



YAKIT HÜCRELİ HİBRİT BİR TAŞITIN MODELLENMESİ VE VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Ali BİBERCİ

**2020
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK

**YAKIT HÜCRELİ HİBRİT BİR TAŞITIN MODELLENMESİ VE
VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Mehmet Ali BİBERCİ

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK**

**KARABÜK
Ağustos 2020**

Mehmet Ali BİBERCİ tarafından hazırlanan “YAKIT HÜCRELİ HİBRİT BİR TAŞITIN MODELLENMESİ VE VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 13/08/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet ŞEN (BAİBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Engin GEDİK (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Kemal BALKİ (SNÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Samet USLU (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mehmet Ali BİBERCİ

ÖZET

Doktora Tezi

YAKIT HÜCRELİ HİBRİT BİR TAŞITIN MODELLENMESİ VE VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Ali BİBERCİ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK

Ağustos 2020, 174 sayfa

Dünyanın birçok ülkesinde otomobil kullanımının artması, fosil yakıt kaynaklarının azalan rezervi ve araç teknolojilerinde değişiklikler yeni araç geliştirme zorunluluğunu doğurmuştur. Ayrıca, taşımacılık sektöründen kaynaklanan çevre sorunları, elektrikli araç (EA) kullanımını son on yılda hızla artırmıştır. Bu çalışmada; benzinli bir taşıt, hibrit benzinli bir taşıt ve yakıt hücresel bir taşıtın Matlab-Simulink ortamında modellenmesi yapılmıştır. Taşıtların her bileşeni üretici teknik özelliklerine göre modellenmiştir. Sürücü kontrolcüsü belirlenen sürüş çevriminin hız değerine göre araç hızını ve pozisyonunu ayarlamakta ve bu şekilde gerçekçi bir dinamik modelleme ve simülasyon ortamı oluşturulmasını sağlamaktadır. Benzinli taşıt ve hibrit benzinli taşıt çalışma kapsamında oluşturulan araç sürüş çevrimi ile sürülerek verimlilikleri kıyaslanmıştır. Sürüş yolu olarak Karabük-Safranbolu yolu kullanılmıştır. Sürüş yol şartları, aracın çevrim boyunca her bir konumundaki GPS verilerinden elde edilen yükseklik ve mesafe değerlerine

göre belirlenmiştir. Yol şartları ve sürüş çevrimi boyunca modellenen araçlar simüle edilmiştir. Hibrit benzinli taşıt için 1 litre yakıtla alınan yol 57,46 km olurken benzinli taşıt için bu değer 15,9 km olmuştur. Yaklaşık olarak hibrit benzinli taşıt, benzinli taşıta göre 4 kat daha iyi yakıt verimine sahip olması yanında emisyon değerleri de önemli ölçüde iyileşmektedir. Yakıt pilli taşıt için bir otomotiv yakıt hücresi sistemi geliştirilmiştir. Yakıt hücresi sistemi, yakıt pili yığını ve sistem yardımcı bileşenlerinden (kompresör, fan, pompa, nemlendirici) oluşmaktadır. Oluşturulan yakıt pili sistemi 625 cm² alana sahip ve 230 hücreden oluşmakta olup yaklaşık 90-140 kW arası güce çıkabilmektedir. Bu tip bir yakıt pili günümüz araçlarına uygun güç üretmekte olup bütünsel bir sistem olduğu için rahatlıkla bir araca uygulanabilir yapıdadır. Modellenen yakıt pilli taşıt ECE-15 sürüş çevrimi kullanılarak denenmiştir. Çevrim boyunca yakıt pili sisteminin enerji ve su yönetimi, ısı transferi, yakıt tüketimi ve sistem verimliliği incelenmiştir. Yardımcı bileşenlerden en fazla enerji tüketiminin fandan kaynaklandığı belirlenmiştir. Çevrim boyunca 0.004 g hidrojen yakıtı tüketilmiştir. Yakıt pili sisteminde en yüksek sistem verimi 3 atm basınçta %48,2 olarak bulunmuştur. Yardımcı ekipmanların güç tüketiminden dolayı verim %25 değerine düşmüştür. Kurulan sistemin gerçek bir sisteme benzerliğini belirlemek amacıyla, bir deneysel çalışmadan alınan verilerle model verileri kıyaslanmış ve model anlamlı bulunmuştur. Simulink ortamında oluşturulan hibrit ve yakıt pilli taşıt modellerinin gelecekteki prototip araç çalışmalarına stratejik avantajlar ve yenilikler sağlayabileceği beklenmektedir.

Anahtar Sözcükler : Elektrikli taşıt, hibrid araç, yakıt pilli (hücreli) taşıt, yakıt hücresi.

Bilim Kodu : 9143

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATING EFFICIENCY OF THE MODELED FUEL CELL HYBRID VEHICLE

Mehmet Ali BİBERCİ

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK

August 2020, 174 pages

The increase in the use of automobiles in many countries of the world and the decreasing reserves of fossil fuel resources have led to the necessity of changing vehicle technologies and developing new vehicles. Therefore, environmental problems arising from the transport sector have rapidly increased the use of electric vehicles (EA) in the last decade. In this study; a gasoline vehicle, a hybrid gasoline vehicle and a fuel cell vehicle were modeled in Matlab-Simulink environment. Each component of the vehicles is modeled according to the manufacturer's specifications. The driver controller adjusts the vehicle speed and position according to the speed value of the specified driving cycle, and thus provides a realistic dynamic modeling and simulation environment. The efficiency of the gasoline vehicle and hybrid gasoline vehicle was compared with the driving cycle created within the scope of the study. Karabük-Safranbolu road was used as the driving road. The driving road

conditions were determined according to the height and distance values obtained from the GPS data at each position of the vehicle throughout the cycle. The vehicles modeled throughout the road conditions and driving cycle were simulated. While the distance covered by 1 liter of fuel for a hybrid gasoline vehicle was 57,46 km, this value was 15,9 km for a gasoline vehicle. In addition to having approximately 4 times better fuel efficiency than a gasoline vehicle, a hybrid gasoline vehicle has significantly improved emission values. An automotive fuel cell system has been developed for the fuel cell vehicle. The fuel cell system consists of the fuel cell stack and system auxiliary components (compressor, fan, pump, humidifier). The fuel cell system created has an area of 625 cm² and consists of 230 cells and can reach a power of approximately 90-140 kW. This type of fuel cell generates power suitable for today's vehicles and can be easily applied to a vehicle because it is a holistic system. Modeled fuel cell vehicle was tested using ECE-15 driving cycle. Energy and water management, heat transfer, fuel consumption and system efficiency of the fuel cell system throughout the cycle have been studied. It has been determined that among the auxiliary components, the highest energy consumption originates from the fan. 0,004 g of hydrogen fuel was consumed during the cycle. The highest system efficiency in the fuel cell system was found to be 48,2% at 3 atm pressure. The efficiency has dropped to 25% due to the power consumption of the auxiliary equipment. In order to determine the similarity of the established system to a real system, the model data were compared with the data obtained from an experimental study and the model was found meaningful. It is expected that hybrid and fuel cell vehicle models created in Simulink environment can provide strategic advantages and innovations to future prototype vehicle studies.

Keywords: Electric vehicle, hybrid vehicle, fuel cell vehicle, fuel cell.

Science Code: 9143

TEŞEKKÜR

Doktora Öğrenimi ve Tez çalışması boyunca tüm aşamalarda ilgisini ve desteğini esirgemeyen, akademik bilgisinden ve tecrübesinden faydalandığım Danışman Hocam Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatın her anında daima yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aile bireylerime tüm kalbimle teşekkür ederim.

Doktora kapsamındaki çalışmalarında teknik desteklerini esirgemeyen Mathworks yazılım şirketine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xix
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
LİTERATÜR TARAMASI.....	4
BÖLÜM 3	12
KONU KAPSAM ve GENEL BİLGİLER	12
3.1. ELEKTRİKLİ ARACIN TARİHSEL GELİŞİMİ	12
3.2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR (EA)	13
3.2.1. Hibrit Elektrik Araçlar	15
3.2.1.1. Elektrikli Araç (EA) ve Seri Hibrit Elektrikli Araç (SHEA)	19
3.2.1.2. Paralel Hibrit Elektrikli Araç (PAHEA).....	20
3.2.1.3. Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araç (SPHEA) ve Kompleks Seri- Paralel Hibrit Elektrikli Araç (KSPHEA)	21
3.2.1.4. Yoldan Paralel Hibrit Elektrikli Araç (YPHEA).....	22
3.2.2. Şebekeden Şarj Edilebilen HEA'lar.....	23
3.2.3. Bataryalı Elektrik Araçlar (BEA)	23

3.2.4. Yakıt Pilli Elektrik Araçlar (YPEA)	24
3.2.4.1. Yakıt Hücresi	26
3.2.4.2. Otomobiller İçin Yakıt Pili Tahrik Sistemi.....	30
3.2.4.3. Sistem Etkileşimleri	32
3.2.4.4. Reaktan Akış Alt Sistemi	32
3.2.4.5. Isı ve Sıcaklık Alt Sistemi	33
3.2.4.6. Su Yönetimi Alt Sistemi.....	33
3.2.4.7. Güç Yönetimi Alt Sistemi	34
3.2.4.8. Yakıt İşlemci Alt Sistemi	34
3.2.5. Bataryalar ve Batarya Çeşitleri	34
3.2.5.1. Kurşun Asit Bataryalar	36
3.2.5.2. Nikel Bazlı Bataryalar.....	36
3.2.5.3. Metal-Hava Bataryaları.....	36
3.2.5.4. Sodyum Bazlı Bataryalar.....	36
3.2.5.5. Lityum İyon Bataryalar.....	37
3.2.5.6. Alüminyum Hava Bataryaları	37
3.2.5.7. Çinko Hava Bataryaları	37
3.2.6. Elektrikli Araçlar İçin Elektrik Motorları.....	38
3.2.6.1. EA'lar İçin Güç Elektroniği Sürücü Yapıları	39
 BÖLÜM 4	40
MATERYAL ve YÖNTEM.....	40
4.1. HİBRİT BİR TAŞITIN DİNAMİK MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU	40
4.1.1. İçten Yanmalı Motor (İYM).....	47
4.1.2. İYM Modifikasyonları	50
4.1.3. İYM Deneysel Performans Ölçümleri	51
4.1.4. Elektrik Motoru.....	53
4.1.5. DA/DA Dönüştürücü.....	62
4.1.6. Maxwell Süper Kapasitör	64
4.1.6.1. Lityum İyon Süper Kapasitör.....	71
4.1.7. Transmisyon Sistemi	73
4.1.7.1. DA Motor ile Tekerlekler Arası Transmisyon Sistemi.....	74

4.1.8. Gaz Potansiyometresi.....	75
4.1.9. Tekerlekler.....	75
4.1.10. Araç Sürüş Kontrol Sistemi.....	76
4.1.11. Yakıt Depeosu Modeli	77
4.1.12. Termal Sistem Modeli.....	78
4.1.13. Aerodinamik Sürüklenme Kuvveti (F_{ad})	82
4.1.14. Yuvarlanma Direnç Kuvveti (F_{yd}).....	82
4.1.15. Tırmanma Direnci	82
4.1.16. Hızlanma kuvveti.....	83
4.2. BİR TAŞIT İÇİN YAKIT HÜCRESİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ.....	84
4.2.1. Yakıt Pili Sistem Modeli Yardımcı Bileşenleri	87
4.2.1.1. Kompresör Modeli.....	89
4.2.1.2. Manifold Dinamiği Modeli	90
4.2.1.3. Gaz Karışımlarının Termodinamiğinin Gözden Geçirilmesi.....	93
4.2.1.4. Hava Soğutucu (Statik) Modeli	93
4.2.1.5. Nemlendirici (Statik) Model	93
4.2.2. Yakıt Hücresi Yığın Modeli	94
4.2.2.1. Yığın Voltaj Modeli	95
4.2.2.2. Yakıt Pili Açık Devre Voltajı.....	95
4.2.2.3. Yakıt Pili Dinamik Elektriksel Etkisi.....	97
4.2.2.4. Katot Akış Modeli	97
4.2.2.5. Anot Akış Modeli	99
4.2.2.6. Membran Hidrasyon Modeli	101
4.2.3. Pem Modeli İçin Analiz Ve Temel Denklemler	102
4.2.3.1. Aktivasyon Kayıpları	102
4.2.3.2. Omik Kayıplar.....	103
4.2.3.3. Konsantrasyon Kayıpları	103
4.2.3.4. Yakıt Pili Verimliliği.....	103
4.2.3.5. Membranın Hidrasyon Yönetimi.....	103
4.2.3.6. Kütle Dengesi.....	104
4.2.3.7. Isı Transferi Dengesi	105
4.2.3.8. Toplam Sistem Gücü ve Sistem Termal Verimliliği.....	105

4.3. BENZİNLİ BİR MOTORUN MATLAB/SİMÜLİNK ORTAMINDA MODELLENMESİ	106
4.3.1. Sürüş Kontrolcüsünün Modellenmesi	106
4.3.2. Taşıt Çekiş Gücünün Modellenmesi	108
4.3.3. Motor Gücü, Şanzıman ve Tekerlek Modelinin Oluşturulması.....	109
4.3.4. Vites Kutusu Modeli	109
4.3.5. Taşıt Tekerlek Modeli	110
 BÖLÜM 5	 113
BULGULAR VE TARTIŞMALAR	113
5.1. BENZİNLİ BİR TAŞIT İLE HİBRİT ELEKTRİKLİ BİR TAŞITIN SİMÜLASYON ANALİZ SONUÇLARI.....	113
5.1.1. HEA Dişli Oranının Yakıt Verimine (1 L yakıtla alınan yol) Etkisi	113
5.1.2. HEA Dinamiğinin Yakıt Verimine Etkisi	114
5.1.2.1. HEA Yuvarlanma Direnci Katsayısının Yakıt Verimine Etkisi.....	114
5.1.2.2. HEA Aerodinamik Direnci Katsayısının Yakıt Verimine Etkisi	114
5.1.2.3. HEA Ön Yüzey Alanının Yakıt Verimine Etkisi	116
5.1.3. Hibrit Elektrikli Taşıt Kontrolü	117
5.1.4. Hibrit Taşıt Modeli ile Benzinli Taşıt Modelinin Yakıt Verimliliği Açısından Karşılaştırılması	118
5.2. YAKIT PİLLİ ARACIN SİMÜLASYON SONUÇLARI	121
5.2.1. Taşıt Modeli İçin Güç Gereksinimi.....	122
5.2.2. Sistemi Oluşturan Yardımcı Ekipmanların Güç Gereksinimi	123
5.2.3. Yakıt Hücresi Hidrojen Tüketimi.....	124
5.2.4. Sistem Verimliliği.....	125
5.2.5. Su Yönetimi.....	126
5.2.6. Enerji Yönetimi.....	127
5.2.7. Sistemin Soğutulması İçin Gerekli Radyatör Alanı ve Soğutucu Sıvı Akış Oranı.....	128
5.3. YAKIT PİLİ MODELİ VALİDASYONU	130

BÖLÜM 6	136
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	136
KAYNAKLAR	139
EK AÇIKLAMALAR A.	151
HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞIT MATLAB SİMÜLASYONU BAŞLANGIÇ (START-UP) KOMUTLARI DOSYASI (m.file).....	151
EK AÇIKLAMALAR B.	159
YAKIT PİLLİ TAŞIT MATLAB SİMÜLASYONU BAŞLANGIÇ (START-UP) KOMUTLARI DOSYASI (m.file)	159
ÖZGEÇMİŞ	174

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Elektrikli araçların tarihsel gelişimi.....	13
Şekil 3.2. Elektrikli Araçların Sınıflandırılması.....	15
Şekil 3.3. Hibrit Elektrik Araçlar	16
Şekil 3.4. İçten Yanmalı Motorların Verimliliklerinin Elektrik Motorlarının Verimlilikleri İle Kıyaslanması	16
Şekil 3.5. EA'ların Kullanılan Enerji Dönüştürücülerine Göre Sınıflandırılması	18
Şekil 3.6. Seri Hibrit Elektrikli Araç Sistemi.....	20
Şekil 3.7. Paralel Hibrit Elektrikli Araç Sistemi (PAHEA)	21
Şekil 3.8. Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araç Sistemi (SPHEA)	21
Şekil 3.9. Kompleks Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araç Sistemi (KSPHEA).....	22
Şekil 3.10. Yoldan Paralel Hibrit Elektrikli Araç Sistemi (YPHEA)	22
Şekil 3.11. Bir Şebekeden Şarj Edilebilen HEA'lar	23
Şekil 3.12. Bataryalı Elektrik Araçlar (BEA).....	24
Şekil 3.13. Yakıt Pili Elektrik Araçlar (YPEA)	25
Şekil 3.14. YPEA'nın Genel Yapısı	25
Şekil 3.15. Yakıt Pili Reaksiyon	26
Şekil 3.16. Membranlı Elektrolit Düzenegi.....	28
Şekil 3.17. Tipik Bir Yakıt Hücresi Polarizasyon Eğrisi	29
Şekil 3.18. Farklı Çalışma Basınçları İçin Yakıt Hücresi Polarizasyonu.....	30
Şekil 3.19. Otomotiv Yakıt Hücresi Tahrik Sistemi	31
Şekil 3.20. Elektrik Motor Çeşitleri	38
Şekil 3.21. Toyota Prius HEA'daki Güç Dönüştürücüler	39
Şekil 4.1. Google earth pro ile yolun oluşturulması.....	42
Şekil 4.2. Yükseklik profili	43
Şekil 4.3. Yol eğim değerleri (rad).....	43
Şekil 4.4. Sürüş çevrimi boyunca zaman hız grafiği.....	44
Şekil 4.5. HEA güç aktarma organları	45

Şekil 4.6. Seri hibrid elektrikli araç	46
Şekil 4.7. Dört zamanlı bir İYM'de bir silindir, piston ve yakıt egzoz manifoldlarının şematik yapısı	48
Şekil 4.8. Geniş açık gaz kelebeğinde bir İYM için tipik çıkış torku, güç ve SFC..	50
Şekil 4.9. Farklı yük koşullarında tipik bir İYM için yakıt tüketimi ve verimliliği.	50
Şekil 4.10. Honda "GX35" motoru	51
Şekil 4.11. Honda "GX35 ve GX25" motor karşılaştırılması	52
Şekil 4.12. Honda "GX35 ve GX25" tork değerleri	53
Şekil 4.13. Honda "GX35 ve GX25" motoru için özgül yakıt tüketimi	53
Şekil 4.14. İYM modellenmesi	54
Şekil 4.15. Genel elektrik motorunun verimlilik özellikleri	55
Şekil 4.16. Fırçalı DA motor	57
Şekil 4.17. Kalıcı mıknatıs DA motor ve alan DA motor sarmalı	58
Şekil 4.18. DA motor için eşdeğer devre	58
Şekil 4.19. DA motorun kararlı durum özellikleri	59
Şekil 4.20. Elektrik motoru modeli	60
Şekil 4.21. DA motor yapısı	60
Şekil 4.22. Maxon "DA-motor RE65" verim grafiği	62
Şekil 4.23. Maxon "4-Q DA/DA" dönüştürücü	63
Şekil 4.24. DA-DA dönüştürü modeli	64
Şekil 4.25. Batarya hücre voltajı	66
Şekil 4.26. Akü devre modeli	67
Şekil 4.27. Tipik bir elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörün veya süper kapasitörün başlıca tanımlanması	69
Şekil 4.28. Tipik bir süper kapasitörün basit devre modeli	69
Şekil 4.29. Li-iyon kapasitörlerin yapısı	71
Şekil 4.30. Farklı elektrik enerjisi depolama teknolojileri için enerji ve güç yoğunlukları	71
Şekil 4.31. Maxwell süper kapasitör	72
Şekil 4.32. Süper kapasitör modeli	73
Şekil 4.33. İYM ile jeneratör arasındaki dişli sistemi	74
Şekil 4.34. İYM ile jeneratör arası dişli sistemi	74
Şekil 4.35. Tekerlek-motor dişli sistemi	75
Şekil 4.36. DA motor ile tekerlekler arasındaki dişli sistemi	75
Şekil 4.37. Gaz potansiyometresi	76

Şekil 4.38. Araç kontrolcü modellemesi	77
Şekil 4.39. Sürücü kontrol alt birimi	78
Şekil 4.40. İYM aç/kapa alt modülü.....	78
Şekil 4.41. Yakıt depeosu modeli.....	79
Şekil 4.42. Bir sistemin termal davranışı	80
Şekil 4.43. Üç katmanlı bir sistemin eşdeğer termal devresi	81
Şekil 4.44. Geçici ısı iletimi için termal eşdeğer devreler.....	82
Şekil 4.45. Sistem termal modelleme. (a) DA motor sıcaklık modeli, (b) Motor sargı direnci modeli.....	82
Şekil 4.46. Araca etkiyen kuvvetler	84
Şekil 4.47. Araç dinamiği modeli.....	85
Şekil 4.48. Hibrit elektrikli bir taşıt modelinin genel görünümü	86
Şekil 4.49. Yakıt pili güç sisteminin şematik gösterimi.....	87
Şekil 4.50. Yakıt pili sistem blok şeması	89
Şekil 4.51. Reaktif tedariki alt sistemi modeli H_2	90
Şekil 4.52. Kompresör blok şeması.....	91
Şekil 4.53. Manifold blok şeması.....	92
Şekil 4.54. Besleme manifoldu blok şeması.....	93
Şekil 4.55. Dönüş manifoldu blok şeması.....	93
Şekil 4.56. Yakıt hücresi yığın blok şeması	95
Şekil 4.57. Yığın kütle akışı	96
Şekil 4.58. Yakıt hücresindeki farklı kayıp türlerinin neden olduğu voltaj düşüşleri	97
Şekil 4.59. Yakıt hücresi eşdeğer devreleri	98
Şekil 4.60. Katot kütle akışı	99
Şekil 4.61. Katot akış modeli	99
Şekil 4.62. Anot kütle akışı.	101
Şekil 4.63. Anot blok şeması.....	101
Şekil 4.64. Membran hidrasyon modeli bloğu	102
Şekil 4.65. Benzinli bir taşıtın simulink ortamında modellenmesinin genel görünümü	108
Şekil 4.66. Sürücü alt modül sistemi.....	109
Şekil 4.67. Araç dinamiği ile toplam çekiş gücünün modellenmesi	109
Şekil 4.68. Motor torku	110
Şekil 4.69. Otomatik Vites Alt Modülü	111
Şekil 4.70. Motor torku modülü alt sistemi.....	112

Şekil 4.71. Motor gücü hesaplama alt modülü	113
Şekil 5.1. Elektrik motoru ile taşıt arasındaki dişli verimi ile yakıt verimi arasındaki ilişki.....	115
Şekil 5.2. Araç toplam çekme kuvveti ve araca etkiyen direnç kuvvetleri	116
Şekil 5.3. Yuvarlanma direnci katsayısının yakıt verimine etkisi.....	117
Şekil 5.4. Ayrodinamik direnç katsayısının yakıt verimine etkisi	117
Şekil 5.5. Araç ön yüzey alanı ile yakıt verimi arasındaki ilişki.....	118
Şekil 5.6. Araç pozisyon, hız, kalan yakıt ve İYM açık veya kapalı durumu grafiği....	120
Şekil 5.7. Süper kapasitör şarj durumuna göre İYM açık veya kapalı durumu	121
Şekil 5.8. Gerekli güç çıkışı	124
Şekil 5.9. Araç hızının bir fonksiyonu olarak her bir yardımcı ekipman güç gereksinimini.....	124
Şekil 5.10. Hidrojen yakıt tüketimi	125
Şekil 5.11. Sistemin genel verimliliği	126
Şekil 5.12. Yakıt hücresi su yönetimi.....	127
Şekil 5.13. Sistem enerji yönetimi.....	128
Şekil 5.14. Sistemin için gerekli radyatör alanı (cm ²).....	129
Şekil 5.15. Soğutucu sıvı akış oranı	130
Şekil 5.16. Sıcaklık dağılım grafiği.....	133
Şekil 5.17. Akım yoğunluğu dağılım grafiği.....	133
Şekil 5.18. Normallik grafiği.....	134
Şekil 5.19. Kutu grafiği	135
Şekil 5.20. Anova analizi tablosu	136

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. EA'ların avantajları ve dezavantajları	15
Çizelge 3.2. Çeşitli batarya tiplerinin özellikleri	35
Çizelge 4.1. İYM "GX25 ve GX35" için üretim verileri	51
Çizelge 4.2. DA motor özellikleri	61
Çizelge 4.3. DA/DA dönüştürücü özellikleri	64
Çizelge 4.4. Maxwell süper kapasitör özellikleri	72
Çizelge 4.5. Lityum iyon süper kapasitör özellikleri	72
Çizelge 4.6. Araç parametreleri	76
Çizelge 4.7. Maksimum tork ve d/d değerleri	76
Çizelge 5.1. Hibrit ve benzinli bir aracın yakıt ekonomisi karşılaştırılması	119
Çizelge 5.2. Deneysel ve hesaplanmış değerler	132

KISALTMALAR

EA	: Elektrikli Araç
HEA	: Hibrit Elektrikli Araç
SPHEA	: Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araç
PAHEA	: Paralel Hibrit Elektrikli Araç
KSPHEA	: Kompleks Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araç
BEA	: Bataryalı Elektrikli Araç
YPEA	: Yakıt Pilli Elektrikli Araç
PEMYH	: Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücreleri
İYM	: İçten Yanmalı Motor
HEA	: Hibrit Elektrikli Araç
FCEV	: Fuel Cell Electric Vehicle (Yakıt Pilli Elektrikli Araç)
FEM	: Fırçasız Elektrik Motor
AİM	: Asenkron İndüksiyon Motorlar
SMM	: Sabit Mıknatıslı Motor
KMFM	: Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Dc Motor
BLSR	: Fırçasız Anahtarlama Relüktans Motor
PEM	: Polimer Elektrolit Membran
ECE-15	: Avrupa Sürüş Çevrimi
YHHA	: Yakıt Hücreli Hibrid Araç
YHHA	: Yakıt Hücreli Araç
SHEA	: Seri Hibrit Elektrikli Araç
YP	: Yakıt Pili
MED	: Membran Elektrolit Düzeneci
PPS	: Zirve Güç Kaynağı
FÖYT	: Fren Özgöl Yakıt Tüketimi
EDLC	: Elektrokimyasal Çift Katmanlı Kondansatörler

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Modern dünyanın ulaşım sektörü temel olarak fosil yakıtı dayanmaktadır. Ancak, küresel ısınma, hava kirliliği ve ozon tabakasının incilmesi fosil yakıtının başlıca sorun olduğu en önemli olaylardır. Ayrıca, taşıtlarda aşırı fosil yakıt kullanımı, yeraltı petrol kaynaklarının azalmasının arkasındaki nedendir. ABD Enerji Bilgi İdaresi istatistikleri, ulaştırma sektörünün dünyadaki toplam enerji tüketiminin yaklaşık %55'ini ve 2014 yılında %30,9'unu karbondioksit gazı emisyonunu kapladığını göstermektedir. Eğer, ulaştırma sektörü için herhangi bir alternatif çözüm kabul edilmezse bu eğilimin devam edeceği ön görülmektedir [1–3].

Son yıllarda fosil yakıtlara alternatif olarak otomobil üreticileri, araçlara güç sağlamak için pil, ultrakapasitör veya yakıt hücresi gibi elektrik kaynaklarını benimsemeye başlamışlardır [4]. Elektrikli araçlar (EA'lar) sera gazı emisyonunu azaltmak ve çevreyi korumak için uygun çözümlerden biridir. EA'lar sadece temiz ve sağlıklı bir ortamın korunmasına yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda gaz veya yağla çalışan araçlara kıyasla araçların işletme maliyetini de azaltmaktadır. EA'lar içerisinde yakıt pilli EA'lar en yüksek verime sahiptir. Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri (PEMYH), düşük performans sıcaklıkları ve yüksek güç yoğunlukları nedeniyle araçlarda kullanım için en uygun yakıt hücresi türüdür [5].

Yakıt hücreleri, gaz halindeki bir yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektriğe dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır ve yaygın olarak potansiyel bir alternatif sabit ve mobil güç kaynağı olarak kabul edilir. Isı motorlarını tamamlarlar ve fosil yakıtlara her yerde bağımlılığı azaltırlar ve bu nedenle önemli çevresel ve ulusal güvenlik etkileri vardır. Bu nedenle, ticari sabit güç üretimi, konut uygulamaları ve ulaşım teknolojileri için aktif olarak çalışılmaktadır. Son çalışmalar ABD'de, karbondioksitin (CO_2) salınan sera gazlarının %80'inden fazlasını oluşturduğunu ve ulaşım sektörünün toplam CO_2 emisyonunun %32'sinden sorumlu olduğunu göstermiştir [6,7]. Bu tezde yakıt hücresi dinamik modellenmesi ve kontrol

gereksinimine yoğunlaşmıştır. Yakıt hücrelerinin otomotive uygulanması, ve kısmen küresel yakıt tüketimi ve emisyon azaltılmasının gerekliliği ve önemi vurgulanmaktadır. Yakıt hücresi yığın sistemleri, birçok üretici tarafından yoğun bir şekilde geliştirilmektedir, şu anda çoğu kişi tarafından kara aracı uygulamaları için nispeten daha gelişmiş bir aşamada olduğu düşünülen Polimer Elektrolit Membranıdır. Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücreleri, yüksek güç yoğunluğu, katı elektrolit, uzun hücre ve istif ömrünün yanı sıra düşük korozyona sahiptir. Isı motorlarına göre daha fazla verimliliğe sahiptirler ve modüler elektrik üretiminde ve elektrikli araçların itişinde kullanılması umut vericidir [8].

Yakıt hücresi verimliliği, kentsel ve otoyol sürüş senaryolarının çoğuna karşılık gelen kısmi yüklerde yüksektir. Nominal bir sürüş hızında (30 mil/saat), doğal gazdan doğrudan hidrojen kullanan bir yakıt hücresi elektrikli tahrikinin verimliliği, geleneksel bir içten yanmalı motordan iki kat daha yüksektir. Saf hidrojeni yakıt olarak kullanmak yoğun nüfuslu kentsel ortamlarda yerel emisyon sorunlarını ortadan kaldırabilir. Rüzgâr, su ve güneşten veya yakıt işlemcilerinden yenilenebilir enerjiye dayanan hidrojen üretim ve dağıtım altyapısı, fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı azaltmaya yardımcı olacaktır [9,10].

Bununla birlikte, İçten Yanmalı Motorlarla (İYM) rekabet edebilmek için, yakıt hücresi sistemlerinin en azından geleneksel motorlar gibi çalışması gerekmektedir. Geçici davranış, yakıt hücreli araçların başarısı için temel bir gerekliliktir. Yakıt hücresi sisteminin güç tepkisi sadece hava ve hidrojen beslemesi, akış ve basınç regülasyonu ile ısı ve su yönetimi ile sınırlıdır. Akım, yakıt pili yığınının bağlı yük kaynağından anında çekildiği için, ısı ve su üretilirken, oksijen tükenir. Bu geçici süre boyunca, istif voltajının zararlı bozulmasını ve dolayısıyla verim azaltımını önlemek için yakıt hücresi yığını solunum kontrol sistemi, optimum sıcaklık, membran hidrasyonu ve reaktiflerin zar boyunca kısmi basıncını korumak için gereklidir.

Bu kritik yakıt hücresi parametreleri, valfler, pompalar, kompresör motorları, genişletme kanatları, fan motorları, nemlendiriciler ve kondansatörler gibi bir dizi aktüatör tarafından çok çeşitli akım ve dolayısıyla güç için kontrol edilebilir. Ortaya çıkan yardımcı aktüatör sistemi, yaş ve çalışma koşullarından bağımsız performans,

güvenlik ve güvenilirlik standartlarını karşılamak için ince ve hızlı ayarlamalar yapmak için gereklidir. Model tabanlı dinamik analiz ve kontrol tasarımı, alt sistem etkileşimleri ve kontrol tasarımı sınırlamaları hakkında fikir verir. Ayrıca, alt sistemler arasında sensör seçimi ve kontrol koordinasyonu için yönergeler sağlar. Tüm sistemin kontrole yönelik dinamik bir modelinin oluşturulması, yalnızca sistem davranışının anlaşılması için değil, aynı zamanda modele dayalı kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi ve tasarımı için de ilk adımdır. Bu araştırmanın amacı yakıt hücresi sistemlerinin ve yakıt işlemci sistemlerinin fizik tabanlı dinamik modellerini geliştirmek ve daha sonra davranışlarını incelemek için çok değişkenli kontrol tekniklerini uygulamaktır. Analiz, kontrol tasarımı sınırlamaları hakkında bilgi verecek ve gerekli kontrolör yapısı ve sistemin yeniden tasarımı için yönergeler sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında; benzinli bir taşıt, hibrid benzinli bir taşıt ve yakıt hücreli bir taşıtın Matlab-Simulink ortamında modellenmesi ve kontrol yöntemleri ile verimliliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Böylece, araştırma metodolojisi doğrultusunda, bu tez çalışmasının ilk aşamasında özel bir sürüş çevrimi boyunca benzinli bir taşıt ve hibrid benzinli bir taşıt koşturulmuş ve kıyaslanarak verimlilikleri incelenmiştir. İkinci aşamada ise, PEM yakıt pili sistemi kullanan bir otomotiv taşıtı ECE-15 (Avrupa Sürüş Çevrimi) boyunca koşturulmuş ve simülasyon sonuçlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

İçten yanmalı motorlarla çalışan araçlar, büyük şehirlerdeki başlıca kirleticilerden biridir. Büyük şehirlerin çoğu (ör. Amman, Ürdün başkenti) yaşadıkları trafik yoğunluğu yüzünden bu problemle yüz yüzedir. Dolayısıyla egzoz borusu emisyonlarında bir artışa neden olmaktadır. Emisyonları en aza indirmenin bir yolu, elektrik aktarımı konfigürasyonunda elektrikli motorları kullanmaktır [11].

Abu Mallouh vd, farklı dünya çapında sürüş döngüleri kullanarak bir hibrid yakıt hücresel aracın performansını araştırmışlardır. Başlangıçta orta ölçekli bir İYM aracının bir modeli geliştirilmiş ve deneysel testlere göre doğrulanmıştır. İYM aracının geçerliliği onaylanmış modeli, daha sonra yalnızca bir hibrid YH/pil sistemi tarafından çalıştırılan bir elektrik motoruyla tahrik edilecek şekilde modifiye edilmiştir. Kentten bölgeye ve bölgeden bölgeye değişen sürüş kalıbının etkisi araştırılmıştır. Amman şehrindeki sürüş kalıplarını temsil eden bir sürüş deneyi, deneysel verilere dayanarak geliştirilerek daha sonra hem İYM hem de hibrid YH/pilli araç konfigürasyonlarının performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Hibrid YH/pil konfigürasyonunun performansı, emisyonlar, yakıt ekonomisi, etkinlik ve hız izleme hatası açısından İYM versiyonundan çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir [12].

PEM yakıt hücresinin dinamik performansı, yakıt hücresi kullanan bir aracın başarılı bir şekilde çalışması için önemli faktörlerden biridir. Kararlı ve yüksek yığın performansını muhafaza ederken hızlı tepki süresinin korunması, özellikle hızlanma ve yavaşlama sırasında önem arz etmektedir. Gomez vd., yasal bir Avrupa sürüş döngüsünün kesimleri boyunca bir çıkmaz anot ile bir PEM yakıt hücresi yığınının geçici tepkisini, tasfiye edici faktörlerin etkisi ile değerlendirmişlerdir. PEM yakıt hücresi yığını, aktif katalizör alanlı 24 hücre içermekle birlikte, düşük bir hidrojen ve hava basıncında çalışmaktadır. Numune edilen hava katot tarafına verilmekte ve böylece kuru hidrojen anottan beslenmektedir. Sıvı soğutucu, istif boyunca termal

zarfın muhafaza edilmesi için istif ve radyatöre dolaştırılır. Zamanla yığın performansının bozulması, biriken suyu ve yabancı maddeleri uzaklaştıran temizleme işlemini kullanarak engellenir. Boşaltma periyodunun, temizleme süresinin, soğutma sıvısı debisinin ve katot stokiometrisinin etkisi yakıt hücresinin sürüş döngüsü boyunca geçici performansı dikkate alınarak incelenmiştir. Sonuç olarak, düşük temizleme süresinin, yüksek bir akımda istenmeyen yavaşlamayı önleyebileceğini ve yüksek temizleme süresinin, zaman içinde daha iyi bir performans gösterebileceğini göstermektedir. Dahası, soğutma sıvısı akış hızı, özellikle yüksek işletme akımlarında soğutma kontrolünün ve yığın performansının yığın sıcaklık-zaman tepkisini etkileyen önemli bir parametre olarak bulmuşlardır [13].

Tipik bir proton elektrolit membran hibrid yakıt hücresi aracının güç aktarma sistemi, bir lityum pil paketi ve bir yakıt hücresi istifi içermektedir. Hu vd., binek otomobilin güç aktarma sistemi için yakıt ekonomisi ve sistem dayanıklılığını dikkate alarak çok amaçlı bir optimizasyon tartışmışlardır. Dinamik programlamayla elde edilen optimum sonuçların bir analizine dayanarak, gerçek zamanlı ve çok objektif kontrol algoritması tasarımı için yumuşak bir çalışma stratejisi önermişlerdir. Yumuşak çalışma stratejisi, lityum pil boyutunu göz önüne alarak optimize edilmiş olup, iki gerçek zamanlı algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. En iyi duruma getirilmiş dinamik programlama sonuçları ile karşılaştırıldığında, güç talebine dayalı kontrol yöntemi, daha büyük kapasiteli pillerle donatılmış aktarma sistemi sistemleri için daha uygun olduğu kanıtlanmıştır. Diğer durumlarda şarj bazlı kontrol yöntemi daha üstün olduğu kanıtlanmıştır. Bu temelde, ömür maliyeti hem lityum pil boyutu hem de eşdeğer hidrojen tüketimi göz önüne alınarak optimize edilmiştir. Son olarak, algoritma bir yakıt hücresi şehir içi otobüsü ile doğrulanmıştır. Üç aylık bir çalışma periyodunda yakıt ekonomisi ve sistem dayanıklılığı bakımından iyi bir denge sağladığını bulmuşlardır [14].

Bir Proton Değişimli Membranlı Yakıt Hücresi (PEMYH) sisteminin dinamik davranışı, Yakıt Hücreli Hibrid Araçlarının (YHHA) güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için çok önemli bir faktördür. Özellikle su ve termal yönetim ciddi yük değişiklikleri sırasında PEMYH 'nin performansını sabitlemek için kritik öneme sahiptir. Kang ve Min yaptıkları çalışmada, YHHA dinamik modelini geliştirmişlerdir. Matlab-Simulink tarafından geliştirilen PEMYH sisteminin dinamik

modeli, Amesim’de elektrikli araç modeline entegre edilmiştir. PEMYH sisteminin dinamik modeli bir PEMYH istifi, bir hava besleme sistemi ve bir termal yönetim sisteminden oluşmuştur. Kabuk-boru gaz-gaz membran nemlendiricisi ve bir ısı eşanjörü PEMYH 'nin bileşen modelleri, deney verileri ile karşılaştırma yaparak doğrulamışlardır. YHHA modeli, bir federal test prosedürü (FTP-75) sürüş çevriminde simüle edilmiştir. PEMYH sisteminde en iyi su ve termal yönetimi elde etmek için bir sistem yapılandırma ve kontrol stratejisi benimsemişlerdir. YHHA modelinden elde edilen araç hızı, FTP-75 döngüsünün hedef hız profilini $\pm 0,5$ hata arasında izlemiş olup, PEMYH sistemindeki her bir bileşenin dinamik davranışı ve korelasyonu araştırılmıştır. PEMYH'de bir nemlendirici ve bir ısı eşanjöründeki kütle ve ısı transferi, akışın dikey yöndeki ayrıklaştırma ile tür konsantrasyonunu ve sıcaklığı daha doğru belirlemek üzere çözülür. Sonuçta, mevcut model ile YHHA 'lardaki PEMYH sistemi; sistemin optimizasyonunu ve kontrol tasarımını elde etmek için kullanılabilineceği gösterilmiştir [15].

Tribioli vd. deneysel olarak onaylanmış bir yüksek sıcaklık polimer elektrolit membran yakıt hücresi modeli kullanarak, bir yakıt hücresi/pil plug-in hibrid güç aktarma organı tarafından yönlendirilen orta ölçekli bir otomobilin enerji yönetim kontrolörünün tasarımını açıklamışlardır. Önerdikleri strateji, tüketilen yakıtı en aza indiren kontrol sorununun gerçek zamanlı optimal olmayan bir çözümüne ulaşmayı amaçlamaktır. Araç aynı zamanda bir oto-termik reformer ile teçhiz edilerek hidrojen tampon boyutunu en aza indirmek için, kontrol algoritması maksimum hidrojen tamponu seviyesindeki kısıtlamalara tabi tutulmuştur. Elde edilen yakıt tüketimleri aynı zamanda içten yanmalı bir motordan ve eklentili bir hibrid elektrikli güç aktarma organından elde edilenlerle karşılaştırılmıştır [16].

Tolj vd., hafif bir elektrikli araç olan golf arabasını (5 kW nominal motor gücü); Ticari 1,2 kW PEM yakıt hücresi sistemi ve sıkıştırılmış hidrojen (iki kompozit silindir, her biri 6,8 L / 300 bar) ile besmişlerdir. Pil ve hibrid güç modlarında karşılaştırmalı sürüş testleri yapmışlardır. Yakıt hücresinin girişi, depolanmış H yakıt miktarı maksimum kapasitenin %55 ile %100'ü arasında değiştiğinde, sürüş aralığının %63-110 oranında uzatılmasına neden olduğunu göstermişlerdir. Hibrid modda çalışma, daha istikrarlı sürüş performanslarının yanı sıra hem araç tarafından geri çekilen hem de sürüş sırasında araç aküsüne geri dönen enerji toplam enerjinin

artması ile sonuçlanmıştır. Pil ve karma güç modlarında sürüş esnasında alınan güç modellerinin istatistiksel analizi, daha yüksek frekans ve tepe enerjisinin daha yüksek ortalama değerlerini de içeren daha geniş bir güç aralığında istikrarlı bir çalışma sağladığını göstermiştir [17].

Fares vd., bileşen kaynakları gereksinimine bağlı kalarak enerji kaynakları arasında optimum bir güç dağılımı sağlamak ve ağırlıklandırılmış iyileştirilmiş bir dinamik programlama tekniğini kullanarak gerekli operasyonel performansı korumak amacıyla dinamik olarak etkin bir enerji yönetim sistemi geliştirmişlerdir. Elektrikli taşıtın Simulink mimarisine dayalı bir yakıt hücresi baskın modeli olan bir güç hattı yapılandırması, enerji yönetim sistemini test etmek için kullanılmaktadır. Döngüler, performans kriterleri, genel işletme maliyetine ve ayrıca yolculuk başına hidrojen tüketimine dayanmaktadır. Sonuçlar, kural tabanlı algoritmalara kıyasla ağırlıklı geliştirilmiş dinamik programlamayı kullanarak düşük maliyetler ve hidrojen tüketim seviyelerini göstermektedir [18].

Fernández vd., Batarya Elektrikli Araçlar'ın (BEA) enerji santralinin yapısında bir değişiklik önermişlerdir. Amaçları, mevcut durumla yararlı olmasını sağlayan bir elektrikli ve/veya hidrojen şarj/yakıt ikmal ağı geliştirilene kadar bu araçların kullanılabilmesidir. Yakıt Pil Elektrikli Araç (YPEA) set modeline dayanan yeni bir Menzil Uzatici Elektrikli Araç konseptini sunmuşlardır. Daha sonra, her iki enerji kaynağının kapasitesine atıfta bulunarak, daha yüksek etkinlik ve performansa neden olacak çalışma koşullarını belirlemek için bir araştırma geliştirmişlerdir. Bir Lityum-İyon pil içinde depolanan elektrik ve yüksek basınçlı tanklarda hidrojen gazını PEM yakıt hücresinde kullanmışlardır. Elde edilen verilerin, gelecekte araç tasarımcıları için stratejik avantajlar ve yenilikler için bir kapı açacağı düşünülmektedir [19].

Mayur vd. yakıt hücreli bir otomobilde Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri (PEMYH)'nin performansı ve dayanıklılığı için çok aşamalı modelleme metodolojisi üzerine çalışmışlardır. Bir PEM yakıt hücresinin ayrıntılı 2D hücre seviyesi modelini sistem seviyesi sanal araba modeliyle birleştiren çok ölçekli bir hesaplama çerçevesinin geliştirilmesini ve gösterilmesini amaçlamışlardır. Çok ölçekli bir kuplaj ile hücre ömrünü güvenilir bir şekilde tahmin edebilmişlerdir. Bu amaçla, simülasyon çerçevesi yakıt hücresi durumu değişkenlerinin gerçek zamanlı geri

bildirimi ile daha düşük ölçekli fiziksel süreçlere dayanan bozunma mekanizmalarını esnek bir şekilde barındırdığını ifade etmişlerdir [20].

Palanki ve Teletto, yakıt pilli bir otomobilin dinamik çalışması sırasında ortaya çıkan kontrol problemlerini analiz etmişlerdir. Özellikle, güç talebi dalgalandığında çözülmesi gereken üç ayrı kontrol probleminin olduğu gösterilmiştir. Yakıt pili motora gerekli gücü sağlayamadığında pil yedeklemesine geçiş yapan bir mantık tabanlı anahtarlama kontrolörü önerilmektedir. Değişen güç talebine yanıt olarak yakıt hücresine hidrojen akışını ayarlayan lineer bir modele dayanarak uyarlanabilir bir kontrolör geliştirilmiştir [12].

Yakıt hücresi yığınının yüksek verimliliğini ve uzun ömürlü olmasını sağlamak için, reaktan gaz beslemesi ile su ve ısı alt sistemlerinin hem kararlı durum hem de geçici işlemler sırasında düzgün bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Yakıt hücresinin, aracın anlık çalışması sırasında, güvenlik ve verimlilik kriterlerini karşılarken, sürüş esnasında değişken performansı karşılayabilmesi düşündürücü olmaktadır [21]. Yang vd. yakıt hücresi prototip araçlarında kullanılan kontrol zorluklarını ve kullanılan metodolojileri tarif etmişlerdir. Çeşitli kontrol problemleri tanımlanmış ve tartışılmıştır [22]. Başka bir rapor, alt sistem yönetimi veya tesis dengesinin ve her alt sistem için gerekli kontrolün önemini tartışmıştır [23]. Diğer bir çalışma da ise termal yönetim sisteminin zorlukları açıklanmakta olup, termal yönetim ve yığın performansı arasındaki etkileşimler de ele alınmaktadır. Yakıt hücresi sistemindeki çeşitli entegrasyon sorunları ve değişimleri tartışılmaktadır [24]. Yakıt hücresi yığını termal ve su yönetiminin yakıt pili sistemi üzerindeki etkisi [25] 'da incelenmiştir. [26] ve [27] 'de, yakıt hücresi yığını araç içi performansının, yakıt hücresi çalışma koşullarındaki tutarsızlık, özellikle yetersiz hava beslemesi ve yetersiz nemlendirme nedeniyle bir laboratuvar test standındaki performanstan daha düşük olduğu gösterilmiştir. Hızlı tepki verebilen ve yakıt hücresi çalışma koşullarını düzenleyebilen kontrol stratejilerine duyulan ihtiyaç vurgulanmıştır. Yakıt pili modellemesi ile ilgili çok sayıda yayına rağmen, kontrol çalışmalarına uygun yakıt pili sistemleri modelleri hala eksiktir. Literatürde geliştirilen modeller üç ana kategoride sınıflandırılabilir: yakıt pili performans modelleri, sabit durum yakıt pili sistem modelleri ve dinamik yakıt pili sistem modelleri. Yakıt pili modellemesi hakkındaki yayınların çoğu yakıt pili performans tahminini hedeflemiştir. Bu

kategorideki modeller çoğunlukla sabit durumdur. Hücre düzeyinde geliştirilirler ve yakıt hücresi parametrelerinin uzamsal varyasyonlarını içerirler. Bu modelleri geliştirmek için karmaşık elektrokimyasal, termodinamik ve akışkanlar mekaniği prensipleri kullanılmaktadır. Farklı sabit çalışma koşullarında yakıt hücresinin performansı veya verimliliği, bu tip model kullanılarak belirlenebilir. Bu modellerin temel amacı yakıt hücresi bileşenlerini tasarlamak ve yakıt hücresi çalışma noktalarını seçmektir. Bu modeller kontrol çalışmaları için uygun olmasa da, basınç ve sıcaklık gibi çalışma parametrelerinin yakıt hücresi voltajı üzerindeki temel etkilerini belirlerler.

Bazı çalışmalar [28–31], farklı çalışma koşullarında yakıt hücresi polarizasyon özelliklerini tahmin etmek için kullanılan yakıt hücresi dirençlerinin formülasyonunu sunmuştur. Gaz ve suyun kütle taşınması, hem tek boyutlu [32–35] hem de iki boyutlu modellerle [36–38] çeşitli yayınlara dâhil edilmiştir. Springer vd. [35] ayrıca membran boyunca proton başına net su akışını ve membran su içeriğinden dolayı membran direncindeki artışı tahmin eden bir model sunmuşlardır. Birçok yayın yakıt hücresinin su ve termal yönetimini ele almıştır. Nguyen ve White çeşitli nemlendirme tasarımlarının etkinliğini araştıran bir model geliştirmişlerdir. Fuller ve Newman [39] yakıt hücresinin su, termal ve reaktan kullanımını incelemek için iki boyutlu bir kütle elektrot montajı modelini geliştirmişlerdir. Okada vd., [40] zardaki su konsantrasyonu profillerini analitik olarak hesaplamak için bir yöntem sunmuşlardır. Katot ve anot kanalları arasındaki kütle akışını tahmin eden üç boyutlu sayısal bir model [41]'de sunulmuştur. Bernardi [42] ve Büchi [43] yakıt hücresinde su dengesiyle sonuçlanan çalışma koşullarını tanımlayan modeller sunmuşlardır. Baschuk ve Li [44], katot katalizör tabakasındaki su taşkınının etkisini içeren bir model geliştirdiler. Wöhr vd. [45] yakıt hücresinde dinamik bir ısı ve su taşıma modeli sunmuş ve çeşitli akım yoğunluğu değişikliklerinin yakıt hücresi performansı üzerindeki etkilerini göstermiştir. İlginç bir şekilde, farklı yük değişimlerinin, su eksikliğinin bir sonucu olarak farklı bir yakıt hücresi voltajına yol açabileceğini gösterdiler. Yakıt hücresi yığınlarını temsil etmek için çeşitli modeller geliştirilmiştir [46,47]. Yakıt hücresi yığınının geçici tepkilerini tahmin eden bir model [48]'de verilmiştir. Isı transferi geçici olayları bu modele dâhil edilmiştir. Yukarıdaki

kategorideki tüm makaleler, modellerini türetmek için deneyler ve fiziksel yasaların bir kombinasyonunu kullanmıştır.

Son zamanlarda dinamik uyarılma sırasında yakıt hücresi performansının deneysel sonuçları olan ilginç bir dizi makale yayınlandı. Özellikle Chu ve Jiang, yakıt hücresi performansını çeşitli koşullar altında değerlendirdi. [49]'da farklı membran tipleri test edilmiş ve nem ve hidrojen akış etkileri [50]'de sunulmuştur. Sabit akım deşarjındaki yakıt hücresi yığınının voltaj-zaman davranışları incelenmiş ve davranışı temsil eden bir model sunulmuştur [51]. Yığın yapı tasarımları [52]'de test edilmiştir. Laurencelle vd. [53] yük geçişleri sırasında yakıt hücresi yığın tepkilerinin deneysel sonuçlarını sunmuşlardır. Pozitif yük değişimi sırasında yığın geriliminin geçici davranışı deneyde gözlenmiştir.

Kararlı durum sistemi modelleri tipik olarak bileşen boyutlandırma, statik değişim analizi ve toplam yakıt tüketimi veya hibridizasyon çalışmaları için kullanılır. Bu kategorideki modeller, kompresörler, ısı eşanjörleri ve yakıt hücresi yığın voltajı gibi her bir bileşeni statik performans veya verimlilik haritası olarak temsil eder. Barbir vd. [54], çeşitli çalışma basınçları, sıcaklıklar ve güç seviyeleri için sistem ve bileşen parametrelerini hesaplayan tüm sistemin kararlı durum modelini sunmuşlardır. Her bir sistem konfigürasyonu için ısı eşanjörünün veya radyatörün boyutu belirlenmiştir. [55]'de sunulan denklemler, dolaylı bir metanol yakıt hücresi sistemindeki her bir bileşenin verimliliğine dayalı işletim stratejileri bulmak için kullanılmıştır. Net güç çıkışını optimize etmek için bir yöntem sağlanmıştır. Yakıt pili/akü hibrit çalışmaları [56–58] yakıt pili sistem modelleri için kullanılmıştır. [56]'daki model maksimum ivme ile yardımcı güç kaynakları arasındaki dengeyi incelemek için kullanılmıştır. Taşıt atalet dinamikleri bu modeldeki tek geçici durum olmuştur. Yakıt hücresinin ve bataryanın hibrit bir konfigürasyonda boyutlandırılması [57]'de incelenmiştir. Bu model, yüksek yakıt ekonomisi sunan hibridizasyon derecesini seçmek ve yakıt hücresi yığını ile batarya arasındaki güç yönetimi stratejilerini incelemek için kullanılmıştır. Yakıt hücresi yığını, hava besleme sistemi ve termal yönetim sisteminin kararlı durum modelleri araç simülasyon programına dâhil edilmiştir [59]. Model, bir yakıt pili yığınının ve ultrakapasitör hibrit SUV araçlarının hızlanma, frenleme ve sürüş döngüsü yakıt ekonomisi performansını tahmin etmek için

kullanılmıştır. Bu çalışmaların çoğunda, yakıt hücresi yığını, sabit çalışma parametreleri için statik bir polarizasyon ilişkisi ile modellenmiştir.

Literatürde birkaç dinamik yakıt hücresi sistemi modeli bulunmaktadır. Modellerin her birine farklı seviyelerde dinamik davranış dâhil edilmiştir. Termal dinamikler yakıt pili sistemindeki en yavaş dinamik olarak kabul edilir. Bu nedenle, bazı yayınlar sadece sıcaklık dinamiklerini modellerine dâhil etmiş ve hava temini ve nem gibi diğer dinamikleri göz ardı etmişlerdir. Turner vd. [60] ve Geyer vd. [61] modellerinde yakıt hücresi yığın sıcaklığı artışının geçici etkisini içermektedir. Sadece sıcaklık dinamikleri dâhil edilerek, sistemin geçici davranışı ısınma döneminde [61] 'de gösterildiği gibi açıkça gözlemlenebilir. Kim ve Kim [62], yakıt reformeri ve yakıt hücresi yığın voltajını temsil etmek için birinci dereceden zaman gecikmeli elektrik devresini kullanarak sistem modelini daha da basitleştirmişlerdir. Sistem performansını artırmak için bir bulanık denetleyici tasarlamışlardır. Birkaç yayın [63,64] hava tedarik sisteminin dinamiklerini, yani hava kompresörünün dinamiklerini ve manifold dolumunu ve bunların yakıt hücresi sistemi üzerine çalışmışlardır. Ancak bu makalelerde ne modelleme detayları ne de simülasyon sonuçları verilmemiştir.

Yukarıdaki literatür taramasından, bir otomotiv aracı için kapsamlı bir dinamik modele ihtiyaç duyulduğu açıkça görülmektedir. Teknoloji hızla gelişmektedir. Bazı küçük araçlar için (Örneğin; forklift ve golf vb. araçlar) bir PEM sistem modeli geliştirilse de gerçek bir otomotiv taşıtı için bir model oluşturulmadığı görülmüştür. Bu nedende bu tez çalışmasında sürüş çevrimleri boyunca PEM yakıt pili sistemi kullanan bir otomotiv taşıtının dinamik bir modellemesi yapıp, simülasyonu gerçekleştirilerek ve sonuçları incelenecektir. Bu şekilde geliştirilen model, ileride geliştirilecek modelin kontrol gelişimi için önem arz etmektedir

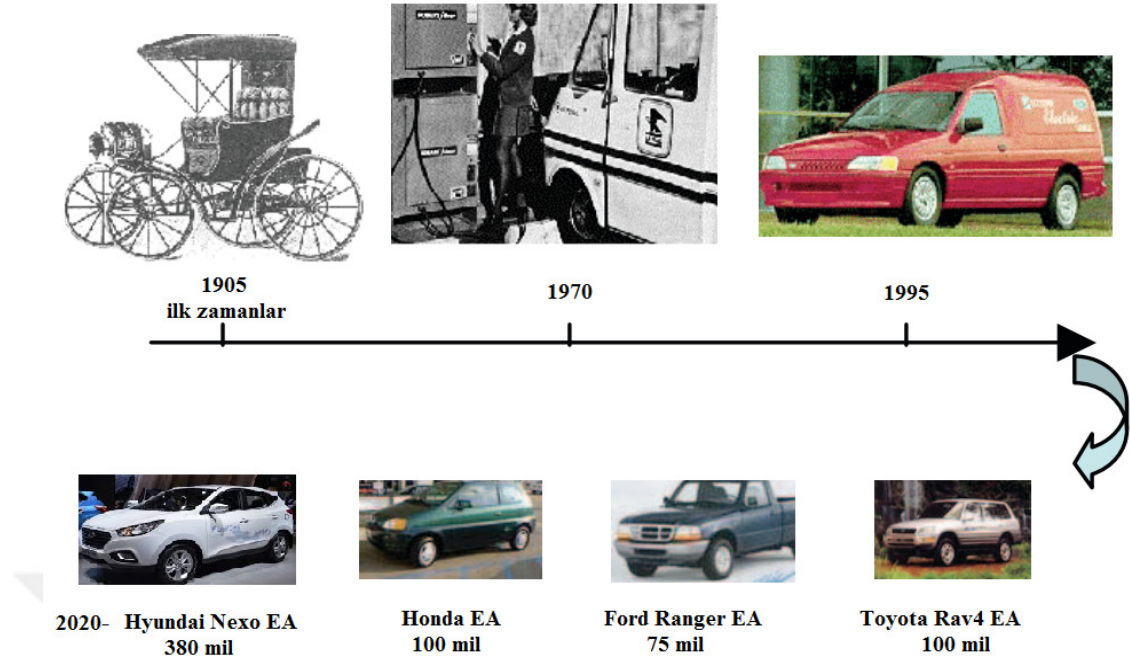
BÖLÜM 3

KONU KAPSAM ve GENEL BİLGİLER

Bu bölümde elektrikli taşıtların tarihsel gelişimi, elektrikli araçların sınıflandırılması ve yakıt pili hakkında genel bilgiler verilecektir.

