

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**YAKIT PİLİ-BATARYA HİBRİT GÜÇ KAYNAĞINDAN
BESLENEN ELEKTRİKLİ ARAÇ GELİŞTİRİLMESİ**

Habip ŞAHİN

Doktora Tezi

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Bilim Dalı

HAZİRAN 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

**YAKIT PİLİ-BATARYA HİBRİT GÜÇ KAYNAĞINDAN BESLENEN
ELEKTRİKLİ ARAÇ GELİŞTİRİLMESİ**

Tez Yazarı
Habip ŞAHİN

Danışman
Prof. Dr. Hikmet ESEN

HAZİRAN 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı:	Yakıt Pili-Batarya Hibrit Güç Kaynağından Beslenen Elektrikli Araç Geliştirilmesi
Yazarı:	Habip ŞAHİN
İlk Teslim Tarihi:	24.05.2022
Savunma Tarihi:	24.06.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Hikmet ESEN Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Resul ÇÖTELİ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Abdullah KAPICIOĞLU Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Fehmi ASLAN Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yeşilyurt MYO	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Yakıt Pili-Batarya Hibrit Güç Kaynağından Beslenen Elektrikli Araç Geliştirilmesi” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

24.06.2022

Habip ŞAHİN



ÖNSÖZ

Akademik kariyerime devam etme kararı aldığım bir zamanda karşıma çıkan ve bu anlamda en büyük şansım olan, beni sadece öğrenciliğine değil en samimi arkadaşlığına da layık gören, akademik hayatıma üniversite dışından devam etmeme rıza göstermeyip beni meslektaşlığına layık görerek akademik camiaya dâhil eden ve bu güzel yolda bana rehberlik eden, bu tez çalışması süresince beni benden daha çok düşünüp kendine dert edinen, her türlü çalışmalarında bana tereddütsüz yardım eden Sayın Prof. Dr. Hikmet ESEN'e hürmetle sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamda ve günlük hayatta her daim yanımda olan hiçbir yardımını esirgemeyen başta Cihangir KALE olmak üzere tüm doktora arkadaşlarıma, Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümü değerli akademisyenlerine ve değerli meslektaşım Burak Taşcı'ya teşekkürlerimi sunarım.

Küçüklüğümden beri bizi okumaya teşvik eden bu uğurda hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, eğitim öğretim hayatım boyunca bana her daim destek olan, hayatımın kırılma noktasında akademik kariyerime devam etmem için beni her daim teşvik eden babam Ali Osman ŞAHİN'e teşekkür ederim.

Bu süreçte maddi manevi hep yanımda olan, bana olan desteğini bir an dahi olsa esirgemeyen ve yaşadığım tüm zorlukları aşmam da bana yardımcı olan eşime ve tüm aile fertlerime de şükranlarımı sunarım.

Tezimi, bana kendi babasının ismini vererek onurlandıran, görebildiği kadarıyla eğitim hayatım boyunca başarılı olmamı övünerek ismini aldığım babasına benzeten, hayata dair birçok şeyi ilk olarak kendisinden öğrendiğim ve bu yönüyle ilk öğretmenin diyebileceğim babaanneme ithaf ederim.

Habip ŞAHİN
ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. Giriş.....	1
1.1. Mevcut Ulaşım Sorunlarının ve Geleceğinin Gözden Geçirilmesi.....	2
1.2. Elektrikli Araçları Gerekli Kılan Nedenler	3
1.3. Elektrikli Araçların Durumu ve Kısıtlamaları	6
1.4. Yakıt Pili Araçların Kısa Tarihçesi ve Günümüzdeki Durumu.....	8
1.5. Literatür Taraması	11
1.6. Tezin Motivasyonu	18
1.7. Tezin Amacı, Araştırma Soruları ve Literatüre Yapılan Katkılar.....	18
1.8. Metot.....	21
1.9. Tezin Sınırlamaları.....	21
2. HİBRİT VE ELEKTRİKLİ ARAÇ TAHRİK SİSTEMLERİ.....	22
2.1. Yakıt Pili	22
2.1.1. Proton Elektrolit Membran Yakıt Pili	25
2.1.2. PEMYP’nde Enerji ve Elektromotor Kuvvet	27
2.1.3. Yakıt Hücre Gerilimi, Verimlilik ve Verimlilik Limitleri.....	29
2.1.4. Yakıt Kaynağı.....	32
2.1.5. Hidrojenin Depolanması.....	32
2.1.6. Yakıt Hücresi Hibrit Elektrikli Tahrik Sistemi Tasarımı	35
2.2. Elektrokimyasal Piller.....	39
2.2.1. Termodinamik Gerilim	41
2.2.2. Spesifik Enerji, Güç ve Enerji Verimliliği	41
2.3. Batarya Teknolojileri	43
2.3.1. Kurşun asit bataryalar.....	44
2.3.2. Nikel Bazlı Bataryalar	46
2.3.3. Lityum Bazlı Bataryalar	47
2.4. Elektrikli Araçlar.....	51
2.4.1. Elektrikli Araç Konfigürasyonları	52
2.4.2. Elektrikli Araçların Performansı	54
2.5. Hibrit Elektrikli Araçlar.....	58
2.5.1. Hibrit Elektrikli Tahrik Sistemleri.....	59
2.5.2. Hibridizasyon Dereceleri.....	63
2.5.3. Hibrit Tahrik Sistem Mimarileri.....	66
2.6. Hibrit ve Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorları	77
2.6.1. Asenkron Makinalar	81
2.6.2. Anahtarlama Relüktans Makinalar	81
2.6.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalar	82

2.6.4. Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Makinalar	83
3. SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİ VE TASARIMI.....	84
3.1. Sürüş Çevrimlerinin Sınıflandırılması	86
3.1.1. Yasama Karakteristiği	87
3.1.2. Sinyal Kaynağı ve İlgili Şekil.....	87
3.1.3. Araç Sınıfı ve/veya Güç Sınıfı.....	87
3.1.4. Çevrime Özel Uygulanabilirlik	88
3.1.5. Sürüş Çevrim Örnekleri.....	88
3.2. Sürüş Çevrimlerinin Karakterizasyonu.....	95
3.2.1. Sürüş Çevrimlerini Tanımlayan Parametreler	95
3.2.2. Performans dağılım analizi	97
3.3. Tezde Kullanılacak Sürüş Çevrimleri.....	100
3.3.1. NEDC, Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi	100
3.3.2. WLTP, Dünya Hafif Hizmet Test Prosedürleri.....	102
3.3.3. NEDC ve WLTP Arasındaki Farklar.....	103
3.3.4. US06 ve ArtMW150 Sürüş Çevrimleri	104
3.4. Gerçek Bir Sürüş Çevrimi Tasarımı.....	105
3.4.1. Metodoloji	106
3.4.2. Elazığ İli Gerçek Sürüş Çevrim Tasarımı.....	109
3.5. NEDC, WLTP, US06, ArtMW150 ve ELZ130 Sürüş Çevrimlerinin Analizi	112
4. MATERYAL VE METOT	115
4.1. Araç Dinamikleri ve Modellenmesi	115
4.1.1. Aerodinamik Sürtünme	116
4.1.2. Yuvarlanma Direnci	118
4.1.3. Eğim Direnci.....	119
4.1.4. Dinamik Eşitlikler.....	120
4.2. Tasarlanan Aracın Performansı Parametrelerinin Belirlenmesi	121
4.3. Yakıt Pili ve Karakteristiklerinin Modellenmesi	123
4.4. Batarya ve Karakteristiklerinin Modellenmesi	128
4.5. Cer Motoru ve Karakteristiklerinin Modellenmesi	132
4.6. Güç Yönetim Sisteminin Modellenmesi	138
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	143
5.1. NEDC Sürüş Çevrimi Simülasyonu.....	143
5.2. WLTP Sürüş Çevrimi Simülasyonu.....	151
5.3. US06 Sürüş Çevrimi Simülasyonu	158
5.4. ArtMW150 Sürüş Çevrimi Simülasyonu.....	164
5.5. ELZ130 Sürüş Çevrimi Simülasyonu	169
5.6. Bulguların Analizi	175
6. SONUÇLAR	177
ÖNERİLER.....	180
KAYNAKLAR.....	181
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Yakıt Pili-Batarya Hibrit Güç Kaynağından Beslenen Elektrikli Araç Geliştirilmesi

Habip ŞAHİN

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2022, Sayfa: xviii + 189

Günümüzde artan enerji talebi ile birlikte her türlü enerji kaynağı değerlendirilmeye çalışılmaktadır. Enerji talebindeki bu artış ile büyük miktarda fosil yakıtların uzun vadeli kullanımının beraberinde getirdiği çevresel olumsuzluklar yadsınamaz boyutlara ulaşmış ve dünya medeniyetinin gelişiminin karşı karşıya olduğu ortak bir sorun olarak kabul edilmiştir. Tüm dünyada enerji tüketiminde büyük paya sahip olan ulaşım alanında, çevresel zararı en aza indirmek ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji çözümlerine odaklanılmaktadır. Bu nedenle içten yanmalı araç teknolojilerinden elektrikli araç teknolojilerine doğru bir yönelim söz konusudur. Bu yönelim sonucunda elektrikli araç çözümleri her alanda hızla gelişmektedir. Rekabetçi bir sürüş menzili, kısa yakıt ikmali süresi ve sıfır emisyon ile Yakıt Pili Elektrikli Araçlar (YPEA'lar), geleceğe ışık tutabilecek araç teknolojileri içinde en olası bir çözüm olarak kabul edilmektedir.

Yakıt pilinin güç üretmeye hazır hale gelmesi için miktar zaman ve enerji gerekir ve ani güç gereksinimlerini karşılamakta gecikir dolayısıyla bu dezavantajları eleyebilecek ikinci bir enerji depolama cihazı ile hibritlenmesi gereklidir. Bu ikincil enerji depolama cihazı aynı zamanda pik yükleri ve yüksek güç dinamiklerini de karşılar ve verimliliği artırmak için frenleme enerjisinin geri kazanılmasına olanak sağlar. Bu nedenle bu çalışmada proton elektrolit membranlı yakıt pili ile lityum-iyon batarya elektrikli bir araca birlikte güç sağlamışlardır.

Bu tez çalışmasında, yakıt pili-batarya hibrit güç kaynağından beslenen elektrikli araç geliştirilmesi amacıyla MATLAB tabanlı Simscape ile yakıt pili fişli hibrit elektrikli bir araç modellenmiştir. Bu araç modelinin simülasyonu NEDC, WLTP Class 3, US06, Artemis Motorway 150 ve gerçek sürüş verileriyle oluşturulan ELZ130 sürüş çevrimlerinde yapılmıştır. Bu simülasyonlarla tasarlanan araç farklı çevrim şartlarında çalışmasını kararlı olarak tamamlamış ve çevrimlerden elde edilen veriler ile performans, verimlilik ve bunlarla bağlantılı birçok parametre elde edilmiştir. Simülasyonların en önemli sonuçları arasında tasarlanan aracın yakıt tüketimi ve menzili olup bu değerler NEDC, WLTP ve ELZ130 için sırasıyla benzin eşdeğer tüketimi olarak 2,08, 2,39, 2,44 L/100 km ve menzil olarak 986, 858,6, 841 km olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Batarya, Elektrikli Araç, Emisyon, Hibrit Araç, Hidrojen, Yakıt Pili, Yakıt Tüketimi.

ABSTRACT

Development of an Electric Vehicle Powered by a Fuel Cell-Battery Hybrid Power Source

Habip ŞAHİN

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Energy Systems Engineering

June 2022, Pages: xviii + 189

Today, with the increasing energy demand, all kinds of energy sources are being evaluated. With this increase in energy demand, the environmental problems brought about by the long-term use of large amounts of fossil fuels have reached undeniable dimensions and have been accepted as a common problem facing the development of world civilization. In the field of transportation, which has a large share in energy consumption all over the world, renewable and sustainable energy solutions are focused on to minimize environmental damage and reduce dependence on fossil fuels. For this reason, there is a trend towards electric vehicle technologies from internal combustion vehicle technologies. As a result of this orientation, electric vehicle solutions are developing rapidly in every field. With a competitive driving range, short refueling time and zero emissions, Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs) are considered the most likely solution among vehicle technologies that can shed light on the future.

Since the fuel cell needs some time and energy to be ready to produce power and it is late to meet the sudden power requirements, it should be hybridized with a second energy storage device that can eliminate these disadvantages. This secondary energy storage device also handles peak loads and high power dynamics and allows braking energy to be recovered to increase efficiency. Therefore, in this study, a proton exchange membrane fuel cell and a lithium-ion battery power an electric vehicle together.

In this thesis, a fuel cell plug-in hybrid electric vehicle is modeled with MATLAB-based Simscape in order to develop an electric vehicle powered by a fuel cell-battery hybrid power source. This vehicle model is simulated on NEDC, WLTP Class 3, US06, Artemis Motorway 150 and ELZ130 driving cycles created with real driving data. Designed with these simulations, the vehicle has consistently completed its operation under different cycle conditions and performance, efficiency and many related parameters have been obtained with the data obtained from the cycles. Among the most important results of the simulations are the fuel consumption and range values of the designed vehicle. These values are 2.08, 2.39, 2.44 L/100 km as gasoline equivalent consumption and 986, 858, 841 km as range for NEDC, WLTP and ELZ130, respectively.

Keywords: Battery, Electric Vehicle, Emission, Fuel Cell, Fuel Consumption, Hybrid Vehicle, Hydrogen.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Tipik bir yakıt pilli tahrik sisteminin temel konfigürasyonu	2
Şekil 1.2. Tahmini Petrol Üretimi - “En İyi Tahmin” Senaryosu [18].....	5
Şekil 1.3. 2010-2020 Dünya geneli EA stoku [22].	7
Şekil 1.4. 1966 GM Electrovan Yakıt Hücresi Sistemi Düzeni [28].	8
Şekil 1.5. Yakıt pili, batarya ve kondansatörlerin enerji ve güç yoğunlukları	19
Şekil 2.1. Elektrot yüzeyinden akım almak ve ayrıca elektrotta gaz sağlamak için uç plakaları olan tek hücre [79].	26
Şekil 2.2. Membran elektrot grupları [80].....	26
Şekil 2.3. Bipolar plakaların bağlantısını gösteren üç hücreli bir yığının görünümü [79].	26
Şekil 2.4. Bir PEM yakıt pili için elektrot reaksiyonları ve yük akışı [79].....	27
Şekil 2.5. Yakıt hücresi giriş ve çıkışları.....	28
Şekil 2.6. Tipik bir düşük sıcaklıklı yakıt hücresi için hücre gerilimi, akım yoğunluğu grafiği [79].	31
Şekil 2.7. Farklı basınç değerlerinde hidrojen enerji yoğunluğu ve eşdeğer litre benzin karşılığı [83]....	33
Şekil 2.8. Çeşitli metal hidrür ve sıkıştırılmış hidrojen tanklarında 6 kg hidrojeni (22 L benzin eşdeğeri) depolamak için gereken kütle ve hacim [84].	35
Şekil 2.9. Bir yakıt hücresinin tipik çalışma karakteristikleri [83].	36
Şekil 2.10. Tipik bir yakıt pilli hibrit aktarma organının konfigürasyonu [83]. 1: Gaz pedalı; 2: fren pedalı; 3: araç kontrolörü; 4: yakıt pili sistemi; 5: yardımcı güç kaynağı; 6: enerji yönetim sistemi; 7: motor kontrolörü; 8: çekiş elektrik motoru; 9: aktarma organı; 10: tekerlekler. (1): gaz komut sinyali; (2): fren komut sinyali; (3): yardımcı gücün enerji sinyali; (4): yakıt pili güç sinyali; (5): enerji yönetim sistemi kontrol sinyali; (6): motor kontrol sinyali; (7): hız	37
Şekil 2.11. Kontrol stratejisinin akış şeması	38
Şekil 2.12. Tipik bir pilin kesme gerilimi	40
Şekil 2.13. Kurşun asit akünün farklı akımlarda deşarj karakteristikleri [83].....	40
Şekil 2.14. Tipik bir bataryanın şarjı ve deşarj verimliliği.....	43
Şekil 2.15. Marş bataryası(solda), derin döngülü batarya (sağda)	45
Şekil 2.16. Li-ion bataryaların çeşitli alanlarda karşılaştırılması	49
Şekil 2.17. Birincil elektrikli araç güç aktarma organı	52
Şekil 2.18. Genel EA yapılandırmasının kavramsal temel çizimi [83].	53
Şekil 2.19. Elektrikli tahrik konfigürasyonları [91].	54
Şekil 2.20. Tipik değişken hızlı elektrik motoru özellikleri.....	55
Şekil 2.21. 60 kW elektrik motorunun $x = 2, 4$ ve 6 değerleri için hız-tork karakteristiği	56
Şekil 2.22. $x = 2$ çekiş motoru ve üç vitesli şanzıman ile çekiş kuvveti ve araç hızı [83].	57

Şekil 2.23.	$x = 4$ çekiş motoru ve iki vitesli şanzıman ile çekiş kuvveti ve araç hızı [83].....	57
Şekil 2.24.	$x = 6$ çekiş motoru ve tek vitesli şanzıman ile çekiş kuvveti ve araç hızı [83].	58
Şekil 2.25.	Bir hibrit elektrikli aktarma organının konsept çizimi	60
Şekil 2.26.	Sabit ve dinamik bileşenlere ayrıştırılmış bir yük gücü	62
Şekil 2.27.	Araç aktarma organlarının elektrifikasyonu.....	62
Şekil 2.28.	Hibrit güç aktarma topolojisi [94].....	63
Şekil 2.29.	Bir seri hibrit elektrikli aktarma organının konfigürasyonu	67
Şekil 2.30.	Bir paralel hibrit elektrikli aktarma organının konfigürasyonu	68
Şekil 2.31.	Yaygın olarak kullanılan mekanik tork kaplin cihazları	69
Şekil 2.32.	İki şanzıman ve iki şaftlı konfigürasyon	70
Şekil 2.33.	İki şaft ve tek şanzımanlı konfigürasyon	71
Şekil 2.34.	Ayrılmış aks tork kuplajlı paralel hibrit elektrikli aktarma organları	72
Şekil 2.35.	Tipik hız kuplaj cihazları	73
Şekil 2.36.	Planet dişli ünitesinin hız kuplajlı hibrit elektrikli aktarma organları.....	74
Şekil 2.37.	Elektrikli transmotorun hız kuplajlı hibrit elektrikli aktarma organları	75
Şekil 2.38.	Planet dişli üniteli alternatif tork ve hız kuplajlı hibrit elektrikli aktarma organları.....	76
Şekil 2.39.	Entegre hız ve tork kuplajlı hibrit elektrikli aktarma organları (Toyota Prius)	77
Şekil 2.40.	BEA ve HEA'lar için mevcut motor tipleri	80
Şekil 2.41.	a) Asenkron makine, b) Anahtarlama relüktans makina, c) Sürekli mıknatıslı senkron makina, d) Sürekli mıknatıs destekli senkron relüktans makina	80
Şekil 3.1.	NEDC, Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (New European Driving Cycle).....	89
Şekil 3.2.	EUDC, Şehir Dışı Sürüş Çevrimi (Extra Urban Driving Cycle)	89
Şekil 3.3.	FTP-72 döngüsü, Federal Test Prosedürü 72	90
Şekil 3.4.	US06 Çevrimi, Ek Federal Test Prosedürü	90
Şekil 3.5.	ETC, Avrupa Transient Çevrimi	91
Şekil 3.6.	West Virginia Üniversitesi tarafından geliştirilen Orange County Otobüs Çevrimi	92
Şekil 3.7.	Artemis Kentsel Sürüş Çevrimi	93
Şekil 3.8.	Artemis Kırsal Yol Sürüş Çevrimi	93
Şekil 3.9.	Artemis Otoyol 150 km/h Sürüş Çevrimi (ArtMW150)	94
Şekil 3.10.	WLTP çevrimi Class 3	95
Şekil 3.11.	Farklı bölgelerde araç hız dağılımı [131].	98
Şekil 3.12.	WLTP çevrimi Class 3 başlangıç ivmelenmesi dağılım analizi	98
Şekil 3.13.	WLTP çevrimi Class 3 duraklama süresi dağılım analizi	99
Şekil 3.14.	WLTP çevrimi Class 3 ivme değişimi (sarsıntı) dağılım analizi	99

Şekil 3.15.	WLTP çevrimi Class 3 zamana göre hız-ivme dağılım analizi.....	100
Şekil 3.16.	ECE kentsel sürüş Çevrimi (Tek çevrim)	101
Şekil 3.17.	Tasarlanan sürüş çevriminin SAPD matrisi 3d bar (solda) ve kontur çizimi (sağda)	108
Şekil 3.18.	Elazığ ili araç GPS izleri.....	110
Şekil 3.19.	Gerçek sürüş çevrimi ELZ130 hız-zaman grafiği	111
Şekil 3.20.	Simülasyonda kullanılan çevrimler	113
Şekil 3.21.	Çevrimlerin maksimum ve ortalama hızlarının karşılaştırılması	113
Şekil 3.22.	Çevrimlerin maksimum, minimum, ortalama ivmeleri ve ivme standart sapmaları	114
Şekil 4.1.	Bir araca etki eden kuvvetler.....	116
Şekil 4.2.	Şekil sürüklemesi	117
Şekil 4.3.	(a) sert ve (b) yumuşak yol yüzeyinde lastik yön değiştirme ve yuvarlanma direnci	118
Şekil 4.4.	MATLAB Simscape yakıt pili bloğu	124
Şekil 4.5.	60 kW PEM yakıt pili akım-gerilim karakteristikleri	125
Şekil 4.6.	60 kW PEM yakıt pili tam gaz çalışmadaki akım, gerilim, güç ve sıcaklık değerleri	126
Şekil 4.7.	60 kW PEM yakıt pili tam gaz çalışmadaki karakteristiklerinin zaman bağlı değişimi	127
Şekil 4.8.	Yakıt pili ve konverter blok modelleri	127
Şekil 4.9.	Batarya ve DC-DC konverter blok modelleri	129
Şekil 4.10.	Panasonic NCR18650BD Li-ion NCA pili Gerilim-BDO karakteristiği.....	129
Şekil 4.11.	Batarya paketinin model görünümü ve tipik bir 18650 tipi pile ait boyutlar	131
Şekil 4.12.	BDO'na göre şarj ve deşarj oranlarının değişimi	131
Şekil 4.13.	136 kW DSMSM Moment-Hız ve Güç-Hız karakteristiği	133
Şekil 4.14.	MATLAB kütüphanesindeki tablolaştırılmış motor blok modeli	133
Şekil 4.15.	136 kW DSMSM verimlilik haritası	134
Şekil 4.16.	Hız değerlerine göre çekme kuvveti F_c ve direnç kuvveti, F_d	135
Şekil 4.17.	Araca ait tam gaz hızlanma grafiği	136
Şekil 4.18.	Elektrik tahrik sisteminin MATLAB Simscape blok modeli.....	137
Şekil 4.19.	Güç yönetim sistemi akış şeması	138
Şekil 4.20.	Batarya yönetim sistemine ait blok diyagramı	140
Şekil 4.21.	Tork komutunun türetilmesin ait blok diyagramı	140
Şekil 4.22.	Motor veya generatör çalışma karar bloğu.....	141
Şekil 4.23.	Tahrik güç yönetim sistemi	141
Şekil 4.24.	Yakıt pili batarya hibrit araç MATLAB Simscape modeli	142
Şekil 5.1.	NEDC çevriminde araç hızına bağlı olarak BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi	144

Şekil 5.2.	Benzin L/100 km eşdeğer yakıt tüketimi hesap modeli	144
Şekil 5.3.	NEDC çevrimi esnasında yakıt pili ve bataryanın akım, gerilim ve güç karakteristikleri.....	146
Şekil 5.4.	NEDC çevrimi esnasında güç akışı.....	148
Şekil 5.5.	NEDC çevrimi esnasında cer motoruna ait akım, gerilim, tork, hız ve güç verileri	149
Şekil 5.6.	NEDC çevrimi esnasında yakıt pili ile batarya enerji değişimi ve yakıt pili sıcaklığı ile verimi	150
Şekil 5.7.	WLTP çevriminde araç hızına bağlı olarak BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi	152
Şekil 5.8.	WLTP çevrimi esnasında yakıt pili ve bataryanın akım, gerilim ve güç karakteristikleri.....	154
Şekil 5.9.	WLTP çevrimi esnasında güç akışı.....	156
Şekil 5.10.	WLTP çevrimi esnasında cer motoruna ait akım, gerilim, tork, hız ve güç verileri	157
Şekil 5.11.	WLTP çevrimi esnasında yakıt pili ile batarya enerji değişimi ve yakıt pili sıcaklığı ile verimi	158
Şekil 5.12.	US06 çevriminde araç hızına bağlı olarak BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi	159
Şekil 5.13.	US06 çevrimi esnasında yakıt pili ve bataryanın akım, gerilim ve güç karakteristikleri.....	160
Şekil 5.14.	US06 çevrimi esnasında cer motoruna ait akım, gerilim, tork, hız ve güç verileri.....	161
Şekil 5.15.	US06 çevrimi esnasında yakıt pili ile batarya enerji değişimi ve yakıt pili sıcaklığı ile verimi	163
Şekil 5.16.	ArtMW150 çevriminde araç hızına bağlı olarak BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi	164
Şekil 5.17.	ArtMW150 çevrimi esnasında yakıt pili ve bataryanın akım, gerilim ve güç karakteristikleri	165
Şekil 5.18.	ArtMW150 çevrimi esnasında cer motoruna ait akım, gerilim, tork, hız ve güç verileri	166
Şekil 5.19.	ArtMW150 çevrimi esnasında güç akışı	167
Şekil 5.20.	ArtMW150 çevriminde yakıt pili ile batarya enerji değişimi ve yakıt pili sıcaklığı ile verimi	168
Şekil 5.21.	ELZ130 çevriminde araç hızına bağlı olarak BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi	169
Şekil 5.22.	ELZ130 çevrimi esnasında yakıt pili ve bataryanın akım, gerilim ve güç karakteristikleri ...	171
Şekil 5.23.	ELZ130 çevrimi esnasında güç akışı	172
Şekil 5.24.	ELZ130 çevrimi esnasında yakıt pili ile batarya enerji değişimi ve yakıt pili sıcaklığı ile verimi	174

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Yakıt pillerinin türleri ve çeşitli özellikleri [78].	24
Tablo 2.2. Maksimum EMK, gf ve hidrojen yakıt hücreleri için verimlilik sınırı	30
Tablo 2.3. EA ve HEA'lar için aday pillerin teorik spesifik enerjileri [86].	42
Tablo 2.4. Yaygın olarak kullanılan Li-ion bataryaların karakteristik özellikleri [88,89].	50
Tablo 2.5. Hibridizasyon seviyelerinin karşılaştırılması	64
Tablo 2.6. Farklı hibrit akülü araçların fonksiyonları [96].	65
Tablo 2.7. Ticari olarak bulunan BEA ve HEA'larda kullanılan elektrikli makinalarının özellikleri [101].	79
Tablo 3.1. ARTEMIS içinde kullanılan 40 parametrelerin tam listesi [128].	96
Tablo 3.2. NEDC'in ana karakteristikleri [128].	102
Tablo 3.3. WLTP'nin ana karakteristikleri [134].	102
Tablo 3.4. NEDC ile WLTP'nin temel farklılıkları	103
Tablo 3.5. US06 ve Artemis MW150 karakteristikleri	105
Tablo 3.6. Tasarlanan sürüş çevriminin ana karakteristikleri	108
Tablo 3.7. Tasarlanan sürüş çevrimi ELZ130'a ait karakteristikler	112
Tablo 4.1. Eşdeğer tekerlek kuvvetine sahip tipik hızlanma ve eğim seviyeleri	120
Tablo 4.2. Tasarlanan araca ait temel özellikler	122
Tablo 4.3. Tasarlanan PEM yakıt pili yığınının ait temel özellikler	123
Tablo 4.4. Tasarlanan batarya paketinde kullanılan pile ait temel özellikler	128
Tablo 4.5. Tasarlanan batarya paketine ait temel özellikler	130
Tablo 5.1. Sürüş çevrimlerinde elde edilen simülasyon sonuçları	175
Tablo 5.2. Tasarım aracının diğer araçlarla karşılaştırılması[162–173]	176

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

α	: Aktivite katsayısı
A_f	: Araç ön alanı
BDO_0	: Batarya doluluk oranı başlangıç değeri
C	: Nominal batarya kapasitesi
C_r	: Yuvarlanma sürtünme katsayısı
C_d	: Aerodinamik sürtünme katsayısı
CO	: Karbon monoksit
CO_2	: Karbondioksit
e	: Elektron yükü
E	: Yakıt hücresinin gerilimi
E^0	: Standart basınçtaki hücre gerilimi
E_H	: Hidrojen enerjisi
F	: Faraday sabiti
F_a	: Aerodinamik sürtünme kuvveti
$F_ç$	: Toplam çekme kuvveti
$F_{ça}$	: Arka tekerleklerin çekme kuvveti
$F_{çö}$	: Ön tekerleklerin çekme kuvveti
F_e	: Eğim kuvveti
F_y	: Yuvarlanma sürtünme kuvveti
F_t	: Çekiş kuvveti
g	: Yerçekimi ivmesi
$\bar{g}_f$	: Gibbs serbest enerjisi
H_2	: Hidrojen gazı
HC	: Hidrokarbon
i	: Akım
i_0	: Nihai dişli oranı
i_g	: Şanzıman dişli oranı
$i_{g,min}$	: Minimum şanzıman dişli oranı
KOH	: Potasyum hidroksit
L	: Aks mesafeleri

Simgeler

M	: Kütle
m_H	: Hidrojenin kütlesi
M_H	: Hidrojenin moleküler ağırlığı
MEG	: Membran elektrolit grubu
N	: Avogadro sayısı
N_m	: Motor hızı d/d
$N_{m,maks}$	: Maksimum motor hızı d/d
NiCd	: Nikel kadmiyum
NiMH	: Nikel metal hidrür
NO_2	: Nitrojen dioksit
NO_x	: Nitrojen oksitler
O_2	: Oksijen gazı
$P_{f,kom}$	: Fren komut gücü
P_{kom}	: Komut gücü
$P_{m,giriş}$	: Motor giriş gücü
$P_{m,çıkış}$	: Motor çıkış gücü
P_{ygk}	: Yardım güç kaynağı gücü
$P_{ygk,ç}$	: Yardım güç kaynağı çekiş gücü
$P_{ygk,ş}$	: Yardım güç kaynağı sarj gücü
P_{yp}	: Yakıt pili gücü
$P_{yp,nom}$	: Yakıt pili nominal gücü
Q	: Batarya kapasitesi
R	: Gaz sabiti
R_d	: Herhangi bir noktada Dünya'nın yarıçapı
r_d	: Tekerlek yarıçapı
R_e	: Ekvatorda Dünya'nın yarıçapı
R_k	: Kutuplarda Dünya'nın yarıçapı
P	: Basınç
P^0	: Standart basınç
s	: Lastik kayması
T	: Mutlak sıcaklık
v	: Hız

Simgeler

V_0	: Termodinamik gerilimi
V_{akt}	: Aktivasyon gerilimi
V_c	: Yakıt hücresinin çalışma gerilimi
V_{diff}	: Kütle transfer gerilimi
V_{ohm}	: Direnç gerilimi
v_r	: Rüzgâr hızı
V_r	: Hücre tersinir gerilimi
V_r^0	: Standart koşullarda tersinir hücre gerilimi
λ	: Boylam
ρ	: Yoğunluk
τ_ζ	: Çıkış torku
τ_g	: Dişli torku
τ_m	: Motor torku
φ	: Enlem
ω	: Açısal hız
ω_g	: Dişli hızı
$W_{a,\delta}$	: Ön ve arka akslar üzerindeki yük
W_H	: Hidrojenin Moleküler ağırlığı
η	: Verimlilik
η_m	: Motordan tekerleğe aktarma oranı verimi
μ_y	: Yakıt kullanım katsayısı
ΔBDO	: Batarya doluluk oranındaki değişim
$\Delta \bar{g}_f$	: Gibbs serbest enerjisindeki değişim
$\Delta \bar{g}_f^0$	: Standart basınçta Gibbs serbest enerjisindeki değişim

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
AB-28	: 28 Avrupa Birliği ülkesi
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AGM	: Emdirilmiş Cam Elyaf
ARM	: Anahtarlama relüktans makine
ArtemisURM130	: Genel Artemis Sürüş Çevrimi
ArtMW150	: Artemis Otoyol Sürüş Çevrimi 150 km/h
ASM	: Asenkron makina
AYP	: Alkali yakıt pili
BDO	: Batarya doluluk oranı
BEA	: Bataryalı elektrikli araç
DC	: Doğru akım
DMYP	: Doğrudan metanol yakıt pili
DOH	: Hibridizasyon Derecesi
DPF	: Dizel partikül filtresi
DSMSM	: Dahili sürekli mıknatıslı senkron motor
EA	: Elektrikli araç
ECE15	: Avrupa şehir içi sürüş çevrimi
EK	: Enerji kapasitesi
EKYP	: Erimiş karbonat yakıt pili
EMK	: Elektromotor kuvveti
ETC	: Avrupa Transient Çevrimi
EUDC	: Şehir Dışı Sürüş Çevrimi
EYS	: Enerji yönetim sistemi
FAYP	: Fosforik asit yakıt pili
FHEA	: Fişli hibrit elektrikli araç
FTP-72	: Federal Test Prosedürü 72
FTP-75	: Federal Test Prosedürü 75
GHG	: Sera gazları
GNSS	: Global Navigasyon Uydu Sistemleri
GPS	: Global Konumlama Sistemi
HEA	: Hibrit elektrikli araç
HV	: Isıl değer

Kısaltmalar

IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
LAB	: Kurşun asit batarya
LH2	: Sıvılaştırılmış hidrojen
Li-ion	: Lityum iyon
Li-Po	: Lityum-polimer
İYMA	: İçten yanmalı motorlu araç
KOYP	: Katı oksitli yakıt pili
NEDC	: Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi
ÖTV:	: Özel tüketim vergisi
PEM	: Proton elektrolit membran
PEMYP	: Proton elektrolit membran yakıt pili
PEMYH	: Proton elektrolit membran yakıt hücresi
PM	: Partikül madde
SEA	: Sıfır emisyon araç
SGHA	: Sabit güç-hız aralığı
SHEA	: Seri hibrit elektrikli araç
SMSM	: Sabit mıknatıslı senkron makine
SMSRM	: Sürekli mıknatıs destekli senkron relüktans makina
SLA	: Sızdırmaz Kurşun asit
SRM	: Senkron relüktans makinalardır
UNECE	: Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu
UDC	: Kentsel Sürüş Çevrimi
UPS	: Kesintisiz güç kaynağı
VRLA	: Valf ayarlı kurşun asit
WLTP	: Dünya Hafif Hizmet Test Prosedürleri
YGK	: Yardım güç kaynağı
YPEA	: Yakıt pilli elektrikli araç
YPFHEA	: Yakıt pilli fişli hibrit elektrikli araç
YPHEA	: Yakıt pilli hibrit elektrikli araç

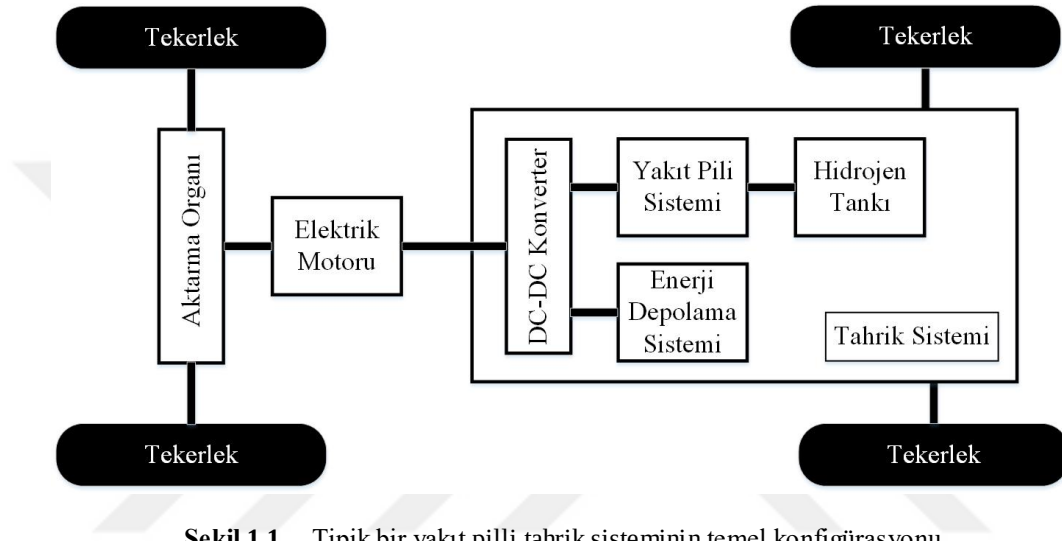
1. GİRİŞ

Dünya çapında binek araç sayısı 2010 yılı civarında 1 milyar sınırını geçmiştir, 2015 yılında bu sayı 1,28 milyara, 2019 yılında 1,42 milyara ulaşmış olup 2035 yılına kadar 2 milyar ve 2050 yılına kadar 2,5 milyar olacağı tahmin edilmektedir [1,2]. Şu anda, tahrik amacıyla kullanılan yakıtın %95'inden fazlası fosil kaynaklardan gelmektedir [3]. Sınırlı fosil yakıt rezervlerinin muazzam ölçekte kullanılması, dünyada petrol rezervlerinin tükenmesi, enerji güvenliği riskleri, sera gazı (GHG) emisyonları ve hava kirliliği gibi bir dizi önemli soruna neden olmaktadır.

