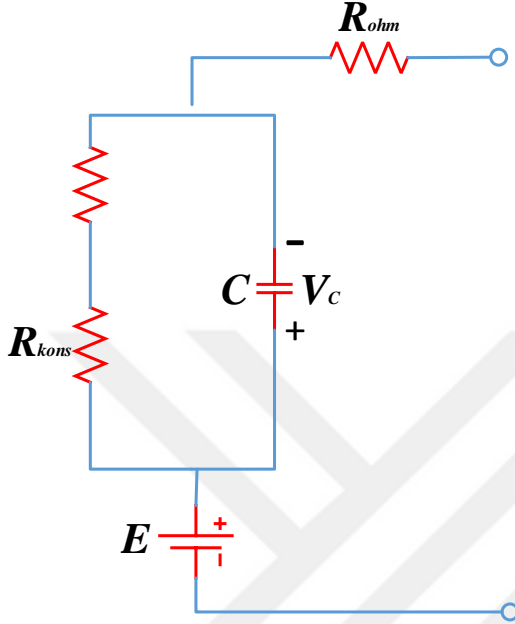
$$R_{\text{ohm}} = R_{\text{ohm}0} + k_{RI}I - k_{RT}T \quad (3.8)$$

Reaksiyon sırasında akış kanallarından katalizör yüzeylerine kütle difüzyonları nedeniyle konsantrasyon gradyanları oluşturulabilir. Yüksek akım yoğunluklarında tepkime maddelerinin reaksiyon alanlarına yavaşça taşınması konsantrasyon gerilim düşüşünün temel nedenidir. Yakıt hücresindeki aşırı konsantrasyon potansiyeli Eş. 3.9'da tanımlanmıştır.

$$V_{\text{kons}} = -\frac{RT}{zF} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{\text{limit}}}\right) \quad (3.9)$$

Bu denklem Fick'in Birinci Yasası ve Faraday Yasası'na göre oluşturulmuştur. Bu denklemlere göre elektronlar anottan harici yük boyunca akacak ve aynı zamanda hidrojen protonlarının çekileceği katodun yüzeyinde toplanacaktır. Böylece gözenekli katot ve zar arasındaki sınır boyunca iki yüklü karşıt polarite tabakası oluşur. Elektrokimyasal çift

katman olarak bilinen tabakalar, elektrik enerjisini depolayabilir ve bir süperkapasitör gibi davranabilir. Bu etki dikkate alınarak yakıt hücresinin eşdeğer devresi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. PEM yakıt hücresinin eşdeğer devresi

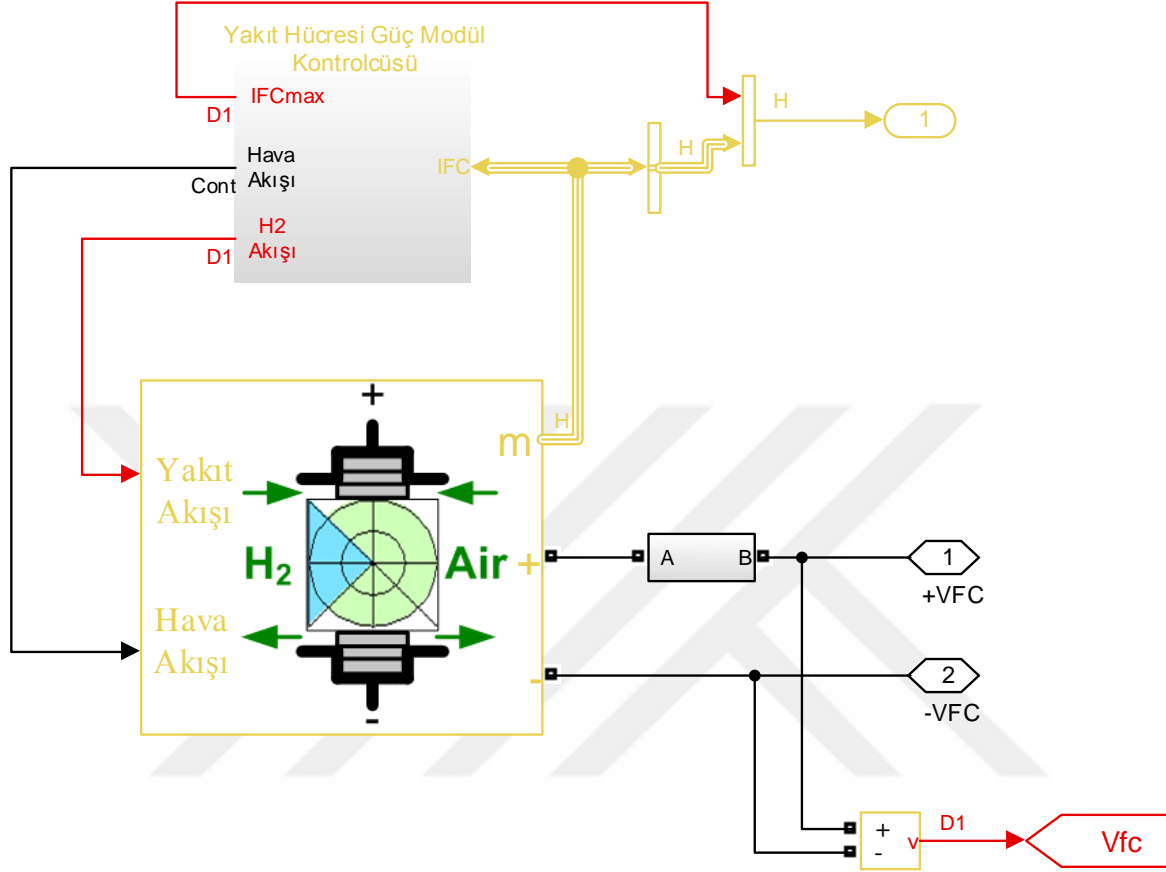
Yukarıdaki devrede, C çift katmanlı şarj etkisinden dolayı eşdeğer kapasitördür. Bir PEM yakıt hücresinin elektrotları gözenekli olduğundan, C kapasitesi çok büyüktür ve birkaç Farad'ın üzerinde olabilir. R_{akt} ve R_{kons} Eş. 3.6 ve Eş. 3.9'a göre hesaplanabilen aktivasyon ve konsantrasyon voltaj düşüşlerinin eşdeğer dirençleridir.

Son olarak PEMFC yığınının hidrojen yakıt tüketimi Eş. 3.10'da hesaplanmıştır.

$$m_{H_2} = \frac{I_{fc} \cdot N_{hücre}}{2F} * 10^{-3} \quad (3.10)$$

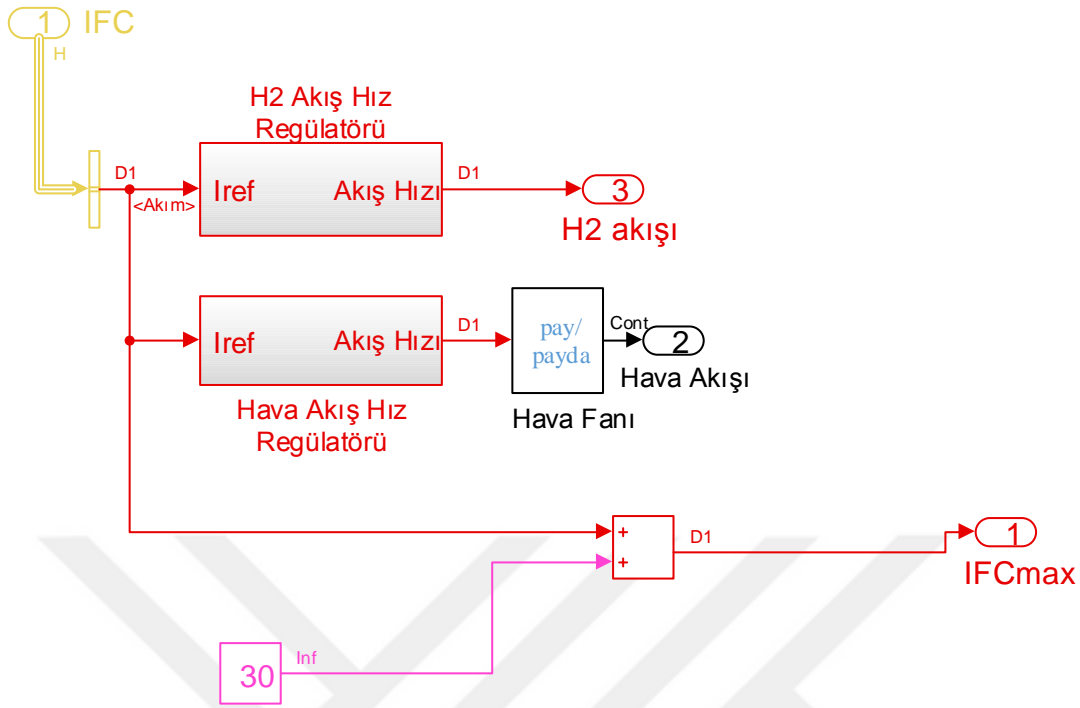
Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC) sistem dinamikleri ve eşitlikleri tanımlanırken aracın güç, enerji, voltaj, akım ve kayıp parametreleri ile yakıt tüketimi dikkate alınarak aracın yakıt deposundaki hidrojen tüm bu parametrelere göre kullanılır. Yakıt hücresinin hidrojen tüketim oranını belirleyebilmek ve kontrol edebilmek için yakıt hücresi çıkış akımı oransal ve integral (PI) denetim sistemi sayesinde geri beslemeli kontrol stratejisi ile kontrol edilir. Ayrıca yakıt hücresinin güç bileşenlerini oluşturmak için bu

belirlenen parametreler yakıt hücresi güç modülü içerisinde yerleştirilmiştir. Oluşturulan yakıt hücresi güç modülü Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Yakıt hücresi güç modülü

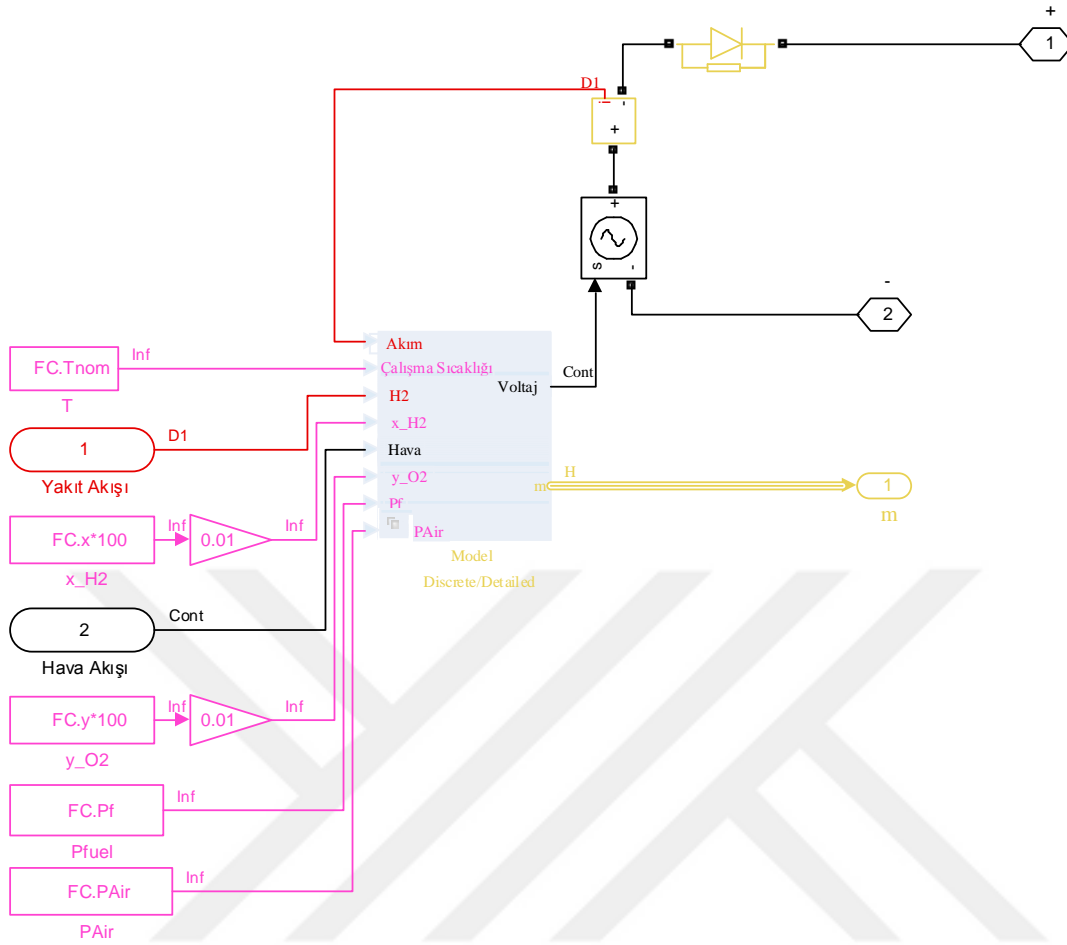
Burada yakıt hücresi güç modül kontrolcüsü yakıt ve hava akış hızlarını kontrol ederek yakıt hücresi geriliminin değişimlerinde rol oynar. Aracın yakıt talebine hızlı cevap verebilmek için yakıt hücresi güç modülünün doğru çalışması oldukça önemlidir. Özellikle parametreleri belirlenen yakıt ve hava akış oranlarının sistemde uygun bir şekilde yer alarak yakıt hücresinin güç bileşenlerini oluşturması sistemin etkili çalışmasını sağlar. Yakıt hücresi güç bileşenlerinden bahsederken yakıt hücresi akım ve gerilim parametrelerinin hidrojen yakıtı ve hava bileşenleriyle birlikte hesaplanması gerekir. Matematiksel olarak hesaplanıp uygun kontrol stratejisiyle kontrol edilen bu bileşenler aracın talep ettiği gücü karşılayacak en önemli parametrelerdir ve araçta yakıt tasarrufuna değinilirken ilk akla gelen kısımlardır. Oluşturulan kontrol stratejisiyle hem yakıt hücresi güç bileşenleri doğru bir şekilde yönetilmiş hem de yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca tasarlanan yakıt hücresi güç modül kontrolcüsü Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yakıt hücresi güç modül kontrolcüsü

Yakıt hücresi yığımındaki hidrojen den üretilen elektrik enerjisinin akım bileşeni yakıt hücresi akımını oluşturarak yakıt hücresi güç modül kontrolcüsüne girer. Yakıt hücresi akımının referans değeriyle birlikte hidrojen ve hava akış hızı regülatörüyle hidrojen ve hava akışı belirlenerek maksimum yakıt hücresi akımı oluşturulur ve sistemin kontrolü sağlanmış olur. Burada yakıt hücresinin gücü akım kontrollü olduğu için çekiş motorundan talep edilen fazla gücü karşılarken yakıt hücresi güç modül kontrolcüsü, yakıt hücresi maksimum akımından fazlasını sisteme vermeyerek batarya ve süperkapasitör teknolojilerinden güç sağlanmasını tetikleyecektir. Böylelikle hem yakıt hücresinin ömrü uzamış olacak hem de yüksek güç taleplerinde yakıt hücresine ihtiyaç azalarak yakıt tasarrufu sağlanmış olacaktır.

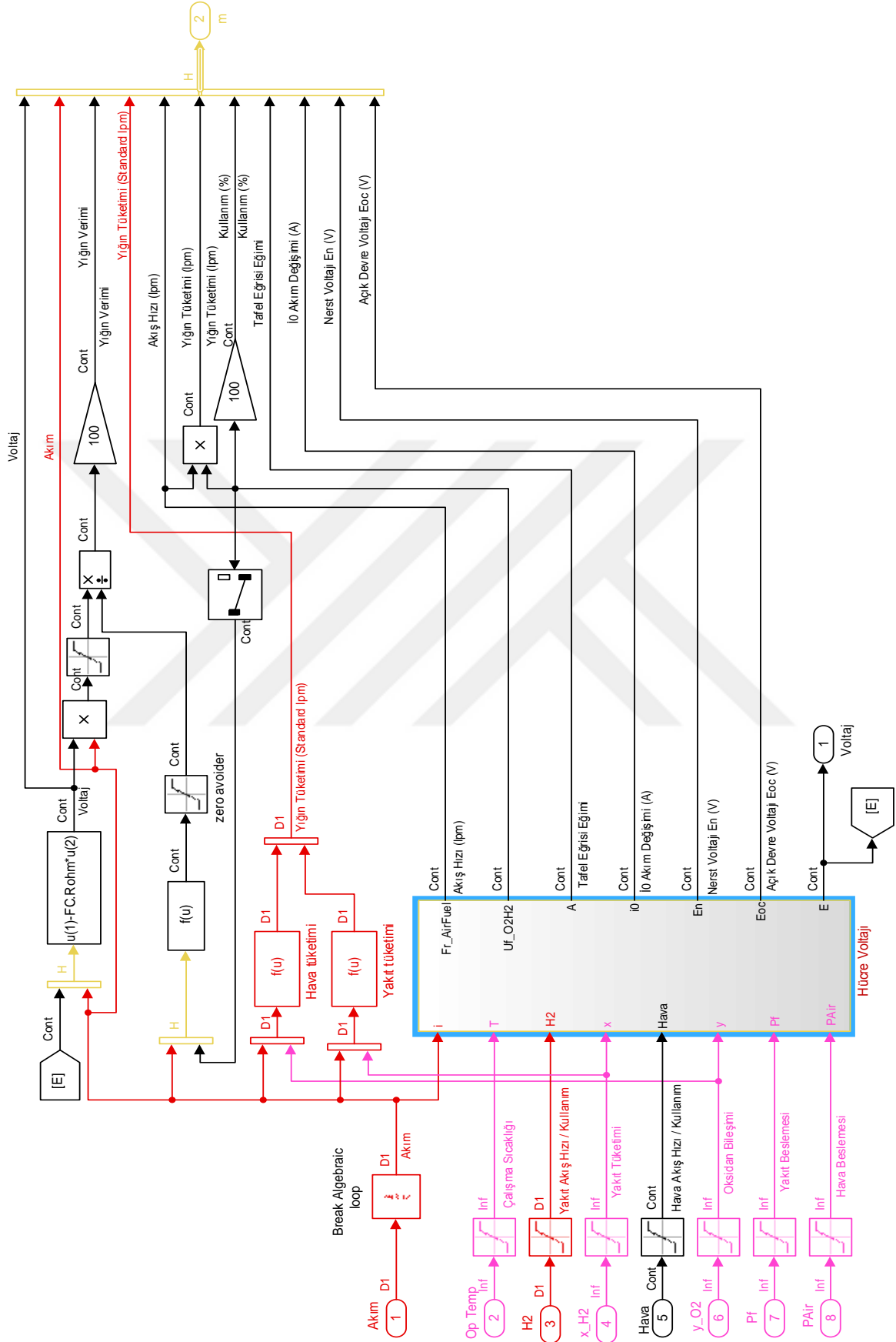
Sistemde yer alan hidrojen yakıt hücresi yığını akım, çalışma sıcaklığı, hidrojen akışı oranı, hava akış oranı, yakıt gücü, hava gücü gibi parametreleri giriş olarak alır ve çıkışta yakıt hücresi yığımının gerilim ve akım değişkenlerinin kontrolüyle yakıt hücresi gücünü verir. MATLAB/Simulink ortamında girilen bu parametreler sistem için en uygun şekilde hesaplanmıştır. Sistemde kullanılan yakıt hücresi yığını Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Böylelikle yakıt hücresi yığını ile yakıt hücresi güç modül kontrolcüsü birlikte çalışarak yakıt hücresi güç modülünü oluşturur.



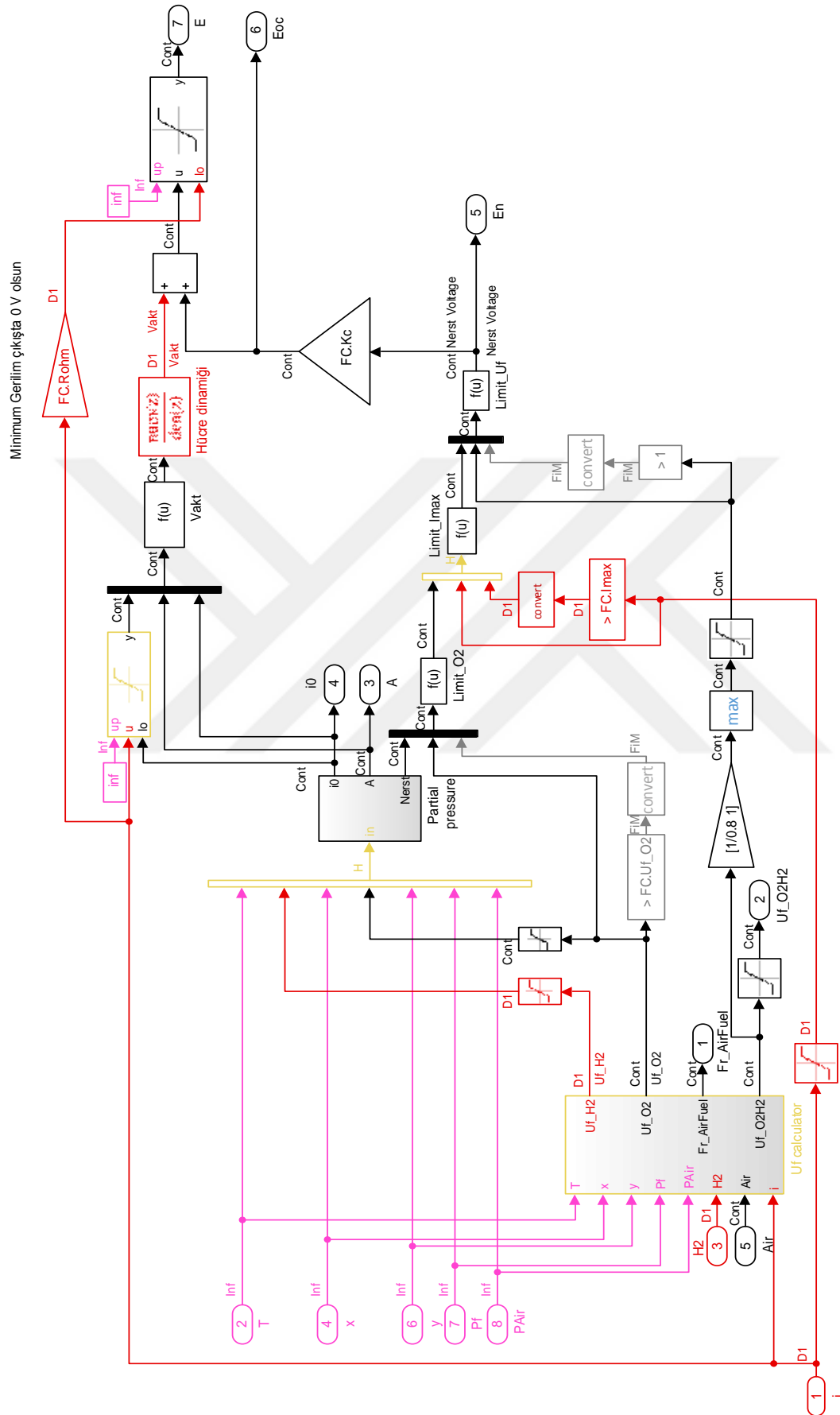
Şekil 3.5. Yakıt hücresi yığını

Sistemde meydana gelebilecek kalıcı durum hatalarını ortadan kaldırmak için kullanılan PI denetleyici ile birlikte yakıt hücresinin dinamik model tasarımı ve eşdeğer devre parametreleriyle MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan PEMFC yığınının detaylı modeli Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Önceden hesaplanan aktivasyon voltajı, omik voltaj ve konsantrasyon voltajı detaylı modelde gösterilmiştir. PEMFC yığına giren hava ve hidrojen ile hücre voltajı sayesinde belirli kontrolleri sağlanarak gerilim, akım, yığın verimi, yığın tüketimi ve açık devre voltajı gibi parametreler hesaplanarak çıkış değerleri belirlenir.

Hidrojen yakıt hücresinin hücre voltajı modülü ise yakıt hücresi yığın parametrelerinin hesaplandığı ve her bir yakıt hücresinin voltaj değerlerinin kontrol edildiği kısımdır. Bu bloğa nominal hidrojen kullanımı, nominal oksidan kullanımı, nominal yığın verimi, çalışma sıcaklığı, yakıt bileşimi, oksidan bileşimi, nominal yakıt akışı, nominal hava akışı, maksimum yakıt akışı, maksimum hava akışı gibi parametreler girilerek Şekil 3.7 oluşturulmuştur.



Şekil 3.6. Yakıt hücresi yığınının detaylı modeli

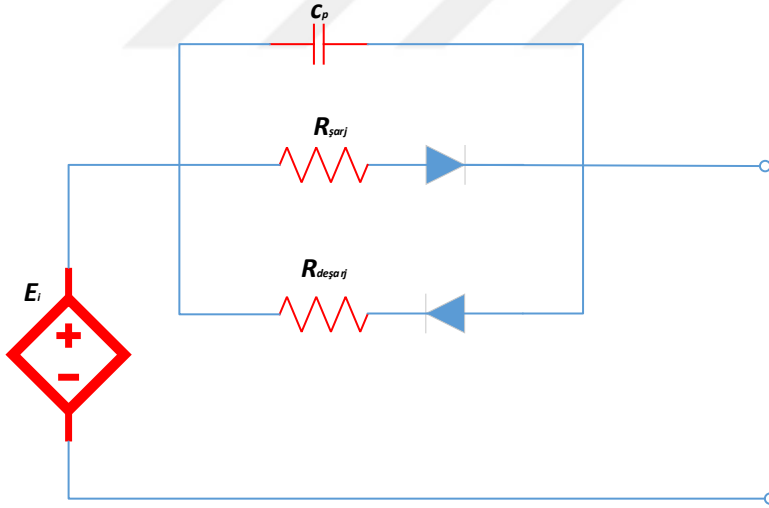


Şekil 3.7. Yakıt hüresinin hücre voltaj modülü

3.2. Lityum İyon (Li-ion) Batarya Teknolojisi Dinamik Modeli

Lityum-iyon bataryaların özellikle hibrid ve hidrojen yakıt hücreli araçlarda enerji depolama teknolojisi olarak kullanımının oldukça yaygın olması ve diğer batarya türlerine göre daha fazla tercih edilmesinin sebepleri çalışmanın giriş bölümünde açık bir şekilde anlatılmıştı. Özellikle yüksek güç ve nakliye uygulamaları için tasarlanan Li-ion bataryaların dinamik modelini tasarlamak ve araçtaki güç ve enerji yönetim sistemine uyumu için doğru parametreleri kullanarak kontrol stratejisini belirlemek oldukça önemlidir.

Bataryaların sistem performansını, ömrünü ve verimini etkileyen en önemli parametre sıcaklıktır. Bu parametre elektrokimyasal sistem davranışını ve hidrojen yakıt hücreli araç performansını doğrudan etkiler. Hidrojen yakıt hücreli araçta kullanılan lityum-iyon bataryanın davranışı MATLAB/Simulink ortamındaki mevcut model tarafından temsil edilmiştir. Bu modelde batarya, bir direnç ile seri olarak değişken bir voltaj kaynağından oluşan eşdeğer devre ile oluşturulmuştur. Şekil 3.8 bu modelin bir şemasını göstermektedir.



Şekil 3.8. Batarya sisteminin eşdeğer devresi

Değişken voltaj kaynağının voltaj değerini hesaplamak için, bataryanın boşalması veya şarj edilmesine bağlı olarak bir deşarj modeli veya şarj modeli kullanılır. Önerilen deşarj modeli, akım değiştiğinde gerilim dinamiklerini doğru bir şekilde temsil edebilir. Açık devre voltajını SOC'nin bir fonksiyonu olarak dikkate alır.

Buna göre deşarj durumundaki batarya çıkış voltajı Eş. 3.11'deki gibidir.

$$V_{bat} = E_i - I_{bat} * R_{deşarj} \left[1 - e^{\left(-\frac{t}{R_{deşarj} * c_p} \right)} \right] \quad (3.11)$$

Şarj modeli, şarj karakteristiğinin sonunu dikkate alır. Çünkü batarya tam şarja ulaştığında voltaj hızla artar. Bu durum polarizasyon kapasitesi ile modellenir. Böylelikle bataryanın şarj durumundaki (SOC) çıkış voltajı Eş. 3.12'deki gibi hesaplanır.