3.1. ELEKTRİKLİ ARACIN TARİHSEL GELİŞİMİ

Elektrikli aracın (EA) gelişimi, elektrikli motorun icat edilmesi ile birlikte yaklaşık 150 yıllık uzun bir geçmişe sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, EA'lar, yanmalı motorun da çok önünde yer alarak en eski otomobiller arasında olmuştur. 1920' lerin sonundan 1930'lara kadar benzinli araçlara kıyasla, EA'lar piyasada 3:1oranla araç piyasasına hâkim olmakla birlikte; 1900'lerin başlarında ise, bu oran iyice artarak kara aracı performans rekorunu kırmayı sağlamıştır. İlk üretilen EA'lar at arabalarından geliştirilen toplum tarafından yaygın olarak kullanılan büyük bir ulaşım aracıydı. 1930'larda ise, benzinli araçların hem performans hem de makul bir fiyatla üretilmeleri EA'ların o tarihlerde statüsünde zedelenmeye neden olmuştur. Ayrıca, benzin satışının yaygın olarak yapılması ve ucuz yakıtın hazır bulunması da benzinli aracın yayılmasına katkıda bulundu. 1930'larda petrol, araç taşımacılığı için doğrudan ucuz bir enerji kaynağı olmuştur. Elektrikli araç üretimi ve geliştirilmesi, 1935 yılında yanmalı motor devralındıktan sonra kişisel ulaşım olarak durmuştur. 1960 ve 1970'lerde kısmi bir artış olsa da, EA'ların sınırlı performansı ve politik nedenlerden ötürü gelişme bu dönemde hızla azalmıştır. EA'lar da modern gelişim çağı ise, GM tarafından filo uygulaması için üretilen ve Enerji Bakanlığı tarafından finanse edilen bir programın ardından Ford EV Ranger kamyonetinin geliştirilmesidir. Toyota RAV4 EV ve Honda, 1990'ların sonunda ve 2000'lerin başında bir EA'a sahip olmuştur [65] (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Elektrikli araçların tarihsel gelişimi [65].

Günümüzde ise, hükümetlerin desteği, şarj istasyonlarının yaygınlaştırılması ve altyapısının güçlendirilmesi, benzin fiyatlarının giderek pahalalanması ve tüketicinin bilinçlenerek çevre dostu araçları tercih etmesi gibi nedenlerden dolayı EA'lara olan talep giderek artmaktadır [66].

3.2.ELEKTRİKLİ ARAÇLAR (EA)

Önümüzdeki 50 yıl içinde küresel nüfus 6 milyardan 10 milyara çıkacağı ve araç sayısı 700 milyondan 2,5 milyara çıkacağı düşünülmektedir. Tüm bu araçlara içten yanmalı motorlar (İYM) sevk edildiği düşünülürse gerekli olan fosil kökenli yakıt karşılanamayacaktır. Aynı zamanda oluşan emisyonlar çevre kirliliğini oldukça artıracaktır. Bu nedenler, insanları 21. yüzyılda sürdürülebilir karayolu taşımacılığı için çabalamaya zorlamaktadır.

Çevrenin ve enerjinin korunması endişesinin duyulduğu bir dünyada, EA teknolojisinin gelişimi bu ihtiyaçları karşılamak için bir büyük hız kazanması gerekmektedir. Çevre ile ilgili olarak EA'lar emisyon içermeyen kentsel ulaşım sağlayabilmektedirler. Taşıtları beslemek için gereken enerji santrallerinden kaynaklanan emisyonlar dikkate alınsa bile, EA'ların kullanımı hala küresel hava

kirliliğini önemli ölçüde azaltabilecektir. Enerji açısından EA'lar, çeşitli yenilenebilir enerjilerin kullanımı gibi verimli, çevre dostu olan güvenli, kapsamlı ve dengeli bir enerji seçeneği sunabilmektedirler. Bu nedenle, EA'ların enerji, çevre ve ulaşım, yüksek teknoloji tanıtımı, yeni endüstri yaratımı ve ekonomik kalkınma üzerinde büyük bir etkisi olma potansiyeli bulunmaktadır [67].

Elektrikli araçlar, gürültüyü ve kirliliği azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda gücün petrol dışındaki yakıtlardan üretilmesi şartıyla, fosil yakıtlara bağımlılığını azaltmak için de giderek önem kazanmaktadır. Sıfır emisyon değerlerinin sağlanması için, elektrikli araçlar için enerjinin, nükleer ve alternatif enerji gibi fosil olmayan yakıt kaynaklarından üretilmesini gerektirmektedir.

Elektrikli trenler iyi gelişmiştir ve yaygın olarak kullanılırken, karayolu taşımacılığı sadece araç üreticilerinin miktar olarak elektrikli otomobil üretmeye başladığı noktaya ulaşmıştır.

Elektrikli bisikletler ve golf arabaları gibi, pazarlarda kullanılan küçük elektrikli araçlar yaygın olarak kullanılırken, elektrikli yol araçları kullanılmamaktadır. Elektrikli kara taşıtları, normalde çok daha uzun menzile sahip olan ve yakıt ikmali çok kolay olan içten yanmalı motorlu taşıtların bu özelliklerini tam olarak karşılayamamaktadır [68]. Elektrikli araçların tasarımının ve ilgili teknolojik ve çevresel konuların arkasındaki ilkelerin tam olarak anlaşılması önemlidir; bu konular aşağıdaki bölümlerde ele alınacaktır. Elektrikli araçlar pek çok avantaja sahiptir. Özellikle, çevre dostu olması ve üretimin nispeten daha basit olması gibi avantajlara sahiptir. Sahip olduğu diğer avantajlar ve dezavantajlar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. EA'ların avantajları ve dezavantajları [69–71].

Avantajları	Dezavantajları
Kullanım noktasında sıfır toksik emisyon	Batarya maliyeti
Sıfır CO ₂ emisyonu potansiyeli	Batarya ağırlığı, dolayısıyla araç ağırlığı
Sistemin karbondan arındırılmasıyla daha temiz olma potansiyeli	Malzeme tedariki için potansiyel kısıtlamalar
Daha düşük bakım ve işletme maliyetleri	Bataryaların üretiminde ve kullanım ömrü tamamlandığında çevre üzerine olumsuz etkisi
Üretimi daha basit	Şarj olma süresi
Enerji arzı dünyanın birçok yerinde yerelleştirilebilir	Yeni altyapı ihtiyaçları (ör; Şarj cihazları)
Sürüş tecrübesi	

EA'ları kullanılan teknolojiye göre, dört başlık altında toplamak mümkündür; Hibrit Elektrikli Araç (HEA)'lar, Şebekeden Şarj Edilebilen HEA'lar, Bataryalı Elektrikli Araç (BEA)'lar, Yakıt Pili Elektrikli Araç (YPEA)'lar [72] (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Elektrikli araçların sınıflandırılması.

3.2.1. Hibrit Elektrik Araç (HEA)'lar

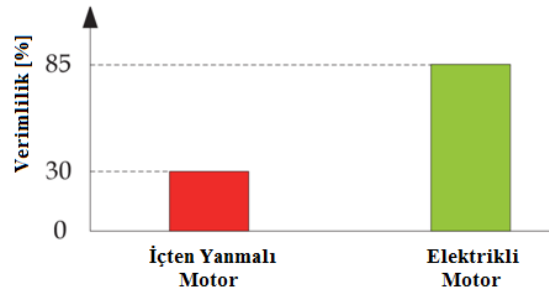
HEA'lar, geleneksel yanmalı motoru desteklemek için pille çalışan bir elektrik motoru kullanılmaktadır [73]. Bir sürücü araca fren uyguladığında, aracın elektrik sistemi kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir jeneratör görevi

görmektedir (Şekil 3.3). Yanmalı motor ise, hala birincil motor vazifesi görevindedir. Düşük hızda araç sıfır emisyonla çalışmaktadır [74–76].



Şekil 3.3. Hibrit elektrik araçlar (HEA)'lar [74].

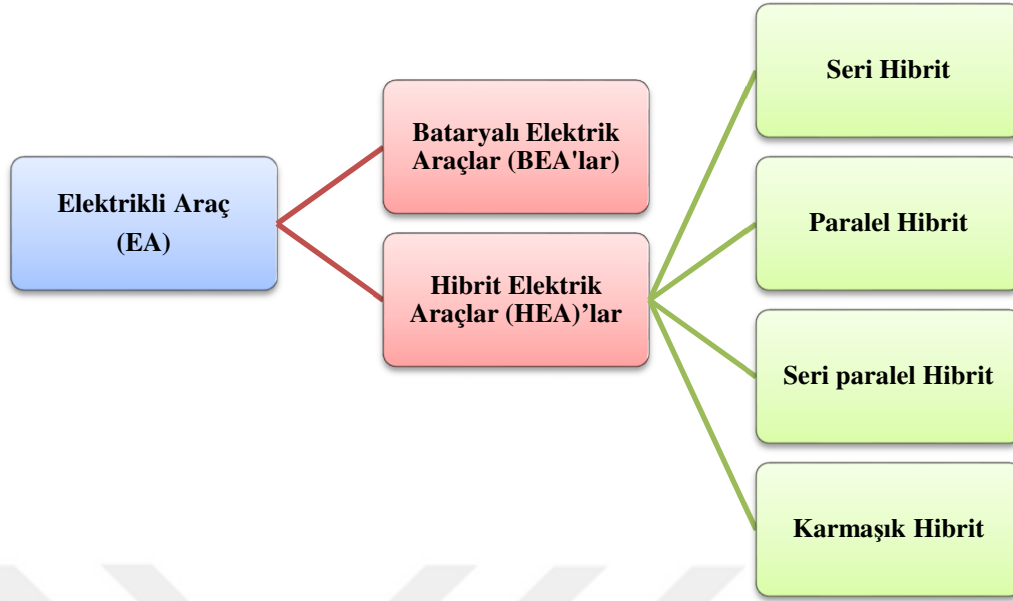
HEA'lara göre, içten yanmalı motorlu taşıtlar, üretim teknolojisi, malzeme bilimi, motor performansı, araç kontrolü, sürücü konforu ve güvenliğinde yüz yıldan fazla süredir gelişmesini giderek arttırmıştır. Bu artışa, gelişen yol ağları, yakıt ikmal istasyonları, servis mağazaları ve yedek parça üreticileri, bayileri ve satıcıları eşlik etmiştir. Modern İYM araçlarının en büyük avantajları; yüksek konfor, mükemmel performans, gelişmiş güvenlik ve göreceli olarak düşük fiyatlardır. Bu nedenle, üretildiği günden beri en cazip tüketici ürünleri haline gelmiştir. Bununla birlikte, uzun süren endüstri ve akademik araştırmalar, İYM verimliliğini artırmayı çok başaramamışlardır. Şekil 3.4'de gösterildiği gibi, sadece İYM yanma reaksiyonunda üretilen enerjinin yaklaşık %30'unu mekanik güce dönüştürmektedir. Başka bir deyişle, yanma ile açığa çıkan enerjinin yaklaşık %70'i kaybolmaktadır. Aslında ve daha da kötüsü, termik motorların boşa harcanan enerjisi, motor ve egzoz gazları ısısına dönüşmektedir.



Şekil 3.4. İçten yanmalı motorların verimliliklerinin elektrik motorlarının verimlilikleri ile kıyaslanması.

Egzoz gazları çoğunlukla karbon dioksitten (CO_2) ve daha düşük bir oranda azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (C_xH_y), karbon monoksit (CO) ve kurumdan oluşan bir karışımdır. İklim araştırmacıları, fosil yakıt kullanımı ile birlikte artan karbondioksit oranının, sera etkisi olarak da adlandırılan küresel sıcaklığı artırdığını göstermişlerdir. Büyük şehirlerde hava kirliliği, akciğer kanseri de dâhil olmak üzere solunum sistemi hastalıklarına yol açan egzoz gazlarının neden olduğu bir diğer ciddi sorundur. Rahatsız edici gürültü seviyesi, büyük şehirlerdeki büyük içten yanmalı motorlu araç filosu ile ilgili bir diğer konudur. Ayrıca, giderek artan dünya filosu için mevcut sınırlı fosil yakıt miktarının az olması insanları fosil yakıtlar haricinde alternatif çözüm yollarına itmiştir. Bazı çalışmalarda, alkol bazlı biyoyakıtlar çevre kirliliğini bir miktar azaltan ancak yeterli ölçüde olmayan alternatif yakıtlar olarak kullanılmaktadır [77]. Örneğin; şeker kamışı veya mısır ürünlerinden üretilen etanol gibi yenilenebilir enerji kaynakları bazı ülkelerde denenmekte olan alternatif bir çözümdür. Şekil 3.4'de gösterildiği gibi, elektrik motorlarının İYM'dan çok daha üstün olduğunu ve araçların tahrikinde mükemmel bir iş yapabileceğini ve İYM'ların yarattığı ciddi iklim, hava kirliliği ve gürültü sorunlarının çözülmesine yardımcı olduğunu göstermektedir. Günümüzde, satışları İYM araçlara göre ihmal edilebilir olsa da, saf EA'lar ve hibrid EA'lar ve yakıt pilli araçlar dünyanın en büyük otomobil üreticileri tarafından sunulmaktadır.

Birçok farklı elektrikli araç türünün daha evrensel bir sınıflandırılması, muhtemelen yakın bir gelecekte oluşacağı, bu oluşumunda dünya çapında etkili olan otomobil üreticisi derneklerinin ve araştırma ekiplerinin çabalarından kaynaklanan seri üretimlerinin etkili olacağı düşünülmektedir. Günümüzde yapılan araç sınıflandırılmasında ise, araçları itmek için kullanılan enerji dönüştürücü tipleri veya araçların güç ve işlevi belirleyici olmaktadır [78,79]. Enerji dönüştürücü tiplerine bakıldığında, Şekil 3.5'te de gösterildiği gibi EA sınıflandırması iki gruba ayrılır: batarya elektrikli araçlar (BEA'lar) ve hibrid elektrikli araçlar (HEA'lar).



Şekil 3.5. EA'ların kullanılan enerji dönüştürücülerine göre sınıflandırılması.

BEA'lar, yapısında İYM'nin olmadığı sadece elektrik motorları tarafından mekanik güce dönüştürülecek enerjiyi depolamak için bataryayı kullanmaktadırlar. Hibrid elektrikli araçlarda (HEA), tahrik, elektrik motoru ve İYM 'nin birleşik eylemlerinin sonucudur. Hibridizasyon, kendi içinde dört farklı grupta incelenmektedir: seri hibrit, paralel hibrit, seri paralel hibrit ve karmaşık hibrit. Günümüze değin, bir araçta, enerji verimliliği, araç performansı ve menzili, sürücü konforu, üretim karmaşıklığı ve üretim maliyeti gibi tüm pratik açılardan üstün sayılabilecek evrensel bir mimari yoktur. Öte yandan, HEV'in günümüzdeki en büyük mimarisi seri hibrit sınıfında olan elektrik motoruyla birlikte bir İYM yerine bir yakıt hücresi kullanan Yakıt hücresel araç (YHA)'larıdır. YHA 'ların hidrojen bazlı kimyasal reaksiyonu, EM tarafından kullanılacak veya akü veya süper kapasitörde depolanacak elektriği üretmektedir. Hidrojen ve oksijen reaksiyonunun yan ürünü basitçe saf sudur, bu da YHA'ları emisyonlardan arındırarak onları en büyük avantajlı haline getirerek tam bir çevre dostu bir teknoloji olmalarını sağlamaktadır [80].

Otomobiller elektrikli hale geldikçe, enerji verimliliği, enerji kaynağı tipleri, enerji depolama cihazı tipleri, hibridizasyon oranı, sürüş menzili, güç performansı, sürücü konforu, üretim maliyet, sahip olma maliyeti vb. gibi kriterlere göre optimize etmek için yeni tasarım metodolojileri ve güç aktarma sistemi topolojileri hayat bulmaktadır [81]. Piyasa, dünyanın farklı bölgelerinde farklı taleplere sahip olduğundan ve her

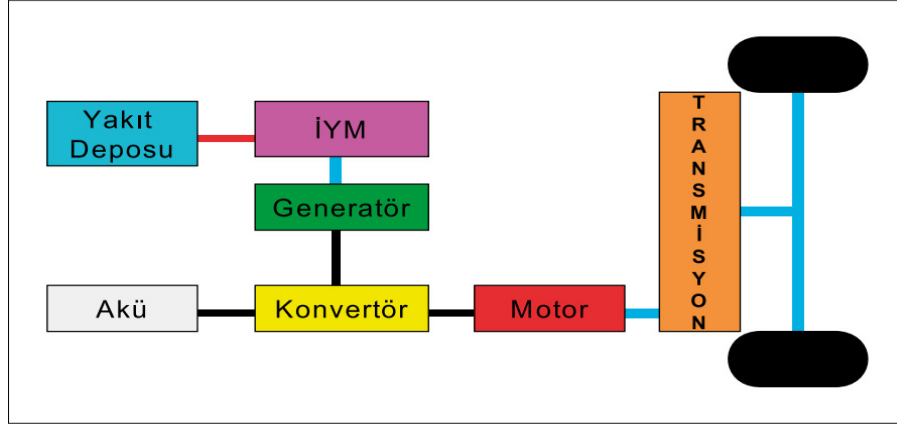
bölgede farklı pazar segmentleri olduğundan, çok sayıda BEA ve HEA modelinin mevcut olması ve artmaya devam etmesi normal olarak görülmektedir [80,82]. Otomobil üreticileri, gelirlerini en üst düzeye çıkarırken pazar ihtiyaçlarını daha iyi karşılayan araba modelleri oluşturmaya devam etmektedir.

3.2.1.1. Elektrikli Araç (EA) ve Seri Hibrit Elektrikli Araç (SHEA)

Bu yapıların her ikisinde de aracın tekerlekleri bir elektrik motoru veya elektrik motorları ile tahrik edilmektedir. Şekil 3.6’te seri hibrit bir elektrikli araç tahrik yapısı incelenmektedir. Elektrikli bir araçta (EA) ise, şekilde bulunan yakıt deposu, içten yanmalı motor ile jeneratör bulunmamaktadır. Aracı tahrik eden elektrik enerjisi, yalnızca batarya ile sağlanmaktadır. Batarya enerjisi tükendiği zaman yeniden bataryanın şarj edilmesi gerekmektedir. Araçta, bataryayı dışarıdan şarj etmeye yarayan bir “şarj” devresi bulunmaktadır.

Elektrikli araçlarda tükenen bataryalar, batarya dolum istasyonlarında değiştirilmekte veya tekrardan şarj edilebilmektedir. Renault elektrikli araç projesi buna bir örnek teşkil etmektedir. Elektrikli araçların menzili, batarya kapasitesi ile (kWh) sınırlı olmaktadır.

Bu sebeple günümüzde araç pazarına sürülmek için üretilen elektrikli araçların küçük ve hafif yapılarda modeller olduğu bilinmektedir. Şekil 3.6’da gösterilen Seri Hibrit Elektrikli Araç’larda (SHEA) içten yanmalı motor sadece jeneratörü çevirmekte ve bu jeneratör, bataryayı ve bir güç elektroniği sistemi üzerinden elektrik motorunu beslemektedir. Bu tür hibrit taşıtlarda tekerlekleri çeviren moment ve güç, elektrik motorunun gücü ile sınırlıdır. Yakın zamanda öne çıkan “range extender” yani menzili artırılmış elektrikli taşıtlar da bu tanım içerisinde yer almaktadır. Bu taşıtlarda önce bataryada depolanmış elektrik enerjisi kullanılmakta ve bataryanın boşaldığı anda ise düşük güçlü benzinli bir motor, ev ve iş yerlerindeki jeneratör gibi çalışmakta olup bu şekilde bataryaya ve elektrik motoruna güç verebilmektedir.

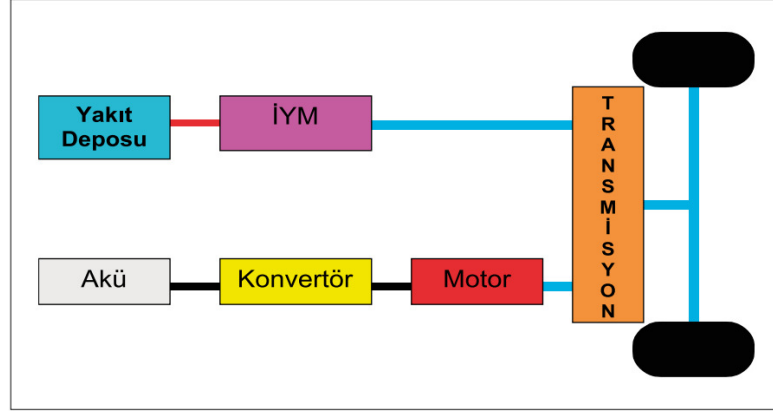


Şekil 3.6. Seri hibrit elektrikli araç sistemi(SHEA) [83].

Ayrıca, elektriksel enerjisinin hidrojen ile sağlandığı yakıt hücresi (fuel cell) içeren tahrik sistemleri de seri hibrit yapısında sınıflandırılmaktadır. Şekilde yakıt deposu yerine blokta hidrojen tankı bulunurken, İYM ve jeneratörün yerinde ise yakıt hücresi yığını yer almaktadır. Yakıt hücresi ile üretilen elektrik enerjisi, tıpkı seri hibrit yapısında olduğu şekilde bir güç elektroniği devresi üzerinden elektrik motorunu çalıştırmakta, bataryayı şarj edebilmektedir. Birkaç yıldan fazla süren uzunca bir zaman ve oldukça yüksek maliyetlerle geliştirilen yakıt hücresi teknolojisinin ticari anlamda elektrikli karayolu taşıtlarında kullanılıyor olması günümüz için çok mümkün görünmemekle birlikte uzun vadede beklentiler devam etmektedir.

3.2.1.2. Paralel Hibrit Elektrikli Araç (PAHEA)

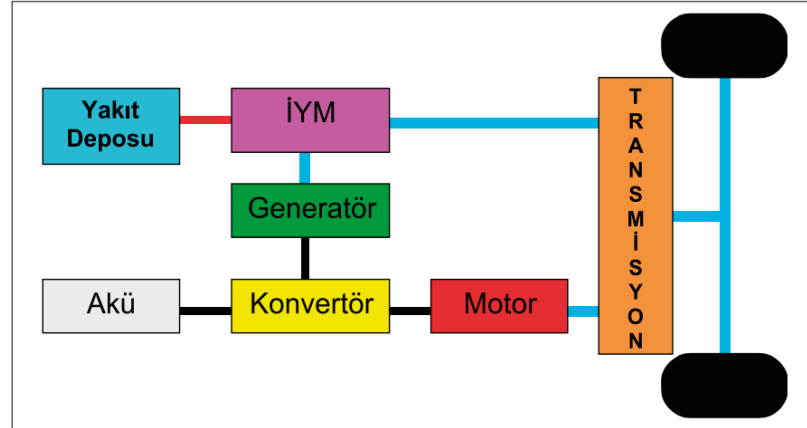
Bu yapıda, içten yanmalı motor, elektrik motoru ile birlikte veya her ikisi ayrı ayrı dişli kutusu miline güç verir. Batarya, İYM vasıtasıyla veya rejeneratif frenleme ile elektrik motoru tarafından desteklenmektedir. Şekil 3.7’de paralel hibrit elektrikli araç tahrik sistemi gösterilmektedir. Hem seri hibrit, hem de paralel hibrit yapılarda elektrik motoru tekerlekleri çevirebildiği gibi, araç yokuştan aşağı inerken veya frenleme yaparken jeneratör gibi davranarak akü bataryayı şarj edebilmektedir.



Şekil 3.7. Paralel hibrit elektrikli araç sistemi (PAHEA) [83].

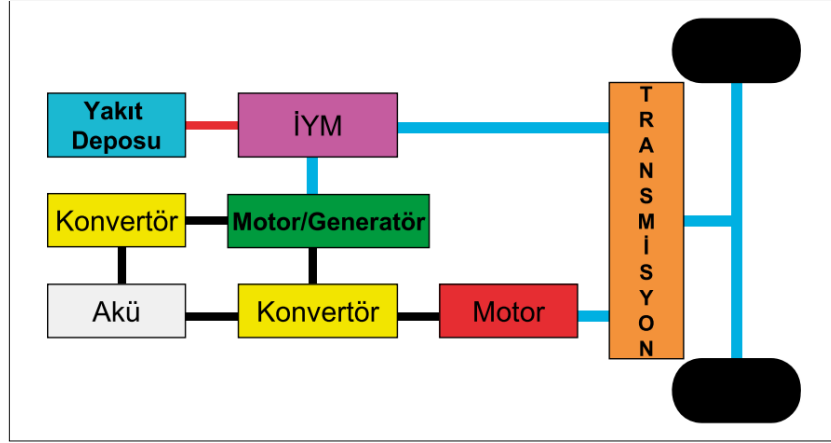
3.2.1.3. Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araç (SPHEA) ve KompleksSeri-Paralel Hibrit Elektrikli Araç (KSPHEA)

SPHEA, seri ve paralel hibrit teknolojilerin olumlu yanlarını sunmaktadır. Şekil 3.8’de görüleceği gibi, İYM tekerlekleri döndürecek tahriki sağlamakta olup aynı zamanda planet dişli vasıtasıyla jeneratörü döndürerek elektrik enerjisi üretmekte ve bu şekilde bataryayı ya da tekerlere ek moment veren elektrik motorunu besleyebilmektedir.



Şekil 3.8. Seri-Paralel hibrit elektrikli araç sistemi (SPHEA) [83].

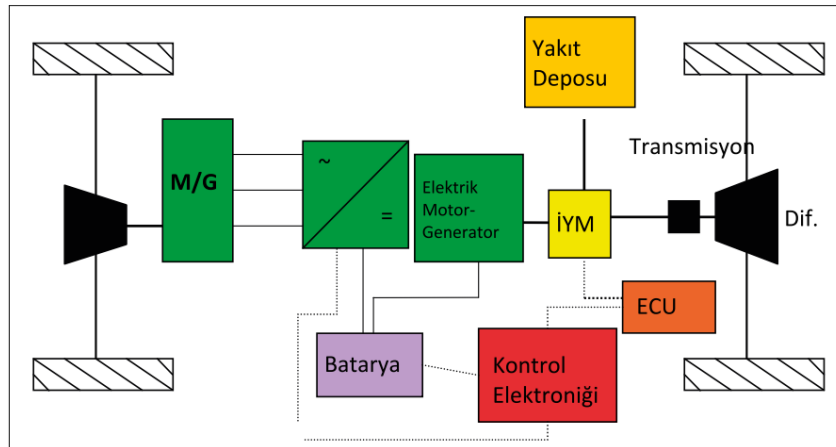
Kompleks seri-paralel hibrit elektrikli araç yapısının, seri-paralel hibrit elektrikli araç tahrik sisteminden farkı içten yanmalı motor tarafından beslenen jeneratörün motor gibi de çalışabilmesi ve gerekli hallerde bataryayı doldurabilmesidir. Şekil 3.9’de KSPHEA’nın topolojik yapısı gösterilmiştir [84–88].



Şekil 3.9. Kompleks seri-paralel hibrit elektrikli araç sistemi (KSPHEA) [83].

3.2.1.4. Yoldan Paralel Hibrit Elektrikli Araç (YPHEA-Through The Road)

Bu yapıda arka aks elektrik motoru ile tahrik edilmekte, ön aks ise elektrik ve mekanik motor (İYM) ile tahrikli bir yapıdır. Ülkemizde TÜBİTAK-MAM tarafından gerçekleştirilen Ford Connect FOHEV 1 ve FOHEV 2 projeleri ile tasarımılandırılan fakat imal edilmeyen Doblo Elit 2 projesinde de bu sistem kullanılmıştır. Bu yapı, içten yanmalı motor ile elektrik motoru arasındaki paralel çalışmanın bir yol üzerinden gerçekleşiyor olmasıdır. Bu sebeple bu metot İngilizce, yol üzerinden paralel anlamına gelen “through the road” olarak adlandırılmıştır. Peugeot tarafından geliştirilen bir hibrit araç bu yapı ile çalışmaktadır. Şekil 3.10’da, yoldan paralel HEA görülmektedir [83].



Şekil 3.10. Yoldan paralel hibrit elektrikli araç sistemi (YPHEA) [83].

3.2.2. Şebekeden Şarj Edilebilen HEA'lar

Ekonomik ve çevresel faktörlerden dolayı, farklı elektrikli araç tiplerinin kullanımı günden güne yaygınlaşmakta, özellikle şebekeden şarj edilebilen HEA'lara olan talep hızlanarak artmaktadır [89].

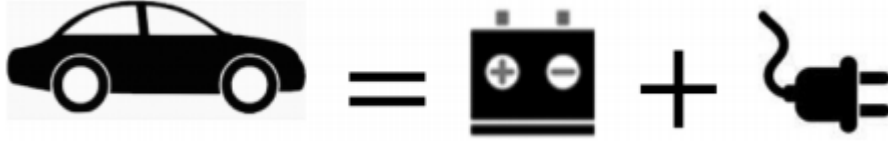
Bir Şebekeden Şarj Edilebilen HEA'lar, bir HEA'ya benzer şekilde çalışmaktadır. Bununla birlikte, araç bir elektrik prizine veya şarj istasyonuna takılarak şarj edilebilen daha büyük bir batarya kullanmaktadır (Şekil 3.11). Batarya enerjisi tükendikten sonra, benzinli motor çalışmakta ve araç normal bir HEA gibi davranır [74, 90].



Şekil 3.11. Bir şebekeden şarj edilebilen HEA'lar [74].

3.2.3. Bataryalı Elektrik Araçlar (BEA'lar)

BEA'lar, %100 batarya ile çalışmaktadırlar. İYM içermezler ve tahrik için ise elektrik motorlarını kullanırlar. BEA'lar, sadece depolanan elektrikle çalışmaktadır. Ana bileşenleri; yüksek voltajlı bir batarya, bir veya daha fazla elektrik motorundan (alternatif akım [AC] veya doğru akım [DA]) ve güç elektroniğini yönetmek için bir denetleyiciden oluşmaktadır (Şekil 3.12). BEA'lar İYM ile kıyaslandığında, elektrik motorunun sıfır mil/saatten itibaren geniş bir hız aralığında sabit ve yüksek bir tork özelliğine sahip olması ve bu nedenle, çoğu BEV bir redüksiyon dişli kutusuna ihtiyaç duymamaktadır. Ayrıca, sürülebilirliği korurken emisyon mevzuatına uymak için İYM' lere ve şanzımanlarına eklenen giderek karmaşıklaşan motor yönetim sistemlerine ihtiyaç duymaz. Sonuç olarak, tüm EA aktarma organları, İYM' li geleneksel araçlara kıyasla daha az karmaşıktır [91,92].



Şekil 3.12. Bataryalı elektrik araçlar (BEA) [74].

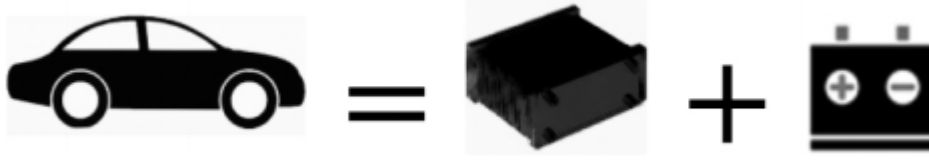
BEA, karşılaştırılabilir İYM 'lerden daha düşük maliyetle de yapılabilir, ancak kullanılan malzemeler daha pahalı olma eğilimindedir. BEA, marş motoru, egzoz veya şanzıman gibi ek sistemler gerektirmediğinden içten yanmalı motordan farklıdır. BEA, doğrudan şarj cihazının verimliliğinin %60–90 arasında değişebileceği elektrik şebekesinden şarj edilmektedir. Motorun kendisi, değişen hız aralıklarının da (%85–95) oldukça verimlidir. Modern bir invertör tarafından batarya DA gücünden motor için AC'ye dönüşüm yaklaşık %95 verimlilikle mümkün olmaktadır. Bu, %70'in üzerinde BEA'lar için yüksek bir verim sağlarken; buna karşılık, bazı dizel motorlar şu anda yaklaşık %40'a ulaşmasına rağmen, birçok İYM'lerde ise aracının verimliliği %20'nin altına düşmektedir [93].

3.2.4. Yakıt Pili Elektrik Araçlar (YPEA'lar)

İnsanlık tarihinin en önemli enerji kaynaklarından biri olan petrol ilk olarak yaklaşık 150 yıl önce Pennsylvania'da keşfedildiğinde, yakıt hücresi 20 yıldır biliniyordu, “yakıt hücresinin babası” Sir William Grove tarafından icat edildi. O zamanlar, zamanının çok ötesinde bir fikirdi. Günümüzde ise yakıt hücrelerinin, diğer enerji depolama cihazlarından çok daha yüksek enerji yoğunlukları ve enerji verimliliği sunan verimli ve çevre dostu güç kaynakları olduğu düşünülmektedir [94]. Bu nedenle yakıt hücrelerinin ulaşım, mobil ve sabit sektörler için umut verici enerji cihazları olduğu söylenebilir [95–98].

YPEA'lar, ana güç kaynağı olarak bir yakıt hücresi ile çalışmakta olup, enerji hidrojen tankına gelmektedir (Şekil 3.13). Batarya yüksek akım piklerini emmek için kullanılarak, aracın temel enerji ihtiyacı ise yakıt hücresinden sağlamış olmaktadır [70,99]. Bir yakıt pili elektrik aracının yapısı Şekil 3.14'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

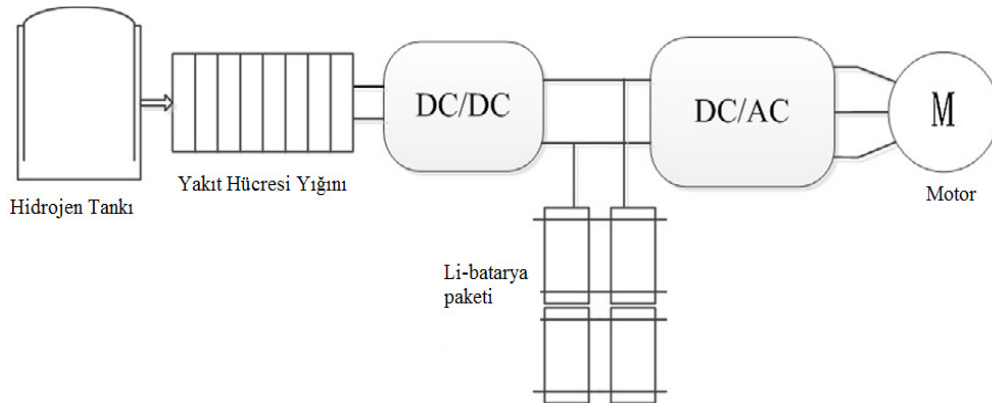
YPEA'lar, çevre dostu olarak bilinmesinin yanı sıra, onları çekici kılan asıl özellikleri ise yüksek verimli ve sessiz çalışma özellikleridir [95,100].



Şekil 3.13. Yakıt Pili Elektrik Araçlar (YPEA) [74].

Genelde saf elektrikli otomobillerin tatmin edici bir sürüş menzili gösteremediği kabul edilirken; yakıt hücreleri elektrikli araçlara umut verici bir teknoloji gibi görünmektedir [101]. Özellikle, Proton Değişim Membran Yakıt Pili, oldukça kompakt ve düşük sıcaklıklarda bile çalıştığı için ilgi çekicidir. Bununla birlikte, yakıt hücrelerinin birkaç yıl boyunca hacimli üretime hazır olmaları muhtemel değildir. Ayrıca, hidrojen dağıtımı için henüz çözülmemiş altyapı gibi bazı dezavantajlar vardır [102–104].

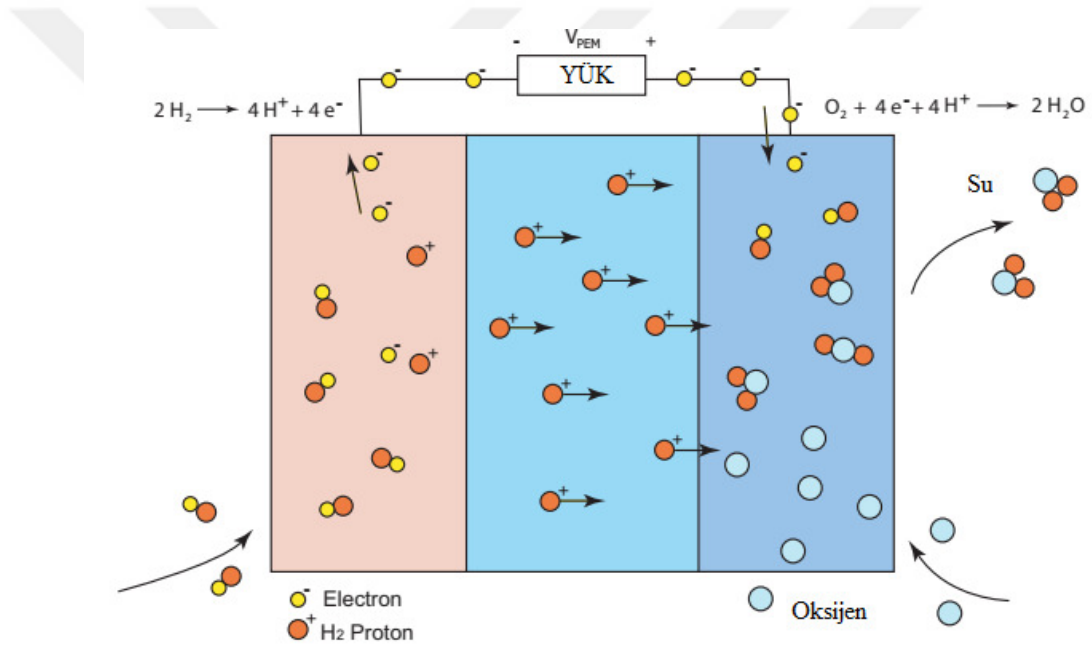
YP türleri arasında PEM YP, yüksek güç yoğunluğu, özgül gücü, düşük çalışma sıcaklığı, uzun ömür, verimlilik, iyi dinamik davranış ve güç talebindeki değişikliklere hızlı bir şekilde uyum sağlama yeteneği nedeniyle toplu taşıma için en iyi bir seçenektir [105,106].



Şekil 3.14. YPEA'nın genelyapısı [14].

3.2.4.1. Yakıt Hücresi

Burada yakıt hücresi enerji üretiminin prensip ve potansiyel faydaları özetlenmektedir. Yakıt hücresi prensibi 1839'da İngiliz fizikçi William R. Grove tarafından keşfedildi. Bir yakıt hücresi iki elektrot arasına sıkıştırılmış bir elektrolitten oluşur. Elektrolit, elektronları bloke ederken pozitif iyonların (protonların) geçmesine izin veren özel bir yapıya sahiptir. Hidrojen gazı anot adı verilen bir elektrottan geçer ve bir katalizör yardımıyla elektronlara ve hidrojen protonlarına ayrılır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Yakıt pili reaksiyon.

Protonlar, katot adı verilen diğer elektroda elektrolit içinden akarken elektronlar harici bir devreden akar ve böylece elektrik oluşturur. Hidrojen protonları ve elektronları katottan oksijen akışı ile birleşir ve su üretir.



Böylece yakıt hücresinin genel reaksiyonu aşağıdaki gibi olmaktadır;

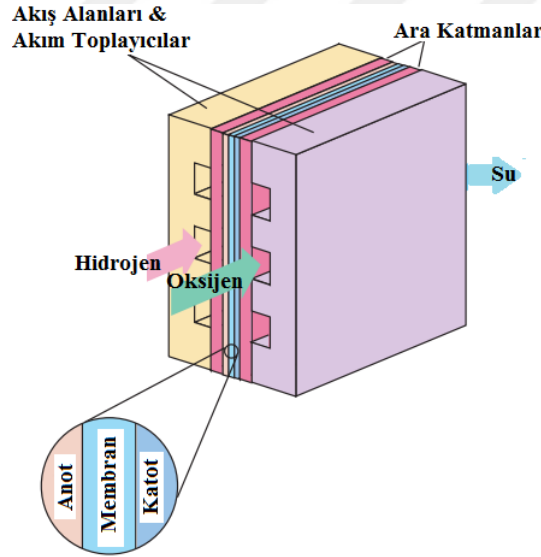


Bir hücreden üretilen voltaj, yakıt hücresi çalışma koşullarına ve yakıt hücresine bağlı yük boyutuna bağlı olarak 0 ila 1 volt arasındadır [107]. Yakıt hücresi voltajının tipik değeri yaklaşık 0.7 voltur. Daha yüksek voltaj elde etmek için, birden fazla hücre seri olarak istiflenir. Toplam yığın voltajı, ortalama hücre voltajı ile çarpılan hücre sayısıdır. Diğer elektrikli cihazlar gibi, yakıt hücresinde elektrik dirençleri vardır. Direnç ile ilişkili kayıp, ısı şeklinde dağıtılır. Başka bir deyişle, yakıt hücresi reaksiyonundan ısı açığa çıkar.

Yakıt hücrelerinin içten yanmalı motorlara ve akülere göre birçok avantajı vardır. Mekanik enerji üretmek için, İYM önce yakıtı yüksek sıcaklıkta oksijenle yakarak yakıt enerjisini termal enerjiye dönüştürür. Termal enerji daha sonra mekanik enerji üretmek için kullanılır. Termal enerji söz konusu olduğu için, dönüştürme işleminin verimliliği Carnot Çevrimi ile sınırlıdır. İYM'nin aksine, yakıt hücreleri yakıt enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür ve maksimum verimliliği Carnot Çevrimi sınırlamalarına tabi değildir. Yakıt hücreleri tarafından daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği elde edilebilir. Yakıt olarak hidrojen kullanılırsa, yakıt hücresi reaksiyonunun sonucu su ve ısıdır. Bu nedenle, yakıt hücrelerinin sıfır emisyonlu bir jeneratör olduğu düşünülmektedir. Hidrokarbon veya azot oksit gibi kirleticiler oluşturmazlar. Pil ayrıca kimyasal enerjiyi doğrudan elektriğe dönüştüren elektrokimyasal bir cihazdır. Ancak, akü reaktanları dâhili olarak saklanır ve tükendiğinde akünün şarj edilmesi veya değiştirilmesi gerekir. Yakıt hücresi reaktanları harici olarak depolanır. Oksijen tipik olarak atmosferik havadan alınır ve hidrojen, yakıt alabilen yüksek basınçlı veya kriyojenik tanklarda depolanır. Yakıt depolarına yakıt ikmali yapmak bataryaları şarj etmekten çok daha az zaman gerektirir [108].

Esas olarak kullanılan elektrolit tipiyle ayırt edilen farklı yakıt hücresi türleri vardır. Hücre malzemesi, çalışma sıcaklığı ve yakıt çeşitliliği gibi hücre karakteristiklerindeki farklılıklar, her yakıt hücresi tipini farklı uygulamalar için uygun hale getirir. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücrelerinin (PEMYH) otomobil uygulamaları için uygun olduğu bilinmektedir. PEM yakıt hücreleri yüksek güç yoğunluğuna, katı bir elektrolite, uzun ömre ve düşük korozyona sahiptir. PEM yakıt hücreleri, daha güvenli çalışmayı sağlayan ve ısı yalıtımı ihtiyacını ortadan kaldıran 50 – 100°C sıcaklık aralığında çalışır. Polimer elektrolit membran elektronik

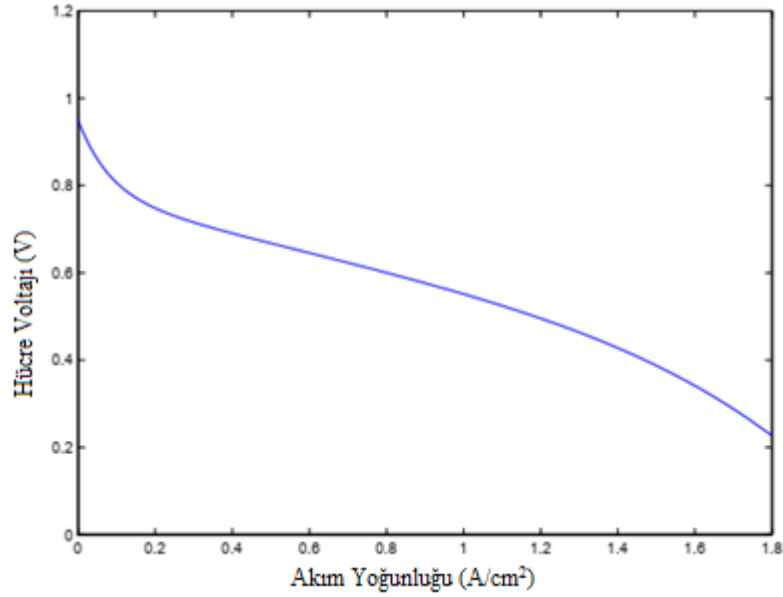
bir yalıtkandır ancak hidrojen iyonlarının mükemmel bir iletkenidir. Tipik membran malzemesi, sülfonik asit gruplarının (SO_3^-H^+) bağlandığı bir florokarbon omurgasından oluşur. Membran hidratlandığında, sülfonik gruptaki hidrojen iyonları (H^+) hareketlidir. Membran üreticilerine ve membran versiyonlarına bağlı olarak, membranların özellikleri farklıdır. Membranın kalınlığı 50 ila 175 mikron arasında değişir, bu da yaklaşık 2 ila 7 kağıt kalınlığındadır. Membran gözenekli grafit gibi yüksek iletkenliğe sahip bir malzemeden yapılmış iki elektrot (anot ve katot) arasına sıkıştırılır. Reaksiyon hızını arttırmaya yardımcı olmak için anot ve katodun yüzeyine az miktarda platin uygulanır. Üç bileşen (anot, elektrolit ve katot), Şekil 3.16'da gösterilen ve tipik olarak bir milimetreden daha az olan tek bir membranlı elektrolit düzeneği (MED) oluşturmak üzere birlikte yalıtılır.



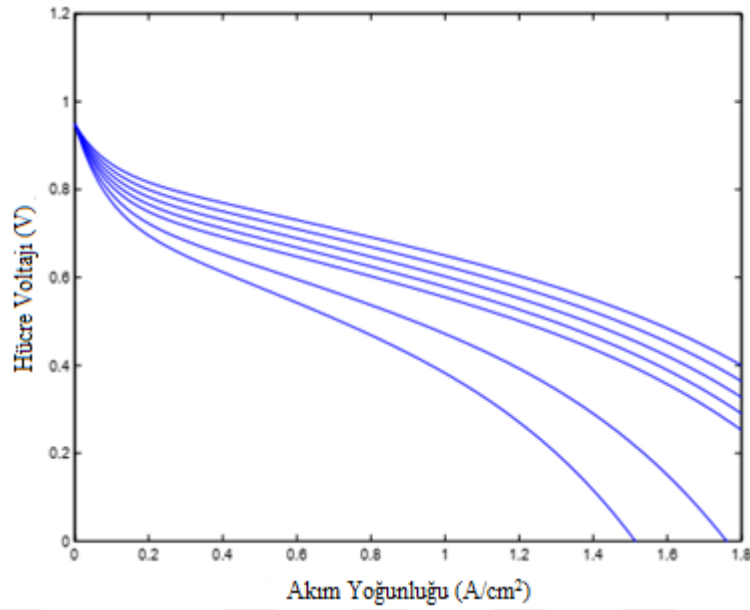
Şekil 3.16. Membranlı elektrolit düzeneği.

MED, gözenekli karbondan yapılmış iki destek katmanı ile bir araya getirilmiştir. Taşıyıcı tabakanın gözenekli yapısı, her reaktan gazın MED üzerindeki katalizör bölgesine etkili bir şekilde dağılmasını sağlar. Taşıyıcı tabakanın dış yüzeyi, hem reaktif gaz akış alanı hem de akım toplayıcı görevi gören akış alanı plakalarına bastırılır. Plaka, grafit veya kompozit malzemeler gibi hafif, güçlü, gaz geçirimsiz, elektron ileten bir malzemeden yapılmıştır. Akış alanı plakasının diğer tarafı bir sonraki hücreye bağlanır. Bir yakıt hücresi yığınının istiflenen hücre sayısı, farklı uygulamalarda değişen yığının güç gereksinimine bağlıdır. Çalışma durumuna bağlı olarak, tek bir yakıt hücresi nominal voltaj 0,7 volt olan 0 ila 1,0 volt arasında bir

voltaj sağlayabilir. Yakıt pillerinin tipik karakteristikleri normal olarak Şekil 3.14'de gösterilen, hücre akım yoğunluğuna karşı hücre voltajının (birim hücre aktif alanı başına akım) bir grafiği olan bir polarizasyon eğrisi şeklinde verilir. Gerçek voltaj ve yakıt hücresinin ideal voltajı arasındaki farklar, hücredeki kaybı temsil eder. Şekil 3.14'de gösterildiği gibi, yakıt hücresinden daha fazla akım çekildikçe, yakıt hücresi elektrik direnci, verimsiz reaktan gaz taşınması ve düşük reaksiyon oranı nedeniyle voltaj azalır. Düşük voltaj yakıt hücresinin düşük verimliliğini gösterdiğinden, düşük yük (düşük akım) çalışması tercih edilir. Ancak, bu yakıt hücresi hacmini ve ağırlığını artıracaktır. Ayrıca, sık sık yük değişiminin talep edildiği otomobil uygulamalarında düşük yükte sürekli çalışma pratik değildir. Şekil 3.17'de gösterilen polarizasyon eğrisi belirli bir çalışma koşulu içindir. Eğri, farklı basınç, sıcaklık, reaktan kısmi basıncı ve membran nemi dâhil olmak üzere farklı çalışma koşullarına göre değişir. Polarizasyon eğrisi üzerindeki basınç etkilerinin bir örneği Şekil 3.18'da gösterilmektedir.



3.17. Tipik bir yakıt hücresi polarizasyon eğrisi.

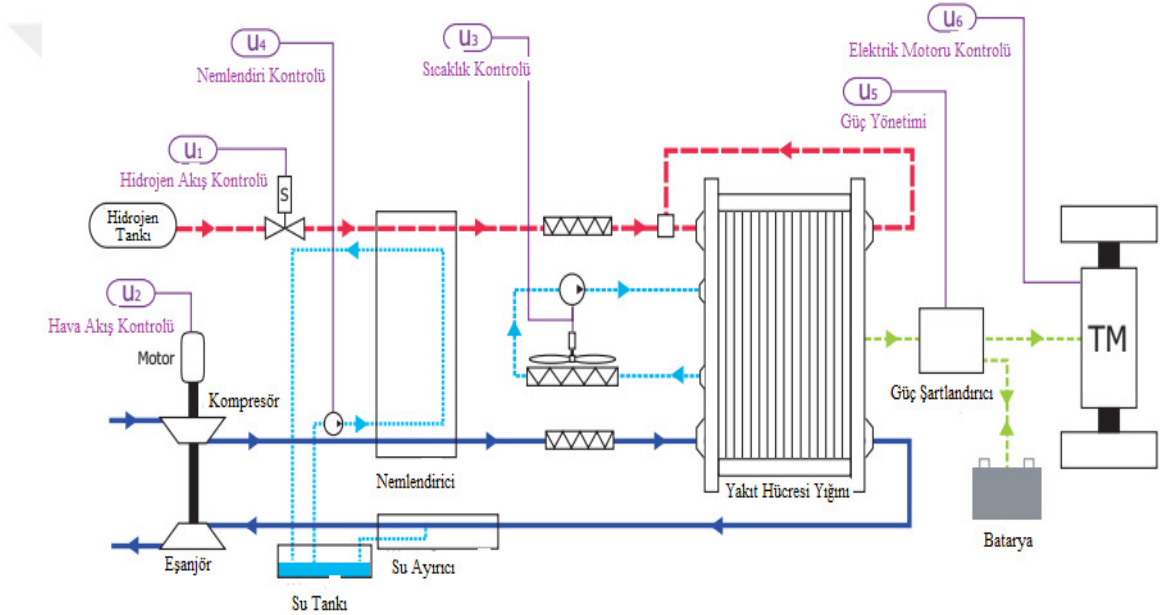


Şekil 3.18. Farklı çalışma basınçları için yakıt hücresi polarizasyonu.

3.2.4.2. Otomobiller İçin Yakıt Pili Tahrik Sistemi

Bir otomobile güç sağlamak için bir yakıt pili yığını, bir yakıt pili sistemi oluşturmak için diğer bileşenlerle entegre edilmelidir. Şekil 3.19'deki şema, basınçlı yakıt hücresi motoru için gereken minimum bileşenleri göstermektedir. Yakıt hücresi yığını dört akış sistemi gerektirir: (i) anoda hidrojen tedarik sistemi, (ii) katoda hava tedarik sistemi, (iii) yığın soğutma kanalında soğutucu görevi gören de-iyonize su ve (iv) hidrojeni nemlendirmek ve hava akışı için nemlendiriciye de-iyonize su beslemesi. Bu dört alt sistem, Şekil 3.19'deki u_1 ila u_4 kontrol girişleri ile gösterilir. Yüksek basınçta çalışma reaksiyon hızını önemli ölçüde artırır ve bu nedenle havayı istenen basınç seviyesine sıkıştırmak için yakıt hücresi verimliliği ve güç yoğunluğu bir kompresör ve bir elektrikli tahrik motoruna ihtiyaç vardır [109]. Kompresörden çıkan havanın yüksek sıcaklığı nedeniyle, hava sıcaklığını yığına girmeden önce düşürmek için bir hava soğutucu gerekir. Membranın dehidrasyonunu önlemek için, Şekil 3.18'de gösterildiği gibi hava akışına buhar eklemek için bir nemlendirici kullanılır. Hava istiften ayrılırken, yakıt hücresinde üretilen buharı taşır. Bir otomotiv yakıt hücresi sistemi için, suyun geri kazanılması için bir su ayırıcıya ihtiyaç vardır. Anot tarafında hidrojen, basınçlı hidrojen veya sıvı hidrojeni depolayabilen bir depodan sağlanır. Hidrojenin akış hızını kontrol etmek için bir valf kullanılır. Hidrojen akışını nemlendirmek için bir nemlendiricide kullanılmaktadır. Membranın

düzgün bir şekilde nemlendirilmesi için istifin sıcaklığı $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında tutulması gerektiğinden, yakıt hücresi reaksiyonunda açığa çıkan aşırı ısı, bir su soğutucu ile giderilir. Şekil 3.18'de gösterildiği gibi, istiften çıkan soğutucu akışkan daha sonra sistemden ısıyı uzaklaştırmak için bir ısı eşanjöründen veya bir radyatörden geçmektedir. Yakıt hücresi yığınının voltajı önemli ölçüde değiştiğinden ve tipik elektronik bileşenler veya çekiş motorları için uygun olmadığından, Şekil 3.19'de kontrol girişi u_5 olarak gösterilen bir güç düzenleyiciye sıklıkla ihtiyaç duyulur. Koşullu güç, taşıt aktarma organlarına bağlı çekiş motoruna sağlanır. Şekil 3.19'deki u_6 kontrol girişi, çekiş motoru tahrikinin kontrolünü temsil eder.



Şekil 3.19. Otomotiv yakıt hücresi tahrik sistemi.

Reaktan akış hızı, toplam basınç, reaktan kısmi basınç, sıcaklık ve membran nemini sağlamak için ayarlanması gereken iki ana parametre; (i) hızlı geçici tepki, tutarlı ısınma ve güvenli kapatma, (ii) sağlamlık ve değişen güce adaptasyondur.

Ana kontrol cihazları; hava akışı ve basınç düzenlemeleri için kompresör motoru, hidrojen akış hızı ve basınç düzenlemeleri için valf, sıcaklık düzenlemeleri için su pompası veya radyatör fan hızı ve nem kontrolü için nemlendiricidir. Ancak parametrelerdeki değişiklikler bağımsız değildir. Bir parametredeki değişiklikler diğerlerini etkiler. Örneğin, aşağıdaki durumlar göz önünde bulundurulmalıdır: Hava akış hızındaki bir artış, hava basıncında bir artışa neden olabilir, ancak aynı zamanda

istiften giren ve çıkan buhar ve ısı miktarını da değiştirebilir, böylece membranın nemini ve istifin sıcaklığını etkiler. Yığın sıcaklığı aynı zamanda, buhar doyma basıncı büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olduğu için, kümenin içindeki havanın ve hidrojenin nemini de etkiler. Aracın çalışması sırasında, çeşitli yük seviyeleri ve ani yük değişiklikleri beklenir. Yakıt hücreli araçların ticarileştirilmesi için bu araç operasyonlarının iyi bir şekilde ele alınması gerekir. Bu geçici süre boyunca kontrol sistemi, yakıt hücresi voltajının zararlı bir şekilde bozunmasını önlemek ve böylece verimlilik azalması ve yakıt hücresi ömrünün kısalmasını önlemek için reaktanların optimum sıcaklığını, membran hidrasyonunu ve kısmi basıncını muhafaza etmek için gereklidir.

3.2.4.3. Sistem Etkileşimleri

Reaktan akışının ve basıncının, yığın sıcaklığının ve membran neminin hassas kontrolü, yakıt hücresi sevk sistemlerinin canlılığı, verimliliği ve sağlamlığı için kritik öneme sahiptir. Ortaya çıkan görev, alt sistem etkileşimleri ve çakışan hedefler nedeniyle karmaşıktır. Tüm sistem dört alt sisteme ayrılabilir. Her sistemin karşılık gelen bir kontrol amacı ve diğer alt sistemlerle etkileşimleri vardır. Alt sistemler reaktan akış, ısı ve sıcaklık, su yönetimi ve güç yönetimi alt sistemleridir.

3.2.4.4. Reaktan Akış Alt Sistemi

Reaktan akış alt sistemi hidrojen kaynağı ve hava besleme döngülerinden oluşur. Araç çekiş motoru akım çekerken yakıt hücresi yığnında hidrojen ve oksijen tüketir. Anoddaki hidrojen akışı ve katottaki hava akışı, sırasıyla vana ve kompresör motoru komutları kullanılarak ayarlanır. Kontrol amacı, hızlı geçici yanıtlar sağlamak ve yardımcı güç tüketimini en aza indirmek için yeterli reaktan akışları sağlamaktır.

Yakıt hücresi güç çıkışının kompresör motor girişindeki değişikliklere karşı asgari olmayan faz davranışı, bu halkanın kapalı döngü bant genişliğini sınırlar. Erken uyarıcı bu zorluğu fark eder ve farklı ortam koşullarında ayarlanması gereken ileriye dönük bir haritaya güvenerek yavaş yanıt vermekten kaçınır. Birçok deneysel sistem, maksimum çekiş gereksinimlerini karşılayan hava akışı sağlayan sabit hızlı bir motor kullanır. Bu, daha az akış gereken düşük yük operasyonları sırasında gereksiz yardımcı güç tüketimi ile sonuçlanır [110–112].

3.2.4.5. Isı ve Sıcaklık Alt Sistemi

Isı ve sıcaklık alt sistemi, yakıt hücresi yığını soğutma sistemini ve reaktan sıcaklığı sistemini içerir. Çekiş motoru tarafından akım çekildiği için, yakıt hücresinde ısı üretilir.