Yollardaki araç sayısının artmasıyla birlikte çevresel etkileri ve yakıt tüketimi sorunları giderek daha ciddi hale gelmektedir. Araçlardan düşük emisyon ve yüksek yakıt ekonomisi talebi öncelikli bir konu haline gelmiş olup toplumun farklı alanlarından büyük ilgi görmektedir. Buna bağlı olarak son yıllarda geleneksel araçların enerji verimliliği önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Fakat fosil yakıtlara bağımlılık ve kirlilik, geleneksel araçların en büyük dezavantajları olmuştur. Buna çözüm olarak, içten yanmalı motorlu araçların (İYMA) elektrifikasyonu gündeme gelmiştir. Böylece saf elektrikli araçlar (EA), hibrit elektrikli araçlar (HEA) ve yakıt pilli elektrikli araçlar (YPEA) gibi birçok alternatifler ortaya çıkmıştır [4]. Elektrik motoru, verimliliği artırmak için geleneksel içten yanmalı motorun yerini almak veya ona yardımcı olmak için kullanılır. Bataryalı elektrikli araçlar (BEA), batarya ile çalışır ve en büyük sorunu, makul boyuttaki pilin sağlayabildiği kısa menzildir. HEA, bataryanın sağladığı elektriği ve fosil yakıtları hibrit enerji kaynakları olarak bir araya getirerek, sürüş menzili ve sistem verimliliğini artırırken, kontrol stratejisi iki veya daha fazla kaynak nedeniyle daha karmaşık hale gelir. Ek olarak, İYMA ve HEA'lar sıfır emisyon hedefini tam olarak gerçekleştiremez.

BEA, HEA ve YPEA benzer araç kontrol teknolojilerini paylaşırlar ancak aracı hareket ettirmek için kullanılan enerji kaynaklarında farklılık gösterirler. BEA, çekiş için bir elektrik motoru ve araca güç sağlamak için tek enerji kaynağı olarak bataryalar kullanır. BEA, geleneksel İYMA göre sıfır emisyon, yüksek verimlilik, fosil yakıtlardan bağımsızlık gibi birçok avantaj sunar [5]. Ancak, sınırlı sürüş mesafesine sahiptirler ve uzun pil şarj süresi gerektirirler. HEA tahrik sistemleri, iki enerji kaynağı ile donatılmıştır: sıvı veya gaz halinde bir kimyasal yakıtla sahip motor ve bir enerji depolama tamponu olarak hizmet edebilen ve frenleme esnasında aracın kinetik enerjisini geri kazanabilen bir şarj edilebilir enerji depolama sistemidir (tipik olarak bataryalar veya süper kapasitörler) [6]. HEA, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha uzun sürüş mesafesi ve çok daha düşük emisyon sunar, ancak fosil yakıt bağımlılığı ve motordan kaynaklanan kirlilik kritik sorunlar olarak mevcudiyetlerini devam ettirir. Alternatif yakıtlarla yakıt ekonomisinin artırılması, yakıt pillerinin ulaşım için gelişmiş güç kaynakları olarak kullanılmasına imkân sağlamıştır [7]. Yakıt hücreleri verimlidir ve geleneksel içten yanmalı motorlara kıyasla yüksek verimlilik ve çok daha düşük GHG emisyonu ile kimyasal enerjiyi temiz bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürür

[8]. Yakıt pili sistemlerinin dinamik tepkisini ve dayanıklılığını geliştirmek için, yakıt pillerinin bataryalar veya süper kapasitörler gibi enerji depolama sistemleriyle hibridizasyonu gereklilik arz etmiş olup bunun neticesinde yakıt pilli hibrit elektrikli araçlar (YPHEA) ortaya çıkmıştır [9]. Şekil 1.1, tipik bir yakıt pilli tahrik sisteminin temel düzenini göstermektedir. Tahrik sistemi, bir yakıt hücresi yığını ve aracı sürmek için bir enerji depolama sisteminden oluşur. Bu nedenle, bu tür tahrik sistemi BEA ve HEA avantajlarını birleştirir ve verimli, kirlilik içermeyen ve uzun menzilli sürüş deneyimi sunar.



Şekil 1.1. Tipik bir yakıt pilli tahrik sisteminin temel konfigürasyonu

1.1. Mevcut Ulaşım Sorunlarının ve Geleceğinin Gözden Geçirilmesi

Giderek artan enerji talepleri ve yeni petrol bulgularının küresel ölçekte tamamlanamaması nedeniyle, diğer alternatif enerji kaynaklarının araştırılması gerektiğine bir önceki bölümde değinilmişti. 1970'lerde, petrol ve gaz üretimindeki dramatik düşüş, otomobillerin tasarımında köklü değişiklikler yapılmasını zorunlu kılmış ve otomobil üreticileri daha iyi yakıt verimliliği elde etmek için daha kompakt otomobiller üretmiştir. Yakın geçmişte, yakıt verimliliği standartlarını yükselten ve emisyon değerlerini daha düşük değerlerle sınırlayan yasalar, otomobil üreticilerini daha fazla yakıt verimli arabalar üretmeye ve alternatif enerjiyi kullanımına yönelmeyi teşvik etmiştir.

Motorlu taşıt emisyonlarının, hidrokarbon emisyonunun %30-50'sini, karbon monoksit emisyonunun %80-90'ını ve nitrojen oksit emisyonunun %40-60'ını oluşturduğu yapılan çalışmalarla gösterilmiştir [10]. Otomobiller ve hafif ticari araçlar, güçlü bir sera gazı olan karbondioksitin bir ülkedeki yaklaşık %20'sinden sorumludur. Motorlu taşıt karbon emisyonları esasen tüketilen toplam yakıtle orantılıdır. Yakıt ekonomisi ne kadar arttırılabilirse, yakıt tüketimi de bu oranda azaltılabilir ve emisyonlar daha verimli şartlar altında azaltılmış olur.

Fosil yakıtlarda daha az belirsizlik durumu ve daha temiz bir dünya için artan motivasyon, sürdürülebilir alternatif enerji kaynaklarına yönelik eğilimi oldukça olumlu şekilde yönlendirmektedir. Bu alandaki yenilikleri keşfetmek için önemli miktarda araştırma ve geliştirme çalışmaları akademik ve ticari olarak devam etmektedir. Bu alternatif kaynaklar tarafından tahrik edilen araçlar yalnızca petrolün hızla tükenmesi üzerindeki enerji baskısını hafifletmekle kalmaz, aynı zamanda toksik emisyonlar (HC, CO ve NO_x), GHG emisyonları veya diğer zararlı gazları hiç yaymaz ya da çok az yayarlar. Ayrıca, yeni enerji türleri ile çalışan araçlar, geleneksel araçlara göre daha iyi performans ve daha yüksek verimlilik sağlayabilir.

1.2. Elektrikli Araçları Gerekli Kılan Nedenler

Toplam GHG emisyonlarının çevreye geri dönüşü olmayan zararlara neden olmaması için 2050 yılına kadar %50-60 azaltılması gerektiğini gösteren çalışmalarla, karbon dioksit (CO₂) emisyon seviyelerinin yakın gelecekte iklim değişikliğinin boyutunu belirlemede önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir [11]. 2019 yılında ulaşım sektörü CO₂ emisyonları açısından, elektrik ve ısı üretiminden sonra tüm dünyada %24,45'lik pay ile ikinci sırada yer almaktadır [12]. Bu oran 2020 yılı için Türkiye'de de yine aynı sıralama ile %19,12 olmuştur [13].

Türkiye, emisyon konusunda yeni otomobiller veya hafif ticari araçlar için zorunlu CO₂ standartlarını uygulamayan birkaç G20 ülkesinden biridir. Türkiye'deki binek araçlar ortalama olarak AB'dekinden daha hafif ve daha az güce sahip olmasına rağmen, Türkiye'deki ortalama CO₂ emisyon seviyesi 2014 yılında 121 g/km olup bu değer 28 Avrupa Birliği ülkesinin (AB-28) 123 g/km olan ortalamasının sadece biraz altındadır [14]. Türkiye'deki araçlar diğer Avrupa ülkelerine göre %7 daha küçük motor hacmine, %3 daha az ağırlığa ve %13 daha az motor gücüne sahip olsa da, 2015 yılı itibari ile Türkiye'de yeni otomobillerin ortalama CO₂ emisyon seviyeleri Avrupa Birliği'ndeki (AB) araçların ortalamalarına eşit veya çok az daha yüksektir. 2010 yılı öncesi göz önüne alındığında Türkiye'deki yeni otomobillerin ortalama CO₂ emisyon seviyeleri AB'dekilere kıyasla oldukça düşük değerlerdedir [15]. Bu durumun temel nedeni ise Türkiye'de araçların özel tüketim vergisi (ÖTV) belirlenirken, içten yanmalı motorlu araçlar için araç emisyon seviyelerinin değil de motor hacimlerinin dikkate alınmıyor olmasıdır [16]. Düşük emisyonlu araçlar için vergi teşvikleri olmadığı için alıcıların büyük bölümü daha çok düşük vergi dilimine giren küçük hacimli motorları tercih etmektedir. Bu durum asıl öncelik emisyon değerlerini düşürmek olmasa bile dolaylı olarak emisyon değerlerinin nispeten düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Türkiye'de trafiğe yeni kayıtlı araçların ortalama CO₂ emisyon seviyesi, 2007'de 145 g/km'den 2017'de 120 g/km'ye sabit bir şekilde düşmesi bu tezi destekler niteliktedir [15].

Sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir karayolu ulaşım sistemi sağlama konularını ele almak için Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), olası üç alternatif düşük karbonlu güç aktarma teknolojisi belirlemiştir [17]. Bunlara BEA, YPEA ve biyoyakıtlarla (Bu çalışmanın kapsamı dışında olduğu

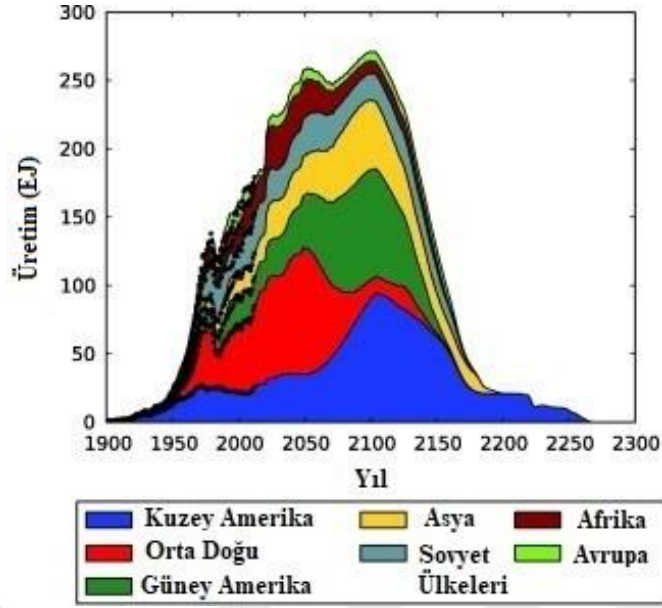
için ayrıca ele alınmayacaktır.) çalışan araçlar dâhildir. Bu nedenle, geri dönüşü olmayan iklim değişikliğini önlemek için sera gazı emisyonlarında %80'lik bir azalmaya ilişkin 2050 hedeflerine ulaşmak için sektörler karbondan arındırılırken, ulaşım uygulamasında sürdürülebilir düşük karbonlu çözümlerin geliştirilmesi önümüzdeki yıllarda kritik önem taşımaktadır.

BEA ve YPEA işletme esnasında herhangi bir emisyon üretmedikleri için sıfır emisyon araçlar (ZEV) olarak anılırlar. HEA kullanımıyla artırılan verimlilik sayesinde düşürülen emisyon salınımları, ulaşılabilecek verimliliğin üst limitlerini zorlamaya başladığından, daha fazla sürdürülebilir olmaktan uzaklaşmaktadır. Bu nedenle BEA ve YPEA gibi araç teknolojilerinin daha sürdürülebilir bir çözüm olarak kaçınılmaz oluşu aşikârdır. Tabi burada dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise tüketilen elektrik veya hidrojenin eldesi esnasında üretilen emisyonların göz ardı edilmemesi ve bunların da asgari seviyeye indirilmesi hayati önem arz etmektedir.

GHG emisyonlarından başka diğer sorunları sıralarsak:

- **Petrol Kaynaklarının Tükenmesi**

Fosil yakıtlar, milyonlarca yıl boyunca ısı ve basınca maruz kalmış çürüyen organik madde kalıntılarından oluşur. Sonuç olarak, bunlar sınırlı bir kaynaktır ve zaman içinde çıkarılması ve rafine edilmesi giderek daha karmaşık ve pahalı hale gelecektir. Şekil 1.2'de gösterilen yakın tarihli bir modelde, daha keskin bir şekilde düşmeye başlamadan önce 50-100 yıl daha plato (kademeli düşüşle) olması beklenen petrol üretiminin zirvesine ulaşmış olabileceğimizi ileri sürülmektedir [18]. Bu plato, geleneksel petroldeki düşüşleri kısmen dengeleyen geleneksel olmayan kaynakların çıkarılmasıyla açıklanmaktadır. Dünya çapındaki araç sayısındaki tahmini artış göz önüne alındığında, bu yakıtın mümkün olduğunca verimli kullanılması zorunludur.



Şekil 1.2. Tahmini Petrol Üretimi - “En İyi Tahmin” Senaryosu [18].

- **Enerji Güvenliği**

En endişe verici konulardan biri de enerji güvenliğidir ve bu sorunun küresel ölçeğinin dünya çapında bir takım toplumsal ve politik sonuçları vardır. Petrol dünya çapında eşit bir şekilde dağılmamıştır ve en büyük konvansiyonel rezervlerden bazıları politik olarak istikrarsız bölgelerde yoğunlaşmıştır. Türkiye ve AB gibi birçok ülkenin kendi rezervleri çok azdır ve bu nedenle arzının büyük bir bölümü ithalata dayalıdır. Özellikle ülkemizin dış ticaret açığının %15,42’si enerji ithalatından kaynaklandığı göz önünde bulundurulursa bunun ne denli önem arz ettiği daha da öne çıkmaktadır [19]. Her ne kadar elektrik üretiminde de bu ithal enerji kaynakları birincil enerji kaynağı olarak kullanılsa da elektrik üretiminde yerli kaynak kullanımı 2020 yılı itibari ile %63 oranına ulaşmıştır [20].

- **Hava kirliliği**

Fosil yakıtın yanması, sağlığa ve çevreye zararlı bir dizi kimyasal üretir. Araçların egzoz borularından yayılan ve çevre için endişe uyandıran bir takım zararlı bileşikler bulunmaktadır. CO₂, su ile birlikte tam yanmanın doğrudan bir ürünüdür. Bir sera gazı olmasının yanı sıra, asit yağmuru ve okyanus asitleşmesine katkıda bulunan karbonik asit oluşturacak şekilde suda çözünür. Karbon monoksit (CO), yakıtın eksik yanması sonucu oluşur. Hemoglobin ile birleşerek kanın oksijen taşıma yeteneğini azaltan karboksihemoglobin üretir. Yüksek dozlarda ölümcüldür ve daha küçük dozlarda baş dönmesi, baş ağrısı, mide bulantısı ve yorgunluğa neden olur. Normal çalışma koşulları altında, katalitik konvertördeki oksijenle reaksiyona girerek karbon dioksit oluşturması nedeniyle araçtan çok az miktarda da olsa karbon monoksit salınmaktadır. Partikül madde (PM), çoğunlukla egzozdan çıkan kurum olarak görülen eksik

yanmanın bir başka sonucudur. PM, egzoz gazında asılı kalan mikroskobik katı ve sıvı maddelerden oluşur ve solunum yolu hastalıkları ve kanser gibi bir dizi sağlık sorununa neden olabilir. Dizel araçlar tarafından üretilmeleri daha olasıdır ve bu nedenle modern dizel araçlarda genellikle PM emisyonlarını %80'e kadar azaltabilen dizel partikül filtresi (DPF) takılır. Hidrokarbon emisyonları genellikle yanmamış yakıt veya yağ sonucunda oluşur. Astıma, karaciğer hastalığına, akciğer hastalığına ve kansere neden olabilen çok çeşitli bileşikler kapsar. Azot oksitler (NO_x), aşırı yüksek sıcaklıklar nedeniyle havadaki azot ve oksijenin birleşmesiyle oluşan ve motorun en verimli şartlarda çalışırken dahi üretilen nitrik oksit (NO) ve nitrojen dioksit (NO_2) için genel bir terimdir. Bronşit veya amfizem gibi solunum yolu hastalıklarına neden olabilir veya bunları daha da kötüleştirebilir.

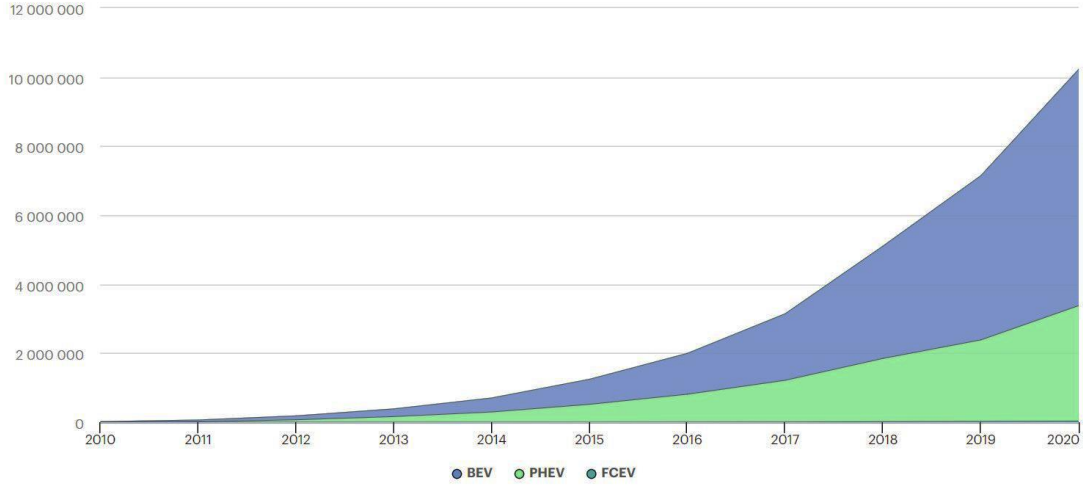
Önümüzdeki 50-100 yıl içinde, dünya nüfusu ve gelişmekte olan ülkeler arttıkça, kişisel hareketliliğe yönelik küresel talebin artacağı kesindir. En gelişmiş verimliliğe sahip konvansiyonel tahrik organları seçenekleri bile bunun ulaşım sektörünün daha yüksek ham petrol talebine yol açmasını engelleyemez. Ulaştırma endüstrisi fosil yakıtlara daha az bağımlı hale gelmedikçe, bunun artan düzeyde hava kirliliğine, sera gazlarına ve azalan fosil yakıt kaynakları nedeniyle artan nakliye maliyetlerine neden olması muhtemeldir. Kısa vadede BEV ve hibridizasyon ve uzun vadede hidrojen gibi alternatif, temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir yakıtların yaygınlaşmasıyla bunların üstesinden gelinebilir.

1.3. Elektrikli Araçların Durumu ve Kısıtlamaları

Ana ulaşım aracı olan taşıtlar, yüzyıllardır insanların günlük hayatında gerçekten önemli bir rol oynamaktadır. Bu alt bölümde, dünyadaki bazı büyük ülkelerde EA'ların piyasa durumu analizi ve elektrikli mobilite durumunun net bir resmini verebilecek EA'ların gelişimi için olumlu faktörler tartışılmıştır.

Global EA görünümü 2021 raporuna göre, on yıllık hızlı büyümenin ardından, 2020'de küresel elektrikli otomobil stoku, 2019'a göre %43'lük bir artışla ve toplam stokun %1'lik payını oluşturarak 10 milyona ulaşmıştır (Şekil 1.3). BEA, 2020'de yeni elektrikli otomobil kayıtlarının ve stokun üçte ikisini oluşturmuştur. 4,5 milyon elektrikli otomobille Çin en büyük filoya sahipken, 2020'de Avrupa 3,2 milyona ulaşan sayısı ile en büyük yıllık artışın yaşandığı bölge olmuştur [21]. Genel olarak, tüm araba türleri için küresel pazar önemli ölçüde Covid-19 pandemisinin ekonomik yansımalarından etkilenmiştir. 2020'nin ilk yarısında, yeni otomobil kayıtlarının önceki yıla göre yaklaşık üçte bir oranında düştüğü görülmüştür. Bu düşüş, ikinci yarıdaki daha güçlü aktivite ile kısmen dengelenmiş ve yıllık bazda %16'lık bir düşüşle sonuçlanmıştır. Özellikle, geleneksel ve genel yeni otomobil kayıtlarının düşmesiyle birlikte, küresel elektrikli otomobil satışlarının payı 2020'de %70 artarak %4,6'lık rekor bir seviyeye ulaşmıştır. 2020'de yaklaşık 3 milyon yeni EA tescil edilmiştir. İlk kez AB 1,4 milyon yeni tescille birinciliği Çin'den alırken, Çin de 1.2 milyon

kayıt ile AB'yi takip etmiş ve Amerika Birleşik Devletleri'nde ise 295 bin yeni EA kaydedilmiştir. Norveç'te EA'lar rekor yüksek satış payına ulaşarak 2019 yılına nazaran yaklaşık üçte bir oranında artarak %75'e yükselmiştir [21].



Şekil 1.3. 2010-2020 Dünya geneli EA stoku [22].

2022 Şubat ayı sonu itibari ile Türkiye'deki EA sayısı 100.407'i bulmuş olup toplamdaki payı sadece %0,7'de kalmıştır ve bunun yaklaşık sadece 5 bini BEA olmuştur. Yine 2021 yılı trafiğe kaydedilen EA sayısı 56.783 olup %9,2'lik bir paya sahiptir [23]. Her ne kadar Türkiye'de EA toplam araç sayısı içerisinde çok düşük bir paya sahip olsa da son yıllarda yeni araç içerisindeki payı %10'lara ulaşmaya başlamıştır. Bu oran AB ile karşılaştırıldığında elbette hala daha çok daha düşüktür [24].

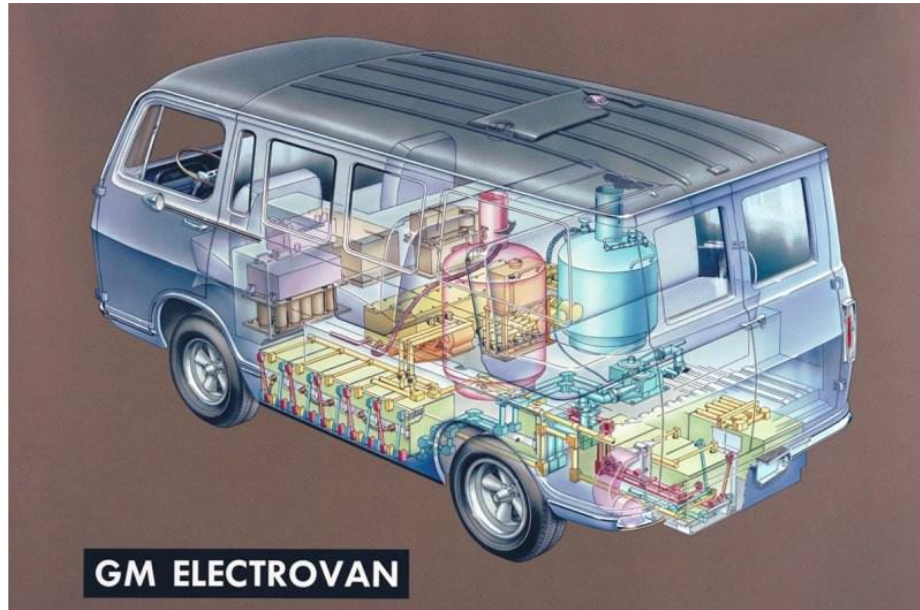
BEA günümüzde en popüler EA olarak kabul edilir, ancak hala çözüm bekleyen bazı dezavantajları vardır. BEA için menzil sınırlamalarında önemli bir faktör, dizel yakıt için 12,7 kWh/kg ve benzin yakıtı için 12,1 kWh/kg ile karşılaştırıldığında özgül enerjisinin yaklaşık 0,25 kWh/kg gibi düşük bir değerde kalmasıdır [25]. 320 km'lik bir menzile ulaşmak için Tesla Roadster, toplam araç ağırlığının üçte birinden fazla olan 450 kg Li-ion batarya (buna diğer elektrikli bileşenler dahildir) taşır. Aynı aralık, 9,4 L/100km İYMA'lar için yaklaşık 26 kg benzin ve YPEA için hidrojen tüketiminin 1 kg/100 km olduğu varsayımı altında 3,2 kg sıkıştırılmış hidrojen olacaktır.

Benzinli bir araç kullanırken, kısa yakıt doldurma süresi göz önüne alındığında menzil çok büyük bir sorun değildir. Ancak BEA için şarj süresi dikkate alınması gereken çok önemli bir parametredir ve tüketici kullanım deneyimi için birincil önceliğe sahip faktördür. 33 kWh pil paketi içeren BMW i3 için normal şarj süresi 3 saat iken süper şarj ile %80 doluluğa 40 dakikaya kadar düşmektedir. 60 kWh pil paketi içeren Tesla S60 için normal şarj 7 saat, süper şarj (%80 şarj) ile

30 dakika sürer [26]. Bu arada, yüksek güçlü DC hızlı şarj istasyonlarının kurulumu için elektrik şebekenin modifiye edilmesi gerekmektedir ve çok sayıda DC hızlı şarj istasyonu, şebekeye büyük bir yük getirecektir. Ayrıca, yüksek güçlü hızlı şarj, BEA'ların şarj süresini azaltmanın etkin bir yolu olsa da batarya degradasyonu üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir [27]. Ayrıca günümüzde EA üretiminde batarya maliyetinin toplam maliyete oranı çok yüksek olup otomobil üreticisinin geleneksel araçlara kıyasla çok fazla kar elde etmesi daha zordur. Bu arada, pilin düşük enerji yoğunluğu nedeniyle, BEA'ların yük taşıma kapasitesi diğer araç türlerine göre pek rekabetçi değildir.

1.4. Yakıt Pili Araçların Kısa Tarihçesi ve Günümüzdeki Durumu

Otomotiv endüstrisinde, dünyanın ilk YPEA, 1966 yılında GM tarafından geliştirilen ve aynı zamanda bir alkalın yakıt hücresi ve kriyojenik sıvı hidrojen ve oksijen deposu kullanan “Elektrovan” idi (Şekil 1.4). 1800 kg'lık yakıt hücresi sistemi ve orijinal 6 koltuklu bir panelvan aracın arka tarafının çoğunu kaplayan depolama tankları nedeniyle sadece iki koltuğa sahipti ve 3220 kg ağırlığındaydı. 160 kW maksimum güce sahip Union Carbide yakıt hücresi yığımına 1000 saatlik kullanım ömrü biçilmiş olup 160 ila 240 km aralığında bir menzil sunup panelvanı maksimum 112,7 km/h hıza çıkarabilmiştir. Güvenlik nedeniyle sadece şirket sınırları içerisinde kullanılmıştır ve teknolojinin ticari kullanım için çok pahalı olduğu gerekçesiyle proje durdurulmuştur [28].



Şekil 1.4. 1966 GM Electrovan Yakıt Hücresi Sistemi Düzeni [28].

Aynı çalışmada yakıt pili ile ilgili sorunlar şu şekilde özetlenmiştir;

- Ağır ve büyük hacim gereksinimi,
- Kısa ömürlü olması,
- Karmaşık ve uzun çalıştırma ve kapatma prosedürleri,
- Yan ürün suyu, gaz sızıntıları gibi egzoz ürünlerinin uzaklaştırılması ve bertarafı,
- Hem gazlarda hem de elektrolitte kontaminasyona karşı hassasiyet,
- Hidrojen, oksijen ve elektrolitten oluşan üç ayrı sıvı sisteminin karmaşıklığı,
- Zor sıcaklık kontrol gereksinimleri,
- Yüksek voltajlar, elektrolit sızıntıları, hidrojen sızıntıları, olası çarpışma tehlikeleri gibi yeni güvenlik sorunları,
- Geçici koşullar sırasında kritik gaz-elektrolit basınç dengesi.

Proton elektrolit membran (PEM) yakıt hücresi (PEMYH) 1960'larda General Electric'ten Willard Thomas Grubb ve Leonard Niedrach tarafından icat edilmiştir. Bu buluş, Electrovan'da sıvı potasyum hidroksit (KOH) elektrolit kullanımından kaynaklanan yukarıdaki endişelerin birçoğunu hafifletmiştir, ancak yeni bir problem ortaya çıkmıştır. PEMYH'leri kullanılan Nafion iyonomer elektroliti sıcaklığa karşı çok hassastır ve bu nedenle yüksek enerji üretimi için gerekli reaksiyon hızlarını sağlayabilmek için çok miktarda platin katalizörü gerekmiştir. Sıkıştırılmış hidrojen depolama, bilgisayar tabanlı kontrolörler ve düşük platin yüklemeli katalizörlerdeki teknolojik gelişmeler yakıt hücresi yığınlarının maliyetini ve karmaşıklığını azaltıp YPEA'ların geliştirilmesini yeniden mümkün kılan kadar, bu sorunlar yakıt pilli araçların geliştirilmesinin 30 yıl daha ertelenmesine neden olmuştur [27].

1994 yılında Daimler-Benz AG, Ballard Power Systems tarafından geliştirilen ve 50kW'lık bir yakıt pili ile çalışan dünyanın ilk PEM YPEA'ı olan NeCar I'i tanıtmıştır. Araçta bir MB-180 minibüsü temel olarak alınmış ve 300 barda depolanan sıkıştırılmış hidrojen kullanılmıştır. Bunu, Mayıs 1996'da bir yolcu minibüsü olan NeCar II, Mercedes'in B-Sınıfı binek otomobilini temel alan NeCar III ve 1997'de tam işlevli bir şehir içi toplu taşıma otobüsü olan NeBus izlemiştir. 1999 yılında yeni nesil NeCar IV tanıtılmıştır ve 70 kW Ballard yakıt hücresi, 145 km/h azami hız ve 450 km menzil ile yakıt pilli araçları kullanılabilirlik ve performans açısından modern üretim araçlarına çok daha yakın hale getirmiştir. Aynı dönemde Toyota, GM, Mazda, Ford, Honda, Nissan ve Volkswagen de 10 ila 75 kW arasında değişen yakıt hücreli yığınlarla sahip kendi yakıt pilli araçlarını geliştirmeye başlamışlar ve 500 km'ye kadar menzil sağlayabilmişlerdir [29].

GM HydroGen projesi 1990'ların sonlarında başlatılmıştır. İlk versiyonlarda, sıvı hidrojen depolamalı bir Opel Zafira MPV gövde stili kullanılmış ancak GM daha sonra güvenlik nedenleriyle paketleme için şaside bir dizi yapısal değişiklikle 700 bar sıkıştırılmış hidrojen deposuna sahip bir Chevrolet Equinox crossover'a takılan HydroGen4'e (2007'de tanıtılmıştır)

geçmiştir [30]. Bu, araca 4,2 kg hidrojen ve yaklaşık 400 km menzil sağladı. 2012 yılı itibariyle, 119 HydroGen4 aracı 10.000'den fazla müşteri tarafından kullanılmış ve bu araçla 4 milyon kilometreden fazla yol kat edilmiştir. Bu testlerle GM, yakıt pili yığınındaki hücrelerin %10'unun 650 saatlik kullanımda ve %50'sinin 1450 saatlik kullanımda işlevliğini yitireceği belirterek, sistemin güvenilirliğinin daha fazla çalışma gerektirdiğini vurgulamıştır [31].

2000'li yıllara gelindiğinde, GM tarafından HydroGen projesinin tanıtılması ve 2002 yılında Toyota'nın YPEA'nın ticari olarak mevcut ilk yakıt pilli araçların piyasaya sürülmesiyle, büyük otomotiv üreticilere bu teknolojiyi olgunlaştırma yönünde büyük bir motivasyon kaynağı olmuştur. 2015 yılında Hyundai ix35 Fuel Cell, Toyota Mirai piyasaya sürülmüş ve bunlara ek olarak GM, Honda, Daimler AG, Nissan, Renault ve Ford gibi firmalar da sonraki yıllar içinde YPEA'ı piyasaya sürmeyi planlamışlardır. Ancak YPEA'ların geleneksel araç teknolojisi ile gerçek anlamda rekabet edebilmesi için hala üstesinden gelinmesi gereken bir dizi teknik sorunun varlığı unutulmaması gereken bir konu olmuştur.

Bu gelişmelerle birlikte YPEA'lar, geleneksel araçlara göre rekabetçi performansı nedeniyle 'e-mobilité' için gerçek bir atılım olarak kabul edilmiştir. Çünkü yüksek enerji yoğunluğuna sahip hidrojen sayesinde YPEA'lar sürüş menzili açısından geleneksel araçlarla mukayese edilebilir seviyelerdedir. Ayrıca 5 kg'lık bir depoya sahip bir YPEA'nın yakıt ikmali süresi, geleneksel araçlara benzer şekilde 3 ila 5 dakika arasında kısa bir sürede gerçekleştirilebilir. E-mobilité olarak kabul edilen YPEA'nın yakıt olarak kullandığı hidrojen, yenilenebilir kaynaklardan elde edildiğinde ısı ve su buharından başka bir emisyonu sahip değildir ki bu da YPEA'ları çevre dostu yapar [32].