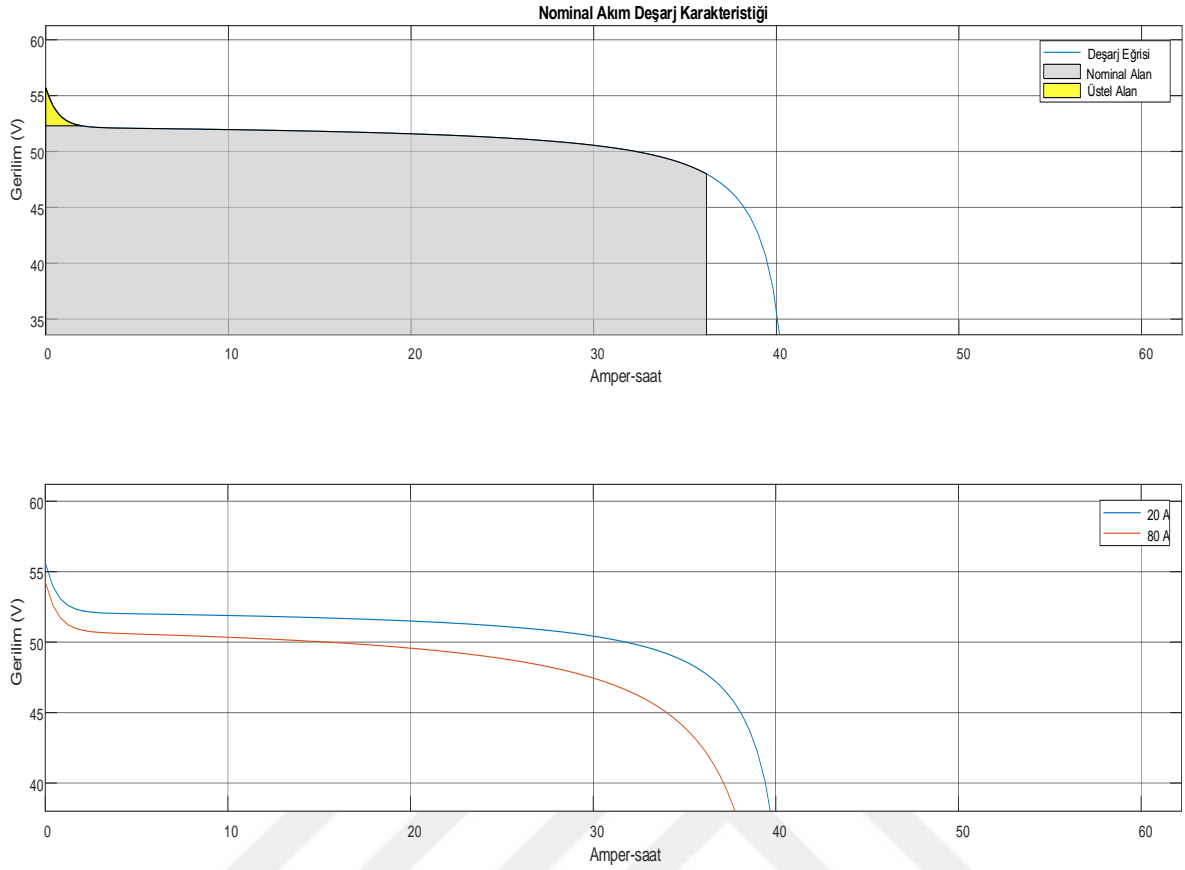
$$V_{bat} = E_i + I_{bat} * R_{şarj} \left[1 - e^{\left(-\frac{t}{R_{şarj} * c_p} \right)} \right] \quad (3.12)$$

Batarya sarj durumu (SOC) ise Eş. 3.13'de gösterilmiştir.

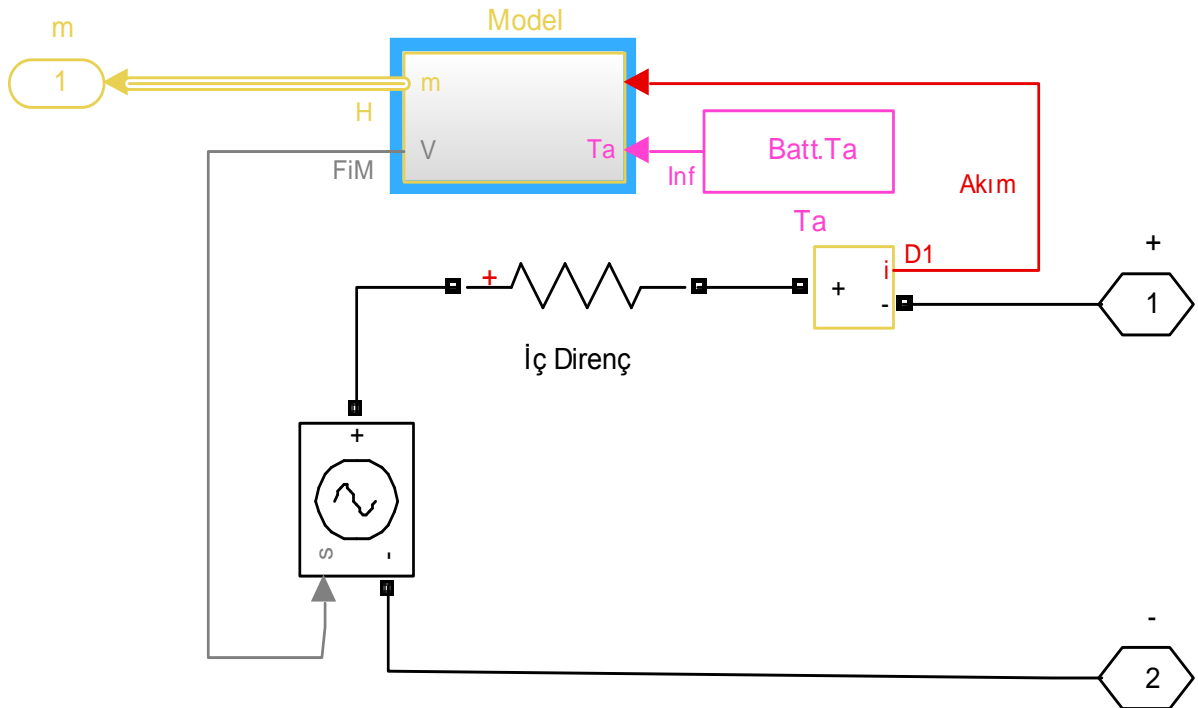
$$\%SOC = \%SOC_0 - \left(\frac{1}{C_{bat}} \int I_{bat} * dt \right) * 100 \quad (3.13)$$

Şekil 3.9'da bu çalışmada kullanılan modelden elde edilen 40 A nominal akıma sahipdeşarj eğrisi gösterilmektedir. Öte yandan, yüksek şarj verimi elde etmek için SOC batarya kapasitesi % 60 ile % 90 arasında tutulmalıdır. Kontrol stratejisi, batarya modelinin hibrid sistemdeki batarya yanıtını temsil etmek için bataryayı bu çalışma aralığında çalıştıracak şekilde tasarlanmıştır.

Bir batarya, amper-saat cinsinden ölçülen bir kapasiteye sahip olarak karakterize edilir. Bu da tam şarj durumundan (SOC % 100) saat başına voltajı terminallerdeki voltajın limite ulaştığı noktaya kadar sağlayabilen gücü gösterir. Şarj durumunun yüzdesinin sıfır olduğu durum “kesme gerilimi” olarak adlandırılır. Bir bataryanın, boşaldığı yoğunluğa bağlı olarak amper-saatlerde farklı kapasitesi vardır. Bunlar, yüksek yoğunluklar için daha az kapasite talebi ve küçük akımlar için artan kapasite talebidir. Şekil 3.10'da gösterilen model, batarya akımını ölçerek batarya şarj durumunu hesaplar. Bir batarya modelinin en önemli ve vazgeçilmez parametrelerinden birisi, aracın menzilini tahmin etmede klasik bir yöntem olduğu için şarj durumunun doğru tahminidir. Buradaki lityum-iyon batarya modelinde batarya performansını temsil eden şarj durumu (SOC), cihaz voltajı, zamanla bataryadan geçen akım, güç ve etkin enerji değerleriyle birlikte sürücünden gelen ve aracın talep ettiği gücü karşılarken oluşturulacak kontrol stratejilerinin belirlenmiş parametreleri batarya dinamik modelini oluşturur.



Şekil 3.9. Batarya nominal akım deşarj eğrisi

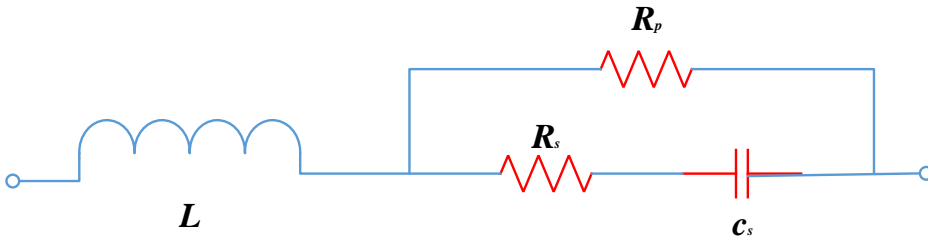


Şekil 3.10. Lityum iyon batarya dinamik modeli

3.3. Süperkapasitör (Ultrakapasitör) Teknolojisi Dinamik Modeli

Hidrojen yakıt hücreli araçların güç gereksinimlerini karşılayabilmek için süperkapasitör güç profillerinin sık sık şarj ve deşarj darbelerinden oluşması gerekmektedir. Şarj ve deşarj darbeleri özellikleri yüksek akım seviyeleri ve onlarca milisaniye ile on saniye arasında bir süredir. Aracın güç gereksinimlerini sadece yakıt hücresiyle karşılayabilmesi oldukça maliyetli ve olumsuz şartlarda büyük problemlere sebep olabilmektedir. Bunun yerine yakıt hücresini birincil enerji kaynağı olarak kullanan hidrojen yakıt hücreli araçların hem maliyetin azaltılması açısından hem de verimlilik ve performansın yükseltilmesi bakımından yakıt hücresine yardımcı enerji depolama teknolojisi olarak süperkapasitörler kullanılabilir. Özellikle ani yük değişimlerinde süperkapasitörün devreye girmesi ve güç gereksinimini yakıt hücresi ve batarya ile birlikte karşılaması süperkapasitör teknolojisinin araç uygulamalarında gelecek vaat eden en önemli enerji depolama sistemlerinden birisi olduğunu göstermektedir.

Sistemde süperkapasitör, aracın güç talebi ile yakıt hücresi ve bataryanın çıkış güçleri arasındaki farkları karşılamak üzere tasarlanmıştır. Araçtaki güç gereksiniminin süperkapasitör olmaksızın sadece yakıt hücresiyle karşılanması hem maliyeti artıracak hem de sistemin boyutunu artıracaktır. Bu da taşıt uygulamalarında istenmeyen durumdur. Bu nedenle bu bölümde simülasyonda kullanılan süperkapasitörün matematiksel modellenmesi tanıtılmıştır. Sistem modelindeki süperkapasitörün elektriksel eşdeğer devresi Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Süperkapasitör elektriksel eşdeğer devresi

Hidrojen yakıt hücreli araçlarda süperkapasitörleri enerji depolama cihazları olarak kullanmak ve yüksek voltaj seviyesi elde etmek için birkaç hücreyi (her hücre voltajı 2.7 V) seri olarak birleştirmek gerekir.

Buradaki eşdeğer devrede Kirchoff gerilim yasası uyguladığımızda Eş. 3.14'teki denklemi elde ederiz.

$$V_{SC} = V_{C_s} - V_{R_s} - V_L \quad (3.14)$$

Ayrıca süperkapasitör şarj durumu (SOC) süperkapasitör performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir ve Eş. 3.15'teki gibi hesaplanır.

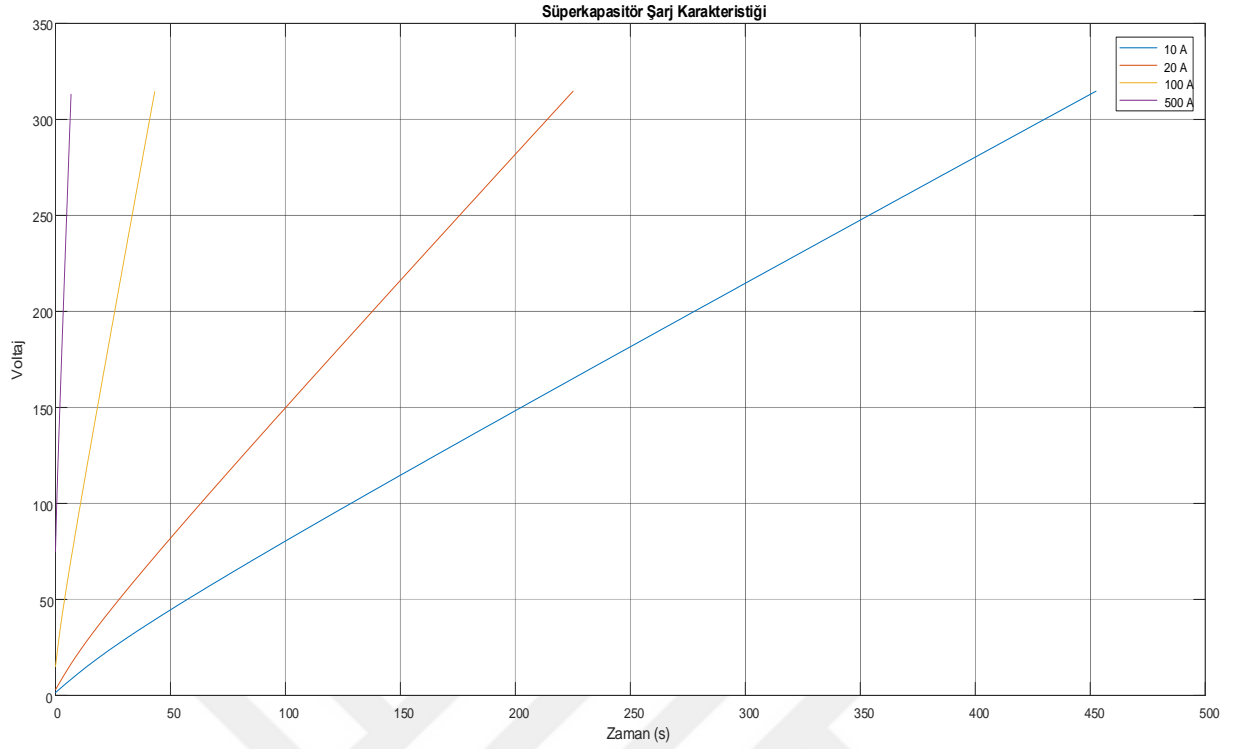
$$\%SOC = \frac{V_{SC}}{V_{max}} * 100 \quad (3.15)$$

Süperkapasitör tarafından sağlanan enerji denklemi Eş. 3.16'da hesaplanmıştır.

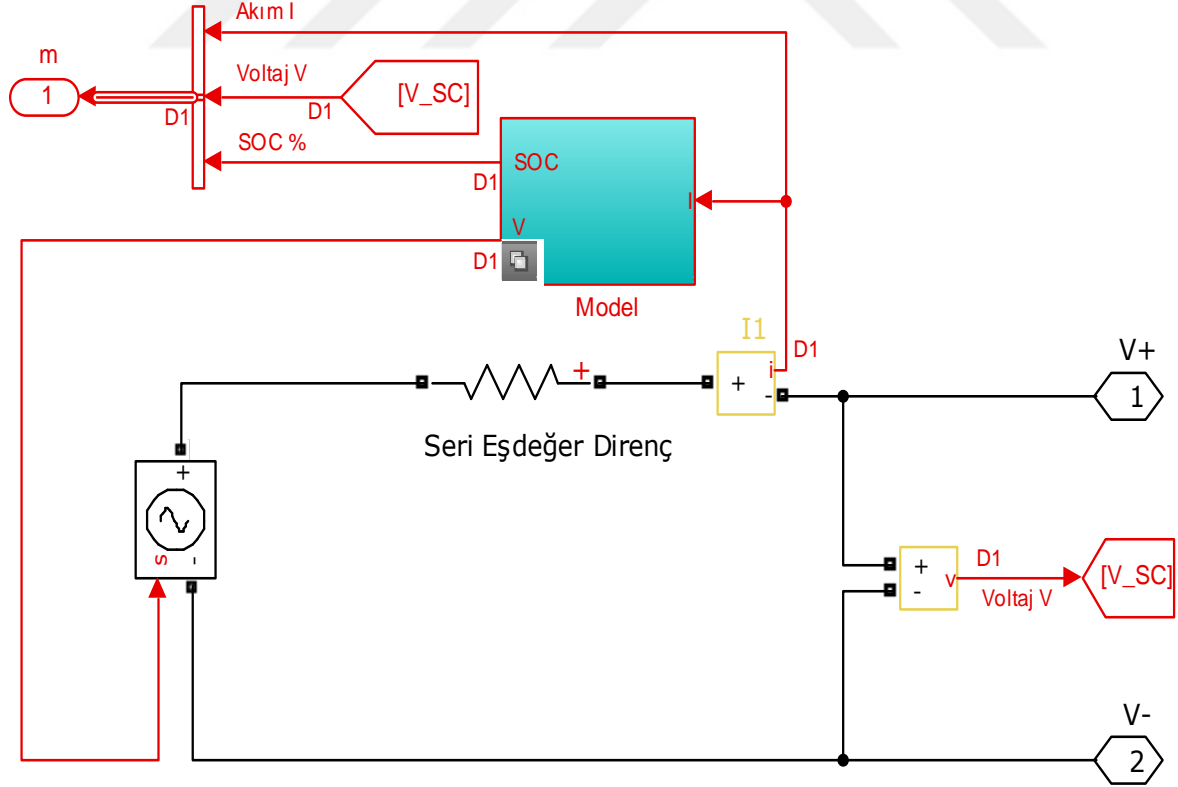
$$E = \frac{1}{2} C_s (V_f^2 - V_{cf}^2) \quad (3.16)$$

Şekil 3.12, süperkapasitör modelinin farklı akımları için süperkapasitör şarj eğrilerini göstermektedir. Model verilerinin daha düşük talepler için yeterince iyi olduğu gözlemlenebilir. Örneğin süperkapasitörün 10 A'lık akımla şarj talebinde yaklaşık 320 V gerilime kadar 450 saniye boyunca şarj olabilirken bu veriler 20 A için 220 saniye, 100 A için 45 saniye ve 500 A için ise neredeyse 5 saniyeye kadar düşmektedir. Bununla birlikte, model her bir şarj eğrisinin sonundaki doğrusal davranışı yansıtır. Kontrol stratejisi, süperkapasitörün toplam deşarjını önlemek için tasarlanmıştır. Böylece bu doğrusal olmayan bölgeye asla ulaşamaz. Bu nedenle, süperkapasitör modeli hibrit sistemdeki süperkapasitör yanıtını temsil etmek için geçerli kabul edilir.

Süperkapasitör için matematiksel denklemlerin ve sistem modellemesinin MATLAB/Simulink ortamında yazılmasıyla süperkapasitör dinamik modeli Şekil 3.13'te oluşturulmuş ve bir hidrojen yakıt hücresi araç tasarımı gerçekleştirilmiştir. Model akım giriş parametresiyle birlikte gerilim ve SOC değerlerinin hesaplanmasıyla tasarlanırken aynı zamanda akım kontrolü yapılmaktadır. Süperkapasitörün yüksek akım seviyesinin belirlenerek yaşam döngüsünü kontrol altında tutmak hem araç verimi hem de enerji depolama teknolojilerinin sağlıklı ve birbiriyle uyumlu çalışması açısından oldukça önemlidir.



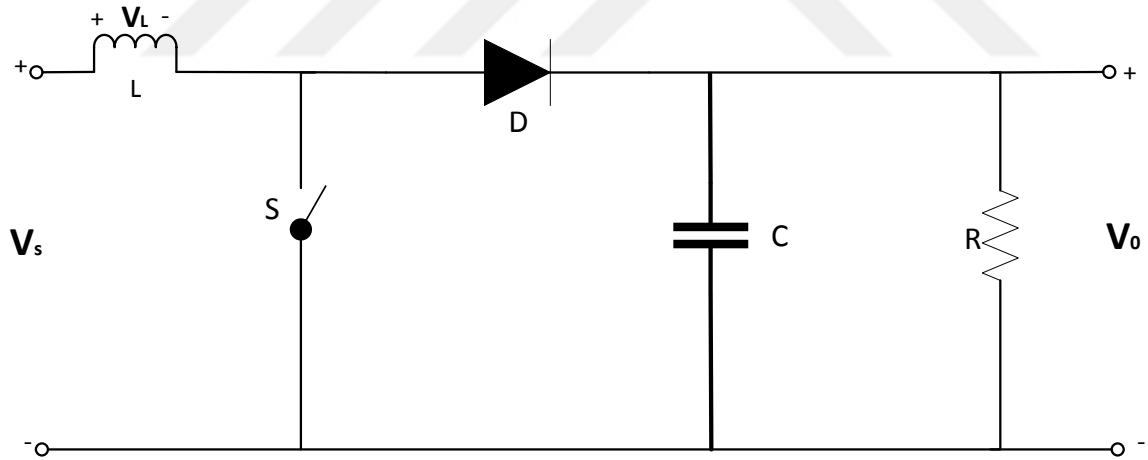
Şekil 3.12. Süperkapasitör şarj karakteristiği



Şekil 3.13. Süperkapasitör dinamik modeli

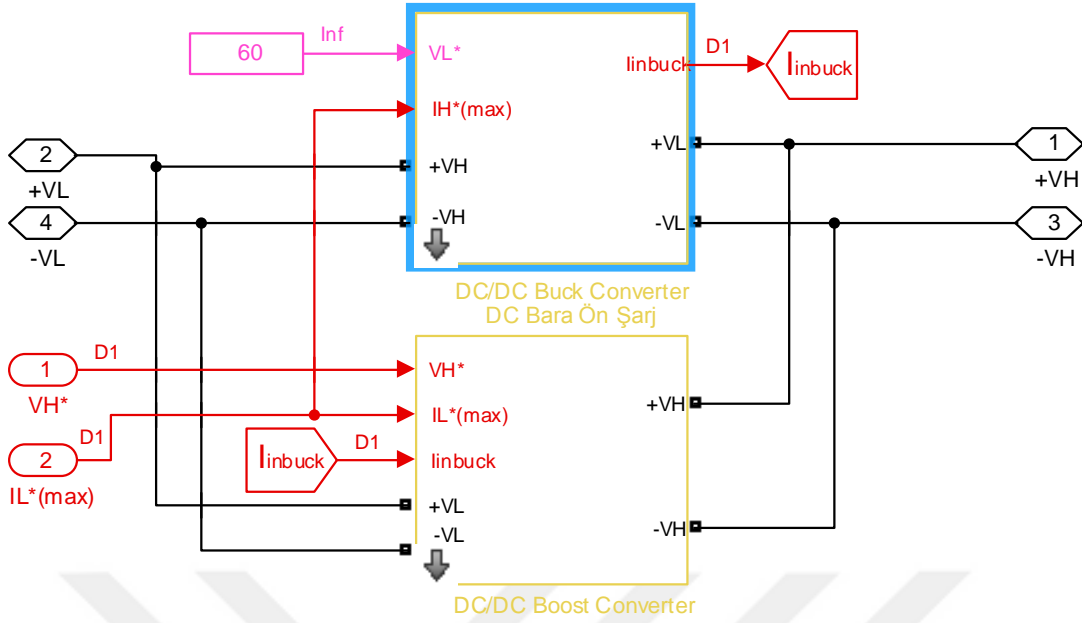
3.4. DC/DC Güç Biçimlendirme Üniteleri (Konvertörler)

Hidrojen yakıt hücreli araçlarda enerji depolama sistemlerinin yanında güç dönüştürücü ünitelerine dayalı güç elektroniği de önemli yere sahiptir. DC/DC dönüştürücüler farklı gerilim seviyelerine sahip olan enerji depolama cihazları ile DC bara ve DC bara ile çekiş motoru arasındaki enerji akışını kontrol etmek ve güç dönüşümü sağlamak için gereklidir. Hidrojen yakıt hücreli araçların depolama sistemleri arasında enerji kontrolü sağlamak için bir DC bara kullanılır. Yakıt hücresi tarafından üretilen DC gerilim aracın güç gereksinimleri ile büyük ölçüde değiştiği için daha yüksek düzenlenmiş bir DC gerilim üretmek gereklidir. Yakıt hücresi gerilimini artırmak ve düzenlemek için yakıt hücresini DC baraya bağlayan geniş bir giriş aralığına sahip tek yönlü bir DC/DC boost konvertör (yükseltici dönüştürücü) gereklidir. Bu dönüştürücü yakıt hücresinden gelen hidrojeni kullanarak üretilen elektrik enerjisini DC baraya aktarır. Çalışmada kullanılan DC/DC boost konvertörün yapısı Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Yakıt hücresi DC/DC boost konvertörünün yapısı

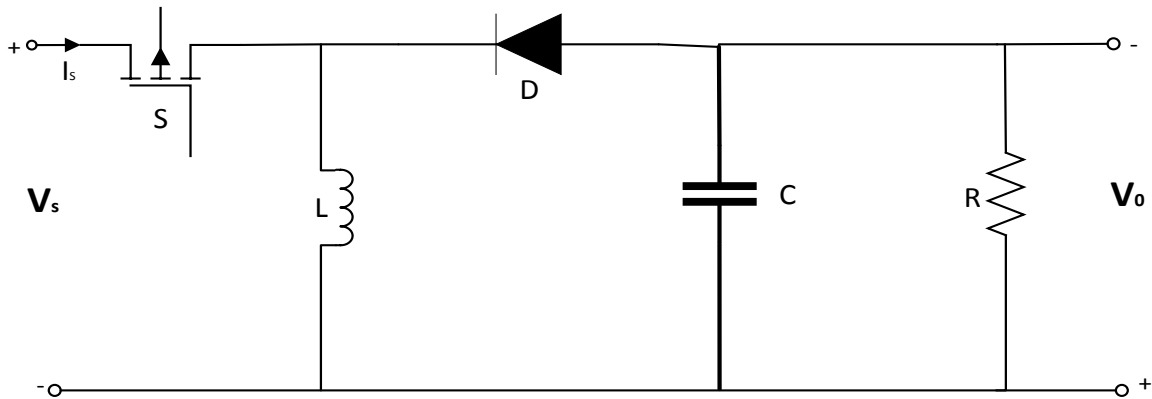
Yakıt hücresi DC/DC boost konvertörü yarı iletken bir anahtar, bobin, kapasitör, direnç ve diyottan oluşmaktadır. Burada anahtarın iletim veya kesime götürülmesiyle devrenin kontrolü sağlanmaktadır. Anahtar iletimdeyken bobin üzerinden geçen akım artarak bobin üzerinde enerji depolanır. Anahtar kesimdeyken bobinin akımı diyot üzerinden kapasitör ve yüke aktarılır. Bu konumda bobin üzerindeki enerji boşalırken bobin geriliminin polaritesinin yönü gerilim kaynağınınunki ile aynı olur ve böylece çıkış gerilimi yükseltilir. MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan model Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15. Yakıt hücresi DC/DC boost konvertörü

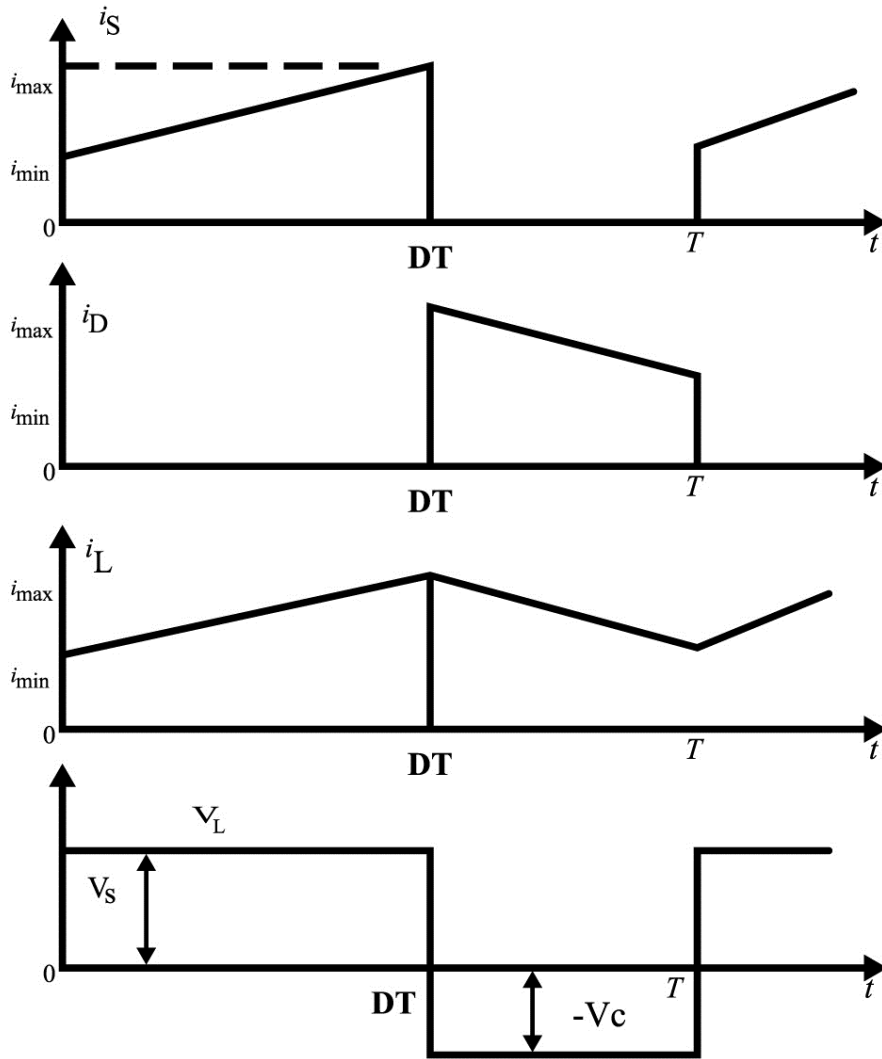
DC/DC boost konvertörün kontrolü sağlanırken yakıt hücresi çıkış gücü ile talep edilen güç karşılaştırılıp bunlar arasındaki hata oranı bir PI kontrolcüye girilir. Bu kontrol sayesinde talep edilen güç yakıt hücresinden yüke aktarılır.