Yakıt pili yığınının termal yönetimi, içten yanmalı motordakinden daha zordur. İlk olarak, iyonu giderilmiş su, etkili bir soğutucu sıvı yerine istifte soğutucu olarak kullanılır. İkinci olarak, PEM yakıt hücresi 80°C civarındaki sıcaklıkta çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, sıcaklığı 80°C civarında olan istiften çıkan egzoz havası, ısıyı taşıma kapasitesi 500°C'nin üzerindeki İYM egzoz gazından daha az kabiliyete sahiptir [113]. Yakıt pili yığını için ısı reddi bu nedenle soğutma sisteminin sorumluluğundadır. Ayrıca, istif ve su soğutucu arasındaki düşük sıcaklık farkı istiften soğutucuya ısı transferinin etkinliğini sınırlar. Binek araçlar için gereken istif boyutuyla, üretilen ısı istifin dış yüzeyi boyunca hava konveksiyonu ve radyasyonla pasif olarak dağıtılamaz. Bu, reaktan akış hızı ve soğutma sistemi yoluyla aktif soğutma gerektirir. Su soğutucu akış hızı ve sıcaklığı dışında, giriş reaktan havasının sıcaklığı da istifin sıcaklığını etkiler. Isı yönetim sistemi, bir by-pass vanasının ayarlanmasıyla birlikte soğutma fanının ve devridaim pompasının hızını değiştirebilir. Termal yönetimin amacı, yığın sıcaklığı aşımı olmadan hızlı ısınma ve düşük yardımcı fan ve pompa gücü kullanmaktır.

3.2.4.6. Su Yönetimi Alt Sistemi

Su yönetim sisteminin görevi, polimer zarın hidrasyonunu korumak ve sistemdeki su kullanımını/tüketimini dengelemektir. Reaktif akış miktarı ile anot ve katot akışlarına enjekte edilen su, membranın nemini etkiler. Kuru membranlar ve su basmış yakıt hücreleri yüksek polarizasyon kayıplarına neden olur. Akım yakıt hücresinden çekilirken, su moleküllerinin her ikisi de katotta üretilir ve hidrojen protonları ile anottan katoda sürüklenir. Katottaki su konsantrasyonu arttıkça, konsantrasyon derecesi suyun katottan anoduna yayılmasına neden olur. Yakıt hücresi nemindeki bozulmaya farklı mekanizmalar neden olabilir. Bunlar; yük arttıkça üretilen su, membran boyunca mutlak ve bağıl reaktan basıncındaki değişiklikler, hava akış hızında değişiklikler ve buhar doyma basıncını değiştiren yığın sıcaklığındaki değişikliklerdir. Bu mekanizmalar nem kontrol görevleri, reaktan akış yönetimi

döngüsü, ısı yönetimi döngüsü ve güç yönetimi döngüsü arasında güçlü ve doğrusal olmayan etkileşimleri gösterir. Uygun nemlendirme kontrolü yoksa voltajda %20-40 oranında bir düşüş meydana gelebilir [43].

3.2.4.7. Güç Yönetimi Alt Sistemi

Güç yönetimi alt sistemi, yakıt hücresi yığınınından çekilen gücü kontrol eder. Güç yönetimi göz önünde bulundurulmadan, yük akımı yakıt hücresi sistemini etkileyebilir. Bununla birlikte, yukarıda belirtildiği gibi, çekilen akımın diğer alt sistemler üzerinde doğrudan etkisi vardır. Sistemde bir akü başka bir güç kaynağı olarak kullanılırsa, iki güç kaynağı arasındaki güç yönetimi, araca geçici yanıt vermek ve yakıt pili sistemine yardımcı olmak amacıyla uygulanabilir.

3.2.4.8. Yakıt İşlemci Alt Sistemi

Hidrojen yakıt ikmali, dağıtımı ve depolaması için yetersiz altyapı, yakıt işlemci teknolojisini yakıt pili sisteminin önemli bir parçası haline getirir. Karbon bazlı yakıtlardan metanol, benzin ve doğal gaz yakıt hücresi enerji kaynakları olarak kabul edilen yakıtlara örnektir [114]. Bileşenler ve yakıt işlemcisindeki birçok ilave kontrol aktüatörü arasındaki etkileşimler, kontrol problemine ek karmaşıklık getirmektedir. Yakıt hücresi değişkenlerine ek olarak, hassas kontrol gerektiren yakıt işlemcisi değişkenleri reaktörlerin sıcaklığını ve gaz akımındaki hidrojen ve karbon-monoksit konsantrasyonu (karbon bazlı yakıtlar için) içermektedir.

3.2.5. Bataryalar ve Batarya Çeşitleri

Bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bataryalar hücrelerden, hücreler de bir elektrolit ile pozitif ve negatif anotlardan oluşmaktadır. Elektrolit ve elektrotlar arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu DA elektrik üretilmektedir [115].

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların uzun ömürlü, yüksek özgül güç, yüksek özgül enerji ve uzun çevrim ömrüne sahip olması istenmektedir. Elektrikli araçlarda en çok tercih edilen enerji depolama ünitesi olarak kullanılan bataryaların başında lityum-iyon bataryalar gelmektedir. Lityum-iyon bataryalar diğer bataryalara nazaran daha hafif olurken; enerji yoğunlukları ise oldukça

yüksektir. Menzillerinin 150 km civarında olması ve CO₂ salınımını ciddi oranda azaltması şehir içi kullanımı için bu bataryaları avantajlı kılmaktadır [116].

Batarya, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrokimyasal hücre olup (Galvanik hücre olarak da bilinir); bir elektrolit (aynı zamanda elektronik olarak yalıtıcı bir ortam olan iyonik bir iletken) ile ayrılmış bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Elektronlar anotta üretilir ve dış devre boyunca katoda doğru akar. [117, 118]. Çizelge 3.2’de çeşitli batarya tiplerinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çeşitli batarya tiplerinin özellikleri [119, 120].

Batarya Kimyası	Tip: Birincil (B) İkincil (İ)	Hücre Potansiyeli (ΔV)/V	Teorik (pratik) özgül enerji /Wh kg ⁻¹	Faydalı enerji yoğunluğu/Wh l ⁻¹
Alkali çinko mangan dioksit (Zn / MnO ₂)	B	1.5	358 (145)	400
Lityum iyot (Li / I ₂)	B	2.8	560 (245)	900
Alkali nikel kadmiyum (NiCd)	İ	1.3	244 (35)	100
Nikel metal hidrit (NiMH)	İ	1.3	240 (75)	240
Kurşun asit (Pb / PbO ₂)	İ	2.1	252 (35)	70
Sodyum sülfür (Na / S)	İ	2.1	792 (170)	345
Sodyum nikel klorür (Na / NiCl ₂)	İ	2.6	787 (115)	190
Lityum-iyon (Li-iyon)	İ	4.1	410 (180)	400

BEA'larda kullanılan iki ana pil tipi nikel metal hidrit (NiMH) ve lityum-iyon (Li-ion) bataryalardır [121]. NiMH bataryalar çoğu zaman HEA'larda (örneğin Toyota Prius) bir içten yanmalı motorla (İYM) birlikte kullanıldıklarında ikincil enerji kaynakları olarak kullanılırken, Li-ion bataryalar Nissan gibi BEA'larda birincil enerji kaynakları olarak kullanılmaktadır. Örneğin; Nissan Leaf ve Mitsubishi iMiev gibi 35.000 dolarlık 5 kapılı Nissan Leaf BEA, 24 kWh kapasite sağlayan ve sıfır şarj durumundan standart bir ev prizinden tam şarj etmek için 12 saate kadar (48 modül) güç sağlarken; 3 fazlı bir AC prizinden ise 30 dk güç sağlamaktadır [119].

YP araçlarda kullanılan bataryalar, ultrakapasitörden daha yüksek özgül enerjiye sahiptir, bu nedenle daha uzun süre ekstra güç sağlayabilmektedir. Tipik olarak, günümüzün ticari olarak temin edilebilen ultra kapasitörleri karşılaştırılabilir ağırlıktaki bir pilin enerjisinin sadece onda birine sahiptir. Bununla birlikte, ultra kapasitörler bir pilden çok daha hızlı enerji sağlar ve pil üreticileri tarafından da pazarda hızla yer kazanmıştır [122, 123].

3.2.5.1. Kurşun Asit Bataryalar

Kurşun asitli bataryalar, yaygın kullanım ve maliyetinin düşük olması sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir [124]. Bu bataryaların, bakım gerektirmemesi ve ucuz olması avantajları arasında sayılırken, ağır ve enerji yoğunluğu düşük olması ise dezavantajları arasındadır. Bu bataryalar, İYM'li araçlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, elektrikli araçlarda kullanılan kurşun asit bataryalar, İYM'li araçlarda kullanılan bataryalara göre daha uzun ömürlü olup, tasarımları da daha farklı ve pahalıdır [125]. Kurşun asit bataryalar, kW-saat dolm açısından en ucuz olan yeniden şarj edilebilen bataryalar olmasına rağmen; spesifik enerjileri düşük olduğundan uzun menzilli araçlarda kullanımı ise zordur [115].

3.2.5.2. Nikel Bazlı Bataryalar

Nikel bazlı bataryalar dört gruba ayrılır: nikel demir, nikel çinko, nikel kadmiyum ve metal hidrürdür. Nikel kadmiyum bataryalar, elektrikli araçlarla ve diğer birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu bataryaların avantajları; yüksek özgül güç, uzun ömür ve iyi denilebilecek uzun menzilli depolaması sarsıntılara karşı oldukça dayanıklı olmasıdır.

3.2.5.3. Metal-Hava Bataryaları

Elektrikli araçlarda kullanılan diğer bir batarya türü metal-hava bataryalarıdır. Çinko ve alüminyum bu bataryalarda en fazla kullanılan metal elektrotlardır. Metal hava bataryalarında, ince gaz geçirgen katot ve potasyum hidroksit gibi alkali su bazlı elektrolit kullanılmaktadır [125]. Metal hava bataryalarında bulunan metal elektrotlar tükendikleri zaman yenileriyle değiştirilmektedir. Bu nedenle metal elektrotlar bir çeşit yakıt gibi düşünülmektedir [115].

3.2.5.4. Sodyum Bazlı Bataryalar

Sodyum bazlı bataryaların çalışma sıcaklıkları yüksek olduğundan dolayı elektrikli araçlar için uygundur. Bu bataryalar, kurşun asit bataryalar ile kıyaslandığında, spesifik enerjilerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Batarya, negatif sıvı sodyum elektrotu ve pozitif sıvı sülfür elektrotundan meydana gelmektedir. Elektrolit ise sodyum iyonlarını yönlendiren ve iki elektrotu ayıran bir çeşit katı seramiktir. Ancak,

elektrolitin seramik olması güvenlikle ilgili birtakım endişelerin oluşmasına neden olmakta ve bu endişeler denemeler sırasında oluşan yangınlar ile birlikte desteklendiğinden, bu batarya ticari olarak fazla gelişmemiştir[115].

3.2.5.5. Lityum İyon Bataryalar

Lityum bataryalar, enerji yoğunlukları oldukça iyileştirilmiş olan bataryalardır. Ancak, diğer tekrar şarj edilebilen bataryalara göre daha yüksek maliyete sahiptirler. Bu bataryalar, pozitif elektrot olarak lityumlu bir metal oksit ve negatif elektrot olarak lityumlu bir karbondan oluşmaktadır. Bu bataryaların en önemli özelliği, hücreler doldurulurken gerilimin belirli bir değerde olması gerektiğidir. Bu nedenle batarya ile birlikte şarj aletleri de geliştirilmektedir [115]. Lityum iyon bataryaların en önemli avantajları, diğer bataryalara nispeten daha hafif olması ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Bu yüzden, gelişimini tamamladıklarında, elektrikli araç uygulamalarında en çok tercih edilen bataryalar olacağı düşünülmektedir.

3.2.5.6. Alüminyum Hava Bataryaları

Alüminyum hava bataryalarında bulunan alüminyum, havadaki oksijen ve suyla birleşerek alüminyum hidroksit oluşturmakta ve bu kimyasal reaksiyon sonucu elektrik enerjisi açığa çıkmaktadır [126]. Bu tip bataryaların negatif elektrotu alüminyumdan oluşmaktadır. Kullanılmış olan negatif elektrotların değiştirilmesi ile batarya yeniden doldurulmaktadır.

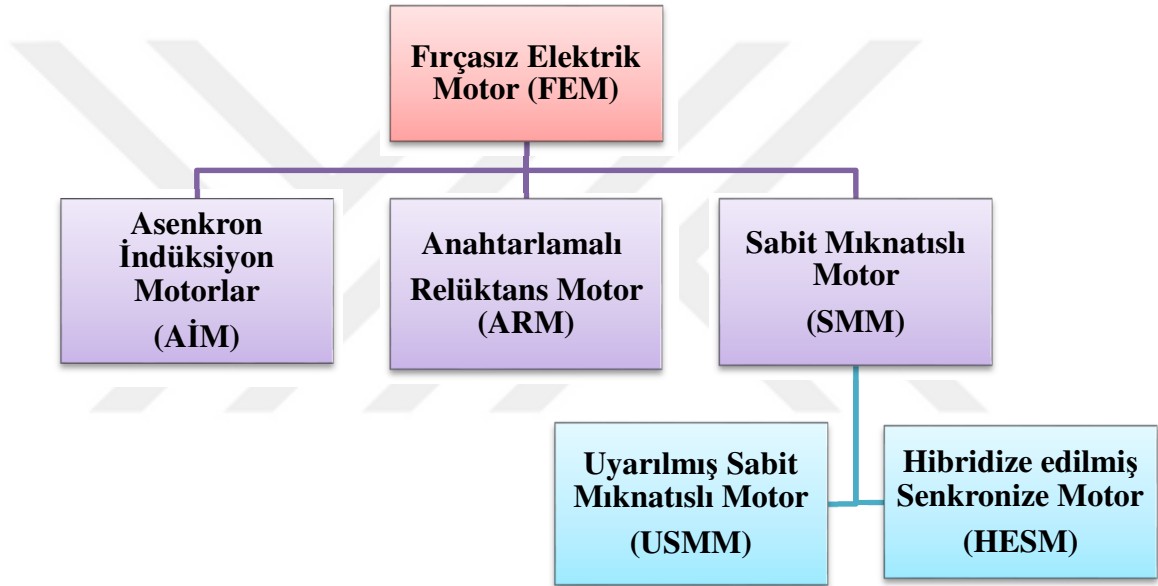
Alüminyum hava bataryalarının en büyük dezavantajı, düşük özgül güce sahip olmalarıdır. Elektrikli araç için gerekli olan güce erişebilmek için çok ağır bataryalar kullanılması gerektiğinden kullanışlı değildir.

3.2.5.7. Çinko Hava Bataryaları

Çinko hava bataryalarında bulunan çinko, havadaki oksijenle birleşerek çinko oksidi oluşturmakta ve böylece enerji üretilmektedir. Çinko hava bataryaları, alüminyum hava bataryalarına nazaran daha yüksek spesifik güce sahiptirler. Bu nedenle alüminyum hava bataryalarına göre daha kullanışlıdır.

3.2.6. Elektrikli Araçlar İçin Elektrik Motorları

Sincap kafesli rotor, üç fazlı, asenkron indüksiyon motorlar en bilinen motor çeşitleridir. Bu motorları kullanan EA'lar nispeten düşük maliyetli, yüksek sağlamlık ve iyi dinamik performansları en büyük avantajları arasındadır. Bununla birlikte, EA'ların ihtiyaç duyduğu dinamik performans gerekli hız kontrolü oldukça karmaşık bir teknik olduğundan endüksiyon motoru tarafından nispeten yüksek bir fiyata karşılanmaktadır. Şekil 3.20'de EA'larda kullanılan başlıca elektrik motoru çeşitleri verilmiştir [80].



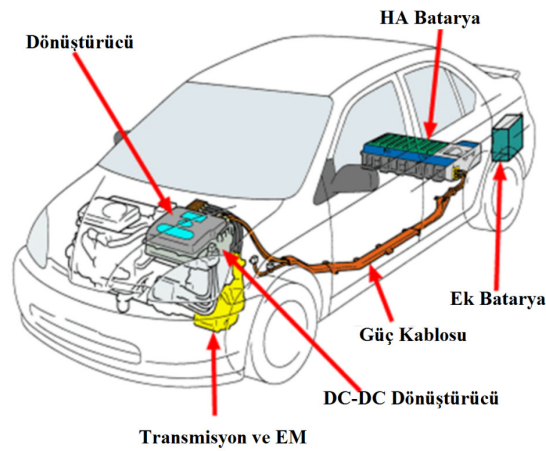
Şekil 3.20. Elektrik motor çeşitleri.

Kalıcı mıknatıslı fırçasız DA motor (KMFM), çok geniş bir alanda umut vaat eden bir teknolojidir. Ancak, Çin dışındaki otomobil üreticileri temkinli olmalıdır. Çünkü kalıcı mıknatıslarda kullanılan nadir toprakların dünya rezervleri neredeyse tamamen Çin'de bulunmakta olup, Çin hükümeti ihracat kısıtlamaları uygulayabildiği sürece, bu tahrik türü önemli bir pazar lideri olacak gibi görünmektedir. EA'lar için son elektromanyetik tork üretici seçeneği fırçasız anahtarlamalı relüktans (BLSR) motordur. BLSR motorlarının çok düşük üretim maliyeti (asenكرون motorlarındakinden bile daha düşük), diğer bazı önemli özelliklerle (örneğin, geniş hız aralığı), onları EA'ları sürmek için ciddi bir aday yapar. Bununla birlikte, daha karmaşık (ve pahalı)

bir kontrolör ile telafi edilebilen (akustik) gürültü ve torkta yüksek dalgalanma ile mücadele etmektedirler.

3.2.6.1. EA'lar İçin Güç Elektroniği Sürücü Yapıları

Güç dönüştürücüler, regüle edilmemiş bir DA (doğru akım) voltaj seviyesini düzenlenmiş ve farklı bir DA voltaj seviyesine veya düzenlenmiş AC (alternatif akım) voltaj seviyesine dönüştürmek için yüksek güçlü elektronik anahtarlar ve analog ve dijital kontrol devresi ile inşa edilmiş son derece uzmanlaşmış devrelerdir. İlkine DA-DA dönüştürücüler denir, ikincisine DA-AC dönüştürücüler (genellikle frekans çeviriciler) denir. DA-DA dönüştürücülerde çıkış voltajı seviyesi, giriş voltajı seviyesinden daha düşükken, takviye dönüştürücüler girişlerine göre yüksek bir çıkış voltajı seviyesi sağlamaktadırlar. Buck-boost dönüştürücüler, kontrol sinyali görev döngüsüne bağlı olarak giriş voltajını girişlerine göre azaltabilir veya yükseltebilir. Şekil 3.21, ticari bir HEV'de güç dönüştürücülerinin uygulanmasını göstermektedir. Dönüştürücüler, rejeneratif frenleme ve boşaltma sırasında pil takımına (veya ultrakapasitör) enerji tasarrufu sağlamak için pil takımını şebeke voltajından (PHEV'de) şarj etmek, pil takımını yakıt deposundan (İYM ve jeneratör dahil) şarj etmek için kullanmaktadır. Ayrıca, elektrik motorunu/motorlarını sürmek ve ısıtma, havalandırma ve klima gibi araç yüklerini beslemek için de kullanılmaktadırlar.



Şekil 3.21. Toyota Prius HEA'daki güç dönüştürücüler.

BÖLÜM 4

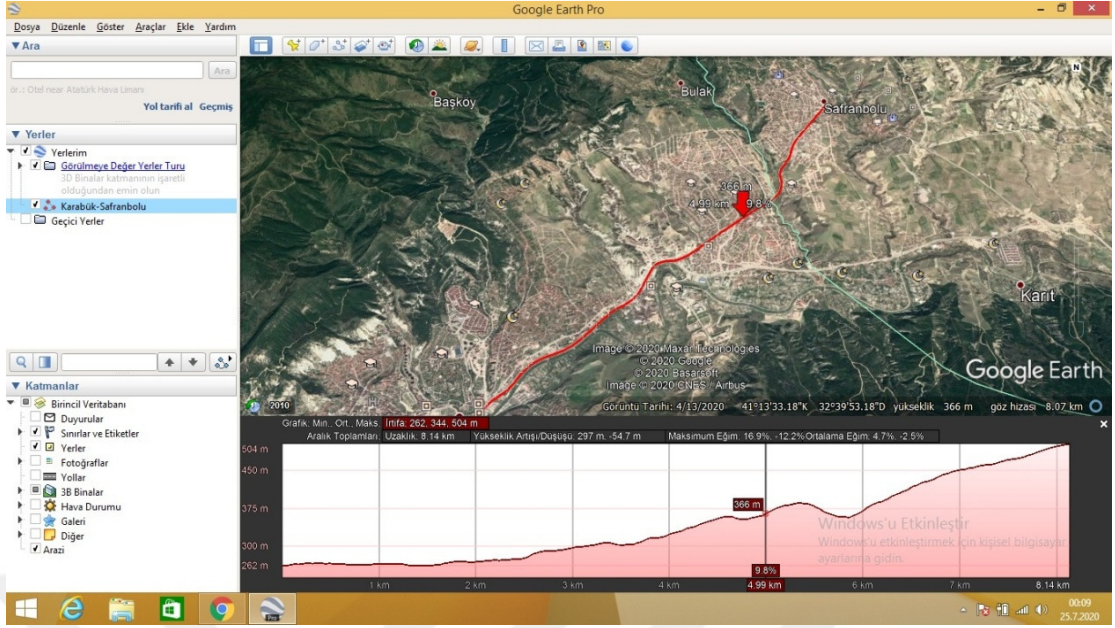
MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde bir taşıtın dinamik modelinin oluşturulması ve simülasyonu için gerekli olan yazılım bilgisi, modelleme alt yapıları, modellenen taşıta ait bilgiler, modelleme için gerekli hesaplamalar ve analiz sonuçları verilmiştir.

Bu çalışmada, taşıt modellenmesi ve model alt yapısı için MATLAB 2020a yazılımı kullanılmıştır. Diğer gömülü yazılımlara göre hem daha üstün olması hem de daha güncel içerikleri bulundurması, taşıt modeli oluşturulabilmesi için özel ve geniş bir kütüphaneye sahip olup kullanıcı dostu olması ve en önemlisi günümüz otomotiv üreticilerinin Ar-Ge departmanları tarafından uygulama yazılımı olarak kullanılması gibi avantajları olması nedeni ile MATLAB yazılımı tercih edilmiştir.

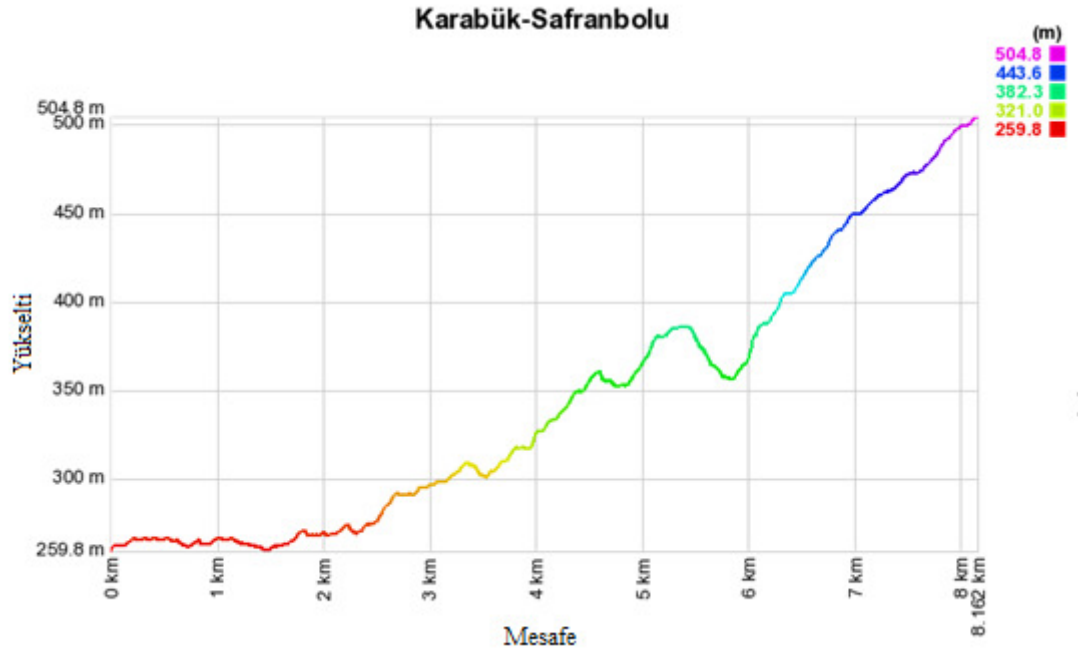
4.1. HİBRİT BİR TAŞITIN DİNAMİK MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Bir taşıtın modelleme işleme başlangıçta modelle ortamının oluşturulması ile başlamaktadır. Modelleme ortamı için en belirgin özellik ise; yol şartlarının oluşturulması ve bu yol şartlarına göre simülasyon vektörlerini oluşturup bir sürüş çevrimi meydana getirmesidir. Bu çalışma da Karabük merkez ile Safranbolu arası yolu sürüş yolu olarak belirlenmiştir. Yol şartlarının belirlenmesi için Google Earth Pro programı kullanılmıştır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi program üzerinde yukarıda bahsedilen aralık için bir yol oluşturulmuştur.

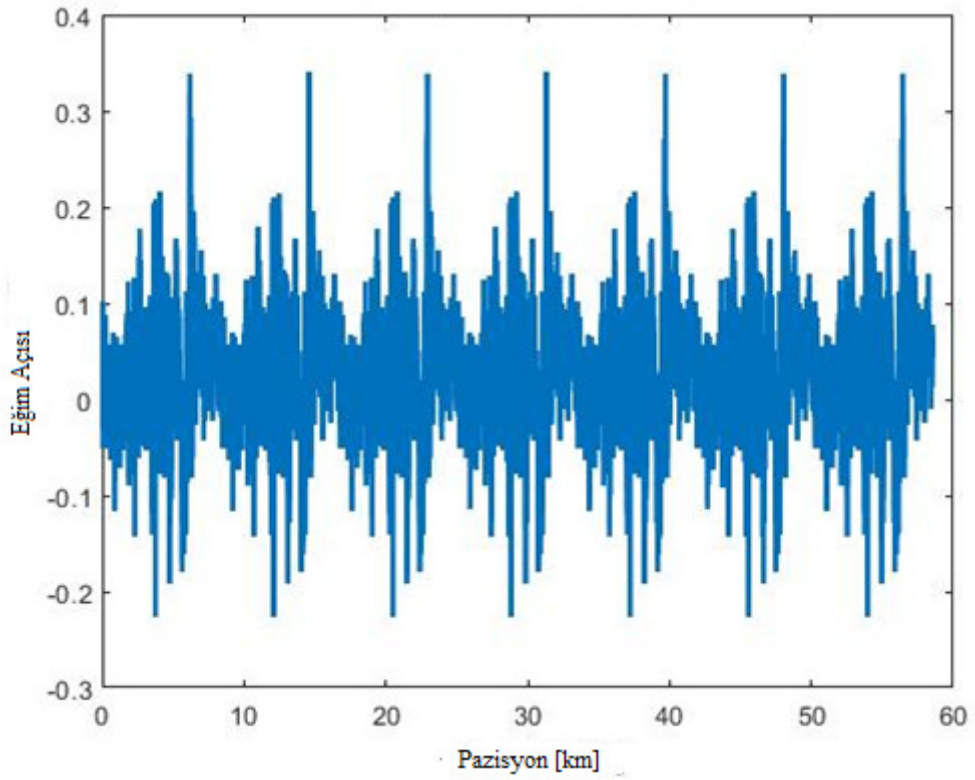


Şekil 4.1. Google earth pro ile yolun oluşturulması.

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere oluşturulan yolun yükseklik profili belirlenmiştir. ardından bu yükseklik profili google earth üzerinde ".klm" formatında kaydedilerek sayısal veriler alabilmek için "GPSVisualizer.com" sitesi üzerine kaydedilen yükseklik profil dosyası aktarılmıştır. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi enlem ve boylam değerlerine göre yükseklikler metre birimi olarak sayısallaştırılmıştır. Bu yazılımsal site hesaplama çıktısı olarak farklı bir formatta çıktı verdiği için elde edilen yükseklik çıktıları "TCX converter" adlı bir program kullanılarak ".csv" dosyasına dönüştürülmüştür. ".csv" dosyası "Microsoft Excel" programında açılarak bir dizi hesaplamalar sonucunda her bir GPS noktasındaki eğim açıları taşıt yokuş tırmanma direncinin hesaplanması için belirlenmiştir ve taşıtın pozisyonuna göre Şekil 4.3'te verilmiştir.

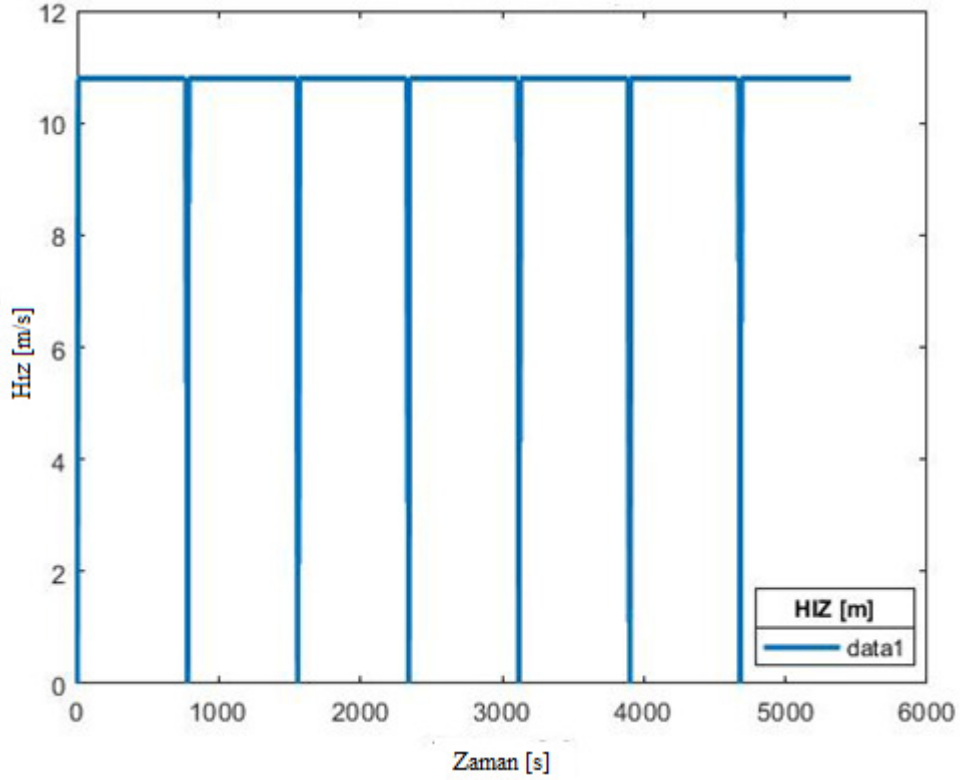


Şekil 4.2. Yükseklik profili.



Şekil 4.3. Yol eğim açısı değerleri.

Şekil 4.3 incelendiğinde sürüş çevrimi boyunca yol eğim açısı değerleri görülmektedir. Yol şartlarına göre ortam modeli oluşturulduktan sonra simülasyon hız vektörü Şekil 4.4'te aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 4.4. Sürüş çevrimi boyunca zaman hız grafiği.

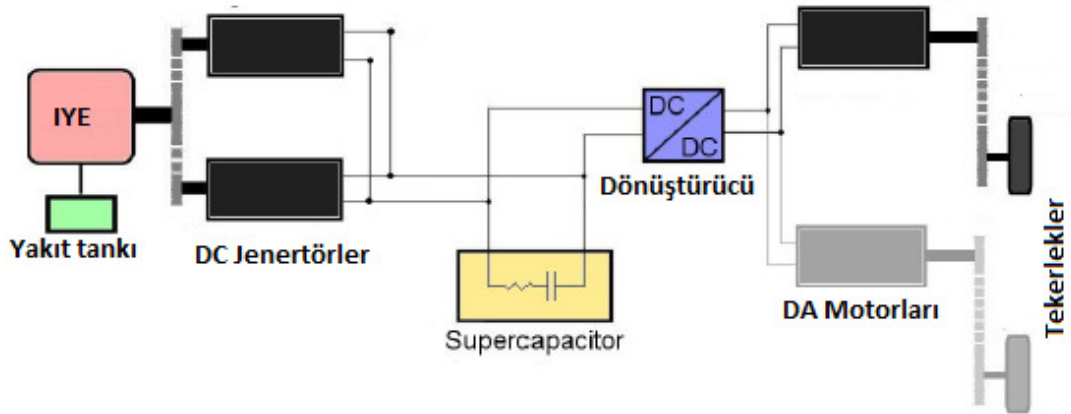
Hız vektörü oluşturulurken Karabük-Safranbolu arası katedilen yolun toplam ne kadar sürede alındığına dikkat edilmiştir. Zaman değerleri Google earth programı tarafından iki nokta arasındaki mesafeye göre verilen süre dikkate alınarak belirlenmiştir. Araç hız profili oluşturulurken yol boyunca ortalama hız dikkate alınmıştır. Ortalama hız ise temel hız denkleminde türetilmiştir. Araç hızlanma süresi 10 saniyede gerçekleşmektedir. Ayrıca sürüş çevrimi belirlenen iki nota arasında gerçekleştirilen 7 turdan oluşmaktadır. Böylece toplam sürüş mesafesi 58 km olmaktadır. Tur sayısı artırılarak aracın aldığı mesafenin artırılmasının amacı, daha gerçekçi bir simülasyon ve simülasyon sonuçlarına ulaşılmasını istenmesidir.

Yukarıdaki gibi gerçekçi bir sürüş ortamı oluşturulduktan sonra oluşturulan ortam şartlarına göre araç simülasyonu aşağıdaki adımlara göre gerçekleştirilmiştir.

Başlangıçta, akıllı bir HEA taşıtı için aktarma organları kurulumu açıklanmaktadır. Aynı zamanda aktarma organı bileşenleri ve aracın diğer yönleri hakkında gerekli toplanan bilgiler de sunulmaktadır. Bu bilgiler MATLAB/Simulink modellemesi için temel teşkil edecektir.

Ayrıca bu bilgiler ileride gerçekleştirilmesi düşünülen bilimsel ve deneysel çalışmalar için kullanılacaktır. Bu nedenle aşağıdaki topolojisi sunulmuş olan araç yapısı gerçek bir araç oluşturulacak ve deneysel çalışmaya tabi tutulacak şekilde belirlenmiştir.

Görüldüğü üzere, Şekil 4.5'te seri bir hibrit yapısı mevcuttur. Burada, İYM'nin tekerleklerle doğrudan temas halinde olmadığı anlamına gelir. Bunun yerine, bir veya iki paralel DA jeneratörü aracılığıyla süper kapasitörün şarj edilmesi için kullanılmaktadır. Toplam çekiş gücü, her biri arka tekerleklerden birine bağlanan bir veya iki elektriksel olarak paralel DA motor kullanılarak elde edilir. Her tahrik motoru ile süper kapasitör arasına bir DA/DA dönüştürücü yerleştirilir. İYM ve jeneratörler arasındaki ve elektrik motorları ile tekerlekler arasındaki mekanik bağlantı sabit oranlı zincir dişlilerden oluşmaktadır.

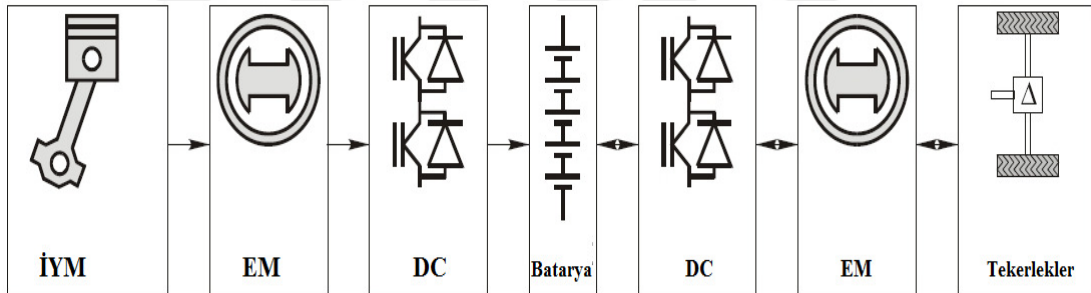


Şekil 4.5. HEA güç aktarma organları.

SHEA, başlangıçta tahrik aralığını genişletmek için elektrikli araçtan geliştirilmiştir. Elektrikli bir araca bir motor eklenerek, enerji depolama cihazının panoda şarj edilmesi sağlanmaktadır.

Aracın tahriki, bir enerji depolama cihazı ve/veya bir motor jeneratör ünitesi ile çalışan bir elektrik motoru tarafından gerçekleştirilir. Yük gücü talebi büyük olduğunda, motor jeneratör ünitesi tampon sistemin elektrik motoruna güç vermesine yardımcı olur ve yük gücü talebi küçük olduğunda motor jeneratör ünitesi tampon sistemini şarj etmektedir.

Aracın hızlanma, tırmanma kabiliyeti ve maksimum hız gibi performansı tamamen elektrik motorunun boyutu ve özelliklerine göre belirlenmektedir. Seri hibrit topolojisi Şekil 4.6'da verilmiştir. Bir seri hibrid elektrikli araçta motor-jeneratör sistemi ile tekerlekler arasında mekanik bir bağlantı yoktur. Ancak, bu topolojinin avantajı, İYM'nin kapatılabilmesi ve bir diğerinin motor-jeneratör ünitesinin çekiş motorundan ayrı olarak monte edilebilmesidir. Motor mekanik olarak tekerleklerden ayrıldığından, motoru daima en uygun çalışma bölgesinde çalıştırmak mümkündür. Bu aktarma organları topolojisi, debriyaj ve konvansiyonel şanzıman ihtiyacını da ortadan kaldırmaktadır.



Şekil 4.6. Seri hibrid elektrikli araç [127].

Sürüş koşullarına ve sürücünün isteğine bağlı olarak, seri hibrid elektrikli araç dizisinin seri arasında geçiş yapmak için beş çalışma modu vardır. Çalışma modları:

-Hibrit çekiş modu: Yüksek miktarda talep edilen güç olduğunda, hem motor jeneratörü hem de zirve güç kaynağı (PPS) olarak da adlandırılan enerji depolama cihazı elektrikli motor sürücüsüne güç sağlamaktadır. Verimlilik ve emisyon nedenleriyle İYM optimal bölgesinde çalıştırılmalıdır.

-En yüksek güç kaynağı - yalnız çekiş modu: En yüksek güç kaynağı yalnızca istenen gücü sağlamaktadır.

-Motor jeneratörü - tek başına çekiş modu: Motor jeneratörü tek başına istenen gücü sağlamaktadır.

-Motor jeneratöründen PPS şarjı: Enerjisi en alt seviyeye düştüğünde PPS'nin şarj edilmesi gerekmektedir. PPS rejeneratif frenleme veya motor jeneratörü ile şarj edilebilmektedir. Rejeneratif fren şarjı genellikle yetersiz olup, bu nedenle genellikle motor-jeneratör şarjı gerekli olmaktadır.

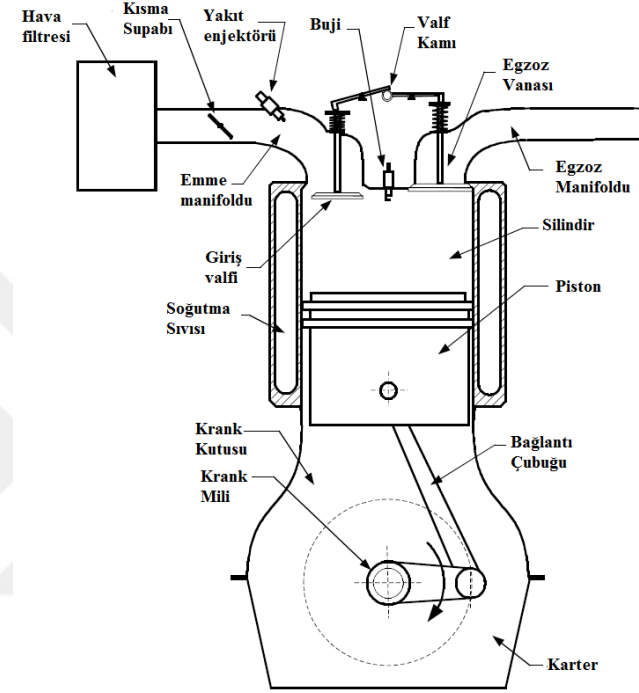
-Rejeneratif frenleme modu: Elektrikli çekiş motoru, araç fren yaparken jeneratör olarak kullanılabilir. Sonuç olarak, araç kütlesinin kinetik enerjisinin bir kısmını PPS'yi şarj etmek için elektrik enerjisine dönüştürmektedir.

İYM birincil güç kaynağı olarak kullanılırsa, İYM'den gelen güç çıkışının elektrik motorunu kullanmadan önce elektriğe dönüştürülmesi gerektiğinden verimsizlikler meydana gelecektir. Bu nedenle, seri hibrit topolojisi genellikle bir enerji depolama cihazının tahrik aralığını genişletmek için küçük bir İYM ile kurulmaktadır. Dur-kalk sürüş sırasında seri topoloji, İYM'nin verimsiz çalışmasını en aza indirdiği ve rejeneratif frenlemeden devam eden enerjiyi en üst düzeye çıkardığı için çok düşük emisyonlara ve çok iyi verimliliğe sahip olmaktadır. Bu topolojinin dezavantajı ise, maliyeti önemli ölçüde artıran ve araç performansını azaltan büyük, ağır, enerji depolama sistemi gerektirmesi olup, mekanik gücün elektriğe dönüşmesi ve daha sonra EM'de mekanik harekete geri dönmesi nedeniyle karayolu sürüşü sırasında verimliliği düşürmesidir.

Aktarma organındaki bileşenler, içten yanmalı motorlar, elektrikli makineler, elektrik enerjisi tamponları ve güç elektroniği dönüştürücüler gibi hibrit elektrikli ve elektrikli araçlarda yaygın olan bazı bileşenlerle ilgilidir. Her bileşen için gerekli arka plan bilgileri ve bileşenlerin nasıl modellenebileceği ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

4.1.1. İçten Yanmalı Motor (İYM)

Otomobillerde en yaygın birincil enerji kaynağı, pistonlu motor olarak da adlandırılan içten yanmalı motorlardır. Motor, elektrokimyasal enerjiyi yakıttan ısıya dönüştürerek mekanik bir enerji üretmektedir [128–130]. Şekil 4.7’de dört zamanlı bir İYM’un yapısı görülmektedir.



Şekil 4.7. Dört zamanlı bir içten yanmalı bir motorun yapısı [130].

Bir benzinli motor için hava/yakıt oranı yaklaşık 14:6'dır, yani her kg yakıt kütlesi için 14: 6 kg hava gereklidir. Güvenilir bir yanma için hava/yakıt oranının bu değere yakın olması en iyisidir.

λ değeri (lambda değeri), gerçek hava/yakıt oranının stokiyometrik hava/yakıt oranına bölümüdür. Maksimum güç çıkışı için (tam yükte ve geniş açık gaz kelebeğinde), λ yaklaşık 0:85 – 0:95 olmalıdır, çünkü daha az hava gereklidir. Kısmi yükte (kısmi gaz) $\lambda > 1$ ile düşük güç çıkışı ve düşük yakıt tüketimi elde edilmektedir. Bu nedenle, ikisinin karıştırıldığı giriş manifolduna hem havayı hem de yakıt akışını kontrol edebilmek önemlidir. Bu genellikle yakıt akışının anlık hava akışına bağlı olduğu bir karbüratör veya bir yakıt enjeksiyon sistemi kullanılarak yapılmaktadır.

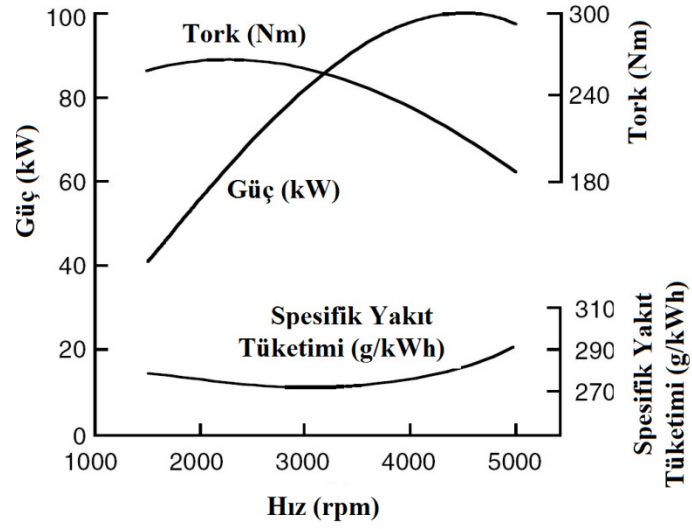
Daha sonra hava akışı veya yakıt-hava karışımının silindire akışı, konum açısı gaz pedalının konumuna bağlı olan bir gaz kelebeği ile kontrol edilmektedir.

Motor parametrelerinden biri, piston aşağı pozisyondayken silindir hacminin, piston yukarı pozisyondayken hacme oranı olan sıkıştırma oranıdır. Daha yüksek sıkıştırma oranı, kısmi yükte daha yüksek motor verimliliği sağlamaktadır. Bununla birlikte, hava/yakıt karışımının erken ateşleme riskini de arttırmaktadır. Bu olaya, ortaya çıkan metalik gürültü nedeniyle vuruntu denilmektedir. Bu vuruntu, güç kaybına neden olmakta, pistona ve silindire zarar verebilmektedir.

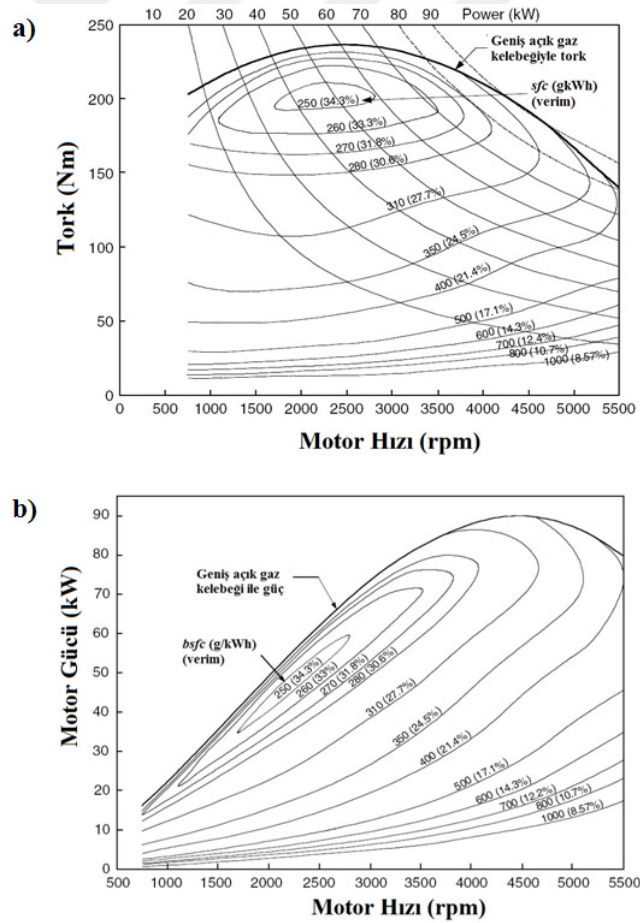
Motor tarafından üretilen tork, pistonun aşağıdan yukarıya doğru süpürme hacmi olarak tanımlanan motor boyutu veya yer değiştirme hacmi ile doğru orantılıdır. Güç, piston başının alanıyla ve ortalama piston hızıyla orantılıdır. Yani, motor boyutu ne kadar büyük olursa, üretilen tork ve güç de o kadar yüksek olmaktadır. Tork ve güç üretimini etkileyen diğer faktörler; hacimsel verimlilik olarak adlandırılan yakıt dönüşüm verimliliği, yanma sırasında yakıttan salınan ısı, giriş havasının yoğunluğu ve yakıt hava karışımıdır. Bu faktörlerin çoğu genellikle üreticinin veri sayfasında verilmeyip, ancak kullanıcı tarafından ölçülmeli veya tahmin edilmelidir.

Mekanik verimlilik, yani silindirde üretilen gücün krank milinde mevcut güce oranı gaz kelebeği konumuna, motor hızına ve tasarımına bağlı olmaktadır. Ana mekanik kayıplar, yatakların ve pistonun sürtünmesinden kaynaklanmaktadır. Motor testi ile bulunabilen bir başka parametre ise, genellikle g/kWh cinsinden ölçülen fren özgül yakıt tüketimidir. FÖYT, birim zaman, net krank mili güç çıkışı başına yakıtın kütle akışı olarak tanımlanır ve motorun iş üretmek için verilen yakıtı ne kadar verimli kullanabileceğinin bir ölçüsüdür. FÖYT ne kadar düşükse, bir İYM için yaklaşık 250-270 g/kWh civarındadır [130].

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da görülebileceği gibi, tipik bir İYM için FÖYT motor devri aralığı ve yüklemesi (gaz kelebeği konumu) önemli ölçüde değişir. Motor, motor devir aralığının yaklaşık ortasında, maksimum çıkış torkuna yakın ve maksimum çıkış gücünün yaklaşık yarısında, ancak tam yük işlemine yakın (geniş açık gaz kelebeği) optimum çalışma bölgesine sahiptir. Bu nedenle, yakıt açısından en verimli çalışma motorun optimum çalışma aralığına yakın olması istenir.



Şekil 4.8. Geniş açık gaz kelebeğinde bir İYM için tipik çıkış torku, güç ve FÖYT [130].



Şekil 4.9. Farklı yük koşullarında tipik bir İYM için özgül yakıt tüketimi ve verimliliği, a) Krank mili torku ile motor devri; b) Çıkış gücü ve motor devri [130].

HEA modelinde kullanılmak üzere halen piyasada bulunan Şekil 4.10'da verilen Honda GX35, "mini" dört zamanlı, bir silindire sahip benzinli motor seçilmiştir. Çizelge 4.1'de Honda GX35 ve GX25 motorunun özellikleri verilmiştir.



Şekil 4.10. Honda "GX35" motoru [131].

Çizelge 4.1. Honda "GX25 ve GX35" için üretim verileri.

Özellikler	GX25	GX35
Silindir Hacmi (cc)	25.0	35.8
Sıkıştırma Oranı	8:1	8:1
Maksimum Net Güç (kW)	0.72	1.0
Maksimum Net Güç (Nm)	1.0	1.6
Ağırlık (kg)	2.90	3.46

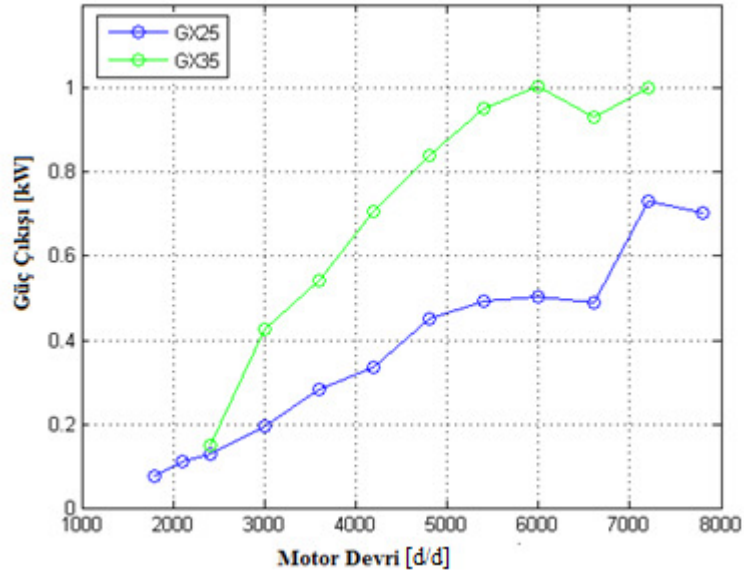
4.1.2. İYM Modifikasyonları

Tek silindirli düşük güçlü Honda GX35 motoru normalde karbüratörlüdür. Ancak verimini artırmak ve motor sistemlerini kontrol edebilmek için elektronik kontrollü sisteme dönüştürülmüştür. Dönüşüm İsveç Teknik Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Anabilim dalında yapılan bir çalışma ile gerçekleştirilmiştir. Sistem, motor performansını izlemek için lambda sensörü de dâhil olmak üzere dört farklı sensör kullanmaktadır. Harici ateşleme ve yakıt enjeksiyonu zamanlaması, bir yazılım aracılığıyla ayarlanmıştır. Lambda değeri 1'den biraz daha düşük bir değere ayarlanmış ve sıkıştırma oranı 11: 1'e yükseltilmiştir, bu şekilde motor testlerinden

daha yüksek bir verim sağlanmıştır. Bu çalışmada İYM için gerekli olan veriler bu deneysel çalışmalardan elde edilmiştir.

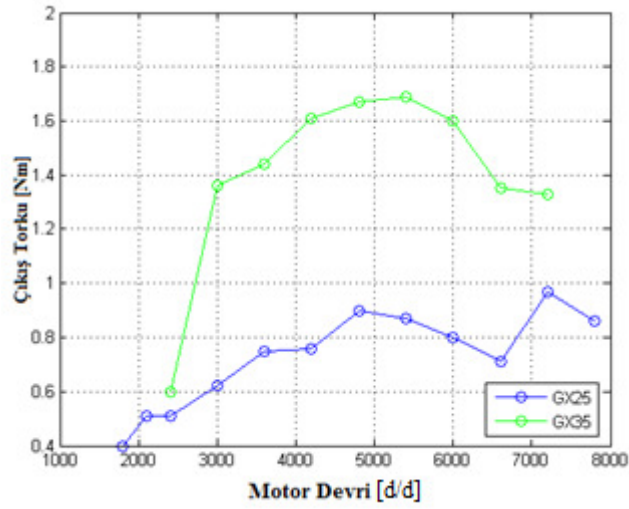
4.1.3. İYM Deneysel Performans Ölçümleri

İsveç Teknik Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Anabilim dalında yapılan geniş bir hız aralığında iki motorun (GX25 ve GX35) gücü ve tork üretimi ve spesifik yakıt tüketimi hakkında ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Testler geniş açık gaz kelebeği (%100) ile yapıldı. Ayrıca motorlar her hız değerinde sadece 10 saniye çalıştırılmış ve sabit bir hızı, yaklaşık 3000 d/d'nın altında tutmak zor olmuştur. Deneysel yapılan güç ve tork ölçümlerinin sonuçları Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de görülebilir. Ayrıca, motorun özgül yakıt tüketiminin ölçümleri Şekil 4.13'de sunulmaktadır. GX25 her hız seviyesinde bir kez çalıştırılmış, ancak GX35 3000-5400 d/d hızlarında çalıştırılmıştır. Böylece bu çift değerlerin aritmetik ortalama değeri şekillerde gösterilmektedir.



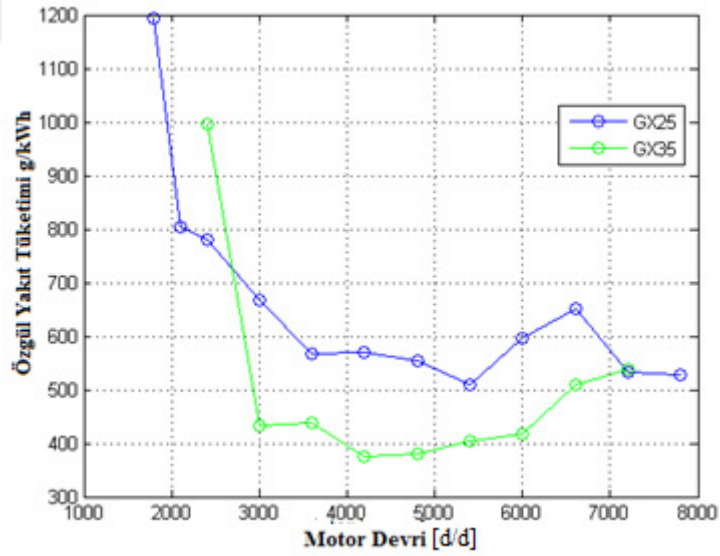
Şekil 4.11. Honda "GX35 ve GX25" motor karşılaştırma.

Ölçüm verilerine göre maksimum güç GX35 için yaklaşık 6000 d/d ve GX25 için 7200 d/d'da elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Honda "GX35 ve GX25" tork değerleri.

Şekil 4.12'ye bakıldığında maksimum tork değerlerinin, GX35 için 5400 d/d'da GX25 için 7200 d/d'da elde edildiği görülmektedir.

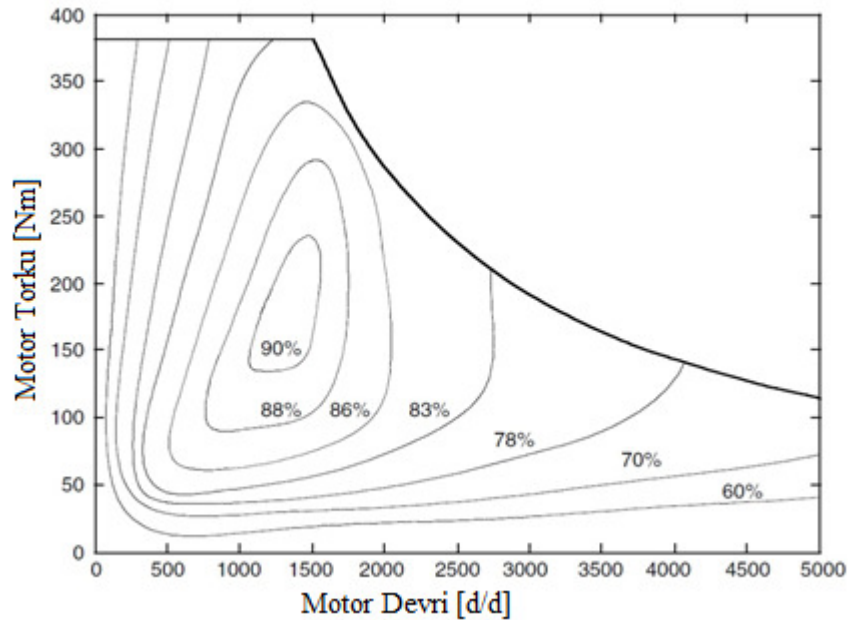


Şekil 4.13. Honda "GX35 ve GX25" motoru için özgül yakıt tüketimi [g/kWh].

Motorun özgül yakıt tüketiminin ölçümleri Şekil 4.13'te sunulmaktadır. Honda, hız fonksiyonu olarak motorun ÖYT'si hakkında bir üretim bilgisi bulunmamaktadır. Bununla birlikte, deneysel ölçümler GX35 için GX25'e kıyasla yaklaşık 3000 d/d ile 7000 d/d aralığında daha düşük bir ÖYT değeri göstermektedir. En düşük ÖYT'ye sahip hız aralığı GX35 için 4000–5000 d/d olurken GX25 için 5000–5700 d/d aralığında olmaktadır.