YPEA'ların ticarileşme süreci tüm yukarıda belirtilen sebeplerle yavaş bir ilerleme kaydetmiş ve 2020 yılına gelindiğinde dünyada 25,932 yakıt pilli araç sayısına ulaşılmıştır bu da Şekil 1.3'de de görüldüğü üzere BEA ve fişli hibrit elektrikli araçlardan (FHEA) çok çok daha az bir miktara tekabül etmiştir [33]. ABD'de özellikle Kaliforniya'da, 2022 Mart ayı itibari ile 12.703 dünya toplamının neredeyse üçte birini teşkil etmiştir [34]. Japonya'da ise 2021 Mart ayı itibari ile bu sayı yaklaşık 5.280 civarında olup dünyanın en büyük ikinci yakıt hücreli taşıt sayısına sahip olmuştur [35]. 2020 yılında başta Almanya ve Fransa olmak üzere AB'de yaklaşık 1.300 yakıt hücreli araç sayısına ulaşılmıştır [36]. Hidrojenasyon altyapısının kurulumu şu anda çok sınırlı olup 2020 yılı sonu itibari ile dünyada 33 ülkede toplam 584 hidrojen dolum istasyonu sayısına ulaşılmıştır. Bunların çoğunluğu ilk olarak yaklaşık 150 adet ile Japonya'da sonrasında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD), özellikle Kaliforniya eyaletinde bulunmaktadır [37]. Küresel ortalamada, yaklaşık her 45 YPEA'lar için yaklaşık bir yakıt ikmal istasyonu vardır ve bu sayı YPEA'ların kullanımının yüksek olduğu ülkelerde (Japonya ve ABD) daha da azdır. Bununla birlikte, ABD, Çin, Almanya, Japonya ve Güney Kore de dâhil olmak üzere birçok pazarda hidrojen altyapısı ve araç dağıtımı konusunda şimdiden olumlu gelişmeler mevcuttur [21].

Hidrojen enerjisinin ticarileştirilmesini hızlandırmak için ulusal politikaların desteklenmesi ve teşvik edilmesi gerekmektedir. 2019 yılında Çin, Hükümet Çalışma Raporuna ilk kez yeni alternatif enerjili araçlar için hidrojen istasyonlarının geliştirilmesini dâhil etti ve küresel olarak en büyük EA pazarı olarak Çin, yakıt hücreli araçların geliştirilmesini destekleme yönünde ciddi adımlar atmıştır [38].

1.5. Literatür Taraması

Literatürde YPEA'lar hakkında çok sayıda ve çok çeşitli alanlarda akademik çalışmalar mevcuttur. Yapılan tez çalışmasının güncelliğini desteklemek amacıyla genel olarak son yıllarda yapılan çalışmaların ağırlıkta olduğu bir literatür taraması yapılmıştır.

İlk olarak yakıt pillerinin araçlarda kullanımını tarihsel seyir olarak sunmak gerekirse bu alanda Muthukumar ve arkadaşlarının YPEA'ların gelişimine ışık tutan çalışmaları gösterilebilir. Bu çalışmada mevcut geleneksel araçların sürdürülebilir olmadıklarından bahisle elektrik gücüne dayalı yeni teknolojilerin geliştirilmesi gerektiği konusu incelenmiştir. Bu bağlamda alternatiflerden biri olan YPEA'lar, bu araçların avantaj ve dezavantajlarını göz önünde bulunduran farklı YPEA konfigürasyon ve sistemleri tanıtılmıştır. Halihazırda farklı otomobil firmaları tarafından üretilen araçlar analiz edilmiştir [39]. Tanç ve arkadaşları YPEA'ların gelecek çeyrek yüzyıl projeksiyonunda genel bir bakış sunmuş olup çalışmalarında hem daha önceki çalışmaları hem de geleceğe yönelik tahmin raporlarını tartışmışlardır. YPEA'ların mevcut dezavantajlarının gelişen teknoloji ile daha da hafifletileceği ve bunun sonucunda bu araçlara artan talebin devam edeceği sonucuna varmışlardır [40].

YPEA'ların dezavantajlarını minimize etmek ve hem yakıt ekonomisini hem de performansını iyileştirmek için bataryalar ile hibridizasyonunu ele alan çok sayıda çalışma mevcuttur. Fathabadi, çalışmasında YPHEA'ların, sadece İYM veya İYM ile elektrik motoru içeren geleneksel İYMA'lar ve HEA'lara nazaran birçok avantajının olduğunu vurgulamıştır. Çalışmasında 90 kW'lık PEMYP yığını ve 19.2 kWh'lik lityum-iyon batarya kombinasyonu ile maksimum 155 km/h hıza ulaşabilen ve 530 km menzile sahip bir YPHEA tasarlamıştır [41]. Tanç ve arkadaşları 70 kW'lık bir yakıt piline sahip bir YPEA'a 15 kWh'lık bir batarya eklemişlerdir. Böylece her iki araç türünü karşılaştırarak enerji ve yakıt tüketimi açısından YPHEA'larda YPEA'lara göre sırasıyla %8 ve %32'lik daha iyi sonuçlar elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır [42]. Yakıt pili ve çeşitli batarya türlerinin hibridizasyonu bu iki farklı enerji kaynağının optimum güçlerde boyutlandırılması sorununu ortaya çıkarmıştır. Gaikwad ve Ghosh, yaptıkları çalışma ile etkin bir enerji yönetiminin verimli ve uygun maliyetli bir YPHEA konfigürasyonu için çok önemli olduğunu ve yine yakıt pili ve bataryanın gerekli yükü tahrik edebilecek optimum boyutlandırılmasının da bu konfigürasyonda kilit bir öneme sahip olduğunu ortaya koymuşlardır [43]. Yakıt pilleri sadece bataryalar ile birlikte kullanılmamış olup elektrokimyasal çift katmalı

kondansatörler gibi farklı elektrik depolama sistemleri ile birlikte kullanılmışlardır. Örneğin yakıt pili-batarya modelinin yanında Fathabadi, yakıt pili-süper kondansatör konfigürasyonunu da çalışmış olup bu defa aynı yakıt pili 600 F'lık bir süper kondansatör kullanmıştır. Bu durumda öncekine göre daha hafif bir yapı elde edilip 158 km/h'lık bir azami hız ve daha iyi bir ivmelenme yakalanmasına rağmen menzil 435 km'ye düşmüştür [44]. Bazen de bu üç güç kaynağının hep birlikte kullanıldığı çalışmalar da olmuştur. Sagaria ve arkadaşları yakıt pili-batarya-ultra kondansatör'den oluşan hibrit bir tahrik sistemi oluşturup her birinin sisteme olan katkılarını irdelenmişlerdir. Yakıt pilinin diğerleri ile desteklenmesiyle %40 daha küçük güçlerde seçilebileceği, yine yakıt verimliliğinin arttırılabileceği, sık ve kısa sürüşe sahip uygulamalarda ultra kondansatörün hem çok hızlı şarj olması hem de 20 yıl ömre sahip olması ile çok büyük avantajlarının olduğu, uzun menzilli uygulamalarda ise yakıt pilinin birincil enerji kaynağı olarak tercih edilmesi gerektiği ortaya konmuştur [45].

Yakıt pilinin birincil enerji kaynağı olarak kullanıldığı YPHEA'lar olduğu gibi, menzil arttırıcı olarak kullanıldığı seri hibrit yapılı elektrikli araçlar (SHEA) da mevcuttur. Dimitrova ve Nader, geleneksel İYM yerine PEMYP'nin enerji dönüştürücü olarak kullanılmasının yakıt tüketim tasarrufu üzerindeki potansiyelini araştırmışlardır. Sonuç olarak PEMYP'nin menzil arttırıcı olarak kullanılan yapının verimliliği geliştirdiği ve EA'larda menzil arttırıcı olarak iyi bir çözüm sunabileceği gösterilmiştir [46]. Hibridizasyon işleminin sadece aktif kontrol yöntemleri ile değil pasif olarak da işletilebileceği Jacome ve arkadaşları tarafından irdelenmiştir. Daha küçük hacim ve ağırlık gereksinimi, uygulama kolaylığı ve düşük maliyet avantajlarına rağmen güç dağılımının kontrol edilebilir olmaması, yüksek demeraj akımları ve yakıt pilinin daha hızlı degradasyona uğraması gibi dezavantajların ortaya çıktığı saptanmıştır [47]. Yine de bu tür pasif hibridizasyonların özellikle hafif güçlü araçlarda maliyette çok büyük bir avantaj sağlamasının diğer dezavantajlarının ikincil plana atılabileceğini gösteren Trolio ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalar da literatürde yer bulmuştur [48].

Farklı çalışma karakteristiklerine sahip ve birlikte aynı yükü tahrik etmesi gereken yakıt pili-batarya hibrit tahrik sisteminin farklı çalışma koşullarında farklı akım ve gerilim değerlerine sahip iki kaynağın gücünü çıkışa verebilecek konverterler tasarlanmasını zorunlu kılmıştır. Ayrıca bu konverter Angalaeswari ve arkadaşlarının çalışmalarında gösterdiği gibi rejeneratif frenleme esnasında bataryaların şarj edilmesini de mümkün kılmaktadır [49]. Affam ve arkadaşları, konverter topolojilerinin daha kolay kontrol edilebilir olması, daha az parça sayısına sahip olması, daha ucuz olması gerektiğini belirtmiştir. Birçok farklı konverter topolojisi bu bağlamda incelenmiş ve her bir farklı uygulama için farklı topolojilerin öne çıktığı gözlemlenmiş olup sonuç olarak hiçbir konverter topolojisinin tek başına sektördeki talepleri karşılamasının mümkün olmadığı belirtilmiştir [50].

Her hibrit güç sisteminde olduğu gibi YPHEA’larda da enerji yönetim sistemleri (EYS) ve bu sistemlerde uygulanan kontrol teknikleri oldukça önem arz etmektedir. Sid ve arkadaşları, çalışmalarında YPHEA’lar için enerji yönetimi tekniklerinin karşılaştırmalı analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yakıt pili ve lityum-iyon bataryadan oluşan hibrit sistemde başarılı bir yaklaşım sağlamak için yakıt pilindeki hidrojen tüketimi ve bataryanın şarj durumunun regülasyonu analizlerin temelini oluşturmaktadır [51]. Kimyasal proseslerin gerçekleştiği yakıt pilinde bu reaksiyonların gerçekleşmesi uygun sıcaklık değerlerinin yakalanmasının hayati olduğu kadar bu reaksiyonlar sonucunda ısı da açığa çıkmakta olup bu ısıнын fazlasının çalışma koşullarını olumsuz etkilememesi için uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle enerji yönetimi kadar termal yönetim sistemleri de yakıt pilinin haliyle de tahrik sisteminin efektif çalıştırılabilmesi için çok önemlidir. Şefkat ve Özel çalışmalarında genel enerji verimini artırmak için bir kontrol algoritması geliştirmiş, batarya ve yakıt pilinin enerji tüketimlerini dengelemiş ve yakıt akışını kontrol ederek hidrojen akış borularının atık ısını kullanarak hem yakıt pilinin hem de bataryanın düşük ve yüksek ortam sıcaklıklarında güvenli ve verimli bir şekilde çalıştırılması sağlanmıştır. Bu şekilde aracın -10 e 35 °C gibi uç sıcaklık değerlerinde %7-11 arasında bir enerji verimliliği artışı sağlanmıştır [52].

EA’lardaki bir diğer önemli konu ise menzil konusu olup özellikle son kullanıcının tercihleri üzerinde de büyük bir etkiye sahiptir. Bu nedenle uzun bir menzil sağlanması gerektiği gibi kullanım esnasında sürüş alışkanlıklarına ve diğer parametrelere göre anlık kalan menzil bilgisinin doğrulukla sağlanması da önemli bir husustur. Menzilin uzatılabilmesi için çokça sınırlandırması olan bu sistemlerde mevcut enerjinin en yüksek verimde kullanılması da oldukça önemlidir. Lin ve arkadaşları çalışmalarında hidrojen tüketiminin sırasıyla yakıt hücresi ve pil tarafından sağlanan enerji oranının optimizasyonu ile en aza indirilebileceğini göstermişlerdir. Geliştirdikleri optimizasyonla hidrojen kullanımı, 100 km, 300 km ve 500 km’lik bir yolculuk mesafesinde Kural tabanlı strateji ile karşılaştırıldığında sırasıyla %45.76, %37.75 ve %37.19 oranında iyileştirilmiştir [53]. Çeven ve arkadaşları, çeşitli problem alanlarında başarıyla uygulanan bulanık mantık sınıflandırıcı ile elektrikli araçlarda menzil tahmini yapmışlardır. Tahmin sisteminde, araçta harcanan güç ve akü şarj durumu girdi olarak seçilip, testler; yüksüz (sadece sürücü), yarım yük (sürücü + bir kişi) ve tam yük (sürücü + üç kişi) ile yapılmıştır [54]. Kalan menzil bilgisi kullanıcı için önemli bir parametre olup sürücüde menzil kaygısı oluşmasına neden olabilir. Modi ve arkadaşları çalışmalarında derin konvülasyon sinir ağı kullanan elektrikli araçların gerçek zamanlı enerji tüketimini tahmin ederek sürücünün menzil kaygısını azaltmayı hedeflemişlerdir. Önerdikleri modelin en düşük hata ile mevcut tekniklerden daha tutarlı bir şekilde daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlardır [55].

EA’lar, BEA, YPEA veya YPHEA olsun tahrik sistemlerini oluşturan yakıt pili ve bataryaların bir kullanım ömrü olup bu kullanım koşullarına bağlı olarak kısılabilmektedir. Özellikle yakıt pili dış etkenlerden ve kullanım şartlarından çok daha fazla etkilenmektedir. Tang

ve arkadaşları derin takviyeli öğrenmeye dayalı enerji yönetimi stratejisinin yakıt ekonomisini iyileştirmede ve YPHEA'larda yakıt hücresi ömrünü uzatmada önemli bir rol oynadığını belirtmektedirler. Yakıt ekonomisi ile yakıt hücresi sistemi degradasyonu arasındaki denge, bozunma ağırlığı ve hidrojen tüketim ağırlığı ayarlanarak sağlanır. Sonuç olarak enerji yönetim sisteminin (EYS) yakıt ekonomisinin % 0,53 oranında azaltılması durumunda yakıt hücresi sisteminin bozulmasının etkin bir şekilde bastırıldığı gösterilmiştir [56]. Kandidayeni ve arkadaşları yaptıkları inceleme çalışmasında elektrokimyasal cihazların (yakıt pili, pil ve süper kondansatör) enerjik özelliklerinin, yaşlanmanın etkisi ve farklı ortam ve çalışma koşulları nedeniyle zamanla değiştiğini belirtmişlerdir. Bu durumun EYS'nin yanlış yönetilmesine yol açabileceği ve bunun neticesinde hidrojen tüketiminde yaklaşık %6,5-24 arasında bir artışa neden olabileceği saptanmıştır. Bu nedenle, güç paylaşımı gerçekleştirilirken bileşenlerin gerçek durumunun farkında olan bir strateji geliştirmek gerektiği belirtilmiştir. Bahsedilen faktörlerden kaynaklanan belirsizliklerle başa çıkmak için bileşenlerin durumunu izleme teknikleri potansiyel adaylar olarak öne çıkmakta olup bu bağlamda hassas ve doğruluğu yüksek durum izleme teknikleri ve dolayısıyla EYS'leri geliştirmek için gerekli olan genel modelleme tekniklerinin kısa bir incelemesini ortaya koymuşlardır [57].

Hidrojenin yanıcı ve patlayıcı bir gaz olması ve yüksek enerji yoğunlukları sağlama bilmesi için çok yüksek basınçlarda sıkıştırılması gerektiği göz önünde bulundurulduğunda YPHEA'ların çeşitli riskler taşıdığı gerçeği tartışılmazdır. Bu nedenle hidrojenin depolanmasından, hidrojenin yakıt ikmal istasyonlarına taşınmasından ve yakıt ikmal prosedüründen kaynaklanan potansiyel risklerle ilgili derinlemesine çalışmalara ihtiyaç vardır. Smaragdakis ve arkadaşları özellikle bu tür araçların satışının önemli ölçüde düşük olduğu bir ülkede, işletme/bakım sırasında YPEA güvenliği ile ilgili bütünsel bir temel oluşturmanın ön koşul olduğunu belirtmektedirler. Operasyonel risk yönetimi metodolojisi kullanarak araştırmalarında, yerel toplumun teknolojik tehlikelere olan ilgisini ve hidrojen araçlarının geleneksel araçlar kadar güvenli olabileceğine olan inancı sorgulanarak hidrojen depolama ile ilgili ek kritik senaryolar analiz edilmiştir [58].

YPHEA'larda yapılan yakıt pili-batarya kombinasyonunun araç performans ve maliyetinde de bir avantaj sağlanması beklenmekte olup bu araçların BEA ve YPEA'lara tercih edilmelerini sağlaması gerekmektedir. Nassif ve arkadaşları çalışmalarında, hibridizasyon derecesinin (DOH) bir YPHEA'nın performansı ve toplam maliyeti üzerindeki etkisini analiz etmek için Gelişmiş Araç Simülatörünü kullanmışlardır. Farklı DOH seviyelerindeki konfigürasyonların maliyetleri ve yakıt ekonomisi sonuçları, mevcut araçla karşılaştırılıp, en yüksek hibridizasyon derecesine sahip konfigürasyonun (DOH = %61,2), orijinal araca kıyasla yakıt ekonomisinde %8,3 artış ve toplam maliyette %13,2 düşüş gösterdiği ortaya konmuştur [59]. Almeida ve Kruczan tarafından yapılan benzer bir çalışmada hidrojen tüketimini ve araç maliyetini en aza indirmeyi amaçlayan ve çeşitli sürüş gereksinimlerini karşılayan yakıt hücresi yığınının optimum boyutunu ve pil modüllerinin

sayısını bulmak için yapılan modelleme ve simülasyonlarda elde edilen en iyi sonuçlar, yakıt hücresi yığın gücünü %58 oranında azaltılabileceği göstermiştir. Eşdeğer yakıt ekonomisinde (3,285 L/100km) %7,7 artış ve araç maliyetinde %25 azalma sağlanmıştır [60]. Bu araçların daha kapsamlı bir toplam sahip olma ve yaşam döngüsü maliyetlerini incelemek de faydalı olacaktır. Tüketiciler, bir EV veya CV seçerken genellikle somut maliyete odaklanır, ancak satın alma veya sürüş kısıtlamaları için zaman maliyetini ve gaz emisyonlarından kaynaklanan çevresel maliyeti gözden geçirir. Li ve arkadaşları çalışmalarında araçlar için sırasıyla maddi olmayan maliyet ve dış maliyet olarak adlandırılan trafik ve çevre politikalarını parasal olarak ifade eden bir yaşam döngüsü maliyet modeli yürütmüşlerdir. Yaptıkları karşılaştırmalar, Çin'deki çoğu şehirde BEA'ların ve YPEA'ların somut maliyet açısından İYMA'lar ile karşılaştırılmaz olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, özellikle Pekin ve Şanghay gibi birinci kademe şehirlerdeki öne çıkan trafik ve çevre politikaları, İYMA'ların maddi olmayan ve dış maliyetlerini büyük ölçüde artırarak tüketicileri BEA'ları ve YPEA'ları satın almaya daha yatkın hale getirdiğini göstermektedir. Devlet sübvansiyonları, satın alma ve sürüş kısıtlamaları ve çevre vergilerinin BEA'ların ve YPEA'ların üç temel politika avantajları olduğu vurgulanmaktadır [61].

YPHEA'ların avantaj sağlaması beklenen ve günümüzde en fazla önem arz eden çevresel etkileri ve emisyonudur. Liu ve arkadaşları her ne kadar sürüş esnasında sera gazı emisyonu olmayan bu bağlamda sıfır emisyonlu araç (SEA) olarak adlandırılan YPEA'larda yakıt olarak kullanılan hidrojenin üretimi, taşınması ve yakıt ikmali, fosil yakıtlara göre daha fazla enerji tüketimi ve emisyona sebep olduğunu belirtmişlerdir. YPEA ile İYMA'yı karşılaştırmak için kaynaktan tekere enerji kullanımı ve emisyon analizi yapılmıştır. Bu analizler sonucunda, her ne kadar fosil bazlı bir üretimden elde edilen (doğal gazın buhar metan reformu yoluyla) hidrojenle beslenen bir YPEA'ın %5-33 daha az enerji kullandığını ve %15-45 daha düşük sera gazı emisyonuna sahip olduğunu gösterilmektedir [62].

YPHEA'ların ticari olarak hayatımızda yer alabilmesi için tercih edilmesi bunun içinde tüketici tarafında bir satın alınma isteği oluşturulmalıdır. Li ve arkadaşları çalışmalarında satın alma fiyatının, sürüş mesafesinin, yakıt doldurma süresinin, yakıt maliyetinin, emisyonların azaltılmasının, yakıt ikmali erişilebilirliğinin tüketici tercihiinde önemli etkiler olduğu gösterilmiştir. Sürüş menzilineki her 200 km'lik iyileştirme, yakıt ikmal süresinde 5 dakikalık azalma, yakıt maliyetinde 1,16 ₺/km azalma, emisyonlarda %20 azalma ve yakıt ikmali erişilebilirliğinde %20 iyileşme için tüketicinin marjinal değerlerden sırası ile 113.750, 29.490, 8.847, 110.800 ve 29912 ₺ daha fazla ödeme yapmayı göze alabilecekleri tahmin edilmiştir [63]. Hwang ve arkadaşları ise çalışmalarında, YPEA'ların Güney Kore'de yerel bölgede başarılı bir şekilde benimsenmesi için olası yolları araştırmayı amaçlamaktadır. İlk olarak, çok sayıda hidrojen (H₂) istasyonunun YPEA'ların benimsenmesinde önemli bir rol oynayacağı, ikincisi, yerel yönetim tarafından yönlendirilen yüksek seviyelerde sera gazı yaptırımları ve hidrojen dolum

istasyonlarının gelecekteki inşaat planlarının birleşiminin dikkate değer bir katkı sağlayacağı, son olarak, yüksek miktardaki sübvansiyonların ilgi uyandıracağı belirtilmiştir [64]. Trencher, Kaliforniya'daki deneyimlerin, literatürde YPEA difüzyonunun önündeki engellerin iyi anlaşıldığı, ancak bunların üstesinden gelmek için gerçek stratejiler hakkında bilgi eksikliği bulunan bir boşluğu ele almak için ideal bir fırsat sunmakta olduğunu ve dolayısıyla çalışmasında, YPHEA'ların üretimini ve yayılmasını, kilit sonuçları, edinilen tecrübeleri ve çözümlenmemiş zorlukları hızlandırmak için Kaliforniya'daki yönetim stratejilerini incelemektedir. Stratejiler dört perspektifte incelenmiştir: (i) Arz tarafı (yani araç üretiminin teşviki), (ii) Altyapı (yani yakıt ikmal istasyonlarının inşası ve hidrojen üretimi), (iii) Talep tarafı (yani taşıt benimsemesinin teşviki) ve (iv) Kurumsal (yani işbirliğini, yeniliği ve maliyet düşürmeyi kolaylaştıran ortak önlemler) [65].

Wu yaptığı doktora tez çalışmasında BEA, YPEA, Yakıt pili-Batarya HEA, Yakıt pili-Süper kondansatör HEA ve pasif kontrollü Yakıt pili-Süper kondansatör HEA'ların simülasyonlarını yapıp farklı sürüş çevrimlerinde farklı tahrik sistemlerini karşılaştırmıştır. Şehir içi yoğunluklu sürüşlerde toplam sahip olunma maliyeti (TCO) en düşük olanının BEA, uzun otoyol sürüşleri için en uygun olanının YPEA olduğu belirlenmiştir. Yakıt pili-Batarya HEA özellikle şehir içi kullanımlarda rejeneratif frenleme sayesinde yakıt ekonomisi sağlarken kullanılan hem yakıt pilinin hem de bataryanın boyutları küçülmüştür. Yakıt pili-Süper kondansatör HEA ise daha büyük yakıt pillerine ihtiyaç duyarken kondansatörlerin çok yüksek güç yoğunlukları neticesinde özellikle agresif sürüşlerde büyük avantaj sağlamaktadır. Pasif kontrollü durumunda ise maliyet olarak avantaj sağlamasına ve tepkilerin hızlanmasına rağmen EYS çok iyi olmadığından yakıt tüketimi ve yakıt pilinin degradasyonu daha hızlı olmaktadır [66]. Salisbury, tez çalışmasında yakıt pilli fişli hibrit elektrikli aracın (YPFHEA) maliyet, emisyon azaltma ve petrol kullanımını azaltma açısından umut verici bir araç mimarisi olduğu göstermiştir. Yapılan sürüş testlerinin sonuçlarında, YPFHEA'nın uygulanabilirliği gösterilmiş ve mevcut SEA mimarilerine göre avantajları vurgulanmıştır [67].

Fletcher, yaptığı doktora çalışmasında yalnızca yakıt tüketimini değil, aynı zamanda aracın genel işletme maliyetini optimize etmek için yakıt hücresinin bozulmasını da dikkate alan, özellikle YPHEA için yeni bir EYS geliştirmiştir. EYS tarafından verilen kararların yakıt hücresi bozulması üzerindeki etkisini ölçen bir strateji geliştirilmiş ve bu yeni stratejinin performansı, simülasyonda yalnızca yakıt tüketimini optimize etmek için tasarlanmış stratejilerle karşılaştırılmıştır. Bozunma metriklerinin dâhil edildiği bu EYS ile yakıt tüketiminde yalnızca %3.7'lik bir artışla yakıt hücresi ömründe %20'lik bir artış sağlanabilmiş böylece toplam işletme maliyetinin %9 oranında azaldığı bulunmuştur [68].

Xu, tez projesinde, bir YPFHEA ve bir seri YPHEA modeli ile bunların farklı bileşenleri ve kontrol stratejileri, çeşitli sürüş çevrimleri ve senaryoları altında hidrojen tüketimini analiz etmek için GTSuite yazılımını kullanarak modellemiştir. Enerji kaynağı bileşenleri için ilk maliyet

karşılaştırması yapılmış, mevcut verilere dayalı ilk maliyet karşılaştırmasının sonuçları, en ucuzdan en pahalıya doğru sıralamanın seri YPHEA, YPFHEA ve BEA olduğunu gösterilmiştir. Şebekeden elektrik kullanmak, aracı hareket ettirmek için hidrojen kullanmaktan hala çok daha ucuz olup seri YPHEA için, tek enerji kaynağı hidrojen olduğundan, tüm araç ömrü boyunca toplam sahip olma maliyeti açısından BEA'lara kıyasla hiçbir maliyet avantajının olmadığı gösterilmiştir. Bununla birlikte, YPFHEA'nın tüm kullanım ömrü boyunca toplam sahip olma maliyetinin avantajlarının olduğu, çünkü YPFHEA'nın enerji kaynağı hem şebekeden gelen elektriği hem de hidrojeni içermesi gösterilmiştir. En ucuzdan en pahalıya doğru işletme maliyeti dâhil toplam sahip olma maliyetinin sıralaması YPFHEA, BEA ve seri YPHEA olarak verilmiştir [27].

Shen, tez çalışmasında yakıt hücreli araçlarda enerji akışını kontrol etme problemini sistem kararlılığını, optimalliğini ve dayanıklılığını göz önünde bulundurarak araştırmıştır. Bunun için, enerji yönetimi problemi, yakıt ekonomisini iyileştirmek, pilin şarj durumunu korumak ve yakıt hücresi performans düşüşünü etkileyen faktörlerin insidansını azaltmak için çok amaçlı doğrusal olmayan bir optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. EYS, sürücünün güç talebinin belirsiz olduğu durumlarda optimizasyon hedeflerine ulaşabilmesi için bir yakıt hücresi yığını sağlık durumu tahmincisi ve bir enerji depolama sistemi planlayıcısı ile koordinasyon yeteneğine sahip olarak tasarlanmıştır. Geliştirilen yeni tasarım tekniğinin etkinliği, tipik şehir içi/otoyol sürüş senaryoları üzerinde kontrol performansı üzerine çalışmalar yürütülerek gösterilmiştir [27].

Biberci, doktora çalışmasında yakıt pilli taşıt için bir otomotiv yakıt hücresi sistemi geliştirmiştir. 625 cm² alana sahip ve 230 hücreden oluşmakta olan ve yaklaşık 90-140 kW arası güce çıkabilen günümüz araçlarına uygun güç üretmek için uygulanabilir yapıdadır. Modellenen taşıt ECE-15 sürüş çevrimi boyunca yakıt pili sisteminin enerji ve su yönetimi, ısı transferi, yakıt tüketimi ve sistem verimliliği incelenmiştir. Yakıt pili sisteminde en yüksek sistem verimi 3 atm basınçta %48,2 olarak bulunmuştur bu değer yardımcı ekipmanların güç tüketiminden dolayı %25'e düşmüştür. Deneysel çalışmalardan alınan verilerle model verileri kıyaslanmış ve model anlamlı bulunmuştur [69].

Yapılan literatür taraması ile YPEA ve YPHEA'ların tarihsel gelişimden gelecek projeksiyonuna değinilmiştir. Hibridizasyon çeşitleri ve optimizasyonu ayrıntılı bir şekilde işlenmiştir. Yakıt pillerinin menzil artırıcı olarak kullanımından pasif kontrolüne kadar geniş bir yelpazede irdelenmiştir. YPHEA'larda kullanılan konverter topolojileri enerji ve termal yönetim sistemlerinin önemleri ve sistem üzerindeki etkilerini gösteren çalışmalara yer verilmiştir. YPHEA'lar için en önemli konulardan olan menzil sorunu ve bu sorunun üstesinden gelmek için yapılan çalışmalar incelenmiştir. Yakıt pili kullanım ömrü ve degradasyon sorununun ele alındığı çalışmalar ve yine hidrojen kullanımına ilişkin risk analizi içeren çalışmalar derlenmiştir. YPHEA'ların performans ve maliyet konusu ele alınmış özellikle maliyet konusunu her yönüyle inceleyen çalışmalar sonuçları ile verilmiştir. Yine çevre bilinci ve emisyon farkındalığı oluşturan

çalışmaya yer verilmiştir. Son olarak YPHEA'ların ticari varlık gösterebilmeleri için dünyanın farklı bölgelerine ait çalışmalar sunulmuştur. Yapılacak olan tez çalışmasında da elde edilen sonuçlar bu bağlamlarda analiz edilecek olup genel literatüre özellikle de Türkçe literatüre yeni terimler ve çok önemli katkılar sağlanacaktır.

1.6. Tezin Motivasyonu

Otomotiv endüstrisi, saf içten yanmalı motorlardan hibridizasyon ve elektrifikasyona geçiş yaptığı bir süreçten geçmekte olup bunun temel nedenleri ve aşamaları önceki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenmiştir. İçten yanmalı motorlu araçlardan farklı olarak bataryalı elektrikli araçlar, menzil kaygısı, uzun şarj süresi, kamu şarj altyapılarının olmaması veya yetersiz olması ve yüksek fiyatları nedeniyle çeşitli kısıtlamalara sahiptir. Yakıt olarak benzin veya dizel gibi fosil yakıtlar yerine sadece elektrik ve kaynağı olarak batarya değil, hidrojen de kullanılarak araçların sıfır egzoz emisyon özelliği korunabilir. Bu güç aktarma organını araştırmak için bu tezde, yakıt pilinin birincil kaynak olduğu bir yakıt pilli hibrit elektrikli aracın araştırılması ve modellenmesi amaçlanmaktadır.

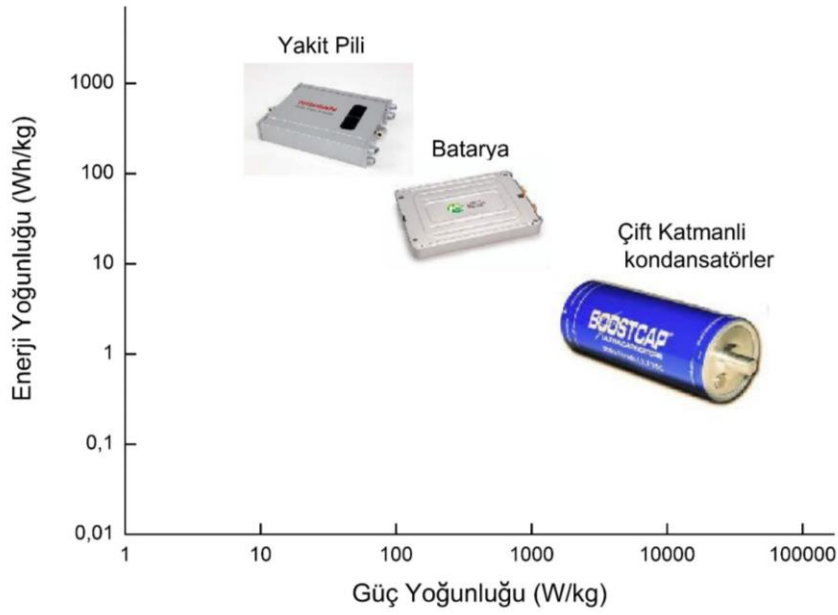
Normal yakıt pilli elektrikli araçlar ve hibrit elektrikli araçlar hızlı yakıt ikmali ve uzun sürüş menzili sunmaktadır. YPEA'lar için teknoloji şu anda pahalı ve hidrojen dolum altyapıları çok sınırlı bir bölgede mevcuttur. Yakıt hücresi yığını sınırlı boyutlu bir batarya ile menzil genişletici olarak birleştirmek, potansiyel olarak hızlı şarj ve yakıt ikmali, uzun sürüş menzili sağlayarak maliyet ve kütle olarak BEA'dan daha düşük değerlere ulaşılabilmesini sağlayabilir. Ayrıca, yakıt pilleri içten yanmalı motordan yaklaşık %40 daha verimli olduğu için araç yakıt ekonomisinin daha iyi olması beklenmektedir [70]. Bu nedenle, ilk enerji kaynağı olarak yakıt pili ve menzil genişletici olarak batarya kullanan YPHEA modellenmiş ve simüle edilmiştir.

1.7. Tezin Amacı, Araştırma Soruları ve Literatüre Yapılan Katkılar

Elektrikli araçların başarısı için tanımlanan kritik teknolojiler genellikle şu şekilde alıntılanır; hidrojen yakıt pili, lityum iyon pil ve süper veya ultra kondansatör. Onlarca yıllık yoğun araştırmalar ve geliştirmeler, bu teknolojilerin enerji ve güç yoğunluğu açısından en son teknoloji haline gelmesi ve hâlihazırda ticarileşmesi veya ticarileştirilmeye yaklaşması ile sonuçlandı. EV teknolojisinin genel olarak benimsenmesinin önündeki engeller, bileşenlerin yüksek maliyeti, sınırlı dayanıklılık ve hidrojen dolum ve elektrik şarj altyapısının sınırlı olmasıdır.