Süperkapasitör ve batarya teknolojilerinden istenen gücü uygun bir şekilde DC baraya aktarmak için çift yönlü DC/DC dönüştürücüler (bidirectional DC/DC convertor) kullanılır. Özellikle aracın rejeneratif frenleme enerjisini geri kazanmak için kullanılan dönüştürücüler çift yönlü olmalıdır. Çalışmada çift yönlü dönüştürücü tipi olarak buck/boost DC/DC konvertör kullanılmıştır ve yapısı Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Buck/boost çift yönlü DC/DC konvertörün yapısı

Buck/boost çift yönlü DC/DC konvertör devresinde yarı iletken bir anahtarlama elemanı, diyot, bobin, kapasitör ve buna paralel bir direnç bulunmaktadır. Buck/boost konvertörler giriş geriliminin alternansını ters polariteye çeviren bir DC/DC dönüştürücüdür. Burada girişteki pozitif uç üst tarafta iken çıkışta alt tarafa geçerek gerilimin polaritesi değişmiştir. Devredeki yarı iletken anahtarlama elemanı bir sürücü devresi yardımı ile anahtarlanabilir özelliktedir. Çıkıştan elde edilen gerilim değeri ile talep edilen gerilim değeri arasındaki fark bir fark kuvvetlendirici ile bulunarak karşılaştırılır ve anahtarlama elemanın iletim veya kesim durumu kontrol edilir. Buck/boost çift yönlü DC/DC konvertörüne ait akım-gerilim karakteristikleri Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Buck/boost çift yönlü DC/DC konvertörünün akım-gerilim grafik eğrileri

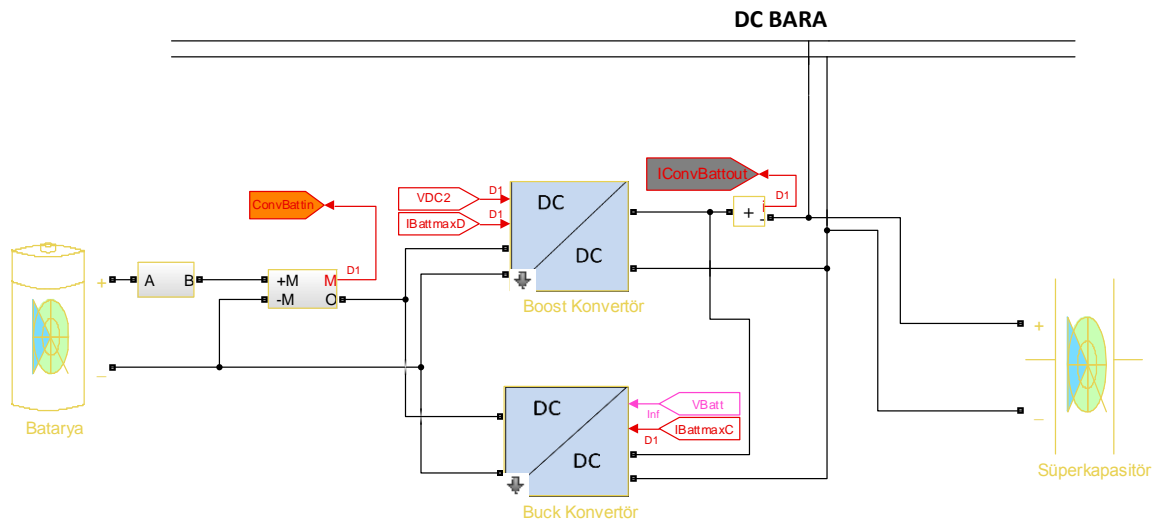
Burada anahtarın iletimde olması durumu gözlemlendiğinde kaynaktan sürekli akım çekildiği ve bobinin bu akımla beslendiği görülmektedir. i_s kaynak akımı, i_D ise diyot akımını temsil etmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi diyot akımı sadece anahtar kesimdeyken aktiftir. Bobin akımı i_L ise kaynak ve diyot akımlarının toplamıdır. Bobinin gerilim grafiği incelendiğinde ortalama geriliminin sıfır olması gerektiğinden dolayı pozitif ve negatif alternansların altında kalan alanlarının eşit olması gerekmektedir. Bu özelliğin sağlanabilmesi için Eş. 3.17'deki denklem elde edilir.

$$|V_S| * DT = |-V_C| * (T - DT) \quad (3.17)$$

Denklemden T bir periyodun değeri, D ise bir periyottaki doluluk oranıdır. Son olarak devrenin çıkış gerilimi V_S ve yük gerilimi V_y olmak üzere çıkıştaki yük üzerinde oluşan gerilimin değeri Eş. 3.18'de gösterilmiştir.

$$V_y = \frac{V_S * D}{1 - D} \quad (3.18)$$

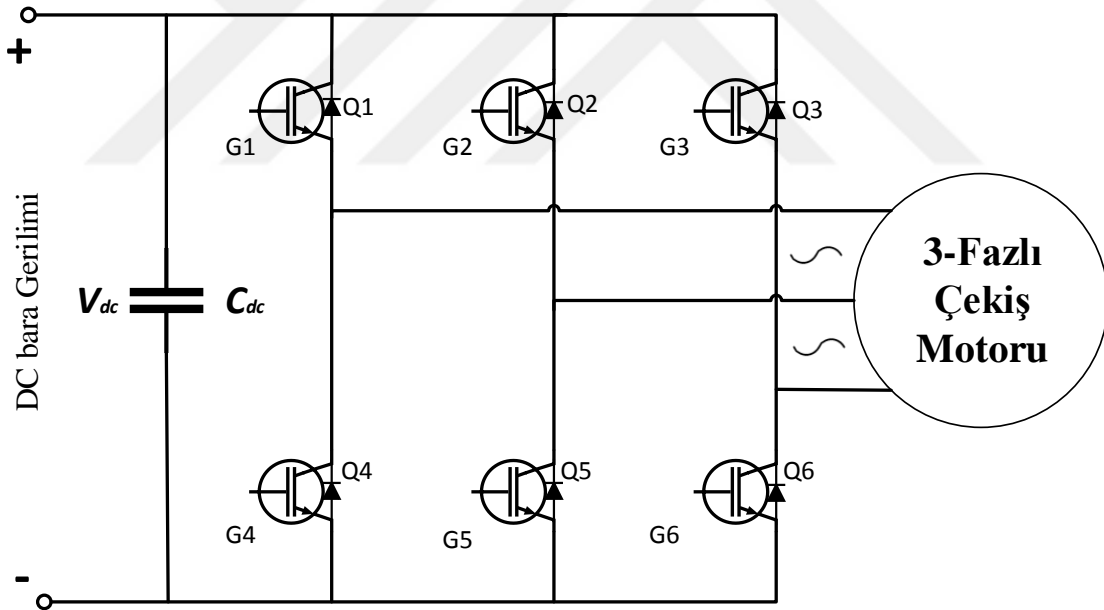
Çalışmada kullanılan buck/boost çift yönlü DC/DC konvertör MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuş ve Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Burada özellikle DC bara geriliminin kontrolünü süperkapasitör konvertörü sağlamaktadır. DC bara geriliminin sabit tutulması ve uygun bir şekilde DC/AC dönüştürücüsüne aktarılması oluşturulan kontrol stratejisinin hedeflerindedir.



Şekil 3.18. Buck/boost çift yönlü DC/DC konvertör

3.5. DC/AC Dönüştürücü (İnverter)

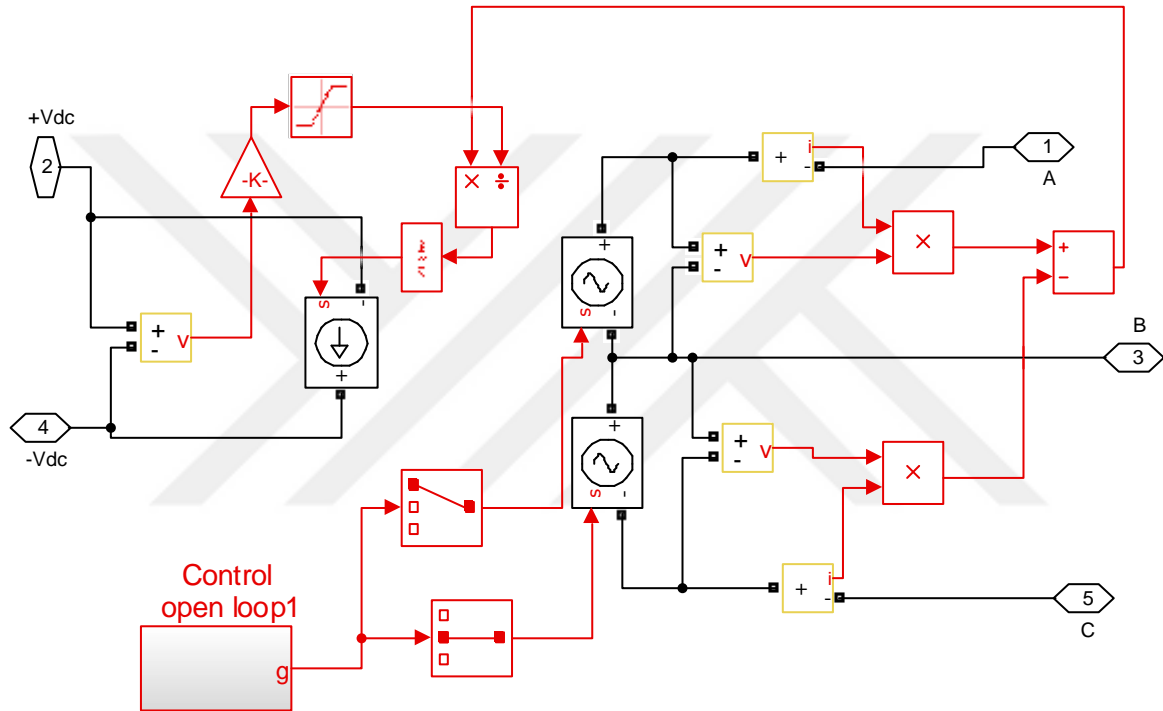
Hidrojen yakıt hücreli aracın üç fazlı çekiş motorunu DC baraya bağlayan üç fazlı çift yönlü DC/AC dönüştürücünün elektriksel devre şeması Şekil 3.19’da gösterilmiştir. Buradaki inverter devresi DC bara gerilimini üç fazlı ve üç seviyeli PWM’ye dönüştüren altı adet IGBT’yi içermektedir. Üç fazlı çekiş motorunun statoruna AC gerilim verilir ve çekiş motoru üç fazlı endüktif bir yük olarak hareket ettiğinden statora iletilen akım, üç seviyeli PWM AC geriliminin bir parçasıdır ve böylece mevcut dalga şekli sinüzoidal bir forma yakındır. Her bir IGBT'nin kendisi bir yayıcıdan toplayıcıya bağlı diyot içerir. Aynı zamanda altı diyot yavaşlama sırasında çekiş motorunun ürettiği rejeneratif güçten kaynaklanan üç fazlı AC voltajını dönüştürmek ve süperkapasitör ile bataryayı şarj etmek için kullanılan DC bara gerilimini azaltmak için üç fazlı bir doğrultucu olarak çalışır. Böylece önerilen üç fazlı DC/AC inverter aynı zamanda çift yönlü bir dönüştürücüdür.



Şekil 3.19. Üç fazlı çift yönlü DC/AC inverterin elektriksel devre şeması

Yavaşlama sırasında (rejeneratif frenleme periyodu) çekiş motoru torku emer ve invertere AC voltaj sağlar. İnverter motor tarafından üretilen enerjinin miktarını ve frenleme yoğunluğunu kontrol eder. Oluşan enerji aracın batarya ve süperkapasitör teknolojilerine şarj olarak uygulanır. Rejeneratif frenleme enerjisi hem aracın verimliliğini önemli ölçüde artırır

hem de aracın belirli bir batarya şarjı ile gideceği mesafeyi artırır. Devredeki büyük kondansatör DC/AC inverterin önemli bir parçasıdır. Bu kapasitörün devredeki rolü DC bara gerilimini ayırmak, anahtarlama dalgalanmasını sınırlamak ve en önemlisi de IGBT üzerindeki voltaj aşımını KAPALI konumundayken sınırlamaktır. Bu sırada kapasitör ile anahtarlama cihazları arasındaki ara bağlantı empedansını en aza indirmek de önemlidir. Önerilen üç fazlı çift yönlü DC/AC dönüştürücünün MATLAB/Simulink ortamında parametrelerinin girilmesiyle oluşturulan dinamik modeli Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Üç fazlı çift yönlü DC/AC inverterin dinamik modeli

3.6. Üç Fazlı Çekiş Motoru

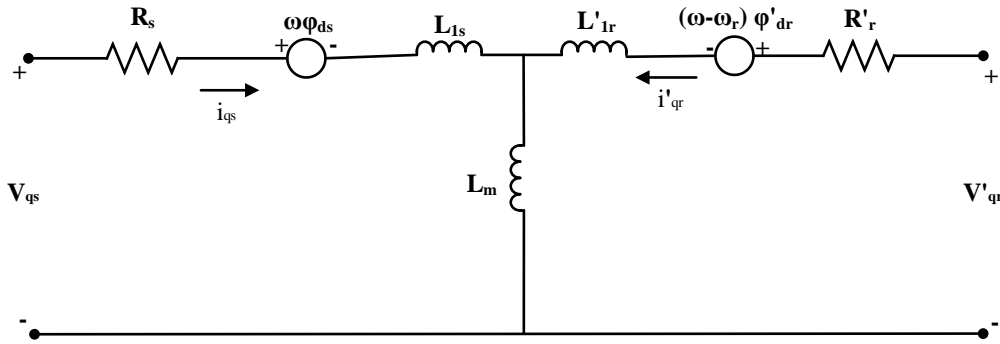
Basit ve sağlam yapısı, düşük maliyeti, bakım gereksiniminin az olması, yüksek güvenilirliğe sahip olması, ek bir başlangıç motoruna gerek duymaması ve senkronize çalışmaya ihtiyaç duymaması gibi özelliklerinden dolayı hidrojen yakıt hücreli araçların çekiş motorlarında üç fazlı AC asenkron (indüksiyon) motorlar kullanılmaktadır. Üç fazlı asenkron motorun statoru üç faz sargılarını taşımak için oluklardan (yarık) oluşmuştur. Asenkron motorun üç fazlı sarımı bir döner manyetik alan oluşturabilmesi için oluklara yerleştirilmiştir ve farklı sayıda kutup için sarılmıştır. Sargılar geometrik olarak 120 dereceye ayrılmıştır. Üç fazlı asenkron motorun rotoru ise iletkenleri taşıyan paralel oluklara sahip silindirik çekirdekte oluşmuştur ve elektromanyetik devrenin dönen kısmıdır.

İletkenler her bir oluğa yerleştirilmiş ve uç halkalar tarafından kısa devre edilmiş bakır veya alüminyum çubuklardır. Oluklar milin eksenine tam olarak paralel değil biraz eğridirler. Bunun amacı manyetik uğultu sesini azaltmak ve motorun durmasını engellemektir.

Üç fazlı asenkron motorun rotoru hiçbir zaman senkron hıza ulaşamaz. Manyetik alanın dönme hızı olan senkron hız ile rotorun hızı arasındaki fark kayma olarak adlandırılır. Senkron hız frekans ile doğru, kutup çifti sayısı ile ters orantılıdır. Üç fazlı asenkron motordaki kayma Eş. 3.19'da gösterilmiştir.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.19)$$

Eşitlikteki s kaymayı, n_s senkron hızı ve n_r ise rotorun hızını göstermektedir. Önerilen üç fazlı çekiş motorunun rotoru sincap kafesli seçilmiştir ve Şekil 3.21'de q eksenli eşdeğer devresi gösterilmiştir ve çekiş motorunun q eksenine göre eşdeğer devre parametreleri aşağıda hesaplanmıştır (Chapman, 2005).



Şekil 3.21. Üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motorunun eşdeğer devresi (q eksenli)

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + d\phi_{qs}/dt + \omega\phi_{ds} \quad (3.20)$$

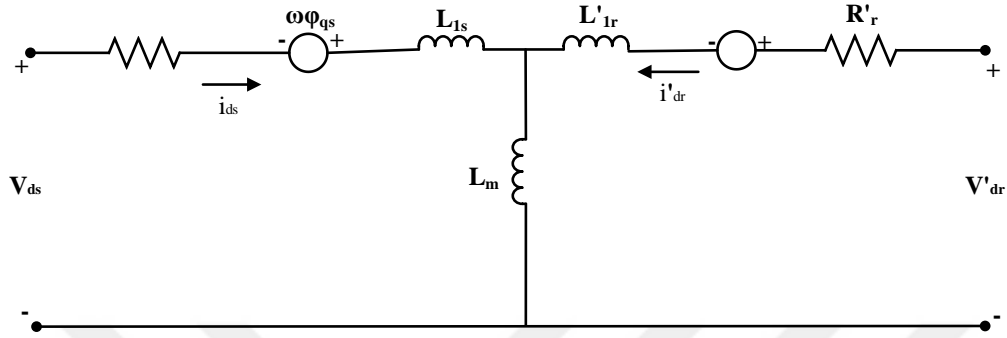
$$V_{ds} = R_s i_{ds} + d\phi_{ds}/dt - \omega\phi_{qs} \quad (3.21)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + d\phi'_{qr}/dt + (\omega - \omega_r)\phi'_{dr} \quad (3.22)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + d\phi'_{dr}/dt - (\omega - \omega_r)\phi'_{qr} \quad (3.23)$$

$$T_e = 1.5p(\phi_{ds}i_{qs} - \phi_{qs}i_{ds}) \quad (3.24)$$

Yine üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motorunun d eksenine göre eşdeğer devresi Şekil 3.22’de gösterilmiştir ve çekiş motorunun d eksenine göre eşdeğer devre parametreleri de aşağıda hesaplanmıştır (Chapman, 2005).



Şekil 3.22. Üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motorunun eşdeğer devresi (d eksen)

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (3.25)$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (3.26)$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (3.27)$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (3.28)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (3.29)$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (3.30)$$

Burada ω referans alınan açısal hız ve ω_r ise elektriksel açısal hız ifadesidir.

Giriş gerilimlerini (abc sabit eksen) dq döner eksenine ve çıkış akımlarını (dq döner eksen) abc sabit eksenine dönüştürmek için kullanılan rotor, stator ve senkron parametre değerleri MATLAB/Simulink ortamında hazırlanmıştır. Asenkron makinenin faz-faz gerilimlerine uygulanan abc-dq eksen dönüşümleriyle ilgili parametre eşitlikleri aşağıda verilmiştir (Chapman, 2005).

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cos \theta & \cos \theta + \sqrt{3} \sin \theta \\ 2 \sin \theta & \sin \theta - \sqrt{3} \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{abs} \\ V_{bcs} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\begin{bmatrix} V'_{qr} \\ V'_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cos \beta & \cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta \\ 2 \sin \beta & \sin \beta - \sqrt{3} \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{abr} \\ V'_{bcr} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Burada β açısı, açısal pozisyon (θ) ile rotorun elektriksel açısal pozisyonu (θ_r) arasındaki farktır ve Eş. 3.33'te gösterilmiştir.

$$\beta = \theta - \theta_r \quad (3.33)$$

Asenkron makinenin faz akımlarına uygulanan dq-abc eksen dönüşümleriyle ilgili parametre eşitlikleri aşağıda verilmiştir (Chapman, 2005).

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\cos \theta + \sqrt{3} \sin \theta & -\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

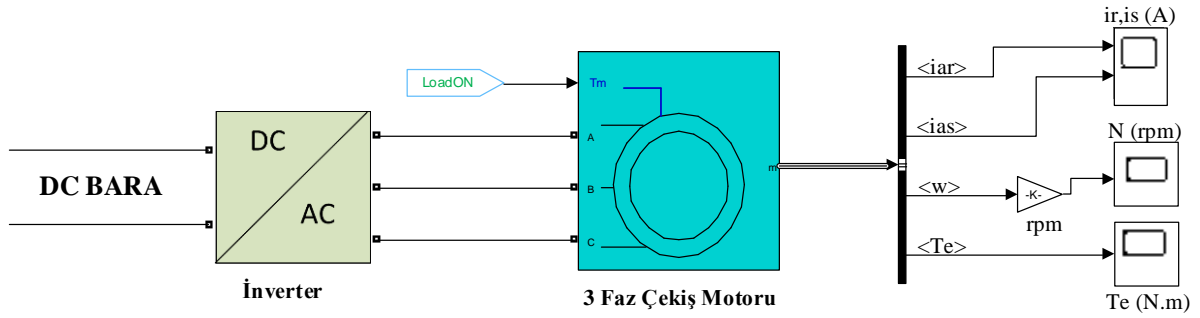
$$\begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta & -\sqrt{3} \cos \beta - \sin \beta \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$i_{cs} = -i_{as} - i_{bs} \quad (3.36)$$

$$i'_{cr} = -i'_{ar} - i'_{br} \quad (3.37)$$

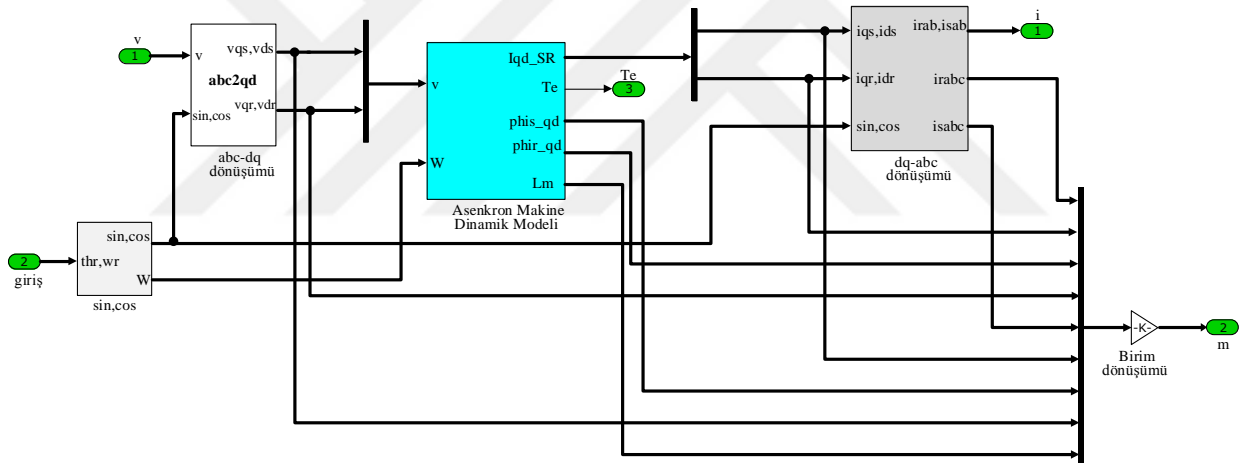
Üç fazlı çekiş motorunun parametreleri belirlendikten sonra DC/AC inverterden gelen AC gerilim ile çalıştırılır. Motorun tork girişi T_m ile gösterilmiştir ve birimi newton.metre (N.m)'dir. Önerilen üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun hem motor hem de generatör olarak çalışma özelliği sayesinde araçta rejeneratif frenleme enerjisi de depolanabilmektedir. Asenkron motorun rotorunun hızı pozitif olduğunda mekanik tork sinyali işaretine bakılacak olursa pozitif tork sinyali motor olarak çalıştığını, negatif sinyal ise generatör olarak çalıştığını göstermektedir.

Çekiş motorunun rejeneratif frenleme özelliği, çekiş motoruna enerjiden tasarruf etme olanağı sağladığı gibi aynı zamanda frenlemede pürüzsüzlük de sağlar. Ayrıca bu, mekanik frenleme sisteminde aşınma ve yıpranmayı da önleyen en önemli özelliktir. Bir indüksiyon motorunun mekanik hızı eş zamanlı hızdan daha fazlaysa generatör olarak çalışır. Çekiş motorunun frenleme konumu esnasında statora uygulanan frekans, mekanik hızın altına indirilir ve gerilim de frekansla birlikte azalır. Önerilen üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motorunun MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan modeli Şekil 3.23'te gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motoru

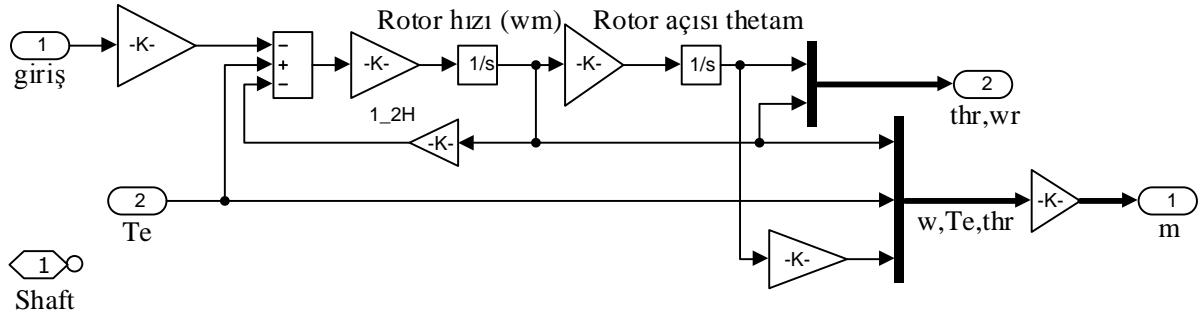
Önerilen çekiş motorunun parametreleri belirlenirken öncelikle elektriksel ve mekanik modellemesinin yapılması gerekmektedir. Hem elektriksel hem de mekanik model tasarlandıktan sonra parametrelerin simülasyon sonuçları elde edilebilir. Üç fazlı çekiş motorunun elektriksel modeli Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24. Üç fazlı çekiş motorunun elektriksel modeli

Elektriksel modelde rotor, stator ve senkron giriş parametreleri oluşturulduktan sonra abc-dq dönüşümü yapılmış ve eşitliklerle elde edilen asenkron makinenin dinamik modelinde faz gerilimlerine uygulanan değişkenler yerleştirilmiştir. Daha sonra faz akımlarına uygulanan dq-abc eksen dönüşümleri ile asenkron makinenin elektriksel modelindeki gerilim ve akım değişkenleri elde edilmiştir. Bu değişkenlerin elektriksel eşdeğer devre parametreleri olarak hesaplanmasıyla hidrojen yakıt hücresi aracının çekiş motoru modeli tasarlanmıştır.

Asenkron makine olarak çalışan çekiş motorunun mekanik bileşenleri ve parametreleri hesaplanarak Şekil 3.25'te oluşturulan mekanik modelde yerine konulmuştur.



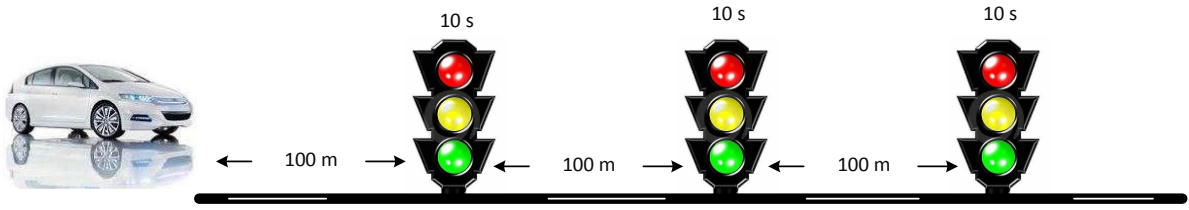
Şekil 3.25. Üç fazlı çekiş motorunun mekanik modeli

Burada T_e elektromanyetik torku, s kaymayı, thr elektriksel rotor açısı pozisyonunu, w_r elektriksel açısal hızı ve w_m ise rotorun açısal hızını temsil etmektedir. Mekanik ve elektriksel modelden elde edilen değerler ile asenkron makinenin generatör ya da motor olarak çalıştırılması gerçekleştirilmiştir. Sürücünün hızlanma, yavaşlama, ani hız veya fren tepkileri için talep edilen güç aslında sistemde çekiş motorunun hızlı dönmesi, yavaşlaması, generatör olarak çalışması veya frenleyip durması olarak algılanır ve bu hareketleri sağlayacak güç de yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitörden karşılanır. Hem aracın enerji depolama teknolojileri hem de çekiş motoru gerçek sürüş koşullarında oluşturulan yol modellerine göre tepki vermiştir.

3.7. Yol Modelleri

Aracın enerji tüketimini ve yakıt tasarrufunu etkileyen parametreleri belirlerken aracın menzili boyunca geçtiği yol koşulları önemlidir. Bir hidrojen yakıt hücreli araç için sistem tasarımı gerçekleştirilirken, aracın gerçek sürüş ortamında karşılaşılabileceği yol koşulları modellenmiş ve araç buna göre optimize edilmiştir. Bunun için "dur-kalk yol modeli" ve "yokuş iniş-çıkış yol modeli" olarak iki farklı yol modelini incelemek uygun görülmüştür.

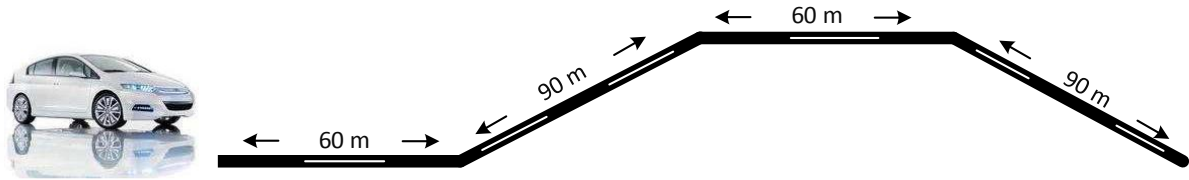
Dur-kalk yol modeli, hidrojen yakıt hücreli araçların kentsel trafiğe girdiklerinde en sık karşılaştıkları yol koşullarının modellenmesiyle oluşturulmuştur. Kentsel ulaşımında araçlar yoğun trafiğe maruz kalabilir. Ayrıca, sürüş esnasında trafik ışıkları ile karşılaşabilirler. Araç bir trafik ışığından diğerine geçerken, aracın momenti durma, kalkış ve hızlanma konumları ile artar. Bu sırada, elde edilen kinetik enerji, boşa harcanmaması için diğer trafik ışığına yaklaşırken rejeneratif fren enerjisiyle araçta depolanır ve araç kalkış durumunda bu enerjiyi tekrar kullanır. Şekil 3.26'da dur-kalk yol modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Dur-kalk yol modeli

Tasarlanan dur-kalk yol modeline göre, araç toplamda 300 metrelik düz bir yolu 100 metre aralıklarla 3 kez durarak tamamlamıştır. Her bir trafik ışığında bekleme süresi ise 10 saniye olarak belirlenmiştir.