Tüm elektrik motorları, üretildikleri malzemelere (bakır ve demir) bağlı olarak aynı sınırlamalara sahiptir. İlk olarak, bir motorun olası çıkış gücü, sarımların izin verilen sıcaklık artışına ve kullanılıyorsa olası kalıcı mıknatıslara bağlıdır. Daha yüksek yalıtım seviyesi ve daha iyi soğutma sistemi daha yüksek akımlara izin verir.

İkinci olarak, kabaca aynı hacme sahip motorların hemen hemen aynı torku üretmesi beklenebilmektedir. Üçüncü olarak, birim hacim başına çıkış gücü hız ile doğru orantılıdır. Bu nedenle, yüksek hızlı bir motor kullanmak ve daha sonra mekanik olarak hızı azaltmak genellikle daha iyidir. Dördüncüsü, daha büyük motorlar küçük motorlardan daha verimlidir. Örneğin; çok küçük bir motorun verimi yaklaşık % 1 kadar düşük olabilirken, daha büyük motorların verimi %95'in üzerinde olabilir. Beşinci olarak, motorun verimliliği hızla artar. Başlıca elektrik motor tipleri; DA motor, endüksiyon motor ve sabit mıknatıslı senkron motordur. Son iki motor, daha yüksek verimlilik, daha yüksek güç yoğunluğu, daha düşük işletme maliyeti, daha yüksek güvenilirlik ve bakım gerektirmeyen çalışma ile sonuçlanan komütatörsüz motorlardır. Bir elektrik motorunun verimliliği, motorun tork hızı düzleminde hangi noktada çalıştığına bağlı olarak değişmektedir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Genel elektrik motorunun verimlilik özellikleri [128–130].

Elektrik motorlarının hepsinin rejeneratif çalışma olasılığı vardır. Daha sonra motorlar, aracın kinetik veya potansiyel enerjisini tampon sisteminde depolanabilen

ve yeniden kullanılabilen elektrik enerjisine dönüştürmek için jeneratör olarak çalışacak şekilde kontrol edilir. Genellikle elektrik motoru gerekli frenleme torkunu karşılayacak kadar tork üretemez, dolayısıyla mekanik sürtünmeli frenleme elektriksel olarak rejeneratif frenleme ile bir arada olmalıdır.

1980'lere kadar hız veya tork kontrolünün fırçalı DA motorlar ile sağlanırken, günümüzde inverter beslemeli endüksiyon makinelerine bir geçiş gerçekleşti. DA makineleri birkaç Watt'tan birkaç Megawatt çıkış gücüne kadar değişir. Şekil 4.15'de iki kutuplu bir alan sarılı DA makinesini göstermektedir.

Rotordaki eksenel akım taşıyan iletkenler, stator tarafından üretilen radyal manyetik akı ile etkileştiğinde tork oluşur. Bununla birlikte, manyetik akı mekanik çıkış gücüne katkıda bulunmaz, sadece enerji dönüşümünü mümkün kılar.

Nm cinsinden geliştirilen toplam tork,

$$T = k_t I, \quad (4.1)$$

Burada, k_t (Nm / A) motor tork sabiti ve I (A) armatür akımıdır.

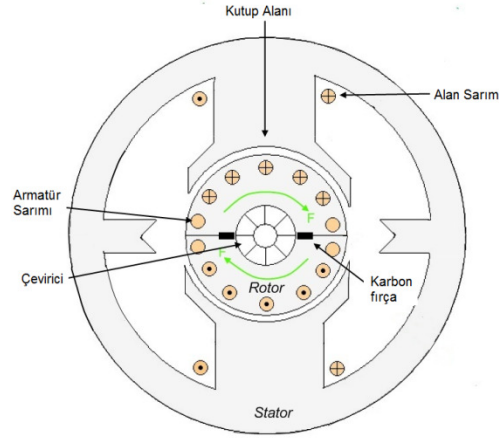
Rotor döndüğünde, armatür sargısı radyal manyetik akıyı keserek iletkenlerde Elektro Manyetik Alan (EMA)'nın indüklenmesi neden olmaktadır. Fırçalarda geliştirilen V'de EMA;

$$E = k_e \omega, \quad (4.2)$$

Burada, k_e (Vs / rad) EMA sabiti ve ω (rad / s) açısal hızdır.

k_t ve k_e esasen aynı sayıdır, aralarındaki fark sadece hangi birime kullanıldığını göstermektedir.

Stator, manyetik akıyı üretmek için sabit mıknatıslardan veya DA sargılarından oluşmaktadır (Şekil 4.16). Sabit mıknatıslı makineler genellikle birkaç watt ile birkaç kilowatt arasında değişen daha küçük motorlar için kullanılabilirken, alan sargılarına sahip makineler yaklaşık 100 W ile megawatt çıkış seviyelerine kadar değişebilmektedir.



Şekil 4.16. Fırçalı DA motor.

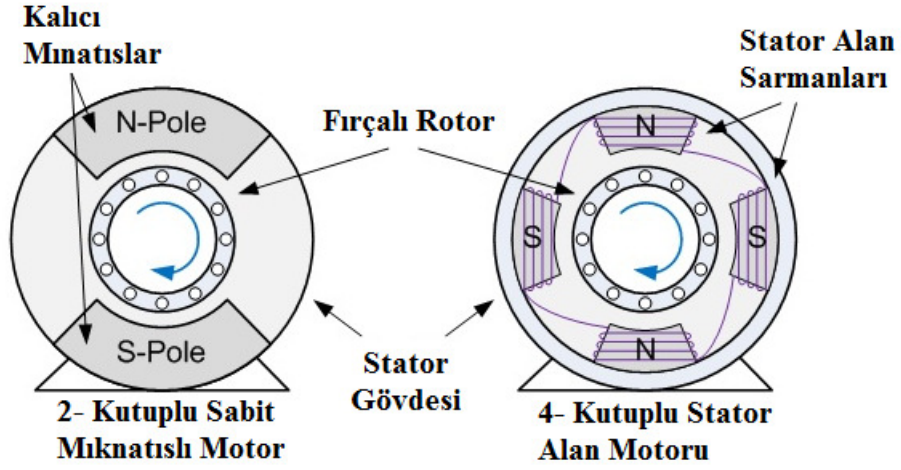
Rotor döndüğünde, armatür sargısı radyal manyetik akıyı keserek iletkenlerde Elektro Manyetik Alanın (EMA) indüklenmesi neden olmaktadır. Fırçalarda geliştirilen V'de oluşan EMF;

$$E = k_e w, \quad (4.3)$$

Burada, k_e (Vs /rad) EMA sabiti w (rad/s) açısal hızdır.

k_t ve k_e esasen aynı sayıdır, aralarındaki fark sadece hangi birime kullanıldığına karar vermektir.

Stator, manyetik akıyı üretmek için sabit mıknatıslardan veya DA sargılarından oluşmaktadır (4.17). Sabit mıknatıslı makineler genellikle birkaç Watt ile birkaç kilowatt arasında değişen daha küçük motorlar için kullanılabilirken, alan sargılarına sahip makineler yaklaşık 100 W ila megawatt çıkış seviyelerine kadar değişebilmektedir.

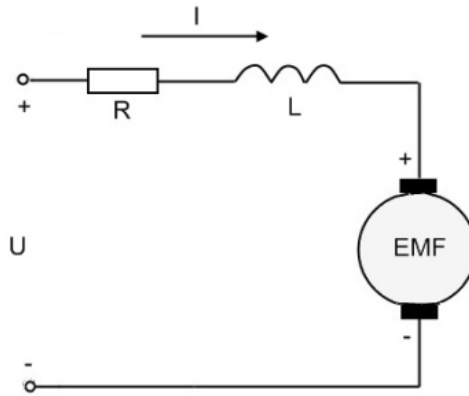


4.17. Kalıcı mıknatıs DA motor ve alan DA motor sarmalı [132].

DA motorun eşdeğer devresi Şekil 4.17'de görülebilir ve aşağıdaki denklemle açıklanabilmektedir.

$$U = E + IR + L \frac{di}{dt} \quad (4.4)$$

Denklemde, U (V) armatür voltajı, I (A) armatür sargısı boyunca akım, R (Ω) armatür direnci ve L (H) armatür indüktansını ifade etmektedir.

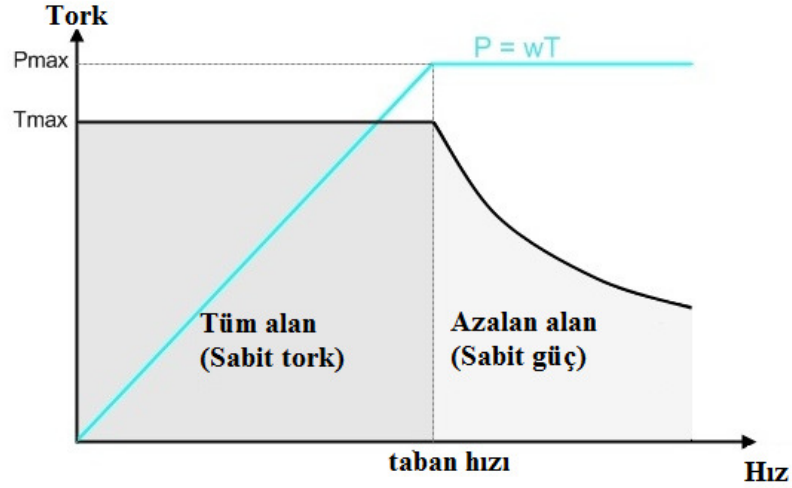


Şekil 4.18. DA motor için eşdeğer devre [133].

Şekil 4.18 bir DA motorun kararlı durum özelliklerini göstermektedir. Tam saha alanında motor, taban hızına kadar herhangi bir hızda tam nominal torkunu üretebilir.

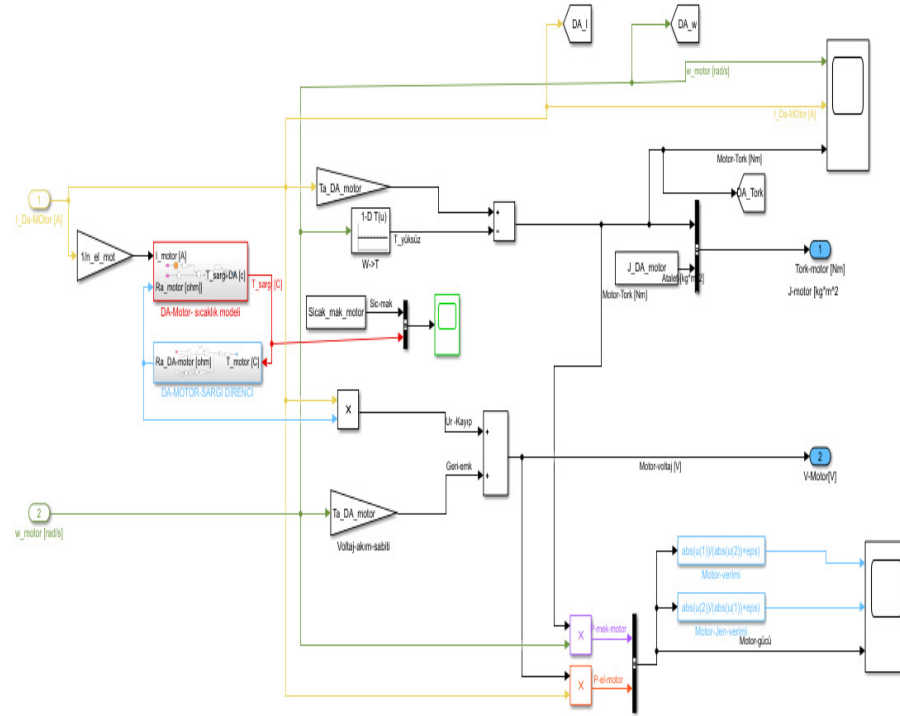
Motoru taban hızının üzerinde bir hızda çalıştırmak için, alan zayıflaması adı verilen akı azaltılmalıdır. Şekil 4.18'de görülebileceği gibi, alan zayıflaması sadece yüksek

hızlarda tam tork istenmediğinde uygulanabilir. Alan zayıflama aralığı farklı motorlar arasında çok değişir, ancak maksimum hız nadiren taban hızın üç veya dört katını aşar.



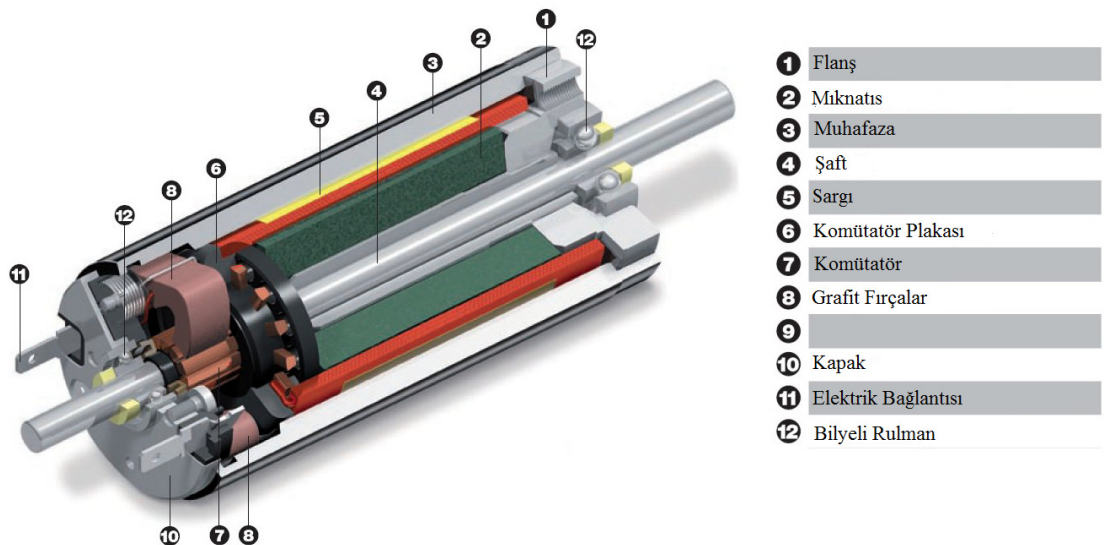
Şekil 4.19. DA motorun kararlı durum özellikleri.

DA makinesi dört çeyrekte de çalışabilir, (Şekil 4.19). Bir numaralı ve üç numaralı çeyreklerde DA makinesi motor olarak çalışır, ancak ilk çeyrekte makine ileri yönde, üçüncü çeyrekte ise ters yönde çalışır. İkinci ve dördüncü çeyreklerde DA makinesi jeneratör olarak çalışmaktadır. HEA modelinde kullanılan elektrik motoru modeli Şekil 4.20’da verilmiştir.



Şekil 4.20. Elektrik motoru modeli.

Araç topolojisi için, Şekil 4.21'da verilen Sabit mıknatıslı ve fırçalı bir Maxon RE65, 250 W, bir DA motor, hem jeneratör hem de tahrik motoru kullanılmıştır. Ayrıca üreticinin veri sayfasında verilen bazı operasyonel parametreler Çizelge 4.2'te sunulmaktadır.



Şekil 4.21. DA motor yapısı [134].

Çizelge 4.2. DA motor özellikleri [134].

Nominal Voltaj Değerleri	
Nominal Voltaj	36.0 V
Yüksüz Akım	0.407 A
Nominal Hız	3550 d/d
Nominal Tork	0.654 Nm
Nominal Akım	7.74 A
Maksimum Verim	87.3 %
Karakteristikler	
İç Direnç	0.173 Ω
İç Endüktans	0.848 mH
Tork Sabiti	89.1 mNm/A
Hız Sabiti	107 d/d/V
Rotor Ataleti	1380 gcm ²
Isıl direnç-ortam	1.3 K/W
Isıl direnç-sargılar	1.85 K/W
Termal zaman sabiti, sargı.	127 s
Termal zaman sabiti, motor.	991 s
İzin verilen maksimum sargı sıcaklığı	125 °C
İzin verilen maksimum hız	4000 d/d
Motor ağırlığı	2.480 kg

Yüksüz akım, yüksüz durumdayken motorun nominal voltajda çektiği akımdır. Fırçalarda ve yataklarda sürtünmeye karşı çıkan ve hızla artan torku üretmek için gerekli akımı temsil eder. Sargı sıcaklığını kabul edilebilir sınırlar içinde tutmak için nominal tork ve akım da izin verilen maksimum sürekli değerlerdir. Maksimum verim değeri mutlaka motorun en iyi çalışma noktasını değil, sadece nominal gerilimdeki en yüksek verimliliğini temsil etmektedir.

Maksimum sargı sıcaklığı geçici olarak bile aşılmamalıdır. İzin verilen motor akımını ve dolayısıyla geçici motor aşırı yük miktarını sınırlayan sargı sıcaklığıdır. Termal ve mekanik hususlar için belirtilen maksimum hız verilmiştir. Daha yüksek hız mümkündür, ancak motorun kullanım ömrü üzerinde olumsuz bir etkisi olacaktır. Üretici tarafından, 5000 d/d'lık bir hızın aşılmaması önerilmektedir. Aşırı hız

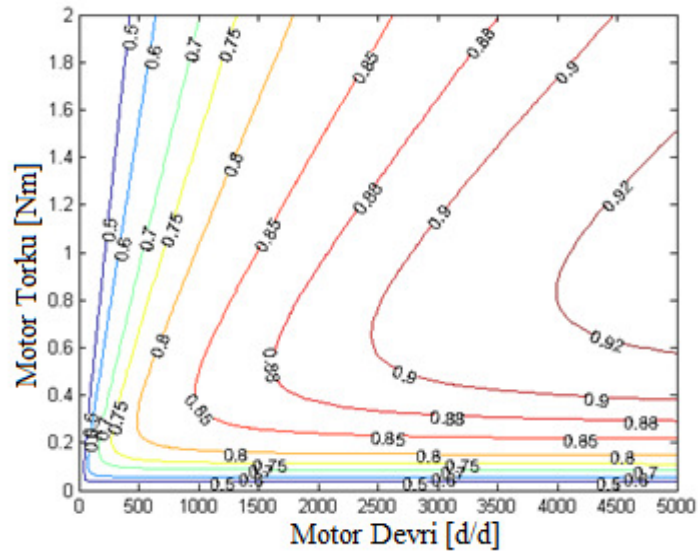
fırçalara ve sargılara hasar verecektir. Son olarak daimi mıknatısın mukavemeti, %75 sıcaklığa ulaşıldığında % 1–10 arasında zarar görmektedir.

Çizelge 4.2'de verilen bilgilere dayanarak, motor kayıpları tahmin edilebilir ve bir verimlilik haritası oluşturulabilir, Şekil 4.20'te sabit motor voltajı için, kayıplar dikkate alındığında iç direnç kaynaklı güç kaybı veya bakır sargı kayıpları, P_{Cu} ve yük kaybı yok ise, P_{no} aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{cu} = R_{cu} I^2 = R_{cu} \left(\frac{T}{k_T} \right)^2 \quad (4.5)$$

$$P_{yüksüz} = w T_{yüksüz} = w k_t I_{yüksüz} \quad (4.6)$$

Burada, R_{Cu} iç direnci, I motor akımı, T üretilen tork, k_T tork sabiti, w açısal motor hızı, $T_{yüksüz}$ yüksüz torku ve $I_{yüksüz}$ yüksüz akımı vermektedir. Görülebileceği gibi, verim nominal çalışma noktasında (3550 rpm, 0.654 Nm) en yüksek değer değildir, ancak motor hızı ile artmaktadır. Sürtünme kayıpları düşük torklarda nispeten büyüktür, bu nedenle verimlilik daha düşüktür. Dolayısıyla, optimal çalışma noktası 4000 d/d'nın üzerinde bir hız ve 0,6 Nm nominal torkun yaklaşık iki katı arasında bir tork değerinde oluşmaktadır. Modelde kurulan elektrik motorunun verim eğrisi Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22. EM verim grafiği.

4.1.5. DA/DA Dönüştürücü

Elektrikli tampon ve elektrikli makine arasında bir güç elektronik dönüştürücü, hibrit elektrikli ve elektrikli araçlarda düzenli olarak kullanılır. Bu şekilde, elektrik makineleri hâli hazırda uygun voltaj büyüklüğüyle beslenebilir ve DA gerilimleri, örneğin üç fazlı AC makinelerinin kullanıldığı durumlar için PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) kullanılarak AC voltajlarına dönüştürülebilmektedir.

Maxon marka dönüştürücü, Şekil 4.23'te görüldüğü gibi 4-Q-DA Servoamplifier, ADS 50/10 model olup, yaklaşık 80–500 W çıkış güçlerini işlemek için uygun bir PWM kontrollü dönüştürücüdür. Dönüştürücü, hem negatif hem de pozitif voltaj ve akımları yönetebilir. Negatif voltajla motor ters yönde çalıştırılabilir. Böylece Süper kapasitörden motora ve motordan, rejeneratif frenleme ile süper kapasitöre akım yönelimi sağlayabilmektedir.



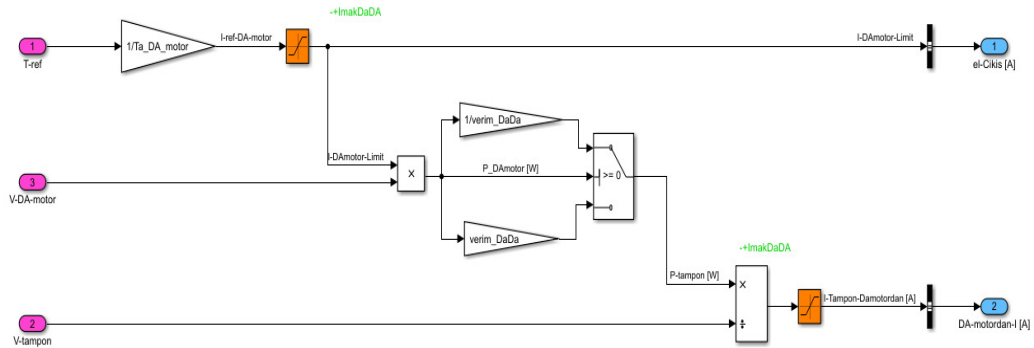
Şekil 4.23. DA/DA elektirk motoru akım dönüştürücü.

Dönüştürücü üretim verileri ile ilgili bazı özellikler Çizelge 4.3'te verilmiştir. Dönüştürücü aşırı akım ve aşırı sıcaklık için bir korumaya sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda uyarı ışığı yanar ve dönüştürücü belirli bir kritik değerin üzerindeki sıcaklıklarda kapatılır.

Çizelge 4.3. DA/DA dönüştürücü Özellikleri [134].

Çalışma Voltajı	12-50 V
Maksimum Çıkış Voltajı	45 V
Maksimum Çıkış Akımı	20 A
Sabit Çıkış Akımı	10 A
Maksimum Verim	% 95
Ağırlık	0.4 kg

Maxwell süper kapasitörünün voltaj kontrollü direnç yükü üzerinden boşaltılması sırasında Maxwell DA/DA dönüştürücü test işlemi gerçekleştirilmiştir. Kondansatör girişinde güç 448.2 W ve giriş gerilimi 48V'dur. Çıkış tarafında, dönüştürücü tarafından maksimum karşılanabilir akım 16.6A, yani üretici tarafından teknik veride verilmiş olan 20 A akıma ulaşılammıştır. Yaklaşık 25 °C 'lik bir laboratuvar odası sıcaklığında, dönüştürücü, test süresince aşırı sıcaklık veya akım göstermeden bu test işlemi dört buçuk dakikadan fazla sürdürülebilmştir. Test sırasında, dönüştürücü kasası sıcaklığı yaklaşık 12 °C artmıştır. Yapılan diğer ölçümler, dönüştürücü verimliliğinin çalışma sırasında% 82-92 arasında değiştiğini göstermektedir. Bu modelde süper kapasitörden elde edilen akımı DA motor için uygun limit değerlerine eşitleyerek yönlendirmektedir. Şekil 4.24'de DA/DA dönüştürücü modeli görülmektedir.



Şekil 4.24. DA-DA dönüştürü modeli.

4.1.6. Maxwell Süper Kapasitör

HEA'larda, bir elektrik enerjisi depolaması, frenleme sırasında geçici enerjinin fazlalığını absorbe etmek ve otomotiv sürüşünün karakteristiği olan hızlanma sırasında ihtiyaç duyulan anlık ekstra enerjiyi sağlamak için tampon olarak kullanılabilir. Bunun dışında, İYM kapatıldığında ve elektrikli makine çekici bir motor olarak kullanıldığında, depolama cihazı alternatif bir enerji kaynağı olarak da kullanılabilir. Bu, HEV elektrikli enerji depolama cihazının yüksek bir enerji kapasitesine ve belki de daha da önemlisi yüksek bir tepe güç kapasitesine sahip olması istendiği anlamına gelmektedir.

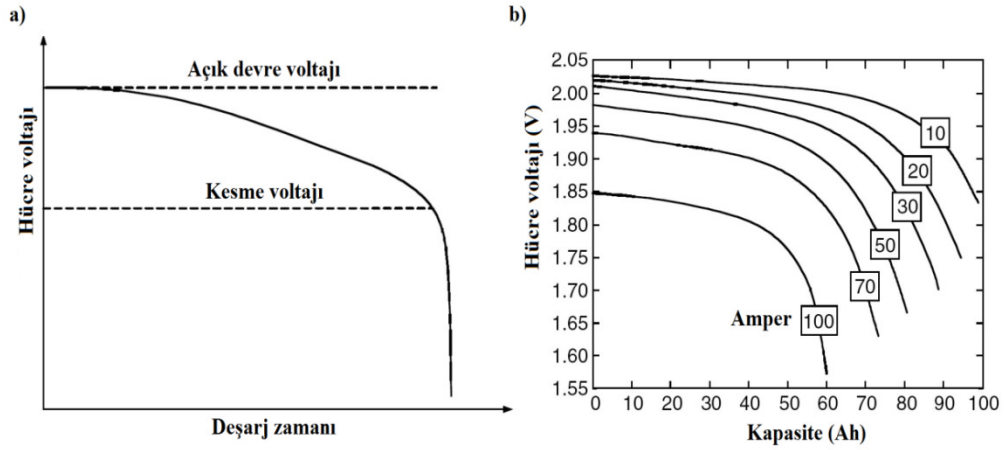
EV'lerde ise elektrik enerjisi depolaması tek enerji kaynağıdır. Daha sonra, her bir şarj için daha uzun hareket mesafelerine ulaşmak için yüksek enerji yoğunluğuna sahip olma özelliği daha da önemli hale gelmektedir.

Geleneksel olarak HEV'ler ve EV'lerdeki elektrik enerjisi depolama cihazı bataryalardır.

Bununla birlikte, son zamanlarda, nispeten yüksek güç yoğunluklarından dolayı, bataryayı tamamlayıcı olarak kullanılan süperkapasitörler veya ultrakapasitörler popüler hale gelmiştir.

Bataryalar incelendiğinde, elektrik enerjisini bir pil hücresindeki potansiyel kimyasal enerji olarak veya bir pil takımı oluşturmak için birlikte istiflenmiş birçok hücre olarak depolar. Her hücre, aralarında bir elektrolit çözeltisi bulunan bir elektrikli olarak pozitif (katot) ve bir negatif (anot) olmak üzere iki metal plakadan (elektrotlar) oluşur. Her bir şarj ve deşarj, iki enerji formu arasında bir dönüşümdür ve plakalar ile elektrolit arasındaki kimyasal reaksiyonlar tarafından kullanılmaktadır. Bir bataryada depolanan şarj miktarı Amper-saat (Ah) olarak ifade edilir ve ayrıca pilin kapasitesi olarak da adlandırılmaktadır. Üreticilerin veri sayfalarında, kapasite genellikle C/20 deşarj akımı oranıdır. Yani, yinelemeli bir işlem sırasında, akünün 20 saat sonra tamamen deşarj olması için sabit akım büyüklüğü verilmiştir.

Akü deşarj olduğunda terminal voltajı kesme voltajına düşer. Kesme geriliminin altında hücre gerilimi önemli ölçüde düşer ve bundan kaçınılmalıdır (Şekil 4.25. (a)). Daha yüksek akımların bataryası, daha kısa sürede doğal olarak boşalacaktır. Bununla birlikte, hücre voltajını kesme voltajına daha kısa zamanda da ulaşabilmekte ve böylece elde edilen kapasite daha küçük akımlardan daha azdır (Şekil 4.25 (b)).



Şekil 4.25. Batarya hücre voltajı, (a) Tipik bir batarya için sabit akım deşarjı; (b) Tipik bir kurşun-asit akü için farklı seviyelerde deşarj akımları.

Bataryanın kalan şarj miktarı yani şarj durumu, SOC olarak ifade edilir. Tam şarjlı bataryanın başlangıç kapasitesine göre kalan şarj miktarı, yani %0 ila 1 veya %0 ila 100 arasında bir değerdir. Bir pilin anlık SOC'si şu şekilde tahmin edilebilmektedir:

$$SOC_{(t)} = SOC_{init} - \frac{\int_0^t i(t) dt}{Q_{tot}} \quad (4.7)$$

Burada;

SOC_{init} : SOC'nin başlangıç değeri,

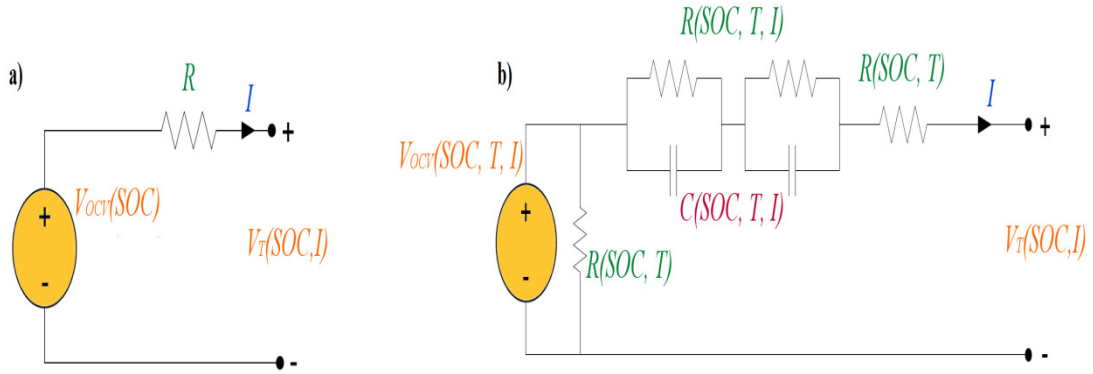
$i(t)$: anlık batarya akımı,

Q_{tot} : batarya kapasitesini ifade etmektedir.

Ayrıca, deşarj derinliği, DOD adlı bir parametre de vardır, bu da kapasiteye göre verilen yük miktarı olup, 0 ile 1 arasında bir değerdir.

Her batarya hücresinde gerçekleşen şarj ayrımı, bir hücre voltajına veya Açık Devre Voltajı OCV'ye neden olmaktadır. Terminal uçları bir elektrik devresinde kapatılır kapatılmaz, hücrede kimyasal reaksiyonlar meydana gelmeye başlar ve bu da bir akımın akışına neden olmaktadır. Bununla birlikte, elektrolit içindeki yük taşınması ve plakaların yüzeyindeki kimyasal reaksiyonlar ve plakalardaki akım nedeniyle, akünün iç direnci, akıma bir direnç gösterir. Bu nedenle akü terminalleri üzerindeki voltaj, dâhili direnç üzerindeki voltaj düşüşünden etkilenmektedir. Bu terminal voltajının yük akımına da bağlı olduğu anlamına gelmektedir.

Bir pilin basit bir devre modeli, OCV'nin SOC'ye bağlı olduğu ve direncin sabit olduğu Şekil 4.25 (a) 'da gösterilmiştir. Bununla birlikte, bu basit modele dâhil olmayan, plakalardaki yük birikimi gibi direnç, SOC ve sıcaklığa kapasitif katkılar sağlayan bir dizi faktör bulunmaktadır; OCV'ye karşı şönt direnci olarak modellenebilen tüm parametrelerin (OCV, R ve C) bağımlılığı ve son olarak bataryanın kendi kendine deşarj olmasıdır. Şekil 4.26 (b) 'de daha karmaşık bir batarya modeli verilmektedir.



Şekil 4.26. Akü devre modeli, a) basit; b) karışık.

Bir kapasitör, arasında elektrik enerjisi depolayabilen bir izolasyon ortamına sahip iki elektrottan oluşan pasif bir bileşendir. Elektrotlar potansiyel bir farka maruz kaldıkça, sırasıyla pozitif ve negatif elektrotlar üzerinde pozitif ve negatif yük biriktirmekte ve izolasyon ortamı bir elektrik alanını korumaktadır. Bir kapasitörün depolayabileceği enerji miktarı (J), kapasitansı C (F) ve üzerindeki potansiyel farkın U (V) karesi ile doğru orantılıdır.

$$W_e = \frac{CU^2}{2} \quad (4.8)$$

Kapasitörün, kapasitansı, sırayla elektrotların geometrisine ve yalıtkan malzemenin geçirgenliğine, ϵ (F/m) bağlı fiziksel bir özelliktir. Paralel plaka kapasitör için, kapasitans ideal olarak şu şekilde bulunur:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (4.9)$$

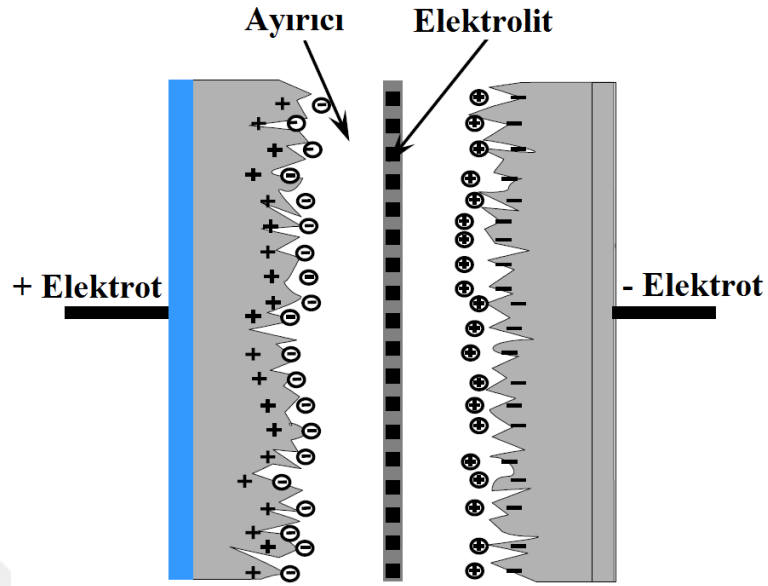
Burada A (m^2) elektrotların yüzey alanıdır ve d (m) elektrotlar arasındaki ayırma mesafesi veya pozitif ve negatif yüküdür.

Bu nedenle, kapasitörde depolanabilecek enerji miktarını arttırmak için manipüle edilecek dört faktör vardır; cihaz üzerinde büyük potansiyel farkı, elektrotların maksimum yüzey alanı, minimum ayırma mesafesi ve uygun bir yüksek geçirgenlik izolatörü kullanımı olmaktadır.

Süper kapasitörün yapısı incelendiğinde, kullanılan izolatör malzemesinin türüne bağlı olarak, üç ana kapasitör kategorisi vardır; elektrostatik, elektrolitik ve Elektrokimyasal Çift Katmanlı Kondansatörler.

EDLC, “süperkapasitör” veya “ultrakapasitör” en büyük kapasitans değerine sahiptir. Ayrıca, hücre seviyesinde, elektrolitik kapasitanstan bin kat daha büyük olup, genellikle pF ila μF aralığında olan elektrostatik tiplerden daha büyük birkaç kF civarında yapılarıdır.

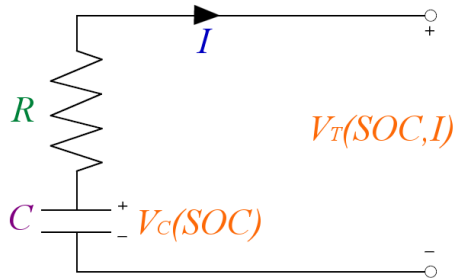
Çok geniş bir yüzey alanı ($2000m^2=g'e$ kadar) ve karbon çiftinin boyutunu veren ve kullanan elektrolit iyonları genellikle elektrot olarak kullanılan aktif karbonun gözenekliliğinden kaynaklanan ekstra yüksek kapasitans, yük ayırma mesafesini neredeyse $10 \text{ \AA}$ kadar kısa hale getirmektedir (Şekil 4.27). Negatif elektrolit iyonları, pozitif elektroda ve pozitif iyonlar, negatif elektroda çekilir, böylece yük ayrımı, bataryaların aksine herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadan gerçekleştirilir.



Şekil 4.27. Tipik bir elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörün veya süper kapasitörün başlıca tanımlanması. Ayrıcı, iyon geçirgendir.

Süper kapasitörün devre modeli, Süperkapasitörün basit bir devre modeli Şekil 4.28'de verilmiş olup, burada C kapasitans, V_C kapasitans üzerindeki voltaj, R iç direnç, I yük akımı ve V_T terminal voltajıdır. İç direnç çoğunlukla temas direncine, elektrot direncine ve elektrolit içindeki yüklerin hareketliliğine bağlıdır. V_C doğrusal olarak kapasitansın şarj durumuna bağlıdır. Ayrıca, kapasitörde akülerle karşılaştırıldığında oldukça yüksek kendi kendine deşarj durumu vardır. Bu direnç, C 'ye paralel bir direnç olarak modellenebilmektedir.

Süper kapasitör sıcaklıktan oldukça bağımsızdır, yani kapasitans tüm sıcaklık çalışma aralığında oldukça sabittir. Bununla birlikte, elektrolit hareketliliği azaldığından direnç azalan sıcaklıkla artmaktadır.



Şekil 4.28. Tipik bir süper kapasitörün basit devre modeli.

Süper kapasitör özellikleri, Elektrolitin dielektrik dayanımı ile sınırlı, hücre başına maksimum voltaj sadece yaklaşık 2-3 V'dir. Daha yüksek voltaj seviyelerine ulaşmak için bir dizi hücre seri olarak bağlanmalıdır.

Şarj ve deşarj yaklaşık 10 saniye içinde hızlıdır, çünkü kimyasal reaksiyonlar olmadığından sadece elektrotlardaki ısı gelişimi ile sınırlıdır. Aynı nedenden ötürü, şarj ve deşarj verimliliği aynı ve oldukça yüksektir, en az %90'dır. Kabul edilebilir hücre voltajı maksimumdan 0 V'a kadardır. Ara sıra aşırı voltaj yükselmeleri hücreye zarar vermez, ancak cihazın yaşlanmasına neden olmaktadır. Aşırı sıcaklık ile birlikte, aşırı voltaj kapasitansta bir azalmaya ve iç direncinde daha da büyük bir artışa neden olacaktır.

Bir süperkapasitör, bir bataryadan çok daha yüksek olan yüz bin devirlik bir yaşam döngüsüne sahiptir [135].

Aküye göre ana avantajı, 20 kWh/kg'a kadar çıkabilen süper kapasitörlerin yüksek özgül gücüdür. Fakat özgül enerji bir bataryadan çok daha düşüktür ve sadece yaklaşık 5 Wh/ kg'dır.

Lityum iyon süper kapasitöründe, pozitif elektrot, tıpkı EDLC gibi aktif karbondan yapılır. Negatif elektrot, bir lityum önceden katkılı karbon malzemeden yapılmaktadır (Şekil 4.29). Bu, yaklaşık 3,8 V hücre voltajlarını mümkün kılmaktadır.

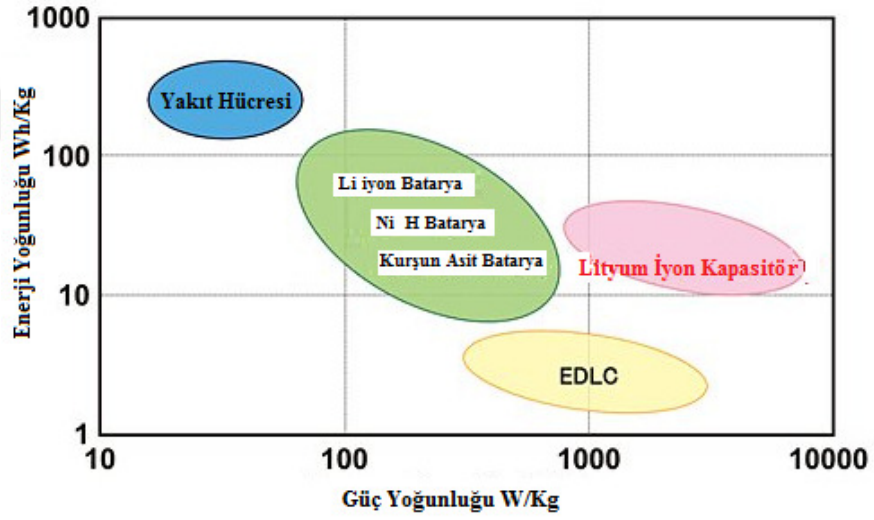
Başka bir sonuç, negatif elektrodun kapasitansının, pozitif elektrotunkinden çok daha yüksek olması olup, bu da hücre kapasitansı başına EDLC'den daha yüksek sonuç vermektedir. Hem daha yüksek bir voltaj hem de daha yüksek bir kapasitans, Li-ion kapasitör için EDLC'ye kıyasla daha yüksek bir enerji yoğunluğu ile sonuçlanmaktadır. Bununla birlikte, güç yoğunluğu az çok benzerdir. Farklı elektrik tamponları için enerji ve güç yoğunluklarının karşılaştırılması Şekil 4.30'da sunulmaktadır.

Kondansatör yapısı polariteye duyarlıdır ve hem izin verilen hem de minimum izin verilen voltaj seviyesine sahiptir. Bu sınırların aşılması basınç artışına, ısınmaya, sızıntıya veya en kötü durumda patlamaya neden olabilir. Bu teknoloji sadece birkaç

üretici tarafından hala çok yeni ve geliştirme aşamasındadır. Bu nedenle, bu teknoloji hakkında genel bilgi çok azdır.



Şekil 4.29. Li-iyon kapasitörlerin yapısı.



Şekil 4.30. Farklı elektrik enerjisi depolama teknolojileri için enerji ve güç yoğunlukları.

Ticari bir süper kapasitör olan Maxwell, 48.6 V çalışma voltajına sahiptir olan ve Şekil 4.31'da görülmektedir. Maksimum güç yoğunluğu 6.4 kW/kg, maksimum enerji yoğunluğu 3.40 Wh/kg ve kütlesi 13.5 kg'dır [21]. Çalışma sıcaklığı aralığı 40 ila 65 °C arasındadır.



Şekil 4.31. Maxwell süper kapasitör.

Ölçülen ve üretici verileri aşağıda Çizelge 4.4'te verilmiştir. Ölçülen değerler simülasyonda kullanılmıştır.

Çizelge 4.4. Maxwell süper kapasitör özellikleri

	Üretici Verisi	Ölçülen Değerler
C (F)	140	154.4
R (mΩ)	8.0	14.3

4.1.6.1. Lityum İyon Süper Kapasitör

Çizelge 4.5'da özellikleri verilen kapasitör yığını yapısı modelleme de düşünülmüştür. JM Energy Corporation tarafından üretilen, seri bağlantılı 13 Standart 2200 F Lityum iyon kapasitör hücresinden oluşturulması planlanmıştır. Her bir hücrenin maksimum voltajı 3.8 V'dur [136], bu da tüm kapasitör yığını için maksimum 49.4 V voltaj sağlar. Şarj ve deşarj sırasında her hücre için izin verilen maksimum akım 250 A ve çalışma sıcaklığı aralığı 20 ila 70 °C arasındadır [134].

Çizelge 4.5. Lityum iyon süper kapasitör özellikleri.

	Üretici Verisi	Ölçülen Değerler
C (F)	169.2	169.0
R (mΩ)	18.2	39.2
m (kg)	-	4.68

Süperkapasitörün olası maksimum enerjisini hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

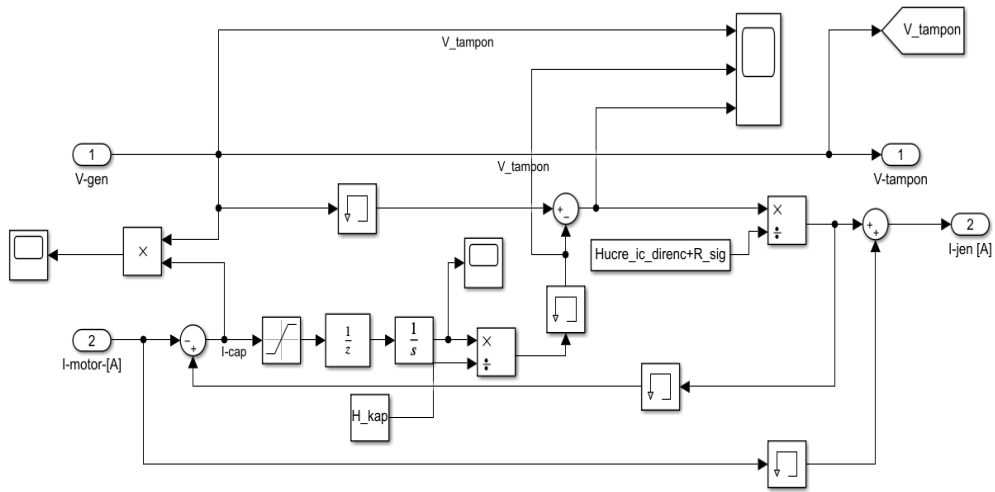
$$W_{max} = \frac{CU_{max}^2}{2} \quad (4.10)$$

Burada Wmax (Ws) maksimum enerji, C (F) süper kapasitör kapasitansı ve Umax (V) süper kapasitörün sahip olabileceği maksimum voltajdır. Daha sonra maksimum enerji yoğunluğu şu şekilde hesaplanmıştır;

$$169.2 * 49.4^2 / 2 * 4.68 * 3600 \approx \frac{12.3Wh}{kg} \quad (4.11)$$

$$P_{max} = \frac{U_{max}^2}{4.R.m} = \frac{49.4^2}{4 * 18.2 * 10^{-3} * 4.68} \approx 7.2 kW/kg \quad (4.12)$$

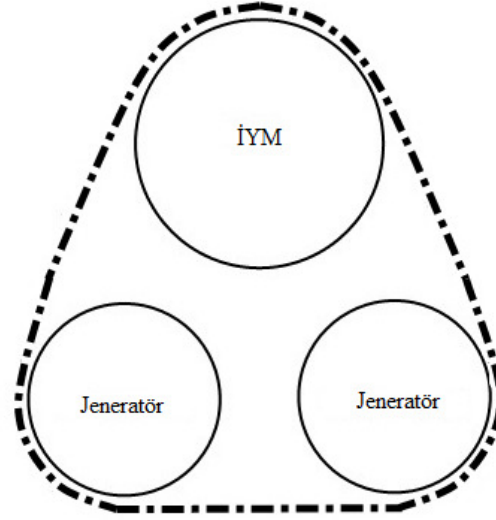
Burada Pmax (W) maksimum güç, Umax (V) maksimum voltaj, R (Ω) 1 kHz'de eşdeğer seri dirençtir ve m (kg) süper kapasitör kütlesidir. Sonuç olarak, Li-ion kapasitör, ticari süper kapasitörle (Maxwell) karşılaştırıldığında biraz daha yüksek güç ve oldukça yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Şekil 4.32'deki süper kapasitör modeli incelendiğinde, jeneratör tarafından sağlanan enerji ile şarj olmakta ve oluşturduğu akım ile elektrik motorunu çalıştırmaktadır.



Şekil 4.32. Süper kapasitör modeli.

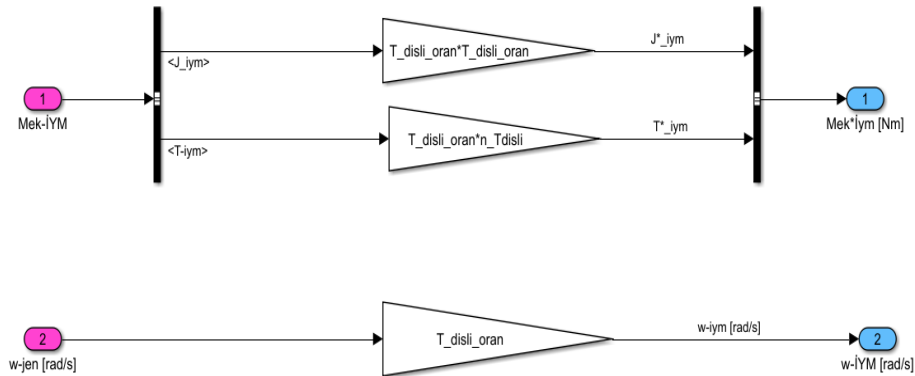
4.1.7. Transmisyon Sistemi

Taşıtta biri İYM ile jeneratörler ve diğeri elektrikli motorlar ile tekerlekler arasında olmak üzere iki iletim sistemi kullanılmıştır. Şekil 4.33'de İYM ve jeneratörler arasındaki dişli konstrüksiyonu görülmektedir.



Şekil 4.33. İYM ile jeneratör arasındaki dişli sistemi.

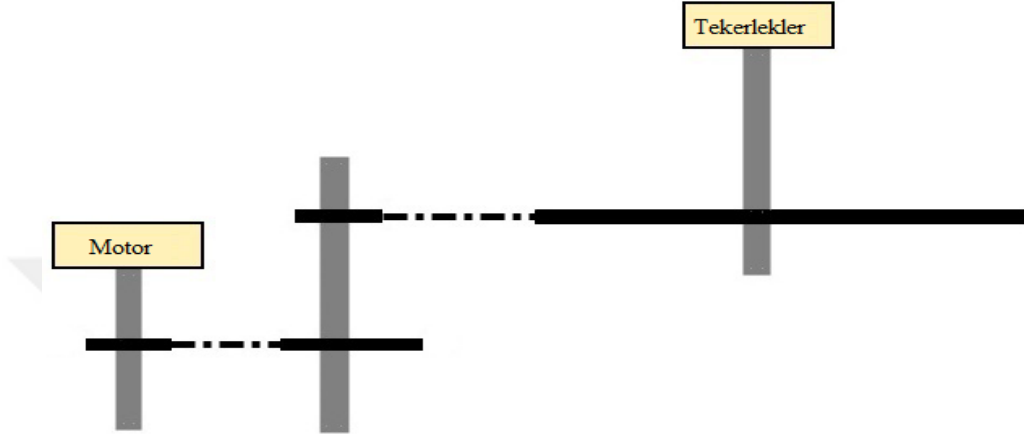
İYM'den jeneratörlere dişli oranı 0.8'dir ve verimin % 90 olduğu varsayılmaktadır. Şekil 4.34'de görüldüğü gibi İYM tarafından üretilen tork ve hız belli dişli oranları ile jeneratöre aktarılmaktadır.



Şekil 4.34. İYM ile jeneratör arası dişli sistemi.

4.1.7.1. DA Motor ile Tekerlekler Arası Transmisyon Sistemi

Motorlar ile tekerlekler arasındaki dişlinin yapısı, aynı zamanda zincir dişlileri ve makaralı zincirlerden oluşmaktadır. Bu yapı Şekil 4.35'de gösterilmektedir.

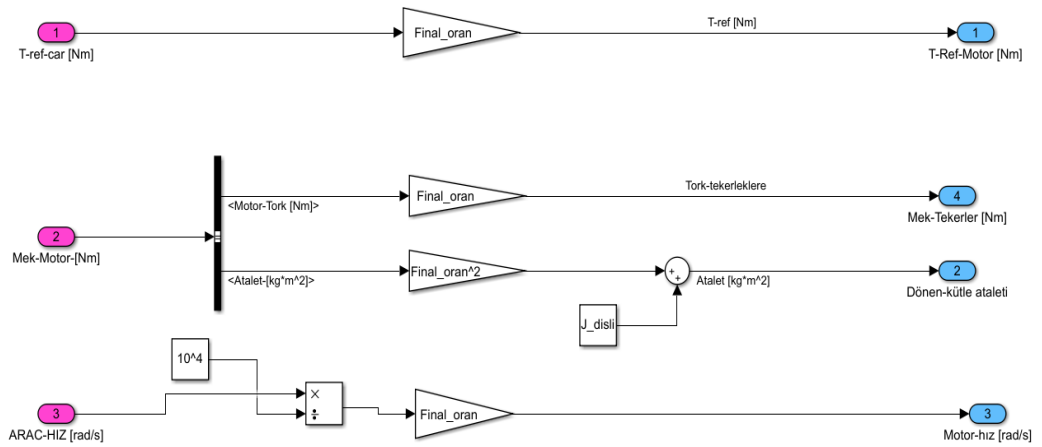


Şekil 4.35. Tekerlek-motor dişli sistemi.

Motor ve tekerlek arasındaki tam dişli oranı;

$$21/12 * 95/12 \approx 13.9 \quad (4.13)$$

olarak hesaplanmıştır. Ayrıca burada transmisyon veriminin % 90 olduğu varsayılmıştır. Şekil 4.36 incelendiğinde elektrik motoru tarafından üretilen tork ve hız değerleri belirlenmiş olan final dişli oranı ile tekerleklerle iletilmektedir.



Şekil 4.36. DA motor ile tekerlekler arasındaki dişli sistemi.

4.1.8. Gaz Potansiyometresi

Bu modelleme de gaz pedalı yerine Şekil 4.37'da gösterilen bir potansiyometre kullanılmıştır. Doğrusal potansiyometre, elektrikli çekiş motorunda istenen tork için karşılık gelen bir referans akımı göndermektedir ve sonuç olarak potansiyometre hem gaz hem de fren pedalı olarak işlev görmektedir.



Şekil 4.37. Gaz potansiyometresi.

4.1.9. Tekerlekler

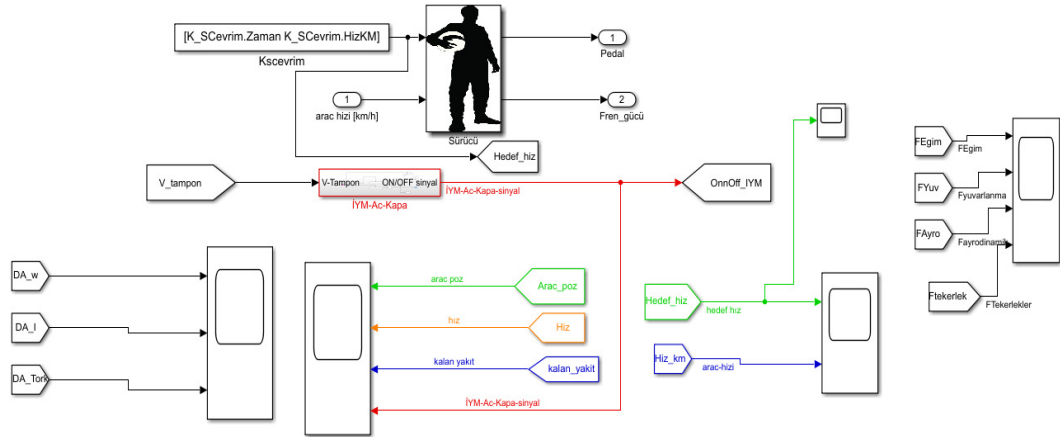
Lastikler, Michelin (eko-lastik) 95/80 R16 olarak seçilmiştir. Yani, lastik genişliği 95 mm, lastik yüksekliğinin genişliğe oranı %80 ve çapı ise 16 inç anlamına gelmektedir. Ayrıca model taşıtta alüminyum jantlar kullanılması planlanmıştır. Şasi ve gövde, ekstra hafif bir karbon fiber kullanılarak tek parça olarak planlanmıştır. Araç teknik özellikleri Çizelge 4.6'de listelenen bileşenlerden oluşmaktadır. Bu yapının kurulumunun toplam ağırlığı 74 kg olarak verilmektedir. Aracın aerodinamik sürtünme, yuvarlanma ve tırmanma direncine ve hızlanmaya tepkisini oluşturan parametreler; A kesit alanı, Cd aerodinamik hava katsayısı, Cr yuvarlanma direnci katsayısı Tablo 4.6'da verilmiştir. Ayrıca m aracın toplam kütlesidir.

Çizelge 4.6. Araç parametreleri

Yüzey alanı (m ²)	1.4
Sürtünme direnci katsayısı	0.28
Yuvarlanma direnci katsayısı	0.007
Araç Ağırlığı (kg)	74

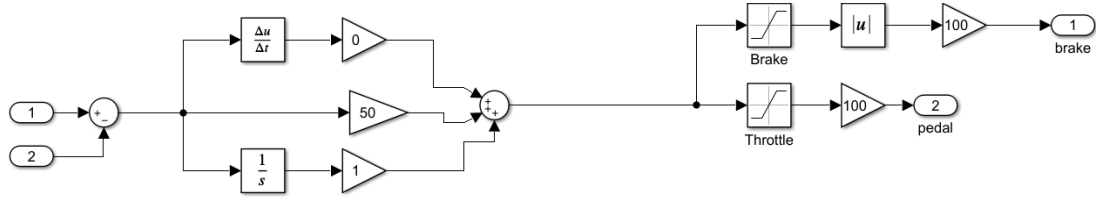
4.1.10. Araç Sürüş Kontrol Sistemi

Araç kontrol sistemi sensörlerden aldığı birçok veriyi değerlendirerek karar vermektedir. Genel olarak araç kontrol sistemi süper kapasitörün akım voltajına göre İYM'nin açık veya kapalı olması gerektiğine karar vermektedir. Süper kapasitör voltajı çok düşerse, kontrol sinyali motora bir başlatma sinyali gönderir ve voltaj izin verilen maksimum değere ulaştığında kontrol sisteminden bir durdurma sinyali gönderilir. Ayrıca sürücünün İYM'nin ne zaman açık ve kapalı olması gerektiğine karar verdiği manuel bir yapıda mümkündür. Araç kontrolcüsü sürücü kontrolü ile İYM açık veya kapalı durumda olması gerektiği ile ilgili kontrolleri içermektedir. Sürücü PI kontrolü, bir pedal kontrolü ile araç hızının sürüş çevrimi boyunca izlenmesi gereken hedef hızı takip etmesini sağlayan kontrolcü alt birimidir. İYM kontrolcüsü ise süper kapasitörün şarj durumuna İYM çalışıp çalışmayacağına karar veren kontrolcü alt birimidir (Şekil 4.38).