Bu nedenle yakıt pilinin, lityum iyon pillerin ve süper kondansatörlerin elektrokimyasal performansını karakterize etmek ve anlamak, otomotiv uygulamalarında bunların uygunlukları ile ilgili herhangi bir analizde çok önemlidir. Şekil 1.5, ilgilenilen üç elektrokimyasal cihazın enerji ve güç yoğunluğunu göstermektedir. Yakıt pili, tipik olarak bir kimyasal yakıt kullanımı nedeniyle üç cihazdan en büyük enerji yoğunluğuna sahip olanıdır. Güç yoğunluğu ise daha yüksek çalışma

empedansları nedeniyle tipik olarak diğer ikisinden daha düşüktür. Lityum iyon piller tipik olarak daha düşük empedanslar nedeniyle daha yüksek güç yoğunluklarına sahiptir ancak enerji taşıma kapasitesinin yapımında kullanılan aktif malzeme miktarıyla doğru orantılı olması nedeniyle daha düşük enerji yoğunluklarına sahiptir. Süper kondansatörler, yük depolama mekanizması Faradik olmadığı ve yük transfer reaksiyonlarının olmaması nedeniyle cihazlar içinde en yüksek güç yoğunluğuna sahip olanıdır ancak enerji yoğunlukları tipik olarak en düşüktür.



Şekil 1.5. Yakıt pili, batarya ve kondansatörlerin enerji ve güç yoğunlukları

Bu teknolojilerin bireysel bazda analizi daha önce çok fazla sayıda çalışmada sunulmuştur ancak bu teknolojiler arasındaki ayrıntılı etkileşimler tam olarak irdelenmemiştir. Bu etkileşimleri inceleyen çalışmalarda yakıt olarak saf hidrojen veya elektriğin aksine hem hidrojen hem de elektriği kullanan bir aracın daha düşük sermaye ve işletme maliyeti açısından faydaları vurgulanmıştır. Güç aktarma organları sermaye maliyeti, hidrojen maliyeti ve elektrik maliyetinin sırasıyla bir YPEA için dikkate alınması gereken en önemli faktörler olduğu ve en büyük avantajların bir YPHEA oluşturmak üzere yakıt pillerinin bataryalarla hibridize edildiğinde gerçekleştiği sonucuna varılmıştır [71].

Bu tezin amacı, YPHEA'nın sistem çalışmalarını gerçekleştirmektir. Bu kapsamda hidrojen ve elektrik tüketimini analiz etmek; uygun tahrik konseptini oluşturabilmek için gerekli pil boyutu, elektrik motoru ve yakıt pili gücü ile hidrojen yakıt depolama miktarını belirlemek için komple tahrik sistemi ve bu sisteminin farklı bileşenleri oluşturulmuştur. Dikkate alınan nitelikler menzil, performans, araç kütlesi, yakıt ekonomisi ve emisyon değerleri olmuştur.

Amaçları;

- Yakıt pilli bir aracın tahrik sistemi içindeki tüm alt sistemlerin çalışma sürecini eksiksiz olarak anlamak,
- Yakıt pilleri ile ilgili daha önce yapılmış çalışmaları araştırmak,
- Tahrik sistemi modellemesi ve simülasyonu ile ilgili önceki çalışmaları araştırmak,
- Pil boyutu, elektrik motoru ve yakıt hücresi gücü ile hidrojen yakıtı depolama miktarı için en uygun tahrik konseptini bulmak,
- Yakıt hücresi yığınının sahip YPHEA'nın simülasyon modellerini oluşturmak ve simülasyon sonuçlarını farklı sürüş çevrimlerinde ve farklı vaka çalışmalarında analiz etmektir.

Bu amaçlar doğrultusunda, bazı araştırma sorularının yanıtlanabilmesi hedeflenmektedir ve bu sorular şöyledir:

- Otomotiv uygulamalarında bu cihazların performans sınırlamaları nelerdir?
- Bu elektrokimyasal cihazlar için en uygun çalışma parametreleri nelerdir?
- Otomotiv uygulamalarında bu cihazların optimal konfigürasyonu ve kombinasyonu nedir?

Literatüre yapılan katkılar;

- Bu çalışmanın mevcut akademik literatüre değer katmayı hedeflediği alan, temel çalışma ilkeleri bilgisi aracılığıyla verimlilik ve performans değişkenlerinin optimizasyonuna izin veren matematiksel modellerle otomotiv güç aktarma tasarımlarının sistem düzeyindeki sonuçlarının analiz edilmesidir.
- Bu analizi yapmak için özellikle ülkemizde üzerine çok fazla çalışma yapılmamış olan sürüş çevrimleri konusu da ayrıntılı şekilde işlenmiş ve gerçek sürüş verilerine dayalı yerel bir sürüş çevrimi tasarlanmıştır. Bu yönüyle tez Türkçe literatüre yenilik katmıştır.
- Özellikle günümüz çağında hızla gelişen e-mobilité'ye yönelik yeni teknolojilere ait bilgiler Türkçe literatüre aktarılmış olup hidrojen yakıt pili ile bataryanın fişli hibrit bir yapıda tasarımının yapıldığı sınırlı sayıdaki çalışmalardan biri gerçekleştirilmiştir.

Farklı araç tahrik sistem konfigürasyonlarının ve bu sistemlerin kontrol yöntemlerinin neredeyse sınırsız sayıda olabileceği göz önünde bulundurulduğunda bir tez kapsamında tüm güç aktarım konfigürasyonlarının incelenemeyeceğini vurgulamak önemlidir. Bunun yerine, bu çalışmada amaçlanan hedefler doğrultusunda bir ana güç aktarma organı yapılandırmasıyla ilgili soruları yanıtlamak için gerekli araçları ve metodolojinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Önerilen araştırma sorularına dayalı olarak, aşağıdaki tezde incelenecek hipotezler aşağıdaki gibidir:

- Yakıt pillerinin diğer elektrokimyasal enerji depolama cihazları ile hibridizasyonu ile verimlilik ve performans açısından önemli kazanımlar elde etmek mümkündür.
- Bu kazanımlara ek olarak karbon ayak izi ve emisyon değerlerini azaltmak da mümkündür.

1.8. Metot

Bir sevk sistemine genel bir bakış elde etmek ve yakıt hücreli tam bir tahrik sistemi içindeki tüm alt sistemlerin çalışma sürecini tanımak için öncelikle literatür çalışması yapılmıştır. Literatür çalışması, farklı tahrik konseptlerini ve bu konseptlerle ilgili kontrol ve konfigürasyon stratejilerini kapsamaktadır. Komple tahrik sistemi ve bunların farklı bileşenleri MATLAB Simscape ile inşa edilmiştir. Modeli optimize etmek için farklı senaryolarda simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. YPHEA için yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, verimlilik, performans ve emisyon açısından analiz edilmiş ve piyasadaki gerçek YPEA, BEA ve İYMA'lardan alınan verilerle karşılaştırılmıştır.

1.9. Tezin Sınırlamaları

Yapılan çalışmanın gerçek bir araç olarak tasarlanıp ve gerçek fiziksel ortamlarda test edilmesini, çalışmaya söz konusu olan cihazların çok yüksek maliyetlerinin olması ve böylesi büyük çaplı bir projenin bir ekip olmaksızın tekil bir doktora tez çalışmasında yürütülemeyeceği gerçeği imkânsız kılmıştır. Bu nedenle çalışma yakıt pili ve bataryadan beslenen hibrit bir tahrik sistemi olarak MATLAB Simscape'de modellenmiştir. Yine çalışmada, tek bir doktora tezi kapsamının çok ötesine geçecek komple bir aracın tasarım ve modellenmesi yerine ağırlıklı olarak tahrik sistemine odaklanılmıştır. Tahrik sistemi ile ilgili olmayan şasi gibi diğer alt sistemler bu çalışmada ele alınmamıştır.

2. HİBRİT VE ELEKTRİKLİ ARAÇ TAHRİK SİSTEMLERİ

Bu bölümde tasarlanan yakıt pilli hibrit elektrikli aracın tahrik sisteminin temel bileşenleri ve genel anlamda hibrit araçların tahrik sistemleri açıklanmıştır. Yakıt pilli hibrit aracın tahrik sisteminde güç kaynağı olarak kullanılan yakıt pilleri ve elektrokimyasal piller hakkında genel bilgiler verilmiştir. Yakıt Pili kısmında özellikle PEM yakıt pili ve bu tipe ait önemli kavramlar işlenmiştir ve PEM türünün seçilme nedeni açıklanmıştır. Bu kısımda yakıt pilli hibrit elektrikli tahrik sistemini de temel seviyede yer verilmiştir. Elektrokimyasal piller, çeşitleri ve yine bataryalara ait önemli kavramlar açıklanmış tasarım araçta da kullanılan lityum iyon batarya teknolojileri ve çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir. Sonrasında elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar ve konfigürasyonları hakkında bilgi verilmiştir. Son olarak modern hibrit ve elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorları ve çeşitlerine değinilmiştir.

2.1. Yakıt Pili

Yakıt pili, hidrojen gazı (H_2) gibi bir yakıtta ve oksijen gazı (O_2) veya hava gibi bir oksidantta depolanan kimyasal potansiyel enerjiyi bir katalizör varlığında elektrokimyasal işlem yoluyla elektrik, ısı ve suya doğrudan dönüştüren bir elektrokimyasal enerji dönüştürme cihazıdır [72]. Kullanılan yakıtla bağlı olarak atık ürünler karbondioksit (CO_2) gibi başka bileşenler de içerebilir. Her ikisinin de iki elektrottan oluştuğu ve de ürün olarak bir akım ürettiği göz önünde bulundurulduğunda, bir yakıt hücresi bazı yönleriyle kimyasal bir pile benzerlik gösterir. Bununla birlikte çoğu kimyasal pilin aksine bir yakıt hücresinin reaktantları yakıt hücresinin içinde depolanmaz, standart çalışma sırasında sürekli olarak yakıt hücresine iletilir [73].

Bir yakıt hücresinde elde edilen voltaj, kullanılan yakıtla ve gerçekleşen reaksiyona bağlıdır. İdeal bir hidrojen yakıt hücresi 1.23 V üretir, ancak geri dönüşü olmayan kayıplar nedeniyle bu değer gerçek koşullarda biraz daha düşük olacaktır [74]. Bununla birlikte, yakıt hücreleri daha yüksek bir voltaj sağlamak için birlikte kullanılabilir ki bu yapı genellikle yığın veya yakıt pili olarak adlandırılır. Bu da belirli bir uygulamanın enerji ve güç talebine daha iyi uyacak şekilde ölçeklendirilebilecekleri anlamına gelir. Bu esneklikleri yakıt pillerini çok yönlü hale getirir ve ulaşım, güç istasyonları ve taşınabilir cihazlar gibi birçok farklı kullanım alanı için kolayca uygulanabilir hale getirir [75].

Bir yakıt hücresinde, teorik olarak oksitlenebilen herhangi bir yakıt kullanabilir, ancak yüksek güç yoğunluğu ile hidrojen en yaygın olarak kullanılan yakıt türüdür. Hidrojen kolayca katalize edilir olmasının yanında oksijenle reaksiyona girdiğinde, atık ürünler sadece ısı ve sudur ve bu nedenle sıfır emisyonlu bir yakıt olarak kabul edilir [76]. Yakıt pillerinin kullanımında herhangi bir yanma süreci olmadığından karbon içermeyen bir yakıt kullanıldığı sürece hiçbir CO_2

emisyonu oluşturmaz. Hidrojen, temiz atık ürünler ve yüksek güç yoğunluğu sebebiyle yakıt pilleri için mükemmel bir yakıt konumundadır [77].

Her biri belirli membranlara, elektrolitlere ve elektrotlara sahip ve farklı yakıtlara çalışan birkaç farklı yakıt hücresi türü vardır. Bu nedenle kullanım alanlarını da belirleyen farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptirler. Bu tezin kapsamı nedeniyle, hidrojen yakıt bölümünün geri kalanının ana odak noktası olacaktır. Tablo 2.1'de, bugün piyasada bulunan bazı yakıt pilleri teknolojileri hakkında temel bilgiler verilmiştir [78].

Bu tezde, yakıt pili sistemi kullanımının amacı bir yolcu arabasına güç sağlamak olduğundan çok sayıda kısıtlamayla karşı karşıyadır. Fosforik asit, erimiş karbonat ve katı oksit yakıt pili sistemin elektrik verimliliği için faydalı olacak birleşik ısı ve güç sistemleri olarak işlev görebilecekleri sabit uygulamalarda güçlü yönleri sahiptir. Erimiş karbonat ve katı oksit yakıt pili ulaşımında da kullanılabilir ancak ağır vasıtalar için daha uygundur. Alkali yakıt pili ise saf oksijen kaynağı olarak ikinci bir tank gerektirmesi nedeniyle toplam hacim gereksinimi fazla olacaktır. Bu nedenle PEMYP bu tez çalışması için en uygun yakıt pili teknolojisi olarak görülmüştür.

Tablo 2.1. Yakıt pillerinin türleri ve çeşitli özellikleri [78].

Yakıt pili	Elektrolit	İşletim sıcaklığı [°C]	Güç verimi [%]	Sistem verimi [%]	Güç yoğunluğu [mW/cm ²]	Uygulama alanları	Avantajları	Zorluklar
Alkali (AYP)	Potasyum hidroksit	<100	60	26-31	100-200	Askeri, uzay, yedek güç kaynağı, ulaşım, taşınabilir	Geniş kararlı malzeme yelpazesi, düşük maliyetli bileşenler, düşük sıcaklık, hızlı başlatma.	Yakıttaki ve havadaki CO ₂ 'ye duyarlılık, Elektrolit yönetimi, Elektrolit iletkenliği.
Proton elektrolit membran (PEMYP)	Katı polimer	<120	40-60	32-40	350	Uzay, ulaşım, yedek güç kaynağı, özel araçlar, sabit güç kaynağı.	Katı elektrolit, düşük sıcaklık, hızlı başlatma ve yükleme takibi.	Pahalı katalizörler, yakıt safsızlığına yüksek hassasiyet.
Fosforik asit (FAYP)	Ortofosforik asit	150-200	40-45	36-45	100	Kojenerasyon, sabit güç kaynağı, taşıma	Birleşik ısı ve güç uygulamaları için uygun, yakıt safsızlığına yüksek tolerans.	Pahalı katalizörler, uzun başlatma süresi, kükürt duyarlılığı.
Erimiş karbonat (EKYP)	Lityum-potasyum karbonat	600-700	50-60	43-55	100	Kojenerasyon, sabit güç kaynağı	Yüksek verim, yakıt esnekliği, birleşik ısı ve güç uygulamaları için uygun, hibrit/gaz türbini çevrimi.	Yüksek sıcaklıkta korozyon ve degradasyon, uzun başlatma süresi, düşük güç yoğunluğu.
Katı oksit (KOYP)	Kararlı hale getirilmiş zirkon	500-1000	50-60	43-55	240	Kojenerasyon, sabit güç kaynağı, yardımcı güç kaynağı	Yüksek verim, yakıt esnekliği, birleşik ısı ve güç uygulamaları için uygun, hibrit/gaz türbini çevrimi, katı elektrolit.	Yüksek sıcaklıkta korozyon ve degradasyon, uzun başlatma süresi, düşük güç yoğunluğu, devreden çıkarılma sayısının sınırlı olması.
Doğrudan metanol (DMYP)	Sülfürik asit veya polimer	50-120	30-40	40	40	Ulaşım, bilgisayar, cep telefonu	Sıvı yakıt kullanımı, yakıt depolama kolaylığı	Pahalı katalizörler, düşük güç yoğunluğu.

Yakıt pillerinin günümüzdeki en önemli dezavantajı tüm çeşitler için maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Bununla birlikte, farklı çeşitlerin her birinin öne çıkan ve farklı uygulamalarda kullanımlarını teşvik eden avantajları mevcuttur.

Yakıt pilleri genellikle pistonlu veya türbin tabanlı olsun yanmalı motorlardan daha verimlidir. Çünkü tek bir kademede kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Diğer geleneksel termal yöntemlerde öncelikle yanma işlemi ile kimyasal bağ enerjisi ısı enerjisine, elde edilen bu ısı enerjisi bir Carnot Çevrimi ile mekanik enerjiye dönüştürülür. Son olarak bu mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Yine yakıt pillerini geleneksel termal sistemlerden öne çıkaran diğer bir özelliği ise küçük sistemlerin de büyük sistemler kadar verimli olabilmesidir. Bu özellikle birleşik ısı ve güç sistemleri için ihtiyaç duyulan küçük yerel güç üretim sistemleri söz konusu olduğunda çok daha fazla önemlidir.

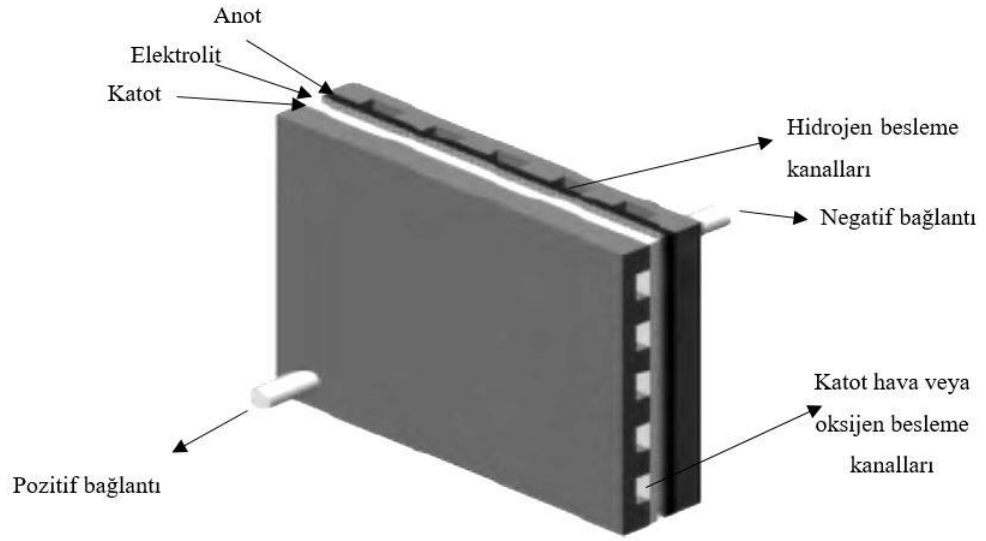
Yakıt olarak sadece hidrojen kullanılan bir yakıt hücresinin yan ürünü saf sudur, bu da bir yakıt hücresinin esasen sıfır emisyon olabileceği anlamına gelir. Araç emisyonlarını azaltmak ve hatta ortadan kaldırmak zorunlu bir gereklilik olduğundan, araçlarda kullanılmaları büyük bir avantaj sağlar. Bununla birlikte, şu anda yakıt olarak ihtiyaç duyulan hidrojen üretiminde de CO₂ emisyonlarının oluştuğuna dikkat edilmelidir.

Bir yakıt hücresi çok az sayıda hareketli parça içermekte ve oldukça çok basit bir yapıdadır. Böylece son derece güvenilir ve uzun ömürlü sistemler oluşturulabilir. Yine aynı sebeplerle yakıt pilleri, kapsamlı ekstra yakıt işleme ekipmanlarına ihtiyaç duyanları bile, çok sessizdirler. Bu, hem taşınabilir güç uygulamalarında hem de birleşik ısı ve güç sistemlerinde yerel güç üretimi için çok önemlidir.

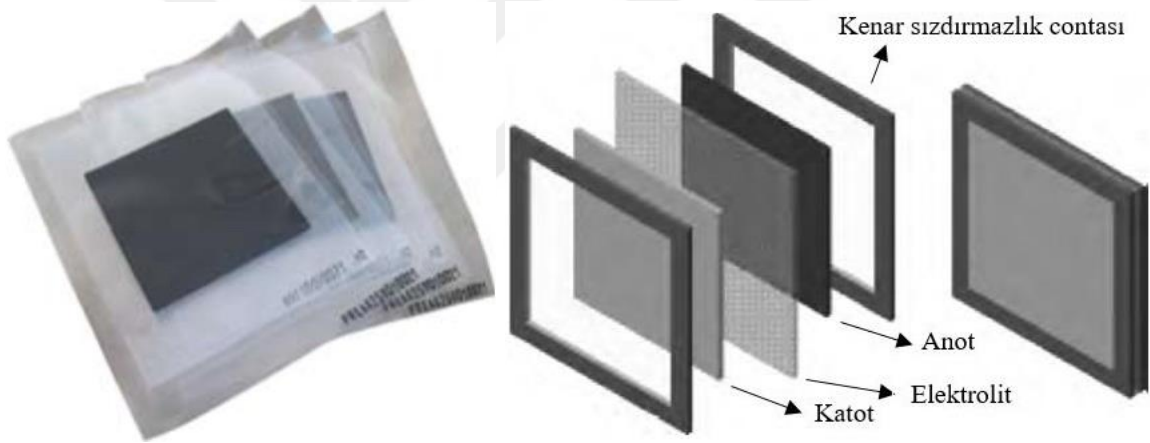
Yakıt pillerinde hidrojenin ilk tercih edilen yakıt olması esasında başlıca dezavantajlarından biridir. Ancak bunun fosil yakıtlar tükendikçe hidrojenin dünyada en büyük yakıt ve enerji vektörü olacağı öngörüsüyle büyük bir avantaja dönüşeceğini savunanlar da mevcuttur.

2.1.1. Proton Elektrolit Membran Yakıt Pili

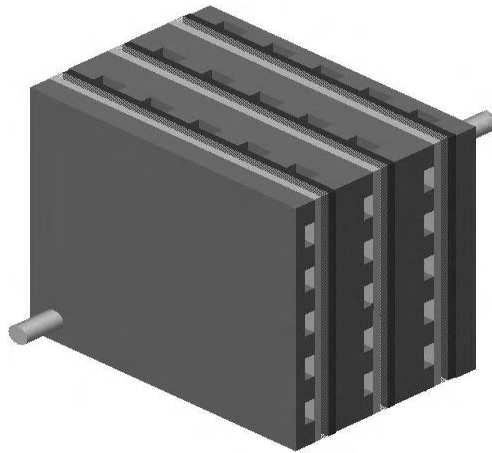
Katı polimer yakıt pili (KPYP) olarak da adlandırılan PEMYP, ilk olarak 1960'larda General Electric tarafından NASA için ilk insanlı uzay araçlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir [79]. Elektrolit bir iyon iletim polimeridir ve her iki tarafına katalize edilmiş gözenekli bir elektrot bağlanmıştır. Anot-elektrolit-katot yapısı bu nedenle tek parçadır ve Şekil 2.1'de bir membran elektrot grubu (MEG) gösterilmiştir. Şekil 2.2'de ise MEG'nun gerçek görseli ile plakalanmış hali gösterilmiştir. Bu yapılar, Şekil 2.3'te olduğu gibi genellikle bipolar plakalar kullanılarak seri bağlanır.



Şekil 2.1. Elektrot yüzeyinden akım almak ve ayrıca elektrota gaz sağlamak için uç plakaları olan tek hücre [79].

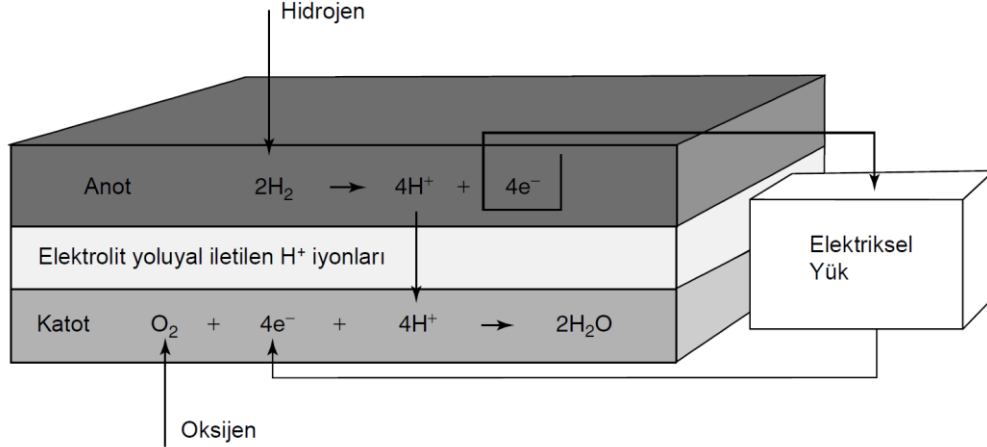


Şekil 2.2. Membran elektrot grupları [80].



Şekil 2.3. Bipolar plakaların bağlantısını gösteren üç hücreli bir yığının görünümü [79].

Kullanılan polimerlerdeki mobil iyon, bir H^+ iyonu veya protondur, bu nedenle hücrenin temel çalışması, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi gibidir [79]. PEMYP'nin ilk sürümlerinin ömrü yalnızca NASA Gemini uzay aracında kullanıldığı haliyle 500 saati ve bu süre sınırlı görevler için yeterliydi. Geliştirme programı, 1967'de Dupont'un tescilli ticari markası olan Nafion adlı yeni bir polimer membranın dâhil edilmesiyle devam etti ve bugün olduğu gibi PEMYP için standart hale geldi [79]. Bununla birlikte, elektrolitteki su yönetimi sorununun güvenilir bir şekilde yönetilmesinin çok zor olması ve maliyetlerinin o sırada geliştirilmekte olan FAYP gibi diğer yakıt hücrelerine göre daha yüksek olması kullanımını sınırlandırdı. Maliyetlerinin yüksek olmasının temel sebebi ise elektrotun her santimetre karesi için 28 mg platin gerekli olmasıydı. Bugün bu değer $0,2 \text{ mg/cm}^2$ 'den de daha az değerlere düşmüştür. PEMYP'lerinde yapılan iyileştirmelerle akım yoğunlukları yaklaşık 1 A/cm^2 veya daha fazlasına çıkarırken, aynı zamanda platin kullanımı %1'e düşürülmüştür. Böylece kilovat güç başına güç yoğunluğu artarken maliyette büyük bir düşüş meydana gelmiştir. PEMYP'leri, cep telefonları ve bilgisayarlar gibi elektronik ekipmanlara güç sağlamak için birkaç vata, tekneler ve ev sistemleri için birkaç kilovata, arabalar için onlarca kilovata, otobüsler ve endüstriyel birleşik ısı ve güç sistemleri için yüzlerce kilovata kadar olası bir güç kaynağı haline gelmişlerdir [79].

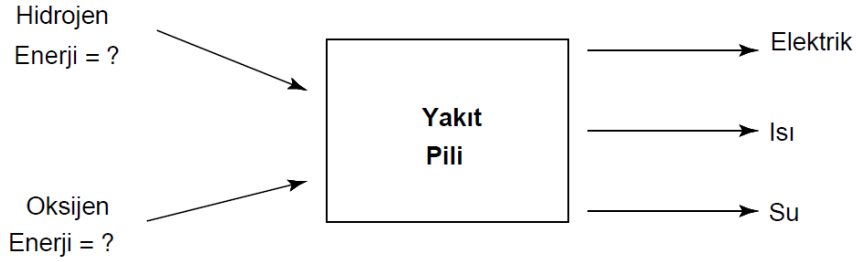


Şekil 2.4. Bir PEM yakıt pili için elektrot reaksiyonları ve yük akışı [79].

2.1.2. PEMYP'nde Enerji ve Elektromotor Kuvvet

Bazı elektrik enerjisi üreten cihazlarda, hangi enerji formunun elektriğe dönüştürüldüğü çok açıktır ancak kimyasal girdi ve çıktının bulunduğu yakıt pili gibi sistemlerde kolay tanımlanamamaktadır. Sorun kimyasal enerjinin basitçe tanımlanamaması ve entalpi, Helmholtz fonksiyonu ve Gibbs serbest enerjisi ($\bar{g}_f$) gibi terimlerin kullanılmasıdır.

Yakıt pillerinde önemli olan Gibbs serbest enerjisi'dir. Bu enerji, basınç ve/veya hacimdeki değişiklikler tarafından yapılan herhangi bir işi ihmal ederek, harici iş yapmak için mevcut olan enerji olarak tanımlanabilir. Bir yakıt hücresinde harici iş, elektronların bir dış devre etrafında hareket etmesini içerir ve giriş ve çıkış arasındaki hacim değişikliğiyle yapılan herhangi bir iş, yakıt hücresi tarafından kullanılmaz (Şekil 2.5) .



Şekil 2.5. Yakıt hücresi giriş ve çıkışları

Hidrojen-oksijen yakıt hücresi için temel reaksiyonun, ürünü bir mol H_2O ve tepkenleri bir mol H_2 ve yarım mol O_2 'dir ve Denklem 2.1'de gösterilmiştir.



$$\Delta \bar{g}_f = \bar{g}_{f,ürünler} - \bar{g}_{f,tepkkenler} \quad (2.2)$$

$$\Delta \bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (\bar{g}_f)_{O_2} \quad (2.3)$$

burada $\Delta \bar{g}_f$ herhangi bir reaksiyon sonucunda Gibbs serbest enerjisindeki farkdır. Denklem 2.2'de verilmiştir. Denklem 2.3'de ise yakıt hücresinde meydana gelen reaksiyona ait Gibbs serbest enerjisindeki farktır.

Yakıt hücresinde herhangi bir kayıp yoksa yani süreç tersinir ise, tüm bu Gibbs serbest enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür. Uygulamada bir kısmı ısı olarak da açığa çıkar. Bu işlem bir yakıt hücresinin tersinir açık devre gerilim değerini bulmak için kullanılır.

Hidrojen yakıt hücresi için üretilen her su molekülü ve kullanılan her hidrojen molekülü için dış devreden iki elektron geçer. Böylece, kullanılan bir mol hidrojen için, dış devreden iki mol elektron geçer. Burada N , Avogadro sayısıdır ve e bir elektronun yükü ise akan yük Denklem 2.4'teki gibi olur.

$$-2Ne = -2F \quad (2.4)$$

burada F , Faraday sabiti veya bir mol elektron üzerindeki yüküdür ve E , yakıt hücresinin gerilimi ise bu yükü devreden hareket ettirerek yapılan elektrik işi Denklem 2.5'te verildiği üzere,

$$Yapılan\ elektrik\ işi = Y\ddot{u}k \times Gerilim = -2FE\ joule\ olur. \quad (2.5)$$

Sistem tersinir ise yapılan bu elektrik işi, salınan Gibbs serbest enerjisine, $\Delta \bar{g}_f$, eşit olacaktır (Denklem 2.7).

$$\Delta \bar{g}f = -2F \times E \quad (2.6)$$

Böylece,

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}f}{2F} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7, hidrojen yakıt hücresinin elektromotor kuvvetini (EMK) tersinir açık devre gerilimini verir. 80°C'de çalışan bir hidrojen yakıt hücresinin bu sıcaklık değerinde $\bar{g}_f = -228,2$ kJ olduğu durum için hücrenin EMK'sı 1,18 V olarak bulunmuştur.

Bu durum tersinmezlik olmadığı ve standart basınçta (0,1 MPa) saf hidrojen ve oksijen durumunda geçerli olacaktır. Pratikte gerilim düşüşleri nedeniyle gerilim bundan daha düşük olacaktır. Bu tersinmezliklerden bazıları, akım çekilmediğinde bile çok az geçerlidir, bu nedenle bir yakıt hücresinin açık devre gerilimi bile genellikle Denklem 2.7'te hesaplanandan daha düşük olacaktır.

2.1.3. Yakıt Hücre Gerilimi, Verimlilik ve Verimlilik Limitleri

Yakıt hücrelerinin Carnot verimlilik limitine tabi olmadığı oldukça iyi bilinmektedir. Elektrik enerjisine dönüştürülen enerjinin Gibbs serbest enerjisi olduğunu ve tersinmezlikler olmasaydı, tüm bu enerji elektrik enerjisine dönüştürülebilir ve verimin %100 olduğu söylenebilirdi. Ancak bu çeşitli kimyasal enerji türlerinden sadece birini seçmenin sonucudur. Gibbs serbest enerjisinin sıcaklık, basınç ve diğer faktörlerle değiştiği de bilinmektedir. Sonuç olarak verimliliği üretilen elektrik enerjisinin Gibbs serbest enerji değişimine oranı olarak belirlemek çok kullanışlı değildir ve çoğu zaman tercih edilmez.

Bir yakıt hücresi, enerjisini açığa çıkarmak için genellikle yakılan malzemeleri kullandığından, üretilen elektrik enerjisini yakıtın yakılmasıyla oluşacak ısı ile karşılaştırmak daha mantıklı olacaktır. Buna kalorifik değer de denir, ancak daha kesin bir tanım oluşum entalpisindeki değişiktir. Diğer yakıt kullanan teknolojilerle iyi bir karşılaştırma yapabilmek için yakıt pilinin verimliliği, genellikle tüketilen mol yakıt başına üretilen elektrik enerjisinin oluşum entalpisine oranı olarak tanımlanabilir.

Bununla birlikte hidrojenin yanması için oluşum entalpisi için kullanabileceğimiz iki farklı değer vardır. Ürünler kısmındaki suyun sıvı veya gaz fazında oluşuna bağlı olarak oluşum entalpileri arasında 44,01 kJ/mol, suyun molar buharlaşma ısısı, kadar bir farklılık söz konusudur. Yüksek ve düşük ısı değerine bağlı olarak verim değerinde de farklılıklar ortaya çıkacaktır. Özellikle belirtilmediği durumda verimlilik değeri daha yüksek olacağından düşük ısı değerine göre verilebilir. Mevcut maksimum elektrik enerjisi Gibbs serbest enerjisindeki değişime eşittir ve bu nedenle maksimum verimlilik bu değer oluşum entalpisine oranı olarak bulunabilir. Bu maksimum verimlilik sınırı termodinamik verimlilik olarak bilinir. Tablo 2.2, bir hidrojen yakıt hücresi için yüksek ısı değer göre verimlilik limiti değerlerini vermektedir.

Tablo 2.2. Maksimum EMK, $\bar{g}_f$ ve hidrojen yakıt hücreleri için verimlilik sınırı

H ₂ O formu	Sıcaklık	$\bar{g}_f(\text{kJ/mol})$	Maks.	Verim
Sıvı	25	-237.2	1.23	83
Sıvı	80	-228.2	1.18	80
Gaz	100	-225.2	1.17	79
Gaz	200	-220.4	1.14	77
Gaz	600	-199.6	1.04	70
Gaz	800	-188.6	0.98	66
Gaz	1000	-177.4	0.92	62

Bir hücrenin maksimum EMK'sı ile maksimum verimliliği arasında bir bağlantı olduğu Tablo 2.2'de açıkça görülmektedir. Bir yakıt hücresinin çalışma gerilimi (V_c) de verimliliği (η) ile kolay bir şekilde ilişkilendirilebilir ve Denklem 2.6'ya uyarlanarak Denklem 2.8'de gösterilmiştir.

$$\eta = \frac{V_c}{1.48} \times 100 \quad (\text{Yüksek ısıl değer göre}) \quad (2.8)$$

Bununla birlikte pratikte bir yakıt hücresinde yakıtın tamamının kullanılamaz çünkü yakıtın bir kısmı reaksiyona girmez. Hücrede reaksiyona giren yakıt kütlelerinin, hücreye yakıt giriş kütlelerine oranına yakıt kullanım katsayısı (μ_y) olarak alınarak Denklem 2.9 elde edilmiştir.

$$\eta = \mu_y \times \frac{V_c}{1.48} \times 100 \quad (2.9)$$

Bir kimyasal reaksiyonda Gibbs serbest enerjisinin sıcaklıkla değişimi yukarıda incelenmiştir. Tepkenlerin basıncı ve konsantrasyonu da Gibbs serbest enerjisinde değişikliklere neden olmaktadır.