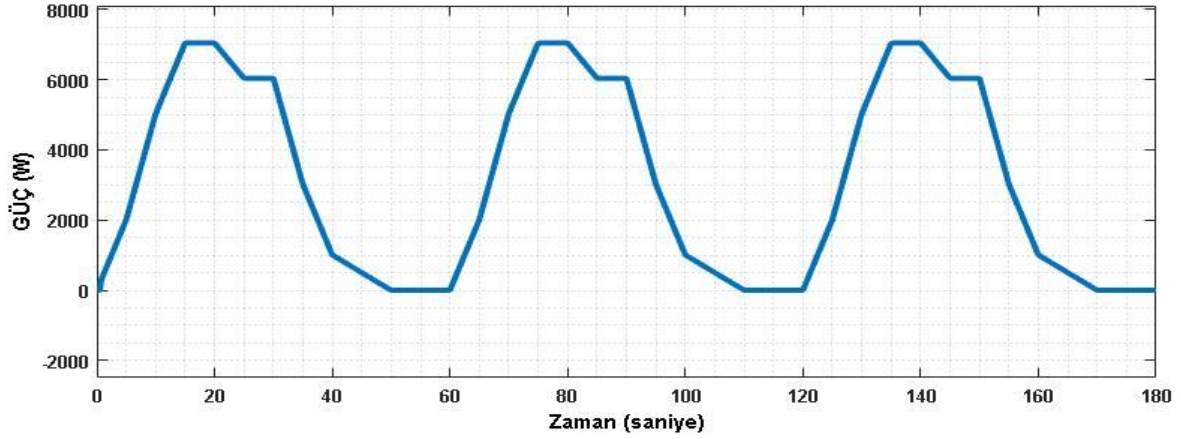
Gerçek sürüş ortamındaki en yaygın yol modellerinden birisi de yokuş iniş-çıkış yol modelidir. Bir hidrojen yakıt hücreli araç yokuş yukarı çıkarken ya da hızlı bir şekilde ivmelenirken çok fazla güç ister. Bu talebi karşılamak için batarya ve süperkapasitör, yakıt hücresini destekler. Bu arada, aracın potansiyel enerjisi artar ve daha fazla hidrojen tüketilir. Araç yokuş aşağı gittiğinde ise, kazanılan potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşmeye başlar. Burada dur-kalk yol modelinde olduğu gibi, frenleme sırasında aracın kaybedeceği kinetik enerji de rejeneratif frenleme ile araçta depolanır. Buna göre aracın yokuş iniş-çıkış yol modeli Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



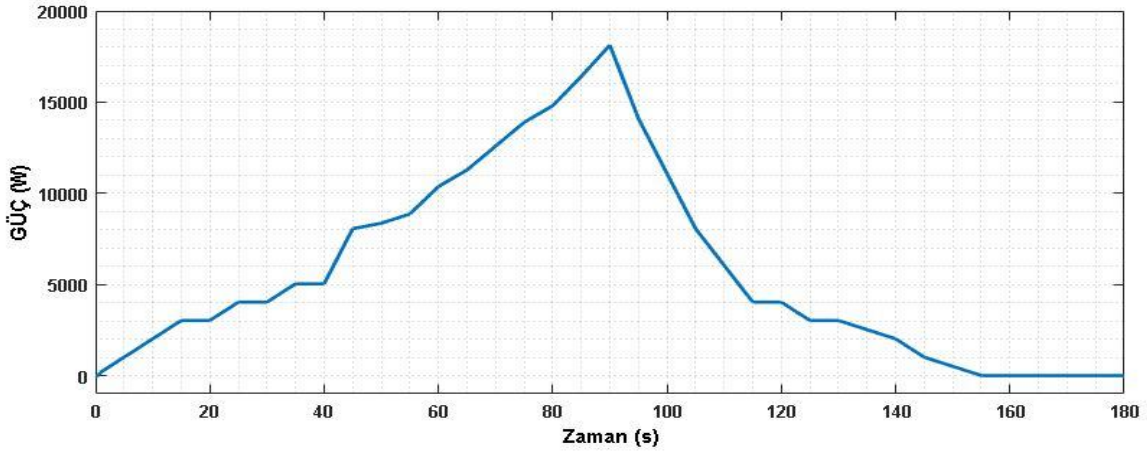
Şekil 3.27. Yokuş iniş-çıkış yol modeli

Tasarlanan yokuş iniş-çıkış yol modeline göre aracın çekiş motorundaki yükü azaltmak için, araç hareket ettikten sonra 60 metrelik düz yolda hızlanır. Daha sonra araç 90 metrelik bir rampayı çıkmıştır. Rampanın sonunda, aracın kazanımlarını gözlemlemeyi kolaylaştırmak için araç 60 metrelik düz bir yolu almıştır. Bu mesafenin sonunda araç, 90 metrelik rampadan inerek yol modelini tamamlamıştır.

Burada tasarlanan yol modelleri aracın gerçek sürüş ortamında en fazla karşılaşılabileceği koşullardır. Buna göre aracın talep edeceği güç diyagramları ise Şekil 3.28’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.28. Güç profilleri: a) Dur-kalk yol modeli, b) Yokuş iniş-çıkış yol modeli

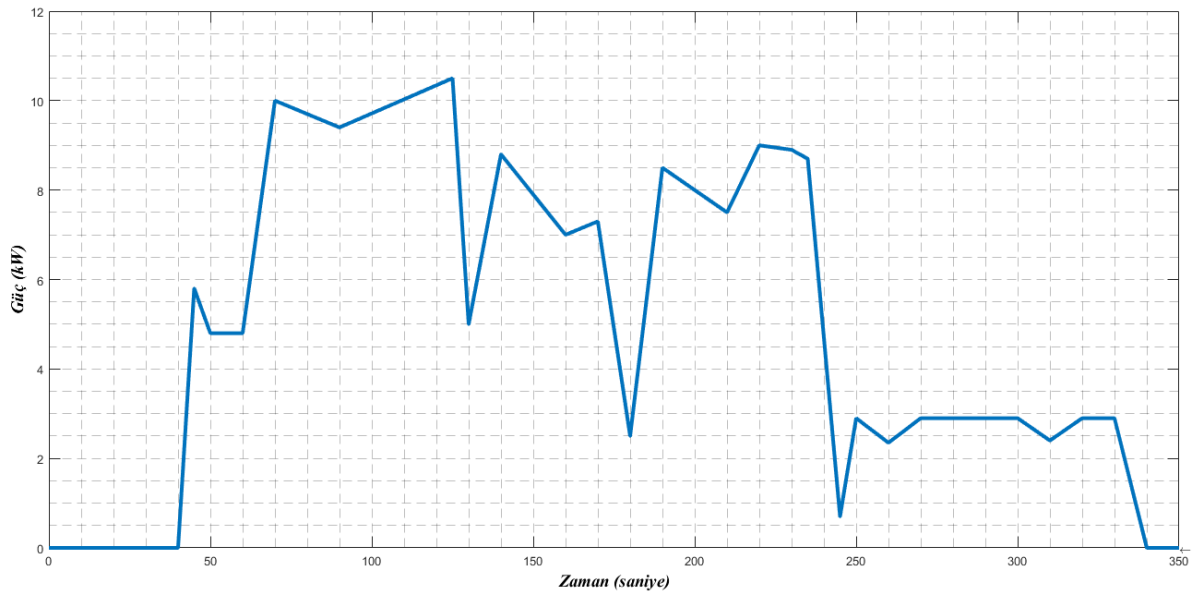
Tasarlanan yol modellerinin yük profilleri gösterilmiştir. Buna göre dur-kalk yol modelinde aracın kalkış esnasından üç farklı trafik lambası geçişine kadar 300 metrelik mesafeyi 180 saniyede alması tasarlanmıştır. Yokuş iniş-çıkış yol modelinde ise aracın 300 metrelik rampa ve düz yol geçişlerini yine 180 saniyede alarak aracın talep ettiği güç belirlenmiştir.

3.8. Hidrojen Yakıt Hücresel Araç Sistemi için Oluşturulan Kontrol Stratejisi

Bünyesinde genellikle hidrojen yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör bulunan hidrojen yakıt hücresel araçlarda geliştirilecek kontrol stratejileri, enerji verimliliği ve yakıt tasarrufu açısından çok önemlidir. Aracın talep ettiği gücü sağlayan ve birincil enerji kaynağı olarak sisteme entegre edilen yakıt hücresinin enerji ve güç bakımından veriminin düşmesiyle

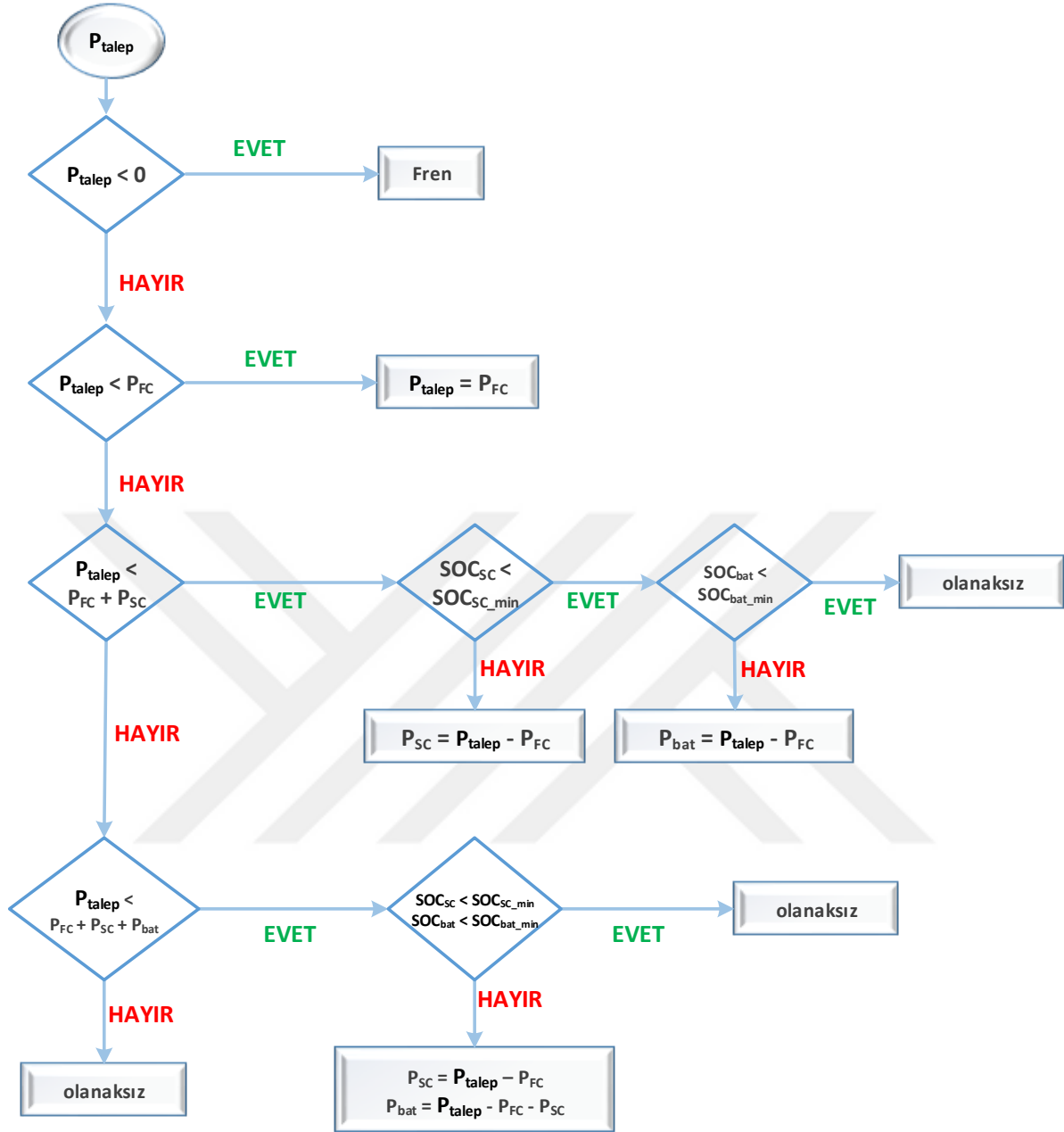
batarya ve süperkapasitör teknolojileri devreye girerek aracın sürüş verimliliğini dengeleyecek ve yakıt tasarrufu sağlayacaktır.

Aracın sürüş koşullarına göre kalkış momenti, sabit hızlı hareketi, ivmeli hareketi, hızlanması, yavaşlaması, ani hızlanma veya yavaşlama hareketi ile yokuş çıkış ve iniş hareketi değişimleri sürücünün komutlarını değiştirecek ve aracın güç taleplerindeki değişimleri oluşturacaktır. Bir hafif hidrojen yakıt hücresel aracın yük profili Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Hafif hidrojen yakıt hücresel aracın yük profili

Oluşturulan kontrol stratejisine göre araca sırasıyla yakıt hücresi, süperkapasitör ve batarya güç sağlar. Çekiş için yakıt hücresinin doğrudan kullanımı enerji açısından daha verimlidir. Dolayısıyla yakıt hücresi birincil enerji kaynağı olarak kullanılır. Güç paylaşımı ve şarj etme stratejisi, bataryaların daha fazla enerji yoğunluğuna ve süperkapasitörlerin daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olması gerçeğine dayanmaktadır. Ayrıca süperkapasitör, batarya ile kıyaslandığında kolayca şarj edilebileceği ve deşarj olabileceğinden dolayı sadece yüksek güç talebi durumunda batarya devreye alınmaktadır. Güç sistemlerinin elektronik kontrol akış şeması Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



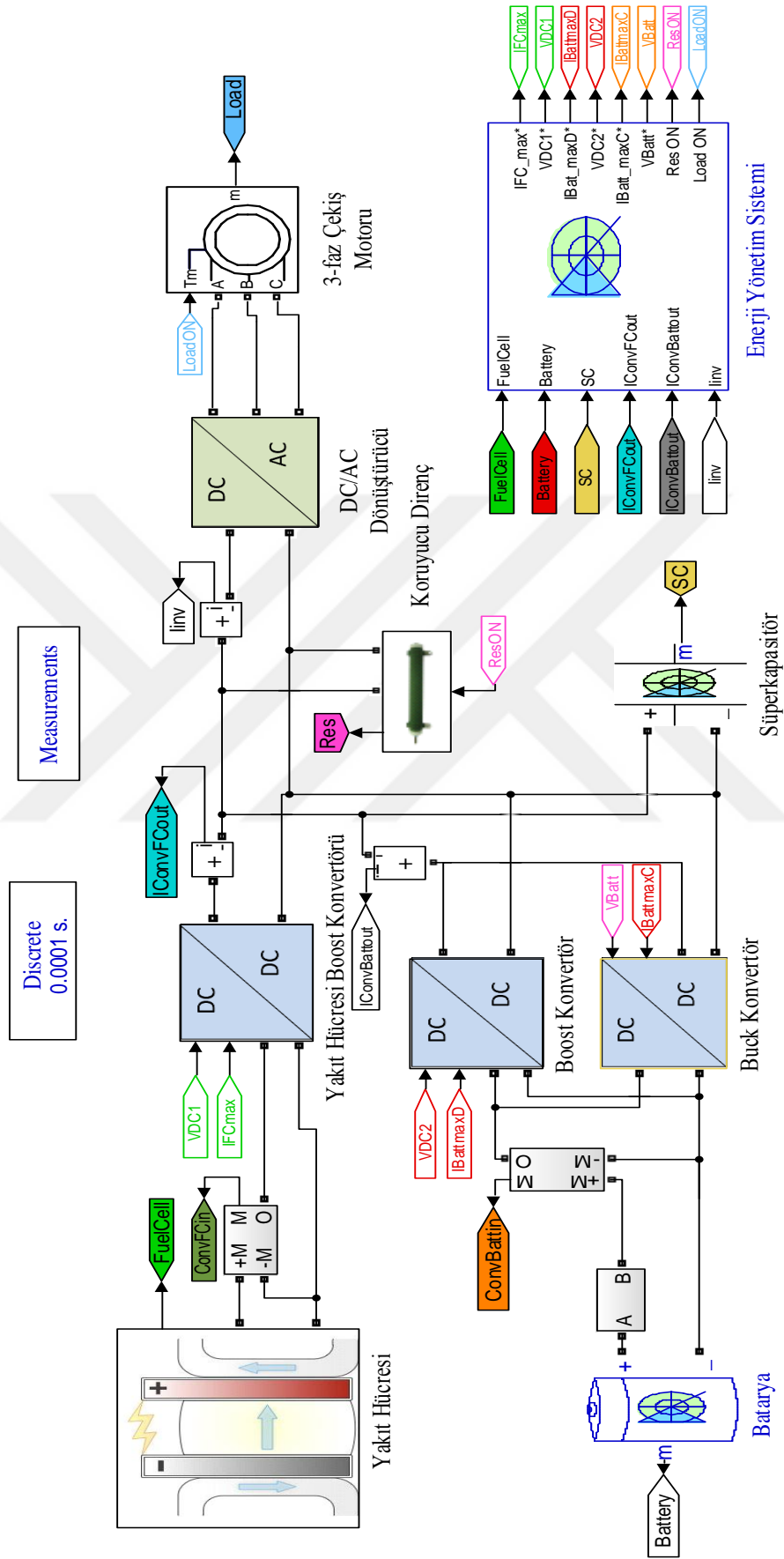
Şekil 3.30. Güç sistemlerinin elektronik kontrol akış şeması

Sistemde mevcut devre bileşenlerinin gücü, akış şemasındaki talep edilen gücü analiz etmek için dikkate alınmalıdır. Eğer yakıt hücresi gücü talep edilen güçten büyükse aracın enerji gereksinimini sadece yakıt hücresi temin edebilir. Bununla birlikte eğer yakıt hücresi gücü talep edilen güçten küçükse nominal güç yakıt hücresinden temin edilir ve kalan kısım ise süperkapasitörden sağlanır. Talep edilen güç yakıt hücresi ve süperkapasitör gücünü de aşarsa devreye batarya girer. Bu işlemler gerçekleştirilirken batarya ve süperkapasitör uygun şarj aralıklarında çalışacak şekilde ayarlanmalıdır. Eğer batarya ve süperkapasitör şarj

durumları uygun aralıklarda tutulmazsa kontrol elektroniğinde istenmeyen durumlar oluşabilir.

Aynı zamanda talep edilen güç yakıt hücresi gücünden düşükse ve araç fren yapıyorsa araçta ikincil enerji depolama sistemleri olarak kullanılan batarya ve süperkapasitör teknolojileri, yakıt hücresinin kalan enerjisiyle şarj edilebilir. Aracın yavaşlaması zayıf olduğunda rejeneratif frenleme enerjisi bataryayı yeniden şarj ederken güçlü zayıflama veya ani frenlemede süperkapasitör yeniden şarj olur. Böylece hidrojen yakıt hücreli aracın kontrol elektroniği tasarlanmış ve kontrol stratejisi belirlenmiş olur.

Modellenen hidrojen yakıt hücreli araç konfigürasyonu MATLAB/Simulink ortamında oluşturularak aracın gerçek yol koşullarında karşılaşılabileceği tüm durumlar analiz edilmiştir. Buna göre bir hidrojen yakıt hücreli aracın enerji yönetim sistemi MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.31’de gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Bir hidrojen yakıt hücreli aracın enerji yönetim sistemi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

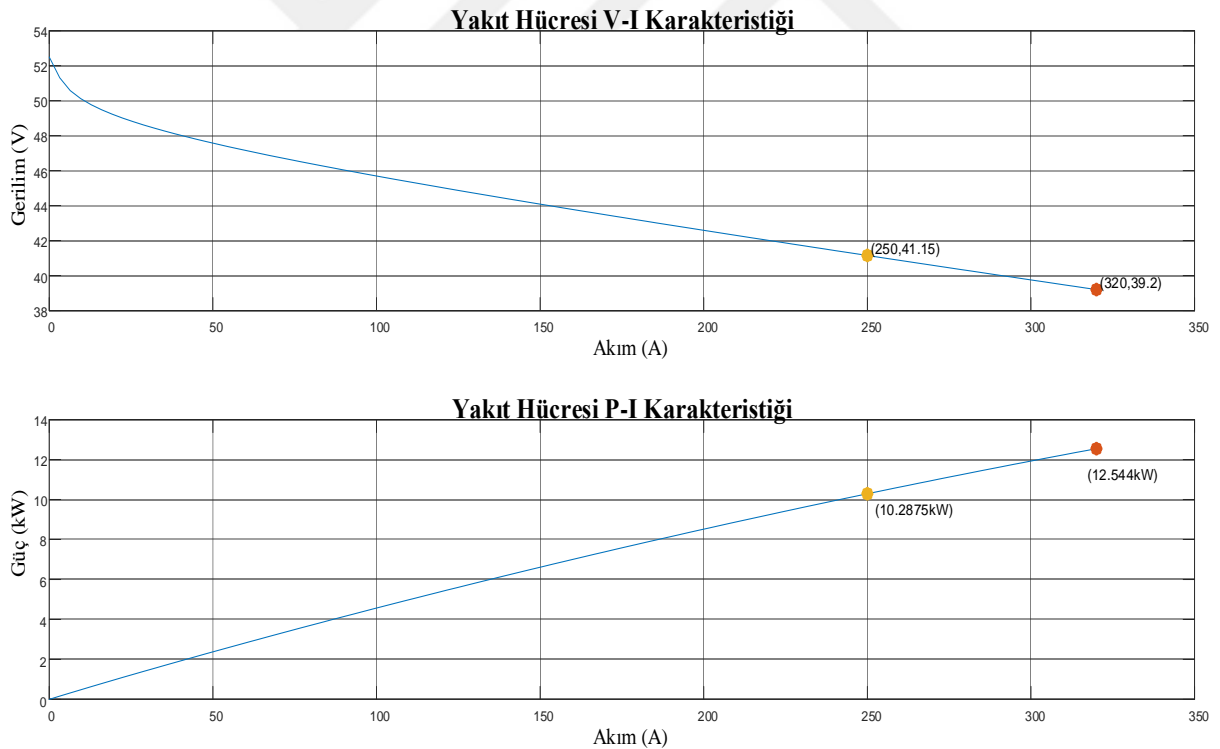
Bu bölümde hidrojen yakıt hücreli aracın dinamik modellerinin MATLAB/Simulink ortamında tanımlanmasıyla birlikte oluşan simülasyon sonuçları analiz edilmiştir. Bir hidrojen yakıt hücresinde bulunan yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör teknolojileri ile bunları DC baraya bağlayan güç biçimlendirme üniteleri ve aracın üç fazlı bir AC çekiş motorunun oluşturduğu enerji yönetim sistemine göre kontrol stratejisi tasarlanmıştır. Oluşturulan kontrol stratejisinin enerji yönetim sistemi algoritması hafif bir hidrojen yakıt hücreli aracın şehir içi yol koşullarına göre ilk önce ayırık zamanda 350 saniye çalıştırılmıştır. Aracın çeşitli yol koşullarına adapte olarak çalıştırılmasıyla elde edilen simülasyon sonuçlarında oluşturulan kontrol stratejisinin ne kadar verimli olduğu da gözlemlenmiş ve literatüre katkısı belirtilmiştir. Burada ilk bileşen olarak kullanılan PEM yakıt hücresi parametreleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. PEM yakıt hücresi parametreleri

PEM Yakıt Hücresi Parametreleri		PEM Yakıt Hücresi Sinyal Değişim Parametreleri	
Yakıt Hücresi Nominal Gücü	10287.5 W	Yakıt Bileşimi [x_H₂]	% 99.95
Yakıt Hücresi Maksimum Gücü	12544 W	Oksidan Bileşimi [y_O₂]	% 21
Yakıt Hücresi Direnci	0.0245 Ω	Nominal Yakıt Akışı	114.9 lpm
Hücre Sayısı	65	Maksimum Yakıt Akışı	147.1 lpm
Nominal Hidrojen Kullanımı	% 98.98	Nominal Hava Akışı	732 lpm
Nominal Oksidan Kullanımı	% 42.88	Maksimum Hava Akışı	937 lpm
Nominal Yığın Verimi	% 50	Yakıt Besleme Basıncı	1.16 bar
Çalışma Sıcaklığı	45 °C	Hava Besleme Basıncı	1 bar

Çalışmada kullanılan PEM yakıt hücresinin nominal gücü 10287.5 W ve hücre sayısı 65'tir. Yakıt hücresinin nominal hidrojen kullanımı % 98.98 olarak seçilirken nominal oksidan kullanımı % 42.88 olarak gösterilmiştir. Burada asıl etken yakıt hücresi çalışma prensibi göz önüne alındığında iki hidrojen ve bir oksijen kullanılmasıdır.

PEM yakıt hücresinin dinamik modelinde yerine konulan parametreler, yakıt hücresi gerilim, akım, güç ve yakıt tüketimi değişimlerinin gözlemlenmesini sağlamıştır. Yakıt hücresinin gerilim, akım ve güç karakteristikleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Buna göre yakıt hücresi nominal gerilimi 41.15 V iken 250 A akım çekmektedir. Yakıt hücresi maksimum 320 A akım çekerken, 39.2 V gerilime sahiptir. Yakıt hücresinin nominal akım noktasındaki gücü 10.2875 kW ve maksimum akım noktasındaki gücü ise 12.544 kW olarak görülmektedir. Böylece aracın güç taleplerine göre yakıt hücresinin nominal ve tepe değerleri belirlenmiş ve kontrol stratejisinde kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Yakıt hücresi gerilim, akım ve güç karakteristiği

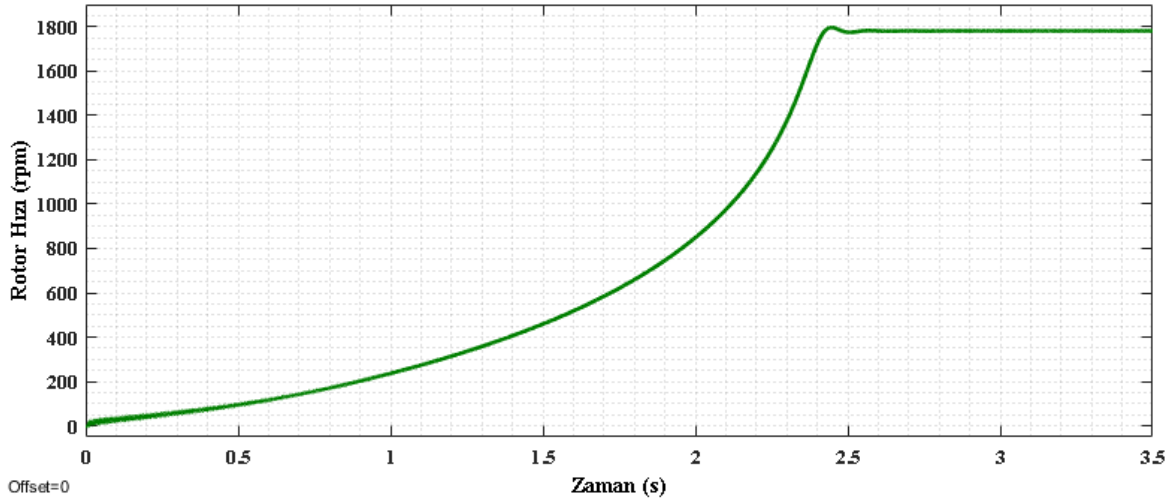
Hidrojen yakıt hücreli aracın yük bileşenlerinin tanımlanabilmesi için üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motoru kullanılmış ve parametreleri belirlenerek simülasyonu yapılmıştır. Çekiş motorunun yakıt hücresi ve enerji depolama teknolojileriyle uyumlu bir şekilde çalışabilmesi için DC/AC inverter kullanılmıştır.