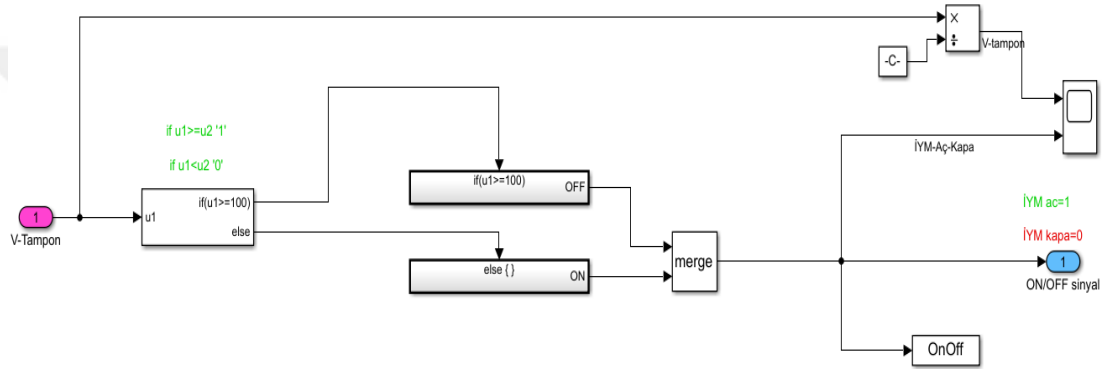
Şekil 4.38. Araç kontrolcü modellemesi.

Şekil 4.39'de görülen sürücü alt modülü pedal pozisyonuna göre araç hızını ayarlamakta olup aynı zamanda araçta üretilen frenleme kuvvetinide vermektedir.



Şekil 4.39. Sürücü kontrol alt birimi.

Şekil 4.40' de süper kapasitörden gelen voltaj değeri 100 V ve üzerinde ise İYM kapatır ve değeri sıfıra eşitler iken, kapasitörden gelen voltaj değeri 100 V'un altında ise İYM açılır ve jeneratör vasıtası ile kapasitör şarj edilmektedir.



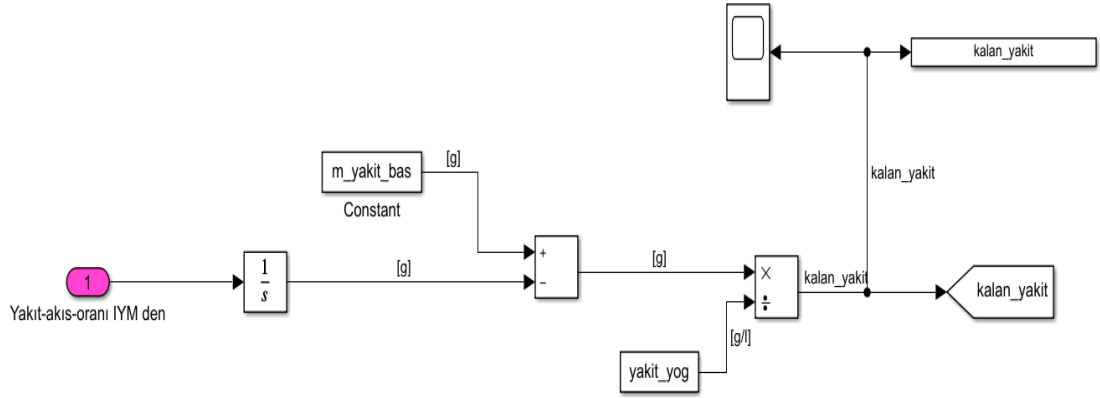
Şekil 4.40. İYM aç/kapa alt modülü.

4.1.11. Yakıt Depeosu Modeli

Yakıt deposu modeli, için belirli bir yakıt tüketim değeri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta depeoda bulunan yakıt miktarı (g) üzerinden modellenmektedir. Sürüş esnasında zamana bağlı olarak tüketilen yakıt miktarı eşitlik 4.14'deki gibi hesaplanmaktadır. Burada $V_{kalan(z)}$ ve yakıt tüketim miktarı $Y_{tm}^{dz}(g/s)$, $\rho_{yakıt}$ yakıt yoğunluğudur.

$$V_{kalan(z)} = \frac{M_{yakıtbas} - \int_0^z Y_{tm}^{dz}}{\rho_{yakıt}} \quad (4.14)$$

Yakıt deposu modeli Şekil 4.41'da verilmiştir.



Şekil 4.41. Yakıt depeosu modeli.

4.1.12. Termal Sistem Modeli

Tahrik hattındaki bileşenler kusursuz olmayıp, aslında yanma, sürtünme veya elektrik direncinden kaynaklanıp kaynaklanmadığına bakılmaksızın ısı üreticisidirler. Bu ısı, bileşenlerin malzeme özelliklerini, örneğin elektrikli makinenin direncini etkileyerek ve bileşenin çalışma noktasını değiştirmektedir. Yüksek çalışma sıcaklığının başka bir dezavantajı, bileşenin eskimesine veya daha da kötüsü kalıcı olarak hasar görmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, sadece aktarma organlarındaki farklı bileşenlerin sıcaklık gelişimini denetlemek değil, aynı zamanda sıcaklığı kabul edilebilir sınırlar içinde tutmaya çalışmak da çok önemlidir. Model sistemi içerisinde, özellikle DA motor ve jeneratör için termal sistem modeli geliştirilmelidir. Çünkü bu iki yapının verimi sıcaklık değerinden oldukça çok etkilenmektedir.

Termal hususlar ve modellemelerde, elektrik direncinin termal bağımlılığı ile sabit ve geçici termal iletimi ve modellenmesi önemli hususlardır.

Elektrik direncinin sıcaklığa bağılılığı, iletken bir malzemenin elektrik direnci, oda sıcaklığında, sıcaklıkla doğrusal olarak artmaktadır.

$$R_T = R_{T0} [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (4.15)$$

Burada; R_T (Ω), rastgele sıcaklık T (K) direncidir, R_{T0} , T_0 sıcaklıkta dirençtir ve α ($1/K$) malzemeye bağlı sıcaklık katsayısıdır. Bakır için sıcaklık katsayısı $3.9 \cdot 10^{-3}$

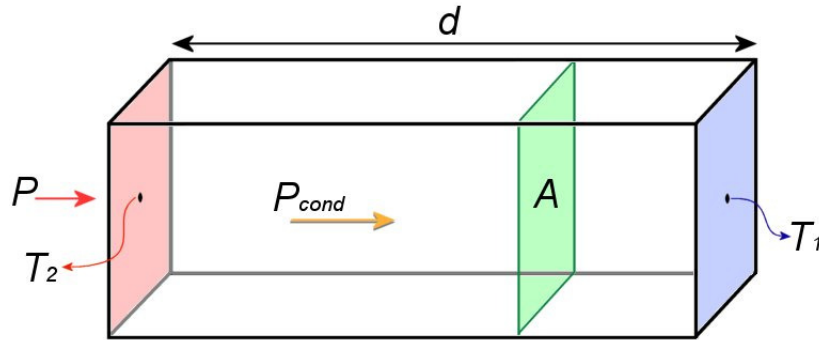
K^{-1} 'dir. Bu, bir iletkenin sıcaklığı %25 artarsa, bakır sargının direncinin neredeyse %10 artacağı anlamına gelmektedir.

Bir malzemenin içindeki sıcaklık gradyanı, ısının yüksek sıcaklık alanından düşük sıcaklık alanına iletim yoluyla aktarılmasına neden olmaktadır. Böyle bir durum, izole edilmiş bir parçanın bir tarafındaki bir güç kaynağı P (W), T_2 sıcaklığının yükselmesine neden olduğu Şekil 4.41 ile gösterilmiştir. Bu durum, (P_{cond} (W/m²)) birim zaman başına net enerji akışına ve (T_1) düşük sıcaklığa neden olmaktadır.

P_{cond} ve sıcaklık farkı arasındaki ilişki aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır;

$$P_{cond} = \frac{\lambda A (T_2 - T_1)}{d} = \frac{\Delta T}{R_{\theta}} \quad (4.16)$$

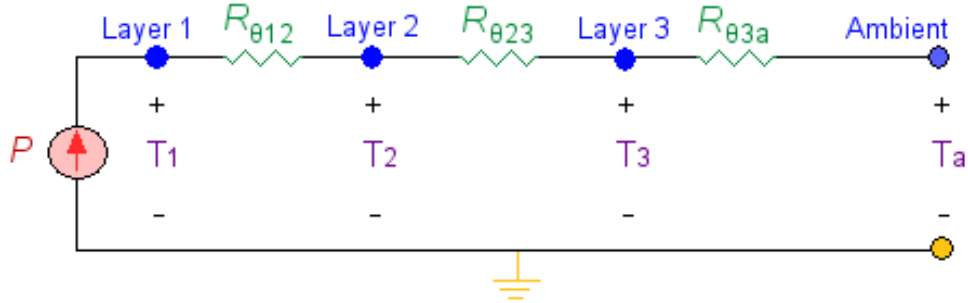
Burada, T (K); sıcaklık, $T_2 > T_1$, λ (W/m K); malzemenin termal iletkenliği, A (m²); parça kesit alanı, d (m) parça uzunluğudur. Son üç parametre birlikte, termal direncin R_{θ} (°C/W) bileşenlerini oluşturmaktadır [137].



Şekil 4.42. Bir sistemin termal davranışı.

Isı kaynağına (P) sahip, sıcaklık gradyanına neden olan izole edilmiş bir parça, böylece güç P_{cond} (W), daha yüksek sıcaklıktan daha düşük sıcaklık tarafına doğru yürütülür. Bir sistemin termal davranışı, Şekil 4.43'deki gibi bir elektrik devresi ile aynı şekilde modellenenmektedir. Buradaki ısı enerjisi oranı, sabit bir akım kaynağına benzemekte olup her bir katmanın sıcaklıkları bir topraklama noktasına ve termal direnç elektrik direncine benzemektedir. Ortam sıcaklığının sabit olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, malzemelerin homojen olduğu ve sıcaklığın bir katmanın tüm gövdesinde esasen aynı olduğu varsayılabilir. Bu varsayımlar yapılarak, sistem “topaklı parametre modeli” olarak modellenmiştir. Katman 1'deki sıcaklık

böylece denklem Şekil 4.43'deki gibi hesaplanabilmektedir. Isı akışı için paralel yollar olması durumunda, akım bölümü ile birlikte paralel bağlı dirençler olarak modellenebilmektedir.



Şekil 4.43.Üç katmanlı bir sistemin eşdeğer termal devresi.

$$T_1 = P (R_{\theta 12} + R_{\theta 23} + R_{\theta 3a}) + T_a \quad (4.17)$$

İletimle geçici ısı transferi, bir parçadaki sıcaklığın yükselmesi hemen gerçekleşmeyip, ancak sıcaklığın sabit durum seviyesine ulaşması biraz zaman almaktadır. Zaman, malzemeye özgü ısıya, c_p ($J / kg K$) ve parçanın kütlesine, m (kg) bağlıdır ve “termal kapasite”, C_θ (W_s / K) veya (J / K) olarak adlandırılır [138].

Geçici termal davranışın modellenmesi, bir bileşenin veya fiziksel sistemin geçici termal tepkisi, hem termal direncine, R_θ , hem de termal kapasiteye, C_θ , dayanan toplam eşdeğer termal empedansı, Z_θ , karakterizedir.

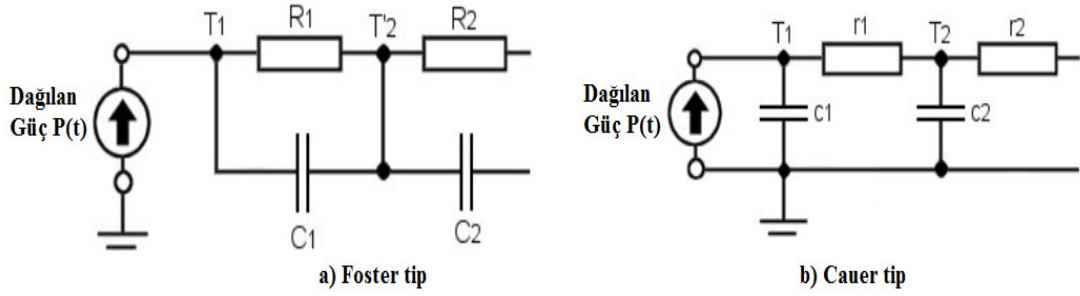
Termal kapasite için elektrik benzeşimi kapasitans olup, yani sıcaklığın bir kapasitif bileşen üzerindeki voltaj gibi, bir parçanın içinde yükselmesi zaman almaktadır.

Bir sistemin eşdeğer termal empedansı, bir giriş gücü darbesine karşı termal adım yanıtını temsil eder; $Z_\theta(t) = (T(t) - T_a) / P(t)$ [137].

Bir bileşenin veya katman sisteminin topaklı parametre eşdeğer devrelerinin yapılmasının, iki yolu vardır. Bileşen, Foster tipi termal eşdeğer devre veya Cauer tipitermal eşdeğer devredir (Şekil 4.44).

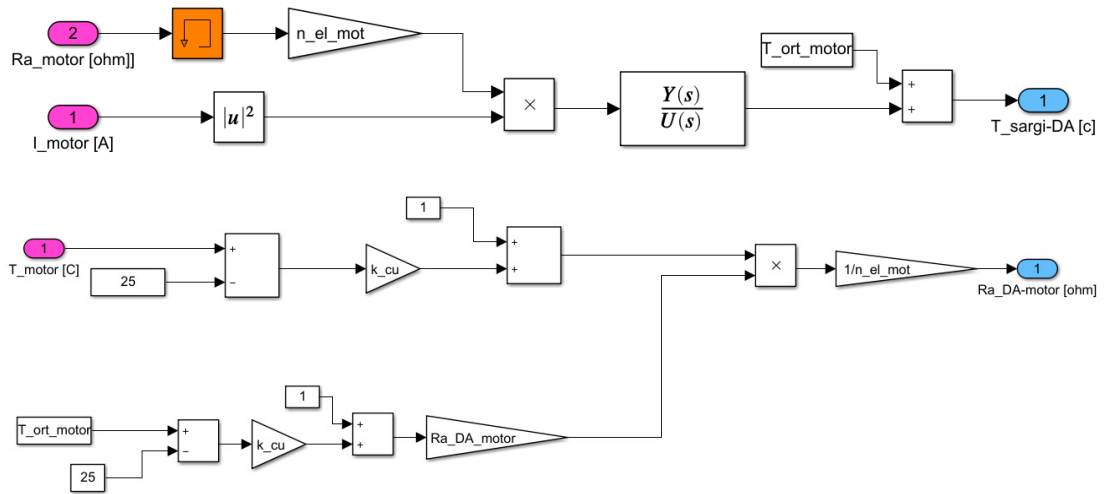
Cauer tipi gerçek fiziksel termal davranışı temsil ederken; Foster tipi modelde sıcaklık artışı hemen gerçekleşmektedir. Ancak, Cauer tipinde topraklı kapasitörler

ile sıcaklık artışında bir zaman gecikmesi olduğu için bu durum sistemdeki malzeme kütlesini temsil etmektedir [139].



Şekil 4.44. Geçici ısı iletimi için termal eşdeğer devreler [139].

Şekil 4.45'de sistemin termal modellemesi diyagramları verilmiştir. Benzer bir termal sistem modellemesi jeneratör için de oluşturulmuştur.



Şekil 4.45. Sistem termal modelleme. (a) DA motor sıcaklık modeli, (b) Motor sargı direnci modeli.

Son olarak taşıt performansının modellenmesinde, çekme kuvveti (F_{tc}) için bir eşitlik üretmektedir. Bu çekme kuvveti, taşıtı ileri iten, taşıt tekerlekleri aracılığıyla yere ileten kuvvettir. Eşitlik (4.18)'de verilmiştir.

$$F_{tc} = F_{ad} + F_{yd} + F_{tt} + F_a \quad (4.18)$$

4.1.13. Aerodimanik Sürüklenme Kuvveti (F_{ad})

Direnç kuvvetin bu kısmı hava içinde hareket eden taşıt gövdesinin sürtünmesinden kaynaklanır. Eşitlik (4.19)'deki gibi hesaplanır.

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 \quad (4.19)$$

Burada ρ havanın yoğunluğu A toplam cephe alanı ve V hızdır. C_d sürüklenme katsayısı adı verilen bir sabittir. Bu katsayı binek bir taşıtta 0,3 iken bazı elektrikli taşıtlarda 0.19' a kadar düşmektedir.

4.1.14. Yuvarlanma Direnç Kuvveti (F_{yd})

Yuvarlanma direnç kuvveti eşitlik (4.30)'deki gibi hesaplanır.

$$F_{yd} = \mu_{yd} mg \quad (4.20)$$

μ_{yd} yuvarlanma direnci katsayısıdır. μ_{yd} 'yi kontrol eden ana faktörler; lastik tipi ve lastik basıncıdır. Bu direnç genellikle sabittir. Radyal katlı bir lastikte 0.015; elektrikli araç özel üretim lastiklerinde 0.005'e kadar düşer.

4.1.15. Tırmanma Direnci

Tepeden aşağı veya yukarı giden bir aracın ağırlığı aşağıya doğru bir kuvvet oluşturacaktır.

Bu kuvvet ya yukarı doğru giderken harekete karşı çıkacak ya da aşağı doğru giderken harekete katkıda bulunacaktır. Tırmanma direnci kuvveti,

$$F_c = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (4.21)$$

Burada; m (kg) aracın kütlesi, g (m / s^2) yerçekimi sabiti ve α (rad) yol açısıdır.

4.1.16. Hızlanma kuvveti

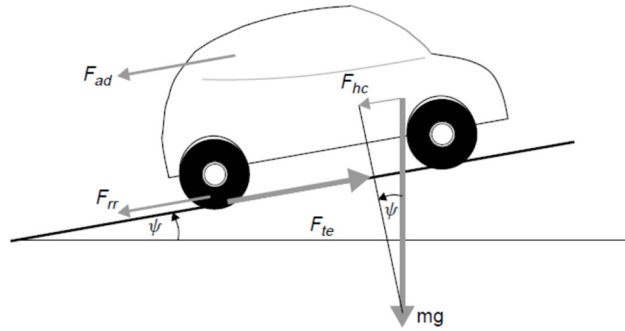
Hızlanma kuvveti, aracın hareketine karşı gelen kuvvetlerin toplamı ile toplam çekiş gücüdür. Net kuvvet, aracın kuvvet yönünde hızlanmasına neden olmaktadır. İvme kuvveti doğrusal bir hareket olarak tanımlanabilir,

$$F_{acc} = m \cdot a \quad (4.22)$$

Burada; m (kg) kütle ve a (m / s^2) aracın hızlanması veya dönme hareketi olarak,

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\sum T}{J} \quad (4.23)$$

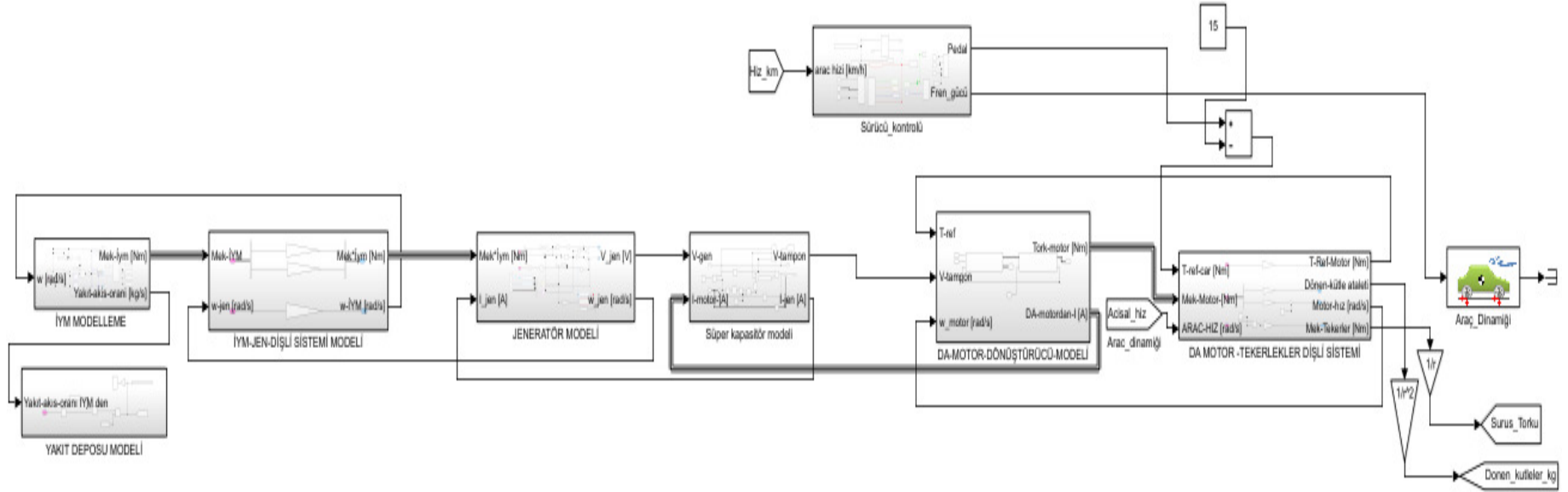
Burada, ω (rad/s) aracın hızı, $\sum T$ (Nm) tekerleklerle etki eden torku ve J (kg/m^2) aracın toplam ataleti' dir. Şekil 4.46'de bir taşıta etkiyen direnç kuvvetleri görülmektedir.



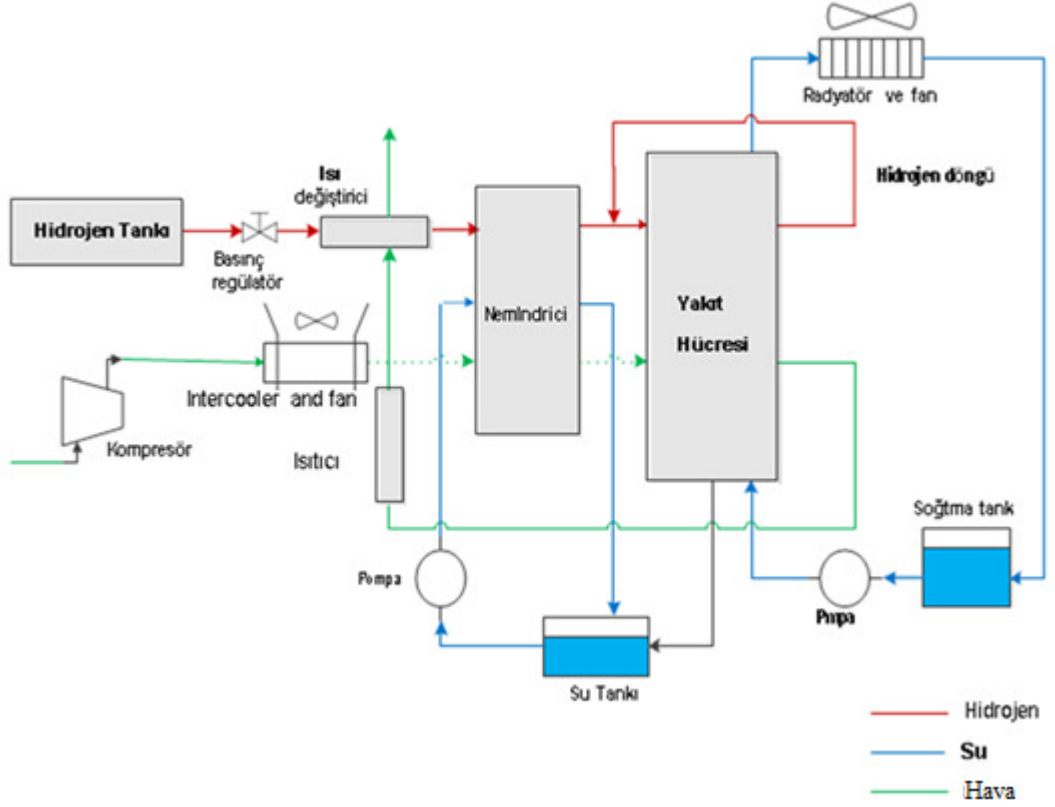
Şekil 4.46. Araca etkiyen kuvvetler.

Şekil 4.47'de araç dinamiği modeli görülmektedir. Bu topolojide araca etkiyen toplam direnç kuvvetleri ile aracın liner ve açısal hızı ile araç pozisyonunu belirlenebilmektedir. Bu son modül ile hibrit bir taşıtım modellenmesi tamamlanmaktadır.

HİBRİT ELEKTRİKİ BİR TAŞITIN MODELLENMESİ



Şekil 4.48. Hibrit elektrikli bir taşıt modelinin genel görünümü.



Şekil 4.49. Yakıt pili güç sisteminin şematik gösterimi.

Hava besleme sistemi bir kompresör, hava soğutucu (intercooler), nemlendirici ve bir ısıtıcıdan oluşur. Yüksek basınçta hava kaynağı kompresör tarafından sağlanır. Sıkıştırma işlemi, sağlanan havadaki sıcaklık artışına neden olur. Gelen havanın sıcaklığını nemlendiriciye indirmek için hava bir ara soğutucudan geçer. Membranın yeterli bir hidrasyon seviyesini sağlamak için yakıt hücresi yığınının katot tarafına girmeden önce hava nemlendirici tarafından nemlendirilir. Yığından çıkan kullanılmayan hava, ısıtıcı tarafından ısıtılabilir ve hidrojen besleme hattındaki bir ısı değiştirici aracılığıyla hidrojen sıcaklığını arttırmak için kullanılabilir.

Hidrojen tedarik sistemi bir hidrojen tankı, basınç regülâtörü valfi, ısı değiştirici, nemlendirici ve kullanılmayan hidrojen geri dönüşüm hattından oluşur. Hidrojen bir tankta yüksek basınçta depolanır. Hidrojenin akış hızını ayarlamak için bir basınç regülâtörü valfi kullanılır. Isı değiştirici, gelen hidrojenin ısıtılmasına yardımcı olur ve daha sonra nemlendiriciye beslenir. Hava akışı gibi, hidrojen, yakıt hücresi kümesinin anot tarafına girmeden önce nemlendirici tarafından nemlendirilir. Hidrojen için geri dönüşüm sistemi, yığın içinde reaksiyona girmeyen ve

nemlendiriciden sonra gelen anot akımı ile karışmaya geri gönderilen hidrojeni toplamak için kullanılır.

Su ve termal yönetim sistemleri bir radyatör, bir fan, pompalar ve bir su deposundan oluşur. Radyatörün ana işlevi, soğutma hücresine ısıyı dağıtarak yakıt hücresi yığınının çalışma sıcaklığında tutulmasını sağlamaktır. Fan, düşük araç hızlarında ısı taşınımının etkinliğini artırır. Pompalar, suyu ve soğutma sıvısını sistem üzerinden dolaştırır ve su tankı, üretilen suyu geri yüklemek ve saklamak için kullanılır. Üretilen su, nemlendiriciden reaktif gazları nemlendirmek için kullanılır.

Bu araştırma boyunca kullanılan yığın, kompozit bipolar plakalar ve 625 cm²'lik bir aktif alana sahip bir 230 hücre yığını olarak seçilmiştir. Sistemin maksimum gücü 3 atm'da 90 kW'dir. Bu sistem otomotiv uygulamalarında bulunanlar için tipiktir ve Toyota Motor Corporation FC aracında bulunan sisteme benzemektedir.

4.2.1. Yakıt Pili Sistem Modeli Yardımcı Bileşenleri

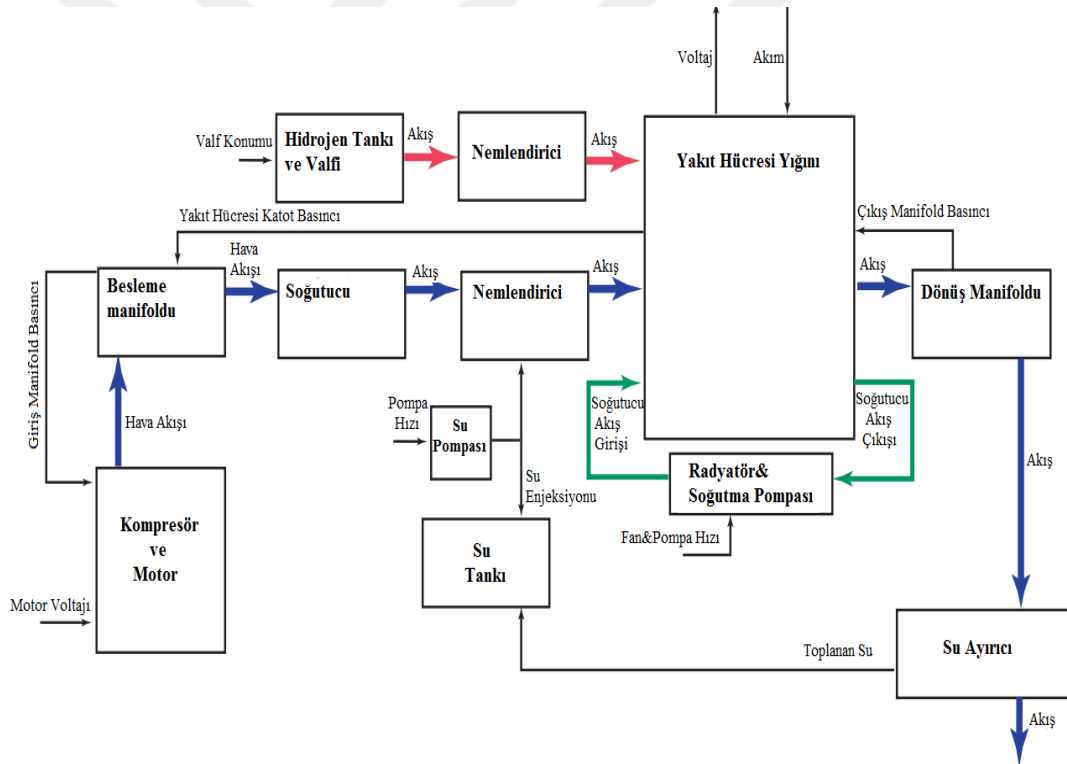
Kontrol çalışmaları için özel olarak geliştirilen modeller belirli özelliklere sahiptir. Dinamik (geçici) etkiler gibi önemli özellikler dâhil edilirken, parametrelerin uzamsal değişimi gibi diğer bazı etkiler toplanarak, normal diferansiyel veya fark denklem formlarına dâhil edilmektedir. Ayrıca, yalnızca otomobil operasyonlarıyla ilgili dinamik efektler modellere entegre edilmiştir.

Bir otomotiv tahrik boyutlu PEM yakıt hücresi sistemi için ilgili zaman sabiti aşağıda özetlenmiştir [140,141].

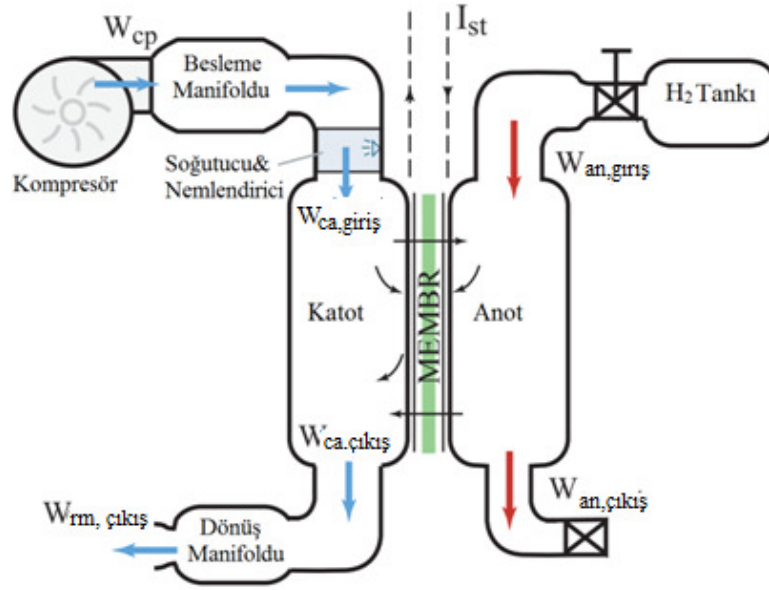
- Elektrokimya (10^{-19} sn)
- Hidrojen ve hava manifoldları (10^{-1} sn)
- Membran su içeriği (net değil)
- Akış kontrol/süper şarj cihazları (10^0 sn)
- Araç atalet dinamikleri (10^1 sn)
- Hücre ve yığın sıcaklığı (10^2 sn)

Hem elektrokimyasal reaksiyonların hem de elektrot elektrik dinamiklerinin son derece hızlı geçici fenomenleri, otomobil uygulamasında minimum etkiye sahip olup, göz ardı edilebilmektedir. Manifold doldurma dinamiği, membran su içeriği, süperşarj cihazları ve sıcaklığa bağlı geçici davranışlar, aracın davranışını etkileyebileceğinden, modele dâhil edilmelidir. Ancak, nispeten yavaş yanıtlar hücre ve yığın sıcaklığı ayrı bir kontrolör ile donatılan ayrı bir kontrol sistemi olarak görülebilmektedir. Bu durumda sıcaklık diğer daha hızlı alt sistemler için sabit olarak kabul edilebilmektedir.

Alt sistem bloklarını giriş/çıkış sinyalleriyle birlikte gösteren sistem blok şeması Şekil 4.50'de gösterilmektedir. Şekil 4.51, reaktif besleme alt sistemi ile ilgili bileşenleri ve akışları göstermektedir.



4.50. Yakıt pili sistem blok şeması.

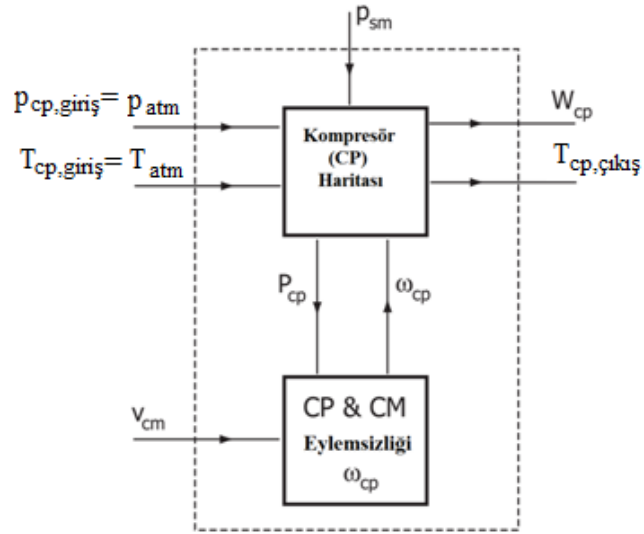


4.51. Reaktif tedariki alt sistemi modeli.

4.2.1.1. Kompresör Modeli

Kompresör modeli, Şekil 4.52'de gösterildiği gibi iki parçaya ayrılmıştır. İlk bölüm, kompresörden hava akış hızını belirleyen statik bir kompresör haritası olup, bu bölümde çıkış havası sıcaklığını ve gerekli kompresör gücünü hesaplamak için termodinamik denklemler kullanılmaktadır. İkinci kısım ise, kompresörü ve motor ataletini temsil eder ve kompresör hızını tanımlamaktadır. Hız, sonuç olarak hava kütle akış hızını bulmak için kompresör haritasında kullanılmaktadır.

Modeldeki tek dinamik durum kompresör hızıdır, ω_{cp} . Modele girişler, giriş hava basıncı, $P_{cp,giriş}$ onun sıcaklığı, $T_{cp,giriş}$ kompresör motoruna voltaj komutu, V_{cm} ve besleme manifoldu basıncı, $P_{cp,çıkış}=P_{sm}$ olan aşağı akış basıncını içermektedir. Giriş havası, tipik olarak atmosferiktir ve basıncı ve sıcaklığının sırasıyla $p_{atm} = 1 \text{ atm}$ ve $T_{atm} = 25^\circ\text{C}$ 'ye sabitlendiği varsayılmaktadır. Motor komutu, yakıt pili sisteminin girişlerinden biri olmakla birlikte; aşağı akış basıncı ise, besleme manifoldu modeli tarafından belirlenmektedir.



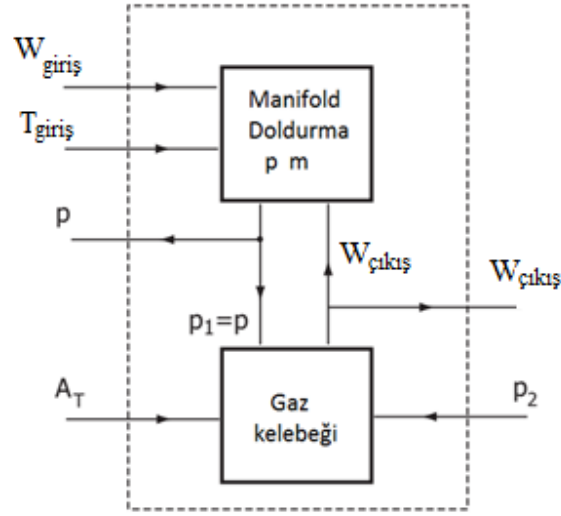
Şekil 4.52. Kompresör blok şeması.

Kompresör hava kütle akış hızı, W_{cp} (kg/sn), bir kompresör akış haritası aracılığıyla kompresör üzerindeki basınç oranından ve kompresörün hızından belirlenmektedir.

Bununla birlikte, kompresör akış haritasının bir arama tablosu şeklinde sağlanması dinamik sistem simülasyonları için uygun değildir [142].

4.2.1.2. Manifold Dinamiği Modeli

Manifold modeli, borular ve her cihaz arasındaki bağlantılar ile ilişkili topak hacmini temsil etmektedir. Besleme manifoldu hacmi, soğutucu ve nemlendiricinin hacmi de dâhil olmak üzere kompresör ile yakıt hücresi yığını arasındaki boruların hacmini içermektedir (Şekil 4.53). Dönüş manifoldu, yakıt hücresi yığını egzozundaki boru hattını temsil etmektedir.

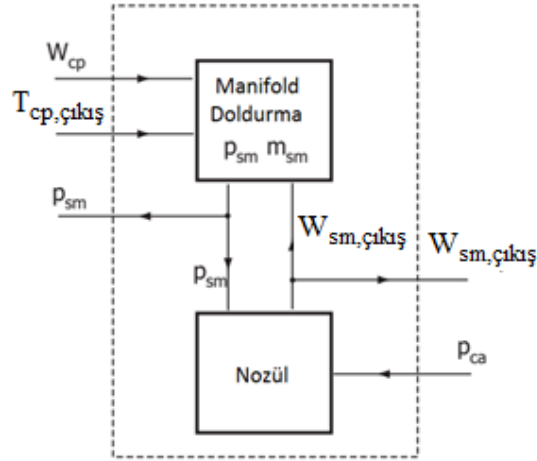


Şekil 4.53. Manifold blok şeması.

Manifold modelinin blok şeması Şekil 4.53'de gösterilmiştir. Kütle koruma prensibi, manifold modelini geliştirmek için kullanılmaktadır. Burada m , manifold hacminde biriken gazın kütlesi ve $W_{giriş}$ ve $W_{çıkış}$, manifolda giren ve çıkan kütle akış hızlarıdır. Hava sıcaklığının (T) manifoldda sabit olduğunu ve giriş akış sıcaklığına ($T = T_{in}$) eşit olduğunu varsayarsak, manifold doldurma dinamikleri izotermik bir ilişkiyi takip etmektedir. A_T , nozülün açılış alanı (m^2) ve p gaz basıncıdır. Ayrıca, bir nozülün geçen akış hızı, memenin yukarı akış basıncının, P_1 , ve aşağı akış basıncının, P_2 , bir fonksiyonudur.

Besleme Manifoldu;

Besleme manifoldu için, giriş kütle akışı kompresör akışı W_{cp} 'dir ve çıkış kütle akışı $W_{sm,çıkış}$ 'dir. Besleme manifoldu ile katot arasındaki basınç farkı nispeten küçüktür. Besleme manifoldu blok şeması Şekil 4.54'de verilmiştir.

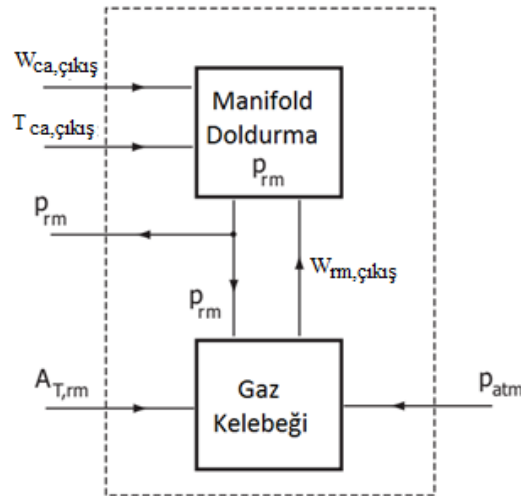


Şekil 4.54. Besleme manifoldu blok şeması.

Burada, $k_{sm, çıkış}$ besleme manifoldu çıkış akış sabitidir. Besleme manifoldundaki havanın sıcaklığı yüksek olduğundan, hava sıcaklığının manifoldun içinde değişmesi beklenmektedir. V_{sm} besleme manifoldu hacmi ve T_{sm} besleme manifoldu hava sıcaklığıdır.

Dönüş Manifoldu:

Bacadan çıkan havanın sıcaklığı, kompresörden çıkan hava ile karşılaştırıldığında nispeten düşüktür. Bu nedenle, dönüş manifoldundaki hava sıcaklığı değişiklikleri göz ardı edilebilmektedir. Dönüş manifolduna ait blok şeması Şekil 4.55’de verilmiştir.



Şekil 4.55. Dönüş manifoldu blok şeması.

Burada, V_{rm} dönüş manifoldu hacmi ve T_{rm} dönüş manifoldundaki gazın sıcaklığıdır. $W_{ca,çıkış}$, dönüş manifolduna giren akış, p_{rm} manifold basıncı, $A_{T,rm}$, gaz keleşbeği açma alanıdır.

4.2.1.3. Gaz Karışımlarının Termodinamiğinin Gözden Geçirilmesi

Spesifik olarak, karışımın her bileşeni diğer bileşenlerin varlığından bağımsızdır ve her bileşen ideal bir gaz olarak işlem görebilmektedir.

Dikkat edilmesi gereken iki konu vardır. İlk olarak, bir değere sahip bağıl nem, karışımın doymuş veya tamamen nemlendirildiği anlamına gelmektedir. Karışımnda daha fazla su içeriği varsa, fazla miktarda su sıvı bir formda yoğunlaşacaktır. İkincisi, ideal gaz varsayımı ile iç enerji ve entalpi hesaplamaları yapılırken karışımındaki çeşitli bileşenler ayrı ayrı işlenebilmektedir.

4.2.1.4. Hava Soğutucu (Statik) Modeli

Besleme manifoldundaki havanın sıcaklığı, kompresörden çıkan yüksek hava sıcaklığı nedeniyle yüksektir. Yakıt hücresi zararına herhangi bir zarar gelmesini önlemek için, havanın yığın çalışma sıcaklığına kadar soğutulması gerekmektedir.

İdeal bir hava soğutucusunun, $T_{cl} = 80^{\circ}\text{C}$ 'de yığına giren havanın sıcaklığını koruduğu bilinmektedir.

Soęutucuda basınç düşüşü olmadığı varsayılır, $p_{cl} = p_{sm}$. Sıcaklık değışimi gaz nemini etkilediğinden, soğutucudan çıkan gazın nemi hesaplanır.

4.2.1.5. Nemlendirici (Statik) Model

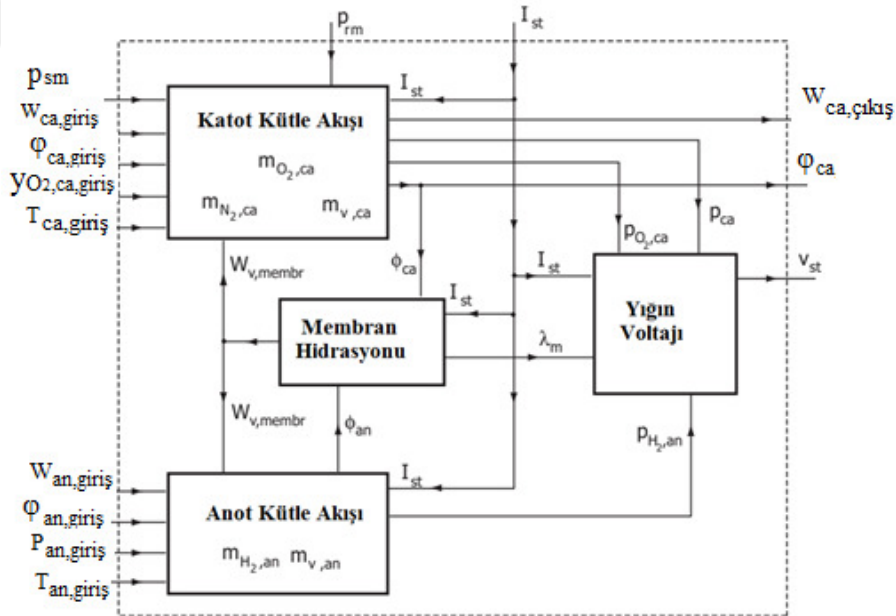
Soğutucudan gelen hava akışı, yığına girmeden önce nemlendiricideki hava akımına su enjekte edilerek nemlendirilmektedir. Burada, nemlendiricinin hacmi küçüktür ve bu nedenle besleme manifoldu hacminin bir parçası olarak düşünölmektedir. İlave enjekte edilen su nedeniyle, hava nemindeki değışikliği hesaplamak için nemlendiricinin statik bir modeli kullanılmaktadır.

4.2.2. Yakıt Hücresi Yığın Modeli

Yakıt hücresi yığın modeli aşağıdaki alt modellerden oluşmaktadır: yakıt hücresi voltaj modeli, anot akış modeli, katot akış modeli, membran hidrasyon modeli ve ısı transfer modeli. Gerilim modelinde, yığın geriliminin çalışma koşullarının bir fonksiyonu olarak hesaplanması için bir denklem (Nernst denkleminin dayalı olarak) kullanılır. Katot ve anot akış modelleri, yığın akış kanallarının içindeki reaktif gaz akışı davranışını temsil eder. Membran hidrasyon modeli, membrandaki su içeriğini ve membran boyunca suyun kütle akış hızını temsil eder. Isı transfer modeli elektrokimyasal reaksiyonların ürettiği toplam termal güce dayanır.

Yakıt hücresi yığın modeli; yığın voltajı; anot akışı, katot akışı ve membran hidrasyon modelleri olan etkileşen dört alt model içermektedir. Yığın modelinin bir blok diyagramı Şekil 4.56'de gösterilmiştir.

Bu modelde, reaksiyon nedeniyle üretilen ısıyı hesaplamada, istif sıcaklığının sabit olduğu varsayılır.

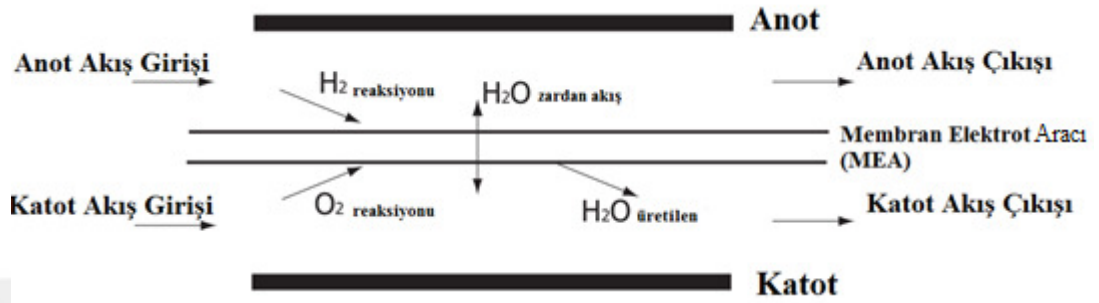


Şekil 4.56. Yakıt hücresi yığın blok şeması.

Voltaj modelinde, yığın voltajının hesaplanmasında; basınç, sıcaklık, reaktan gazı kısmi basıncı ve membran nemi; katot ve anot akış modellerinde, yığın akış kanalları

içindeki reaktan gaz akışının basıncını ve bağlı neminin hesaplanmasında termodinamik özelliklerle birlikte kütle koruması da kullanılmaktadır.

Yakıt hücresi yığını ile ilişkili ana akışlar Şekil 4.57'de gösterilmektedir. Membran boyunca su transferi süreci, membran hidrasyon modeli ile temsil edilmektedir.



Şekil 4.57. Yığın kütle akışı.

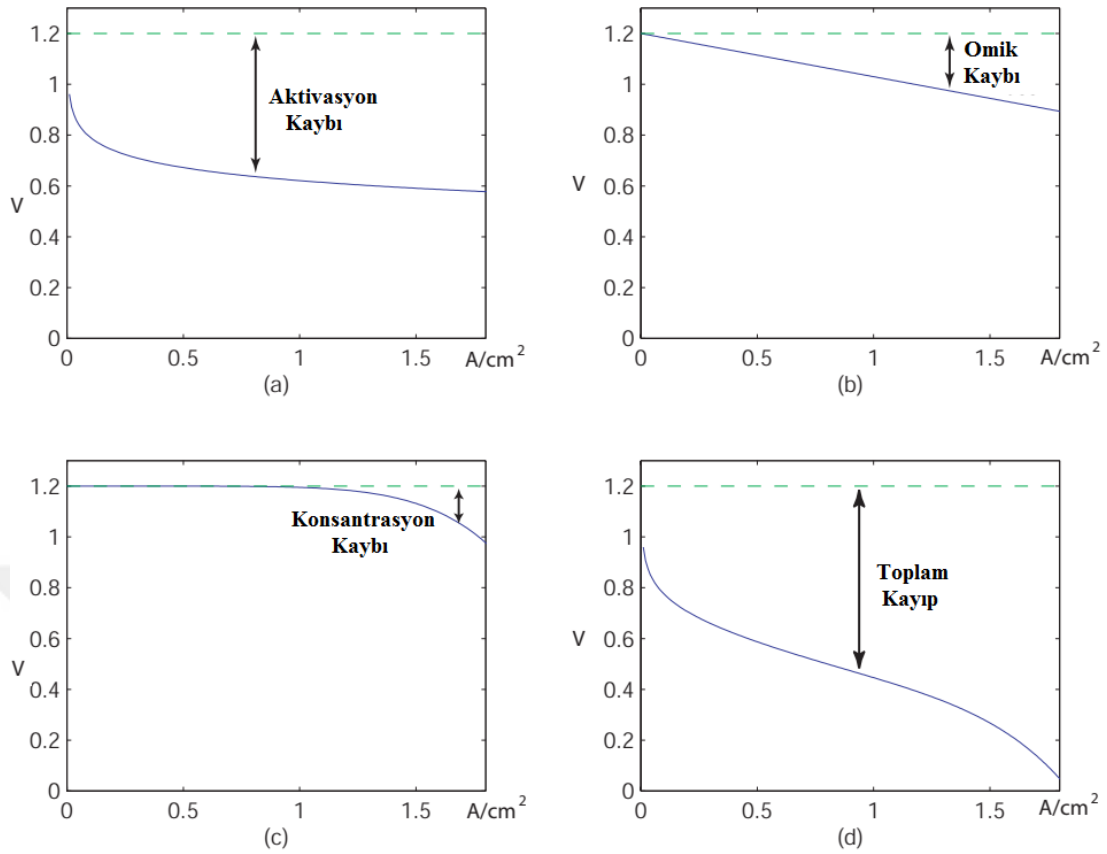
4.2.2.1. Yığın Voltaj Modeli

Yakıt hücresinin açık devre voltajı, reaktanlardaki kimyasal enerji ile elektrik enerjisi arasındaki enerji dengesinden hesaplanmaktadır. Yakıt hücresindeki üç ana kayıp türü açıklanmaktadır.

4.2.2.2. Yakıt Pili Açık Devre Voltajı

Yakıt hücresi kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Yakıt hücresinden salınan kimyasal enerji, ürünün Gibbs serbest enerjisi ile reaktanların Gibbs serbest enerjisi arasındaki fark olan Gibbs serbest enerjisindeki (Δg_f) değişiklikten hesaplanabilmektedir. Gibbs serbest enerjisi, harici işler yapmak için mevcut enerjiyi temsil etmek için kullanılmaktadır.

Yakıt hücresi kayıpları üç kategoride sınıflandırılır: aktivasyon kaybı, omik kayıp ve konsantrasyon kaybı. Kayıpların her birinin neden olduğu voltaj düşüşü grafikleri Şekil 4.58'da gösterilmektedir.



Şekil 4.58. Yakıt hücresindeki farklı kayıp türlerinin neden olduğu voltaj düşüşleri: (a) Sadece aktivasyon kayıpları (b) Sadece omik kayıplar (c) Sadece konsantrasyon kayıpları (d) Toplam kayıplar.

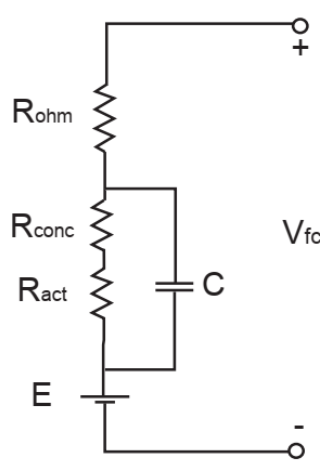
Aktivasyon kaybı veya aktivasyon aşırı gerilimi; elektron transferine neden olma ile anot ve katotta kimyasal bağları kırma ve oluşturma ihtiyacının bir sonucudur [143]. Elektrotlardan elektrona aktaran kimyasal reaksiyonu sürerken mevcut enerjinin bir kısmı kaybolmaktadır [144]. Aktivasyon aşırı gerilimi, her iki yakıt hücresi elektrodu olan anot ve katotda da meydana gelmektedir. Bununla birlikte, anotta hidrojen oksidasyonunun reaksiyonu çok hızlı olurken, katotta oksijen azalmasının reaksiyonu oldukça yavaştır [109]. Bu nedenle, aktivasyon kaybından kaynaklanan voltaj düşüşü, katot reaksiyon koşullarının hâkimiyetindedir.

Omik kayıp, polimer zarın protonların transferine direncinden ve elektrot ile kolektör plakasının elektronların transferine direncinden kaynaklanmaktadır [53, 145, 146].

Konsantrasyon kaybı veya konsantrasyon aşırı voltajı, reaksiyonda tüketildikçe reaktanların konsantrasyonundaki değişiklikten kaynaklanmaktadır. Bu kayıplar, yüksek akım yoğunluğunda hızlı voltaj düşüşünün nedeni sayılmaktadır [140].

4.2.2.3. Yakıt Pili Dinamik Elektriksel Etkisi

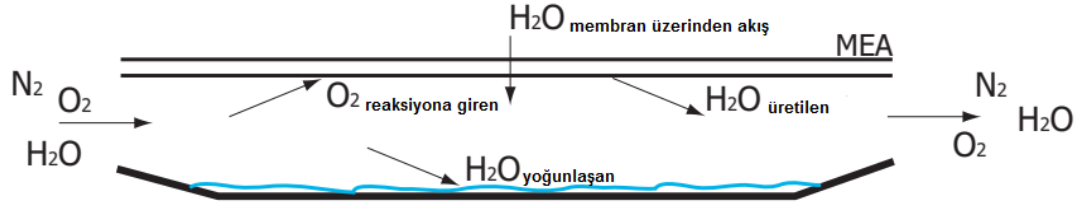
Yakıt hücresi, "çift katman şarj" hızlı dinamik özelliği ile bilinmektedir. Özellikle, elektrot/elektrolit arayüzünün yakınında, elektrik yükünü ve dolayısıyla enerjiyi depolayan "çift şarjkatmanı" adı verilen bir yük katmanı vardır. Bu katman bir elektrik kondansatörü gibi davranmaktadır. Yüklerin toplanması, daha önce dikkate alınan aktivasyon aşırı voltajı ve konsantrasyon aşırı voltajı kombinasyonuna karşılık gelen bir elektrik voltajı üretmektedir [144]. Bu nedenle, akım aniden değiştiğinde, aktivasyon aşırı voltajı ve konsantrasyon aşırı voltajının akımdaki değişikliği izlemesi biraz zaman almaktadır. Diğer yandan omik voltaj düşüşü, akımdaki bir değişikliğe anında yanıt verir. Böylece, Şekil 4.59'deki eşdeğer devre yakıt hücresinin dinamik davranışını modellemek için kullanılabilir.



Şekil 4.59. Yakıt hücresi eşdeğer devreleri.

4.2.2.4. Katot Akış Modeli

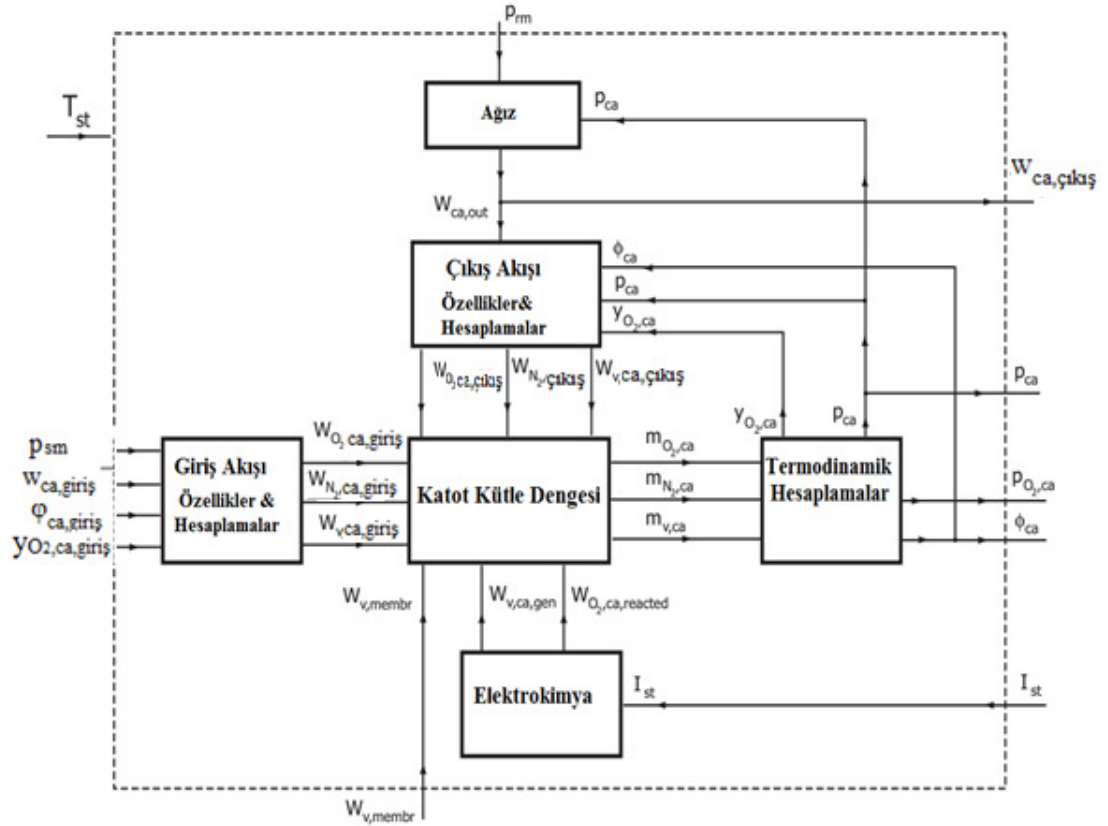
Katot kütle akış modeli, yakıt pili yığınının katodu içindeki hava akışı davranışını temsil etmektedir. Model, kütle koruma prensibi ve havanın termodinamik ve psikometrik özellikleri kullanılarak geliştirilmiştir. Kütle sürekliliği, Şekil 4.60'de gösterilen katot hacmindeki üç elementin, yani oksijen, azot ve su kütlesini dengelemek için kullanılmaktadır.