Denklem 2.10'daki gibi tepkenler kısmında j mol J 'nin k mol K ile reaksiyona girerek m mol M ürettiği genel bir reaksiyon düşünülecek olunursa tepkimeye girenlerin ve ürünlerin her birinin ilişkili bir "aktivitesi" olacaktır. Bu aktivite (a), a_J ve a_K ile reaktanların aktivitesi ve a_M ürünün aktivitesi olarak Denklem 2.11'deki gibi belirtilir.

$$\text{aktivite } a = \frac{P}{P^0} \quad (2.11)$$

Burada P gazın basıncı veya kısmi basıncıdır ve P^0 standart basınçtır. Yakıt pilleri genellikle gaz reaktörleri olduğundan, bu basit denklem çok kullanışlıdır ve aktivite kısmi basınçla orantılıdır. Tepkenlerin ve ürünlerin aktiviteleri, bir reaksiyonun Gibbs serbest enerji değişimini değiştirir. R , gaz sabiti ve T , sıcaklık olmak üzere bu değişim termodinamik argümanlar kullanılarak Denklem 2.10'daki gibi bir kimyasal reaksiyonda gösterilebilir.

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^0 - RT \ln \left(\frac{a_f^j + a_k^k}{a_M^m} \right) \quad (2.12)$$

Denklem 2.12'deki $\Delta \bar{g}_f^0$, standart basınçta oluşumun molar Gibbs serbest enerjisindeki değişimdir. Hidrojen yakıt hücresi reaksiyonu durumunda bu denklem 2.13'teki gibi olur.

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^0 - RT \ln \left(\frac{a_{H_2} + a_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \quad (2.13)$$

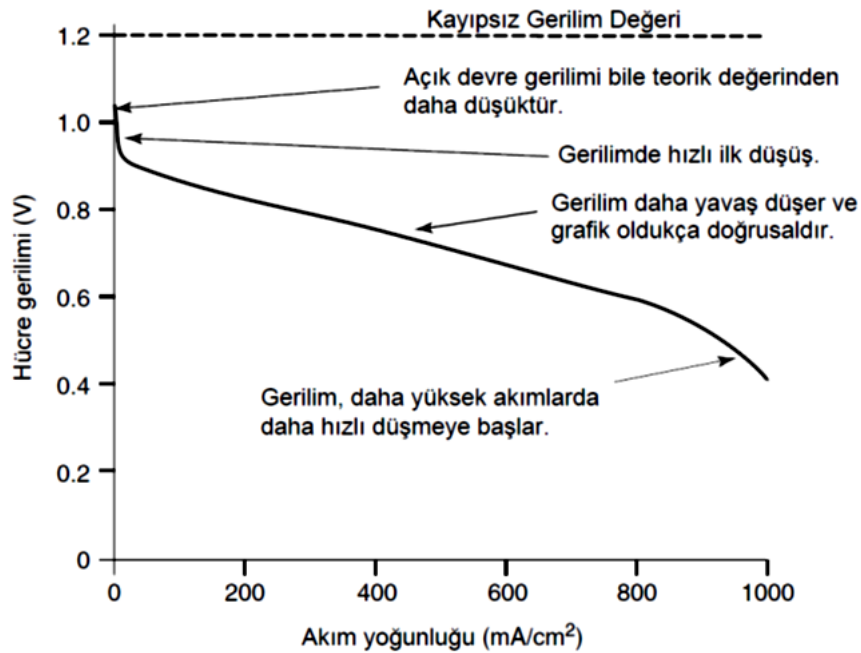
Bu denklemin gerilimi nasıl etkilediğini görmek için denklem 2.7'e uygulanmış ve Denklem 2.14 ve 2.15 elde edilmiştir.

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{a_{H_2} + a_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \quad (2.14)$$

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{a_{H_2} + a_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \quad (2.15)$$

burada E^0 , standart basınçtaki EMK'dır ve Tablo 2.2'nin 4. sütununda verilen sayılara tekabül etmektedir. Bu denklem tepkenlerin aktivitesinin artmasının gerilimi nasıl artırdığını tam olarak gösterir. Ürün ve/veya tepken aktivitesi açısından bir EMK veren Denklem 2.15 ve varyantları Nernst denklemleri olarak adlandırılır. Bu tür denklemlerden hesaplanan EMK, 'Nernst gerilimi' olarak bilinir ve belirli bir sıcaklık ve basınçta var olabilecek tersinir hücre gerilimidir.

Bir yakıt pili imal edilip kullanıma sunulduğunda geriliminin teorik değerlerden daha az olduğu gözlemlenir. Şekil 2.6, normal atmosfer basıncında yaklaşık 70 °C'de çalışan tipik bir tek hücrenin performansını gösterir.



Şekil 2.6. Tipik bir düşük sıcaklıklı yakıt hücresi için hücre gerilimi, akım yoğunluğu grafiği [79].

Şekil 2.6’da açık devre geriliminin bile teorik değerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Akım çekilmesi ile gerilimde hızlı bir ilk düşüş söz konusu olup daha sonra gerilimdeki düşüş daha yavaş ve daha doğrusal olmaktadır. Daha yüksek bir akım yoğunluğunda daha yüksek gerilim düşümleri vardır.

2.1.4. Yakıt Kaynağı

Yakıt hücreli araç uygulamaları için en büyük zorluklardan biri yakıt pile yakıt tedariki sağlamaktır. Daha önce bahsedildiği gibi, hidrojen yakıt hücreli araçlar için ideal yakıttır bu nedenle, hidrojen üretimi ve araçta depolanması halledilmesi gereken en büyük sorundur [81]. Genel olarak, yakıt pillerine yakıt tedarikinin iki yolu vardır. Birincisi dolum istasyonlarında hidrojen üretmek ve araçta saf hidrojen depolamaktır. Diğeri ise kolay taşınan bir hidrojen taşıyıcısından araçta hidrojen üretmek ve doğrudan yakıt pillerini beslemektir.

2.1.5. Hidrojenin Depolanması

Hidrojen gazı 120 kJ/kg’lik yüksek bir enerji yoğunluğu değerine sahiptir ki, bu değer benzininkinden (44,5 kJ/kg) neredeyse üç kat daha yüksektir. Bununla birlikte atmosferik koşullarda enerji yoğunluğu 10,050 kJ/m³’tür, bu da sıvı benzinin (31,150 MJ/m³) değerinin %0,03’ü kadardır [82]. Hidrojen yakıtlı bir aracın yeterli enerjiyi depolayabilmesi için hidrojen yoğunluğunu artıracak gelişmiş yakıt depolama sistemlerinden faydalanılması gereklidir. Bu nedenle hidrojenin araçlarda depolanması için üç yöntem vardır. Bunlar, ortam sıcaklığında bir tüp içerisinde sıkıştırılmış hidrojen olarak, düşük sıcaklıkta kriyojenik sıvı hidrojen olarak ve metal hidrür tüplerde depolama yöntemleridir. Tüm bu yöntemlerin avantajları ve dezavantajları vardır.

2.1.5.1 Sıkıştırılmış Hidrojen

Saf hidrojen araçta basınç altında bir tankta depolanabilir. İdeal gaz denklemi, V hacmi ve p basıncı olan bir kapta depolanan hidrojen kütleini (m_H) hesaplamak için Denklem 2.16’daki gibi kullanılabilir.

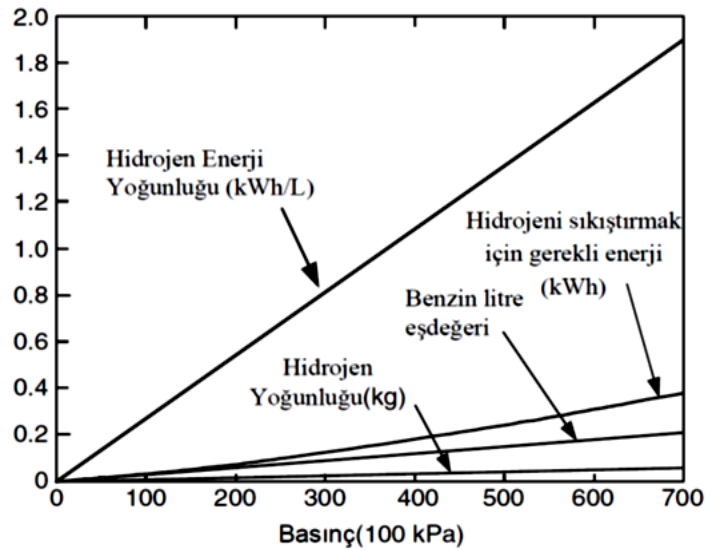
$$m_H = \frac{pV}{RT} M_H \quad (2.16)$$

Burada p ve V kabın basıncı ve hacmidir, R gaz sabitidir (8,31 J/mol.K), T mutlak sıcaklıktır ve M_H hidrojenin moleküler ağırlığıdır (2,016 g/mol). Hidrojende depolanan enerji ise Denklem 2.17’de hesaplanmıştır.

$$E_H = m_H HV \quad (2.17)$$

Burada HV , hidrojenin ısıtma değeridir. Isıtma değeri, üretilen su yoğunlaşma enerjisinin geri

kazanılıp kazanılamayacağına bağlı olarak ya yüksek ısı değeri (144 MJ/kg) ya da daha düşük ısı değeri (120 MJ/kg). Hesaplamalarda İYM'lar ile uygun bir karşılaştırma için, çoğunlukla düşük ısı değeri kullanılır. Şekil 2.7'de, oda sıcaklığında (25 °C) farklı basınç değerlerinde hidrojenin enerji yoğunluğu ve eşdeğer litre benzin karşılığı ve yoğunluğu gösterilmektedir. Eşdeğer litre benzin karşılığı 1 litre hidrojen ile aynı miktarda enerjiye sahip benzin hacmi olarak tanımlanır. Şekil 2.7'de 350 barlık bir basınçta, hidrojen litresi başına enerjisinin 1 kWh'den az olduğu ve yaklaşık 0,1 litre benzine eşdeğer olduğu görülmektedir. Basınç, ulaşılabilecek maksimum değer olarak tanımlanan 700 bar'a yükseltile bile hala enerji yoğunluğu 2,0 kWh/L'den ve yaklaşık 0,2 eşdeğer litre benzinden daha azdır. Ayrıca hidrojeni sıkıştırmak için de bir miktar enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır ve hidrojen enerjisinin yaklaşık %20'sinin tüketilmesi gerektiği Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Kompresör ve elektrik motorunun verimleri de göz önünde bulundurulduğunda, hidrojen enerjisinin yaklaşık %25'inin tüketildiği tahmin edilmektedir.



Şekil 2.7. Farklı basınç değerlerinde hidrojen enerji yoğunluğu ve eşdeğer litre benzin karşılığı [83].

Bu denli yüksek basınçlarda gazı depolayabilmek için çok güçlü tanklara ihtiyaç duyulmaktadır. Ağırlığı ve hacmi olabildiğince makul tutmak için otomotiv uygulamalarında kullanılan hidrojen tanklarının imalatında karbon fiber gibi kompozit malzemeler kullanılır. Sıkıştırılmış bir hidrojen tankının maliyetinin yüksek olması bu nedenle muhtemeldir. Sıkıştırılmış hidrojenin depolanması ve taşınması, aracın güvenliği ve işlevselliği için kritik bir işlemdir ve tehlikeleri dikkate alınmalıdır. Tank duvarlarında, contalarda ve çatlaklardan sızıntı riskinin yanı sıra duvar malzemesinden hidrojen sızması sorunu da vardır çünkü hidrojen gazının molekülü o kadar küçüktür ki bazı maddelerden geçebilir.

Sıkıştırılmış bir gaz tankı bir kaza durumunda potansiyel bir bombadır çünkü havada %4 ila

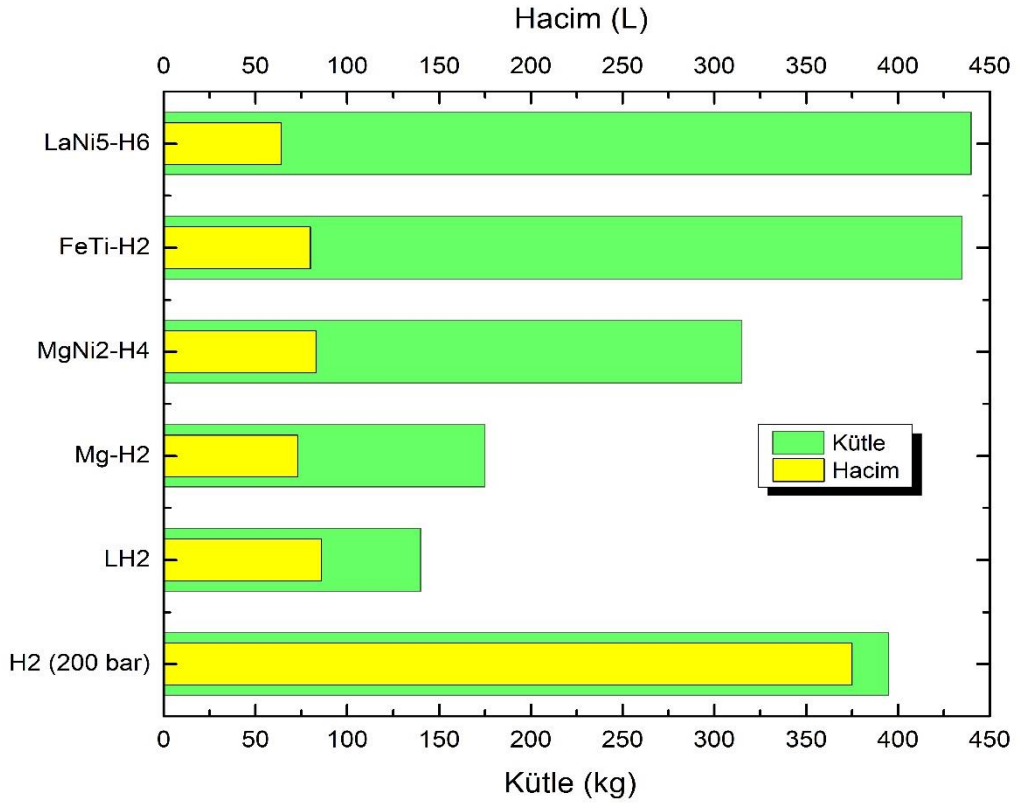
%77 arasında çok geniş bir patlama aralığına sahip olan ve hava ile çok hızlı bir şekilde karışabilen hidrojen büyük bir tehlike arz edebilir [84,85]. Bu patlayıcılık aralığı yalnızca %1 ila %6 arasında olan ve sıvı halde bulunan benzinle karşılaştırılmaz.

2.1.5.2 Kriyojenik Sıvı Hidrojen

Hidrojeni araçlarda depolamak için başka bir alternatif çözüm ise gazı kriyojenik sıcaklıklarda (-259,2 °C) sıvılaştırmaktır. Bu şekilde depolanan hidrojene yaygın olarak sıvılaştırılmış hidrojen (LH2) denir. Sıkıştırılmış hidrojendeki yoğunluk problemi etkisini LH2’de de gösterir. Sıvı hidrojenin yoğunluğu çok düşüktür ve 1 litre sıvı hidrojen sadece 0,071 kg’dır. Bu düşük yoğunluk ile sıvı hidrojen enerji yoğunluğu 8,52 MJ/L olmaktadır [84]. Hidrojeni sıvı olarak -259,2 °C gibi düşük bir sıcaklıkta tutmak teknik olarak zordur. Ortamdan kriyojenik sıvıya ısı transferini en aza indirmek ve böylece kaynamasını engellemek için oldukça iyi yalıtılmış bir tank gereklidir. Bu nedenle önemli ölçüde yalıtılmış ve kaynamadan kaynaklanan basıncın bir kısmına dayanacak kadar güçlü bir tank imal etmek önemlidir. Tank yalıtımı, gücü ve güvenlik cihazları LH2 depolamasına ek ağırlık ve maliyetler getirir. Kaynama sorunu çok önemlidir çünkü araç kapalı bir alana (garaj, yer altı otoparkı) park edilmişse, kapalı atmosferde hidrojen birikmesi ve patlama riski vardır. Sıvı hidrojenli bir tankın yakıt ikmali de özel önlemler gerektirir. Patlama ve kriyojenik tehlikelerle başa çıkmak için tasarlanmış özel ekipman kullanmak da gereklidir çünkü kriyojenik bir sıvı canlılar için tehlikeli bir bileşiktir.

2.1.5.3 Metal Hidrürler

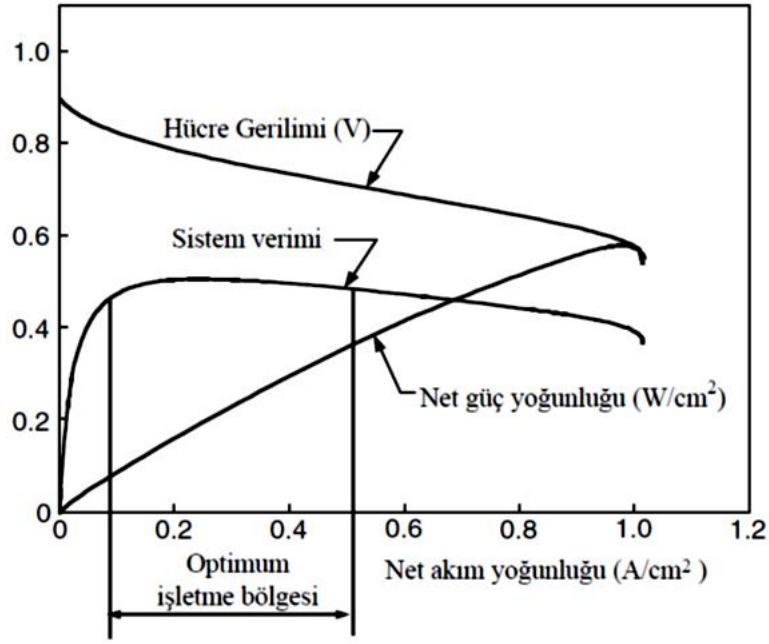
Bazı metaller, belirli bir basınç ve sıcaklık altında hidrojen ile daha sonra ayrışabilen kararlı bileşikler oluşturabilmektedir. Bu metaller demir, titanyum, manganez, nikel, lityum ve bunların bazı alaşımları olabilir. Metal hidrürler, normal sıcaklık ve basınç koşulları altında kararlıdır ve yalnızca istenilen durumlarda hidrojen verebilir. Bu metaller ve alaşımları Mg, Mg₂Ni, FeTi ve LaNi₅’tir ve hidrojeni emerek Mg-H₂, Mg₂Ni-H₄, FeTi-H₂ ve LaNi₅-H₆ oluşturur [83]. Pratikte hidrojen depolama kapasitesi absorbe edildiği malzemenin yüzey alanına büyük ölçüde bağlıdır bu nedenle metallerin veya alaşımlarının ince öğütülmüş tozundan yapılan gözenekli modüller ile malzemenin birim ağırlığı başına geniş bir yüzey alanı elde edilebilir. Şekil 2.8’de 6 kg hidrojeni (22 L benzin eşdeğeri) depolamak için gereken kütle ve hacim gösterilmektedir. Bu rakam, Mg-H₂’nin gelecek vaat eden teknoloji olduğunu göstermektedir. Depolama yoğunluğu, diğer birçok hidrojen depolama tekniğine kıyasla iyi olmasına rağmen benzine kıyasla hala daha düşüktür. Bu hidrürlerin üretimi ve geri dönüşümü de zordur.



Şekil 2.8. Çeşitli metal hidrür ve sıkıştırılmış hidrojen tanklarında 6 kg hidrojeni (22 L benzin eşdeğeri) depolamak için gereken kütle ve hacim [84].

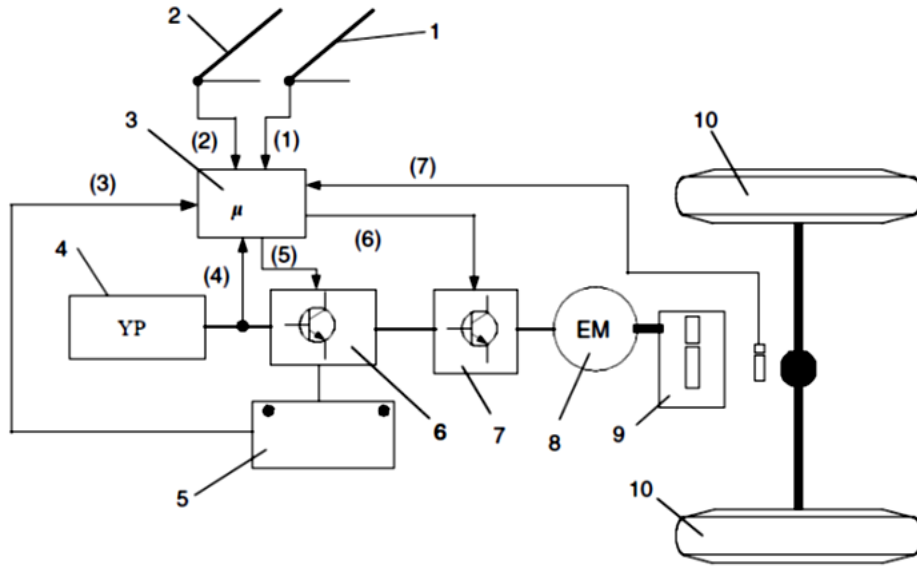
2.1.6. Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Tahrik Sistemi Tasarımı

Yakıt pillerinin ulaşım uygulamaları güç kaynaklarından biri olarak kabul edilir ve İYM ile karşılaştırıldığında yüksek enerji verimliliği ve daha düşük emisyon avantajlarına sahiptir. Bununla birlikte yalnızca yakıt pilleri ile çalışan araçların yakıt pili sisteminin düşük güç yoğunluğunun neden olduğu ağır ve hacimli güç ünitesi, uzun başlatma süresi ve yavaş güç tepkisi gibi bazı dezavantajları da söz konusudur. Tahrik uygulamalarında Şekil 2.9'da gösterildiği gibi, ani hızlanmada büyük güç arzı ve düşük hızlarda düşük güç arzı gereksinimi yakıt pillerinin çalışma verimini oldukça düşük değerlere indirebilir. Bu nedenle bu durumlarda devreye girecek yardımcı bir güç kaynağı ile yakıt pili sisteminin hibridizasyonu bu dezavantajlarının üstesinden gelmek için etkili bir yöntemdir. YPHEA, geleneksel İYM ile çalışan araçlardan ve İYM tabanlı hibrit aktarma organlarından tamamen farklıdır. Bu nedenle, tamamen yeni bir tasarım metodolojisi gereklidir.



Şekil 2.9. Bir yakıt hücresinin tipik çalışma karakteristikleri [83].

Yakıt pili ile çalışan hibrit aktarma organı, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi inşa edilmiştir. Temel olarak birincil güç kaynağı olarak bir yakıt pili sisteminden, yardımcı güç kaynağından (YGK), elektrik motoru tahrik sisteminden, araç kontrolöründen ve enerji yönetim sisteminden oluşur. Pedallardan alınan güç veya tork komutuna ve diğer çalışma sinyallerine göre, araç kontrolörü motor gücünü veya tork çıkışını ve yakıt pili, YGK ve tahrik sistemi arasındaki enerji akışını kontrol eder. Pik güç talebinde, örneğin ani bir hızlanma sırasında, hem yakıt pili sistemi hem de YGK elektrik motoru sürücüsüne gerekli gücü sağlar. Frenlemede jeneratör görevi gören elektrik motoru, frenleme enerjisinin bir kısmını elektrik enerjisine çevirir ve YGK'da depolar. Tahrik gücü yakıt pili sisteminin nominal gücünden daha az olduğunda YGK'ya yakıt pili sisteminden enerji akışı olabilir. Böylece uygun bir tasarım ve kontrol stratejisi ile YGK'nın araç dışından şarj edilmesine gerek kalmayabilir. Bu tasarımda güç tepkilerini daha da iyileştirmek, yakıt pili boyutunu ve tedarik ve maliyet konusunda kısıtlamaları hala devam eden hidrojen gereksinimini daha da düşürmek için araç dışından da şarj edilebilen tasarımlar da söz konusu olabilir.



Şekil 2.10. Tipik bir yakıt pilli hibrit aktarma organının konfigürasyonu [83]. 1: Gaz pedalı; 2: fren pedalı; 3: araç kontrolörü; 4: yakıt pili sistemi; 5: yardımcı güç kaynağı; 6: enerji yönetim sistemi; 7: motor kontrolörü; 8: çekiş elektrik motoru; 9: aktarma organı; 10: tekerlekler. (1): gaz komut sinyali; (2): fren komut sinyali; (3): yardımcı gücün enerji sinyali; (4): yakıt pili güç sinyali; (5): enerji yönetim sistemi kontrol sinyali; (6): motor kontrol sinyali; (7): hız

Araç kontrol stratejisi, yakıt pili sistemi, YGK ve aktarma organları arasındaki güç akışını kontrol eder. Kontrol stratejisi, elektrik motorunun güç çıkışının her zaman güç talebini karşılamasını, YGK'daki enerji seviyesinin her zaman optimum seviyede tutulmasını ve yakıt pili sisteminin optimum çalışma bölgesi içinde çalışmasını sağlamalıdır.

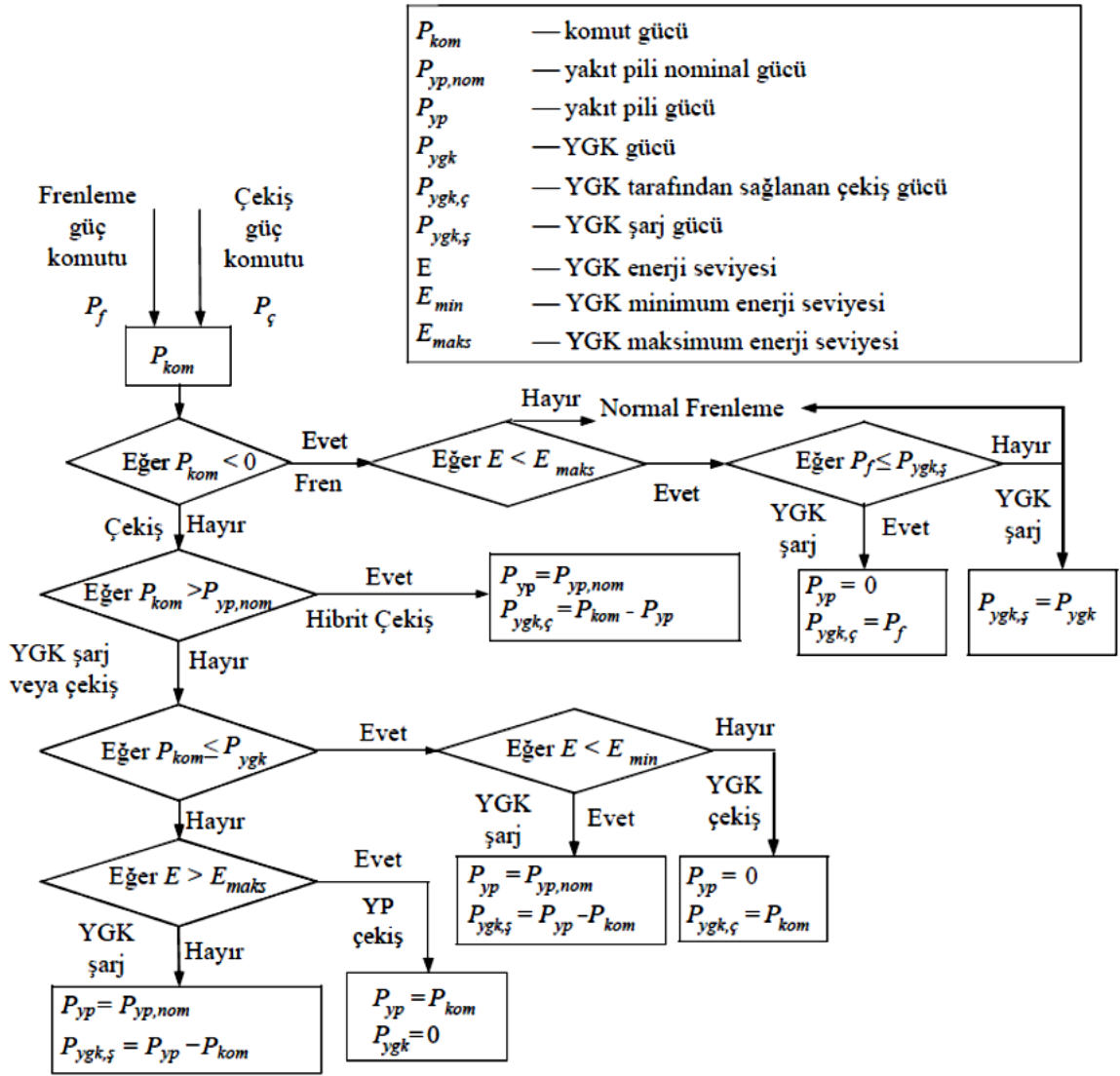
Sürücü, Şekil 2.11'de de görüldüğü üzere motorun üretmesi beklenen bir güç komutu olan P_{kom} ile temsil edilen gaz pedalı veya fren pedalı aracılığıyla bir çekiş komutu veya fren komutu verir. Bu nedenle, çekiş modunda, motor sürücüsüne elektrik gücü girişi ($P_{m,giriş}$) Denklem 2.18'deki gibi ifade edilebilir.

$$P_{m,giriş} = \frac{P_{kom}}{\eta_m} \quad (2.18)$$

Burada η_m , motor sürücüsünün verimliliğidir. Bununla birlikte, frenlemede motor tahriki bir jeneratör olarak işlev görür ve motordan gelen elektrik gücü çıkışı ($P_{m,çıkış}$) Denklem 2.19'da şu şekilde ifade edilir.

$$P_{m,çıkış} = P_{f,kom} \times \eta_m \quad (2.19)$$

$P_{f,kom}$ motora verilen fren komutudur ve fren pedalından gelen güç komutundan (P_{kom}) farklı olabilir çünkü tüm frenleme gücü rejeneratif frenleme ile geri kazanılamayabilir. Şekil 2.11'de bu komutların uygulanması durumunda uygulanacak kontrol stratejisinin akış şeması verilmiştir.



Şekil 2.11. Kontrol stratejisinin akış şeması

Motor gücü komutu, YGK'ndaki enerji seviyesi ve yakıt pili sisteminin minimum çalışma gücü gibi araç bilgilerine göre yakıt pili sistemi ve YGK gerekli gücü üretmek için kontrol edilir. Aktarma organının çeşitli çalışma modları ve ilgili güç kontrol stratejisi aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Durma modu: Ne yakıt pili sistemi ne de YGK aktarma organlarına güç sağlamaz. Yakıt pili sistemi rölantide çalışabilir.

Fren modu: Yakıt pili sistemi rölantide çalışır ve YGK şarj gücü nispetinde rejeneratif fren enerjisini depolar.

Çekiş modu: Komut verilen motor giriş gücü, yakıt hücresi sisteminin nominal gücünden büyükse, yakıt pili sisteminin nominal gücüyle çalıştığı hibrit çekiş modu kullanılır ve talep edilen gücün kalan kısmı YGK tarafından sağlanır. Yakıt pili sisteminin nominal gücü, yakıt pilinin

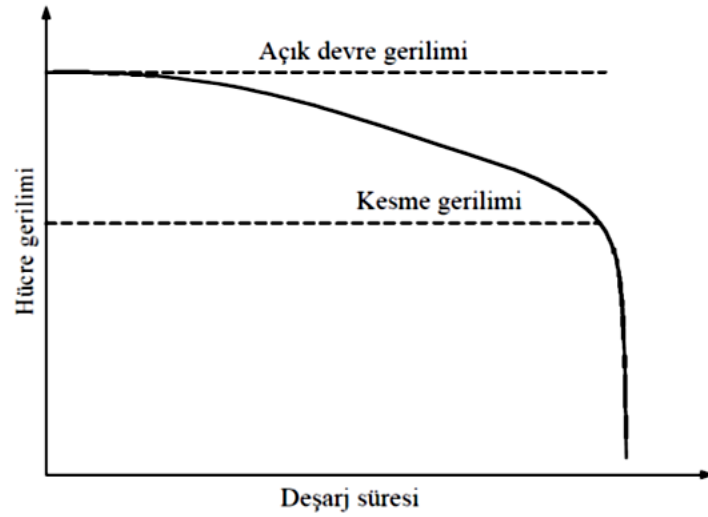
optimal çalışma bölgesinin en üst sınırı olarak ayarlanabilir.

Komut verilen motor giriş gücü, yakıt pili sisteminin optimum işletme bölgesindeki güç değerinden daha küçükse ve YGK'nın şarj edilmesi gerekiyorsa yakıt pili sistemi nominal güçte çalışır ve hem YGK'ı şarj ederken hem de tahrik sistemine gerekli gücü sağlar. Eğer YGK'nın şarj edilmesi gerekmiyorsa yakıt pili sistemi rölantide çalışır ve YGK tek başına aracı tahrik eder. Bu durumda, YGK'nın maksimum gücünün, komut verilen motor giriş gücünden daha büyük olması gerekir.

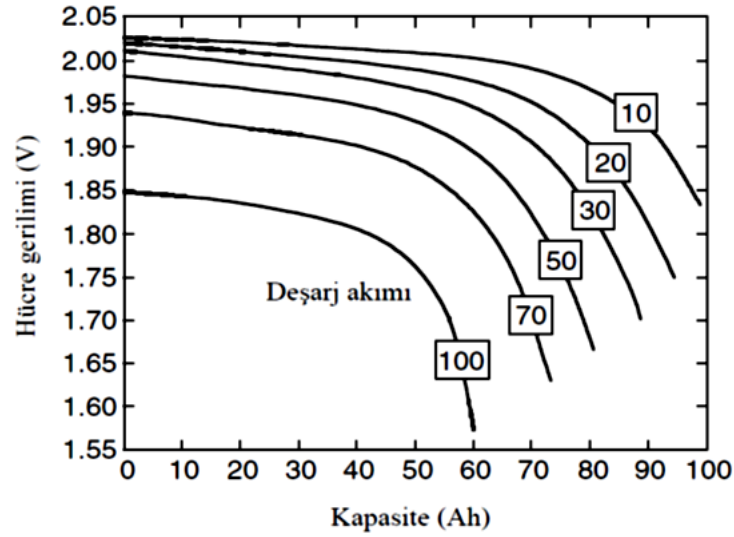
Yük gücü optimum işletme bölgesindeki güç aralığı içerisinde ve YGK'nın şarj edilmesi gerekmiyorsa, yakıt pili sistemi tek başına aracı çalıştırır. YGK'nın şarj edilmesi gerekiyorsa, yakıt hücresi sistemi nominal güçte çalışır ve hem YGK'yı şarj ederken hem de tahrik sistemine gerekli gücü sağlar.

2.2. Elektrokimyasal Piller

Elektrokimyasal piller yaygın olarak pil veya batarya olarak adlandırılırlar. Ülkemizde batarya kelimesi yerine günlük kullanımda daha çok akü kelimesi kullanılmaktadır. Şarj esnasında elektrik enerjisini potansiyel kimyasal enerjiye ve deşarj esnasında kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır. Bir pil, tüm elektrokimyasal özelliklere sahip bağımsız ve eksiksiz birkaç hücre biriminden oluşur. Temel olarak bir pil hücresi, bir elektrolit ve bu elektrolite daldırılmış pozitif ve negatif olmak üzere iki elektrottan oluşur. Bir pil tam şarjlı durumdan terminal voltajı kesme voltajına (Şekil 2.12) düşene kadar deşarj edilir ve bu esnada kazanılan amper-saat sayısı olarak tanımlanan kulometrik kapasitesi (Ah) üreticiler tarafından belirtilir. Aynı pilin farklı deşarj akımlarında kapasitesinin de değişeceğine dikkat edilmelidir. Genel olarak, Şekil 2.13'te gösterildiği gibi, büyük bir deşarj akımı oranı ile kapasite küçülecektir. Bu nedenle üreticiler genellikle pil kapasitesini belirtirken bunun hangi deşarj oranında olduğunu da belirtir. Örneğin 100 Ah C5 etiketli bir pil, 5 saatlik deşarj hızında 100 Ah kapasiteye sahiptir bu durumda deşarj akımı $100/5 = 20$ A olmaktadır.