DC baradaki gerilimi çekiş motoruna doğru bir şekilde verebilmek için kullanılan inverterin de kontrolü yapılmıştır. Buna göre DC/AC inverter 6 adet IGBT ile PWM kontrollü olarak çalışmaktadır. Sürücüden gelen güç taleplerini çekiş motoruna ileten ve çekiş motorundan da generatör özelliği sayesinde rejeneratif frenleme ile batarya ve süperkapasitöre enerji sağlanmasında rol oynayan DC/AC inverterin çekiş motoruyla uyumlu çalışması hem hidrojen yakıt hücresi aracın güç bileşenlerinin kontrolünde hem de yakıt tasarrufunda önemli rol oynamaktadır. Önerilen üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motorunun MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motorunun parametreleri

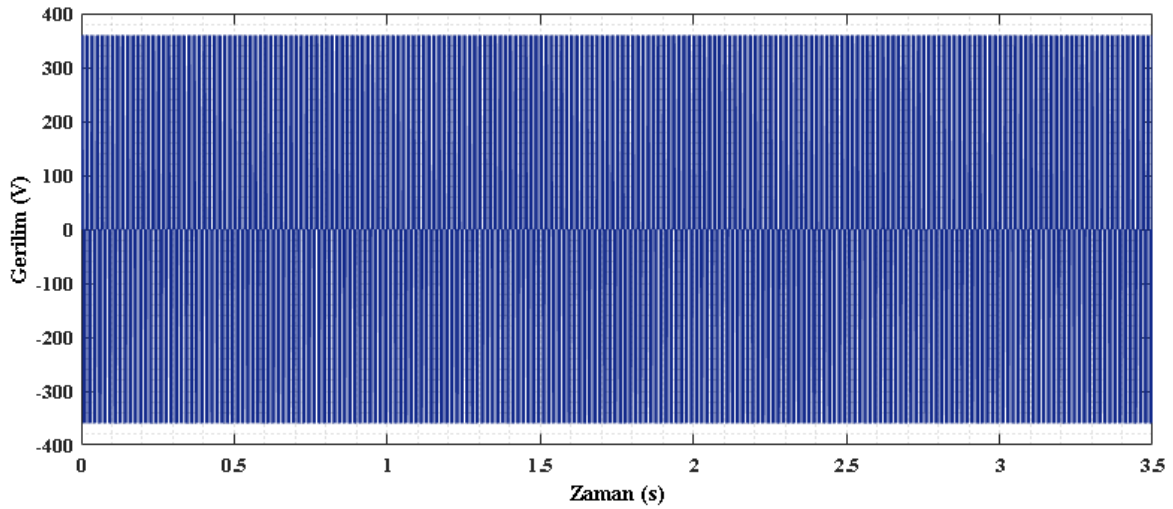
Üç Fazlı Çekiş Motorunun Blok Parametreleri			
Rotor Tipi	Sincap Kafesli	Rotor Direnci	0.1645 Ω
Motor Gücü	20 HP	Rotor Endüktansı	2.191 mH
Fazlar arası Gerilim	460 V	Ortak Endüktans	76.14 mH
Frekans	60 Hz	Sürtünme Faktörü	0.01771 N.m.s
Rotor Hızı	1760 rpm	Kutup Sayısı	2
Stator Direnci	0.2761 Ω	Mekanik Giriş	Tork (T_m)
Stator Endüktansı	2.191 mH	Referans Çerçevesi	Stator

20 HP gücündeki çekiş motorunun rotoru sincap kafesli ve rotor hızı 1760 rpm seçilmiştir. Fazlar arası gerilim 460 V olarak belirlenmiştir. 2 kutuplu ve 60 Hz frekansa sahip asenkron motorun kayma değeri Eş. 3.19’dan % 2.2 olarak bulunur. Hem motor hem de generatör olarak çalışabilen çekiş motorunun araçtan güç çekerken ve fren yaparken ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekir. Asenkron makine motor olarak çalıştırıldığında rotor hızının zamana göre grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



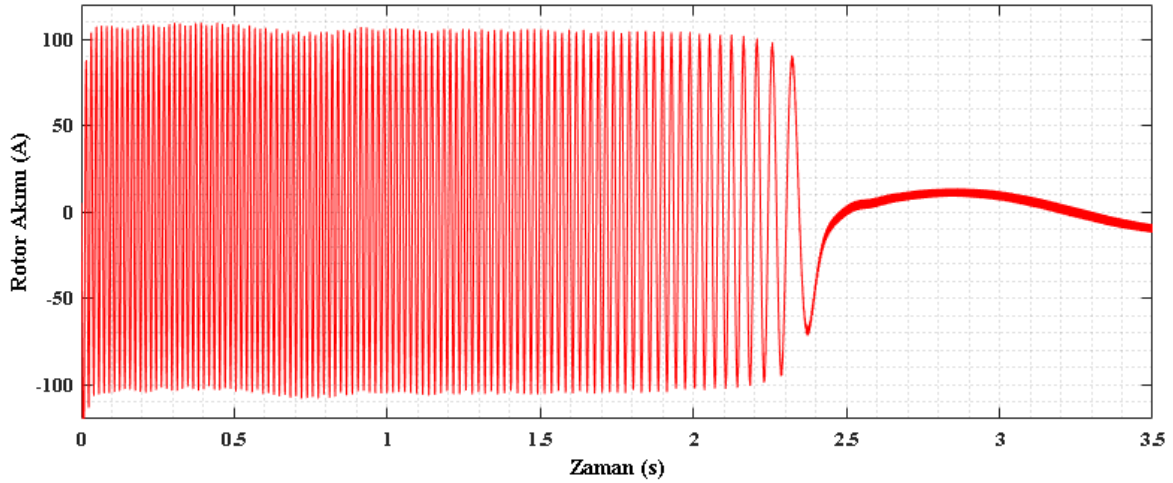
Şekil 4.2. Asenkron makine motor olarak çalıştırıldığında oluşan rotor hızı (rpm)

Motor olarak çalışan çekiş motorunun rotoru hızlanmaya başlayarak bir süre sonra nominal hızı olan 1760 rpm değerine ulaşmıştır. Sincap kafesli asenkron motorların üstünlükleri materyal ve yöntem bölümünde anlatılmıştır. Hem elektrikli hem de hibrid otomobillerde elektrik motoru olarak sincap kafesli asenkron motorlar oldukça yaygın kullanılmaktadır. Ayrıca çalışmada önerilen üç fazlı asenkron çekiş motorunun fazlar arası gerilimleri abc-dq eksen dönüşümüyle tasarlanmış ve Şekil 4.3'te simülasyon sonucu gösterilmiştir.

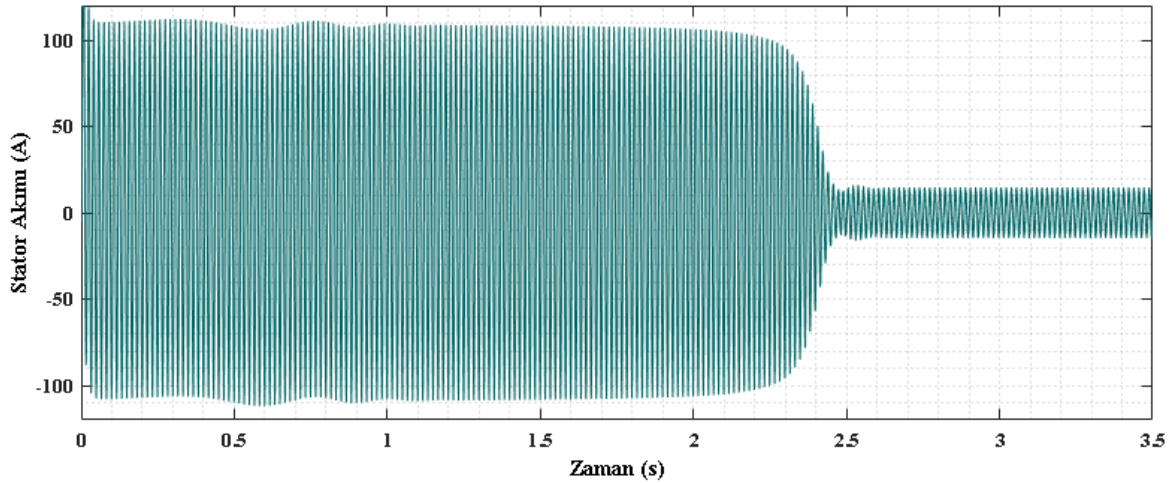


Şekil 4.3. Üç fazlı çekiş motorunun fazlar arası gerilimi (V_{ab})

Çekiş motorunun faz gerilimlerine uygulanan abc-dq eksen dönüşümü ile rotor, stator ve senkron parametreleri belirlenerek uygun şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca asenkron makine motor olarak çalıştırıldığında faz akımlarına uygulanan dq-abc eksen dönüşümüne göre rotor akımı Şekil 4.4'te ve stator akımı da Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

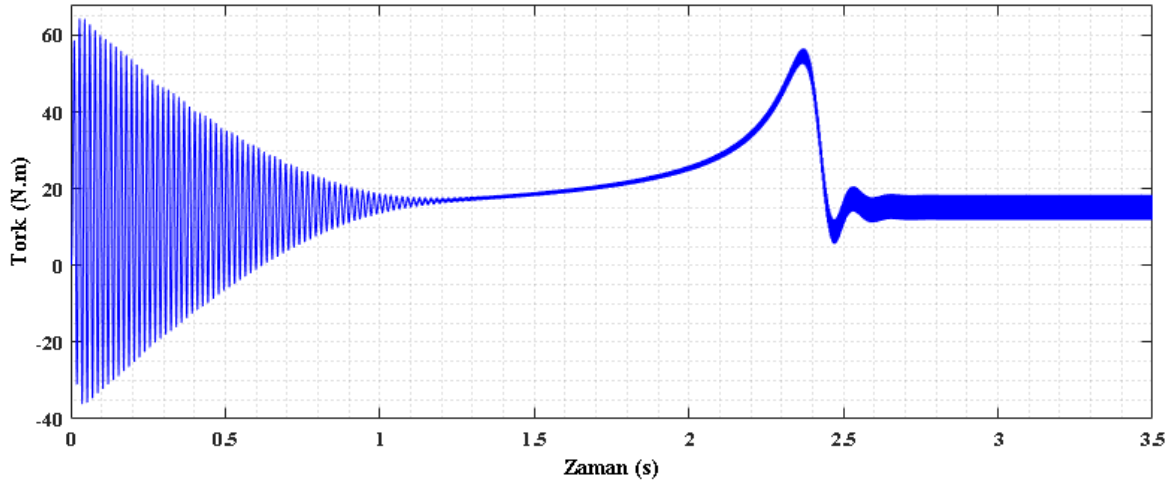


Şekil 4.4. Asenkron makine motor olarak çalıştırıldığında oluşan rotor akımı (i_{ar})



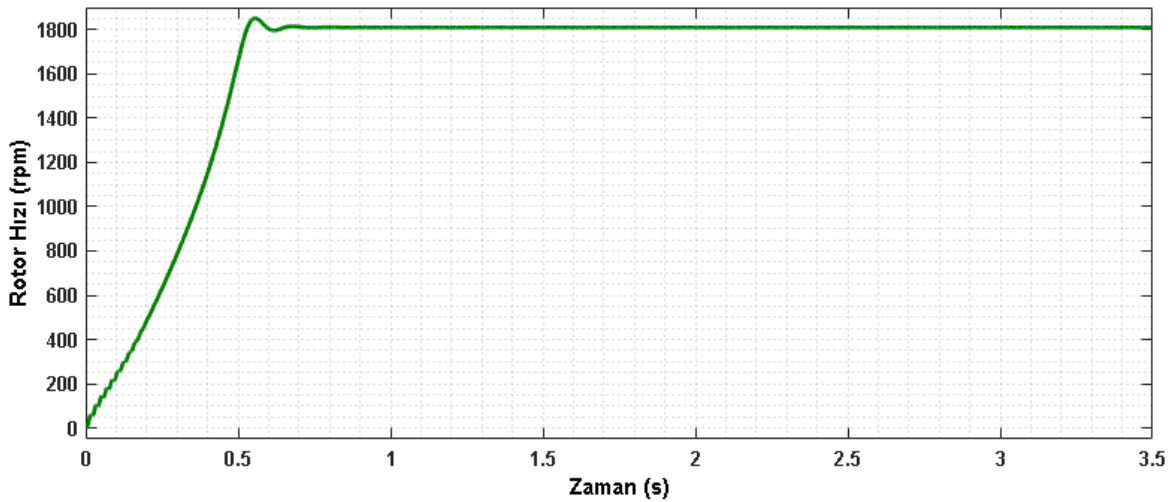
Şekil 4.5. Asenkron makine motor olarak çalıştırıldığında oluşan stator akımı (i_{as})

Çekiş motoru, aracın hareketi boyunca giriş elemanı olarak tork değişkenini baz almıştır. Asenkron makine motor olarak çalıştırıldığında çekiş motorunun torku önce artmış daha sonra rotorun hızının sabitlenmesiyle birlikte tork da sabitlenmiştir. Tork eğrisinin pozitif ekseninde olması asenkron makinenin motor olarak çalıştırıldığını göstermektedir. Eğer araç harekete başlıyor, hızlanıyor ya da yokuş çıkıyor ise bu durumlarda asenkron makine motor olarak çalışır ve pozitif tork üretir. Bu sayede yakıt hücresi hidrojen tüketerek elektrik üretir ve gerekirse batarya-süperkapasitör teknolojilerinden yardım alarak çekiş motoruna elektrikselsel güç sağlar. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren üç fazlı sincap kafesli asenkron çekiş motoru ürettiği pozitif tork ile aracın istenen şekilde hareket etmesini sağlar. Asenkron makinenin motor olarak çalıştırılmasıyla oluşan tork Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



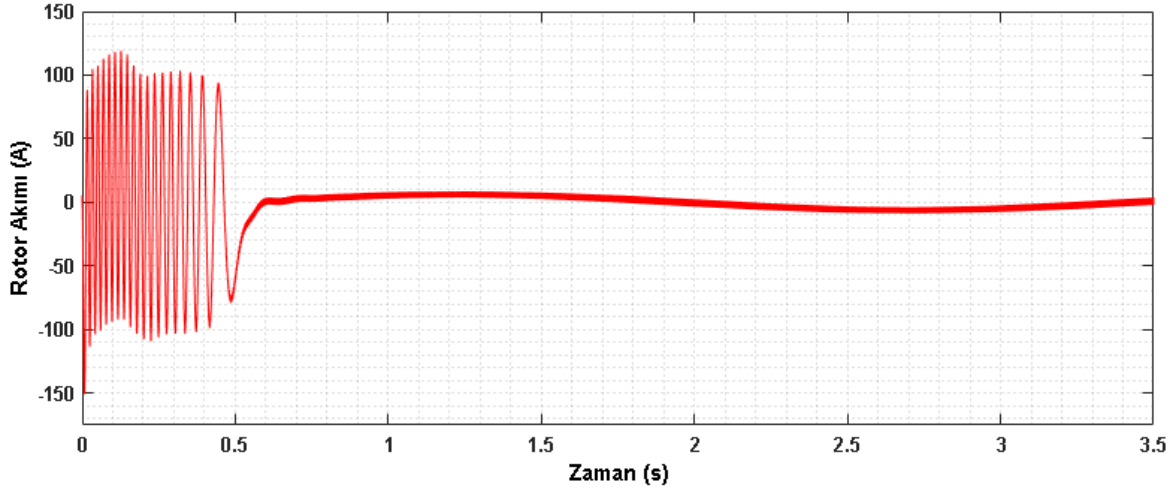
Şekil 4.6. Asenkron makine motor olarak çalıştırıldığında oluşan tork (N.m)

Hidrojen yakıt hücreli araçların çekiş motorlarının rejeneratif frenleme esnasında oluşan enerjiyi depolamaları ve tekrar kullanmaları yakıt tasarrufuna oldukça fayda sağlamaktadır. Hidrojen yakıt hücreli araçtaki yakıt hücresinin de harcadığı hidrojen miktarını azaltmak için rejeneratif frenleme enerjisini kompakt yapı içerisindeki batarya ve süperkapasitör gibi enerji depolama teknolojilerinde depolayabilmesi ve aracın enerji ihtiyacında kullanabilmesi yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Bunun için aracın çekiş motorunun generatör olarak çalışması ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek DC barayı beslemesi gerekmektedir. Önerilen üç fazlı çekiş motoru aracın rejeneratif frenlemesi esnasında generatör olarak çalışmakta ve batarya ile süperkapasitörün bu enerjiyi depolamasını sağlamaktadır. Çekiş motorunun generatör olarak çalışmasıyla oluşan rotor hızı Şekil 4.7'de verilmiştir.

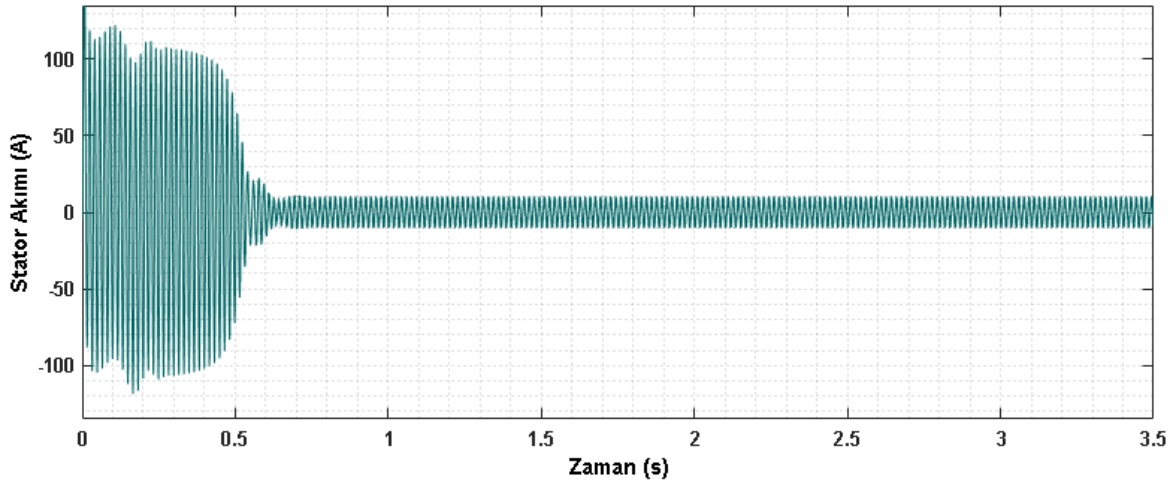


Şekil 4.7. Asenkron makine generatör olarak çalıştırıldığında oluşan rotor hızı (rpm)

Şekilde de görüldüğü gibi çekiş motoru rejeneratif frenleme esnasında generatör olarak çalışmakta, rotor hızı bu esnada hemen artmakta ve senkron hız olan 1800 rpm değerinin üzerine çıkarak (1810 rpm) bu değerde sabit çalışmaktadır. Ayrıca çekiş motorunun generatör olarak çalışmasıyla fazlar arası akımların dq-abc eksen dönüşümü sonucu oluşan rotor akımı Şekil 4.8’de ve stator akımı ise Şekil 4.9’da verilmiştir.

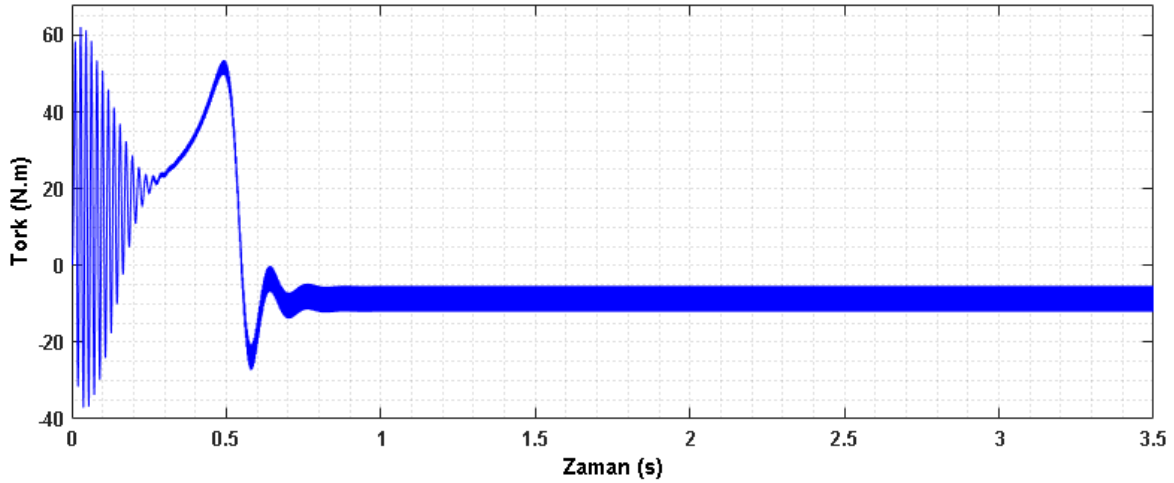


Şekil 4.8. Çekiş motoru generatör olarak çalıştırıldığında oluşan rotor akımı (i_{ar})



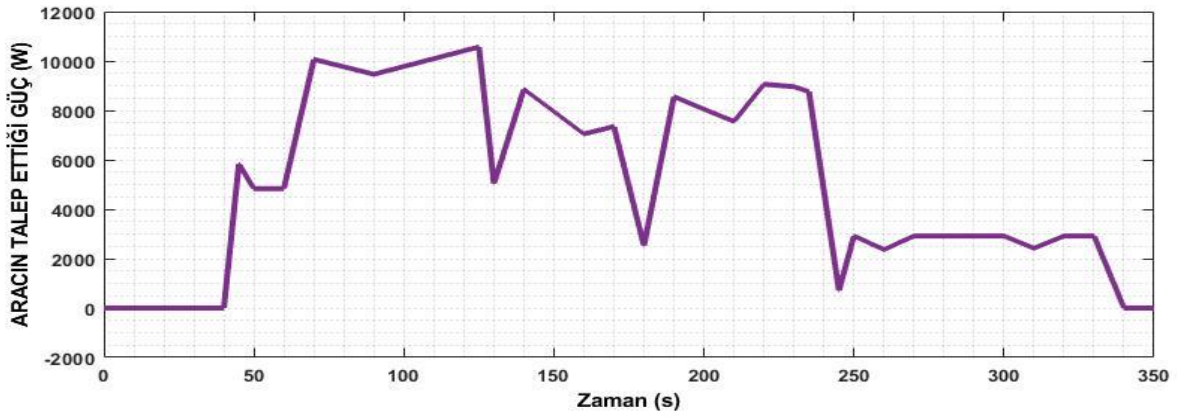
Şekil 4.9. Çekiş motoru generatör olarak çalıştırıldığında oluşan stator akımı (i_{as})

Çekiş motorunun generatör olarak çalışmasıyla fazlar arası akımlar kısa sürede sıfır noktasına yaklaşmış ve asenkron makine elektrik enerjisi üretmeye başlamıştır. Bununla birlikte sincap kafesli asenkron makinenin generatör olarak çalışması sonucu oluşan tork negatiftir (Şekil 4.10) ve bu da rejeneratif frenleme enerjisinin çift yönlü DC/AC inverter yardımıyla DC baraya oradan da batarya ve süperkapasitöre depolanmasını sağlamıştır.



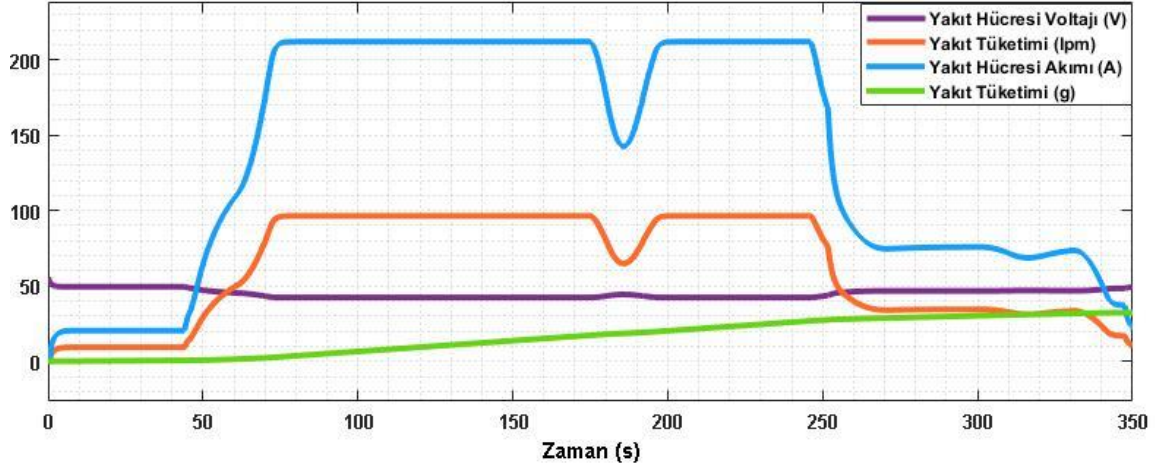
Şekil 4.10. Asenkron makine generatör olarak çalıştırıldığında oluşan tork (N.m)

Çalışmada kullanılan US FTP-72 (Federal Test Prosedürü) döngüsüne Kentsel Dinamometre Sürüş Takvimi veya Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) denir. Bu çevrim, sık sık durmalarla 12,07 km kentsel bir güzergahı simüle eder. Maksimum hız 91.25 km/sa ve ortalama hız 31.5 km/sa olarak hesaplanmıştır. Buna göre aracın talep ettiği güç Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



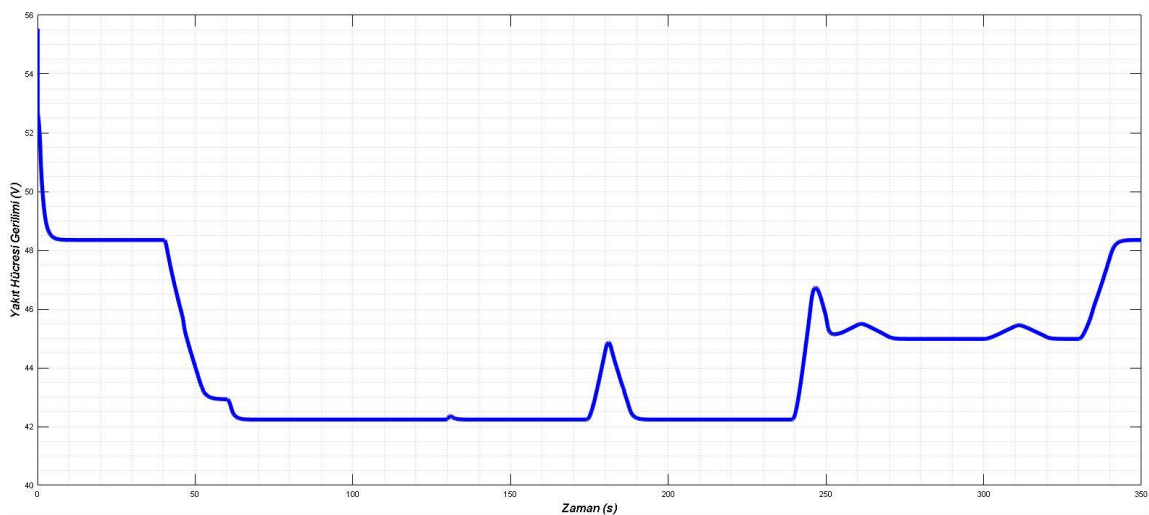
Şekil 4.11. Hidrojen yakıt hücreli aracın talep ettiği güç

Aracın talep ettiği güce karşılık yakıt hücresinin gerilim, akım ve yakıt tüketimindeki değişimleri Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Aracın yakıt tüketimi, talep edilen güç arttıkça artmaya başlamış ve akım-gerilim karakteristiğinde de değişmelere sebep olmuştur. Talep edilen gücü karşılayabilmek için harcanan hidrojen yakıt tüketimi, aracın yavaşlaması durumlarında azalmış ve kontrol stratejisi belirlenirken yakıt tasarrufu sağlamak için yakıt hücresi akım ve gerilim kontrolü dikkate alınmıştır.



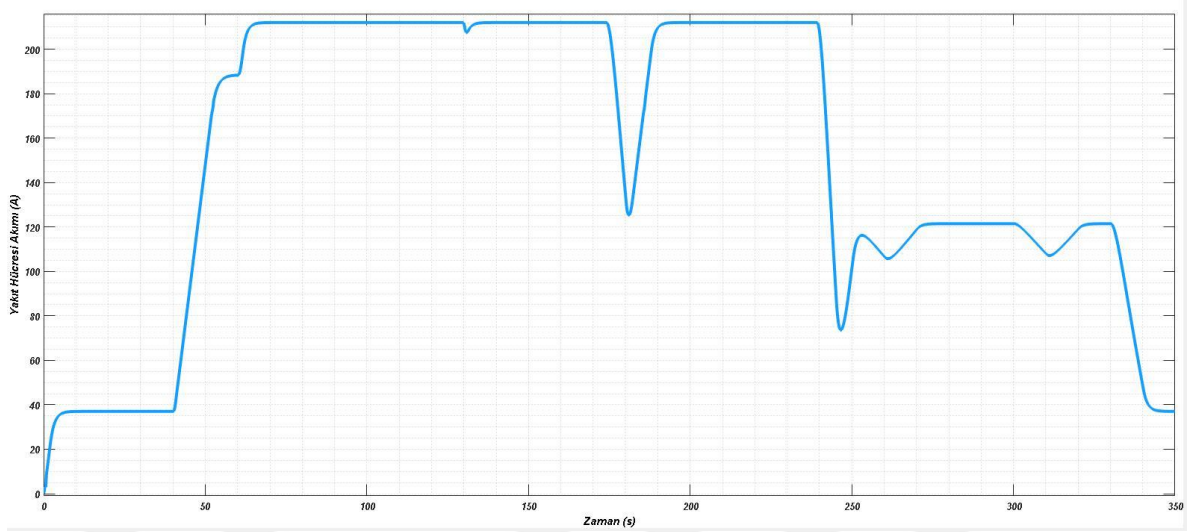
Şekil 4.12. Yakıt hücresi gerilim, akım ve yakıt tüketimindeki değişimler

Sistemin yük talebi doğrultusunda PEM yakıt hücresinin çıkış voltajı Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Yakıt hücresi gerilimi başlangıçta 58 V iken aracın hareketi boyunca değişmiş, ilk 40 saniyede aracın çalışması ve harekete başlaması esnasında gerilim 49 V'a düşmüş ve talep edilen güç arttıkça yaklaşık 42 V seviyelerine kadar gerilemiştir. Aracın güç talebi azalmaya başlayıp yavaşlama ve durma konumlarında ise yakıt hücresi gerilimi tekrar artmış ve hareket sonunda 49 V'a ulaşmıştır.