Şekil 4.60. Katot kütle akışı.

Katot akış modeli Şekil 4.61’de verilmiştir. Oksijen kütlesi, $m_{O_2,ca}$, azot kütlesi, $m_{N_2,ca}$, ve su kütlesi, $m_{w,ca}$ ’dır. "ca" alt dizisi, yakıt hücresi katotunu temsil etmektedir.

Modele giriş, yığın akımı, I_{st} , yığın sıcaklığı, T_{st} , membran boyunca su akış hızı, $W_{v,membr}$, geri akış manifoldu basıncı, p_{rm} ve giriş akış sıcaklığı, $T_{ca,giriş}$, basınç, $p_{ca,giriş}$, kütle akış oranı, $W_{ca,giriş}$, nemi, $\phi_{ca,giriş}$, ve oksijen mol fraksiyonu, $y_{O_2,ca,giriş}$, dahil olmak üzere giriş akış özelliklerini içermektedir.



Şekil 4.61. Katot akış modeli.

Burada,

$W_{O_2,ca,giriş}$ katoda giren oksijen gazının kütle akış hızıdır.

$W_{O_2, ca, çıkış}$ katottan çıkan oksijen gazının kütle akış hızıdır.

$W_{O_2, reaktant}$, reaksiyona giren oksijen hızıdır.

$W_{N_2, ca, giriş}$, katoda giren azot gazının kütle akış hızıdır.

$W_{N_2, ca, çıkış}$ katottan çıkan azot gazının kütle akış hızıdır.

$W_{v, ca, giriş}$ katoda giren buharın kütle akış hızıdır.

$W_{v, ca, çıkış}$ katottan çıkan buharın kütle akış hızıdır.

$W_{v, ca, üretilen}$ yakıt hücresi reaksiyonunda üretilen buhar hızıdır.

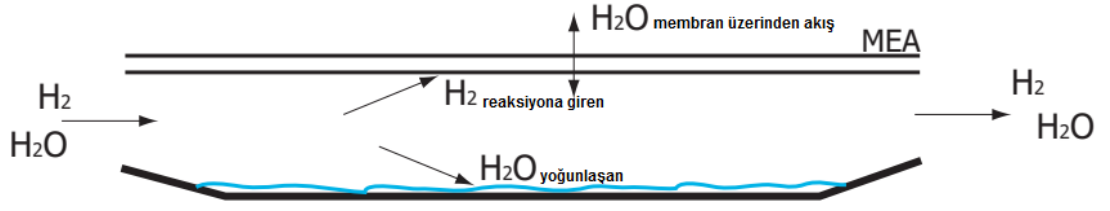
$W_{v, membran}$ yakıt hücresi zarı boyunca su transferinin kütle akış hızıdır.

$W_{l, ca, çıkış}$ katottan çıkan sıvı su hızıdır.

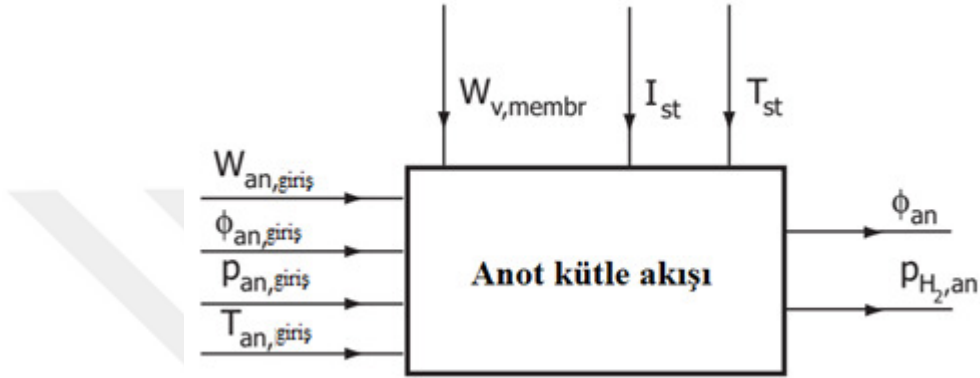
4.2.2.5. Anot Akış Modeli

Bu modelde hidrojen, yakıt hücresi yığınının anoduna bir hidrojen tankı ile beslenmektedir. Anot giriş akış hızının, katot ve anot arasındaki minimum basınç farkını korumak için bir valf ile anlık olarak ayarlanabileceği varsayılmaktadır. Burada, anot kanalı akış direncinin katot akış direncine kıyasla küçük olduğunu varsayılmakta olup, böylece basınç farkını korumak yeterli hidrojen akışını sağlamaktadır. Akış sıcaklığının yığın sıcaklığına eşit olduğu varsayılmaktadır. Anot çıkış akış durumunun, yani basınç, sıcaklık ve nem durumunun, anot akış kanalındaki gazın durumuyla aynı olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, tüm kanalların akış kanalı ve destek tabakası tek bir hacimde toplanmaktadır.

Katot akış modeline benzer şekilde, hidrojen kısmi basıncı ve anot akış nemi, anottaki hidrojen ve suyun kütle akışının dengelenmesiyle belirlenmektedir. Şekil 4.62 anottaki kütle akışını göstermektedir. Şekil 4.63'de gösterilen modele girişler; anot giriş (toplam) kütle akışı, $W_{an, giriş}$, giriş akış nemi, $\phi_{an, giriş}$, giriş akış basıncı, $p_{an, giriş}$, giriş akış sıcaklığı, $T_{an, giriş}$, yığın akımı, I_{st} , yığın sıcaklığı, T_{st} , ve membran boyunca buhar akış hızı, $W_{v, membran}$, içermektedir.



Şekil 4.62. Anot kütle akışı.



Şekil 4.63. Anot blok şeması.

Burada,

$W_{H_2,an,giriş}$ anota giren hidrojen gazının kütle akış hızıdır.

$W_{H_2,an,çıkış}$ anottan ayrılan hidrojen gazının kütle akış hızıdır.

$W_{H_2,reaktant}$ reaksiyona giren hidrojen oranıdır.

$W_{v,an,giriş}$ anoda giren buharın kütle akış hızıdır.

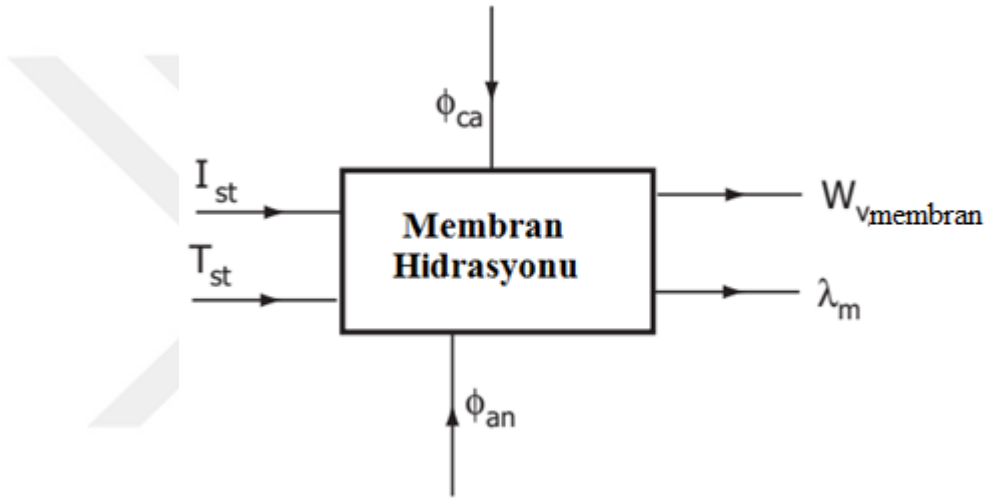
$W_{v,an,çıkış}$ anottan çıkan buharın kütle akış hızıdır

$W_{v,membran}$ yakıt hücresi zarı boyunca su transferinin kütle akış hızıdır.

$W_{l,an,çıkış}$ anoddan çıkan sıvı su oranıdır.

4.2.2.6. Membran Hidrasyon Modeli

Membran hidrasyon modeli, membrandaki su içeriğini ve suyun membran boyunca kütle akış hızını temsil etmektedir. Hem su içeriği hem de kütle akışının, membranın yüzey alanı üzerinde homojen olduğu varsayılmaktadır. Membran suyu içeriği ve membran boyunca kütle akış hızı, yığın akımının fonksiyonları ve anot ve katot akış kanalları içindeki akışın bağıl nemidir. Katot ve anot akışının bağıl nemi, sırasıyla katot akış modelinin ve anot akış modelinin çıktısıdır. Şekil 4.64’de membran hidrasyon modeli bloğu görülmektedir.



Şekil 4.64. Membran hidrasyon modeli bloğu.

Burada, yığın akımı, I_{st} , yığın sıcaklığı, T_{st} , membran boyunca su akış hızı, $W_{v,membran}$, membran ortalama su içeriği, λ_m ’dur.

Membran boyunca su taşınması iki ayrı olayla sağlanmaktadır [147] :

- Su molekülleri, hidrojen protonu ile membran boyunca anottan katoda sürüklenmektedir. Bu olaya, elektro-ozmotik sürüklenme denir. Taşınan su miktarı, her proton tarafından taşınan su moleküllerinin sayısı olarak tanımlanan elektro-ozmotik sürüklenme katsayısı, n_d , ile temsil edilmektedir.
- Ayrıntılı bir uzaysal olarak dağıtılmış sistemde, membran boyunca anot ve katot akışlarındaki nem farkından kaynaklanan bir su konsantrasyonu derecesi

vardır. Bu su konsantrasyonu gradyanı, suyun katottan anod'a "geri difüzyonuna" neden olmaktadır.

4.2.3. Pem Modeli İçin Analiz Ve Temel Denklemler

Genel, sıfır boyutlu bir PEMFC modeli oluşturmak için, yakıt hücresinin deneysel polarizasyon eğrisinin yeniden üretilmesi için yarı deneysel bir çözüm uygulanmıştır. Ortalama hücre voltajı aşağıdaki ifadeyle analitik olarak ifade edilebilir [145,148].

$$V_{cell} = E - \eta_{act} - \eta_{ohmic} - \eta_{conc} \quad (4.11)$$

Burada E, açık devre voltajıdır. η_{act} , η_{ohmic} , η_{conc} aktivasyonu, omik ve konsantrasyon kayıplarıdır. Literatürde, aşağıdaki bölümlerde açıklanan yukarıda belirtilen terimleri tahmin etmek için önerilen çok sayıda denklem vardır [148].

$$V_{stack} = v_{cell} \cdot n_{cell} \quad (4.12)$$

Burada yığın gerilimi V_{stack} basitçe hücre gerilimi $n_{hücre}$ sayısı ile çarpılmıştır [107].

$$P_e = i \cdot v_{cell} \cdot n_{cell} = i \cdot V_{stack} \quad (4.13)$$

Burada yakıt hücresi yığınının P_e (W) güç çıkışı verilmiştir [107].

4.2.3.1. Aktivasyon Kayıpları

Yakıt hücresi voltajındaki aktivasyon kayıpları iyi bilinen Butler-Volmer denklemi kullanılarak hesaplanabilir [149].

$$V_{act} = \frac{RT}{n\alpha_{anode}F} \left[\ln \frac{i}{i_o} \right]_{anode} + \frac{RT}{n\alpha_{cathode}F} \left[\ln \frac{i}{i_o} \right]_{cathode} \quad (4.14)$$

Burada i , mevcut yoğunluktur ve i_o , reaksiyon değişim akım yoğunluğu, n , tepkime maddesi molü başına değişim protonlarının sayısı, F , Faraday sabitidir ve α , yük aktarım katsayısıdır [150].

4.2.3.2. Omik Kayıplar

Yakıt hücresi toplam omik kayıpları aşağıdaki gibi yazılabilir [14];

$$E_{ohmic} = iA \Sigma R = iA \left[\left(\frac{L}{\sigma A} \right)_{electrolyte} + \left(\frac{L}{\sigma A} \right)_{cathode} + \left(\frac{L}{\sigma A} \right)_{anode} \right] \quad (4.15)$$

Burada L, elektrolit tabakasının kalınlığı ve σ iletkenliktir ve yakıt hücresinin aktif alanıdır.

4.2.3.3. Konsantrasyon Kayıpları

Konsantrasyon kayıpları aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir [150].

$$V_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{i_L}{i_L - 1} \quad (4.16)$$

Burada i_L sınırlayıcı akım yoğunluğu. Yakıt hücresinin sınırlayıcı akım yoğunluğu, akım yoğunluğunun arttığı ve reaktan konsantrasyonunun sıfıra düştüğü noktadır, böylece yakıt hücresi, sınırlayıcı akım yoğunluğundan daha yüksek bir akım yoğunluğu üretemez.

4.2.3.4. Yakıt Pili Verimliliği

Genel olarak termodinamik yakıt hücresi verimliliği, üretilen elektrik gücü ile yakıt hücresine giren toplam yakıt enerjisi oranı arasındaki ilişkidir;

$$\eta_{ther} = \frac{I \cdot V_{cell} \cdot n_{cell}}{\dot{m}_{H_2, in} \cdot HHV_{H_2}} \quad (4.17)$$

4.2.3.5. Membranın Hidrasyon Yönetimi

Polimer elektrolitteki su içeriği, PEMFC yığın ömründe ve membranın iyonik direncinde önemli bir rol oynar. Membrandaki düşük nemlendirme, iyonik dirençte hızlı bir artışa neden olur ve yüksek nemlendirme, çok fazla sıvı suyun reaktan kanallarına taşmasına ve elektrotlardaki gözenekleri doldurmasına neden olur. Membranda yüksek iyonik iletkenliğe sahip olmak için tamamen hidratlanmalıdır. Hidrasyon, gazların nemlendirilmesiyle veya yakıt hücresinin ürün suyunun zarı hidratlamasına izin verecek şekilde tasarlanmasıyla elde edilebilir [148,151]. Bu

çalışmada her iki yöntem de uygulanmıştır. Genel olarak, suyun polimer elektrolit içinde difüzyonu iki terimle ifade edilir: biri, zardan geçerken protonlarla (H^+) ilişkili su moleküllerinin sayısını temsil eden elektro ozmotik sürüklenme olgusudur. Ancak su katot tarafında üretildiğinde bu fenomen başka bir yöndedir. Su konsantrasyonu gradyanı, suyun katottan su geri difüzyonu adı verilen anot tarafına hareket etmesini sağlar [148]. Elektro-ozmotik sürüklemeye bağlı su molar akısı şu şekilde tanımlanabilir:

$$\dot{m}_{drag} = MW_{H_2O} \cdot n_d \cdot \frac{i \cdot A_{cell} \cdot n_{cell}}{F} \quad (4.18)$$

Proton başına su molekülleri birimi cinsinden elektro-ozmotik sürüklenme katsayısı, n_d , membran su içeriğinden, λ_m hesaplanabilir [145].

$$n_d = 0.0029\lambda_m^2 + 0.05\lambda_m - 3.4 \cdot 10^{-19} \quad (4.19)$$

Membrandaki su moleküllerinin, iyonomer içindeki sülfonik asit gruplarının sayısına oranı olarak tanımlanan λ_m , su aktiviteleri a_w 'eşitlik (4.20)'den hesaplanır [145].

$$\lambda_m = 0.043 + 17.8 a_w - 39.85 a_w^2 + 36. a_w^3 \quad (4.20)$$

λ_m 'yi çözmek için gereken su aktivitesi, a_w , şu şekilde tanımlanır:

$$a_w = \frac{y_v P}{P_{sat}(T)} = RH \quad (4.21)$$

Buradaki P, anot veya katotun basıncıdır. Membran boyunca geri difüzyonun neden olduğu su konsantrasyonunun miktarı, elektro ozmotik sürüklenme ile su transferine eşittir.

4.2.3.6. Kütle Dengesi

Kütle denge denklemleri, reaktantlardaki her bir bileşim için ayrı ayrı uygulanır. Su kütlesi dengesi şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{m}_{H_2O_{Air},in} + \dot{m}_{H_2O_{gen}} - (\dot{m}_{drag} \cdot A_{cell} \cdot M_{H_2O} \cdot 10^{-3}) = \dot{m}_{H_2O_{Air},out} \quad (4.22)$$

$$\dot{m}_{H_2O_{fuel},in} + \dot{m}_{H_2O_{gen}} - (\dot{m}_{drag} \cdot A_{cell} \cdot M_{H_2O} \cdot 10^{-3}) = \dot{m}_{H_2O_{fuel},out} \quad (4.23)$$

Bu denklemler, sırasıyla sıvı veya buhar olabilen katot ve anot taraflarındaki su kütle dengesini temsil eder. A_{cell} aktif hücre alanıdır ve M_{H_2O} su moleküler ağırlığını temsil eder. $\dot{m}_{H_2O}$ su kütle akış hızıdır [148].

4.2.3.7. Isı Transferi Dengesi

Elektrokimyasal reaksiyonda açığa çıkan enerji, istenen sıcaklıkta sabit tutmak için istiften uzaklaştırılmalıdır. Yakıt hücresinin termodinamik kararlı durum enerji dengesi şu şekilde verilir:

$$\sum Q_{i,in} = \sum Q_{i,out} + W_{el} + Q_{cool} + Q_{env} \quad (4.24)$$

Burada $Q_{i,in}$ reaktif gazlarla giren enerji oranı, $Q_{i,out}$ kullanılmayan reaktif gazlarla çıkan enerji oranıdır, W_{el} üretilen elektrik gücüdür, Q_{cool} taşınan ısı oranıdır soğutucunun yakıt hücresine ve Q_{env} yığın yüzeyi tarafından çevreye yayılan ısı oranıdır.

4.2.3.8. Toplam Sistem Gücü ve Sistem Termal Verimliliği

Yakıt pili güç sisteminin verimliliği, net elektrik gücü çıkışı ile yakıt hücresine giren toplam yakıt enerjisi oranı arasındaki ilişkidir;

$$\eta_{sys} = \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (4.25)$$

Burada çıkış elektrik enerjisi P_{out} :

$$P_{out} = P_e - P_{aux} \quad (4.26)$$

$$P_{in} = \dot{m}_{H_2,in} \cdot HHV_{H_2} \quad (4.27)$$

Burada brüt çıkış gücü, P_e ve P_{aux} yaygın olarak tüm yardımcı sistem ekipmanlarının tüm parazitik yüklerin toplamıdır;

$$P_{aux} = P_{comp} + P_{pump} + P_{fan} + P_{heater} \quad (4.28)$$

P_{comp} , kompresörün gücü, P_{pump} , hidrojen devridaim ve soğutma devresi pompalarının gücüdür. P_{fan} , soğutma devresi fanının gücüdür ve P_{heater} , ısıtıcının elektrik gücüdür.

4.3. BENZİNLİ BİR MOTORUN MATLAB/SİMÜLİNK ORTAMINDA MODELLENMESİ

Benzinli bir aracın matematiksel modellenmesi simülink ortamında gerçekleştirilmiş olup Şekil 4.65'te ana hatlarıyla görülmektedir. Model kurulumu bütünsel olarak ele alınmış olup model içerisinde buluna alt sistemlerinin detayı ilerleyen bölümlerde anlatılmaktadır.

4.3.1. Sürüş Kontrolcüsünün Modellenmesi

Geliştirilen seyir kontrol sistemi temelde bir sürücü davranışını modellemektir. Şekil 4.66'te oluşturulan model bir sürücü gibi istenilen hıza ulaşmak için gaz pedalı konumunu ayarlayacaktır. Bilindiği üzere gaz pedalı basılı değilken 0 (sıfır) konumunda tam gaz basılı ikende (bir) konumunda nitelendirilecektir.

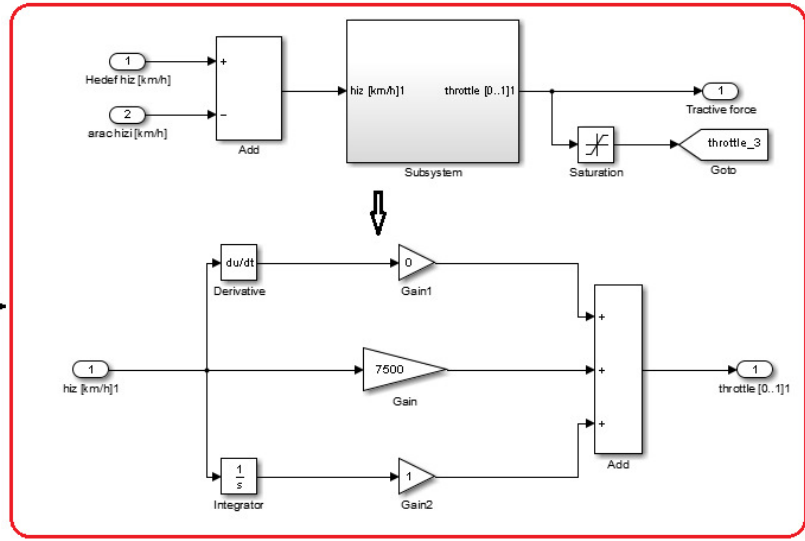
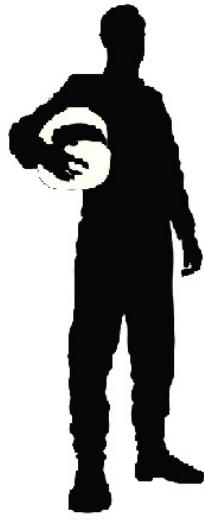
Bu sistemin aşağıdaki görevleri yerine getirileceği düşünülmektedir; Hedefimizdeki (sürüş çevrimine uygun) araç hızını okuma [km/s], Geçerli araç hızını okuma [km/s], Gaz pedalına basarak gaz miktarının kumanda edilmesi. [0 (basılı değilken) 1 (tam basılıya)]

Bu sistem, arabayı istenen hıza ulaşması için sadece gaz pedalını kullanmakta ve bunu sabit tutabilen bir sürücü gibi davranmaktadır. Sürücü Alt modül sistemi Şekil 4.66'de görülmektedir.

Sürücü modülünde istenilen hedef hıza (ECE 15 Avrupa sürüş çevrimi) sürücünün gaz pedalını kontrol etmesi suretiyle taşıtın ulaşması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda şekilde de görüleceği üzere hedef hız ve araç hızı arasındaki fark bir toplam modülü ile belirlenir sonrasında ise bu farka bir PI kontrolcü (zamana bağlı oransal ve integral kontrol yöntemi) uygulanarak araç hızının hedef hız ile aynı değere getirilmesi sağlanır. Ayrıca bu modülde aracın hareket etmesi için gereken çekiş kuvveti araca kazandırılmaktadır.



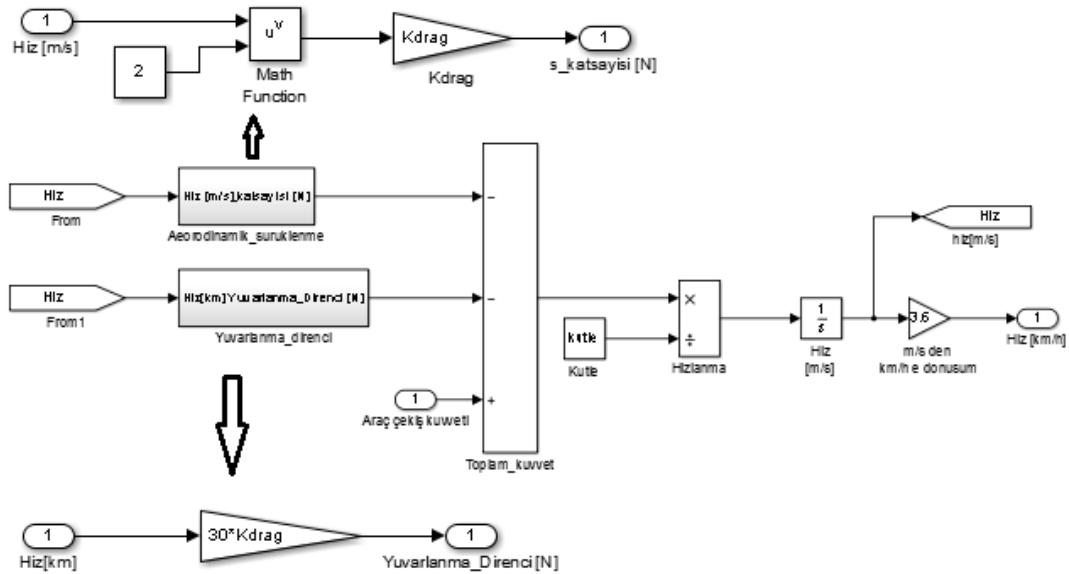
Şekil 4.65. Benzinli bir taşıtın simulink ortamında modellenmesinin genel görünümü.



Şekil 4.66. Sürücü alt modül sistemi.

4.3.2. Taşıt Çekiş Gücünün Modellenmesi

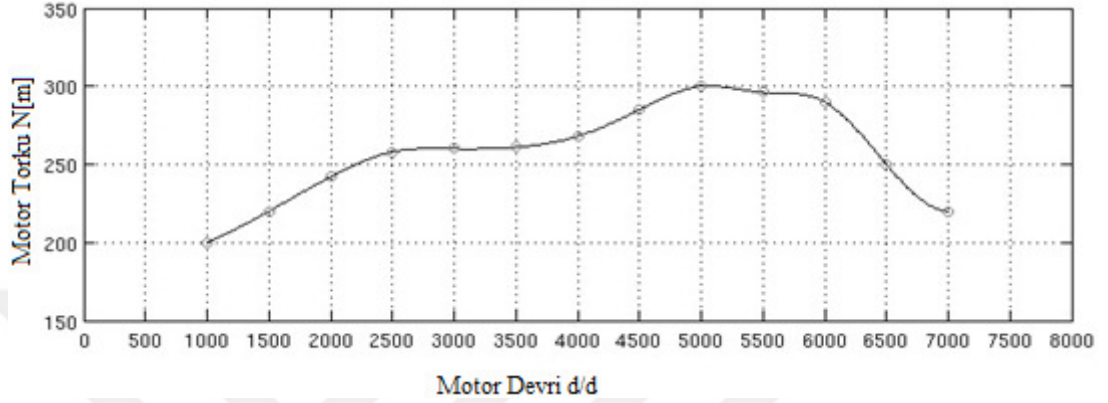
Taşıt çekiş gücünün hesaplanması için tez içerisinde yer alan araç dinamiği ile ilgili matematiksel formüller kullanılmıştır. Şekil 4.67’te görüldüğü üzere araca etkiyen ters yöndeki kuvvetler hesaplanmış ve araç dinamiği modellenmiştir. İlerlemesi için taşıta etkiyen toplam kuvvet hesaplanmaktadır.



Şekil 4.67. Araç dinamiği ile toplam çekiş gücünün modellenmesi.

4.3.3. Motor Gücü, Şanzıman ve Tekerlek Modelinin Oluşturulması

Her içten yanmalı motor, için teknik inceleme kitabında bulunabilecek karakteristik bir tork eğrisine sahiptir. Modellenen taşıtımız için tork eğrisi Şekil 4.68’da gösterilmektedir.



Şekil 4.68. Motor torku.

Şekil 4.68’da, krank mili üzerinde ölçülen maksimum torku (gaz kelebeği tamamen açıkken) göstermektedir. Motor ve tekerlekler, şanzıman ve diferansiyel aracılığıyla birbirine bağlanmış; önce değişken bir dişli oranı sonra sabit bir final oranı uygulanmıştır.

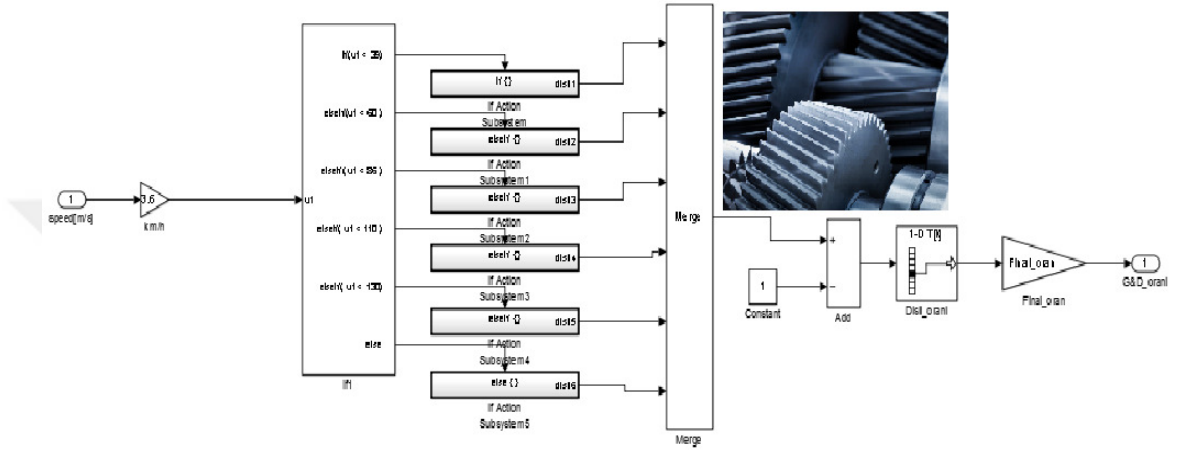
Aracın hızının motor devrine (d/d) ve son olarak da motor torkunun motor gücüne çevrilmesi gerektiği için şanzıman ve diferansiyel toplam oranlarının tamamı hesaba katılarak dikkate alınmıştır.

Şanzıman ve diferansiyel aktarım oranı mevcut hıza çıkış olurken, tekerlerden motor devrine dönüşüm, mevcut aktarma oranı ve mevcut hız temel alınarak mevcut d/d (çıkış) olmaktadır. Motor, gaz kelebeği komutunu alarak ve elde edilen tork karşılığında oluşan motor devrini vermektedir. Torktan kuvvete dönüşüm ise, motor torkunun motorun arabaya uyguladığı kuvvete dönüştürülmesiyle gerçekleşmektedir.

4.3.4. Vites Kutusu Modeli

Krank milinden tekerleğe olan dönüş iki kere azaltılmaktadır. İlki redüktörde vites büyütme/küçültme ile diğeri ise sabit redüksiyon oranı olan diferansiyelde değiştirilmektedir. Modellenen taşıt için, mevcut hızı temel alması nedeniyle

otomatik vites yapısı seçilmiştir. Viteslere göre dişli oranları = [3.500; 2.235; 1.520; 1.156; 0.971; 0.818] olarak belirlenmiştir. Ayrıca Model taşıt için diferansiyel, 3.733'lük bir son oran (K_{Final}) uygulamaktadır. Örnek; birinci viteste, motorun krank mili, tekerlek ekseninden 13 kat ($3.5 * 3.733$) daha hızlıdır. Altıncı viteste ise sadece üç kat daha hızlı ($0.818 * 3.733$) dönmektedir. Şekil 4.33'de otomatik vites alt modülü verilmiştir.



Şekil 4.69. Otomatik Vites Alt Modülü.

Şekil 4.69'de nihayi vites kutusu oluşturulmuştur. Hız değerlerine göre seri bir şekilde vites değiştirebilen bir şanzıman modeli meydana getirilmiştir. Son (Final) oran ise diferansiyel oranını belirlemektedir. Sistem aracın hızı 39 km/h ve altında iken taşıt 1. Vites oranına sahip oluyorken, aracın hızı 130 km/h'den düşük iken 5. Vites oranına sahiptir. Modelleme ortamında vites oranları araç hızına göre bir tablo üzerinden diferansiyelle iletmekte ve son oran ile çarpılarak o andaki gerekli olan dişli oranları belirlenmektedir.

Bu alt sistemin çıkışı araç hızını motor devrine ve daha sonra elde edilen bu devir değeri ile motor torkunu elde etmek için kullanılmaktadır.

4.3.5. Taşıt Tekerlek Modeli

Şekil 4.68'de görülen bu alt sistemin amacı iki giriş kullanarak motor devri elde etmektir. Araç hızı ve kombine (dişli ve diferansiyel) redüksiyon oranını kullanılarak motor devri elde edilebilmektedir. Model taşıtın tekerlek teknik özellikleri aşağıdaki gibidir;

Modelleme aracı tekerlek özellikleri; 185/45R17’dir. Bu özelliklerden yola çıkarak;

Tekerlek jant çapı 17 inç = 0.4318 m

Lastik kesit yüksekliğinin 185 mm’nin %45 $\approx$ 83.3 mm

Tekerlek yarıçapı $0.4318 / 2 + 0.0833 = 0.2992$ m olarak hesaplanmaktadır.

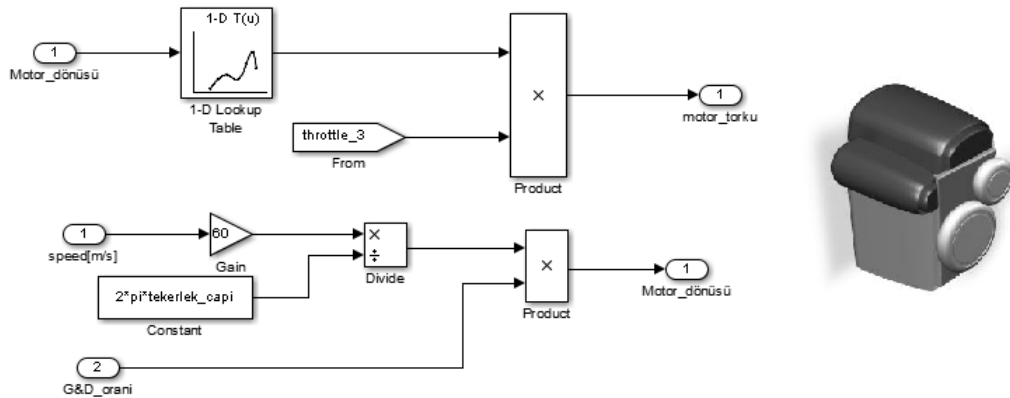
Araç hızı (V) tekerleğin dönüş hızına çevrilebilmektedir. (d/d, dakikadaki devir sayısı). $d/d_{tekerlek}$, arabanın 60 saniye içinde seyahat ettiği mesafenin ($v*60$), tekerlek çapına bölünmesiyle elde edilmektedir. (yani, tekerleğin yarıçapı $r_{tekerlek}$ ’in 2π katı olmaktadır).

Motor ve tekerlekler şanzıman ve diferansiyel yoluyla birbirine bağlanmaktadır. d/d_{motor} , dişli ve diferansiyel oranlarıyla çarpılarak elde edilen $d/d_{tekerlek}$ ’e eşittir. Bu durumda Simülink modelleme ortamında uygulanacak formül aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$d/d_{tekerlek} = \frac{V*60}{2\pi r_{tekerlek}} \quad (4.29)$$

$$d/d_{motor} = \frac{V*60}{2\pi r_{tekerlek}} * Oran_{disli+diferansiyel} \quad (4.30)$$

Motor torku alt modülü Şekil 4.70’te verilmiştir.



Şekil 4.70. Motor torku modülü alt sistemi.

Bu alt sistem ile, motor torku (τ_{motor}) hesaplanmaktadır. Girişler, önceki alt sistemden gelen motor devri ve sürücü sistemindeki gaz keleşbeği konumundan oluşmaktadır. Aşağıdaki eşitlik 4.31 ile hesaplanabilmektedir.

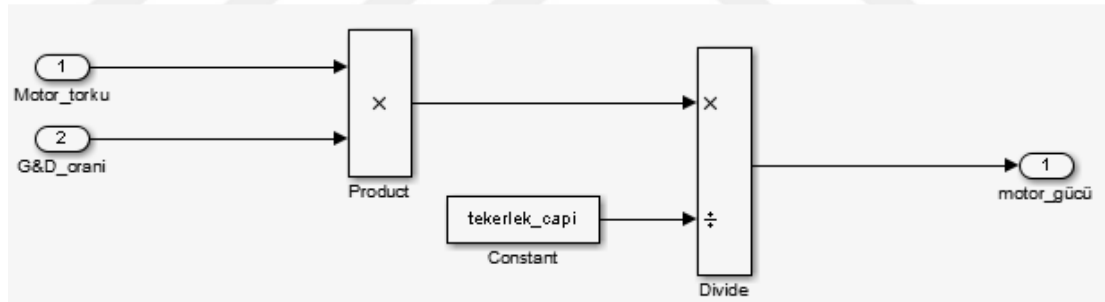
$$\tau_{motor} = \tau_{maksimum} * gaz_keleşbeęi_konumu \quad (4.31)$$

Çizelge 4.7’deki veriler doğrultusunda motor torku, iki nokta arasında bir değeri veren kübik eğri uydurma metodu ile hesaplanabilmektedir.

Çizelge 4.7. Maksimum tork ve d/d değeri

Motor Hızı d/d	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000
Tork [Nm]	200	220	242	258	260	261	268	285	300	296	290	250	220

Motor gücü hesaplama alt modülü Şekil 4.71’te verilmiştir.



Şekil 4.71. Motor gücü hesaplama alt modülü.

Bu alt sistem sağlanan motor torkunu τ_{motor} , araca uygulanan F kuvvetine çevirmektedir. Newton’un üçüncü yasası sayesinde, aynı F kuvvetinin tekerlekler tarafından yere uygulandığı anlaşılmaktadır. Eşitlik 4.32 ve 4.33 kullanılarak, tork tanımını hatırlayarak ve aynı zamanda dişli ve diferansiyel oranlarını uygulayarak F kuvveti tekerlek torku $\tau_{tekerlek}$, ve motor torku ile ilişkilendirebilir.

$$\tau_{tekerlek} = F * r_{tekerlek} = \tau_{motor} * Disli_oranı \quad (4.32)$$

$$F = (\tau_{motor} * Disli_oranı) / r_{tekerlek} \quad (4.33)$$

BÖLÜM 5

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde ilk olarak; Bölüm 4'de modellenen hibrit elektrikli taşıt ile benzinli taşıtın simülasyon analiz sonuçları verilmiştir. Her iki taşıt modeli toplam 58 km den oluşan Karabük-Safranbolu sürüş çevrimi boyuca ortalama 38 km araç hızı ile simüle edilmiş olup analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

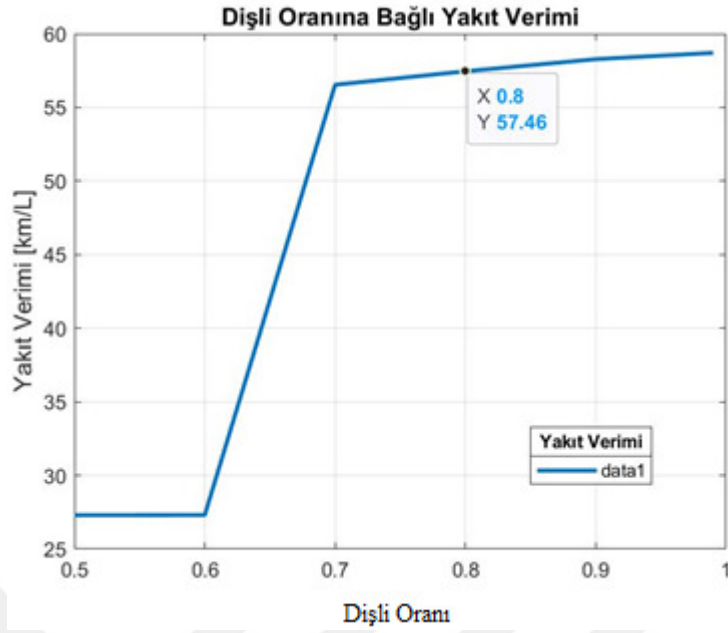
İkinci olarak modellenen yakıt pilli taşıt ECE-15 Sürüş Çevrimi dahilinde Bölüm 4'teki algoritmalar kullanılarak sürülmüştür ve sonuçlar incelenmiştir. Ayrıca yakıt pilli taşıt PEM yakıt hücresinin analiz sonuçları verilmiştir.

5.1. BENZİNLİ BİR TAŞIT İLE HİBRİT ELEKTRİKLİ BİR TAŞITIN SİMÜLASYON ANALİZ SONUÇLARI

Çalışmanın bu kısmında hibrit benzinli bir araç dinamik modelinin simülasyon sonuçları verilmiştir. Ayrıca HEA ile benzinli araç yakıt tüketimleri bakımından kıyaslanmıştır.

5.1.1. HEA Dişli Oranının Yakıt Verimine (1 L yakıtla alınan yol) Etkisi

HEA dişli oranının yakıt verimine etkisi Şekil 5.1' verilmiştir. Dişli oranı 0,7-1,0 arasında maksimum yakıt verimi elde edilmiştir. Ortalama 1 L yakıtla 57,46 km yol alındığı görülmektedir.



Şekil 5.1. Elektrik motoru ile taşıt arasındaki dişli verimi ile yakıt verimi arasındaki ilişki.

5.1.2. HEA Dinamiğinin Yakıt Verimine Etkisi

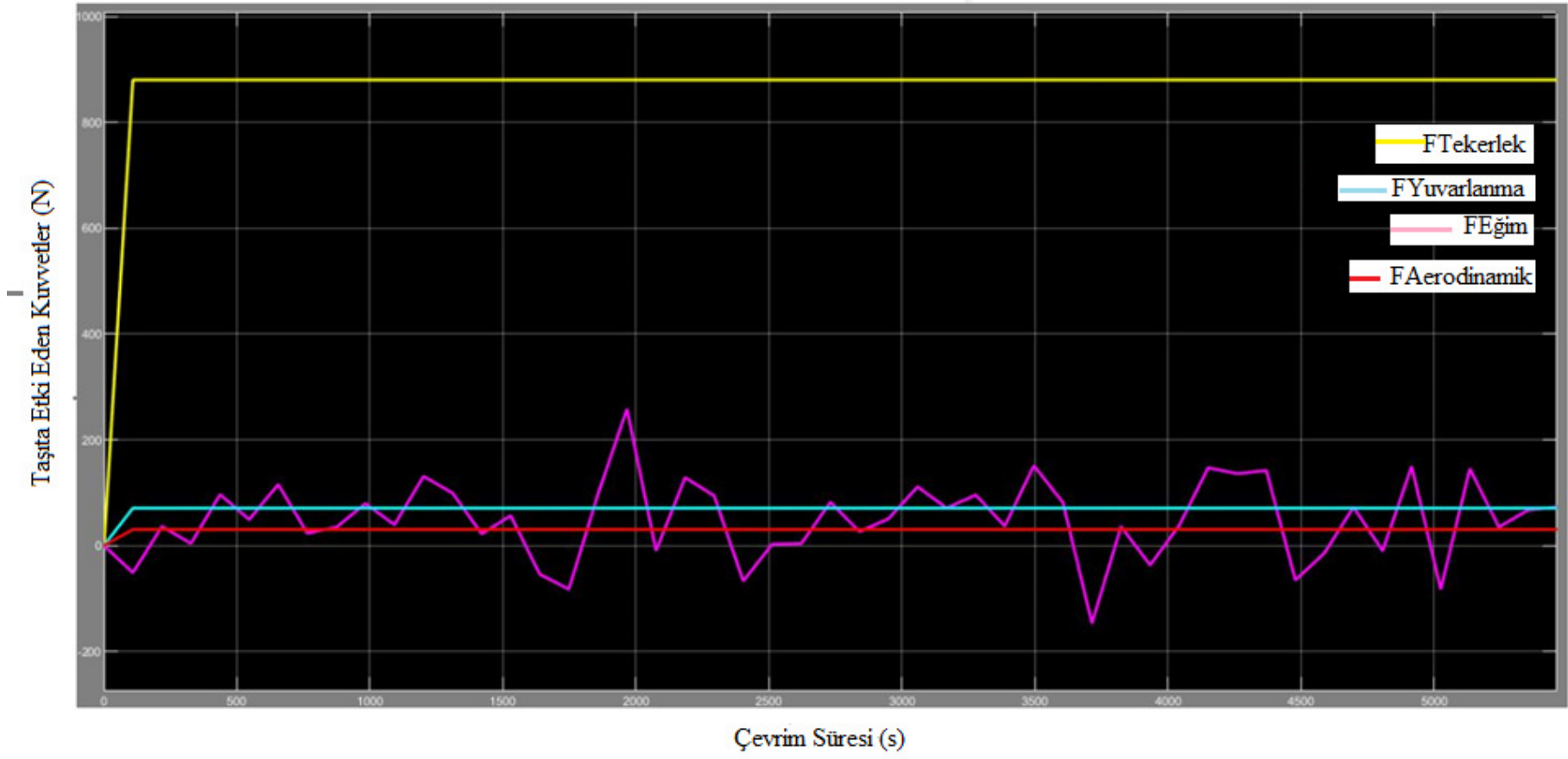
Sürüş çevrimi boyunca toplam çekme kuvveti ile araca etkiyen direnç kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.2’de verilmiştir.

5.1.2.1 HEA Yuvarlanma Direnci Katsayısının Yakıt Verimine Etkisi

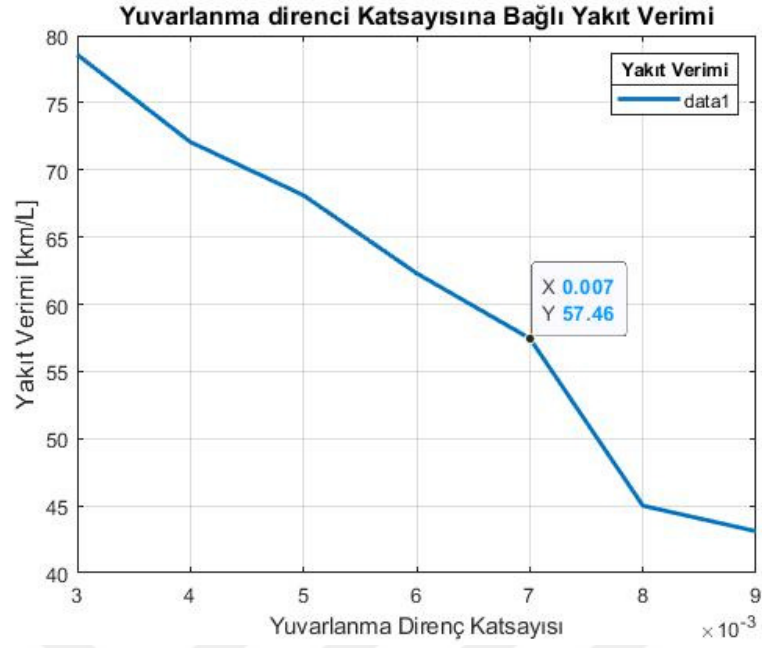
Yakıt verimi ile yuvarlanma direnci ters oranda bir etki oluşturmaktadır. Şekil 5.3’de görüldüğü üzere model taşıt için tahmin edilen 0.07 yuvarlanma direnci değeri işaretlenmiştir. Yuvarlanma direnci yakıt verimi üzerinde büyük etki oluşturmaktadır. Yuvarlanma direnci arttıkça 1L yakıtla alınan yol azalmaktadır.

5.1.2.2. HEA Aerodinamik Direnci Katsayısının Yakıt Verimine Etkisi

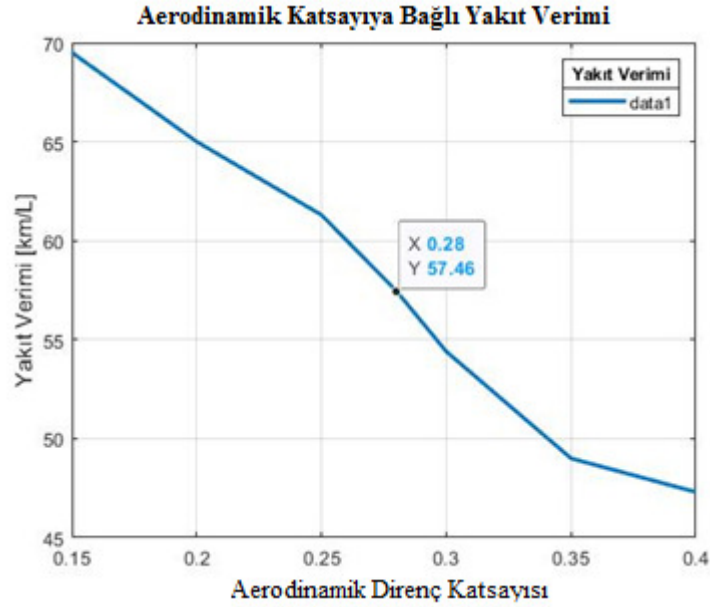
Yakıt verimi ile aerodinamik direnç arasındaki etki Şekil 5.4’ de verilmiştir. Şekil üzerinde model taşıt için tahmin edilen 0.28 aerodinamik direnci değeri işaretlenmiştir. Aerodinamik direnç, yakıt verimi üzerinde önemli bir etkiye neden olmaktadır. Aerodinamik direnç katsayısı arttıkça yakıt verimi azalmaktadır.



Şekil 5.2. Araç toplam çekme kuvveti ve araca etkiyen direnç kuvvetlerinin değişimi.



Şekil 5.3. Yuvarlanma direnci katsayısının yakıt verimine etkisi.

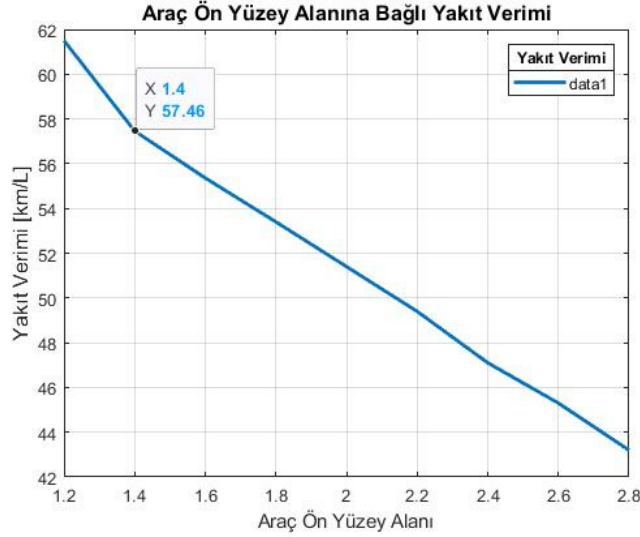


Şekil 5.4. Aerodinamik direnç katsayısının yakıt verimine etkisi.

5.1.2.3. HEA Ön Yüzey Alanının Yakıt Verimine Etkisi

Araç ön yüzey alanı ile yakıt verimi arasında tersine bir etki görülmektedir. Araç ön yüzeyi arttıkça yakıt verim değeri azalmaktadır. Şekil 5.5'te model taşıt için tahmin edilen 1.4 m² ön yüzey alanı değeri işaretlenmiştir. Araç ön yüzey alanı, aerodinamik

direnç kuvveti ve yuvarlanma direnç kuvveti yakıt verimi üzerinde oldukça önemli bir etkiye neden olmaktadır. Araç ön yüzey alanı arttıkça yakıt veriminin azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.5. Araç ön yüzey alanı ile yakıt verimi arasındaki ilişki.

5.1.3. Hibrit Elektrikli Taşıt Kontrolü

Bu kısımda sürücü kontrolüne göre sürüş boyunca araç hızı, pozisyonu, kalan yakıt miktarı, süper kapasitörün voltaj değerine göre İYM açık ve kapalı durumu Şekil 5.6, Şekil 5.7'de görülmektedir.

Şekil 5.6 incelendiğinde daha önceki bölümde bahsedilen Karabük-Safranbolu çevrimi mesafesi olan 58 km'lik mesafeyi, araç hızına uygun bir şekilde tamamlamaktadır. Ve aynı zamanda araç hızına ve pozisyonuna göre tüketilen yakıt tüketimi ile İYM açık veya kapalı durumu senkronize bir şekilde görülebilmektedir. Bu durum ise sürüş kontrolcüsünün hassas ve gerçekçi bir kontrol sağladığını göstermektedir. Böylece sürüş kontrolcüsü istenilen ve hedef hız olan Karabük-Safranbolu sürüş çevrimi hızı ile araç hızını birbiri ile uyumlamaktadır. Bu durum ise bize gerçek hız vektörü ile simülasyon hız vektörünü birbiri ile senkronize edilmesini sağlayarak, modelin simülasyon sonuçlarının gerçekçi olmasını sağlamaktadır.

Şekil 5.7 incelendiğinde sürüş çevrimi boyunca İYM sürüş kontrolcüsü tarafından süper kapasitörün şarj durumuna göre çalıştırılarak süper kapasitörün jeneratör tarafından şarj edilmesini sağlamaktadır. Sürüşün sonuna doğru süper kapasitörün

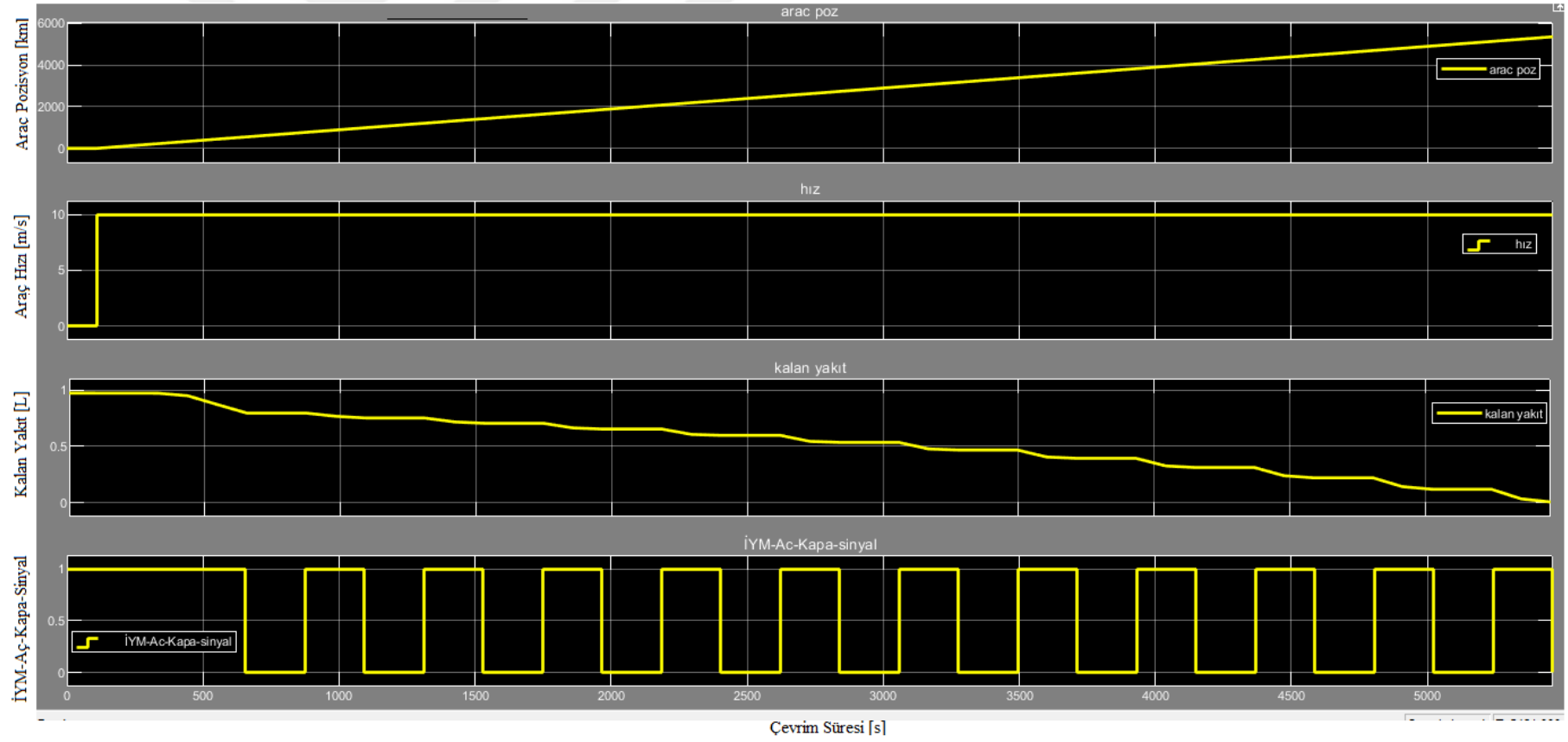
aşırı deşarj olma durumuna ise çevrimin sonuna doğru tırmanma eğiminin artması ile aşırı güç gerektiği için ve aracın soğutma sisteminin olmaması nedeniyle sistemin ısınmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu durum kısa sürede kontrolcü tarafından düzeltilmekte olup, süper kapasitörün şarj olmasını sağlamakta ve aracı normal sürüş moduna sokmaktadır. Ayrıca bu sürüş çevrimi boyunca yol şartlarına bağlı araçtan istenen güç miktarına göre İYM 2500 kez açılıp kapanmaktadır.