Şekil 2.12. Tipik bir pilin kesme gerilimi



Şekil 2.13. Kurşun asit akünün farklı akımlarda deşarj karakteristikleri [83].

Bataryalardaki bir diğer önemli parametre ise şarj durumu yani batarya doluluk oranıdır (BDO). BDO genellikle kalan kapasitenin tam dolu kapasiteye oranı olarak tanımlanır. Bu tanıma göre tam şarjlı bir bataryanın BDO %100'dür ve tamamen boşalmış bir bataryanın BDO %0'dır. BDO'daki değişim, bir zaman aralığında dt ve deşarj veya şarj akımı i ile ifade edilebilir.

$$\Delta BDO = \frac{i dt}{Q(i)} \quad (2.20)$$

Denklem 2.20'de $Q(i)$, akünün i akımındaki kapasitesidir. Deşarj durumunda i pozitif ve şarj durumunda negatif alınır ve pilin BDO'su BDO_0 , BDO'nun başlangıç değeri olarak alınarak aşağıdaki ifade elde edilebilir.

$$BDO = BDO_0 - \oint \frac{i dt}{Q(i)} \quad (2.21)$$

EA'lar ve HEA'lar için, enerji kapasitesinin (EK) kulometrik kapasiteden daha önemlidir

çünkü deşarj koşulu doğrudan aracın çalışma şartlarıyla ilişkilidir. Pilden iletilen enerji şu şekilde ifade edilebilir:

$$EK = \int_0^t V(i, BDO)i(t)dt \quad (2.22)$$

$V(i, BDO)$, pil akımı ve BDO'nun bir fonksiyonu olarak terminal gerilimidir.

2.2.1. Termodinamik Gerilim

Bir pil hücresinin termodinamik gerilimi, açığa çıkan enerji ve reaksiyonda aktarılan elektronların sayısı ile yakından ilişkilidir. Pil hücresi reaksiyonu tarafından salınan enerji, Gibbs serbest enerjisindeki değişimle ifade edilir. Bir kimyasal tepkimede Gibbs serbest enerjisindeki değişim ($\Delta\bar{g}_f$) yakıt pili bölümünde Denklem 2.2'de aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\Delta\bar{g}_f = \bar{g}_{f,ürünler} - \bar{g}_{f,tepkeler} \quad (2.2)$$

Tersinir bir süreçte, Denklem 2.3'te verilen $\Delta\bar{g}_f$ tamamen elektrik enerjisine dönüştürülür.

$$\Delta\bar{g}_f = -nFV_r \quad (2.23)$$

Denklem 2.23'te n , reaksiyonda aktarılan elektron sayısıdır. F , mol başına coulomb cinsinden Faraday sabiti ve V_r , hücrenin tersinir gerilimidir. Normal şartlar altında (25°C sıcaklık ve 1 atm basınç) bir pil hücresinin açık devre tersinir gerilimi (V_r^0) ve $\Delta\bar{g}_f^0$, standart koşullarda Gibbs serbest enerjisindeki değişim olarak ele alınırsa, Denklem 2.24'teki gibi ifade edilebilir.

$$V_r^0 = -\frac{\Delta\bar{g}_f^0}{nF} \quad (2.24)$$

2.2.2. Spesifik Enerji, Güç ve Enerji Verimliliği

Spesifik enerji (Wh/kg), birim pil ağırlığı başına enerji kapasitesi olarak tanımlanır. Teorik spesifik enerji, hücre tepkeninin birim toplam kütlesi başına üretilebilecek maksimum enerjidir. Teorik spesifik enerjiyle ilgili olarak yalnızca etkin ağırlıklar (tepkelerin ve ürünlerin moleküler ağırlığı) söz konusudur.

$$E_{se,t} = -\frac{\Delta\bar{g}_f}{3600 \sum M_i} = \frac{nFV_r}{3600 \sum M_i} \text{ (Wh/kg)} \quad (2.25)$$

Denklem 2.25'te $\sum M_i$, reaksiyonunda yer alan türlerin moleküler ağırlığının toplamıdır. Örnek olarak kurşun asit batarya alınır, $V_r = 2,03 \text{ V}$, $n=2$ ve $\sum M_i = 0,642 \text{ kg}$ olacak ve spesifik enerji 170 Wh/kg olarak bulunur. Spesifik enerji azami düzeye çıkarmak için ideal çiftin, her ikisi de düşük atom ağırlığına sahip, oldukça elektronegatif ve oldukça elektropozitif elementlerden oluşturulabileceği açıktır. Negatif tepkenler için hidrojen, lityum veya sodyum ve daha hafif halojenler olarak oksijen veya kükürt pozitif tepkenler için en iyi seçim olacaktır. Bu tür çiftleri kullanabilmek için her iki elektrotla uyumlu yüksek iletkenliğe sahip elektrolitler ve malzemelerin etkin kullanımı için elektrot tasarımları gereklidir. Bu nedenle oksijen ve kükürtün bazen kendileri

yerine oksit ve sülfürlerinin kullanılması gerekebilir. Ortam sıcaklığında yüksek iletkenlikleri sulu elektrolitlere avantaj sağlar ama alkali grubu metaller su ile reaksiyona girdiğinden elektrot olarak seçilemez. Çinko, demir veya alüminyum gibi makul elektropozitifliğe sahip metalleri seçmek gerekir. Dünyada düşük miktarda bulunan, üretilmesi pahalı veya sağlık ve çevre açısından zararlı olan elementlerin kullanılmaması tercih edilmelidir.

EA ve HEA'lar için önerilen batarya sistemlerinin teorik spesifik enerjileri Tablo 2.3'te sunulmaktadır. Pratikte spesifik enerji değerleri teoriktekinin oldukça altındadır. Hücre voltajını düşürmeye ve reaktanların tam kullanımını önlemeye yarayan elektrot kinetiği ve diğer kısıtlamaların yanında pilin ağırlığını artıran ancak enerji üretmeye yaramayan yapı malzemelerine de ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 2.3. EA ve HEA'lar için aday pillerin teorik spesifik enerjileri [86].

Batarya		Hücre Reaksiyonu			
+	-	Şarj	←	→	Deşarj
Asidik sulu					
PbO ₂	Pb	PbO ₂ +2H ₂ SO ₄ +Pb		⇌2PbSO ₄ +2H ₂ O	170
Alkalın sulu					
NiOOH	Cd	2NiOOH+2H ₂ O+Cd		⇌ 2Ni(OH) ₂ +Cd(OH) ₂	217
NiOOH	Fe	2NiOOH+2H ₂ O+Fe		⇌ 2Ni(OH) ₂ +Fe(OH) ₂	267
NiOOH	Zn	2NiOOH+2H ₂ O+Zn		⇌ 2Ni(OH) ₂ +Zn(OH) ₂	341
NiOOH	H ₂	2NiOOH+H ₂		⇌ 2Ni(OH) ₂	387
MnO ₂	Zn	2MnO ₂ +H ₂ O+Zn		⇌2MnOOH+ZnO	317
O ₂	Al	4Al+6H ₂ O+3O ₂		⇌ 4Al(OH) ₃	2815
O ₂	Fe	2Fe+2H ₂ O+O ₂		⇌ 2Fe(OH) ₂	764
O ₂	Zn	2Zn+2H ₂ O+O ₂		⇌ 2Zn(OH) ₂	888
Akış					
Br ₂	Zn	Zn+Br ₂		⇌ ZnBr ₂	436
Cl ₂	Zn	Zn+Cl ₂		⇌ ZnCl ₂	833
(VO ₂) ₂ SO ₄	VSO ₄	(VO ₂) ₂ SO ₄ +2HVSO ₄ +2H ₂ SO ₄		⇌ 2VOSO ₄ +V ₂ (SO ₄) ₃ +2H ₂ O	114
Eriyik tuz					
S	Na	2Na+3S		⇌ Na ₂ S ₃	760
NiCl ₂	Na	2Na+NiCl ₂		⇌ 2NaCl	790
FeS ₂	LiAl	4LiAl+FeS ₂		⇌ 2Li ₂ S+4Al+Fe	650
Organik lityum					
LiCoO ₂	Li-C	Li _(y+x) C ₆ +Li _{(1-(y-x))} CoO ₂		⇌ Li _y C ₆ +Li _(1-y) CoO ₂	320 ^a

^a maksimum değer için x=0.5 ve y=0.

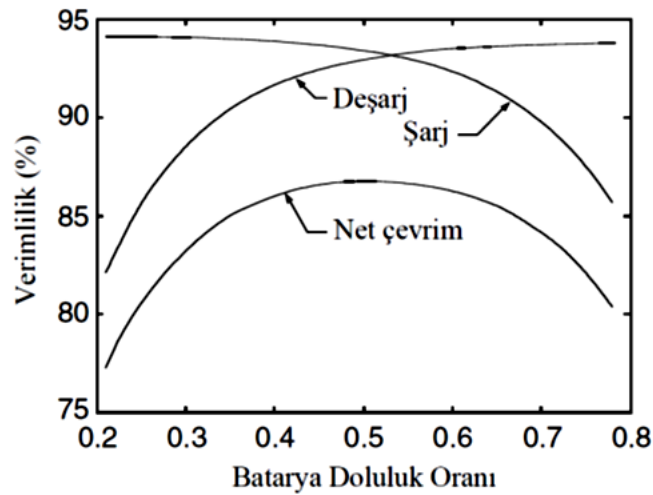
Spesifik güç bataryanın kısa bir sürede üretebileceği birim batarya ağırlığının sahip olduğu maksimum güce denir. Spesifik güç özellikle HEA'lar gibi yüksek güç gerektiren uygulamalarda pil ağırlığının azaltılmasında önemlidir. Bir kimyasal pilin spesifik gücü çoğunlukla pilin iç direncine bağlıdır.

Pilin deşarj ve şarj esnasında meydana gelen enerji veya güç kayıpları gerilim kaybı şeklinde ortaya çıkar. Bu nedenle, pilin deşarj ve şarj sırasındaki verimliliği, herhangi bir çalışma noktasında hücre çalışma geriliminin (V_o) termodinamik gerilime oranı olarak tanımlanabilir. Bu oranlar deşarj ve şarj için sırasıyla Denklem 2.26 ve 2.27'deki gibi bulunabilir.

$$\text{Deşarj esnasında} \quad \eta = \frac{V}{V_o} \quad (2.26)$$

$$\text{Şarj esnasında} \quad \eta = \frac{V_o}{V} \quad (2.27)$$

Akımın ve BDO'nun bir fonksiyonu olan terminal gerilimi, bir kimyasal reaksiyon tarafından üretilen elektrik potansiyelinden deşarjda daha düşük ve şarjda daha yüksektir. Şekil 2.14, deşarj ve şarj sırasında kurşun asit bataryanın verimliliğini gösterir. Batarya yüksek BDO ile yüksek deşarj verimliliğine ve düşük BDO ile yüksek şarj verimliliğine sahiptir. Net çevrim verimliliği BDO'nun orta aralığında bir maksimuma sahiptir. Bu nedenle bir HEA'nın batarya çalışma kontrol ünitesi, çalışma verimliliğini artırmak ve enerji kaybından kaynaklanan sıcaklık artışını azaltmak için BDO'sunu orta aralıkta kalacak şekilde kontrol etmelidir.



Şekil 2.14. Tipik bir bataryanın şarjı ve deşarj verimliliği

2.3. Batarya Teknolojileri

Geçerli EA ve HEA bataryaları, kurşun-asit bataryalar, nikel/demir, nikel/kadmiyum ve nikel-metal hidrit piller gibi nikel bazlı bataryalar ve lityum polimer ve lityum-iyon piller gibi lityum bazlı bataryalardan oluşur. Yakın geçmişte ve günümüzde birçok avantajı nedeniyle kurşun

asitli bataryalar genel araç sektöründe en fazla kullanım oranına sahip olsalar da orta ve uzun vadede, nikel ve lityum bazlı pillerin özellikle EA ve HEA'ların yaygınlaşmasıyla kullanım oranları oldukça artacaktır.

2.3.1. Kurşun Asit Bataryalar

1859 yılında icat edilen kurşun asit batarya (LAB), ticari kullanıma uygun ilk şarj edilebilir bataryadır. Günümüzde sulu tip kurşun asit bataryalar, otomobillerde, golf arabalarında, forkliftlerde ve kesintisiz güç kaynaklarında (UPS) yaygın olarak kullanılır. İlk kurşun asitler bataryalar sulu tip iken 1970'lerin ortalarında sızdırmaz ve bakım gerektirmeyen versiyonları ortaya çıktı. Sıvı elektrolit yerine nemlendirilmiş ayırıcılar kullanılıp sızdırmaz mahfazası doldurma ve boşaltma sırasında gazın tahliyesini kontrol etmek için emniyet valfleri ile donatılmıştır. Bu nedenle herhangi bir pozisyonda çalışabilme avantajına sahiptir.

2.3.1.1 Bakım Gerektirmeyen Kurşun Asit Bataryalar

İki tip mevcut olup birincisi jel akü olarak da bilinen sızdırmaz kurşun asit (SLA) batarya ve valf ayarlı kurşun asit (VRLA) bataryalardır. Aslında sistemler benzer olmakla beraber bilimsellikten ziyade ticari bir ayrım söz konusudur. Ayrıca mühendislik anlamında "sızdırmaz kurşun asit" terimi doğru bir ifade olamaz çünkü hiçbir kurşun asit batarya türü tamamen sızdırmaz hale getirilemez [87].

Sulu tip kurşun asitten farklı olarak, hem SLA hem de VRLA tipleri, bataryanın şarj esnasında gaz üretme seviyesine ulaşmasını engellemek için düşük aşırı gerilim potansiyeline göre tasarlanmıştır. Aşırı şarj, gaz oluşumuna ve suyun tükenmesine neden olur. Sonuç olarak SLA ve VRLA hiçbir zaman tam potansiyellerine kadar şarj edilemezler. Kurşun asit bataryalar hızlı şarj edilmeye elverişli değildirler ve tamamen doygun bir şarj 14 ila 16 saat kadar zaman alır. Batarya her zaman tam şarj durumunda saklanmalıdır çünkü düşük şarj durumunda pilin performansını azalmasına neden olan sülfatlaşmaya olayı meydana gelir. Negatif elektroda karbon eklenmesi bu dezavantajların bazılarını hafifletse de spesifik enerjiyi düşürür. Kurşun asit hafızaya tabi değildir, ancak uzun bir ömür elde etmek için doğru şarj gerilimleri önemlidir.

Kurşun asit bataryalar, Watt başına maliyet açısından ucuzdur ama tekrar eden derin döngüler için pek elverişli değildirler. Tam deşarj strese neden olur ve her deşarj/şarj döngüsünde batarya kapasitesinin küçük bir miktarı kaybolur. Batarya iyi durumdayken bu kayıp çok fazla değildir ama performans nominal kapasitesinin %80'inin altına düştüğünde kayıplar daha etkili hale gelir. Deşarj derinliğine ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak, derin döngü uygulamaları için kurşun asit bataryalar 200 ila 300 deşarj/şarj döngüsü sağlar. Diğer batarya türlerine nispeten kısa çevrim ömrünün sebepleri, pozitif elektrotta korozyon, aktif malzemenin tükenmesi ve pozitif plakaların

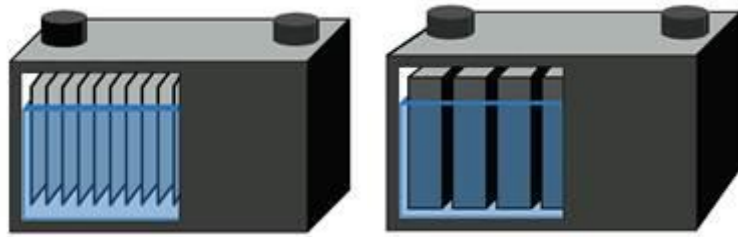
genişlemesidir. Yüksek çalışma sıcaklıklarında bu bozunmalar çok daha görülür ve kalıcıdır.

Kurşun asitli bataryalar, C nominal şarj değeri olmak üzere 5 saatlik (0,2C) ve 20 saatlik (0,05C) deşarj değerlerine sahiptir ve yavaş deşarj edildiklerinde en iyi performansı gösterir. Yine de bu bataryalar yalnızca birkaç saniye için birkaç C değerinde yüksek darbe akımları sağlayabilir. Bu nedenle marş-aydınlatma-ateşleme (SLI) olarak da bilinen bir marş aküsü olarak çok uygundurlar.

2.3.1.2 Marş ve Derin Döngü Bataryalar

Marş bataryası, anlık yüksek güç patlamasıyla bir motoru çalıştırmak, derin döngülü bataryalar ise tekerlekli sandalye veya golf arabası için sürekli güç sağlamak üzere tasarlanmıştır. Dışarıdan bakıldığında her iki batarya birbirine benzerlik gösterse de tasarım açısından farklılıklar gösterir. Marş bataryası yüksek tepe gücü taleplerine cevap verebilirken derin döngülü çalışmalar için uygun değildir, derin döngülü batarya ise orta düzeyde bir güç çıkışına sahipken derin döngülere uygundur. Marş bataryaları, amper olarak CCA derecesine sahiptir. CCA, bir bataryanın soğuk sıcaklıkta verebileceği akım miktarını temsil eden soğuk marş amperini ifade eder.

Marş akülerinin iç direncinin düşük tutulması gerekir ve bu maksimum yüzey alanı sağlamak için ekstra plakalar eklenir.(Şekil 2.15). Plakalar incedir ve kurşun ince köpük görünümünde süngerimsi bir formda uygulanır. Bu yöntem ile düşük direnç ve maksimum güç elde edilebilmesi için plakaların yüzey alanları genişletilir. Deşarj süresinin kısa ve akünün sürüş sırasında şarj olması nedeniyle plaka kalınlığı çok önemli değildir. Bu batarya türlerinde üzerinde durulan konu kapasiteden ziyade güçtür.



Şekil 2.15. Marş bataryası(solda), derin döngülü batarya (sağda)

Golf arabaları, scooterlar ve tekerlekli sandalye gibi hafif araçlar için derin döngülü kurşun asit aküler, maksimum kapasite ve yüksek döngü sayısı için tasarlanmıştır. Bunun için kurşun levhalar kalınlaştırılır. Tam deşarj bu tasarımda da strese neden olur ve döngü sayısı deşarj derinliğine (DeD) bağlıdır. Bir marş aküsü ve derin döngülü akü birbirlerinin yerine kullanılamazlar.

2.3.1.3 Emdirilmiş Cam Elyaf (AGM) Bataryalar

AGM, normal sulu tipten daha yüksek performansa sahip, geliştirilmiş bir kurşun asit bataryadır. Plakalar sıvı elektrolite daldırılmak yerine, elektrolit bir ince cam elyafı içine emdirilir. Böylece akü dökülmeye karşı dayanıklı hale getirilir ve tehlikeli malzeme kısıtlamaları olmadan sevkiyatına olanak sağlanır. Plakalar standart sulu tip kurşun asit aküler gibi düz yapıya dikdörtgen bir mahfazaya yerleştirilebilir veya geleneksel bir silindirik hücre içine sarılabilir.

AGM aküler çok düşük iç dirence ve yüksek akımlar üretme yeteneğine sahiptir ve birkaç derin döngülü çevrime maruz kalsa da nispeten uzun hizmet süreleri sağlar. AGM aküler daha düşük bir ağırlığa sahiptir ve sulu tip kurşun asit akülerden daha iyi elektriksel özellikler sağlar. Aynı zamanda yüksek ve düşük sıcaklık dayanımları daha iyi olup kendiliğinden deşarjı düşüktür. Normal kurşun asit bataryalara göre diğer avantajları daha iyi spesifik güç ve beş kata kadar olabilen daha hızlı şarj süreleridir.

AGM aküleri istenilen boyuta göre üretilebilir ve ısıtmalı koltuklar, direksiyonlar, aynalar ve ön camlar gibi özelliklere sahip güç tüketimi yüksek aksesuarları çok olan araçlarda genellikle tercih edilir. Soğuk havalarda iyi performans göstermesi nedeniyle denizcilik, karavan ve robotik uygulamalar için de kullanılır. AGM ve diğer jelleşmiş elektrolit aküler yüksek ısıya karşı hassas olduklarından motor bölmesinden uzağa monte edilmeli daha uygundur.

2.3.2. Nikel Bazlı Bataryalar

Bu bölümde nikel bazlı piller hakkında genel bilgiler verilip özellikle en geniş kullanım alanına sahip nikel-kadmiyum (NiCd) ve nikel-metal-hidrür (NiMH) türleri incelenecektir.

2.3.2.1 Nikel-Kadmiyum Bataryalar

Uzun yıllar boyunca NiCd bataryalar, telsizler, acil tıbbi ekipman, profesyonel video kameralar ve elektrikli aletler için tercih edilen pil seçimi oldu. Standart NiCd en sağlam bataryalardan biri olup uzun ömürlü olması için uygun şartlarda çalıştırılması gerekmektedir.

NiCd teknolojisi, yüksek spesifik güç (220 W/kg'ın üzerinde), uzun çevrim ömrü (2000 çevrime kadar), yüksek elektrik ve mekanik dayanım toleransı, geniş bir deşarj akım aralığı, hızlı şarj kapasitesi (18 dakikada yaklaşık %40 ila 80), geniş çalışma sıcaklığı (-40 ila 85 °C), düşük kendi kendine deşarj oranı (günde <%0,5), mükemmel uzun süreli depolama, ihmal edilebilir korozyon ve çeşitli boyutlarda tasarlanabilmeleri nedeniyle büyük bir teknik gelişme göstermiştir. Bununla birlikte, NiCd bataryaların, yüksek maliyet, düşük hücre voltajı (1,3 V), kadmiyumun kanserojen özelliği ve olumsuz çevresel etkileri gibi bazı dezavantajları da söz konusudur.

NiCd bataryalar genel olarak havalandırılmalı ve sızdırmaz olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Havalandırılmalı sinterlenmiş plaka, yüksek özgül enerjiye sahip ancak daha pahalı olan

yeni bir teknolojidir. Düz bir deşarj gerilim profili, yüksek akım hızı ve düşük sıcaklık performansı ile karakterize edilebilir. Sızdırmaz bir NiCd batarya aşırı şarj sırasında gaz çıkışının neden olduğu hücrede basınç birikmesini önlemek için özel bir hücre tasarımına sahiptir ve sonuç olarak bakım gerektirmez.

2.3.2.2 Nikel-Metal-Hidrür Bataryalar

NiCd'a benzer özellikler gösteren nikel-metal-hidrür (NiMH) bataryaların temel farkı kadmiyum yerine aktif negatif elektrot malzemesi olarak bir metal hidrür içinde absorbe edilen hidrojenin kullanılmasıdır. Bugün bu bataryalar, standart bir NiCd'dan %40 daha yüksek spesifik enerji sağlar ve en büyük avantajı toksik metaller içermemesidir bu nedenle de NiMH türü NiCd'un yerini almaktadır. Deşarj esnasında, negatif elektrottaki metal hidrür, metal alaşım oluşturmak üzere oksitlenir böylece pozitif elektrottaki nikel oksihidroksit, nikel hidroksite indirgenir. Şarj sırasında ise ters reaksiyon meydana gelir.

Şu anda, NiMH batarya teknolojisi 1,2 V nominal gerilime sahiptir ve 65 Wh/kg spesifik enerjiye ve 200 W/kg spesifik güce ulaşmaktadır. Çok sayıda döngü boyunca kararlı bir şekilde hidrojen depolayabilen metal alaşımlar NiMH bataryanın önemli bir bileşenidir. Bu metal alaşımların iki ana tipi vardır ve bunlar AB₅ (LaCePrNdNiCoMnAl) olarak bilinen lantan-nikel bazlı nadir toprak alaşımları ve AB₂ (VTiZrNiCrCoMnAlSn) olarak bilinen titanyum ve zirkonyumdan oluşan alaşımlardır. AB₂ alaşımları, AB₅ alaşımlarından daha yüksek kapasiteye sahiptir ama daha iyi şarj ve kararlılık özellikleri nedeniyle eğilim AB₅ alaşımlarını kullanmaktan yanadır.

Nikel bazlı piller arasında en yüksek özgül enerjiye (70 ila 95 Wh/kg) ve en yüksek özgül güce (200 ila 300 W/kg) sahiptir, çevre dostudur (kadmiyum içermez), düz deşarj profiline (daha düşük gerilim düşümüne) ve hızlı şarj yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte diğer nikel bazlı türlere göre yüksek maliyeti, hafıza etkisinin olabilmesi ve ekzotermik şarj gibi dezavantajlara sahiptir. Lityum iyon (Li-ion) bataryaların popülerliği NiMH'ye olan talebi biraz azaltmış olsa da HEA üreticilerini bu avantajları kanıtlanmış teknolojiden uzaklaştıracak noktaya ulaşmamıştır. Araçlardaki elektrikli güç aktarma organları için tasarlanan bataryaların bazı en zorlu meydan okumaları karşılamalıdır ve NiMH bataryaların burada Li-ion'a göre fiyat ve güvenlik gibi iki büyük avantajı vardır. Güvenlik konusundaki esnekliği nedeniyle NiMH'nin eşdeğer bir Li-Ion sistemin üçte birine mal edilebilmesi söz konusudur.

2.3.3. Lityum Bazlı Bataryalar

Lityum, en hafif metal olup elektrokimyasal potansiyeli çok yüksektir. Bu nedenle çok yüksek bir spesifik enerji ve güce sahiptir ve yüksek bir termodinamik gerilim sağlayabilir. Lityum

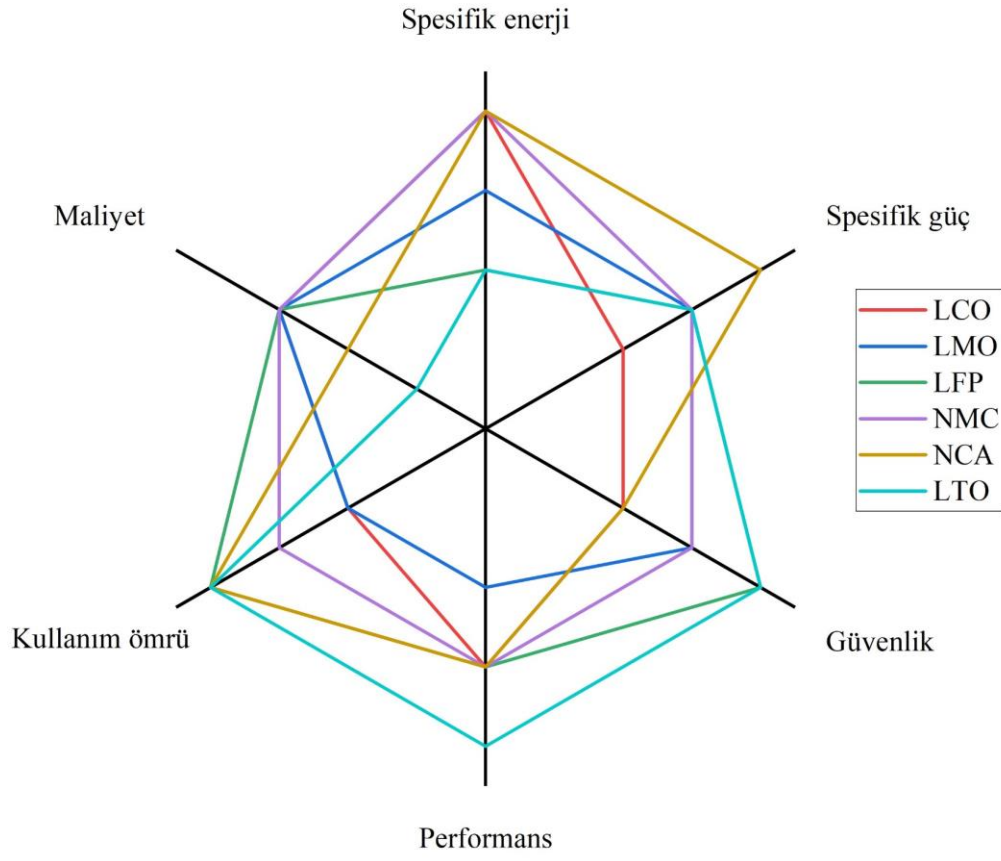
bazlı bataryalarda kullanılan lityum-polimer (Li-Po) ve lityum-iyon olmak üzere iki ana teknoloji vardır. Li-ion'un özgül enerjisi NiCd'un iki katıdır ve nikel sistemlerindeki 1,20 V gerilime kıyasla 3,60 V yüksek nominal hücre gerilimi bu avantajın temel nedenidir. Elektrottaki aktif malzemelerin iyileştirilmesi ile spesifik enerjide daha fazla artış potansiyeline sahiptir. Yük özellikleri iyidir ve düz deşarj eğrisi, depolanan enerjinin istenen 3,70 ila 2,80 V/hücre gerilim spektrumunda etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar. Nikel bazlı piller ise 1,25 ila 1,0 V/hücre arasında değişen düz bir deşarj eğrisine sahiptir.

1994 yılında, 1,1 Ah kapasiteli 18650 silindirik hücre formunda Li-Ion üretmenin maliyeti 10 dolardan fazlaydı. 2001 yılında fiyatı 2 dolara düşmüş ve kapasitesi 1,9 Ah'a yükselmiştir. Günümüzde yüksek enerji yoğunluğuna sahip 18650 hücreler 3,0 Ah'dan fazla güç sağlarken maliyetleri de daha da düşmektedir [87]. Maliyetinin düşmesi, spesifik enerjideki artış ve toksik maddeler içermemesi, Li-ion'u taşınabilir uygulamalar için evrensel olarak kabul edilen bir batarya teknolojisi haline getirmiştir. Bu durum ilk olarak tüketici endüstrisinde şimdi de taşıtlar için elektrikli güç aktarma organları da dâhil olmak üzere ağır sanayide giderek daha fazla yaygınlaşmaktadır.

Li-ion diğer tüm kimyasal çeşitlerinin iddia edemeyeceği kadar az bakım gerektiren bir bataryadır. Hafıza sorunu yoktur ve kapasitesini korumak için tam deşarja ihtiyaç duymaz. Kendi kendine deşarj, nikel bazlı sistemlerden daha azdır. 3,60 V'luk nominal hücre gerilimi, cep telefonları ve dijital mobil aletlere doğrudan güç sağlayabilir ve bunu çok hücreli tasarımlara göre daha basit ve az maliyetle sunar. Dezavantajları ise yüksek fiyatın yanı sıra uygulamada koruma devrelerine ihtiyaç duyulmasıdır.

2.3.3.1 Lityum İyon Bataryalar

Kurşun ve nikel bazlı mimarilere benzer şekilde Li-ion batarya türlerinde, iletken olarak bir katot (pozitif elektrot), bir anot (negatif elektrot) ve elektrolit kullanır. Katot bir metal oksittir ve anot gözenekli karbondan oluşur. Deşarj sırasında iyonlar, elektrolit ve ayırıcı aracılığıyla anottan katoda akar, şarj esnasında ise yük yönü tersine çevrilir ve iyonlar katottan anoda doğru akar. Li-ion pillerin birçok çeşidi vardır ve ilk bakışta çok benzer gibi gözükseler de performans açısından ciddi farklılıklar gösterir ve buna katot malzemelerinin seçimi neden olur. Yaygın katot malzemeleri arasında lityum kobalt oksit, lityum mangan oksit, lityum demir fosfat ve ayrıca lityum nikel mangan kobalt, lityum nikel kobalt alüminyum oksit ve lityum titanyum bulunur. Şekil 2.16'da tüm bu türlere ait genel bir karşılaştırma grafiği verilmiştir. Yine Tablo 2.4'te yaygın olarak kullanılan bu türlerin karakteristik özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.16. Li-ion bataryaların çeşitli alanlarda karşılaştırılması

Tablo 2.4. Yaygın olarak kullanılan Li-ion bataryaların karakteristik özellikleri [88,89].

Tür	Katot	Anot	Kısaltma	Nominal ve işletme gerilimi (V)	Spesifik enerji (Wh/kg)	Şarj oranı (C) ve gerilimi (V)	Deşarj oranı (C) ve kesme gerilimi (V)	Şarj deşarj sayısı**	Uygulamalar	Yorumlar
Lityum Kobalt Oksit	LiCoO ₂	Grafit	LCO	3,6 3,0-4,2	150-200	0,7-1* 4,2	1 2,5	500- 1000	Cep telefonları, tabletler, dizüstü bilgisayarlar, kameralar.	Çok yüksek spesifik enerji, sınırlı spesifik güç. Kobalt pahalıdır. Enerji Hücresi olarak görev yapar.
Lityum Manganez Oksit	LiMn ₂ O ₄	Grafit	LMO	3,7-3,8 3,0-4,2	100-150	0,7-1 Maks 3 4,2	1-10 30 (5 s) 2,5	300- 700	Elektrikli el aletleri, tıbbi cihazlar, elektrikli güç aktarma organları.	Çok yüksek spesifik güç, sınırlı spesifik enerji. LCO'dan daha güvenli. Performansı artırmak için genellikle NMC ile karıştırılır.
Lityum Demir Fosfat	LiFePO ₄		LFP	3,2-3,3 2,5-3,65	90-120	1 3,65	1-25 40 (2 s) 2,5	>2000	Yüksek yük akımları ve dayanıklılık gerektiren taşınabilir ve sabit uyg.	Çok düz gerilim deşarj eğrisi, düşük kapasite ve güvenli. Özel pazarlar için kullanılır. 580 \$/kWh.
Lityum Nikel Manganez Kobalt	LiNiMnCoO ₂	Grafit	NMC*	3,6-3,7 3,0-4,2	150-220	0,7-1* 4,2-4,3	1-2 2,5	1000- 2000	E-bisikletler, tıbbi cihazlar, EA'lar, endüstriyel uyg.	Yüksek spesifik enerji ve güç sağlar. En yaygın ve öncü tür. 420 \$/kWh.
Lityum Nikel Kobalt Alüminyum	LiNiCoAlO ₂	Grafit	NCA	3,6 3,0-4,2	200-260	0,7 4,2	1 3,0	500	Tıbbi cihazlar, endüstriyel, EA'lar (Tesla)	LCO ile benzer. Panasonic ve Tesla tarafından kullanılır. Büyüme potansiyeli vardır. 350 \$/kWh.
Lityum Titanyum	LiMn ₂ O ₄ - LiNiMnCoO ₂	Li ₂ Ti O ₃	LTO	2,4 1,8-2,85	50-80	1-5 2,85	1-10 30 (5 s) 1,8	3,000- 7,000	UPS, EA'lar (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV), güneş enerjili sokak aydınlatması	Uzun ömür, hızlı şarj, geniş sıcaklık aralığı, düşük spesifik enerji, güvenli ve pahalı. Hızlı şarj etme yeteneği. Özel uygulama için kullanılır. 1005 \$/kWh.

* 1C'nin üzerindeki şarj akımı pil ömrünü kısaltır.