Şekil 4.13. Yakıt hücresi gerilimi

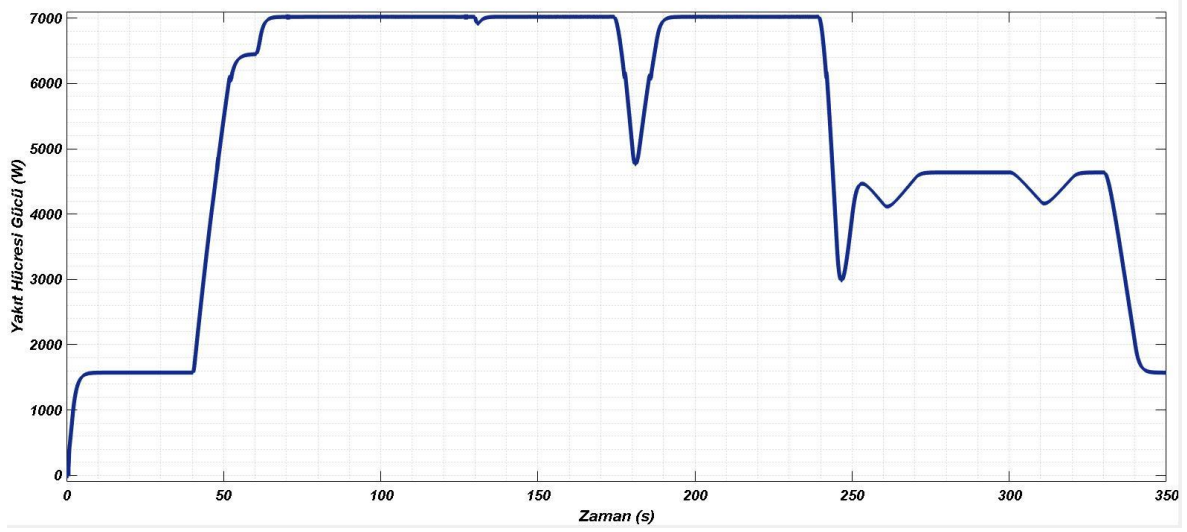
Yakıt hücresindeki bu gerilim değişimleri beraberinde akım karakteristiklerinde de değişimlere neden olmuştur. Şekil 4.14'te yakıt hücresi akım değişimlerinin grafiği görülmektedir.



Şekil 4.14. Yakıt hücresi akımı

Aracın harekete başladığı ilk 40 saniye boyunca yakıt hücresi akımı yaklaşık 36 A değerinde seyretmiş ve aracın güç talebiyle birlikte bu değer 212 A seviyelerine çıkmıştır. Yakıt hücresi verimi ve ömrü açısından sisteme uygun seçtiğimiz yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör voltaj ve akım tepe değerleri oluşturulan kontrol stratejisinde ayarlanarak kontrol edilmektedir. Bu yüzden yakıt hücresi akım tepe değerinin daha üst seviyelere çıkması engellenmiştir. Zaten sistemdeki talep edilen güç yakıt hücresinin karşılayamayacağı seviyelerde olduğunda devreye batarya ve süperkapasitör girecektir. Bu kontrollerin hassas yapılması hem sistem verimliliği, hem bu teknolojilerin yaşam ömrü hem de konforlu bir sürüş için elzemdir.

Yakıt hücresi gerilim ve akım değişimlerinin talep edilen güce göre yük tarafına aktarılmasıyla yakıt hücresinin yakıt tüketimindeki değişim de göz önünde bulundurularak güç karakteristiği elde edilir. Yakıt hücresi tarafından karşılanan güç Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Sistemin talep ettiği güç arttıkça yakıt hücresi bu talebi karşılamaya çalışmıştır. Yakıt hücresinin gücü 7 kW'a kadar çıkıp talep edilen gücü karşılayamayacak seviyelere geldiğinde maksimum verimle çalışmış ve 212 A'den daha fazla akım çekmesi engellenerek maksimum güç noktası sabit tutulmuştur. Sistemin talep ettiği güç azaldığında ise yakıt hücresinin yüke aktarılan gücü sistem gücünün belli miktarını karşılayarak azalmıştır.



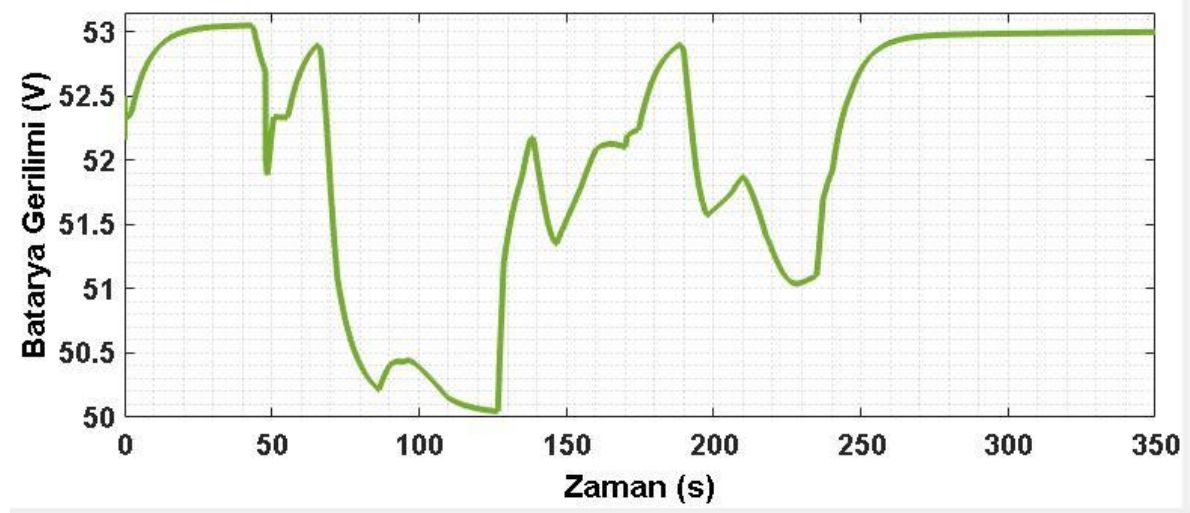
Şekil 4.15. Yakıt hücresi gücü

Sürücüden gelen komutlara göre aracın güç talebindeki değişiklikleri izleyerek araca güç sağlama amacına hizmet eden kontrol stratejisi, hidrojen yakıt hücresiyle kompakt olarak bir lityum iyon bataryayla birlikte çalışmaktadır. Lityum iyon bataryanın sistem için uygun seçilmesi gerektiğinden parametreleri Çizelge 4.3'teki gibi ayarlanmıştır. Buna göre sistemde kullanılan lityum iyon bataryanın nominal voltajı 48 V, anma kapasitesi 40 amper-saat ve başlangıç şarj durumu (SOC) % 65 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Lityum-iyon batarya parametreleri

Lityum-iyon Batarya Parametreleri	
Nominal Gerilim	48 V
Anma Kapasitesi	40 amper-saat
Başlangıç Şarj Durumu (SOC)	% 65
Maksimum Kapasite	40 amper-saat
Tamamen Şarj Voltajı	55.87 V
Nominal Deşarj Akımı	17.39 A
İç Direnç	0.012 Ω
Nominal Gerilimdeki Kapasitesi	36.17 amper-saat

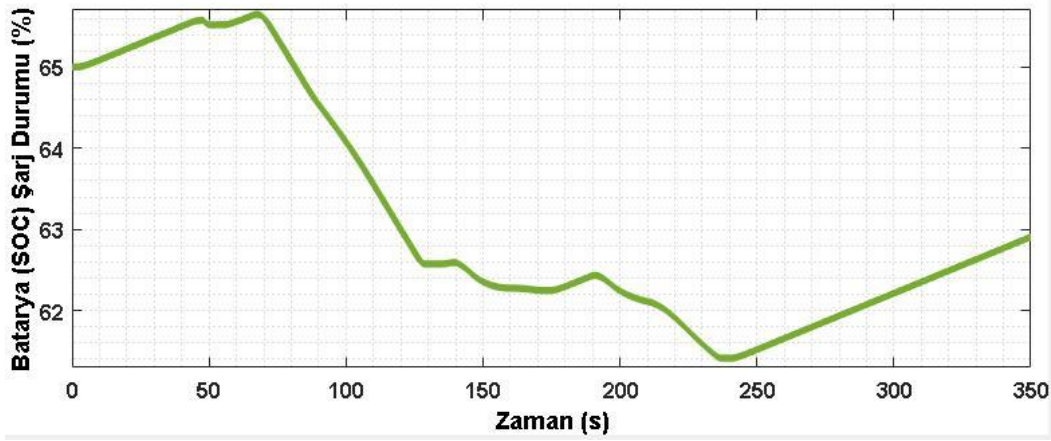
Sistemde ikincil enerji depolama teknolojisi olarak görevli olan lityum-iyon bataryanın gerilim grafiği Şekil 4.16'da verilmiştir. Buna göre aracın çalışması süresince yakıt hücresi ve süperkapasitörle birlikte araca yedek güç katkısı sağlayan bataryanın voltaj karakteristiği uygulanan kontrol stratejisi sayesinde minimum 50 V ile maksimum 53 V arasında tutulabilmektedir. Aracın 65 ve 125 saniyeleri arasındaki yüksek güç talebinde batarya voltajında oldukça düşüş olmuş fakat uygulanan kontrol stratejisi sayesinde batarya voltajının 50 V altına inmesi engellenmiştir. Batarya voltajına bağlı olarak lityum iyon batarya akımındaki değişimler ve bu değişimlere bağlı bataryanın şarj durumu karakteristiği sırasıyla Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.16. Lityum iyon batarya gerilimi



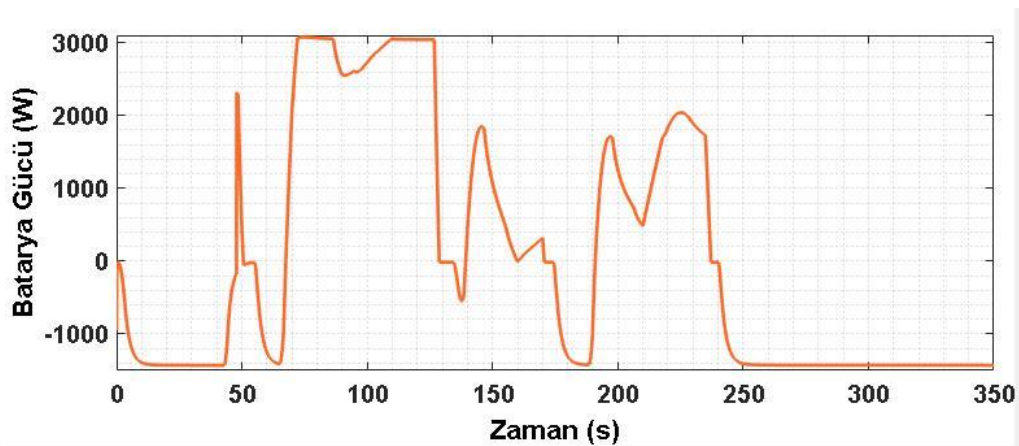
Şekil 4.17. Lityum iyon batarya akımı



Şekil 4.18. Lityum iyon batarya şarj durumu (SOC)

Batarya şarj durumu (SOC) başlangıçta % 65 olarak alınmıştır. Aracın ilk hareketi boyunca yakıt hücresinden enerjisini karşılaması ve bataryaya ihtiyaç duymaması batarya şarj durumunu % 65.58 seviyelerine çıkarmıştır. Yani bataryaya ihtiyaç yokken hem rejeneratif frenleme enerjisi ile hem de yakıt hücresinin fazla gücü ile şarj olmakta ve bu enerjisini de aracın yüksek güç ihtiyacı olduğu seviyelerde kullanabilmektedir.

Batarya akımı karakteristiği ile bataryanın çekiş motoruna aktardığı güç karakteristiği oldukça benzerdir. Bunun sebebi batarya DC/DC dönüştürücüsünün kontrol stratejisinin akım kontrollü PI denetleyici ile sağlanmasıdır. Şekil 4.19’da lityum iyon bataryasının gücü görülmektedir. Buna göre aracın bataryayı kullanmadığı durumlarda batarya şarj olmaktadır. Batarya gücünün negatif bölgelerde olması bunu temsil etmektedir. Aynı zamanda yüksek güç isteyen bölgelerde yine akım kontrolü yapılarak bataryanın 3 kW tepe güç değerini aşmaması sağlanmıştır. Böylelikle batarya ömrü ve verimliliğinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.19. Lityum iyon batarya gücü

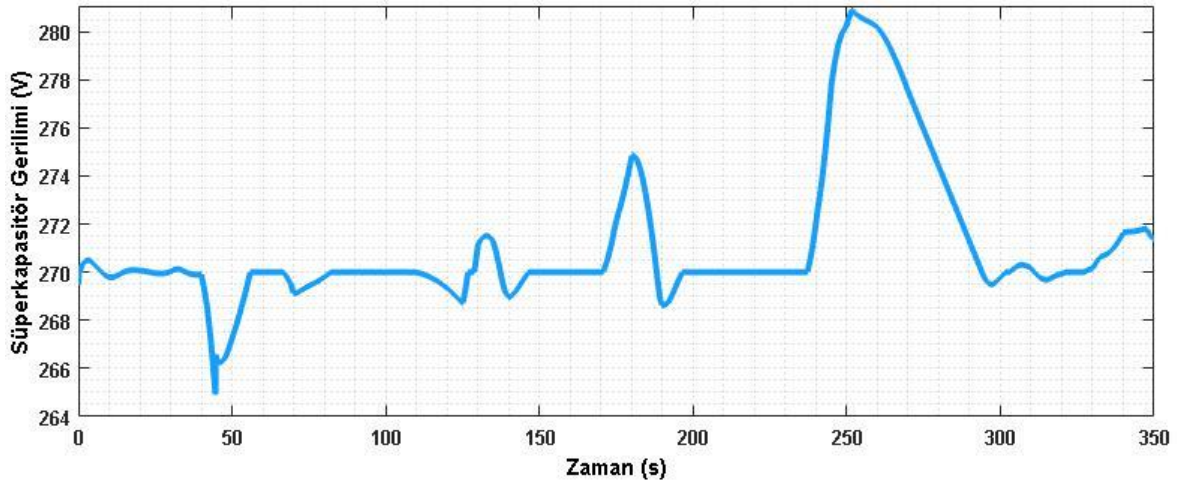
Hidrojen yakıt hücreli araçtaki bir diğer enerji depolama teknolojisi olan süperkapasitör parametreleri belirlenerek kontrol mekanizmasında yakıt hücresi ve bataryayla uyumlu olarak yerleştirilmiştir. Süperkapasitör parametreleri oluşturulurken toplamda 108 adet seri kapasitör kullanılmıştır. Her bir kapasitör 2.7 V gerilime sahip olduğundan anma gerilimi 291.6 V olarak belirlenmiştir. Süperkapasitörün anma kapasitesi 15.6 Farad'tır. Burada başlangıç gerilimi 270 V alınmıştır. Sonuçta süperkapasitör, aracın ani güç taleplerinde devreye girdiği için başlangıç voltajı yüksek tutulmuş ve ani yüklenmelerde gerilim düşümü olmuştur. Süperkapasitörün ömrünü ve verimini düşürmemek için voltaj regülasyonu yapılmış ve gerilimin belirli seviyenin altına düşmemesi sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan süperkapasitör parametreleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Süperkapasitör parametreleri

Süperkapasitör Parametreleri	
Anma Gerilimi	291.6 V
Anma Kapasitesi	15.6 F
Seri Eşdeğer DC Direnci	150 mΩ
Seri Kapasitör Sayısı	108
Paralel Kapasitör Sayısı	1
Başlangıç Gerilimi	270 V
Çalışma Sıcaklığı	25 °C

Aracın çekiş motorunun talep ettiği güç yakıt hücresi ve batarya ile birlikte görev yapan süperkapasitörün akım ve gerilim karakteristiklerinde değişmelere neden olmuştur. Süperkapasitörün gerilimindeki değişimler Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Buna bağlı olarak yine süperkapasitörün akım dalgalanmaları ise Şekil 4.21'de gösterilmiştir.

Aracın hareketinin 44. saniyesinde ani güç talebi ile süperkapasitör akımı 16.62 A seviyesine çıkmış ve süperkapasitör gerilimi ise bu noktada 265 V seviyesine inmiştir. Hareketin 240. saniyesinde araç ani frenleme yapmış ve süperkapasitör akımı -18 A seviyesine düşerken gerilimi ise 281 V seviyelerine çıkararak rejeneratif frenleme enerjisini depolamıştır.

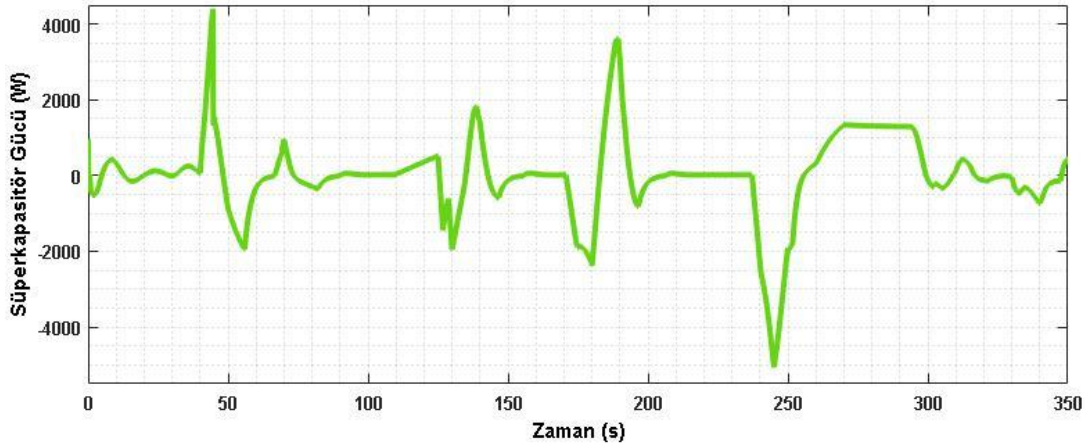


Şekil 4.20. Süperkapasitör gerilimi



Şekil 4.21. Süperkapasitör akımı

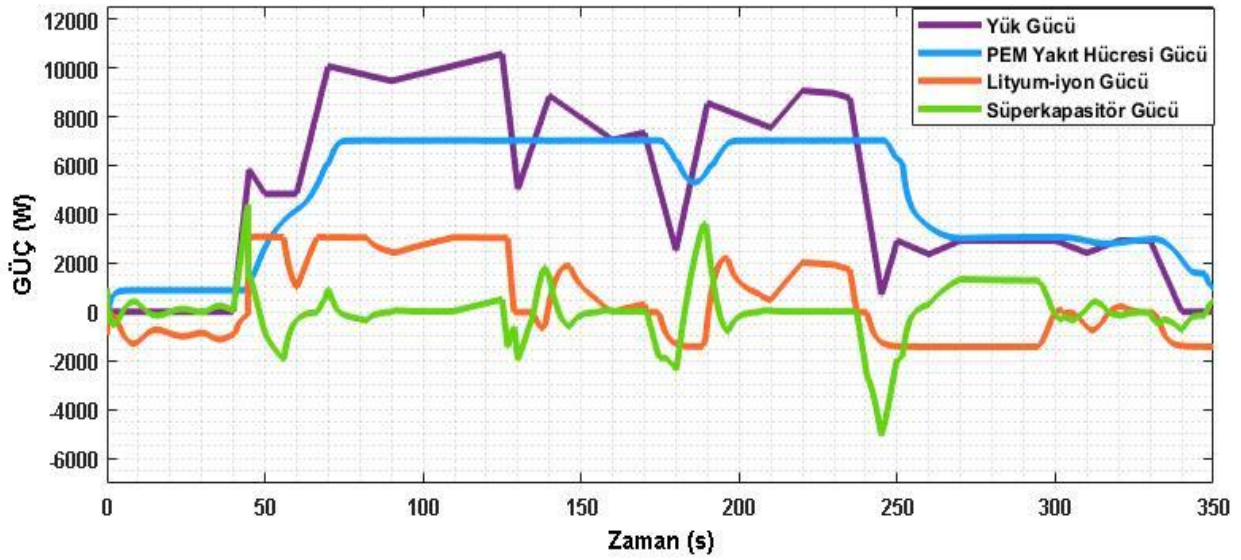
Süperkapasitörün sistem içerisindeki güç kontrolü ve çıkış gücü uygun kontrol stratejisi ile belirlenmiş ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Aracın ilk kalkışı esnasında talep edilen gücü ilk 40 saniyede yakıt hücresi karşıladığı için süperkapasitör bu esnada araca güç sağlamamaktadır. Aracın 40. saniyeden sonraki ani güç taleplerinde süperkapasitör hemen devreye girerek araca ekstra güç sağlamıştır. Ayrıca aracın ani frenlemelerinde süperkapasitörün gücünün negatif bölgelere geçmesi, çekiş motorunun generatör özelliğiyle çalışarak DC baraya rejeneratif frenleme enerjisini sağlaması sonucu süperkapasitörün bu enerjiyi depolamasını göstermektedir. Ayrıca burada spesifik güç yoğunluğu oldukça yüksek olan süperkapasitörün en önemli özelliklerinden birisi olan ani güçlere hızlı tepki vererek güç sağlaması açık bir şekilde gözlemlenmiştir. İkinci olarak ise ani frenleme esnasındaki rejeneratif frenleme enerjisini depolayabilmesi şekilde gösterilmektedir.



Şekil 4.22. Süperkapasitör gücü

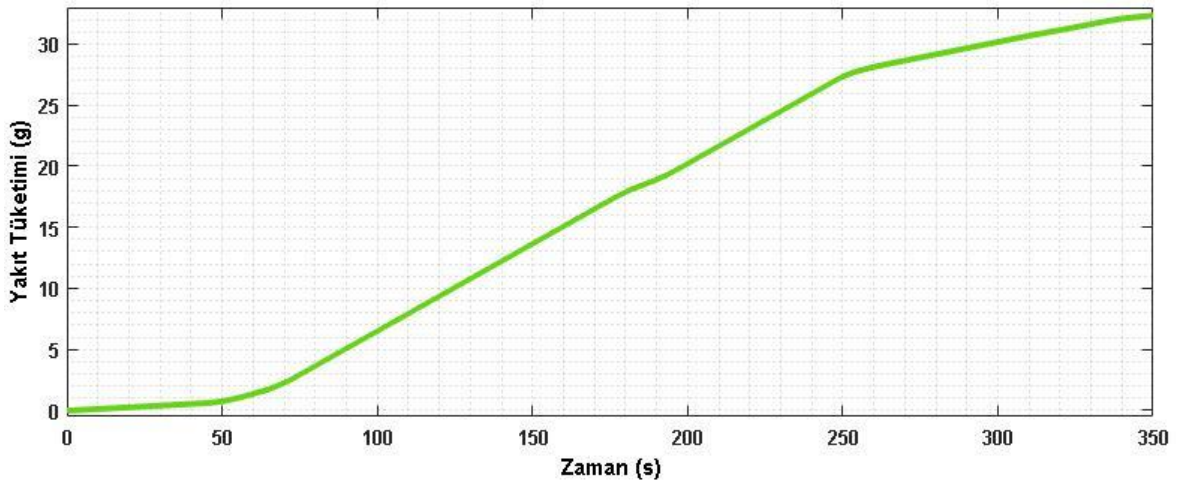
Hidrojen yakıt hücreli aracın enerji yönetim sistemi kontrol ünitesi içinde oluşturulan kontrol stratejisi yazılımı ile sağlanmıştır. Yakıt hücresi akımı ve batarya şarj-deşarj akımı bu stratejiye göre belirlenmiştir. Yine süperkapasitörün akım ve gerilim kontrolü bu strateji ile sağlanmıştır. Enerji depolama teknolojilerinin birlikte uyum içerisinde çalışmasını sağlamak oluşturulan kontrol stratejisinin en büyük özelliğidir. Yazılım MATLAB içerisindeki kodlar kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan yazılım kodları EK-1’de verilmiştir. Kontrol ünitesinin başlangıç parametreleri fonksiyonun içinde tanımlanmıştır. Daha sonra aracın hareket mekanizmasına göre kontrol stratejisi «if» döngüsüyle yazılmıştır. Toplamda 9 durum belirlenmiş ve araca uygulanarak simüle edilmiştir. Geliştirilen bu strateji sayesinde aracın bütün enerji yönetim sistemi sağlıklı bir şekilde kontrol edilmiştir.

Belirlenen strateji hafif çekişli bir hidrojen yakıt hücresili araca uygulandığında araçtaki güç talebine göre oluşacak değişimler Şekil 4.23’te gösterilmiştir. Buna göre aracın ilk kalkışından itibaren yakıt hücresi birincil enerji kaynağı olarak kullanılmış ve batarya ile süperkapasitör ise ikincil enerji kaynağı olarak sistemde yer almıştır. Aracın 350 saniyelik hareketi boyunca ani yüklenmelerini süperkapasitör hemen karşılamış ve geri kazanılan enerjyi normal frenlemede batarya, ani frenlemelerde ise süperkapasitör tekrar kullanmak üzere depolamışlardır. Aracın frenleme konumunda yakıt hücresi hidrojen tüketimini azaltarak kendi payına düşen gücü düşürmüş ve aracın talep ettiği gücü tek başına karşılamaya devam etmiştir.



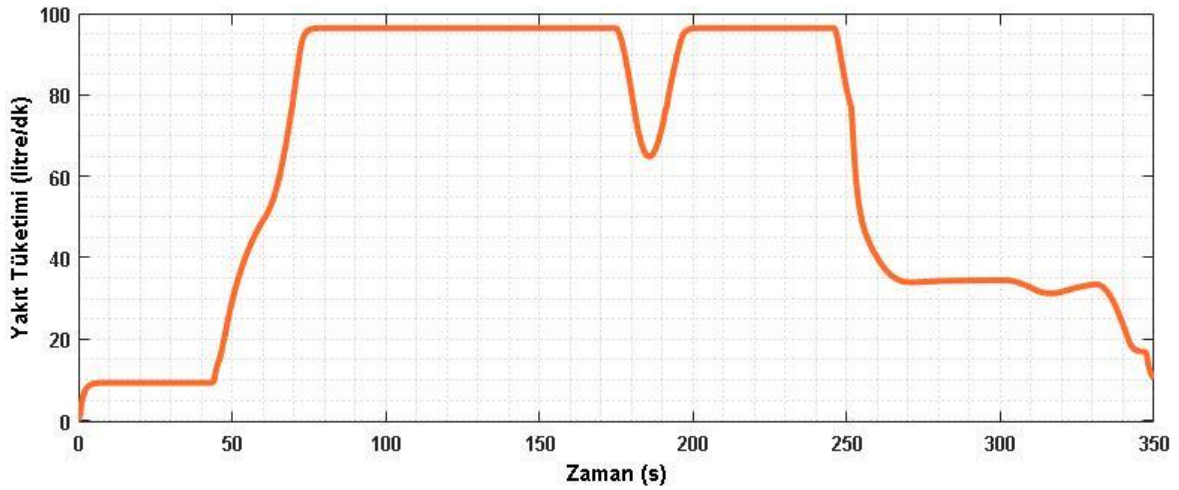
Şekil 4.23. Hafif çekişli bir hidrojen yakıt hücresindeki güç değişimleri

Her ne kadar aracın enerji yönetimini belirlerken güç bileşenlerinden bahsedilse de araçtaki diğer önemli etmen yakıt tasarrufudur. Şekil 4.24'te gösterildiği gibi aracın hareketi boyunca tükettiği hidrojen yakıtı 350 saniye sonunda 32 gramı bulmuştur.