5.1.4. Hibrit Taşıt Modeli ile Benzinli Taşıt Modelinin Yakıt Verimliliği Açısından Karşılaştırılması

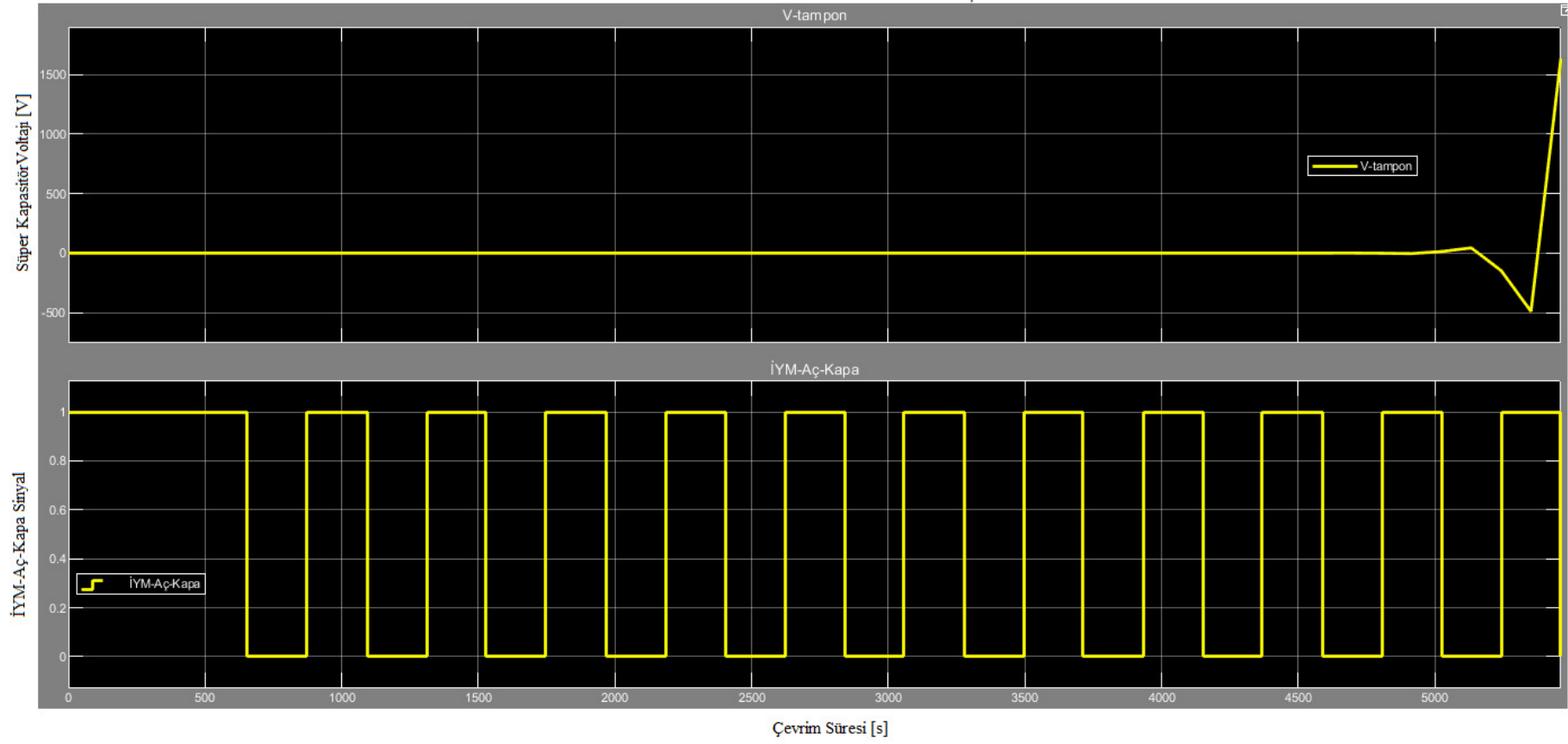
Bu bölümde Karabük-Safranbolu çevrimi boyunca öncelikle hibrit bir araç modeli sürülmüş, ardından aynı özelliklere ve parametrelere sahip benzinli bir araç modeli sürülmüş ve her iki aracın yakıt ekonomisi Çizelge 5.1'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.1. Hibrit ve benzinli bir aracın yakıt ekonomisi karşılaştırılması

KARABÜK-SAFRANBOLU ÇEVİRİM-58 KM				
Yakıt Ekonomisi	L/100Km	Km/L	Çevrim Boyunca Tüketilen Toplam Yakıt (L)	Çevrim Süresi (sn)
Benzinli Taşıt	6,90	15,98	3,624	5461
Hibrit Benzinli Taşıt	1,74	57,46	0,9124	5461



Şekil 5.6. Araç pozisyon, hız, kalan yakıt ve İYM açık veya kapalı durumu grafiği.



Şekil 5.7. Süper kapasitör şarj durumuna göre İYM açık veya kapalı durumu.

Çizelge 5.1 incelendiğinde hibrit bir taşıtın yaklaşık olarak 4 kat daha az yakıt tüketimine sahip olduğu görülmektedir. Hibrit taşıt bir litre yakıt ile 57,46 km yol alabiliyorken benzinli bir taşıt 15,98 km yol alabilmektedir. Yine aynı şekilde hibrit taşıt 100 km'de 1,74 L yakıt tüketirken benzinli bir taşıt 6,90 L tüketmektedir. Ayrıca Karabük-Safranbolu çevrimi boyunca hibrit taşıt 0,9124 L yakıt tüketirken benzinli taşıt 3,624 L yakıt tüketmiştir. Böylece anlaşılabileceği üzere hibrit araç hem daha avantajlı yakıt tüketimine sahipken hem de çevreye olan emisyon etkileri daha az olmaktadır.

Standart sürüş çevrimleri, otomobil üretim teknolojilerinin düzenlenmesi gibi bazı avantajlara sahiptir. Özellikle, iyi kontrol edilen bir laboratuvar koşulunda standart sürüş çevrimlerine dayanan yakıt tüketimi ve emisyon tahminleri, üreticiler, araç tipleri, yakıt türleri ve model yılları arasında karşılaştırılabilmektedir.

5.2. YAKIT PİLLİ ARACIN SİMÜLASYON SONUÇLARI

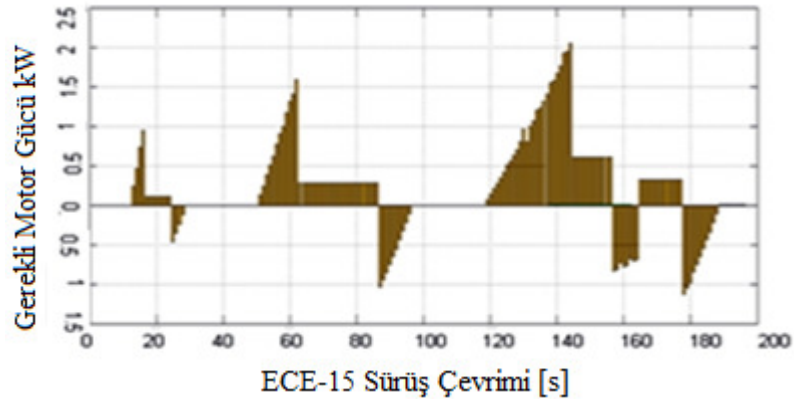
Bu bölümde, MATLAB'da bir otomotiv PEM yakıt hücresi sistemi modeli için bir sabit durum termodinamik modeli geliştirilmiştir. Model, bir PEM yakıt hücresi modelinden ve kompresör, pompalar, fan, ısıtıcılar ve nemlendiriciler gibi gerekli tüm yardımcı bileşenler için alt modellerden oluşur. PEM yakıt hücresi yığını modeli standardı için, belirli çalışma koşullarında Nernst voltajı hesaplanmış ve aktivasyon, literatürdeki mevcut teorik ve ampirik yaklaşımlar kullanılarak omik ve konsantrasyon kayıpları modellenmiştir. Tüm yardımcı bileşenler, sıfır boyutlu sabit durumlu kütle ve enerji dengesi denklemleri kullanılarak modellenmiştir. Araç hızı ve işletme basıncı gibi çeşitli işletme parametrelerinin sistem bileşenlerinin büyüklüğü, ısı ve su oluşumu, yakıt tüketimi ve verimlilik üzerindeki etkilerini belirlemek için sistem modeli kullanılmıştır. PEM yakıt hücresi yığını, 3 atm çalışma basıncında maksimum 90 kW gücünde 230 hücreden oluşacak şekilde tasarlanmıştır.

Bir otomotiv PEMFC sistemi dinamik bir şekilde Matlab ortamında modellenerek bir sürüş çevrimi boyunca simülasyon gerçekleştirilmiştir. PEM yakıt hücresi sistemini gereken koşullarda çalıştırmak için kompresör, pompalar, nemlendiriciler ve ısı eşanjörü için termodinamik modeller gereklidir. Bu bileşenler de Matlab ortamında modellenerek modelin gerçekliği artırılmış olup, elde edilen sonuçlar gerçek zamanlı olmaktadır.

Kurnia vd., simüle edilmiş sürüş döngüsü koşulları altında değişken giriş akışlarına sahip bir PEM yakıt hücresi yığınının performansını değerlendirmişlerdir. İncelenen PEM yakıt hücresi yığını, 1600 cm² aktif katalizör alanına sahip 320 hücre içermektedir. Çalışmalarında, yasal sürüş döngüsü; ECE-15 şehir içi sürüş döngüsü ve bir şehir dışı sürüş döngüsü (EUDA) içeren Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü (NEDA) kullanmışlardır. İlki, şehir içi sürüş koşullarını temsil eder ve düşük araç hızlarıyla karakterize edilirken, ikincisi karayolu sürüş koşullarını temsil eder ve yüksek araç hızı ile karakterize edilmektedir. Ayrıca, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımını kullanarak NEDA tabi araç uygulaması için bir PEM yakıt hücresi yığınının performansını değerlendirerek, NEDA profilini takip eden değişken girişin PEM yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çeşitli olası senaryolar, yani sabit giriş akışları, anotta değişken giriş akışları, katot, soğutucu ve bunların kombinasyonları, sayısal sonuçlar ışığında inceleyerek tartışmışlardır. Sonuçta, değişken giriş akışlarının, yığın gücü açısından yığın performansı üzerindeki marjinal etkilerine rağmen, üretilen toplam net güç, termal zarf ve sıvı doygunluğu üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır [154]. Benzer şekilde, bu tez kapsamında PEM yakıt hücresi yığınının (625 m² ve 230 hücre aktif katalizör alanına sahip) performans değerlendirilmesinde ECE-15 şehir içi sürüş döngüsü kullanılarak yakıt hücresinin verimini etkileyen bileşenler analiz edilmiştir.

5.2.1. Taşıt Modeli İçin Güç Gereksinimi

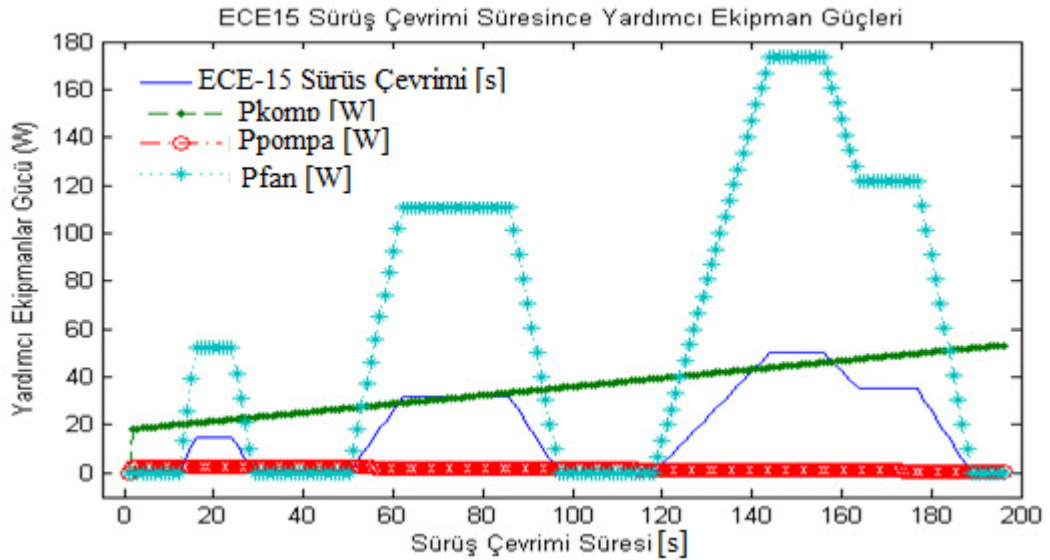
Taşıt için gerekli olan çekme kuvveti bu sistemde yakıt hücresi tarafından sağlanmaktadır. Gaz keleşği pozisyonuna göre model içerisinde çalışan algoritmalar aracın hız fonksiyonuna göre gerekli çıkış gücünü üretmektedir [154]. Şekil 5.8'de, 3 atm çalışma basıncı için araç hızının bir fonksiyonu olarak gereken güç çıkışını göstermektedir. Görüleceği üzere hız değerlerindeki değişim gerekli çıkış gücünü doğrudan etkilemektedir.



Şekil 5.8. Gerekli güç çıkışı.

5.2.2. Sistemi Oluşturan Yardımcı Ekipmanların Güç Gereksinimi

PEM yakıt hücresi sistemini gereken koşullarda çalıştırmak için kompresör, pompalar, nemlendiriciler ve ısı eşanjörü gibi yardımcı ekipmanlar gerekmektedir. Sistemin çalışması esnasında yardımcı ekipmanlarda güç gereksinimine duymaktadır. Bu nedenle yakıt hücresi güç üretimini ve yakıt tüketimini doğrudan etkilemektedir [115–117]. Yardımcı ekipmanların güç gereksinimleri Şekil 5.9’da verilmiştir.



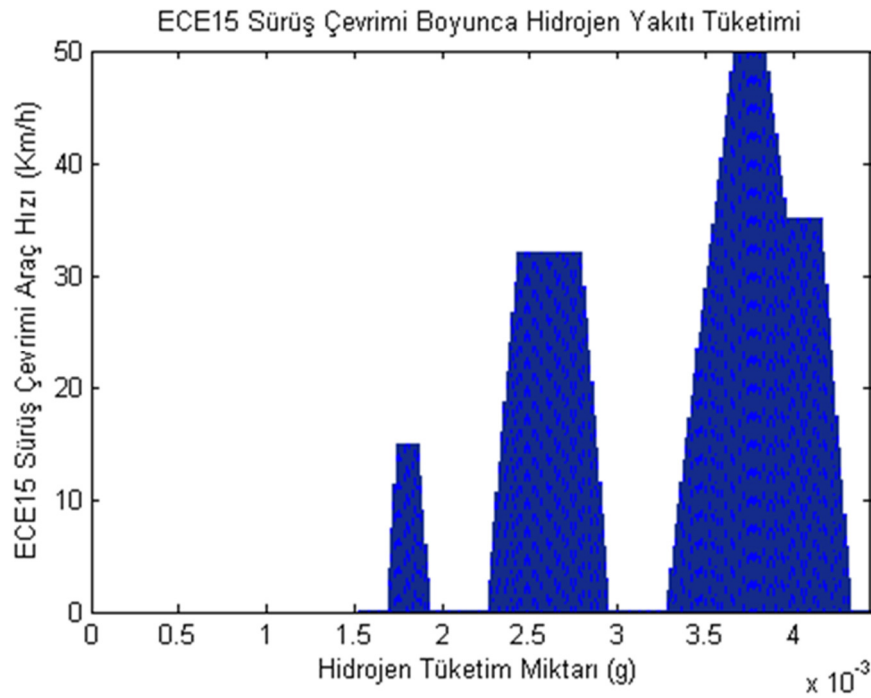
Şekil 5.9. Araç hızının bir fonksiyonu olarak her bir yardımcı ekipman güç gereksinimi.

Şekil de üç (3) atm çalışma basıncında araç hızının bir fonksiyonu olarak yardımcı gücün yayılımı görülmektedir. Yardımcı bileşenler arasında bir kompresör, elektrikli

ısıtıcı, soğutucu pompası, enjeksiyon pompası, radyatör fanı ve bir intercooler fan bulunur. Bu şekilden, fan tarafından tüketilen elektrik gücünün, diğer yardımcı bileşenler tarafından tüketilen elektrik enerjisi oranından daha hızlı büyüdüğünü görmek mümkündür. Ayrıca, sıkıştırılmış havanın bir intercooler kullanılarak bir nemlendiriciye girmeden önce soğutulmuştur. Nemlendiriciye gelen havanın sıcaklığının bir hava soğutucusunda düştüğü görülmüştür.

5.2.3. Yakıt Hücresi Hidrojen Tüketimi

Modelin yakıt hücresi, PEM (Polimer Elektrolit Membranlı) yapıdan oluşmaktadır. Bu elektrot yapısına sahip yakıt hücrelerinde kullanılan yakıt hidrojendir. Hidrojenin kullanılmasıyla hem araç çevreye emisyon oluşturmamakta hem de verim oranı yükselmektedir. YPA hidrojen tüketimi Şekil 5.10'da verilmiştir.

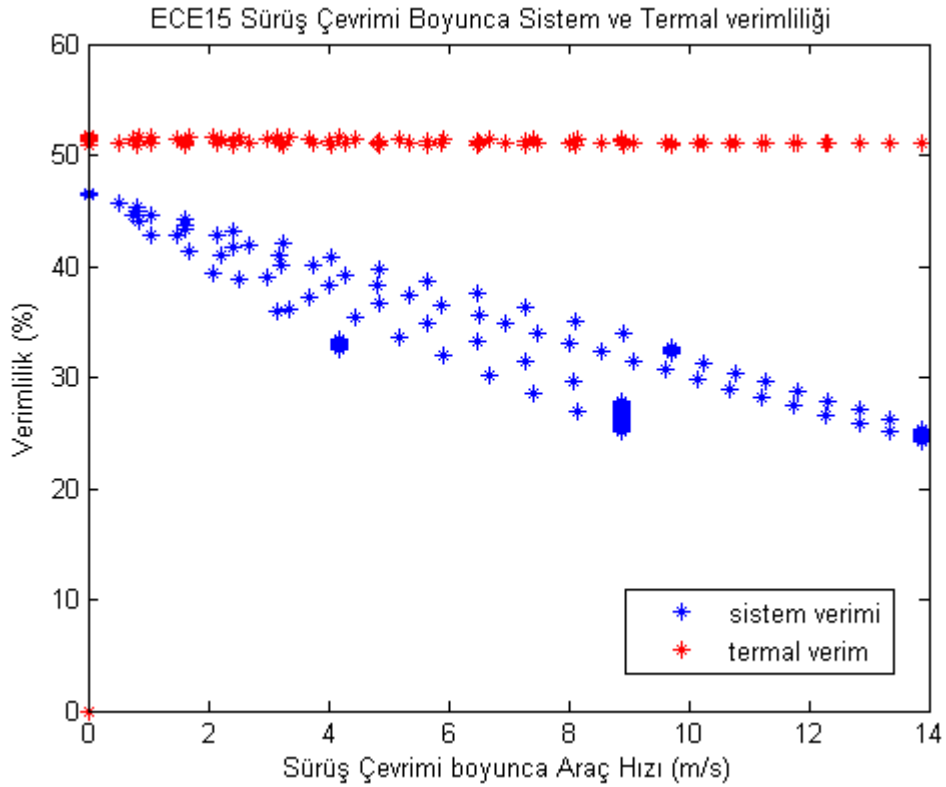


Şekil 5.10. Hidrojen yakıt tüketimi.

Bir yakıt hücresinin ürettiği elektrik enerjisi, tüketilen yakıt miktarıyla doğru orantılıdır. Sürüş çevriminde, aracın hızı arttığında, daha fazla miktarda enerjiye ihtiyaç duyulduğu açıktır, dolayısıyla daha fazla yakıt tüketilmiştir [145, 148, 155].

5.2.4. Sistem Verimliliği

Bu bölümde sistemin genel verimliliği ve termal verimliliği incelenmiştir. Sistemin genel verimliliği sistemin işletilebilirlik derecesini belirlemektedir. Bu nedenle Şekil 5.11. incelendiğinde, araç hızının bir fonksiyonu olarak verimlilik değerleri görülmektedir. Bu şekildeki değerler yakıt hücresi termal verimliliğini ve sistem termal verimliliğini göstermektedir. Yakıt hücresi ısı verim eğrileri, üretilen elektrik ile taşıt tahrikine yönelik maksimum kullanılabilir çalışma arasındaki ilişkiyi sunmaktadır. Aracın yakıt tüketimindeki artışa bağlı olarak aracın hızını artırarak yakıt hücresi ısı veriminin azaldığı eğrilerden görülmektedir.



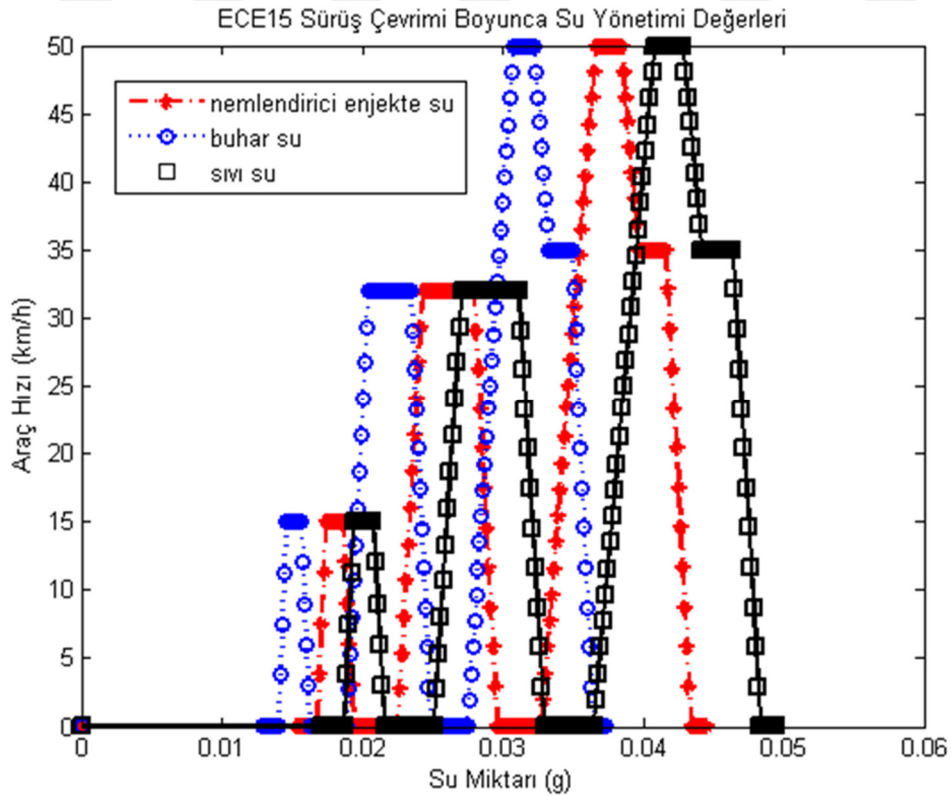
Şekil 5.11. Sistemin genel verimliliği.

Sistem termal verim eğrilerinde, 0 m/s'den 14 m/s'ye kadar araç hızındaki artışın sistem ısı verimliliğini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Bu, esas olarak, kompresör ve diğer yardımcı bileşenlerin tükettiği elektrik enerjisinden kaynaklanmaktadır. Uygun çalışma parametrelerini girerek, bu çalışmada üretilen model sistem optimizasyonu yapabilir ve sistem için en iyi çalışma koşulu seçebilir.

5.2.5. Su Yönetimi

PEMFC sisteminin su dengesinde, ortam havasındaki sisteme giren su miktarı, ayrıca nemlendirilmiş gazlara enjekte edilen su miktarı, ayrıca elektrokimyasal reaksiyon nedeniyle katodun içinde üretilen su, sistemden çıkan su miktarından büyük veya ona eşit olmalıdır. Egzoz havası ve hidrojen ile egzozdaki su sıvı veya gaz halinde olabilir.

Şekil 5.12, 3 atm basıncı için araç hızının bir fonksiyonu olarak nemlendirme işlemi için gerekli olan yığının çıkışındaki su (sıvı ve buhar) miktarını göstermektedir. Sonuç olarak, yakıt hücresi yığınının çıkışındaki suyun ortalama değerinin %60 sıvı su ve %40 su buharından oluştuğu sonucuna varılmıştır. Yüksek basınçlarda suyun buhar basıncı yüksektir, bu nedenle suyun kaynama noktası artar. Bu nedenle, artan çalışma basıncı ile sıvı su miktarı artar. Ayrıca, yakıt hücresinin çıkışındaki sıvı suyun, enjekte edilen sudan daha büyük olduğu ve bir kondenser kullanmadan yakıt hücresine girmeden önce reaktifleri nemlendirmeye yetecek kadar olduğu görülmektedir.

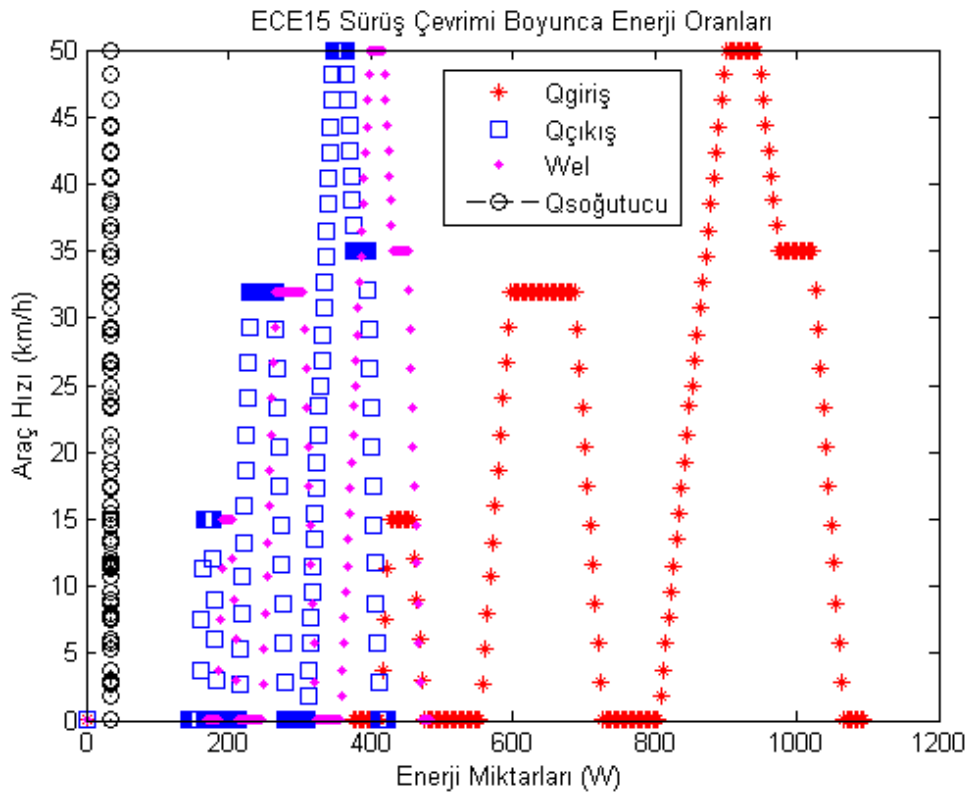


Şekil 5.12. Yakıt hücresi su yönetimi.

5.2.6. Enerji Yönetimi

Termal yönetim, yakıt hücresi yığın sisteminin geliştirilmesindeki en önemli özelliklerden biridir, çünkü ısı, bir PEM yakıt hücresinde bir elektrokimyasal reaksiyon yoluyla büyük miktarlarda üretilir. Oluşan ısıнын oranı çok yüksekse, yakıt hücresi fazla ısınır ve membran dehidrasyona yol açabilir. Düşük sıcaklıklar kimyasal reaksiyonun hızını azaltır, verimliliği azaltır ve su yoğunlaşmasına ve elektrotların taşmasına neden olabilir.

Yukarıda belirtildiği gibi, bir yakıt hücresinin performansı ve dayanıklılığı için gerekli olan hücreler içinde istenen sıcaklıkların muhafaza edilmesi ve istifin yakıt hücresi yığın sisteminin ısınmasını engellemek için uygun termal yönetim gereklidir. Araç hızının bir fonksiyonu olarak yakıt hücresi sistemi enerji dengesi Şekil 5.13'te görülmektedir. Üretilen elektrik enerjisinin toplamı, kullanılmayan reaktif gazlarla bırakılan enerji oranı ve yakıt hücresinden ısı uzaklaştırma oranı, reaktant gazlarla giren enerji oranına eşit olmalıdır.



Şekil 5.13. Sistem enerji yönetimi.

5.2.7. Sistemin Soğutulması İçin Gerekli Radyatör Alanı ve Soğutucu Sıvı Akış Oranı

Yakıt hücreleri verimi sıcaklıkla ters orantılı olarak değişmektedir. Sıcaklık arttıkça yakıt hücresi verimi ve dolayısıyla sistemin verimi düşmektedir. Bu nedenle sistemin iyi bir şekilde soğutulması gerekmektedir.

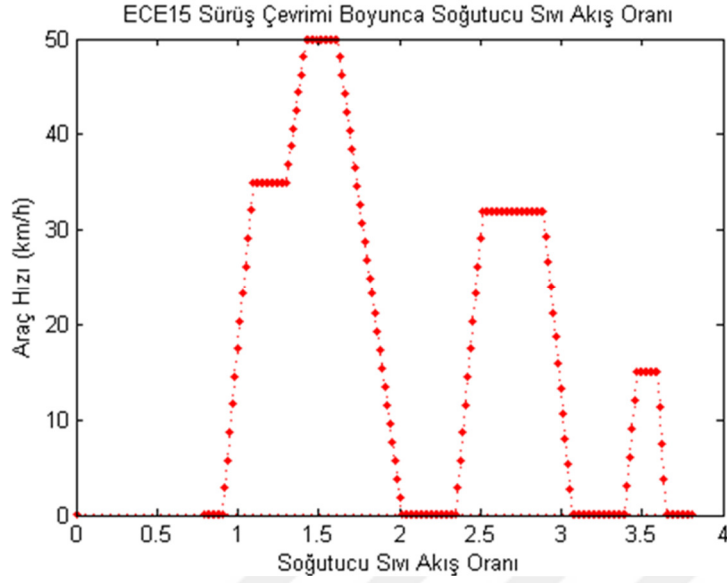
Sıcaklık verime ters etki ettiği için sistem soğutması için gerekli radyatör tipi ve büyüklüğünün doğru seçilmesi önemli olmaktadır. Sistem için gerekli radyatör alanı Şekil 5.14’de görülmektedir.



Şekil 5.14. Sistemin için gerekli radyatör alanı (cm²).

Isı değiştiricinin (radyatörün) boyutu yakıt hücresi yığından çıkarılacak ısı miktarına bağlıdır ve aynı zamanda işletme basıncından da etkilenir. Radyatör alanı yakıt hücresi gücünün artmasıyla birlikte artmaktadır. Bu, radyatörün boyutunun sistem termal performansını etkileyecek temel faktör olduğu anlamına gelmektedir.

Şekil 5.15, araç hızının soğutucu akışkan debisi miktarına etkisini göstermektedir. Araç hızının artması durumunda yakıt hücresi yığınının ihtiyaç duyulan gücün de arttığını ve artan atık ısı çıkışına uyacak şekilde soğutucu akış hızının artırılması gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.15. Soğutucu sıvı akış oranı.

Bu çalışmada, bir yakıt hücresi yığını, hava tedarik sistemi, hidrojen tedarik sistemi ve bir termal devre içeren bir otomotiv PEM yakıt hücresi sistemi için bileşen modellerini entegre edilmeye çalışılmıştır. Entegrasyon, bir yakıt hücresi sisteminin tasarım parametrelerini incelemek, özellikle de gerçekçi yakıt hücresi sisteminin karakteristik özelliği, termal ve su yönetimi ile birlikte tesis dengesi araştırılmıştır. Bu analizlerden çıkarılan birkaç sonuç aşağıdadır.

- Sistemin çalışma basıncının artırılması, yakıt hücresi ısı verimini artırır, ancak sistemin ısı verimi üzerinde etkisi yoktur.
- Sistem basıncının yakıt yoğunluğunun güç yoğunluğu ve su dengesi özellikleri üzerinde önemli bir olumlu etkisi vardır.
- Araç hızının artırılması sistem verimliliği ve istif verimliliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir.
- Yardımcı bileşenler, PEM yakıt hücresi sistemini çalıştırmak için gereklidir, ancak sistem verimliliğini düşürür.
- Yüksek işletme basıncı su yönetimini iyileştirir, çünkü yüksek basınçlarda aynı bağıl nem seviyelerine ulaşmak için daha az suya ihtiyaç duyulur. Bununla birlikte, yüksek basınçlı sistemler kompresörü çalıştırmak için yakıt hücresi çıkış

gücünün yüksek bir yüzdesini kullanır ve bu da sistem verimliliğinde bir miktar kayba neden olur.

- Su yönetimi, düşük basınçta çalışan sistemlerdeki sorunlardan biridir, çünkü nemlendirme işlemleri için büyük miktarda suya ihtiyaç duyarlar ve nemlendiricinin ve kondansatörün boyutları artar. Bununla birlikte, bu parazitik güç gereksinimi, fan yoğunlaştırıcı nedeniyle artar.
- Çalışma basıncı arttıkça, radyatörün boyutu artmaktadır.

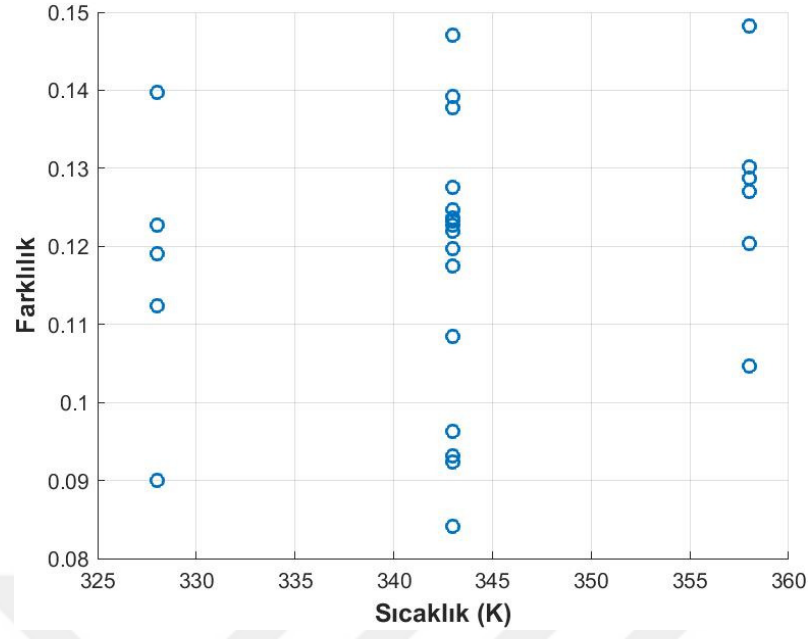
5.3. YAKIT PİLİ MODELİ VALİDASYONU

Bir PEM yakıt hücresinin çeşitli çalışma akımları ve sıcaklıkları üzerindeki performansını tahmin etmek için parametrik bir model geliştirilmiştir. Parametrik denklem, doğrusal bir regresyon analizinden aktivasyon aşırı gerilimini tahmin etmektedir. Çizelge 5.2'de Amphlett ve arkadaşları tarafından yakıt pili üzerinde yapılan bir deneysel çalışmadan alınan veriler ile, bu tez çalışmasında oluşturulmuş olan model üzerinden tahmin değerleri elde verilmiştir. Elde edilen tahmin değerleri ile yapılmış olan deneysel çalışma verileri arasında regresyon analizi yapılarak bu çalışmada oluşturulan modelin validasyonu gerçekleştirilmiştir.

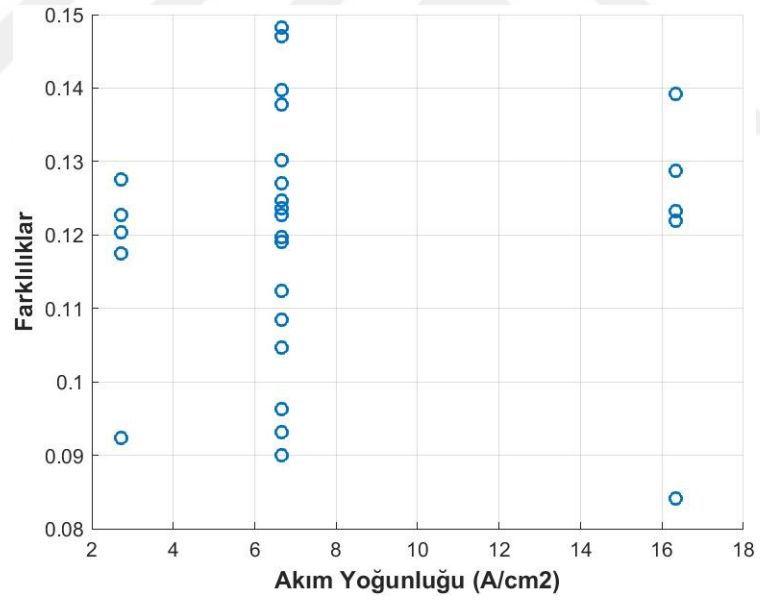
Şekil 5.16 ve 5.17'de sıcaklık ve akım yoğunluğu dağılım grafikleri verilmiştir. Şekil 5.16 ve Şekil 5.17 incelendiğinde geliştirilen parametrik model içerisindeki hem akım hem de sıcaklık değerleri deneysel metot verileri ile hata miktarları bakımından çok yakınsamaktadır. Bu nedenle parametrik model ile deneysel model verileri çok iyi bir şekilde uyumlu olmaktadır. Böylece oluşturulan modelin gerçekçi bir model olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.2. Deneysel ve hesaplanmış değerler.

Deney sayısı	Sıcaklık (K)	Akım	Deneysel aşırı aktivasyon voltajı (V)	Tez Çalışması Modelinden Tahmin edilen Aşırı aktivasyon voltajı (V)
1	358	2.72	-0.2717	-0.3921
2	328	6.66	-0.4017	-0.4917
3	343	6.66	-0.3522	-0.4719
4	358	6.66	-0.3038	-0.4520
5	343	6.66	-0.3341	-0.4719
6	343	6.66	-0.3756	-0.4719
7	328	6.66	-0.3727	-0.4917
8	343	2.72	-0.322	-0.4144
9	343	6.66	-0.3492	-0.4719
10	343	6.66	-0.3472	-0.4719
11	328	2.72	-0.3141	-0.4368
12	328	6.66	-0.352	-0.4917
13	343	6.66	-0.3482	-0.4719
14	358	6.66	-0.3473	-0.4520
15	358	6.66	-0.352	-0.4520
16	358	6.66	-0.3218	-0.4520
17	343	16.33	-0.4075	-0.5294
18	343	16.33	-0.3902	-0.5294
19	343	6.66	-0.3492	-0.4719
20	343	6.66	-0.3788	-0.4719
21	358	16.33	-0.3834	-0.5121
22	343	2.72	-0.2969	-0.4144
23	343	6.66	-0.3249	-0.4719
24	343	2.72	-0.2868	-0.4144
25	343	16.33	-0.4453	-0.5294
26	353	6.66	-0.3502	-0.4586
27	328	6.66	-0.3793	-0.4917
28	343	16.33	-0.4062	-0.5294

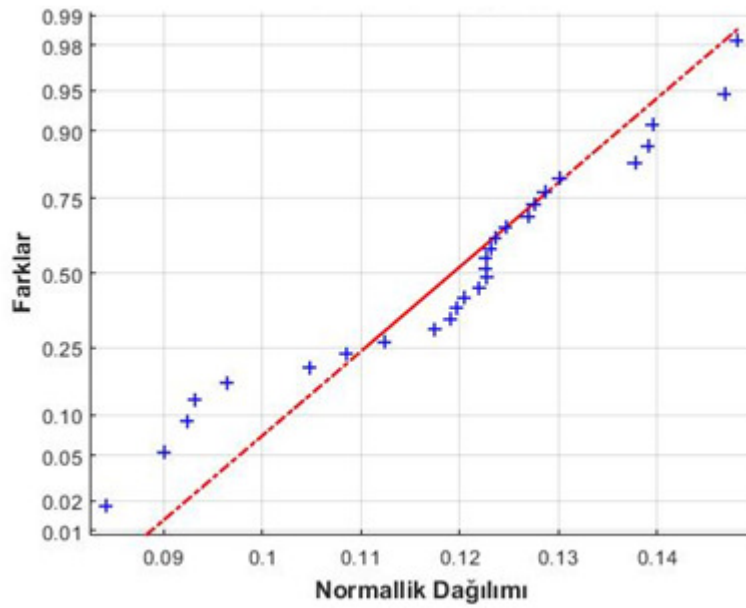


Şekil 5.16. Sıcaklık dağılım grafiği.



Şekil 5.17. Akım yoğunluğu dağılım grafiği.

Şekil 5.18, incelendiğinde, normal dağılım için teorik doğru ortadaki çizgidir. Artı şeklinde (mavi) noktalar ise modelden elde edilen verilerdir. Bu veriler bu teorik doğrunun alt ve üst kısımlarında dağılmış durumdadır. Alt ve üst kısımlarda bulunan veriler normal dağılım teorik doğrusuna ne kadar yakın ise ve bu doğrudan sapmalar az ise ve aykırı sapmalar yoksa veriler normal dağılım gösteriyor denebilmektedir. Yukarıdaki grafiklere bakıldığında veri setleri için teorik normal dağılım doğrusundan çok fazla uzaklaşmadığı görülmektedir. Bu nedenle bu veri setleri normal dağılım gösteriyor denilebilir.



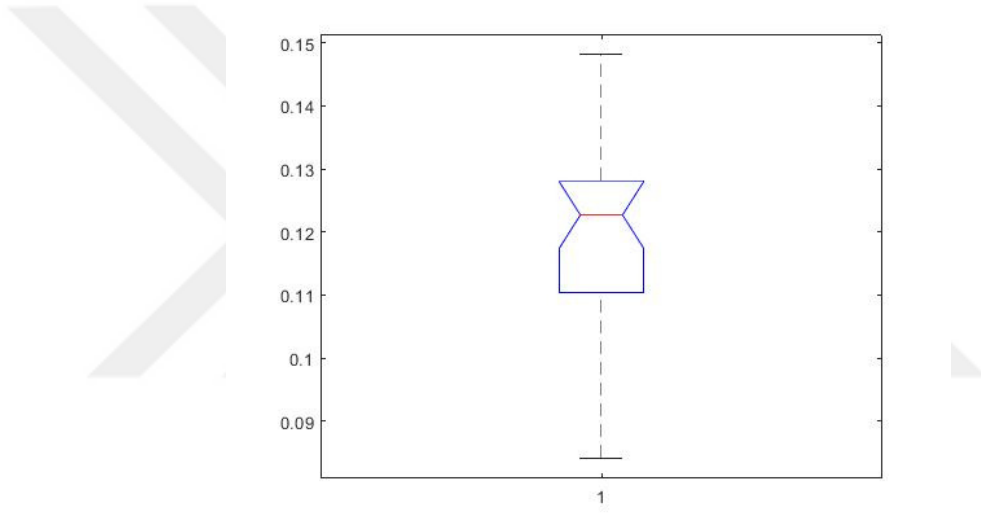
Şekil 5.18. Normallik grafiği.

Şekil 5.19 incelendiğinde bir kutu grafiği görülmektedir. Kutu grafiği bir veri setinin yığılmalarını gösterir. En alttaki yatay çizgi verinin alt kısımdaki yığılımlarını gösterirken en üstteki yatay çizgi verinin üst kısımdaki yığılımları göstermektedir. Kutu içerisinde bulunan yatay çizgi ise verinin medyan değerini vermektedir. Kutunun en alttaki yatay çizgi ile kutunun alt kısmı arasındaki mesafe veri setinin ilk çeyreklik kısmını (ilk %25'lik kısmı) belirtirken veri setinin üst kısımdaki yatay çizgi ile kutunun üst kısmındaki mesafe ise verinin son çeyreklik kısmını (son %25'lik kısmı) gösterir.

Kutu grafiğinde veri setinin normal dağılımı ile ilgili yorum yapılırken, ortadaki yatay çizginin kutunun olabildiğinde orta noktasında olması istenir. Ayrıca alt yatay

çizgi ile kutunun altındaki mesafe ve üst yatay çizgi ile kutunun üst kısmı arasındaki mesafenin oldukça birbirine yakın olması istenir.

Şekil 5.19'daki veri setinin kutu grafiği incelendiğinde ortadaki yatay çizginin yani medyan değerinin kutunun tam ortasına oldukça yakın olduğu gözükmemekte ve aynı zamanda alt yatay çizginin kutunun altına olan mesafesi ile üst yatay çizginin kutunun üstüne olan mesafesinin eşit olduğu söylenebilir. Bu nedenlerle veri seti için normal dağılım sergilediği görülebilir. Normal dağılım gösteren verilerde istenilen değerden sapma az olacağı için oluşturulan modelin oldukça doğru bir şekilde deneysel verilere yakın olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.19 Kutu grafiği.

Şekil 5.20'de, Anova testinden elde edilen veriler, $0.11295 \leq \text{Hata Ortalaması} \leq 0.12598$ ile %95 güven aralığında, 50.93 F değeri ve anlamlılık düzeyi 0.0004 olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre kurulan model anlamlı bulunmuştur. Anlamlılık değeri 0.100'den büyükse, bu modelin anlamlı olmadığını gösterir. Çok sayıda önemsiz veri varsa, model iyileştirme için anlamsız verileri azaltmak modeli iyileştirebilir.

Varyans Analizi					
Veriler	Kareler toplamı	d.f. -	Ortalamalar	F	Anlamlılık değeri
X1	0.00696	2	0.00348	11.45	0.0004
X2	0.03096	2	0.01548	50.93	0
Error	0.00699	23	0.0003		
Total	0.04324	27			

Şekil 5.20. Anova analizi tablosu.

PEM yakıt pilleri, enerji kullanımımızı, kirlетici emisyonlarımızı ve fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı azaltma potansiyeline sahiptir. Son on yılda, bu teknolojinin ticarileştirilmesi için önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Örneğin, birkaç PEM yakıt hücresi otobüsü şu anda gerçekçi sürüş ortamlarında tam ölçekli doğrulamanın teknik hazır olma aşamasında derecelendirilerek, ABD Enerji Bakanlığı tarafından belirlenen 25.000 saatlik nihai hedefi karşılamıştır. Toyota ise şimdiye kadar 4000'den fazla Mirai PEM yakıt hücresi aracını (YPA) satmıştır. PEM yakıt hücrelerinin taşınabilir, otomobil, uçak ve uzay uygulamalarında ticarileştirilmesinde karşılaştıkları teknolojik durum ve zorluklar bulunmaktadır. Özellikle, su ve termal yönetim, dinamik çalışma, soğuk çalıştırma, kanal iki fazlı akış ve düşük nemli çalışma gibi yakıt hücresi tasarımı, operasyonel kontrol ve malzeme geliştirme için anahtar olan temel konulardır [157]. Bu teknolojik durum ve zorlukların çözülmesine katkı sağlamak için, bu tez kapsamında PEM yakıt hücreli bir araç modellenmiş olup, incelenerek verimliliğine bakılmıştır. Bu araçta sürüş çevrimi boyunca araç hızına göre sistem ve termal verimliliği, su yönetimi, sistemin soğutulması için gerekli radyatör alanı ve soğutucu sıvı akış oranı gibi önemli temel konular analiz edilerek kayda değer sonuçlar elde edilmiştir.

BÖLÜM 6

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez kapsamında; benzinli bir taşıt, hibrit elektrikli bir taşıt ve yakıt hücresel bir taşıt Matlab/SIMULINK ortamında dinamik olarak modellenmiştir. Modellenen taşıtların sürüş çevrimleri ile araç optimizasyonlarına ve enerji verimliliklerine bakılmıştır.

Benzinli bir taşıt ile HEA Karabük-Safranbolu arasında oluşturulan sürüş çevrimine göre sürülerek her iki taşıt yakıt tüketimi ve yakıt verimliliği bakımından kıyaslanmıştır. Sürüş çevrimi için, yol şartları, aracın çevrim boyunca her bir konumundaki GPS verilerinden elde edilen yükseklik ve mesafe değerlerine göre belirlenmiştir. Simülasyon sonucuna göre; hibrit benzinli taşıtın yakıt verimi 57,46 km/L olurken benzinli taşıtın yakıt verimi 15,9 km/L olmuştur. Yaklaşık olarak hibrit benzinli taşıt, benzinli taşıta göre 4 kat daha iyi yakıt verimine sahip olması yanında emisyon değerleri de önemli ölçüde iyileşmektedir. Hibrit elektrikli taşıt 100 km'de 1,74 L yakıt tüketirken, benzinli taşıt 6,90 L yakıt tüketmiştir. 5641 sn ve 58 km'lik Karabük-Safranbolu çevrimi boyunca hibrit elektrikli taşıt 0,9124 L yakıt tüketirken benzinli taşıt 3,624 L yakıt tüketim değerine ulaşmıştır.

Ayrıca bu sürüş çevrimine göre HEA'nın taşıt dinamiği parametrelerinin yakıt verimine etkileri de incelenmiştir. Taşıt yakıt verimini önemli ölçüde düşüren etken araca uygulanan direnç kuvvetleri (aerodinamik, yuvarlanma ve tırmanma direnci) olmaktadır. Yakıt verimi ile yuvarlanma direnci ters oranda bir ilişki bulunmaktadır. Model taşıt için yuvarlanma direnç katsayısı 0,07 olmaktadır. Bu katsayı değeri 0,07'den 0,09 değerine artırıldığında yakıt verimi %33 azalmıştır. Taşıtın aerodinamik yapısı yakıt tüketimini etkilemektedir. Taşıt aerodinamik direnç katsayısı 0,28 değerinden 0,15 değerine indirildiğinde yakıt veriminde %34 civarında iyileşme olurken; katsayı 0,28'den 0,40 değerine çıkarıldığında yakıt veriminde %17 azalma belirlenmiştir. Taşıt ön yüzey alanı ile yakıt verimi arasında

ters yönde bir ilişki bulunmaktadır. Taşıt ön yüzey alanı $1,4 \text{ m}^2$ 'den $1,2 \text{ m}^2$ 'ye azaltıldığında yakıt veriminde %7 artış meydana gelmiştir. Ancak taşıt ön yüzey alanı $1,4 \text{ m}^2$ 'den $2,8 \text{ m}^2$ 'ye artırıldığında yakıt verimi %28 oranında düşmüştür. Elektrik motoru ile tekerlekler arasındaki dişli verimi ile yakıt verimi arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Model taşıtta kullanılan dişli oranı 0,8'dir. Yakıt verimi dişli oranı 0,99 değerine yükseltilerek iyileştirilebilir. Dişli oranı 0,8 değerinden 0,5 değerine düşürüldüğünde yakıt veriminde %52 kayıp olurken; dişli verimi 0,99 değerine çıkarıldığında ise %3 lük verim artışı meydana gelmektedir. Dişli oranı 0,5-0,7 değerleri arasında olduğunda yakıt verimi çok düşük seviyelere inmektedir.

Modellenen yakıt hücresi sistemi; yakıt pili yığını ve sistem yardımcı bileşenlerinden (kompresör, fan, pompa, nemlendirici) oluşmaktadır. Oluşturulan yakıt pili sistemi 625 cm^2 alana sahip ve 230 hücreden oluşmakta olup yaklaşık 90 -140 kW arası güce çıkabilmektedir. Bu tip bir yakıt pili günümüz araçlarına uygun güç üretmekte olup bütünsel bir sistem olduğu için rahatlıkla bir araca uygulanabilir yapıdadır. Yakıt pilli araç ECE-15 sürüş çevrimi ile sürülerek test edilmiştir. ECE-15 sürüş çevrimi boyunca yakıt pili sisteminin, enerji ve su yönetimi, ısı transferi, yakıt tüketimi ve sistem verimliliği ile sistem dizaynı incelenmiştir. Yardımcı bileşenlerden en fazla enerji tüketimi 165 W ile fandan kaynaklanırken, ardından sırası ile kompresör 38 W ve pompa 15 W enerji tüketmektedir. Sürüş çevrimi boyunca 0.004 g hidrojen yakıtı tüketilmiştir.

Yakıt pili su yönetimi incelendiğinde 3 atm çalışma basıncı için, yakıt hücresi yığınının çıkışındaki suyun ortalama değerinin %60 sıvı su ve %40 su buharından oluştuğu sonucuna varılmıştır. Yakıt pili termal yönetimi yakıt hücresi yığın sisteminin verimi için en önemli özelliklerden biridir. Bunun nedeni ise üretilen ısıнын oranı çok yüksekse, yakıt hücresi fazla ısınır ve membran dehidrasyona yol açabilir. Düşük ısı üretiminde ise yakıt pili sıcaklığı düşeceği için kimyasal reaksiyonun hızını azaltır, verimliliği azaltırken su yoğunlaşmasına ve elektrotların taşmasına neden olabilmektedir. Yakıt pili termal yönetimi incelendiğinde sisteme giren ısıнын değeri 1100 W olurken, çıkış ısısının değeri 400 W olmaktadır. Aradaki 700 W enerji farkı ise üretilen elektrik ve sistemden uzaklaştırılan reaktant gazların ısı enerjisinden kaynaklanmaktadır. Yakıt pili soğutma sistemi incelendiğinde yakıt

pilinin soğutulması için toplam 14 cm²'lik bir radyatör alanına ihtiyaç duyulmakta ve soğutucu sıvı akış oranı 3,5 dolaylarında olmaktadır.

Yakıt hücresi sistem modelini doğrulamak için, çok iyi bilinen bir yakıt pili üretici olan Ballard firmasının ürettiği "Ballard Mark IV" modeli üzerinde yapılmış olan deneysel bir çalışma sonucu üretilen deneysel veriler ile bu çalışmada üretilen modelden elde edilen tahmin değerleri arasında regresyon yapılmıştır. Model verilerinin deneysel verilere oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca iki veri için normallik değerleri incelendiğinde deneysel veri ile model verinin normal dağılım gösterdiği görülmüştür. Yapılan ANOVA testi sonucunda, %95 güven aralığında, 50.93 F değeri ve anlamlılık düzeyi 0.0004 olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre kurulan model anlamlı bulunmuştur.

EA'ların yaygınlaşması için maliyeti düşürücü yönde çalışmalar yapılabilir. Özellikle yüksek maliyete sahip batarya teknolojisinin iyileştirilmesi alanında araştırmalar yapılabilir.

EA'lar içinde en yüksek verime sahip YPA'ların maliyeti yakıt hücresi katalizör malzemesinden dolayı yüksektir. Alüminyum gibi farklı malzemeler kullanılarak maliyet düşürülebilir.

EA modelleri farklı sürüş çevrimlerinde sürülerek verimlilikleri incelenebilir.

YPA'larda yakıt hücresi giriş-akış değerleri değiştirilerek aracın performansı araştırılabilir.

Yakıt hücrelerinde giriş ve çıkış manifold tasarımları değiştirilerek hücre parametrelerine etkisi incelenebilir.

Bu çalışmanın, gelecekteki süregelen prototip araç çalışmalarına stratejik avantajlar ve yenilikler sağlayacağı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar ve son zamanlarda hem taşıt hem de yakıt hücresi teknolojilerindeki güncel gelişmeler özellikle çevresel emisyonların giderilmesi için umut verici bir çözüm sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Revankar, S. T. and Majumdar, P., "Fuel Cells: Principles, Design, and Analysis", **CRC Press**, 754 (2014).
2. Meyer, R. T. and Revankar, S., "A Survey of PEM Fuel Cell System Control Models and Control Developments", **ASME 2006 Fourth International Conference On Fuel Cell Science, Engineering And Technology, Parts A And B, ASME 2006 4th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology**, Irvine, California, USA, 63–79 (2006).
3. Patil, K., Molla, S. K., and Schulze, T., "Hybrid Vehicle Model Development using ASM-AMESim-Simscape Co-Simulation for Real-Time HIL Applications", **SAE 2012 World Congress & Exhibition**, 2012-01–0932 (2012).
4. Das, H. S., Tan, C. W., and Yatim, A. H. M., "Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies", **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, 76: 268–291 (2017).
5. Hosseini, M., Shamekhi, A. H., and Yazdani, A., "Modeling and Simulation of a PEM Fuel Cell (PEMFC) Used in Vehicles", **SAE 2012 World Congress & Exhibition**, 2012-01–1233 (2012).
6. Davis, S. C., Diegel, S. W., and Boundy, R. G., "Transportation Energy Data Book: Edition 28. US Department of Energy", **Center For Transportation Analysis, Oak Ridge, Tenn.: National Laboratory**, (2000).
7. Planning, U. S. E. P. A. O. of A. Q. and Air, U. S. E. P. A. O. of, "Latest Findings on National Air Quality: 2000 Status and Trends", **US Environmental Protection Agency, Office Of Air Quality Planning And Standards**, (2001).
8. JOST, K., "Fuel-cell concepts and technology", **Automotive Engineering**, (2000).
9. Panik, F., "Fuel cells for vehicle applications in cars-bringing the future closer", **Journal Of Power Sources**, 71 (1–2): 36–38 (1998).
10. Rajashekara, K., "Propulsion system strategies for fuel cell vehicles", **SAE Technical Paper**, (2000).
11. Ajanovic, A. and Haas, R., "Economic and Environmental Prospects for Battery Electric- and Fuel Cell Vehicles: A Review", **Fuel Cells**, 19 (5): 515–529 (2019)

12. Abu Mallouh, M., Abdelhafez, E., Salah, M., Hamdan, M., Surgenor, B., and Youssef, M., "Model development and analysis of a mid-sized hybrid fuel cell/battery vehicle with a representative driving cycle", *Journal Of Power Sources*, 260: 62–71 (2014).
13. Gomez, A., Sasmito, A. P., and Shamim, T., "Investigation of the purging effect on a dead-end anode PEM fuel cell-powered vehicle during segments of a European driving cycle", *Energy Conversion And Management*, 106: 951–957 (2015).
14. Hu, Z., Li, J., Xu, L., Song, Z., Fang, C., Ouyang, M., Dou, G., and Kou, G., "Multi-objective energy management optimization and parameter sizing for proton exchange membrane hybrid fuel cell vehicles", *Energy Conversion And Management*, 129: 108–121 (2016).
15. Kang, S. and Min, K., "Dynamic simulation of a fuel cell hybrid vehicle during the federal test procedure-75 driving cycle", *Applied Energy*, 161: 181–196 (2016).
16. Tribioli, L., Cozzolino, R., Chiappini, D., and Iora, P., "Energy management of a plug-in fuel cell/battery hybrid vehicle with on-board fuel processing", *Applied Energy*, 184: 140–154 (2016).
17. Tolj, I., Lototskyy, M. V., Davids, M. W., Pasupathi, S., Swart, G., and Pollet, B. G., "Fuel cell-battery hybrid powered light electric vehicle (golf cart): Influence of fuel cell on the driving performance", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 38 (25): 10630–10639 (2013).
18. Fares, D., Chedid, R., Panik, F., Karaki, S., and Jabr, R., "Dynamic programming technique for optimizing fuel cell hybrid vehicles", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 40 (24): 7777–7790 (2015).
19. Fernández, R. Á., Cilleruelo, F. B., and Martínez, I. V., "A new approach to battery powered electric vehicles: A hydrogen fuel-cell-based range extender system", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 41 (8): 4808–4819 (2016).
20. Mayur, M., Strahl, S., Husar, A., and Bessler, W. G., "A multi-timescale modeling methodology for PEMFC performance and durability in a virtual fuel cell car", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 40 (46): 16466–16476 (2015).
21. Stobart, R. K., "Fuel Cell Power for Passenger Cars-What Barriers Remain?", *SAE Technical Paper*, (1999).
22. Yang, W., Bates, B., Fletcher, N., and Pow, R., "Control challenges and methodologies in fuel cell vehicle development", *SAE Technical Paper*, (1998).