** Deşarj derinliği ve sıcaklık gibi uygulama ve çevre şartları çevrim ömrünü belirler ve bu değerler her zaman sağlanamayabilir.

*** NMC, NCM, CMN, CNM, MNC ve MCN temelde aynıdır. Stokiyometri genellikle Li[Ni(1/3)Co(1/3)Mn(1/3)]O₂'dir. Ni, Mn ve Co'nun sırası çok önemli değildir.

2.3.3.2 Lityum-Polimer Bataryalar

Li-Po, kullanılan elektrolit tipine göre diğer batarya sistemlerinden farklıdır ve plastik benzeri bir filme benzeyen katı (kuru) bir polimer elektrolit kullanır. Bu yalıtkan, iyonların (elektrik yüklü atomlar) değişimini sağlar ve elektrolitle ısıtılmış geleneksel gözenekli ayırıcının yerini alır. Katı bir polimerin oda sıcaklığında iletkenliği zayıftır ve akım akışını sağlamak için pil 50–60°C'ye (122–140°F) ısıtılmalıdır. Bataryayı oda sıcaklığında iletken hale getirmek için jel elektrolit eklenir. Günümüzde tüm lityum bazlı hücreler, nem içeren mikro gözenekli bir ayırıcı içermektedir bu nedenle kullanılabilir doğru terim "Lityum-iyon polimer" (Li-ion polimer veya kısaca Li-Po) olacaktır. Li-Po, LCO, NMC, LFP ve LMO gibi birçok teknoloji üzerine inşa edilebilir. Kullanıcı açısından, lityum polimer esasen lityum iyon pil ile aynıdır. Her iki sistem de aynı katot ve anot malzemesini kullanır ve benzer miktarda elektrolit içerir. Fakat iki sistemin özellikleri ve performansı benzer olsa da, Li-Po, geleneksel gözenekli ayırıcının yerini alan bir mikro gözenekli elektrolit olması bakımından benzersizdir. Jelleşmiş elektrolit, elektriksel iletkenliği artıran katalizör görevi görür. Li-Po biraz daha yüksek spesifik enerji sunar ve geleneksel Li-ion'dan daha ince tasarlanabilir ancak üretim maliyeti %10 ila %30 kadar daha fazladır. Maliyet dezavantajına rağmen Li-Po pazar payı büyümektedir.

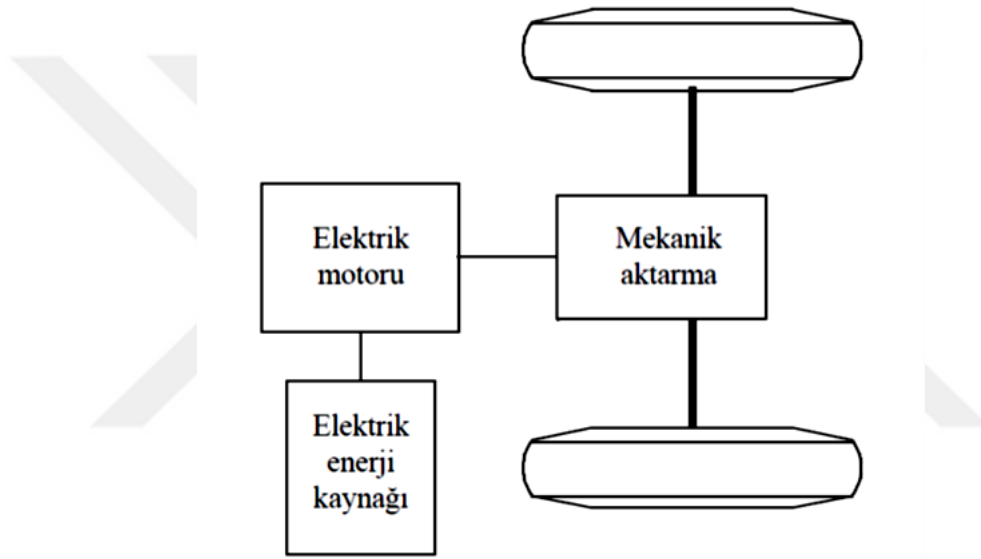
Li-Po hücreler ayrıca gıda paketinde benzer esnek folyo tipi bir kasa (polimer laminat veya poşet hücre) içinde gelir. Standart bir Li-ion, elektrotları birbirine bastırmak için sert bir kasaya ihtiyaç duyarken, Li-Po, sıkıştırma gerektirmeyen lamine levhalar kullanır böylece ağırlık %20'den fazla azaltılır. Ayrıca, ince film teknolojisi, cep telefonları ve dizüstü bilgisayarları daha küçük, daha ince ve daha hafif hale getirmek için format tasarımını özgürleştirir. Li-Po şarj ve deşarj özellikleri diğer Li-ion bataryalarla aynıdır ve özel bir şarj cihazı gerektirmez. Koruma devrelerine ihtiyaç duyulması bakımından güvenlik sorunları da benzerdir. Şarj sırasında gaz birikmesi, folyo paketindeki bir miktar Li-Po şişmesine neden olabilir ve genişleme payı bırakılmalıdır. Folyo paketindeki Li-Po silindirik paketteki Li-ion'dan daha dayanıksız olabilir ama silindirik bir tasarıma da dönüştürülebilir.

2.4. Elektrikli Araçlar

Elektrikli araçlar çekiş için bir elektrik motoru ve bu motoru sürebilmek için enerji kaynağı olarak kimyasal piller, yakıt pilleri, ultra/süper kapasitörler ve/veya volanlar kullanılır. Elektrikli araçların geleneksel İYMA'lara göre sürüş emisyonunun olmaması, yüksek verimlilik, fosil yakıtlardan bağımsız olması, sessiz ve sorunsuz çalışması gibi birçok avantajları vardır. EA'lar ve İYMA'lardaki işletme ve temel ilkeler benzerdir. Ancak arasında benzin deposu ve akü kullanımı, İYM ve elektrik motoru kullanımı ve şanzıman gereksinimleri gibi bazı farklılıklar vardır.

2.4.1. Elektrikli Araç Konfigürasyonları

Elektrikli araçların, Şekil 2.17'de gösterildiği gibi, içten yanmalı motor ve yakıt deposunun bir elektrik motoru ve batarya takımıyla değiştirilip diğer tüm bileşenlerin korunmasını esas olarak mevcut İYMA'dan dönüştürülmesi yakın zamana kadar sıklıkla başvurulmuş bir yöntem olmuştur. Hatta ülkemizde Derindere Motorlu Araçlar firması tarafından belirli marka ve modeldeki İYM araçlar bu temel dönüşümle elektrikli araca dönüştürülmektedir [90]. Ağırlık, düşük tasarım esnekliği ve performans kayıpları gibi dezavantajlar bu tür elektrikli araçların kullanımının pek tercih edilmemesine neden olmuştur.

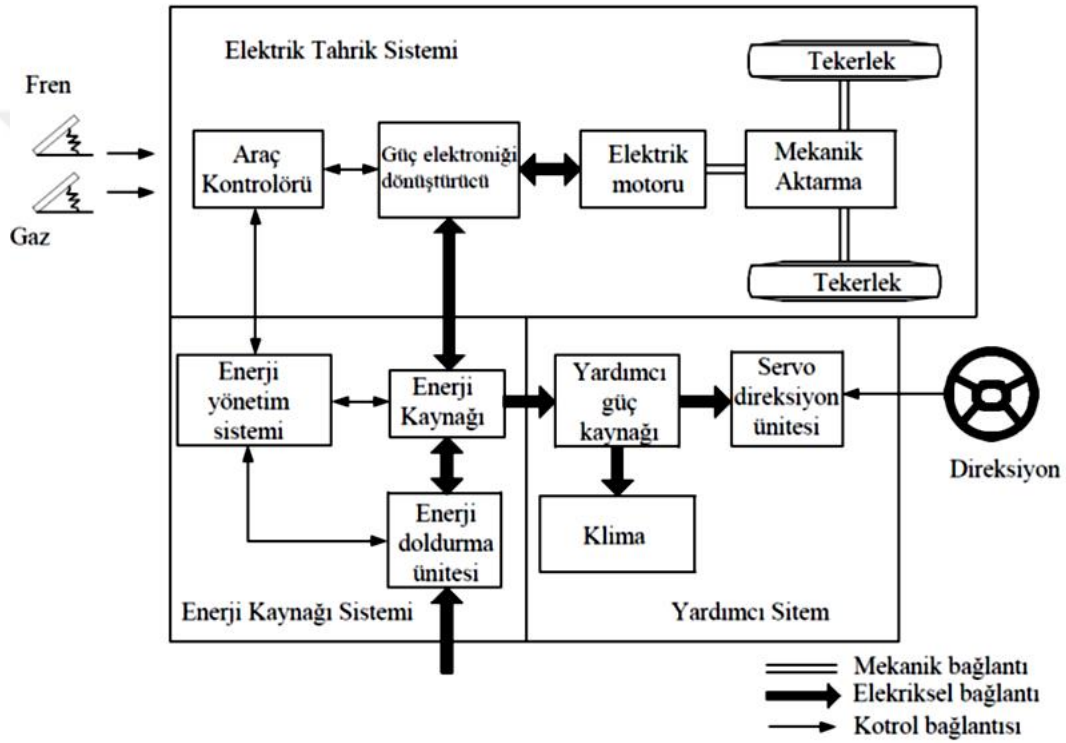


Şekil 2.17. Birincil elektrikli araç güç aktarma organı

Modern EA, orijinal gövde ve çerçeve tasarımlarına dayalı olarak inşa edilmiştir. Bu nedenle EA'lara özgü yapı gereksinimlerini karşılar ve elektrikli tahrikin daha fazla avantajını sunabilir. Modern bir elektrikli aktarma organları kavramsal olarak Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Aktarma organları üç ana alt sistemden oluşur: elektrik motoru tahriki, enerji kaynağı ve yardımcı sistemler. Elektrikli tahrik sistemi, araç kontrolörü, güç elektroniği dönüştürücüsü, elektrik motoru, mekanik şanzıman ve tahrik tekerleklerinden oluşur. Enerji kaynağı sistemi, enerji kaynağını, enerji yönetim sistemini ve enerji yakıt ikmal birimini içerir. Yardımcı sistemler, hidrolik direksiyon ünitesi, klima kontrol ünitesi ve yardımcı besleme gibi ünitelerden oluşur.

Gaz ve fren pedallarından gelen kontrol girdilerine dayanarak araç kontrolörü, elektrik motoru ile enerji kaynağı arasındaki güç akışını düzenleme işlevi gören güç elektroniği dönüştürücüsüne uygun kontrol sinyallerini yollar. Geriye doğru güç akışı, EA'nın rejeneratif

frenlemesinden kaynaklanır ve kazanılan enerji, enerji kaynağının kapasitesi dâhilinde alabileceği şartları sağlamak koşuluyla, enerji kaynağına geri depolanabilir. Çoğu EA bataryasının yanı sıra ultra/süper kapasitörler ve volanlar, bu enerjiyi kolayca kabul depolama yeteneğine sahiptir. Enerji yönetim sistemi, rejeneratif frenlemeyi ve bunun enerji geri kazanımını kontrol etmek için araç kontrolörü ile işbirliği yapar. Ayrıca yakıt ikmal ünitesini kontrol etmek ve enerji kaynağının kullanılabilirliğini izlemek için enerji dolurma ünitesi ile birlikte çalışır. Yardımcı güç kaynağı, klima ve havalandırma kontrolü ve servo direksiyon üniteleri olmak üzere tüm EA yardımcı sistemleri için farklı gerilim seviyelerinde gerekli gücü sağlar.

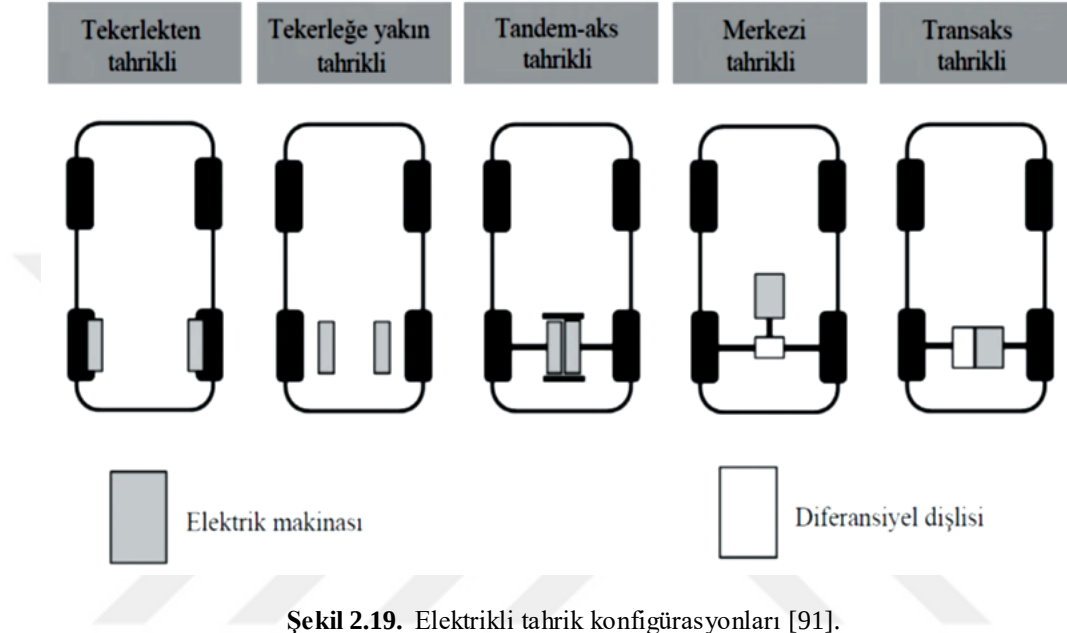


Şekil 2.18. Genel EA yapılandırmasının kavramsal temel çizimi [83].

Şekil 2.19'de gösterildiği gibi, elektrikli tahrik özelliklerindeki ve enerji kaynaklarındaki farklılıklar nedeniyle çeşitli Elektrikli tahrik konfigürasyonları vardır. Şekil 2.17'da bir elektrikli tahrikin geleneksel bir İYM'nin yerini aldığı birinci alternatifin konfigürasyonunu göstermektedir. Elektrik motoru, debriyaj, dişli kutusu ve diferansiyelden oluşur. Debriyaj ve şanzıman otomatik şanzıman ile değiştirilebilir. Debriyaj elektrik motorunun gücünü tahrik edilen tekerleklerle bağlamak veya kesmek için kullanılır. Hız-güç (tork) profilini yük gereksinimine uyacak şekilde değiştirmek için dişli kutusu bir dizi dişli oranı sağlar. Diferansiyel her iki taraftaki tekerleklerin farklı hızlarda sürülmesini sağlayan mekanik bir cihazdır.

Uzun bir hız aralığında sabit güce sahip bir elektrik motoruyla sabit bir dişli, farklı hızlı dişli kutusunun yerini alabilir ve debriyaj ihtiyacını azaltabilir. Bu merkezi tahrikli konfigürasyon

sadece mekanik şanzımanın boyutunu ve ağırlığını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda vites değiştirmeye gerek olmadığı için aktarma organları kontrolünü de basitleştirir. Merkezi tahriklideki aktarma organlarına benzer şekilde, tandem-aks ve transaks tahrikli konfigürasyonda elektrik motoru, sabit dişli tertibatı ve diferansiyel, her iki aks her iki tahrik tekerleğine doğrudan bağlı tek bir tertibata entegre edilebilir. Tüm aktarma organları daha da basitleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır.



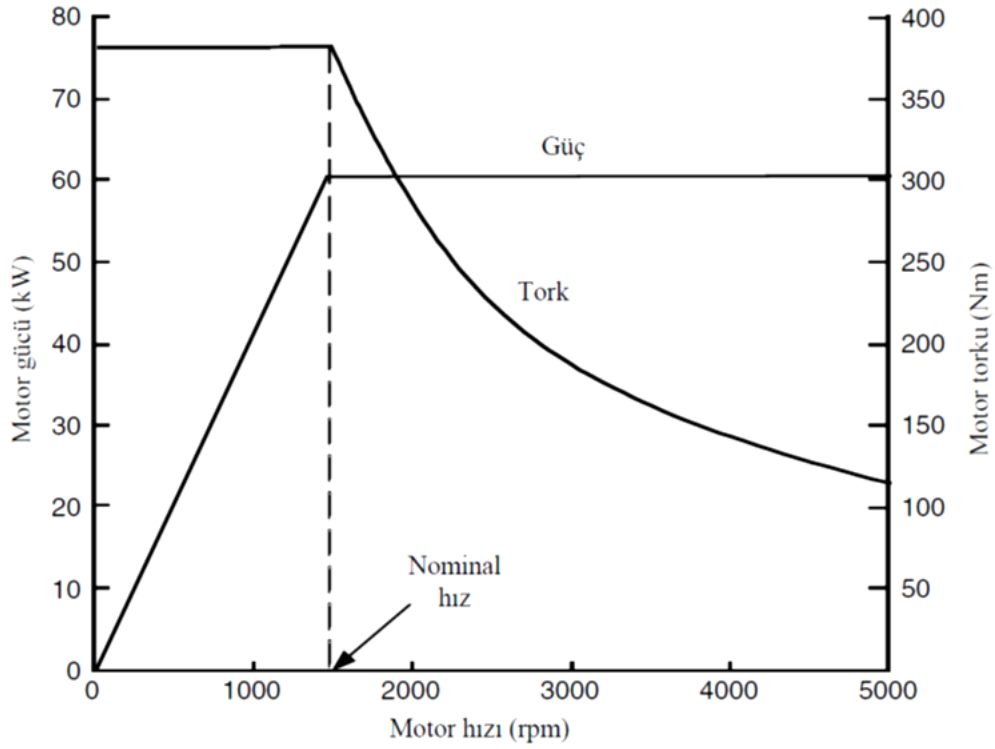
Tekerleğe yakın tahrikli konfigürasyonda mekanik diferansiyel ihtiyacı iki çekiş motoru kullanılarak ortadan kaldırılır. Her biri bir tekerleği tahrik eder ve gerekli durumlarda farklı hızlarda çalışmalarını sağlarlar. Tekerlekten tahrikli konfigürasyonda ise aktarma organını daha da basitleştirmek için çekiş motoru doğrudan tekerleğin içine yerleştirilebilir. Motor hızını azaltmak ve motor torkunu artırmak için ince bir planet dişli takımı kullanılabilir. İnce planet dişli seti, giriş ve çıkış milinin sıralı düzeninin yanı sıra yüksek hızlı bir küçültme oranı avantajı sunar. Elektrik motoru ve tahrik tekerleği arasındaki herhangi bir mekanik dişli tertibatı tamamen terk edilerek, tekerlek içi düşük hızlı bir elektrik motorunun dış rotoru doğrudan tekerleğine bağlanabilir. Elektrik motorunun hız kontrolü ile aynı zamanda tekerlek hızı ve dolayısıyla araç hızı da kontrol edilmiş olur. Ancak bu konfigürasyonda elektrik motorunun aracı çalıştırmak ve hızlandırmak için daha yüksek bir torka sahip olması gereklidir.

2.4.2. Elektrikli Araçların Performansı

Aracın sürüş performansı genellikle hızlanma süresi, maksimum hızı ve tırmanma kabiliyeti ile değerlendirilir. EA aktarma organları tasarımında, uygun motor gücü derecelendirmesi ve şanzıman parametreleri, performans özelliklerini karşılamaya yönelik başlıca hususlardır. Tüm bu

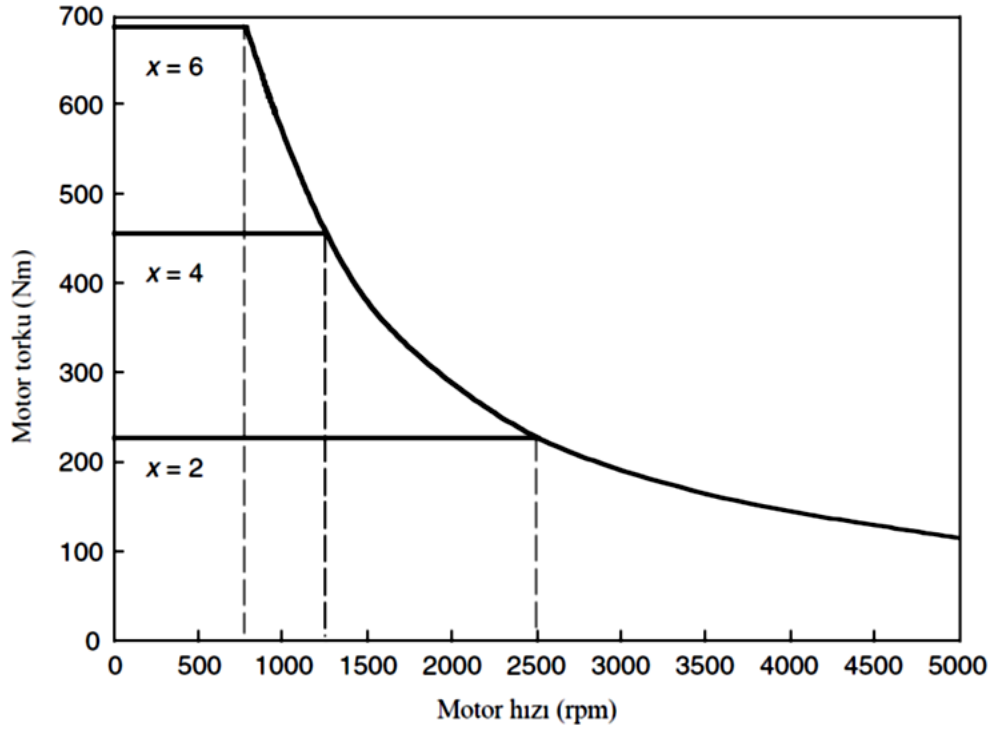
parametrelerin tasarımı çoğunlukla cer motorunun hız-güç (tork) özelliklerine bağlıdır.

Değişken hızlı elektrik motorlar genellikle Şekil 2.20'de gösterilen özelliklere sahiptir. Düşük hız bölgesinde (nominal hızdan daha az), motorun sabit bir torku vardır. Yüksek hız bölgesinde (nominal hızdan daha yüksek), motor sabit bir güce sahiptir. Bu karakteristik genellikle, maksimum hızının taban hızına oranı olarak tanımlanan bir hız oranı x ile temsil edilir. Düşük hızlı işlemlerde, akı sabit tutulurken elektronik dönüştürücüden geçen hızın artmasıyla motora verilen gerilim artar. Nominal hız noktasında motor gerilimi nominal gerilime ulaşır. Nominal hızdan sonra motor gerilimi sabit tutulur ve akı, artan hız ile hiperbolik olarak düşürülür. Dolayısıyla tork da artan hız ile hiperbolik olarak düşer.



Şekil 2.20. Tipik değişken hızlı elektrik motoru özellikleri

Şekil 2.21, farklı hız oranları x ($x=2, 4$ ve 6) olan 60 kW'lık bir motorun tork-hız karakteristiğini göstermektedir. Uzun bir sabit güç bölgesi ile motorun maksimum torkunun önemli ölçüde artırılabilceği ve dolayısıyla araç hızlanma ve tırmanma performansının iyileştirilebileceği ve şanzımanın basitleştirilebileceği açıktır. Bununla birlikte, her motor tipi, doğası gereği, sınırlı maksimum hız oranına sahiptir. Örneğin, kalıcı mıknatıslı bir motor, mıknatıs zıt EMK dolayısı ile alan zayıflaması sorunundan dolayı küçük bir x 'e (<2) sahiptir. Anahtarlamalı relüktans motorlarda bu etki olmadığından $x>6$ ve asenkron motorlarda ise yaklaşık $x=4$ 'e ulaşabilir [92].



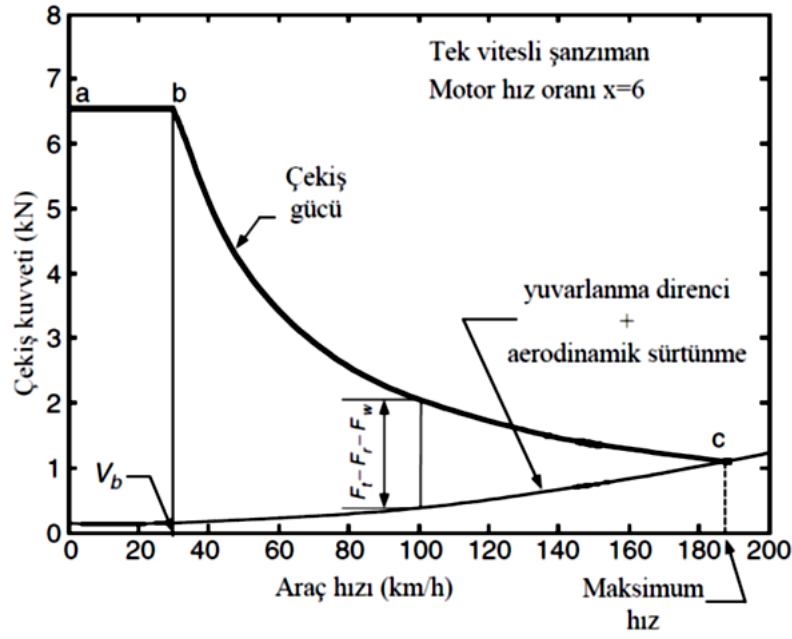
Şekil 2.21. 60 kW elektrik motorunun $x = 2, 4$ ve 6 değerleri için hız-tork karakteristiği

Bir çekiş motorunun tahrik edilen tekerlekler üzerinde geliştirdiği çekiş kuvveti (F_t) ve araç hızı (v) Denklem 2.28 ve 2.29'da şu şekilde ifade edilmiştir.

$$F_t = \frac{T_m i_g i_0 \eta_t}{r_d} \quad (2.28)$$

$$v = \frac{\pi N_m r_d}{30 i_g i_0} \quad (2.29)$$

T_m ve N_m sırasıyla motor tork çıkışı ve d/d cinsinden hızdır, i_g şanzımanın dişli oranıdır, i_0 nihai tahrikin dişli oranıdır, η_t motordan tekerlekler kadar tüm aktarma organlarının verimliliğidir ve r_d , tahrik edilen tekerleklerinin yarıçapıdır. Çok dişli veya tek dişli şanzıman kullanımı, çoğunlukla motor hız-moment karakteristiklerine bağlıdır. Yani, belirli bir motor gücünde, motorun uzun bir sabit güç bölgesi varsa, düşük hızlarda yüksek çekiş gücü için tek vitesli bir şanzıman yeterli olacaktır. Aksi takdirde, çok vitesli (iki veya fazla vites) bir şanzıman kullanılmalıdır. Şekil 2.22, $x=2$ çekiş motoru ve üç vitesli şanzıman ile araç hızı ile birlikte bir EA'nın çekiş kuvvetini gösterir. Birinci vites a–b–c hız bölgesini, ikinci vites d–e–f'yi ve üçüncü vites g–h'yi kapsamaktadır. Şekil 2.23, $x=4$ çekiş motoru ve iki vitesli şanzıman ile çekiş kuvvetini göstermektedir. Birinci vites a–b–c hız bölgesini ve ikinci vites d–e–f'yi kapsar. Şekil 2.24, $x=6$ çekiş motoru ve tek vitesli şanzıman ile çekiş kuvvetini göstermektedir. Bu üç tasarım, araç hızı profillerine karşı aynı çekiş kuvvetine sahiptir. Dolayısıyla araçlar aynı hızlanma ve tırmanma performansına sahip olacak.



Şekil 2.24. $x = 6$ çekiş motoru ve tek vitesli şanzıman ile çekiş kuvveti ve araç hızı [83].

Temel araç performansı, maksimum hızı, tırmanma kabiliyeti ve hızlanmayı içerir. Bir aracın maksimum hızı, Şekil 2.22–24’de gösterilen çekme kuvveti-arac hızı diyagramında, çekme kuvveti eğrisinin direnç eğrisi (yuvarlanma direnci artı aerodinamik direnç) ile kesişme noktasından kolaylıkla bulunabilir. Genellikle daha büyük bir çekiş motoru veya daha büyük bir dişli oranı kullanan bazı tasarımlarda böyle bir kesişme noktasının bulunmadığına dikkat edilmelidir. Bu durumda maksimum araç hızı, cer motorunun maksimum hızı olarak belirlenir ve Denklem 2.30’da verilmiştir.

$$v_{maks} = \frac{\pi N_{m,maks} T_d}{30 i_{g,min} i_0} \text{ (m/s)} \quad (2.30)$$

Burada $N_{m,maks}$, çekiş motorunun izin verilen maksimum devri ve $i_{g,min}$ şanzımanın (en yüksek vites) minimum dişli oranıdır.

2.5. Hibrit Elektrikli Araçlar

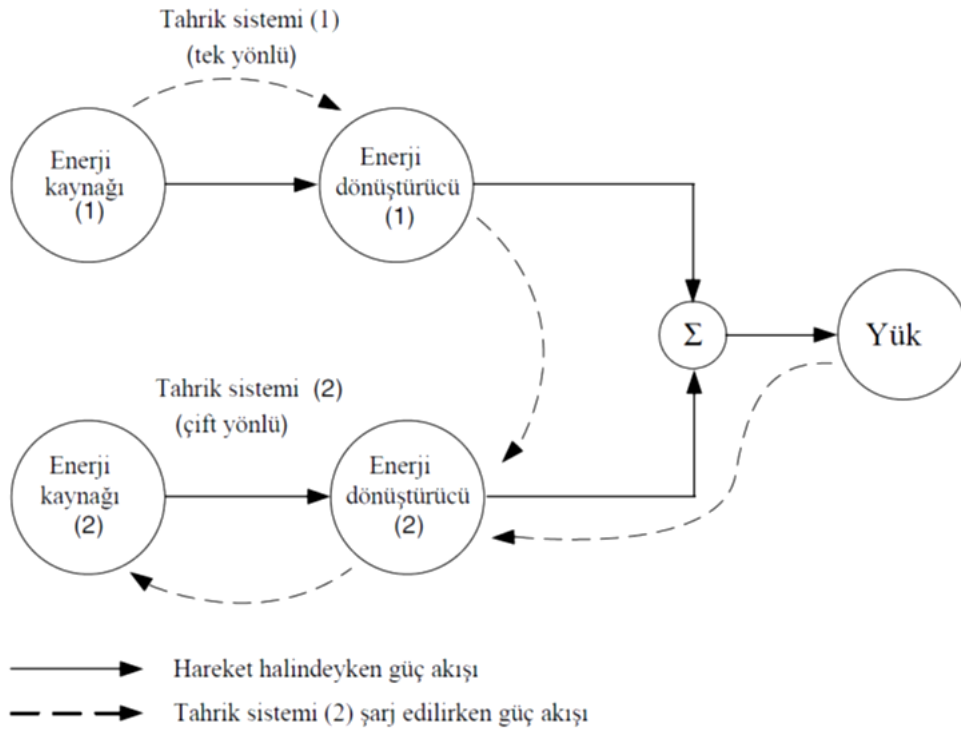
İYM geleneksel araçlar, yüksek enerji yoğunluklu petrol türevi yakıtların avantajlarını kullanarak iyi bir performans ve uzun menziller sağlar. Bununla birlikte, geleneksel İYM araçlar sahip oldukları zayıf yakıt ekonomisi ve neden oldukları çevre kirliliği gibi dezavantajları vardır. Zayıf yakıt ekonomilerinin nedenleri, motor yakıt verimliliği özelliklerinin gerçek çalışma şartlarıyla uyuşmaması, özellikle kentsel sürüşlerde frenleme esnasında araç kinetik enerjisinin dağılması ve mevcut otomobillerde dur-kalk sürüş modellerinde düşük şanzıman verimliliğidir. BEA ise geleneksel İYMA’lara göre yüksek enerji verimliliği ve sıfır çevre kirliliği gibi bazı avantajlara sahiptir. Bununla birlikte özellikle şarj başına sürüş menzili, benzin veya dizelin enerji

yoğunluğuna kıyasla bataryaların daha düşük enerji yoğunluğu nedeniyle İYMA'lara göre çok daha az rekabetçi bir konumdadır. Birincil güç kaynağı ve ikincil güç kaynağı olmak üzere iki güç kaynağı kullanan HEA hem İYMA'ların hem de BEA'ların avantajlarına sahip olup dezavantajların da üstesinden gelmiş olur.

2.5.1. Hibrit Elektrikli Tahrik Sistemleri

Temel olarak, herhangi bir araç güç aktarma organının, araç performansının taleplerini karşılamak için yeterli gücü sağlaması, belirli bir menzil için araç sürüşüne yeterli enerjiyi araçta taşınması, yüksek verimlilik göstermesi ve çevreyi daha az kirletmesi gerekir. Genel olarak bir araç, benzinli (veya dizel) ısı motoru sistemi, hidrojen yakıt pili elektrik motoru sistemi, kimyasal pil elektrik motoru sistemi vb. gibi birden fazla enerji kaynağına ve enerji dönüştürücüye (güç kaynağı) sahip olabilir. İki veya daha fazla enerji kaynağına ve enerji dönüştürücüye sahip olan araçlara hibrit araç denir. Elektrikli güç aktarma sistemine (enerji kaynağı enerji dönüştürücüleri) sahip hibrit bir araca HEA denir.

Bir hibrit araç aktarma organı genellikle ikiden fazla güç aktarma sistemi içermez çünkü daha fazla güç aktarma sistemi genel sistem konfigürasyonu karmaşıktır. Geleneksel İYMA'da ısı şeklinde dağılan fren enerjisinin bir kısmını yakalamak amacıyla, hibrit bir aktarma organı genellikle çift yönlü bir enerji kaynağına ve dönüştürücüye sahiptir. Diğerleri ise çift yönlü veya tek yönlü de olabilir. Şekil 2.25, bir hibrit aktarma organı konseptini ve olası farklı güç akış yollarını göstermektedir.



Şekil 2.25. Bir hibrit elektrikli aktarma organının konsept çizimi

Hibrit tahrik sistemleri, uyarlanmış bir güç aktarma organı tarafından gerekli gücü sağlar. Yük gereksinimlerini karşılamak için güç akışlarını birleştirmenin birçok farklı modu vardır:

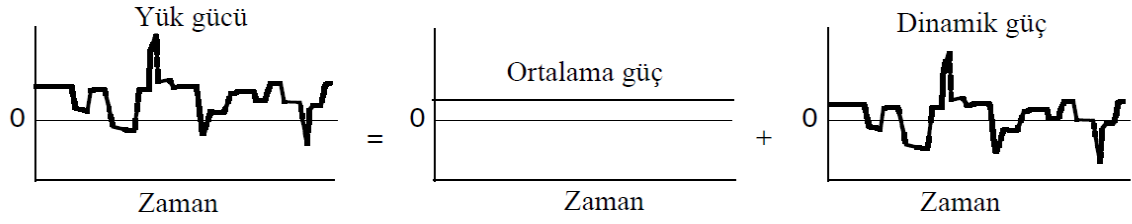
- Mod 1. Tahrik sistemi 1 tek başına yüke güç sağlar.
- Mod 2. Tahrik sistemi 2 tek başına yüke güç sağlar.
- Mod 3. Her iki tahrik sistemi de aynı anda yüke güç sağlar.
- Mod 4. Tahrik sistemi 2 yükten güç alır (rejeneratif frenleme).
- Mod 5. Tahrik sistemi 2, tahrik sistemi 1'den güç alır.
- Mod 6. Tahrik sistemi 2, tahrik sistemi 1'den ve aynı anda yükten güç alır.
- Mod 7. Tahrik sistemi 1 aynı anda hem yük hem de tahrik sistemi 2'ye güç sağlar.
- Mod 8. Tahrik sistemi 1, tahrik sistemi 2'ye güç sağlar ve tahrik sistemi 2 yüke güç sağlar
- Mod 9. Tahrik sistemi 1 yüke güç sağlar ve yük tahrik sistemi 2'ye güç sağlar.