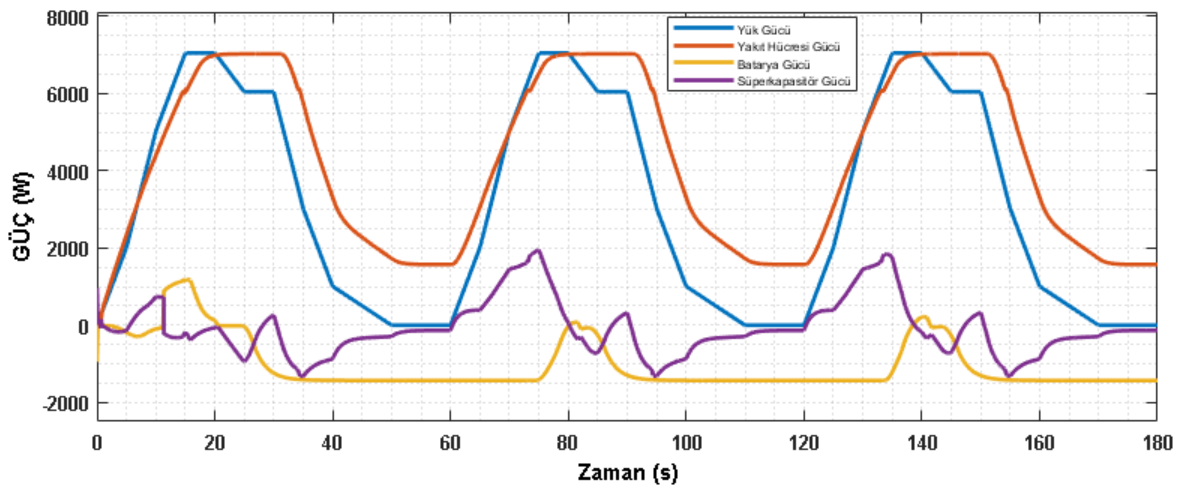
Şekil 4.24. Hidrojen yakıt hücreli aracın hidrojen yakıt tüketimi (g)

Ani hızlanma ve yüksek güç talebi olduğunda ise araç dakikada yaklaşık 95 litre yakıt olarak hidrojen tüketmiştir. Toplam yol boyunca aracın ortalama yakıt tüketimi dakikada yaklaşık 60 litredir. Aracın hidrojen yakıt tüketimi (litre/dk) Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Hidrojen yakıt hücreli aracın hidrojen yakıt tüketimi (litre/dk)

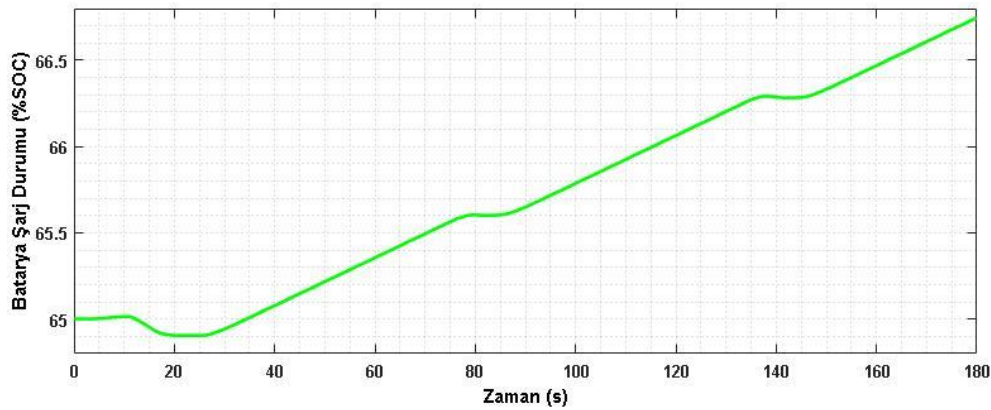
Kontrol stratejisi belirlendikten sonra aracın çeşitli yol koşullarında talep edeceği güce göre değişimi gözlemlendiğinde, geliştirilen bu kontrol stratejisinin bütün hidrojen yakıt hücreli araçlara kolayca uygulanabileceği ve aracın karşılaştığı farklı yol koşullarına göre bile işlevini koruyabileceği görülmüştür. Çalışmanın materyal ve yöntem bölümünde oluşturulan iki farklı yol modelinde aracın davranışları incelenmiştir. Buna göre aracın gündelik hayatta sıklıkla karşılaştığı dur-kalk yol modelinde, geliştirilen kontrol stratejisi en uygun enerji yönetimini sağlamıştır. Hidrojen yakıt hücreli aracın dur-kalk yol modelindeki talep ettiği güce göre yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör teknolojilerinin güç değişimleri Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Hidrojen yakıt hücreli aracın dur-kalk yol modelindeki güç değişimleri

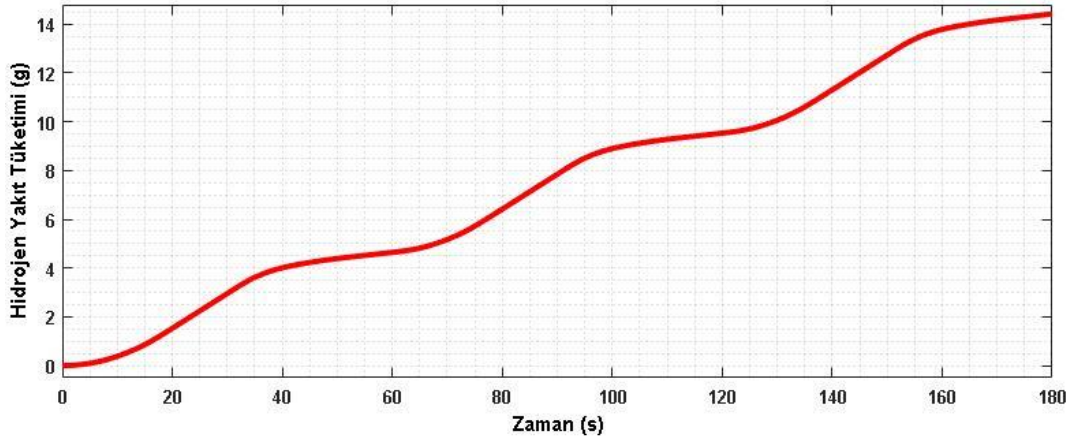
Dur-kalk yol modeline göre, araç sabit konumdan hareket etmeye başlamıştır. Araç 100 metrelik düz bir yolda ilerlerken, trafik ışığıyla karşılaşmış ve hızını yavaşlatarak durmuştur. 10 saniye ışığı bekledikten sonra tekrar hareketine başlamış ve bunu üç kez tekrarlamıştır. Araç toplamda 300 metrelik yolu 180 saniyede almıştır. Bu modele göre aracın güç talebini yakıt hücresi karşılamıştır. Batarya ve süperkapasitör sadece araca kalkışta destek olmuş ve aracın hareketi esnasında şarj konumunda enerji depolamıştır. Depolanan enerjiyi aracın bir sonraki trafik ışığında durma konumundan kalkış konumuna geçerken kullanmıştır. Böylelikle araçtaki depolama sistemleri arasındaki uyum sağlanmıştır. Aracın birincil olarak yakıt hücresini kullanması ise hem batarya ve süperkapasitörün ömrünü artırmış hem de enerjiyi verimli kullanma stratejisinin uygun bir şekilde uygulanmasını sağlamıştır.

Bu modelde yakıt hücresinin birincil enerji kaynağı olarak kullanılması ile batarya ve süperkapasitörün rejeneratif frenleme enerjisini ve aracın durmasıyla kaybedilen kinetik enerjinin bir kısmını muhafaza etmesi, batarya şarj durumunu (SOC) başlangıçta % 65 iken son konumda % 66.7 seviyelerine çıkarmıştır. Aracın dur-kalk yol modelindeki batarya şarj durumu (SOC) Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



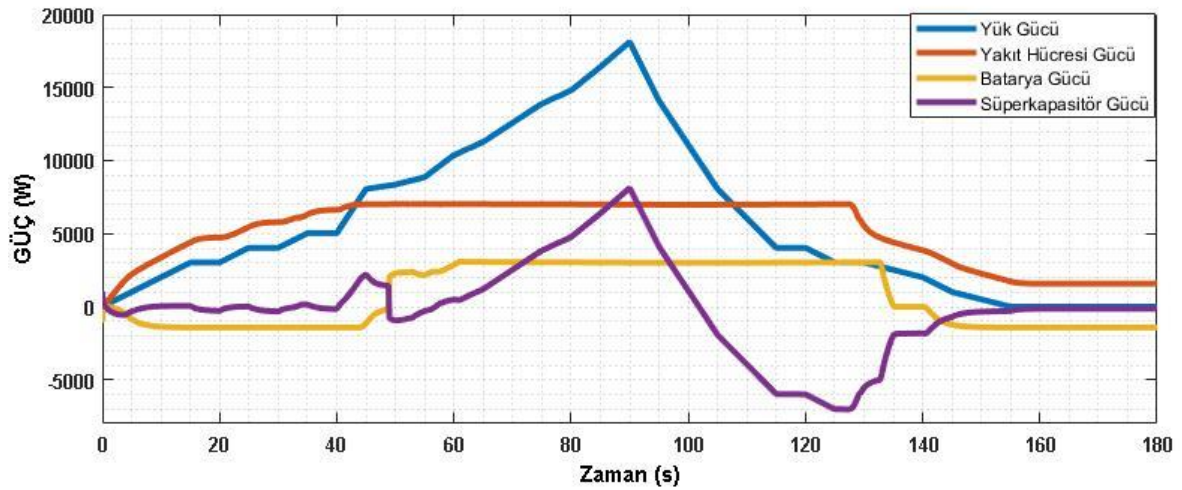
Şekil 4.27. Hidrojen yakıt hücreli aracın dur-kalk yol modelindeki batarya şarj durumu

Bataryanın şarj durumunun yükselmesi, bataryada depolanan enerjinin yeniden kalkış durumunda kullanılacağı anlamına gelir. Ayrıca dur-kalk yol modelinde, aracın hidrojen yakıt tüketimi toplamda 14.5 g olmuştur. Batarya ve süperkapasitörün depoladığı enerjiyi tekrar kullanması aracın kalkış esnasında normalden daha az hidrojen tüketmesini sağlamıştır. Hidrojen yakıt hücreli aracın dur-kalk yol modelinde harcadığı hidrojen miktarı Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Buna göre araç her bir trafik ışığıyla karşılaşmasında 60 saniyelik her periyotta 5 gram hidrojen tüketmiştir.



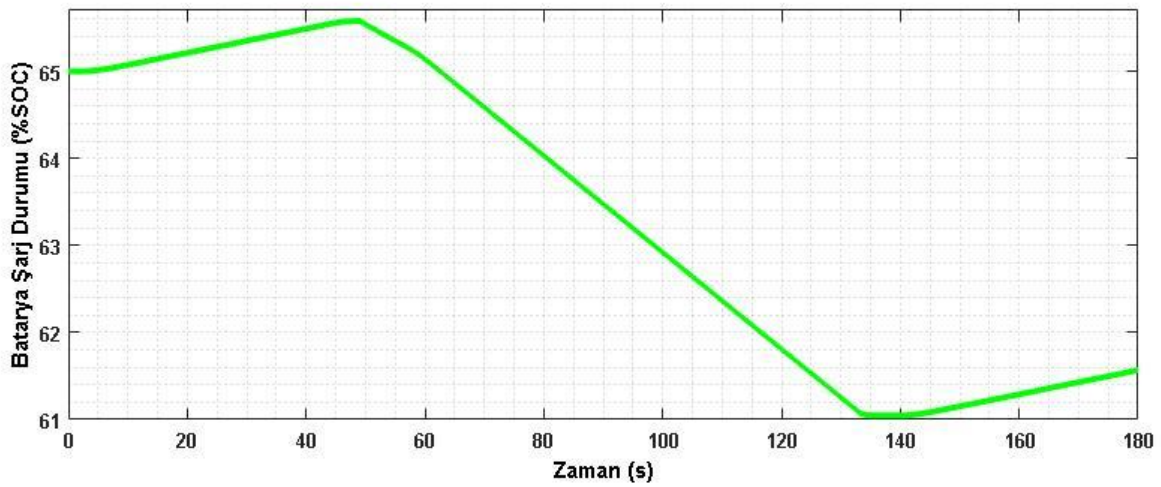
Şekil 4.28. Hidrojen yakıt hücreli aracın dur-kalk yol modelindeki yakıt tüketimi (g)

Araca uygulanan diğer yol modeli ise yokuş iniş-çıkış yol modelidir. Bu yol modelinde araç yokuş yukarı çıkarken çekiş motorundaki yükü azaltmak için ilk önce 60 metre düz bir yolda hızlanmıştır. 60 metrenin sonunda araç 90 metrelik bir rampayı yüksek güç talebi altında çıkmaya başlamıştır. Bu güç talebi tek başına yakıt hücresi tarafından sağlanamayacağı için, batarya ve süperkapasitör teknolojileri devreye girerek araca ekstra güç sağlamıştır. Daha sonra aracın kazanımlarını gözlemlemek için 60 metrelik düz bir yolda hareketine devam ederken yokuş aşağı 90 metrelik bir rampayı inmeye başlamıştır. Bu esnada aracın güç talebi azalmış ve rejeneratif frenleme enerjisi batarya ile süperkapasitörde depolanmıştır. Hidrojen yakıt hücreli aracın yokuş iniş-çıkış yol modelinde karşılaşılabilecek durumlar için çekiş motoru gücünü karşılayacak yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör güç değişimleri Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



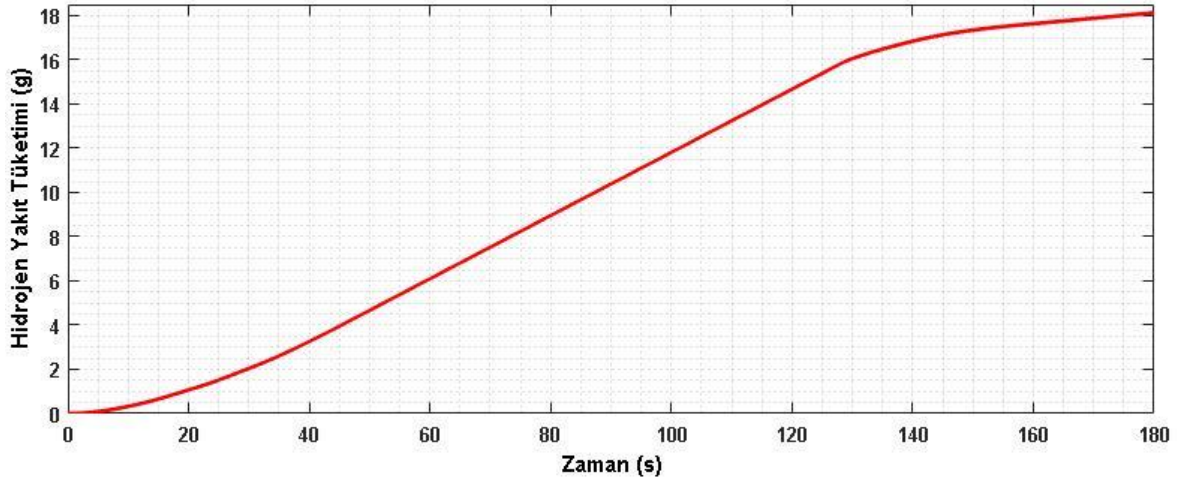
Şekil 4.29. Hidrojen yakıt hücreli aracın yokuş iniş-çıkış yol modelindeki güç değişimleri

Bununla birlikte aracın aşırı güç talebi sırasında, hidrojen yakıt tüketimi de artmıştır. Yokuş yukarı çıktıktan sonra araç 60 metrelik düz bir yolda ilerlemeye devam etmiş ve 90 metrelik rampadan inerek hareketini tamamlamıştır. Aracın yokuş aşağı inerken kazandığı potansiyel enerji, kinetik enerjiye dönüşmüştür. Araç, bu kinetik enerjinin bir kısmını, rejeneratif frenlemeyle yeniden kullanılmak üzere batarya ve süperkapasitörde saklamıştır. Aracın yokuş iniş-çıkış yol modelindeki batarya şarj durumu (SOC) Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Aracın hareketi esnasında bataryanın ilk şarj durumu % 65'ten % 61'e düşmüş ve yokuş inerken yaklaşık % 62'ye ulaşmıştır.



Şekil 4.30. Yakıt hücreli aracın yokuş iniş-çıkış yol modelindeki batarya şarj durumu

Hafif çekişli hidrojen yakıt hücreli araç yokuş iniş-çıkış yol modelinde 300 metrelik yolu 180 saniyede almış ve toplamda 18 g hidrojen yakıtı tüketmiştir. Araç, hareketinin ilk 90 saniyesinde yokuş çıkarak yaklaşık 10 g hidrojen tüketirken son 90 saniyesinde ise yokuş inmeye başlayarak yaklaşık 8 g hidrojen harcamıştır. Bunun sebebi aracın güç talebinin azalmasıyla yakıt hücresi gücünün de düşerek batarya ve süperkapasitörün son 90 saniyelik periyotta rejeneratif frenleme enerjisini depolamasıdır. Yakıt tasarrufu açısından kontrol stratejisinin bu aşamaları önemlidir. Aracın yokuş çıkarken tükettiği hidrojen, yokuş inerken yaklaşık % 20 oranında azalmış ve böylelikle yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Hidrojen yakıt hücreli aracın yokuş iniş-çıkış yol modelindeki hidrojen tüketimi gram cinsinden Şekil 4.31'de gösterilmiştir.



Şekil 4.31. Hidrojen yakıt hücreli aracın yokuş iniş-çıkış yol modelindeki yakıt tüketimi (g)

Geliştirilen ve önerilen kontrol stratejisi hidrojen yakıt hücreli aracın farklı yol modellerindeki gerilim, akım ve güç değişimlerine karşı başarılı bir şekilde uyum göstererek aracın yük taleplerini verimli bir şekilde takip edebilmiştir. Aracın talep ettiği güç arttıkça hidrojen yakıt tüketimi artmıştır, fakat batarya ile süperkapasitör yakıt hücresine ekstra güç sağlayarak bu artışı büyük ölçüde baskılamıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Artan enerji talebini karşılayabilmek için gereken konvansiyonel yakıtların rezervlerinin sınırlı olması ve tükenmeye başlaması küresel ısınma sorununu artırmakla beraber iklim koşullarını olumsuz etkilemektedir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim günümüzde oldukça önem taşımakla beraber teknolojik gelişmeler göz önüne alındığında çok hızlı yol kat edilmektedir. Bu gelişmeler, çeşitli amaçlar için kullanılan (uzay, savunma sanayii, taşımacılık, ulaşım, vb.) araç teknolojisinin petrol ve türevlerini yakıt olarak kullanmasının önüne geçmek için yenilenebilir bir yakıt olarak hidrojenin sürdürülebilir kullanımını beraberinde getirmiştir.

Hidrojenin araçlarda kullanılması ile hidrojen yakıt hücreli araçlar hayatımıza girmiş ve oldukça başarılı uygulamaları sayesinde dışarıya sadece su veren yakıt hücresinin temiz enerji kullanımı yaygınlaştırmıştır. Ancak yakıt hücresinin düşük güç yoğunluğu ve yavaş güç tepkisi gibi dezavantajları ile araçlarda depolama sorununu çözmek amacıyla birçok çalışma günümüzde halen devam etmektedir. Bu tez çalışması, yakıt hücresinin bu dezavantajlarını en aza indirmek için araçta güç kaynağı ve enerji depolama teknolojileri olarak yakıt hücresiyle birlikte batarya ve süperkapasitörleri kullanarak aracın enerji yönetim sisteminin tasarlanmasıyla oluşturulan kontrol stratejisine odaklanmıştır.

Aracın enerji yönetimine uygun kontrol stratejisi geliştirilmesi için bataryanın yüksek enerji yoğunluğu ile süperkapasitörün yüksek güç yoğunluğu özelliklerinden yararlanılmıştır. Ayrıca geliştirilen kontrol stratejisinin amacı, aracın enerji kontrol sisteminin verimliliğini artırmak, maliyetleri düşürmek ve yakıt tasarrufu sağlamaktır. Ani yüklerde yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör verimliliği ve ömrü azalır. Geliştirilen kontrol stratejisi, anlık ve büyük güç değişiklikleri sırasında ortaya çıkabilecek problemlerden kaçınarak güç paylaşımını gerçekleştirir. Sisteme uygulanan kontrol stratejisine göre araç birincil enerji kaynağı olarak yakıt hücresini kullanır. Literatürdeki çeşitli kontrol stratejilerinin genel olarak birbirinden farkı yakıt hücresi ve batarya arasındaki güç paylaşımı ile süperkapasitörün DC bara voltajını izlemesidir. Geliştirilen kontrol stratejisindeki yakıt hücresi DC/DC dönüştürücüsü, batarya ve süperkapasitör DC/DC dönüştürücülerini DC baraya bağlar. DC/DC dönüştürücüler, her bir enerji depolama sistemi arasında güç paylaşımına izin vermek için voltaj düzenlemesi sağlar. Bu güç paylaşımı, aracın talep ettiği

güce göre yapılır. Sürücüden gelen hızlanma, yavaşlama, ani frenleme ve durdurma gibi talepler elektronik kontrolörler aracılığıyla değerlendirilmiştir.

Hidrojen yakıt hücreli araç için geliştirilen kontrol stratejisi ile aracın güç talebine göre yakıt hücresinin hidrojen tüketimi ve batarya-süperkapasitör eşdeğer hidrojen tüketimi en aza indirilmiştir. Ayrıca araçların talep ettiği güç farklı yol koşullarına göre değiştiği için, bir hidrojen yakıt hücreli aracın sistem tasarımı ve optimizasyonu ile farklı yol modellerindeki yakıt ve enerji verimliliği simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir. Buna göre aracın talep ettiği güç arttıkça hidrojen yakıt tüketimi de artmıştır. Ancak batarya ve süperkapasitör teknolojileri yakıt hücresine ekstra güç sağlayarak bu artışı büyük ölçüde baskılamıştır.

Sisteme uygulanan kontrol stratejisi, yapısının ve parametrelerinin basit olmasından dolayı küçük değişiklikler ile farklı hidrojen yakıt hücreli araçlara kolaylıkla uygulanabilirler. Bununla birlikte aracın ani hızlanması ve yüksek güç taleplerinde yakıt hücresi gücü yetersiz kalmış ve batarya ile süperkapasitör araca ekstra güç sağlamak için devreye girmiştir. Özellikle aracın yavaşlaması ve frenlemesi durumlarında rejeneratif frenleme enerjisi batarya ve süperkapasitör tarafından geri kazanılmıştır. Normal yavaşlama periyodunda rejeneratif frenleme enerjisi batarya tarafından, ani yavaşlama ve aracın ani durma periyotlarında ise süperkapasitör tarafından geri kazanılmış ve enerji depolanmıştır. Depolanan enerjiler araçta tekrar kullanılmıştır. Böylelikle sistemin yakıt tasarrufu, verimliliği, kompakt yapı bileşenlerinin ömrü ve performansı artmıştır.

Çalışmanın literatüre katkısı, geliştirilen kontrol stratejisinin eşdeğer hidrojen tüketimini minimum seviyede tutması, parametrelerinin basit olması, rejeneratif frenleme sayesinde enerjinin geri kazanımını sağlayarak kompakt yapı bileşenlerinin ömrünü uzatması, birçok araca kolaylıkla uygulanabilmesi ve aracın performansını yüksek düzeyde tutması olmuştur. Gelecekteki çalışmalarda, geliştirilen bu kontrol stratejisi ile birlikte araç verimliliğini ve enerji tasarrufunu iyileştirmek için farklı topolojiler kullanılarak yeni kontrol sistemlerinin, optimizasyon tekniklerinin ve güç dönüştürücü ünitelerinin uyarlanması “Yeşil Enerji” ve “Hidrojen Ekonomisi”ne büyük katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abd El Monem, A. A., Azmy, A. M. and Mahmoud, S. A. (2014). Effect of process parameters on the dynamic behavior of polymer electrolyte membrane fuel cells for electric vehicle applications. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(1), 75-84.
- Acres, G. J. K. (2001). Recent advances in fuel cell technology and its applications. *Journal of Power Sources*, 100(1-2), 60-66.
- Ahmadi, S., Bathaee, S. M. T. and Hosseinpour, A. H. (2018). Improving fuel economy and performance of a fuel-cell hybrid electric vehicle (fuel-cell, battery, and ultra-capacitor) using optimized energy management strategy. *Energy Conversion and Management*, 160, 74-84.
- Ahmed, S. and Krumpelt, M. (2001). Hydrogen from hydrocarbon fuels for fuel cells. *Int J Hydrogen Energy*. 26(4), 291-301.
- Amjad, S., Neelakrishnan, S. and Rudramoorthy, R. (2010). Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles. *Renew Sustain Energy Rev*, 14(3), 1104-1110.
- Andrea, L., Vitaliano, C., Davide, P., Susanna, M., Massimo, S. and Jan, V. H. (2017). Dealing with fuel contaminants in biogas-fed solid oxide fuel cell (SOFC) and molten carbonate fuel cell (MCFC) plants: Degradation of catalytic and electro-catalytic active surfaces and related gas purification methods. *Progress in Energy and Combustion Science*, 61, 150-188.
- Andujar, J. M. and Segura, F. (2009). Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renew Sustain Energy Rev*, 13(9), 2309-2322.
- Ansari, Y., Tucker, T. G. and Angell, C. A. (2013). A novel, easily synthesized, anhydrous derivative of phosphoric acid for use in electrolyte with phosphoric acid-based fuel cells. *Journal of Power Sources*, 237, 47-51.
- Antunes, G. J. M., Mikalsen, R. and Roskilly, A. P. (2009). An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine. *Int J Hydrogen Energy*, 34(15), 6516-6522.
- Aricò, A. S., Srinivasan, S. and Antonucci, V. (2001). DMFCs: From fundamental aspects to technology development. *Fuel Cells*, 1(2), 133-161.
- Ay, M., Midilli, A. and Dincer, I. (2006). Investigation of hydrogen production from boron compounds for pem fuel cells. *Journal of Power Sources*, 157(1), 104-113.
- Ayad, M. Y., Becherif, M. and Henni, A. (2011). Vehicle hybridization with fuel cell, supercapacitors and batteries by sliding mode control. *Renewable Energy*, 36(10), 2627-2634.
- Balat, M. (2008). Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. *Int J Hydrogen Energy*, 33(15), 4013-4029.

- Balch, R. C., Burke, A. and Frank, A. A. (2001). The affect of battery pack technology and size choices on hybrid electric vehicle performance and fuel economy. *Proc. 16th IEEE Annu. Battery Conf. Appl. Adv.*, 31-36.
- Ball, M. and Weeda, M. (2015). The hydrogen economy-vision or reality? *Int J Hydrogen Energy*, 40(25), 7903-7919.
- Barnwal, B. K. and Sharma, M. P. (2005). Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(4), 363-378.
- Bashyam, R. and Zelenay, P. (2006). A class of non-precious metal composite catalysts for fuel cells. *Nature*, 443, 63-66.
- Bauer, C., Hofer, J., Althaus, H. J., Duce, A. D. and Simons, A. (2015). The environmental performance of current and future passenger vehicles: life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. *Appl Energy*, 157, 871-883.
- Bauman, J. and Kazerani, M. (2008). A comparative study of fuel-cell-battery, fuel-cell-ultracapacitor, and fuel-cell-battery-ultracapacitor vehicles. *IEEE Trans Veh Technol*, 57(2), 760-769.
- Bauman, J. and Kazerani, M. (2009). An Analytical optimization method for improved fuel cell-battery-ultracapacitor powertrain. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(7), 3186-3197.
- Bayindir, K. Ç., Gözükcük, M. A. and Teke, A. (2011). A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Conversion and Management*, 52, 1305-1313.
- Bischoff, M. and Huppmann, G. (2002). Operating experience with a 250 kWel molten carbonate fuel cell (MCFC) power plant. *Journal of Power Sources*, 105(2), 216-221.
- Bozoglan, E., Midilli, A. and Hepbasli, A. (2012). Sustainable assessment of solar hydrogen production techniques. *Energy*, 46(1), 85-93.
- Burke, A. (2000). Ultra-capacitors: why, how, and where is the technology. *J Power Sources*, 91, 37-50.
- Burke, A. (2007). Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proc. IEEE*, 95(4), 806-820.
- Camara, M. B., Gualous, H., Gustin, F. and Berthon, A. (2008). Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(5), 2721-2735.
- Camara, M. B., Gualous, H., Gustin, F., Berthon, A. and Dakyo, B. (2010). DC/DC converter design for supercapacitor and battery power management in hybrid vehicle applications-polynomial control strategy. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(2), 587-597.

- Cao, J. and Emadi, A. (2012). A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(1), 122-132.
- Casalegno, A., Grassini, P. and Marchesi, R. (2007). Experimental analysis of methanol cross-over in a direct methanol fuel cell. *Applied Thermal Engineering*, 27(4), 748-754.
- Caumont, O., Moigne, P. L., Rombaut, C., Muneret, X. and Lenain, P. (2000). Energy gauge for lead-acid batteries in electric vehicles. *IEEE Trans. Energy Convers*, 15(3), 354-360.
- Cecal, A. and Humelnicu, D. (2011). Hydrogen output from catalyzed radiolysis of water. (P. Tsvetkov, Editor). In: *Nuclear Power-Deployment, Operation and Sustainability*. InTech Publishing., 489-510, Romania.
- Chalk, S. G. and Miller, J. F. (2006). Key challenges and recent progress in batteries fuel cells and hydrogen storage for clean energy systems. *J. Power Sources*, 159(1), 73-80.
- Chan, C. C. (2007). The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704-718.
- Chang-Whan, L., Byeong, W. K., Min-Goo, K., Hyung-Chul, H., Sung-Pil, Y., Jonghee, H., Young, J. K. and Min, C. L. (2017). Improved performance of molten carbonate fuel cells with (Li/Na)₂CO₃ electrolytes by using BYS coated cathode at low operating temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(29), 18514-18523.
- Chapman, S. J. (2005). *Electric Machinery Fundamentals*. New York: McGrawHill.
- Chen, X., Wang, Y., Cai, L. and Zhou, Y. (2015). Maximum power output and load matching of a phosphoric acid fuel cell-thermoelectric generator hybrid system. *Journal of Power Sources*, 294, 430-436.
- Chu, S., Cui, Y. and Liu, N. (2017). The path towards sustainable energy. *Nature Materials*, 16, 16-22.
- Chung, C. A., Chen, Y. Z., Chen, Y. P. and Chang, M. S. (2015). CFD investigation on performance enhancement of metal hydride hydrogen storage vessels using heat pipes. *Appl Therm Eng*, 91, 434-446.
- Cooper, A. and Moseley, P. (2006). Progress in the development of lead-acid batteries for hybrid electric vehicles. *Proc. IEEE Vehicle Power Propulsion Conf*, 1-6.
- Cropper, M. A. J., Geiger, S. and Jollie, D. M. (2004). Fuel cells: a survey of current developments. *Journal of Power Sources*, 131(1-2), 57-61.
- Devrim, Y., Devrim H. and Eroglu, I. (2015). Development of 500 W PEM fuel cell stack for portable power generators. *Int J Hydrogen Energy*, 40(24), 7707-7719.