23. Kalhammer, F. R., Prokopius, P. R., Roan, V. P., and Voecks, G. E., "Status and prospects of fuel cells as automobile engines", *State Of California Air Resources Board, California*, (1998).
24. Fronk, M. H., Wetter, D. L., Masten, D. A., and Bosco, A., "PEM fuel cell system solutions for transportation", *SAE Transactions*, 212–219 (2000).
25. Badrinarayanan, P., Ramaswamy, S., Eggert, A., and Moore, R. M., "Fuel cell stack water and thermal management: impact of variable system power operation", *SAE Transactions*, 456–463 (2001).
26. Fuchs, M., Barbir, F., Husar, A., Neutzler, J., Nelson, D. J., Ogburn, M., and Bryan, P., "Performance of automotive fuel cell stack", *SAE Transactions*, 1657–1661 (2000).
27. Barbir, F., Fuchs, M., Husar, A., and Neutzler, J., "Design and operational characteristics of automotive PEM fuel cell stacks", *SAE Technical Paper*, (2000).
28. Amphlett, J. C., Baumert, R. M., Mann, R. F., Peppley, B. A., Roberge, P. R., and Rodrigues, A., "Parametric modelling of the performance of a 5-kW proton-exchange membrane fuel cell stack", *Journal Of Power Sources*, 49 (1–3): 349–356 (1994).
29. Kim, J., Lee, S.-M., Srinivasan, S., and Chamberlin, C. E., "Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation", *Journal Of The Electrochemical Society*, 142 (8): 2670 (1995).
30. Mann, R. F., Amphlett, J. C., Hooper, M. A., Jensen, H. M., Peppley, B. A., and Roberge, P. R., "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell", *Journal Of Power Sources*, 86 (1–2): 173–180 (2000).
31. Marr, C. and Li, X., "Performance modelling of a proton exchange membrane fuel cell", *American Society of Mechanical Engineers, New York, NY (United States)*, (1998).
32. Amphlett, J. C., Baumert, R. M., Mann, R. F., Peppley, B. A., Roberge, P. R., and Harris, T. J., "Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell: I. Mechanistic model development", *Journal Of The Electrochemical Society*, 142 (1): 1 (1995).
33. Bernardi, D. M. and Verbrugge, M. W., "A mathematical model of the solid-polymer-electrolyte fuel cell", *Journal Of The Electrochemical Society*, 139 (9): 2477 (1992).
34. Bevers, D., Wo, M., Yasuda, K., and Oguro, K., "Simulation of a polymer electrolyte fuel cell electrode", *Journal Of Applied Electrochemistry*, 27 (11): 1254–1264 (1997).

35. Springer, T. E., Zawodzinski, T. A., and Gottesfeld, S., "Polymer electrolyte fuel cell model", *Journal Of The Electrochemical Society*, 138 (8): 2334 (1991).
36. Dannenberg, K., Ekdunge, P., and Lindbergh, G., "Mathematical model of the PEMFC", *Journal Of Applied Electrochemistry*, 30 (12): 1377–1387 (2000).
37. Gurau, V., Kakac, S., and Liu, H., "Mathematical model for proton exchange membrane fuel cells", *Proceedings Of The 1998 ASME International Mechanical Engineering Congress And Exposition*, 205–214 (1998).
38. Singh, D., Lu, D. M., and Djilali, N., "A two-dimensional analysis of mass transport in proton exchange membrane fuel cells", *International Journal Of Engineering Science*, 37 (4): 431–452 (1999).
39. Fuller, T. F., "Water and Thermal Management in Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cells", *Journal Of The Electrochemical Society*, 140 (5): 1218 (1993).
40. "Simulation for Water Management in Membranes for Polymer Electrolyte Fuel Cells - ScienceDirect", <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468697100998> (2020).
41. Dutta, S., Shimpalee, S., and Van Zee, J. W., "Numerical prediction of mass-exchange between cathode and anode channels in a PEM fuel cell", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 44 (11): 2029–2042 (2001).
42. Bernardi, D. M., "Water-Balance Calculations for Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cells", *Journal Of The Electrochemical Society*, 137 (11): 3344 (1990).
43. Büchi, F. N. and Srinivasan, S., "Operating Proton Exchange Membrane Fuel Cells Without External Humidification of the Reactant Gases: Fundamental Aspects", *Journal Of The Electrochemical Society*, 144 (8): 2767 (1997).
44. Baschuk, J. J. and Li, X., "Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degrees of water flooding", *Journal Of Power Sources*, 86 (1): 181–196 (2000).
45. Wöhr, M., Bolwin, K., Schnurnberger, W., Fischer, M., Neubrand, W., and Eigenberger, G., "Dynamic modelling and simulation of a polymer membrane fuel cell including mass transport limitation", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 23 (3): 213–218 (1998).
46. Thirumalai, D. and White, R. E., "Mathematical Modeling of Proton-Exchange-Membrane Fuel-Cell Stacks", *Journal Of The Electrochemical Society*, 144 (5): 1717 (1997).
47. "Modeling Fuel Cell Stack Systems - ScienceDirect", <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775397028127> (2020).

48. Amphlett, J. C., Mann, R. F., Peppley, B. A., Roberge, P. R., and Rodrigues, A., "A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells", *Journal Of Power Sources*, 61 (1): 183–188 (1996).
49. Chu, D. and Jiang, R., "Comparative studies of polymer electrolyte membrane fuel cell stack and single cell", *Journal Of Power Sources*, 80 (1): 226–234 (1999).
50. "Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Stacks: Part I. Evaluation and Simulation of an Air-Breathing PEMFC Stack - ScienceDirect",
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775399002852>
(2020).
51. Jiang, R. and Chu, D., "Voltage–time behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack at constant current discharge", *Journal Of Power Sources*, 92 (1): 193–198 (2001).
52. Jiang, R. and Chu, D., "Stack design and performance of polymer electrolyte membrane fuel cells", *Journal Of Power Sources*, 93 (1): 25–31 (2001).
53. "Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack - Laurencelle - 2001 - Fuel Cells - Wiley Online Library",
[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1615-6854\(200105\)1:1%3C66::AID-FUCE66%3E3.0.CO;2-3](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1615-6854(200105)1:1%3C66::AID-FUCE66%3E3.0.CO;2-3) (2020).
54. Barbir, F., Balasubramanian, B., and Neutzler, J. K., "Trade-off Design Study of Operating Pressure and Temperature in PEM Fuel Cell Systems", *ASME Advanced Energy Systems*, Vol. 39, 305–315 (1999).
55. "Balancing Stack, Air Supply, and Water/Thermal Management Demands for an Indirect Methanol PEM Fuel Cell System",
<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2001-01-0535/>
(2020).
56. "Model-Based Systems Analysis of a Hybrid Fuel Cell Vehicle Configuration - IEEE Conference Publication",
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/945991> (2020).
57. Atwood, P., Gurski, S., Nelson, D. J., and Wipke, K. B., "Degree of Hybridization Modeling of a Fuel Cell Hybrid Electric Sport Utility Vehicle", *SAE Transactions*, 110: 93–100 (2001).
58. Ogburn, M. J., Nelson, D. J., Wipke, K., and Markel, T., "Modeling and Validation of a Fuel Cell Hybrid Vehicle", *Future Car Congress*, 2000-01–1566 (2000).
59. "Application of Modeling Techniques to the Design and Development of Fuel Cell Vehicle Systems (2001-01-0542 Technical Paper) - SAE MOBILUS",
<https://saemobilus.sae.org/content/2001-01-0542> (2020).

60. "Modeling a PEM Fuel Cell for Use in a Hybrid Electric Vehicle - IEEE Conference Publication", <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/780574> (2020).
61. "Dynamic Response of Steam-Reformed, Methanol-Fueled, Polymer Electrolyte Fuel Cell Systems - IEEE Conference Publication", <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/553861> (2020).
62. Yoon-Ho Kim and Sang-Sun Kim, "An electrical modeling and fuzzy logic control of a fuel cell generation system", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 14 (2): 239–244 (1999).
63. Pischinger, S., Schönfelder, C., Bornscheuer, W., Kindl, H., and Wiartalla, A., "Integrated Air Supply and Humidification Concepts for Fuel Cell Systems", *SAE Transactions*, 110: 86–92 (2001).
64. "Control of Hybrid Electric Vehicles - IEEE Journals & Magazine", <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4140747> (2020).
65. Situ, L., "Electric Vehicle development: The past, present future", *2009 3rd International Conference On Power Electronics Systems And Applications (PESA), 2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 1–3 (2009).
66. Hosseinzadeh, E., Rokni, M., Rabbani, A., and Mortensen, H. H., "Thermal and water management of low temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell in fork-lift truck power system", *Applied Energy*, 104: 434–444 (2013).
67. Chan, C. C., "The state of the art of electric and hybrid vehicles", *Proceedings Of The IEEE*, 90 (2): 247–275 (2002).
68. Wakefield, E. H., "History of the Electric Automobile-Hybrid Electric Vehicles", (1998).
69. Letcher, T. M., "Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet", *Elsevier*, 822 (2020).
70. Arasaratnam, I., "A Simplified Design, Control and Power Management of Fuel Cell Vehicles", *SAE 2014 World Congress & Exhibition*, 2014-01–1831 (2014).
71. Sorrentino, M., Pianese, C., and Cilento, M., "A Specification Independent Control Strategy for Simultaneous Optimization of Fuel Cell Hybrid Vehicles Design and Energy Management", *IFAC-PapersOnLine*, 49 (11): 369–376 (2016).
72. Asus, Z., Aglzim, E.-H., Chrenko, D., Daud, Z.-H. C., and Le Moyne, L., "Dynamic Modeling and Driving Cycle Prediction for a Racing Series Hybrid Car", *IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics*, 2 (3): 541–551 (2014).

73. Choi, D., Ryu, K., Lee, J., and Shin, J., "Power Rating of Hybrid Electric Vehicles for Vehicle Classification", 17 .
74. Soto, J. D. L. C. and Castillo, U. C., "Fuel Cell as Range Extender in Battery Electric Vehicles for Supply Chain Fleets", *Sustainable Supply Chain Management*, **InTech**, (2016).
75. Sulaiman, N., Hannan, M. A., Mohamed, A., Majlan, E. H., and Wan Daud, W. R., "A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: Issues and challenges", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 52: 802–814 (2015).
76. Gao, D., Jin, Z., Zhang, J., Li, J., and Ouyang, M., "Development and performance analysis of a hybrid fuel cell/battery bus with an axle integrated electric motor drive system", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 41 (2): 1161–1169 (2016).
77. Biberici, M. A. and Celik, M. B., "Dynamic Modeling and Simulation of a PEM Fuel Cell (PEMFC) during an Automotive Vehicle's Driving Cycle", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10 (3): 5796–5802 (2020).
78. Chan, C. C., "The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles", *Proceedings Of The IEEE*, 95 (4): 704–718 (2007).
79. Maggetto, G. and Van Mierlo, J., "Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey", (2000).
80. Gulhane, V., Tarambale, M. R., and Nerkar, Y. P., "A scope for the research and development activities on electric vehicle technology in Pune City", *2006 IEEE Conference On Electric And Hybrid Vehicles*, 1–8 (2006).
81. Chen, K., Bouscayrol, A., Berthon, A., Delarue, P., Hissel, D., and Trigui, R., "Global modeling of different vehicles", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 4 (2): 80–89 (2009).
82. Xiang, Z., Jia, W., Jianzhong, Y., Zhibiao, C., Qinglin, H., and Yuanzhang, H., "Prospects of new energy vehicles for China market", (2008).
83. "Otomotiv_sektor_raporu_2012.Pdf", https://www.musiad.org.tr/uploads/yayinlar/arastirma-raporlari/pdf/otomotiv_sektor_raporu_2012.pdf (2020).
84. Beretta, J., "New tools for energy efficiency evaluation on hybrid system architecture", *Proceedings Of The 17th International Electric Vehicle Symposium*, 297–303 (2000).
85. Inada, E., Matsuo, I., Tahara, M., and Abe, T., "Development of a high performance hybrid electric vehicle tino hybrid", *Proceedings Of The 17th International Electric Vehicle Symposium*, (2000).

86. Szumanowski, A., "Fundamentals: Of Hybrid Vehicle Drives", *Institute For Terotechnology*, (2000).
87. Van Mierlo, J. and Maggetto, G., "Views on hybrid drivetrain power management strategies", *Proceedings Of The EVS-17, Montreal, Canada*, (2000).
88. Wouk, V., "Hybrids: then and now", *IEEE Spectrum*, 32 (7): 16–21 (1995).
89. He, F. and Fathabadi, H., "Novel standalone plug-in hybrid electric vehicle charging station fed by solar energy in presence of a fuel cell system used as supporting power source", *Renewable Energy*, 156: 964–974 (2020).
90. García-Villalobos, J., Zamora, I., San Martín, J. I., Asensio, F. J., and Aperribay, V., "Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 38: 717–731 (2014).
91. Bassam, A. M., Phillips, A. B., Turnock, S. R., and Wilson, P. A., "Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 42 (1): 623–635 (2017).
92. Rousseau, A., "IX.6 Fuel Cells as Range Extenders for Battery Electric Vehicles", 4 (2013).
93. Kendall, G., "Plugged In", *The End Of The Oil Age, Brussels: WWF European Policy Office*, (2008).
94. Ang, S. M. C., Fraga, E. S., Brandon, N. P., Samsatli, N. J., and Brett, D. J. L., "Fuel cell systems optimisation – Methods and strategies", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 36 (22): 14678–14703 (2011).
95. Sammes, N., "Fuel Cell Technology: Reaching towards Commercialization", *Springer Science & Business Media*, (2006).
96. Blomen, L. J. M. J. and Mugerwa, M. N., "Fuel Cell Systems", *Springer Science & Business Media*, 623 (2013).
97. Mench, M. M., "Fuel Cell Engines", *John Wiley & Sons*, 530 (2008).
98. "Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review - ScienceDirect", <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319905000935> (2020).
99. Zenith, F. and Skogestad, S., "DYNAMIC MODELLING AND CONTROL OF POLYBENZIMIDAZOLE FUEL CELLS", 8 .
100. Thanapalan, K., Williams, J., Premier, G., and Guwy, A., "Design and implementation of renewable hydrogen fuel cell vehicles", *Renewable Energy And Power Quality Journal*, 272–277 (2011).

101. Cheng, S., Xu, L., Li, J., Fang, C., Hu, J., and Ouyang, M., "Development of a PEM Fuel Cell City Bus with a Hierarchical Control System", *Energies*, 9 (6): 417 (2016).
102. Candusso, D., Rullière, E., and Toutain, E., "A Fuel Cell Hybrid Power Source for a Small Electric Vehicle", 8 .
103. Linssen, J., "Full fuel cycles and market potentials of future passenger car propulsion systems", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 28 (7): 735–741 (2003).
104. Dawes, J. E., Hanspal, N. S., Family, O. A., and Turan, A., "Three-dimensional CFD modelling of PEM fuel cells: An investigation into the effects of water flooding", *Chemical Engineering Science*, 64 (12): 2781–2794 (2009).
105. Maxoulis, C. N., Tsinoglou, D. N., and Koltsakis, G. C., "Modeling of automotive fuel cell operation in driving cycles", *Energy Conversion And Management*, 45 (4): 559–573 (2004).
106. Corbo, P., Corcione, F. E., Migliardini, F., and Veneri, O., "Energy management in fuel cell power trains", *Energy Conversion And Management*, 47 (18): 3255–3271 (2006).
107. Larminie, J. and Dicks, A., "Fuel Cell Systems Explained", 2nd ed. Ed., *J. Wiley*, Chichester, West Sussex, 406 (2003).
108. Thomas, S. and Zalbowitz, M., "Fuel Cells-Green Power", *Los Alamos National Laboratory*, (1999).
109. Handbook, F. C., "AJ Appleby and FR Foulkes", *Van Nostrand Reinhold—New York*, 2: 3–26 (1989).
110. Lorenz, H., Noreikat, K.-E., Klaiber, T., Fleck, W., Sonntag, J., Hornburg, G., and Gaulhofer, A., "Method and device for vehicle fuel cell dynamic power control", *Google Patents*, (1997).
111. Mufford, W. E. and Strasky, D. G., "Power control system for a fuel cell powered vehicle", *Google Patents*, (1998).
112. Ogburn, M., Nelson, D. J., Luttrell, W., King, B., Postle, S., and Fahrenkrog, R., "Systems integration and performance issues in a fuel cell hybrid electric vehicle", *SAE Technical Paper*, (2000).
113. Heywood, J. B., "Internal combustion engine fundamentals McGraw-Hill Book Company", *New York, Xxix*, (1988).
114. Birch, S., "Ford's focus on the fuel cell", *Automotive Engineering*, (2001).
115. Larminie, J. and Lowry, J., "Electric Vehicle Technology Explained", *John Wiley & Sons*, (2012).

116. Akın, B., "Elektrikli Arabalarda Kullanılan Li-ion Akülerin Tek Fazdan Hızlı ve Verimli Şarjı için Güç Faktörü Düzeltmeli Yükselticilerin Karşılaştırması/Comparison of Single Phase Power Factor Correction Boost Converters for Fast and Efficient Charge of Li-ion Ba", *EMO Bilimsel Dergi*, 2 (4): (2012).
117. Pollet, B. G., Staffell, I., and Shang, J. L., "Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects", *Electrochimica Acta*, 84: 235–249 (2012).
118. Pukrushpan, J. T., Peng, H., and Stefanopoulou, A. G., "Control-Oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems", *Journal Of Dynamic Systems, Measurement, And Control*, 126 (1): 14–25 (2004).
119. Palacín, M. R., "Recent advances in rechargeable battery materials: a chemist's perspective", *Chemical Society Reviews*, 38 (9): 2565–2575 (2009).
120. Valizadeh, M., Feyzi, M. R., Babaei, E., and Sabahi, M., "Dynamic modeling of modular fuel cell for maximum power point tracking and torque ripple reduction in direct torque control of induction motor", 18 .
121. Palanki, S. and Telotte, J. C., "Controller Design in a Fuel-Cell Powered Automobile", *IFAC Proceedings Volumes*, 42 (11): 285–290 (2009).
122. Fernandez, L. M., Garcia, P., Garcia, C. A., and Jurado, F., "Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single DA/DA converter for a tramway", *Energy Conversion And Management*, 52 (5): 2183–2192 (2011).
123. "A Comparative Study of Fuel-Cell–Battery, Fuel-Cell–Ultracapacitor, and Fuel-Cell–Battery–Ultracapacitor Vehicles - IEEE Journals & Magazine", <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4357341> (2020).
124. Keskin, F. and Bayrak, D., "DÜZLEMSEL HOMOTETİK HAREKETLER ALTINDA T.C. YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ", 97 .
125. Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F., and Tırıs, M., "Elektrikli Araçlar", *TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri Ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze*, (2003).
126. Vincent, C. A. and Scrosati, B., "Rechargeable Lithium Cells- Modern Batteries: An Introduction to Electrochemical Power Sources", *Arnold Press, London*, (1997).
127. Alakula, M., Jonasson, K., Andersson, C., Simonsson, B., and Marksell, S., "Hybrid Drive Systems for Vehicles - Part 1", (2004).
128. "BOSCH AUTOMOTIVE HANDBOOK - 5TH EDITION", (2000).

129. Heywood, J. B., "Internal combustion engine fundamentals McGraw-Hill Book Co", *New York*, (1988).
130. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., and Ebrahimi, K., "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles", *CRC Press*, (2018).
131. "Honda Engines | Small Engine Models, Manuals, Parts, & Resources | Official Site", <https://engines.honda.com/mini.htm>, %202009-01-28 (2020).
132. Guzzella, L. and Sciarretta, A., "Vehicle Propulsion Systems", *Springer*, (2007).
133. Hughes, A., "Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications, Austin Hughes", *Published By Elsevier Ltd*, (2006).
134. "Maxon-OnlineShopMaxonGroup",
<https://www.maxongroup.com/maxon/view/catalog/> (2020).
135. "PG_boostcap_product_guide.Pdf",
https://www.maxwell.com/images/documents/PG_boostcap_product_guide.pdf (2020).
136. "Maxon-OnlineShopMaxonGroup",
<https://www.maxongroup.com/maxon/view/catalog/> (2020).
137. "Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd Edition | Wiley",<https://www.wiley.com/en-us/Power+Electronics%3A+Converters%2C+Applications%2C+and+Design%2C+3rd+Edition-p-9780471226932> (2020).
138. Cengel, Y., "Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications", *McGraw-Hill Higher Education*, (2014).
139. Gerstenmaier, Y. C., Kiffe, W., and Wachutka, G., "Combination of thermal subsystems by use of rapid circuit transformation and extended two-port theory", *Microelectronics Journal*, 40 (1): 26–34 (2009).
140. Guzzella, L., "Control oriented modeling of fuel-cell based vehicles", *Presentation In NSF Workshop On The Integration Of Modeling And Control For Automotive Systems*, (1999).
141. Pukrushpan, J. T., "Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors", PhD Thesis, *University of Michigan Ann Arbor, Michigan, USA*, (2003).
142. Moraal, P. and Kolmanovsky, I., "Turbocharger modeling for automotive control applications", *SAE Technical Paper*, (1999).
143. Lee, J. H., Lalk, T. R., and Appleby, A. J., "Modeling electrochemical performance in large scale proton exchange membrane fuel cell stacks", *Journal Of Power Sources*, 70 (2): 258–268 (1998).

144. Larminie, J., Dicks, A., and McDonald, M. S., "Fuel Cell Systems Explained", **J. Wiley Chichester, UK**, (2003).
145. Akroot, A., "Modelling of Thermal and Water Management in Automotive Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Systems", (2014).
146. Springer, T. E., Zawodzinski, T. A., and Gottesfeld, S., "Polymer electrolyte fuel cell model", **Journal Of The Electrochemical Society**, 138 (8): 2334 (1991).
147. Nguyen, T. V. and White, R. E., "A water and heat management model for proton-exchange-membrane fuel cells", **Journal Of The Electrochemical Society**, 140 (8): 2178 (1993).
148. Hosseinzadeh, E., Rokni, M., Rabbani, A., and Mortensen, H. H., "Thermal and water management of low temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell in fork-lift truck power system", **Applied Energy**, 104: 434–444 (2013).
149. O'Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., and Prinz, F. B., "Fuel Cell Fundamentals", **John Wiley & Sons**, 604 (2016).
150. Barbir, F., "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", **Academic Press**, 537 (2012).
151. Spiegel, C., Xii, F., An, C., and Cells, I. F., "Singapore Sydney Toronto Contents", .
152. Rios-Torres, J., Liu, J., and Khattak, A., "Fuel consumption for various driving styles in conventional and hybrid electric vehicles: Integrating driving cycle predictions with fuel consumption optimization", **International Journal Of Sustainable Transportation**, 13 (2): 123–137 (2019).
154. Yuan, W., Tang, Y., Pan, M., Li, Z., and Tang, B., "Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance", **Renewable Energy**, 35 (3): 656–666 (2010).
155. Guvelioglu, G. H. and Stenger, H. G., "Flow rate and humidification effects on a PEM fuel cell performance and operation", **Journal Of Power Sources**, 163 (2): 882–891 (2007).
156. Bao, C., Ouyang, M., and Yi, B., "Analysis of the water and thermal management in proton exchange membrane fuel cell systems", **International Journal Of Hydrogen Energy**, 31 (8): 1040–1057 (2006).

EK AÇIKLAMALAR A.

**HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞIT MATLAB SİMÜLASYONU BAŞLANGIÇ
(START-UP) KOMUTLARI DOSYASI (m.file)**


```
% başlangıçtaki yakıt kütlesi (kg)
m_yakit_bas = h_yakit*yakit_yog;
```

```
%=====
%
% İYM VERİLERİ
%
%=====
```

```
% --- GX35 HONDA MOTOR -----
```

```
% Tork-Hız & Yakıt akış hızı : Look-Up Table -
% Ölçümler gaz pedali açıklığının göre belirlenmiştir.
```

```
% Motor devri [rad/sn]
w_İYM =
[0,251.328,314.16,376.992,439.824,502.656,565.488,628.32,691.152,753.984];
```

```
% Motor torku [Nm]
```

```
T_İYM = [0,0.6,1.36,1.435,1.605,1.67,1.685,1.6,1.35,1.33];
```

```
% Yakıt akış oranı [kg/s]
Yakit_akis_orani = [0,4.16667e-5,5.138889e-5,6.59722e-5,7.36111e-5,8.88889e-5,1.06944e-4,1.16667e-4,1.31944e-4,1.50000e-4];
```

```
% İYM kütlesi (kg)
m_İYM = 3.46;
% İYM ataleti (kg m^2)
J_İYM = 1.38e-4*10;
% Tahrik dişlisi oranı
T_disli_oran = 0.8;
% Tahrik dişlisi verimi
n_Tdisli = 0.9;
% Jenertörle İYM nin başlatılması
% İYM nin başlamsı için geçen zaman (s)
İYM_bas_zamani = 0.5;
% Gerekli olan başlangıç torku [Nm]
İYM_bas_tork = -0.535;
```

```

% --- GX35 HONDA MOTOR -----
%=====
% JENERATÖR
%=====

% Jeneratör Sayısı
jenerator_s = 2;
% Jeneretör kütlesi [kg]
m_jen = 2.48;
% Jeneretör ataleti [kg m^2]
J_jen = 1.38e-4*jenerator_s;
% jeneratör direnci [ohm]
R_jen = 0.173;
% Jeneratör torku akım sabiti [Nm/A]
Ta_jen = 89.1e-3;
% Maksimum jeneratör torku
I_mak_jen = 208;
% Yüksüz tork [Nm]
Yuksuz_jen_tork = jenerator_s * 0.407 * Ta_jen; % 0.407 [A] = yüksüz akım.

% =====
% SÜPER KAPASİTÖR
% =====

% Süper kapasitörün her bir hücre kapasitesi [F]

H_kap = 168.9793;
% Hücre kütlesi [m]

m_hucre = 4.680;

% Hücre iç direnci [ohm]
Hucre_ic_direnc = 39.2296e-3; % [mohm] teknik data değeri.
% Süper kapasitör voltaj limitleri [V]
Vmak = 44;
Vmin = 38;

% Süper kapasitörün Başlangıç şarjı
S_bas = Vmak*H_kap;
% Süper kapasitör sigorta direnci [ohm]
R_sig = 3.1e-3;

```

```
% =====  
% ELEKTRİK MOTORU - Maxon DA PM motor  
% =====
```

```
% Elektrik motoru sayısı  
n_el_mot = 1;  
% Elektrik motoru kütlesi [kg]  
m_DA_motor = 2.48;  
% Elektrik motor ataleti [kg m^2]  
J_DA_motor = n_el_mot*1.38e-4;  
% DA motoru tork akım sabiti [Nm/A]  
Ta_DA_motor = 89.1e-3;  
% DA motor iç direnç [ohm]  
Ra_DA_motor = 0.173;  
% Yüksüz tork [Nm]  
Yuksuz_DA_tork = n_el_mot * 0.407 * Ta_DA_motor; % 0.407 [A] = yüksüz akım
```

```
%--- Termal Parametreler ---
```

```
% Cu (bakır) Direnci sıcaklık katsayısı. [ohm/K]  
k_cu = 3.9e-3;  
% Sabit sargı termal zaman [s]  
t_sargi = 127;  
% Sabit motor termal zaman [s]
```

```
t_sabit_motor = 991;
```

```
% Sargılardaki iç direnç [ohm]  
R_mot_sargi = 1.85;  
% muhafazadaki iç direnç [ohm]  
R_mot_muhafaza = 1.3;
```

```
% Sargılar ısı kapasitesi [K/W]
```

```
K_sargi = t_sargi/R_mot_sargi;
```

```
% Muhafaza ısı kapasitesi [K/W]
```

```
K_Muhafaza = t_sabit_motor/R_mot_muhafaza;
```

```
% İzin verilen maksimum sargı sıcaklığı [C derece]
Sicak_mak_motor = 125;
```

```
% Termal modelin transfer fonksiyonu
s=tf('s'); % laplace fonksiyonu sabiti 's'
Z_Muhafaza = 1 / ( (1/R_mot_muhafaza) + s*K_Muhafaza );
Z_Sargi = 1 / ( (1/R_mot_sargi) + s*K_sargi );
Z_tot_2 = Z_Muhafaza + Z_Sargi;
[num_Zth,den_Zth] = tfdata(Z_tot_2,'v');
```

```
%----- Dönüştürücü parametreleri-----%
% İzin verilem maksimum DA/DA conveter akımı [A]
I_mak_DaDa = 200;
% Sürekli izin verilen DA / DA dönüştürücü akımı [A]
I_Sur_DaDA = 10;
% Dönüştürücünün kütlesi [kg]
```

```
m_DaDa = 0.5;
% Dönüştürücü verimi
verim_DaDa = 0.99;
```

```
% =====
% Araç Ana Gövde (Şasi)
% =====
```

```
% Şasinin kütlesi [kg]
m_sasi = 54.3;
% Sürücü kütlesi [kg]
m_surucu = 60;
```

```
% Başlangıç hızı [rad/s]
w_Bas_hizi = 0;
% Tekerlek özellikleritek_genisligi = 95;
tek_yuksekligi = 80;
tek_jant = 16;
```

```
% Tekerler yarı çapı hesaplama [m]
r = 0.001*((tek_jant*25.4) + (2*tek_yuksekligi/100*tek_genisligi))/2;
% Yuvarlanma direnci katsayısı
Cr = 0.007;
% Aerodinamik direnç katsayısı
Cd = 0.28;
% Araç önYüzey alanı [m^2]
Aoy = 1.4;
```



```

% çevresel ortam parametreleri-hava yoğunluğu hesabı
y_hava = 1.225; % standart kuru hava için
% hava basıncı [Pa]
P_hava = 101325;
% Kuru hava için gaz sabiti [J/(kg*degK)]
R_hava = 287.05;

```

```

% =====
% Dişli - Motordan tekerleklere
% =====

```

```

% dişli kütlesi [kg]
m_disli = 0.5;
% Final dişli oranı
Final_oran = (21/12)*(95/12);
% Dişli ataleti [kg m^2]
J_disli = 0.06;

```

```

% =====
% Sürücü - Hız kontrolcüsü - PI kontrolcü
% =====

```

```

% PI hız kontrolcüsü
Kp = 0.5;
Ki = 0.02;
% =====

```

```

% Çevre-ortam
% =====

```

```

% Ortam Sıcaklığı [C derece]
T_ort_hava = 20;
T_ort_motor = 40;
% hız ve eğim tetikleme
Tet_hiz_pos_ac = 0;
Tet_egim_pos_ac = 1;
% =====

```

```

% Toplam araç kütlesi [kg]
% =====

```

```

m_arac = m_IYM + m_yakit_bas + jenerator_s*m_jen + m_hucre +
n_el_mot*m_DA_motor + m_DaDa + m_sasi + m_disli;
m_top_arac = m_arac + m_surucu;

```

```

%*****
*****
%*****
*****

```

% HEA Ağırlığı = 74 kg
 m_yakit_bas = 1; % başlangıç hacmi 1 litre
 m_İYM = 3.46; % GX35 honda motor
 m_jen = 2*2.48; % 2 adet jeneratör
 m_hucre = 4.680; % Lityum-iyon kapasitör
 m_motor = 2*2.48; % 2 adet DA motor
 m_DaDa = 2*0.4; % Maxon DA/DA dönüştürücü
 m_disli = 0.5; % Motordan tekerleklere

% aracın geri kalan ağırlığı (tekerlekler = 4*3.5 = 14 kg)

m_sasi = 74-(m_İYM + m_yakit_bas + m_jen + m_hucre + m_motor + m_DaDa + m_disli); % = 54.3845

m_surucu = 60;
 m_arac = (m_İYM + m_yakit_bas + m_jen + m_hucre + m_motor + m_DaDa + m_sasi + m_disli);
 m_top_arac = m_arac + m_surucu %/ m_top_arac

EK AÇIKLAMALAR B.

YAKIT PİLLİ TAŞIT MATLAB SİMÜLASYONU BAŞLANGIÇ (START-UP) KOMUTLARI DOSYASI (m.file)

```

%Araç Dizaynı
V1 = Variable2; %Araç hızı km/h
m=1880; %Araç ağırlığı
Hava_surtunme_katsayisi=0.65; %Hava sürtünme katsayısı
on_yuzey_alani=2.68; %aracın ön yüzey alanı, m2
Yuvarlanma_direnc_Katsayisi= 0.012; %Yuvarlanma direnç
katsayısı
Hava_yogunlugu=1.2; %Hava yoğunluğu, Kg/ m3
g=9.81; % yerçekimi sabiti
TETA=[2.86;5.71;8.53;11.3];% yüzdeler eğim %5 %10 %15 ve
%20 iken teta eğim açısını vermektedir.
N1=length(TETA);% her bir eğim açısı için okuma
for T=1:N1
TETA1=TETA (T);
Fhc = m*g*sind(TETA1);
DataFhc (T)= Fhc;
end
i_hucre = 0.001; % hücrenin başlangıç akım yoğunluğu,
A/cm^2
N=length(V1); % Herbir hız değeri için okuma.
%Tüm hız değerlerini m/sn çevirmek için 3.6'a böl.
V1=V1/3.6;
er=0.15;
while er>0.11
i_hucre = i_hucre +0.00001;
for C=2:N
Hizlanma=V1(C) - V1(C-1);
Fda =
0.5*Hava_yogunlugu*Hava_surtunme_katsayisi*on_yuzey_alani
* V1(C)^2;
Frr = m*g*Yuvarlanma_direnc_Katsayisi;
Fla = 1.05*m*Hizlanma;
P_arac = (Fda+Frr+Fhc+Fla)*V1(C);

```

```

i_hucre = i_hucre +0.00001;
%Polarizasyon eğrisi
SR_anod=1.5; %Yakıtın stokiyometrik akış oranı.
SR_katod=2; %Havanın stokiyometrik akış oranı.
P_a= 303.975; %Anod basıncı, kpa
P_c= 303.975; %katot basıncı, kpa
P_komp_cikis= 3; %Havanın kompresörden çıkış basıncı atm
P_hidrojen= 3; %Hidrojen basıncı, atm
T_fh=353; % Yakıt hücresi sıcaklığı, K
R=8.314; %Universal gaz sabiti
n_anod=2; %anoda transfer olan elektron sayısı
n_katod=4; %katoda transfer olan elektron sayısı
F=96485; %Faraday sabiti, C.mol-1
T_Ref=298.15; %Referans sıcaklık, K
P_Ref=101.325; %Referans basınç, kpa
L_GDT=0.0254; %Gaz difüzyon tabakasının kalınlığı., cm
L_KT=0.00287; %Katalizör tabakasının kalınlığı., cm
L_M=0.023; % Membran Kalınlığı, cm
io_anod=0.6; %Anod akım yoğunluğu değişimi, A/cm2
io_katod=4.4*10.(-7); %Katot akım yoğunluğu değişimi,
A/cm2
Ionomer_anod=0.4; %Anot katalizör tabakasının İyonomer
eşdeğeri
Ionomer_katod=0.3; %Katot katalizör tabakasının İyonomer
eşdeğeri
Beta= 0.05; % Konsantrasyon Polarizasyonu için Üssel
Sabit, ?
gozeneklilik= 0.6; % Elektrot gözenekliliği değeri
RH=1; %Bağıl nem ( anot ve katot) RH, (%)
Delta_M= 0.1; % Membran iyonik iletkenliği , S/cm
diff_H2_REF= 0.0376; %Referans durumda H2 difüzyon
katsayısı, cm2 sec-1

```

```

diff_O2_REF= 0.0522; %Referans durumda O2 difüzyon
katsayısı, cm2 sec-1
P_doyma= (-2846.4+411.24*(T_fh-273.15)-10.554*(T_fh-
273.15).^2+0.16636*(T_fh-273.15).^3)*10.^-3; %Doyma
basıncı @ 353
%hidrojenin molar kesri
y_H2=1-(RH*P_doyma./P_a);
y_H2kullanılan= y_H2./SR_anod;
%oksijenin molar kesri
y_O2=(1-(RH*P_doyma./P_c))*0.21;
y_O2kullanılan=y_O2/SR_katod;
%hidrojen ve oksijen konsantirasyonu
K_H2=y_H2kullanılan*P_a./(R*T_fh); %Hidrojen
konsantirasyonu, Kmole.m-3
K_O2=y_O2kullanılan*P_c./(R*T_fh); %oksijen
konsantirasyonu, Kmole.m-3
%Hidrojenin ve oksijenin etkin yayılımı.
D_H2eff=gozeneklilik.^(1.5)*diff_H2_REF*(T_fh./T_Ref).^(1
.5)*(P_Ref./P_a); %hidrojenin etkili yayılımı, cm^2 s^(-
1)
D_O2eff=gozeneklilik.^(1.5)*diff_O2_REF*(T_fh./T_Ref).^(1
.5)*(P_Ref./P_c); %oksijenin etkili yayılımı, cm^2 s^(-
1)
%Akım yoğunluğunu sınırlama
IL_anod=n_anod*F*D_H2eff*K_H2*(10).^(-3)./L_GDT; %Anod
akım yoğunluğunu sınırlama, A.cm-2
IL_katod=n_katod*F*D_O2eff*K_O2*(10).^(-3)./L_GDT; %
Katod akım yoğunluğunu sınırlama, A.cm-2
%Açık devre voltajı
E_a= 1.229 - 0.85*(10).^(-3) * (T_fh - 298.15) +
4.3085*(10).^(-5) * T_fh
*(log(y_H2kullanılan*P_a)+0.5*log(y_O2kullanılan*P_c)); %

```

```

Nernst potansiyeli
%Aktivasyon kayıpları
Act_anod = R*T_fh./(F*n_anod)*( i_hucre./io_anod);
Act_katot = R*T_fh./(F*n_katot*(1-
0.55))*log(i_hucre./io_katot);
Act_kayıplari=Act_anod+ Act_katot;
%Direnç kaybı
Direnc_kaybi = i_hucre
*((L_KT./(2*Ionomer_anod*Delta_M))+(L_M/Delta_M)+(L_KT./(
2*Ionomer_katot*Delta_M)));
%Konsantrasyon kayıpları
Kons_anod=- Beta*log(1-( i_hucre /IL_anod));
Kons_katot = -Beta*log(1-( i_hucre /IL_katot));
kons_kayıblari=- Beta*log(1-( i_hucre /IL_anod))+
Beta*log(1-( i_hucre /IL_katot));
v_hucre =E_a - Act_anod - Act_katot - Direnc_kaybi -
Kons_anod - Kons_katot;
A_hucre= 625; %Area of cell, 25cm*25cm
n_hucre= 230; %Number of cell
P_fc = v_hucre* i_hucre* A_hucre* n_hucre;%w
M_hava=28.97;%havanın molar ağırlığı
M_H2=2.0158; %Hidrojenin molar ağırlığı
M_O2=31.999; %Oksijenin molar ağırlığı
M_N2=28.013; %Nitrojenin molar ağırlığı
M_H2O=18.02; %Su buharının molar ağırlığı
r_O2=0.21; %oksijenin molar yüzde miktarı
m_hava_in=SR_katot./ r_O2* M_hava./(4* F) * P_fc./
v_hucre; % gereken hava miktarı, g.sec-1
m_hidrojen_in=SR_anod * M_H2./(2* F)* P_fc./ v_hucre ; %
yakıt hücre sine girmesi gereken hidrojen miktarı, g.sec-1
m_hava_out=((SR_katot-1)* M_O2+(1- r_O2)./ r_O2* M_N2) *
(P_fc./ v_hucre)./(4* F); % kullanılmayan havanın
miktarı, g.sec-1

```

```

m_hidrojen_out=(SR_anod-1) * M_H2./(2* F)* P_fc./ v_hucre
; % kullanılmayan hidrojenin miktarı, g.sec-1
m_H2_tuketimi= m_hidrojen_in- m_hidrojen_out;
%%% Hava sıkıştırma işlemi
T_cev= 25; %çevre sıcaklığı
RH_cev=0.4; %çevre bağıl nem
T_komp_in= T_cev; %kompresör giriş sıcaklığı
RH_komp_in= RH_cev; % komresör giriş bağıl nem
P1_doyma = (-2846.4+411.24* T_komp_in -10.554*
T_komp_in.^2+0.16636* T_komp_in.^3)*10.^-5; %Doyma
basıncı @25C
Pv1_komp= RH_komp_in*P1_doyma; %kompresör girişi su
buharı basıncı
P_komp_in=1; %Katot elektrodu basıncı atm
w_komp_in= 0.622*(Pv1_komp./(P_komp_in-Pv1_komp));
%Kompresör girişinde su içeriği
%%% Kompresörün kütle dengesi.
w_komp_out= w_komp_in; %Kompresör çıkışında su içeriği
eff_komp=0.8; %kompresör verimi
T_komp_cikis=((T_komp_in+273)+( T_komp_in
+273) ./eff_komp*( (P_komp_cikis./P_komp_in).^ (0.4./1.4)-
1))-273; %kompresör çıkış sıcaklığı
Pv2_komp=w_komp_out*P_komp_cikis./(w_komp_out+0.622);
%kompresör çıkışı su buharı basıncı
P2_doyma= (-2846.4+411.24*T_komp_cikis-10.554*
T_komp_cikis.^2+0.16636* T_komp_cikis.^3)*10.^-5; %doyma
basıncı @162C RH_komp_cikis=Pv2_komp./P2_doyma; %
kompresör çıkışı bağıl nem
Cp_hava =1.005; %Sabit hava basıncında özgül ısı
h_g0=2500; %Doymuş buhar entalpisi @ 0C Kj/Kg
h_kompresor_in= Cp_hava * T_komp_in
+w_komp_in*(h_g0+1.82* T_komp_in);

```



```

h_kompresor_cikis= Cp_hava * T_komp_cikis
+w_komp_out*(h_g0+1.82* T_komp_cikis);
%% kompresör enerji dengesi
eff_komp=0.8;
P_kompresor= m_hava_in*( h_kompresor_cikis-
h_kompresor_in)/eff_komp;
%%% havanın nemlendirme süreci
w_nem_in= w_komp_out; %nemlendirici girişindeki su miktarı
Kg water/Kg air
T_nem_out=80; % nemlendirici çıkış sıcaklığı
RH_nem_out=1; %nemlendirici girişi bağıl nem
RH_giris_katot = RH_nem_out; %katot giriş bağıl nem
T_su_enjekte=25; %nemlendiriciye enjekte edilmiş suyun
sıcaklığı
h_fg=2442; %buharlaşmış suyun entalpisi@ 25C KJ/Kg
h_g2= 2643; %Doymuş buharın entalpisi@ 80C KJ/Kg
P3_doyma= (-2846.4+411.24*T_nem_out-10.554*
T_nem_out.^2+0.16636* T_nem_out.^3)*10.^-5; %doyma
basıncı @25C
w_nem_out= 0.622*(P3_doyma./(P_komp_cikis-P3_doyma));
%nemlendirici çıkışı su içeriği
%%%nemlendiricinin kütle dengesi
m_enjekte_hava =m_hava_in*(w_nem_out- w_nem_in); %Hava
nemlendirmek için gerekli sıvı su kütle akış oranı
%h= Cp_hava *T+w*h_g % Gaz buharı karışımının entalpisi
%h_g=h_g@0C+1.82*T % doymuş buharın entalpisi
h_g0=2501.3; %doymuş buharın entalpisi@ 0C Kj/Kg
h_nem_out = Cp_hava *T_nem_out+w_nem_out*h_g2;
%nemlendirici çıkışı entalpi
h_buharlasma= (w_nem_out-w_nem_in)*h_fg;
%h_nem_in= Cp_hava *Tin_nem+w_nem_in*(h_g0+1.82*T_nem_in)
%nemlendirici girişi entalpi
%%% nemlendirici enerji dengesi

```

```

% h_nem-in+ h_buharlasma =h_nem_out
T_nem_in=(h_nem_out- h_buharlasma -w_nem_in*h_g0)./(
Cp_hava +w_nem_in*1.82); % nemlendirici giriş sıcaklığı
W_nem_inlet=( Cp_hava *(T_nem_out-
T_nem_in)+w_nem_out*(h_g2-h_fg))./((h_g0+1.82*T_nem_in)-
h_fg);
P5_doyma= (-2846.4+411.24*T_nem_in-
10.554*T_nem_in.^2+0.16636*T_nem_in.^3)*10.^-5; %doyma
basıncı @162C
p_v=w_nem_in*P_komp_cikis./( w_nem_in+0.622);
RH_isitici_out=p_v./P5_doyma*100;
h_nem_in= Cp_hava
*T_nem_in+w_nem_in*(h_g0+1.84*T_nem_in); %nemlendirici
girişi entalpi
%%% havanın soğutma işlemi
T_isitici_air_in= T_komp_cikis;
T_isitici_air_out= T_nem_in;
w_isitici_hava_in =w_komp_out;
%%%% havayı ısıtan elektrikli ısıtıcının kütle dengesi
w_isitici_hava_out= w_isitici_hava_in;
h_isitici_hava_giris= Cp_hava * T_isitici_air_in +
w_isitici_hava_in*(h_g0+1.82* T_isitici_air_in); %hava
ısıtıcı giriş entalpisi
h_isitici_air_outlet = Cp_hava * T_isitici_air_out +
w_isitici_hava_out*(h_g0+1.82* T_isitici_air_out); %hava
ısıtıcı çıkış entalpisi
%%%% elektrikli hava ısıtıcı enerji dengesi
Q_isitma_hava= (m_hava_in*( h_isitici_air_outlet -
h_isitici_hava_giris));
%%% Hidrojenin nemlendirilmesi
T_nem_out=80; % nemlendirici çıkış sıcaklığı
RH_nem_out=1; %nemlendirici girişi bağıl nem
RH_giris_anod= RH_nem_out; %Anod girişi bağıl nem

```

```

h_fg=2442; %suyun buharlaşma entalpisi @ 25C Kj/Kg
h_g2= 2643; %doymuş buharın entalpisi@ 80C Kj/Kg
w_nem_in2= 0; %nemlendirici girişindeki su miktarı, Kg
su/Kg hava
P3_doyma= (-2846.4+411.24*T_nem_out-10.554*
T_nem_out.^2+0.16636* T_nem_out.^3)*10.^-5; %doyma
basıncı @25C
w_nem_out2= 9*(P3_doyma./(P_hidrojen-P3_doyma));
%nemlendirici çıkışındaki su miktarı
m_enjekte_hidrojen= m_hidrojen_in*( w_nem_out2-
w_nem_in2); %Hidrojen nemlendirmek için gerekli sıvı su
kütle akış hızı
%h=Cp_H2*T+w*h_g; % gaz buharı karışımının entalpisi
Cp_H2=14.31; %Sabit basıncında Hidrojenin özgül ısı
h_nem_out2= Cp_H2*T_nem_out+w_nem_out2*h_g2;
%nemlendirici çıkışı entalpi
h_buharlasmaa=(w_nem_out2-w_nem_in2)*h_fg;
%h_nem_in= Cp_H2*T_hum _in2 % nemlendirici girişi entalpi
% h_nem_in+ h_buharlasmaa =h_nem_out %nemlendirici enerji
dengesi
T_nem_in2=(h_nem_out2- h_buharlasmaa)./ Cp_H2; %
nemlendirici giriş sıcaklığı
w=(Cp_H2*(T_nem_out-T_nem_in2)+w_nem_out2*(h_g2-h_fg));
h_giris_isitici2=Cp_H2*T_cev; %ısıtıcı girişi entalpi
h_cikis_isitici2=Cp_H2 *T_nem_in2; %ısıtıcı çıkışı entalpi
Q_isitma_H2= m_hidrojen_in*( h_cikis_isitici2-
h_giris_isitici2);

%%% Sabit durumda katot boyunca su taşınmasının kütle
dengesi
P_katott= P_komp_cikis; %katot basıncı
P_anodd = P_hidrojen; %anod basıncı
basinc_dususu_ka=0.15; % katot tarafı basınç düşüşü

```

```

m_H2O_hava_giris= SR_katot./ r_O2* M_H2O./(4* F)*
RH_komp_in* P1_doyma./( P_komp_in- RH_komp_in* P1_doyma)*
i_hucre* A_hucre* n_hucre; % Hava girişindeki su buharı
miktarı.
m_H2O_katot_buhar_cikis= (SR_katot- r_O2)./ r_O2*
M_H2O./(4* F)* P3_doyma./( P_katott - P3_doyma)* i_hucre*
A_hucre* n_hucre; % Katot çıkışında su buharı miktarı
m_H2O_uretilen=9.34*10.^-5*P_fc./v_hucre; %
elektromekanik reaksiyon sonucu üretilen su miktarı
w_aktivite= (RH_giris_anod + RH_giris_katot)./2; %
Membran su aktivitesi
su_icerik= 0.043 + 17.8*w_aktivite-39.85*w_aktivite
.^2+36.0*w_aktivite.^3; % membran su içeriği
EOD_katsayisi=0.0029*su_icerik.^2+0.05*su_icerik-3.4*
10^(-19); % Elektro-ozmotik sürtünme katsayısı
m_H2O_surtunme=EOD_katsayisi*M_H2O./F*i_hucre*A_hucre*n_h
ucre; % Elektro ozmotik sürtünmesi, doğal olay nedeniyle
su transferi
m_H2O_diff=0.92*EOD_katsayisi*M_H2O./F*i_hucre*A_hucre*n_
hucre; % Geri difüzyona bağlı su transferi
m_H2O_membran= m_H2O_surtunme- m_H2O_diff; % membrana
doğru su tarnsferi
m_H2O_enjekte_hava= m_enjekte_hava; %hava içerisine
enjekte olan suyun kütlece akış miktarı,g/sec
m_H2O_katot_cikiss= m_H2O_hava_giris + m_H2O_uretilen+
m_H2O_enjekte_hava +m_H2O_membran;
m_H2O_katot_buhar_cikis=min( (SR_katot- r_O2)./ r_O2*
M_H2O./(4* F)* P3_doyma./( P_katott - basinc_dususu_ka-
P3_doyma)* i_hucre* A_hucre* n_hucre,
m_H2O_katot_cikiss); %katot çıkışı su buharı miktarı
if m_H2O_katot_cikiss > m_H2O_katot_buhar_cikis
m_H2O_katot_sivi_cikiss= m_H2O_katot_cikiss-
m_H2O_katot_buhar_cikis; %Katot çıkışı sıvı su miktarı

```

```

end

%%% Sabit durumdaki anottan su taşınımının kütle dengesi
P_anodd= P_hidrojen; %Anod basıncı
basinc_dusus_anod=0.15; % anod tarafında basınç düşüşü,
atm
m_H2O_enjekte_hidrojenn= m_enjekte_hidrojen; %anod
içerisine enjekte edilmiş suyun kütlece akış oranı, g/sec
m_H2O_anod_cikis= m_H2O_enjekte_hidrojenn -m_H2O_membran;
%anod çıkışı su miktarı
m_H2O_anod_buhar_cikis=min( (SR_anod-1) * M_H2O./(2* F) *
P3_doyma./( P_anodd- basinc_dusus_anod - P3_doyma)*
i_hucre* A_hucre* n_hucre, m_H2O_anod_cikis); % anod
çıkışı su buharı miktarı
if m_H2O_anod_cikis > m_H2O_anod_buhar_cikis
m_H2O_anod_sivi_cikis= m_H2O_anod_cikis-
m_H2O_anod_buhar_cikis; % anod çıkışı sıvı su miktarı
else
m_H2O_anod_sivi_cikis=0;
end

m_H2O_sivii= m_H2O_anod_sivi_cikis+
m_H2O_katot_sivi_cikiss;
m_H2O_buharr = m_H2O_anod_buhar_cikis+
m_H2O_katot_buhar_cikis;
m_H2O_enjektee= m_H2O_enjekte_hidrojenn+
m_H2O_enjekte_hava;

%%% Kararlı durumda PEMFC sistemi enerji dengesi
T_fc_ex=76; % Yakıt hücresi yığının çıkışında egzoz
gazları soğutma sonu sıcaklık
T_fc_yigin=80; % yakıthücresi yığının sıcaklığı
Cp_O2=0.913; %sabit basınçta oksijenin özgül ısısı
Cp_HO2=4.18; %Sabit basınçta suyun özgül ısısı , j/g
Cp_HO2_b=1.85; %su buharının sabit basınçta özgül ısısı

```

```

H_HHV_25=141900; %Hidrojen daha yüksek ısıtma değeri 25C,
J / g
H_HHV_0= H_HHV_25-( Cp_H2+(0.5*M_O2./ M_H2)*Cp_O2-(
M_H2O./ M_H2)*Cp_HO2)* T_cev;
Q_H2_in= m_hidrojen_in*( Cp_H2* (T_fc_yigin -T_cev) +
H_HHV_0); %hidrojen giriş ısısı, W
Q_air_in= m_hava_in *Cp_hava*( T_fc_yigin -T_cev); %Hava
giriş ısısı , W
Q_H2O_in_hava_inlet= (m_H2O_hava_giris+
m_H2O_enjekte_hava )*( Cp_HO2_b* (T_fc_yigin -T_cev) +
h_g0); % su buharı giriş ısısı
Q_H2O_enjekte_H2= m_H2O_enjekte_hidrojenn * (Cp_HO2_b*
(T_fc_yigin -T_cev) + h_g0); % hidrojene enjekte edilmiş
suyun ısısı
Q_giris = Q_H2_in+ Q_air_in+ Q_H2O_in_hava_inlet+
Q_H2O_enjekte_H2; % girişteki toplam ısı
Q_H2_cikis= m_hidrojen_out*( Cp_H2* (T_fc_ex- T_cev) +
H_HHV_0); %Hidrojen çıkış ısısı, W
Q_hava_out= m_hava_out *Cp_hava* (T_fc_ex-25); %Hava
çıkış ısısı, W
Q_H2O_siviii_air_out= m_H2O_katot_sivi_cikiss* Cp_HO2* 0;
% sıvı su çıkış ısısı
Q_H2O_buhar_air_out= m_H2O_katot_buhar_cikis *( Cp_HO2_b*
(T_fc_ex- T_cev) + h_g0); % su buharı hava tarafı çıkış
ısısı
Q_H2O_vapor_H2_ouT= m_H2O_anod_buhar_cikis *( Cp_HO2_b*(
T_fc_ex- T_cev) + h_g0); % su buharı hidrojen tarafı
çıkış ısısı
Q_H2O_sivi_H2_out= m_H2O_anod_sivi_cikis* Cp_HO2* 0; %
sıvı su çıkış ısısı
Q_cikis = Q_H2_cikis+ Q_hava_out+ Q_H2O_siviii_air_out+
Q_H2O_buhar_air_out+ Q_H2O_vapor_H2_ouT+
Q_H2O_sivi_H2_out; % çıkış toplam ısı miktarı

```

```

W_el= v_hucre* i_hucre* A_hucre*n_hucre; %üretilen
elektrik gücü
A_yuzey_fc=0.355; % yakıt hücresi yüzey alanı, m^2
h=5.4; %ısı transfer katsayısı, W/m^2K
T_Ref= 273.15;
Q_konv=h* A_yuzey_fc *( T_fc_yigin - T_cev);
%Konveksiyona bağlı ısı kayıpları, W
S_B = 5.67*10.^(-8); %Stefan. Boltzman constant,W/m^2 K
e = 0.75; %Yığın yüzeyi emisyon
Q_rad=S_B*e* A_yuzey_fc*(( T_fc_yigin + T_Ref).^4-(
T_cev+ T_Ref).^4); %radyasyondan dolayı ısı kaybı, W
T_sogutucu_rad_out =66; %Radyatör çıkışındaki soğutucu
sıcaklığı
Q_sogutucu= -(Q_giris- Q_cikis- W_el- Q_konv- Q_rad);
Q_radiator = m_sogutucu.*(Cp_HO2*( T_fc_ex-
T_sogutucu_rad_out));%radyatör tarafından uzaklaştırılması
gereken ısı ,W
m_sogutucu= Q_sogutucu./ (Cp_HO2*( T_fc_ex-
T_sogutucu_rad_out));%sogutucu su miktarı
%pompa dizaynı
dp=750; % pompa içerisindeki toplam basınç, Pa
su_yogunlugu=1000; % suyun yoğunluğu, kg.m3
P_Pomp1= m_sogutucu* dp/ su_yogunlugu; % Soğutma suyunun
sirkülasyonu için gereken pompa gücü
P_Pomp2= (m_H2O_enjekte_hava + m_H2O_enjekte_hidrojenn ) *
dp/ su_yogunlugu; %Enjekte su sirkülasyonu için gerekli
pompa gücü
P_Pompalar = P_Pomp1+ P_Pomp2; %Pompaları çalıştırmak
için gerekli iş
%radyatör dizaynı
A_radyator=0.5*0.5;
hava_Akis_orani= Hava_yogunlugu*0.5*V1(C)*A_radyator;

```

```

T_ex_rad= T_cev+( (-Q_sogutucu)*10. ^-3./(
hava_Akis_orani* Cp_hava));
dT1= T_fc_ex- T_ex_rad;
dT2= T_sogutucu_rad_out- T_cev;
LMTD=( dT1- dT2)./log(dT1./ dT2);
U=150; % Uverall Hava ısı transfer katsayısı.
Effektif_alan_rad= (Q_sogutucu)./(U* LMTD);
%radyatör fanı dizaynı
dp=50; % Fanda toplam basınç artışı, Pa
P_fans= 2*hava_Akis_orani* dp./ Hava_yogunlugu; %
Radyatör ve hava soğutucusunun fanlarının gücü
P_isitici= Q_isitma_H2+ Q_isitma_hava;
P_YAR= P_kompresor + P_Pompalar + P_fans+ P_isitici;
P_fc_t =P_arac+ P_YAR;
sistem_verimi = (P_fc- P_YAR)./( m_hidrojen_in
*H_HHV_0)*100;
termal_verim = (P_fc)./( m_hidrojen_in *H_HHV_0)*100;
er= ((P_fc_t- P_fc)./ P_fc_t)*100;
PFCDATA (C) = P_fc ;
ParacDATA (C) = P_arac;
I_data (C) = i_hucre;
Voltaj_DATA (C)= v_hucre;
Kons_Kaybi_DATA (C) = kons_kayiblari;
Direnc_kaybi_DATA (C)= Direnc_kaybi;
AKT_Kayiplar_Data (C) = Act_kayiplari;
Sivi_Su_DATA (C)= m_H2O_sivii;
Buhar_Su_DATA (C) = m_H2O_buharr;
Nemlendiridi_enjekte_Su_DATA (C)= m_H2O_enjekte;
Gerekli_guc (C) = P_fc_t;
PYardimci (C)= P_YAR;
Pkomp_Data (C)= P_kompresor;
Ppompa_Data (C) = P_Pompalar;
Pfans_Data (C) = P_fans;

```



```
h2_Tuketim (C) = m_H2_tuketimi ;
Data_termel_verim (C)= termal_verim;
Data_sistem_verim (C) = sistem_verimi;
Data_Q_giris (C)= Q_giris;
Data_Q_cikis(C)= Q_cikis;
Data_W_el (C)= W_el;
Data_rad_alani(C)= Effektif_alan_rad;
DATA_m_sogutucu (C)= m_sogutucu;
DATA_Q_Radyator (C) = Q_radiator;
end
er= ((P_fc_t- P_fc)./ P_fc_t)*100;
end
```

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Ali BİBERCİ 1986'da Silifke'de doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Adana Anadolu Meslek Lisesi, Makine Eğitimi Bölümü'nden mezun olduktan sonra 2005 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü'ne girdi; 2009'de "iyi" derece ile mezun olduktan sonra, 2013 yılında Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine eğitimi Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 2014 yılında, Çankırı Karatekin Üniversitesi Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Halen çalışma hayatını aynı üniversite ve aynı kadroda sürdürmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Çankırı Karatekin Üniversitesi Balıca Kampüsü
Yapraklı MYO, A-Blok Kat:1 Oda No:13
Abdülhalikrenda Mahallesi Ankara Caddesi,
Ankara Yolu 10. km
Merkez / ÇANKIRI

Tel: 0554 356 6494
E-posta: m.alibiberici@gmail.com