- Dincer, I. (2002). Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems. *Int J Hydrogen Energy*, 27(3), 265-285.
- Doddathimmaiah, A. and Andrews J. (2009). Theory, modelling and performance measurement of unitised regenerative fuel cells. *Int J Hydrogen Energy*, 34(19), 8157-8170.
- Dodds, P. E., Staffell, I., Hawkes, A. D., Li, F., Grunewald, P., McDowall, W. and Ekins, P. (2015). Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(5), 2065-2083.
- Dusastre, V. (2001). Materials for clean energy. *Nature*, 414, 331.
- Dutta, S. (2014). A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 1148-1156.
- Edwards, D. B. and Kinney, C. (2001). Advanced lead acid battery designs for hybrid electric vehicles. *Proc. 16th Battery Conf. Appl. Adv*, 207-212.
- Edwards, P. P., Kuznetsov, V. L., David, W. I. F. and Brandon, N. P. (2008). Hydrogen and fuel cells: Towards a sustainable energy future. *Energy Policy*, 36(12), 4356-4362.
- EG&G Technical Services (2004). *Fuel Cell Handbook*. 7th edition, Inc., Morgantown, Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, U.S.
- Ehsani, M., Gao, Y. and Miller, J. M. (2010). Hybrid electric vehicles: architecture and motor drives. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 719-728.
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E. and Emadi, A. (2005). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press., LLC.
- Emadi, A., Rajashekara, K. and Williamson, S. S. (2005). Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(3), 763-770.
- Fang, J., Lyu, M., Wang, X., Wu, Y. and Zhao, J. (2015). Synthesis and performance of novel anion exchange membranes based on imidazolium ionic liquids for alkaline fuel cell applications. *Journal of Power Sources*, 284, 517-523.
- Fathabadi, H. (2018). Novel fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for fuel cell hybrid electric vehicles. *Energy*, 143, 467-477.
- Fayaz, H., Saidur, R., Razali, N., Anuar, F. S., Saleman, A. R. and Islam, M. R. (2012). An overview of hydrogen as a vehicle fuel. *Renew Sustain Energy Rev*, 16(8), 5511-5528.

- Fernandez, R. A., Cilleruelo, F. B. and Martinez, I. V. (2016). A new approach to battery powered electric vehicles: A hydrogen fuel-cell-based range extender system. *Int J Hydrogen Energy*, 41(8), 4808-4819.
- Ferreira, A. A., Pomilio, J. A., Spiazzi, G. and Silva, L. A. (2008). Energy management fuzzy logic supervisory for electric vehicle power supplies system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(1), 107-115.
- Fetcenko, M. A., Ovshinsky, S. R., Reichman, B., Young, K., Fierro, C., Koch, J., Zallen, A., Mays, W. and Ouchi, T. (2007). Recent advances in NiMH battery technology. *J. Power Sources*, 165(2), 544-551.
- Gao, L., Dougal, R. A. and Liu, S. (2005). Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(1), 236-243.
- Gao, W. (2005). Performance comparison of a fuel cell-battery hybrid powertrain and a fuel cell-ultracapacitor hybrid powertrain. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(3), 846-855.
- Gao, Y. and Ehsani, M. (2002). Investigation of battery technologies for the army's hybrid vehicle application. *Proc. 56th IEEE Veh. Technol. Conf*, 1505-1509.
- Gao, Z., Mogni, L. V., Miller, E. C., Railsback, J. G. and Barnett, S. A. (2016). A perspective on low-temperature solid oxide fuel cells. *Energy Environmental Science*, 9, 1602-1644.
- Garcia, P., Fernandez, L. M., Garcia, C. A. and Jurado F. (2010). Energy management system of fuel-cell-battery hybrid tramway. *Ind Electr, IEEE Trans*, 57(12), 4013-4023.
- Garcia, P., Torreglosa, J. P., Fernandez, L. M. and Jurado, F. (2013). Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor. *Expert Systems with Applications*, 40, 4791-4804.
- Geeter, E., Mangan, M., Spaepen, S., Stinissen, W. and Vennekens, G. (1999). Alkaline fuel cells for road traction. *Journal of Power Sources*, 80(1-2), 207-212.
- Goriparti, S., Miele, E., Angelis, F. D., Fabrizio, E. D., Zaccaria, R. P. and Capiglia, C., 2014. Review on recent progress of nanostructured anode materials for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 257, 421-443.
- Gurz, M., Baltacioglu, E., Hames, Y. and Kaya, K. (2017). The meeting of hydrogen and automotive: A review. *Int J Hydrogen Energy*, 42(36), 22334-22346.
- Hajizadeh, A. and Golkar, M. A. (2010). Control of hybrid fuel cell/energy storage distributed generation system against voltage sag. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(5), 488-497.

- Hames, Y., Kaya, K., Baltacioglu, E. and Turksoy, A. (2018). Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles. *Int J Hydrogen Energy*, 43(23), 10810-10821.
- Heinzel, A. and Barragán, V.M. (1999). A review of the state-of-the-art of the methanol crossover in direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources*, 84(1), 70-74.
- Hirata, H., Aoki, T. and Nakajima, K. (2012). Liquid phase migration effects on the evaporative and condensational dissipation of phosphoric acid in phosphoric acid fuel cell. *Journal of Power Sources*, 199, 110-116.
- Hoffmann, P. and Dorgan, B. (2012). *Tomorrow's Energy: Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospects for a Cleaner Planet*. MIT Press., London.
- Husain, I. (2011). *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*. CRC press.
- Jacobson, M. Z., Colella, W. G. and Golden, D. M. (2005). Atmospheric science: Cleaning the air and improving health with hydrogen fuel-cell vehicles. *Science*, 308, 1901-1905.
- Jain, I. P. (2009). Hydrogen the fuel for 21st century. *Int J Hydrogen Energy*, 34(17), 7368-7378.
- Kakosimos, K., Ole, H., Matthias, K. and Berkowicz, R. (2010). Operational street pollution model (OSPM)-A review of performed application and validation studies and future prospects. *Environ Chem*, 7(6), 485-503.
- Kamarudin, S. K., Achmad, F. and Daud, W. R. W. (2009). Overview on the application of direct methanol fuel cell (DMFC) for portable electronic devices. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(16), 6902-6916.
- Kendall, K. and Pollet, B. G. (2012). *Hydrogen and Fuel Cells in Transport*. Comprehensive Renewable Energy by Editor-in-Chief: Ali Sayigh. Elsevier Ltd., U.K., Chapter 4.12: 301-313.
- Khaligh, A. and Li, Z. (2010). Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: state of the art. *IEEE Trans Veh Technol*, 59(6), 2806-2814.
- Khan, M. J. and Iqbal, M. T. (2005). Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system. *Renewable Energy*, 30(3), 421-439.
- Kim, T. -H., Park, J. -S., Chang, S. K., Choi, S., Ryu, J. H. and Song, H. -K. (2012). The current move of lithium ion batteries towards the next phase. *Adv. Energy Mater*, 2, 860-872.
- Kirubakaran, A., Jain, S. and Nema, R. K. (2009). A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renew Sustain Energy Rev*, 13(9), 2430-2440.

- Kordesch, K., Hacker, V., Gsellmann, J., Cifrain, M., Faleschini, G., Enzinger, P., Fankhauser, R., Ortner M., Muhr, M. and Aronson, R. R. (2000). Alkaline fuel cells applications. *Journal of Power Sources*, 86(1-2): 162-165.
- Krathumkhet, N., Vongjitpimol, K., Chuesutham, T., Changkhamchom, S., Phasuksom, K., Sirivat, A. and Wattanakul, K. (2018). Preparation of sulfonated zeolite ZSM-5/sulfonated polysulfone composite membranes as PEM for direct methanol fuel cell application. *Solid State Ionics*, 319, 278-284.
- Kumar, L. and Jain, S. (2014). Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. *Renew Sustain Energy Rev*, 29, 924-940.
- Lagorse, J., Paire, D. and Miraoui, A. (2010). A multi-agent system for energy management of distributed power sources. *Renewable Energy*, 35(1), 174-182.
- Lai, J. S. and Nelson, D. J. (2007). Energy management power converters in hybrid electric and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 766-777.
- Larminie, J. and Dicks, A. (2001). *Fuel cell systems explained*. 2nd edition, John Wiley & Sons, Ltd., U.K.
- Lee, J., Lee, S., Han, D., Gwak, G. and Ju, H. (2017). Numerical modeling and simulations of active direct methanol fuel cell (DMFC) systems under various ambient temperatures and operating conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(3), 1736-1750.
- Li, H., Liao, C. and Wang, L. (2009). Research on state-of-charge estimation of battery pack used on hybrid electric vehicle. *Proc. Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf*, 1-4.
- Li, Q., Chen, W., Liu, Z., Li, M. and Lei, M. (2015). Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway. *Journal of Power Sources*, 279, 267-280.
- Li, X., Ma, H., Shen, Y., Hu, W., Jiang, Z., Liu, B. and Guiver, M. D. (2016). Dimensionally-stable phosphoric acid-doped polybenzimidazoles for high-temperature proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 336, 391-400.
- Liu, H., Song, C., Zhang, L., Zhang, J., Wang, H. and Wilkinson, D. P. (2006). A review of anode catalysis in the direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources*, 155(2), 95-110.
- Liu, W. and Christopher, D. M. (2015). Dispersion of hydrogen leaking from a hydrogen fuel cell vehicle. *Int J Hydrogen Energy*, 40(46), 16673-16682.
- Liu, X. H., Dong, F., Liu, P., Li, Z., Tong, Y. D., Feng, M. N., Hao, M. Q., Wang, Y. and Zhang, P. P. (2018). Direct electricity generation from dissolved cellulosic biomass in an alkaline fuel cell. *Fuel Cells*, 18(2), 219-226.
- Lucia, U. (2014). Overview on fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 164-169.

- Lukic, S., Cao, J., Bansal, R. C., Rodriguez, F. and Emadi, A. (2008). Energy storage systems for automotive applications. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 55(6), 2258-2267.
- Mahato, N., Banerjee, A., Gupta, A., Omar, S. and Balani, K. (2015). Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: A review. *Progress in Materials Science*, 72, 141-337.
- Mallick, R. K., Thombre, S. B. and Shrivastava, N. K. (2016). Vapor feed direct methanol fuel cells (DMFCs): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 51-74.
- Marino, M. G. and Kreuer, K. D. (2015). Alkaline stability of quaternary ammonium cations for alkaline fuel cell membranes and ionic liquids. *ChemSusChem*, 8(3), 513-523.
- Marzougui, H., Amari, M., Kadri, A., Bacha, F. and Ghouili, J. (2017). Energy management of fuel cell/battery/ultracapacitor in electrical hybrid vehicle. *Int J Hydrogen Energy*, 42, 8857-8864.
- McLean, G. F., Niet, T., Prince-Richard, S. and Djilali, N. (2002). An assessment of alkaline fuel cell technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(5), 507-526.
- Mehdi, M., Shahrads, S. and Masood, J. Z. (2017). Energy, exergy and sensitivity analyses of a hybrid combined cooling, heating and power (CCHP) plant with molten carbonate fuel cell (MCFC) and Stirling engine. *Journal of Cleaner Production*, 148, 283-294.
- Mehmood, A., Scibioh, M. A., Prabhuram, J., An, M. G. and Ha, H. Y. (2015). A review on durability issues and restoration techniques in long-term operations of direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources*, 297, 224-241.
- Mekhilef, S., Saidur, R. and Safari, A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renew Sustain Energy Rev*, 16(1), 981-989.
- Melchior, J. P., Majer, G. and Kreuer, K. D. (2017). Why do proton conducting polybenzimidazole phosphoric acid membranes perform well in high-temperature PEM fuel cells? *Phys. Chem. Chem. Phys*, 19, 601-612.
- Mourad, M. A. (2014). A proposed fuel cell vehicle for reducing CO₂ emissions and its contribution to reducing greenhouse gas emissions. *Int J Eng Technol*, 3(2), 252-261.
- Munjewar, S. S., Thombre, S. B., and Mallick, R. K. (2017). Approaches to overcome the barrier issues of passive direct methanol fuel cell – Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 1087-1104.
- Odeim, F., Roes, J. and Heinzl, A. (2015). Power management optimization of an experimental fuel cell/battery/supercapacitor hybrid system. *Energies*, 8(7), 6302-6327.

- Olson, J. B. and Sexton, E. D. (2000). Operation of lead–acid batteries for HEV applications. *Proc. 15th Battery Conf. Appl. Adv*, 205-210.
- Oshiba, Y., Hiura, J., Suzuki, Y. and Yamaguchi, T. (2017). Improvement in the solid-state alkaline fuel cell performance through efficient water management strategies. *Journal of Power Sources*, 345, 221-226.
- Pachauri, R. K. and Chauhan, Y. K. (2016). Various control schemes of power management for phosphoric acid fuel cell system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 49-57.
- Papurello, D., Lanzini, A., Tognana, L., Silvestri, S. and Santarelli, M. (2015). Waste to energy: Exploitation of biogas from organic waste in a 500 W_{el} solid oxide fuel cell (SOFC) stack. *Energy*, 85, 145-158.
- Pei, P., Chang, Q. and Tang, T. (2008). A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime. *Int J Hydrogen Energy*, 33(14), 3829-3836.
- Pollet, B. G., Staffell, I. and Shang, J. L. (2012). Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. *Electrochimica Acta*, 84, 235-249.
- Prakash, B. S., Kumar, S. S. and Aruna, S. T. (2014). Properties and development of Ni/YSZ as an anode material in solid oxide fuel cell: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 149-179.
- Ramesh, V. and Krishnamurthy, B. (2018). Modeling the transient temperature distribution in a direct methanol fuel cell. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 809, 1-7.
- Rayment, C. and Sherwin, S. (2003). *Introduction to fuel cell technology*. Univ Notre Dame. p. 156.
- Raza, R., Akram, N., Javed, M. S., Rafique, A., Ullah, K., Ali, A., Saleem, M. and Ahmed, R. (2016). Fuel cell technology for sustainable development in Pakistan-An overview. *Renew Sustain Energy Rev*, 53, 450-461.
- Ren, G., Ma, G. and Cong, N. (2015). Review of electrical energy storage system for vehicular applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 225-236.
- Ren, X., Zelenay, P., Thomas, S., Davey, J. and Gottesfeld, S. (2000). Recent advances in direct methanol fuel cells at Los Alamos National Laboratory. *Journal of Power Sources*, 86(1–2), 111-116.
- Ribeiro, P. F., Johnson, B. K., Crow, M. L., Arsoy, A. and Liu, Y. (2001). Energy storage systems for advanced power applications. *Proc. IEEE*, 89(12), 1744-1756.
- Rodatz, P., Paganelli, G., Sciarretta, A. and Guzzella, L. (2005). Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle. *Control Engineering Practice*, 13, 41-53.

- Saakes, M., Woortmeijer, R. and Schmal, D. (2005). Bipolar lead–acid battery for hybrid vehicles. *J. Power Sources*, 144(2), 536-545.
- Salvi, B. L. and Subramanian, K. A. (2015). Sustainable development of road transportation sector using hydrogen energy system. *Renew Sustain Energy Rev*, 51, 1132-1155.
- Sammes, N., Bove, R. and Stahl, K. (2004). Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(5), 372-378.
- Santos, K. G. D., Eckert, C. T., Rossi, E. D., Bariccati, R. A., Frigo, E. P., Lindino, C. A. and Alves, H. J. (2017). Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 563-571.
- Saygili, Y., Eroglu, I. and Kincal, S. (2015). Model based temperature controller development for water cooled PEM fuel cell systems. *Int J Hydrogen Energy*, 40(1), 615-622.
- Schultz, M. G., Diehl, T., Brasseur, G. P. and Zittel, W. (2003). Air pollution and climate-forcing impacts of a global hydrogen economy. *Science*, 302, 624-627.
- Scrosati, B. and Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *J. Power Sources*, 195, 2419-2430.
- Sengodan, S., Choi, S., Jun, A., Shin, T. H., Ju, Y. W., Jeong, H. Y., Shin, J., Irvine, J. T. S. and Kim, G. (2015). Layered oxygen-deficient double perovskite as an efficient and stable anode for direct hydrocarbon solid oxide fuel cells. *Nature Materials*, 14, 205–209.
- Sharaf, O. Z. and Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renew Sustain Energy Rev*, 32, 810-853.
- Sørensen, B. (2012). *Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications*. 2nd edition, Elsevier Publishing., USA.
- Sunarso, J., Hashim, S. S., Zhu, N. and Zhou, W. (2017). Perovskite oxides applications in high temperature oxygen separation, solid oxide fuel cell and membrane reactor: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 61, 57-77.
- Thackeray, M. M., Wolverton, C. and Isaacs, E. D. (2012). Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries. *Energy Environ. Sci*, 5, 7854-7863.
- Thounthong, P., Raël, S. and Davat, B. (2009). Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 193(1), 376-385.
- Thounthong, P., Sikkabut, S., Mungporn, P., Nahid-Mobarakeh, B., Pierfederici, S. and Davat, B. (2014). Nonlinear control algorithm of supercapacitor/Li-Ion battery

energy storage devices for fuel cell vehicle applications. *Mecatronics (MECATRONICS)*, 10th France-Japan/8th Europe-Asia Congress on.

- Tie, S. F. and Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 82-102.
- Venkatesetty, H. V. and Jeong, Y. U. (2002). Recent advances in lithium-ion and lithium-polymer batteries. *Proc. 17th Annu. Battery Conf. Appl. Adv*, 173-178.
- Viera, J. C., Gonzalez, M., Anton, J. C., Campo, J. C., Ferrero, F. J. and Valledor, M. (2006). NiMH vs NiCd batteries under high charging rates. *Proc. 28th Annu. Telecommun. Energy Conf*, 1-6.
- Walker, S. B., Fowler, M. and Ahmadi, L. (2015). Comparative life cycle assessment of power-to-gas generation of hydrogen with a dynamic emissions factor for fuel cell vehicles. *J Energy Storage*, 4, 62-73.
- Wang, C., Nehrir, M. H. and Gao, H. (2006). Control of PEM fuel cell distributed generation systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2), 586-595.
- Wang, Y., Leung, D. Y. C., Xuan, J. and Wang, H. (2017). A review on unitized regenerative fuel cell technologies, part B: Unitized regenerative alkaline fuel cell, solid oxide fuel cell, and microfluidic fuel cell. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 775-795.
- Wehrey, M. C. (2004). What's new with hybrid electric vehicles. *IEEE Power Energy Mag*, 2(6), 34-39.
- White, C. M., Steeper, R. R. and Lutz, A. E. (2006). The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. *Int J Hydrogen Energy*, 31(10), 1292-1305.
- Wilberforce, T., Alaswad, A., Palumbo, A., Dassisti, M. and Olabi, A. G. (2016). Advances in stationary and portable fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 41(37), 16509-16522.
- Wilberforce, T., El-Hassan, Z., Khatib, F. N., Makky, A. A., Baroutaji, A., Carton, J. G. and Olabi, A. G. (2017). Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), 25695-25734.
- Winter, M. and Brodd, R. J. (2004). What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chemical Reviews*, 104(10), 4245-4270.
- Won-Jun, J., Young, J. H., Hak-Min, K., Jae-Oh, S., Hyun-Seog, R. and Yun, C. K. (2017). Alkali resistant Ni-loaded yolk-shell catalysts for direct internal reforming in molten carbonate fuel cells. *Journal of Power Sources*, 352, 1-8.
- Won-Jun, J., You-Shick, J., Jae-Oh, S., Hyun-Seog, R. and Wang, L. Y. (2018). Preparation of a Ni-MgO-Al₂O₃ catalyst with high activity and resistance to potassium

- poisoning during direct internal reforming of methane in molten carbonate fuel cells. *Journal of Power Sources*, 378, 597-602.
- Wu, M., Zhang, H., Zhao, J., Wang, F. and Yuan, J. (2018). Performance analysis of an integrated phosphoric acid fuel cell and thermoelectric device system for power and cooling cogeneration. *International Journal of Refrigeration*, 89, 61-69.
- Xu, L., Li, J., Hua, J., Li, X. and Ouyang, M. (2009). Optimal vehicle control strategy of a fuel cell/battery hybrid city bus. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(17), 7323-7333.
- Yang, Y., Wang, J., Zheng, J., Li, S. and Zhang, S. (2014). A stable anion exchange membrane based on imidazolium salt for alkaline fuel cell. *Journal of Membrane Science*, 467, 48-55.
- Yu, Z., Zinger, D. and Bose, A. (2011). An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle. *Journal of Power Sources*, 196(4), 2351-2359.
- Zandi, M., Payman, A., Martin, J. P., Pierfederici, S., Davat, B. and Meibody-Tabar F. (2011). Energy management of a fuel cell/supercapacitor/battery power source for electric vehicular applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(2), 433-443.
- Zervas, P. L., Tatsis, A., Sarimveis, H. and Markatos, N. C. G. (2008). Development of a novel computational tool for optimizing the operation of fuel cells systems: Application for phosphoric acid fuel cells. *Journal of Power Sources*, 185(1), 345-355.
- Zhang, H., Lin, G. and Chen, J. (2012). Multi-objective optimisation analysis and load matching of a phosphoric acid fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(4), 3438-3446.
- Zhang, W., Li, J., Xu, L. and Ouyang, M. (2017). Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy. *Energy Conversion and Management*, 134, 59-69.
- Zhang, X., Cai, L., Liao, T., Zhou, Y., Zhao, Y. and Chen, J. (2018). Exploiting the waste heat from an alkaline fuel cell via electrochemical cycles. *Energy*, 142, 983-990.
- Zhang, Y., Wu, L., Hu, X. and Liang, H. (2008). Model and control for supercapacitor-based energy storage system for metro vehicles. *Proc. Int. Conf. Elect. Mach. Syst*, 2695-2697.
- Zheng, C. H., Oh, C. E., Park, Y. I. and Cha, S. W. (2012). Fuel economy evaluation of fuel cell hybrid vehicles based on equivalent fuel consumption. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 1790-1796.
- Zheng, F., Kotobuki, M., Song, S., Lai, M. O. and Lu, L. (2018). Review on solid electrolytes for all-solid-state lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 389, 198-213.



EKLER

EK-1. MATLAB ortamında oluşturulan kontrol stratejisi yazılım kodları

```

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = Contr(t,x,u,flag)

switch flag

    case 0
        [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
    case 1
        sys=mdlDerivatives(t,x,u);
    case 2
        sys=mdlUpdate(t,x,u);
    case 3
        sys=mdlOutputs(t,x,u);
    case 4
        sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
    case 9
        sys=mdlTerminate(t,x,u);
    otherwise
        DASTudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));

end

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes

    sizes = simsizes;

    sizes.NumContStates = 0;
    sizes.NumDiscStates = 0;
    sizes.NumOutputs = 2;
    sizes.NumInputs = 3;
    sizes.DirFeedthrough = 1;
    sizes.NumSampleTimes = 1;

    sys = simsizes(sizes);

    x0 = [];
    str = [];
    ts = [-1 0];

    simStateCompliance = 'UnknownSimState';

function sys=mdlDerivatives(t,x,u)

    sys = [];

function sys=mdlUpdate(t,x,u)

    sys = [];

function sys=mdlOutputs(t,x,u)

    Pbatt_char=1500;

    SOC_min=60; SOC_max=90;

    SOC_nom1=85;SOC_nom2=60.1;Pfc_min=850;Pfc_max=8800;

    Pfc_opt=1500;Pbatt_max=3400;

```

```
if(u(2)>SOC_max)
    state=1;
end

if(u(2)>=SOC_nom2 && u(2)<=SOC_nom1)
    state=2;
end

if(u(2)>SOC_nom1 && u(2)<=SOC_max)
    state=u(3);
end

if(u(2)<SOC_min)
    state=3;
end

if(u(2)>=SOC_min && u(2)<SOC_nom2)
    state=u(3);
end

%state 1
if(state==1 && u(1)<Pfc_min)
    Pfc=Pfc_min;
end

%state 2
if(state==1 && u(1)>=Pfc_min && u(1)<Pfc_max)
    Pfc=u(1);
end

%state 3
if(state==1 && u(1)>=Pfc_max)
    Pfc=Pfc_max;
end

if(state==2 && u(1)<Pfc_min)
    Pfc=Pfc_min;
end

%state 4
if(state==2 && u(1)>=Pfc_min && u(1)<Pfc_opt)
    Pfc=Pfc_opt;
end

%state 5
if(state==2 && u(1)>=Pfc_opt && u(1)<Pfc_max)
```

```
Pfc=u(1);

end

%state 6

if(state==2 && u(1)>=Pfc_max)
    Pfc=Pfc_max;

end

if(state==3 && u(1)<Pfc_min)
    Pfc=u(1)+Pbatt_char;

end

%state 7

if(state==3 && u(1)>=Pfc_min && u(1)<Pfc_opt)
    Pfc=max(u(1)+Pbatt_char,Pfc_opt);

end

%state 8

if(state==3 && u(1)>=Pfc_opt && u(1)<Pfc_max)
    Pfc=u(1)+Pbatt_char;
    %Pfc=Pfc_max;

end

%state 9

if(state==3 && u(1)>=Pfc_max)
    Pfc=Pfc_max;

end

sys = [Pfc state];

function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)

sampleTime = 1;
sys = t + sampleTime;

function sys=mdlTerminate(t,x,u)

sys = [];
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAYA, Kemal
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.02.1991, Kayseri
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (326) 613 56 00
 Faks : 0 (326) 613 56 13
 e-mail : kemal.kaya@iste.edu.tr



Yayınlar

- Gurz, M., Baltacioglu, E., Hames, Y. and **Kaya, K.** (2017). The meeting of hydrogen and automotive: A review. *Int J Hydrogen Energy*, 42(36), 22334-22346.
- Hames, Y., **Kaya, K.**, Baltacioglu, E. and Turksoy, A. (2018). Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles. *Int J Hydrogen Energy*, 43(23), 10810-10821.

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-.....	İskenderun Teknik Üniversitesi (İSTE)	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Yüzme, Futbol, Satranç, Masa Tenisi

DİZİN

A

AC · 64, 78, 79, 80, 84
AFC · 19, 21, 22, 30
Aktivasyon kaybı · 47
Asenkron makine · 70

B

Batarya · 30, 35, 43, 96
BEV · 17
buck/boost DC/DC
konvertör · 62

Ç

çekiş motoru · 61, 65,
70, 71, 79, 82, 97

D

DC bara · 41, 61, 100
DC/AC inverter · 65
DC/DC boost
konvertör · 61
direnç · 36, 55, 61, 63
diyot · 61, 63, 64, 65
DMFC · 19, 27, 107

E

ECMS · 40, 42, 45
enerji yönetim sistemi
18, 43, 76, 77, 78,
93

F

FLC · 43

G

generatör · 69, 71, 80,
83, 84, 85, 92
güç elektroniği · 18,
40, 61

H

HFCEV · 16
Hidrojen Ekonomisi ·
18, 101
hidrojen tüketimi · 44,
45, 98, 101
hidrojen yakıt hücreli
araç · 16, 31, 39,
44, 55, 71, 76, 98

I

ICE · 16, 17
IGBT · 65, 66, 80

İ

inverter · 65, 79, 84

K

kayma · 67, 80
kondansatör · 36, 66
konsantrasyon
potansiyeli · 47, 48
kontrol elektroniği · 76
kontrol stratejisi · 18,
30, 34, 39, 40, 42,
46, 49, 76, 78, 85,
88, 89, 92, 93, 95,
99, 100, 101, 115

L

Li-ion · 43, 44, 55, 106
lityum-iyon batarya 56

M

MATLAB/Simulink ·
18, 51, 59, 61, 68,
69, 76, 78, 80
MCFC · 19, 20, 30,
102, 103, 109
mekanik tork · 69
motor · 65, 69, 71, 80,
81, 82, 83, 105

N

Nernst · xii, xiii, 47
NiMH · 32, 35, 106

O

oksijen · 21, 23, 24, 79
OMC · 42

P

PAFC · 19, 25, 26, 27
PEMFC · 19, 23, 24,
27, 29, 30, 41, 43,
44, 46, 47, 49, 52
PI · 49, 52, 62, 90
PWM · 44, 65, 80

R

rejeneratif frenleme ·
39, 62, 65, 69, 72,
76, 80, 83, 90, 91,
92, 96, 97, 98, 101
rotor · 68, 70, 71, 80,
81, 82, 83, 84

S

sincap kafesli · 67, 68,
69, 70, 79, 82, 84
SOC · 31, 42, 55, 59,
88, 90, 96, 115, 116
SOFC · 19, 20, 21, 30,
102, 110
stator · 68, 70, 81, 84
süperkapasitör · 17, 18,
30, 36, 37, 38, 39,
41, 42, 43, 44, 45,
46, 49, 51, 58, 59,
64, 65, 72, 73, 74,
75, 76, 78, 82, 83,
87, 91, 92, 93, 95,
96, 97, 99, 100, 101

T

teknoloji · 21, 27, 44
TTCAN · 40

U

ultrakapasitör · 36

Ü

üç faz çekiş motoru 46

Y

yakıt hücreli araçlar ·
16, 17, 18, 100
yakıt hücresi · 16, 18,
19, 20, 23, 26, 27,
28, 29, 30, 39, 40,
41, 42, 43, 44, 46,
47, 49, 50, 51, 52,
58, 59, 62, 71, 73,
74, 75, 76, 78, 79,
82, 85, 86, 87, 89,
91, 92, 93, 95, 96,
97, 98, 100, 101
yakıt hücresi güç
modülü · 50
yakıt tasarrufu · 18, 44,
50, 51, 73, 83, 85,
98, 100, 101
yakıt tüketimi · 17, 42,
49, 79, 85, 94, 95,
96, 97, 98, 99, 101
yarı iletken · 61, 63
yenilenebilir enerji ·
16, 100
Yeşil Enerji · 18, 101
yokuş iniş-çıkış yol
modeli · 71, 72
yol koşulları · 71
yol modelleri · 18, 72

Z

zaman tetiklemeli
kontrolör alan ağı ·
40



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