Bir sıvı yakıtlı İYM (tahrik sistemi 1) ve bir bataryalı elektrik makinası (tahrik sistemi 2) ile hibridizasyonu durumunda, Mod 1'de İYM tek başına tahrik modundadır. Bu mod batarya enerjisinin neredeyse tamamen bittiğinde ve İYM'nin bataryayı şarj edecek ekstra gücü olmadığı veya bataryalar tamamen şarj olduğunda ve İYM aracın güç talebini tek başına karşılayabildiğinde kullanılabilir. Mod 2, motorun kapatıldığı saf elektrikli tahrik modudur. Bu mod çok düşük hız gibi motorun verimli çalışmadığı durumlarda veya emisyonların kesinlikle yasaklandığı alanlarda kullanılabilir. Mod 3, hibrit tahrik modudur ve ani hızlanma veya dik yokuş tırmanışları gibi büyük miktarda güce ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilir. Mod 4, aracın kinetik

veya potansiyel enerjisinin bir generatör işlevi gören elektrik makinası aracılığıyla geri kazanıldığı rejeneratif frenleme modudur. Geri kazanılan enerji daha sonra tekrar kullanılmak üzere bataryalarda depolanır. Mod 5 araç dururken, boştayken veya hafif bir eğimdeyken, yüke hiçbir gücün girmediği veya yükten güç gelmediği sırada İYM'nin bataryaları şarj ettiği moddur. Mod 6, hem rejeneratif frenlemenin hem de İYM'un bataryayı aynı anda şarj ettiği moddur. Mod 7, İYM'un aynı anda hem aracı hareket ettirdiği hem de bataryayı şarj ettiği moddur. Mod 8 İYM'un bataryayı şarj ettiği ve bataryanın yüke güç sağladığı moddur. Mod 9 gücün İYM'dan araç kütlesi aracılığıyla bataryaya aktarıldığı moddur. Bu mod daha çok iki tahrik sisteminin aracın ön ve arka aksına ayrı ayrı monte edildiği konfigürasyonlar da tercih edilir. Bu modların birçoğu tahrik sistemi 1 olarak yakıt pili sistemi kullanıldığında da geçerli olmaktadır. Bu durumda her ne kadar iki farklı enerji kaynağı olsa da tek bir tahrik sistemi yani sadece elektrikli motor bulunacaktır.

Hibrit bir araçtaki çeşitli çalışma modları, tek bir güç aktarma organına sahip araçlara göre daha fazla esneklik sağlar. Uygun konfigürasyon ve kontrol sistemi ile her bir özel çalışma koşulu için özel bir modun uygulanması genel performansı, verimliliği ve emisyonları optimize edebilir. Pratik bir tasarımda hangi modun uygulanması gerektiğine karar vermek, aktarma organının fiziksel konfigürasyonu, güç aktarma sistemi verimlilik özellikleri, yük özellikleri vb. gibi birçok faktöre bağlıdır. Her güç aktarma organını optimum verimlilik bölgesinde çalıştırmak, aracın genel verimliliği için çok önemlidir. Bir İYM genellikle geniş bir gaz keleşi açıklığı ile en verimli çalışma bölgesine sahiptir. Bu bölgeden uzakta çalışmak verimliliğin çok düşmesine neden olacaktır. Öte yandan, bir elektrik motorunun optimal bölge dışındaki verim kaybı İYM'a kıyasla çok daha düşüktür. İYM'deki verimli bölgede çalışma olayı yakıt pilleri için de çok büyük önem arz etmektedir.

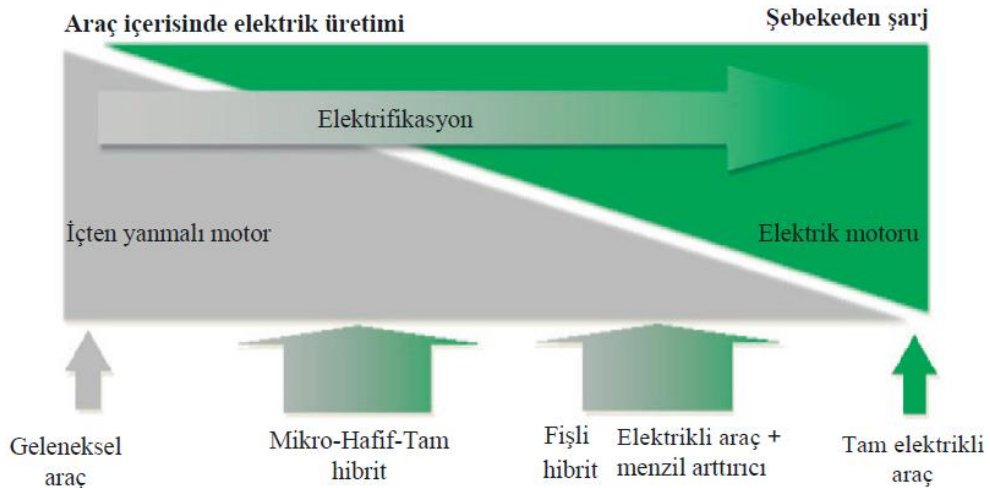
Bir aracın yük gücü, Şekil 2.26'da gösterildiği gibi sık hızlanma, yavaşlama, tırmanma ve inme dereceleri nedeniyle gerçek çalışmada rastgele değişir. Aslında yük gücü iki bileşenden oluşur, biri sabit bir değere sahip olan sabit (ortalama) güç, diğeri ise ortalaması sıfır olan dinamik güçtür. Hibrit araç stratejisinde, İYM veya yakıt pili gibi sabit durumda çalışması istenen bir güç aktarma sistemi ortalama gücü sağlamak için kullanılabilir. Öte yandan dinamik gücü sağlamak için batarya gibi diğeri güç aktarma organları kullanılabilir. Dinamik güç aktarma sistemindeki enerji değişimi ideal şartlarda tüm sürüş çevriminde sıfır olacaktır. Bu, dinamik güç aktarma sisteminin enerji kaynağının sürüş çevriminin sonunda enerji kapasitesini koruduğu sadece bir güç damperi olarak işlev gördüğü anlamına gelir. Bu durum pratikte ideal şartlar sağlanamayacağı için farklılıklar gösterecektir.



Şekil 2.26. Sabit ve dinamik bileşenlere ayrılmış bir yük gücü

Bir hibrit araçta sabit güç, bir İYM, bir Stirling motoru, bir yakıt pili vb. tarafından sağlanabilir. İYM veya yakıt pili, yükün dinamik güç bileşeni dinamik güç kaynağı üzerine alındığı için tekil bir güç aktarma sistemi tasarımındakinden daha küçük tasarlanabilir ve en verimli çalışma bölgesinde istikrarlı bir şekilde çalışabilir. Dinamik güç, elektrokimyasal piller, ultrakapasitörler, volanlar (mekanik piller) ve bunların kombinasyonları ile çalışan bir elektrik motoru ile sağlanabilir.

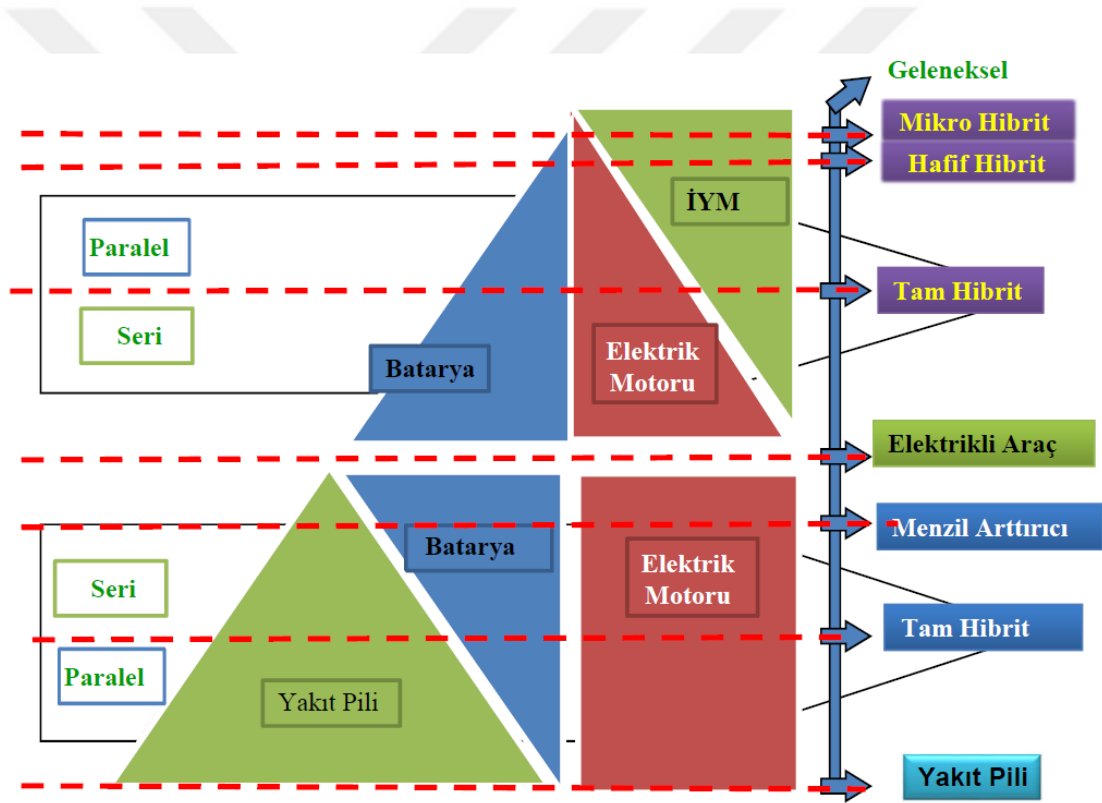
Geleneksel İYM ile tam elektrikli araç arasında birkaç aşama tanımlanabilir (Şekil 2.27). Aslında mikro hibritlerin yalnızca yakıt tasarrufu sağlamak için bir başlat-durdur işlevi vardır ve bir elektrik motorunun olmaması nedeniyle hibrit araçlar olarak nitelendirilemezler. Hafif hibritlerde, bir elektrik motoru çalıştırma sırasında içten yanmalı motorun tahrikini destekler ve küçük bir batarya ile generatör çalışma sayesinde rejeneratif frenlemeye olanak sağlar. Tam hibrit elektrikli araçlar daha da büyük bataryaya sahiptir ve kısa mesafelerde yalnızca elektrik motoruyla sürülebilir. Bununla birlikte, hibrit konseptler hala birincil enerji kaynağı olarak fosil yakıtlara dayanmaktadır ve tüm elektrik araç içinde üretilir.



Şekil 2.27. Araç aktarma organlarının elektrifikasyonu

Fişli hibrit elektrikli araç (FHEA), elektrik mobilitesine yönelik bir sonraki adımdır çünkü aynı zamanda şebekeden gelen elektriğin kullanılmasına da izin verir. FHEA'lar (ve benzer "menzil

genişletici" konseptleri), bu nedenle hibritler ve tam BEA'lar arasında yer alır. Menzil genişletici olarak kullanılan küçük bir yanmalı motor mevcut olması durumunda batarya, tam elektrikli araçlara göre daha küçük olabilir. Bu ağırlık ve maliyet açısından avantajlar sağlayabilir. Bununla birlikte hibritlere kıyasla daha büyük batarya daha uzun mesafelerde tam elektrikli sürüşe izin verir. Bireysel kullanıma bağlı olarak, yaklaşık %80'lik yüksek elektrikli sürüş oranlarını yakalamak mümkündür [93]. Elektrifikasyon sürecinin sonunda yer alan tam BEA'da, FHEA'ya kıyasla daha büyük bataryaya sahip yalnız bir elektrik motoru bulunur. Fakat bu tür BEA'lar halen bir içten yanmalı motor içeren diğer konseptlere kıyasla şu anda sınırlı bir menzile sahiptir. Bu sorunu içten yanmalı motorları kullanmadan tam elektrikli yapıyı koruyacak şekilde aşmak için ise yakıt pilleri devreye girmektedir. Hibrit güç aktarma topolojisine yakıt pilini de eklediğimizde Şekil 2.28'deki yapı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.28. Hibrit güç aktarma topolojisi [94].

2.5.2. Hibridizasyon Dereceleri

Hibrit araçlar hibridizasyon derecesine göre sınıflandırılabilir. Hibridizasyon derecesi, İYM ve elektrik motoru tarafından sağlanan güce bağlıdır. Bazı araçlarda İYM motor baskındır; elektrik motoru sadece takviye gerektiğinde açılır. Birçok araçta hem İYM hem de elektrik motoru yükü paylaşır. Bir hibrit araçta bir elektrik motorunun ürettiği gücün, araç tarafından tüketilen toplam güce oranı hibridizasyon derecesi olarak bilinir. Bu teknik terimin pazarda ve günlük hayatta

karşılığı mikro, hafif, tam ve fişli hibritler olmak üzere farklı hibridizasyon seviyeleri olarak karşımıza çıkar. Bu seviyelerin karşılaştırılması Tablo 2.5'te gösterilmiştir. Yine hibridizasyon derecesine göre kullanılan batarya, elektriksel fonksiyonlar ve emisyon azaltımı karşılaştırması da Tablo 2.6'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Hibridizasyon seviyelerinin karşılaştırılması

	Mikro	Yarı	Tam	Fişli
Dur-kalk trafikte İYM'yi otomatik durdurup çalıştırma	✓	✓	✓	✓
Rejeneratif frenleme, 48 V ve üzerinde çalışma		✓	✓	✓
Bir İYM'a yardımcı bir elektrik motoru kullanır		✓	✓	✓
Sadece elektrik motorunu kullanarak sürebilme			✓	✓
Arttırılmış saf elektrikli menzil için bataryayı haricen şarj edebilme				✓
İşletme gerilimi (V)	12-48	48-150	60-400	200-600
Yakıt ekonomisine katkısı (%)	<5	7-15	>30	>50
Elektrik motor bağlantısı	Kayış	Kayış- Krank mili	Kayış- Krank mili	Krank mili
Elektrik motor güç seviyesi (kW)	2-5	3-15	10-50	15-100
Hibridizasyon derecesi (%)	<5	<10	10-50	>25

Mikro HEA'ların hibridizasyon derecesi %5'ten azdır. Küçük bir entegre marş/jeneratör şeklindeki elektrik motoru, araç tamamen durduğunda motoru kapatmak ve sürücü fren pedalını bıraktığında çalıştırmak için kullanılır. Araç hareket halindeyken İYM tarafından tahrik edilir ve EM araca ek tork sağlamaz, mikro HEA sistemi kullanımı ile yakıt verimliliği %5 civarında artar [95].

Yarı HEA'lar bir mikro HEA'ya çok benzer, ancak İYM gücünün %10'una kadar arttırılmış EM boyutuna ve araç tahriki sırasında güç desteğine izin veren bir bataryaya sahiptir. Yarı HEA'lar için tipik yakıt verimliliği artışları, hibrit olmayanlarla karşılaştırıldığında gerçek dünyadaki sürüş durumu için %7-15 aralığındadır [95].

Tablo 2.6. Farklı hibrit akülü araçların fonksiyonları [96].

	Mikro HEA başlat/durdur ve rejenerasyon	Hafif HEA + kalkış yardımı	Tam HEA + güç desteği ve sınırlı elektrikli sürüş	Fişli HEA + arttırılmış elektrikli sürüş
Tercih edilen batarya	SLI, AGM	LAB+Li-ion	Ni-MH, Li-ion	Li-ion
Batarya gücü (kW)	2-10	7-20	>20	>20
Kullanılabilir batarya enerjisi (SLI bataryaya ek) (kWh)	0-0,25	0,25-10	0,7-2,5	4-10
Kalkış yardımı (kWh)	0	<15	>15	>60
Elektrikli sürüş menzili (km)	0	0	~2	~30
Emisyon azaltma oranı (%)	4-7	8-12	15-20	>20

Mikro ve hafif HEA'lar arasındaki temel fark, araca tork sağlayıp sağlayamamalarıdır. Mikro HEA'ların bunu yapmak için yeterli kapasitesi yoktur çünkü sistemde mevcut olan EM tipik olarak araca başlatma ve durdurma işlevini eklemek için kullanılır. Ayrıca hidrolik direksiyon, klima, ışıklar ve genellikle motordan enerji tüketen diğer sistemler gibi araç aksesuarlarına güç sağlar. Elektrik motoru hafif hibrit ile karşılaştırıldığında daha küçüktür, genellikle 2,5 kW'a kadardır ve 12 V ile çalışır. Dönüştürücüler ve kondansatörlerdeki son gelişmeler, mikro hibritin karmaşık ve pahalı elektrik modifikasyonlarına gerek kalmadan araçların elektrik sisteminde farklı voltajlarla çalışmasına izin verir. Elektrik motorunun daha verimli hale getirilmesi amacıyla 48 V ile çalışması için birçok çalışma yapılmıştır. Gerilim seviyesinin 12 V'tan 48 V'a yükseltilmesi ile hem frenleme işleminden kısa sürelerde daha fazla enerji geri kazanılabilmesine hem de tahrik sisteminin daha güçlü desteklenebilmesine olanak sağlar. DC/DC dönüştürücülerdeki bu iyileştirmeler ile mikro hibrit, aracın elektrik sistemlerini kullanma ve etkileşim kapasitesini kaybetmeden 48V elektrik motorunu kullanabilir [97].

Bir mikro hibritin güç gereksinim seviyesinin düşük olması elektrik motorunun kompakt bir tasarıma sahip olması sağlar böylece aracın yapısında veya İYM'de değişiklik yapılmasına gerek kalmaz. Tipik olarak elektrik motoru İYM'ye bir kayışla bağlı olan araç alternatörünün yerini alır. Batarya olarak ucuz ve yaygın olarak kullanılan kurşun-asit bataryaların kullanımı mikro hibrit sistemler için avantaj sağlar. Nispeten düşük entegrasyon maliyeti nedeniyle bu teknoloji önümüzdeki yıllarda önemli miktarlarda kullanılacak ve CO₂ hedefinin karşılanmasında önemli bir rol oynayacaktır.

Konfigürasyon açısından hafif hibrit sistemler daha karmaşıktır. Sistem motor ve jeneratör olarak çalışan krank miline bağlı bir elektrik motoruna sahip olabilir veya mikro hibritteki gibi İYM ile birleştirilmiş bir elektrik motor ve şanzımana bağlı bir elektrik motorun bir kombinasyonu olabilir. Bu tür sistemler 10–20 kW güç ve 100–250 Nm tork sağlayabilir. Hafif hibrit araç yüksek

voltajlarla çalışabilir ancak güvenlik nedenleriyle geliştirilmekte olan sistemlerin çoğu 48 V ile çalışır [97].

Bu teknoloji yalnızca yakıt tasarruflu araçlar değil, aynı zamanda güvenlik, konfor ve uygun fiyattan ödün vermeden araçların daha verimli hale getirilmesine olanak tanır. Çift debriyaj sistemleri veya güç dağıtımlı yörünge dişli sistemleri gibi teknolojiler, araca tork iletimi ve akülerin şarj durumu BDO arasında en iyi dengeyi sağlamak için farklı kontrol stratejilerinin uygulanmasına yönelik esnekliği artırır [98].

2.5.3. Hibrit Tahrik Sistem Mimarileri

Bir hibrit aracın mimarisi, enerji akış rotalarını tanımlayan bileşenler ve kontrol portları arasındaki bağlantı olarak tanımlanabilir. Geleneksel olarak, HEA'lar seri ve paralel olmak üzere iki temel tipte sınıflandırılır. Günümüzde bu sınıflandırmanın dışında kalan mimariler de mevcuttur. Mikro ve yarı hibrit gibi başlangıç mimarileri, seri ve paralel hibrit yapıların bir arada bulunduğu seri-paralel hibrit mimariler ve daha karmaşık hibrit mimariler de mevcuttur.

2.5.3.1 Seri Hibrit Elektrikli Tahrik Sistemleri

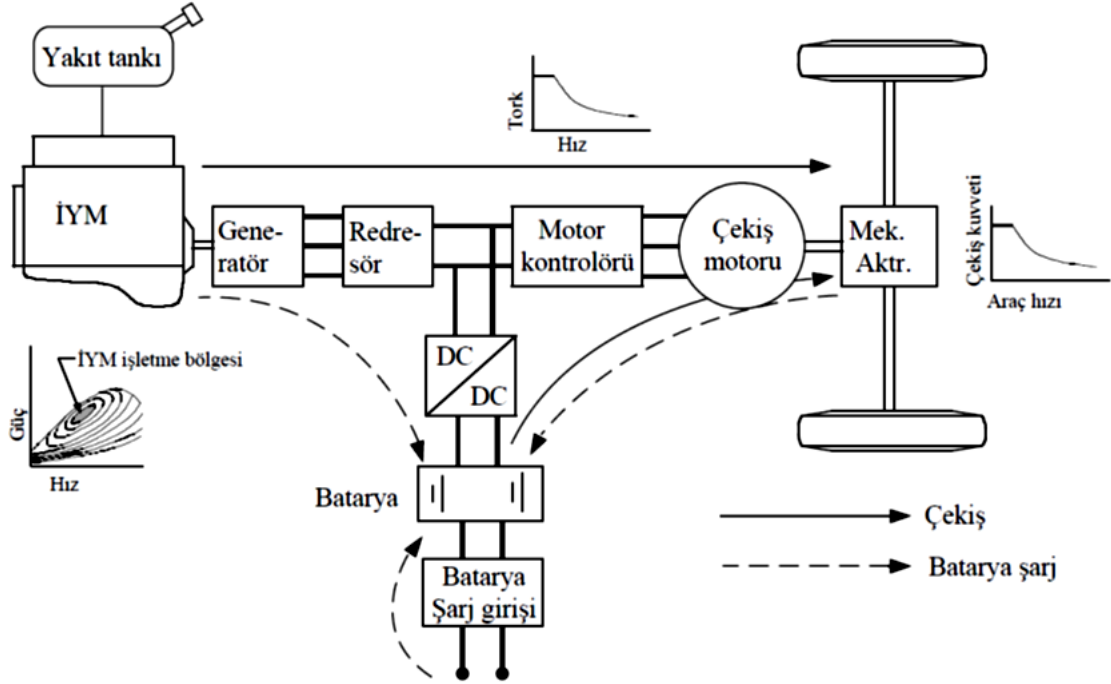
Seri hibrit tahrik sistemi, iki güç kaynağının aracı hareket ettiren tek bir güç ünitesini (elektrik motorunu) beslediği bir aktarma organıdır. En yaygın olarak bulunan seri hibrit aktarma organları, Şekil 2.29'de gösterilmiştir. Yakıt deposu tek yönlü enerji kaynağı ve generatöre bağlı bir motor tek yönlü enerji dönüştürücü durumundadır. Generatörün çıkışı bir elektronik dönüştürücü (doğrultucu) aracılığıyla bir elektrik güç sistemine aktarılır. Çift yönlü enerji kaynağı olarak bir güç elektroniği dönüştürücüsü (DC/DC dönüştürücü) aracılığıyla güç sistemine bağlanan bataryadır. Elektrik güç sistemi ayrıca elektrikli çekiş motorunun kontrolörüne bağlıdır. Cer motoru, motor veya generatör olarak ve ileri veya geri yönde kontrol edilebilir. Bu aktarma organı, bataryayı bir güç ağından şarj etmek için bir şarj sistemine ihtiyaç duyabilir. Seri hibrit elektrikli aktarma organları potansiyel olarak aşağıdaki çalışma modlarına sahiptir.

1. Saf elektrik modu: Motor kapatılır ve araç sadece bataryadan sağlanan enerji ile hareket eder.
2. Saf motor modu: Araç çekiş gücü yalnızca İYM-generatörden gelirken, batarya aktarma organlarına güç sağlamaz veya güç çekmez. Elektrikli makineleri, İYM'den tahrik edilen tekerleklerle elektrik iletimi görevi görür.
3. Hibrit mod: Çekiş gücü hem İYM-generatöründen hem de bataryadan alınır.
4. İYM çekişi ve batarya şarj modu: İYM-generatör, bataryayı şarj etmek ve aracı hareket ettirmek için güç sağlar.

5. Rejeneratif frenleme modu: İYM-generator kapatılır ve cer motoru bir generatör olarak çalıştırılır. Üretilen güç bataryayı şarj etmek için kullanılır.

6. Akü şarj modu: Çekiş motoru güç almaz ve motor jeneratörü aküleri şarj eder.

7. Hibrit akü şarj modu: Hem motor jeneratörü hem de çekiş motoru, aküleri şarj etmek için jeneratörler olarak çalışır.



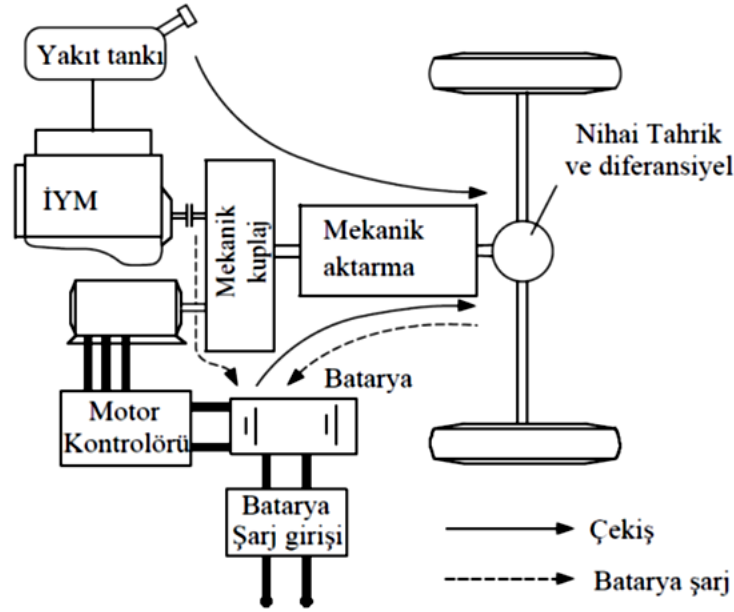
Şekil 2.29. Bir seri hibrit elektrikli aktarma organının konfigürasyonu

İYM, tahrik edilen tekerleklerle mekanik olarak bağlı değildir. Bu nedenle hız-güç karakteristik haritasının herhangi bir noktasında çalıştırılabilir ve potansiyel olarak Şekil 2.29'da gösterildiği gibi maksimum verim bölgesinde çalıştırılmaya özen gösterilir. Bu dar bölgede optimum tasarım ve kontrol ile motorun verimliliği ve emisyonlarını daha da iyileştirilebilir. Dar bir bölgede bu optimizasyon geniş bölge çalışmasına göre daha başarılı ve kolay uygulanabilir. Ayrıca, motorun tahrik edilen tekerleklerden mekanik olarak ayrılması, yüksek hızlı bir İYM'nin de kullanılmasına izin verir. Elektrik motorları ideale yakın tork-hız özelliklerine sahip olduklarından, farklı dişli bulunduran şanzımanlara ihtiyaç duymazlar ve bu yapılarını büyük ölçüde basitleştirilir ve maliyetleri azalır. Ayrıca bir motor ve diferansiyel dişli takımı kullanmak yerine, her biri tek bir tekerleğe güç veren iki ayrı motor kullanılabilir. Dört motor kullanılarak diferansiyellerin ve tahrik millerinin masrafı ve karmaşıklığı olmaksızın araç dört tekerlekten çekişli hale de getirilebilir. Elektrik iletiminin sağladığı mekanik ayırmanın bir sonucu olarak basit kontrol stratejileri kullanılabilir.

Ancak seri hibrit elektrikli aktarma organları bazı dezavantajlara da sahiptir. İYM'den gelen enerji iki kez dönüştürülür (generatörde mekanikten elektriğe ve cer motorunda elektrikten mekaniğe). Generator ve cer motorunun verimsizlikleri toplanır ve kayıplar önemli oranda artabilir. Generator ek ağırlık ve maliyete neden olur. Çekiş motoru, aracı tahrik eden tek güç kaynağı olduğu için maksimum gereksinimleri karşılayacak şekilde boyutlandırılmalıdır.

2.5.3.2 Paralel Hibrit Elektrikli Tahrik Sistemleri

Paralel hibrit tahril sistemi, geleneksel bir İYM ile çalışan araçta olduğu gibi gücünü mekanik olarak tekerleklerle ulaştırdığı bir aktarma organıdır. Şanzımana mekanik olarak bağlı bir elektrik motoru tarafından desteklenir. İYM ve elektrik motorunun güçleri, Şekil 2.30'da gösterildiği gibi mekanik kuplaj ile birbirine bağlanmıştır. Motor ve elektrik motoru gücünün mekanik kombinasyonu farklı konfigürasyonlar için olanak sağlar. Şekil 2.30'daki mekanik kuplaj, bir tork veya hız bağlantısı olabilir.



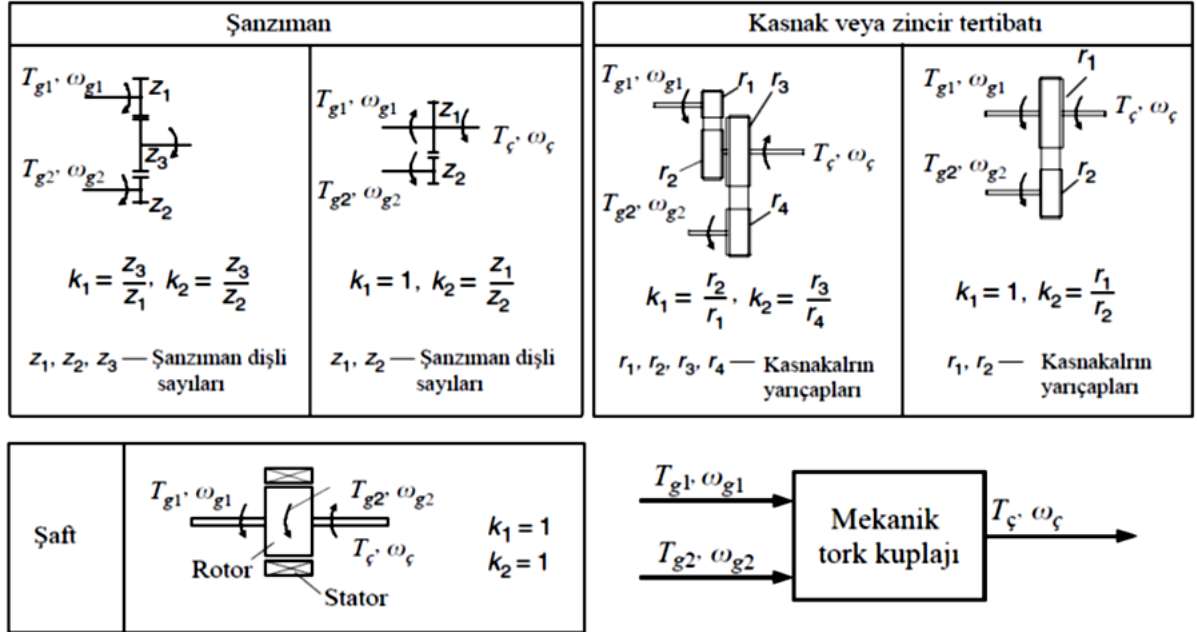
Şekil 2.30. Bir paralel hibrit elektrikli aktarma organının konfigürasyonu

Tork kuplajlı paralel hibrit elektrikli tahrik sistemlerinde tork kaplini, motorun ve elektrik motorunun torklarını birbirine ekler veya motor torkunu tahrik ve batarya şarjı olarak iki parçaya böler. Şekil 30 kavramsal olarak biri İYM'den, diğeri elektrik motorundan olmak üzere iki girişi olan mekanik bir tork kuplajını göstermektedir. Mekanik tork kaplini, mekanik şanzımana çıkış verir. Kayıp göz ardı edilirse, çıkış torku ve hızı Denklem 2.30 ve 2.31'de şu şekilde tanımlanabilir.

$$\tau_{\zeta} = k_1 \tau_{g1} + k_2 \tau_{g2} \quad (2.31)$$

$$\omega = \frac{\omega_{g1}}{k_1} = \frac{\omega_{g2}}{k_2} \quad (2.32)$$

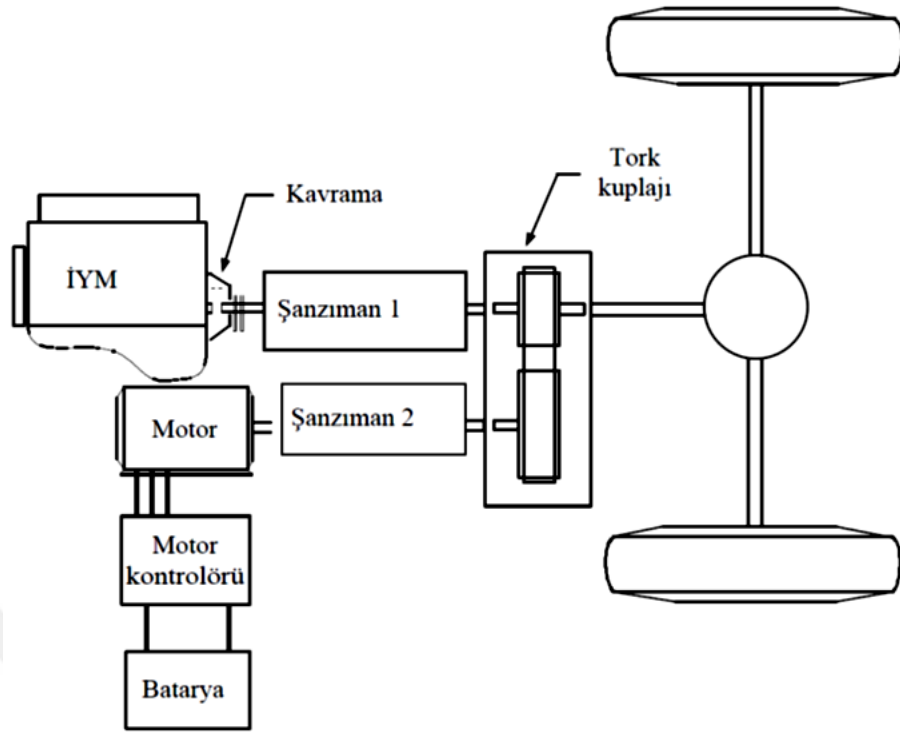
k_1 ve k_2 , tork kuplaj parametreleri tarafından belirlenen sabitlerdir. Şekil 2.31, tipik olarak kullanılan bazı mekanik tork kuplaj cihazlarını listeler.



Şekil 2.31. Yaygın olarak kullanılan mekanik tork kaplin cihazları

Tork kuplajlı hibrit aktarma organlarında çeşitli konfigürasyonlar vardır. İki şaftlı ve tek şaftlı tasarımlar olarak sınıflandırılırlar. Her kategoride şanzıman farklı konumlara yerleştirilebilir ve farklı dişlilerle tasarlanabilir, bu da farklı çekiş özellikleri sağlar. Optimum tasarım, çoğunlukla çekiş gereksinimlerine, İYM boyutuna ve özelliklerine, elektrik motor boyutuna ve özelliklerine bağlı olacaktır.

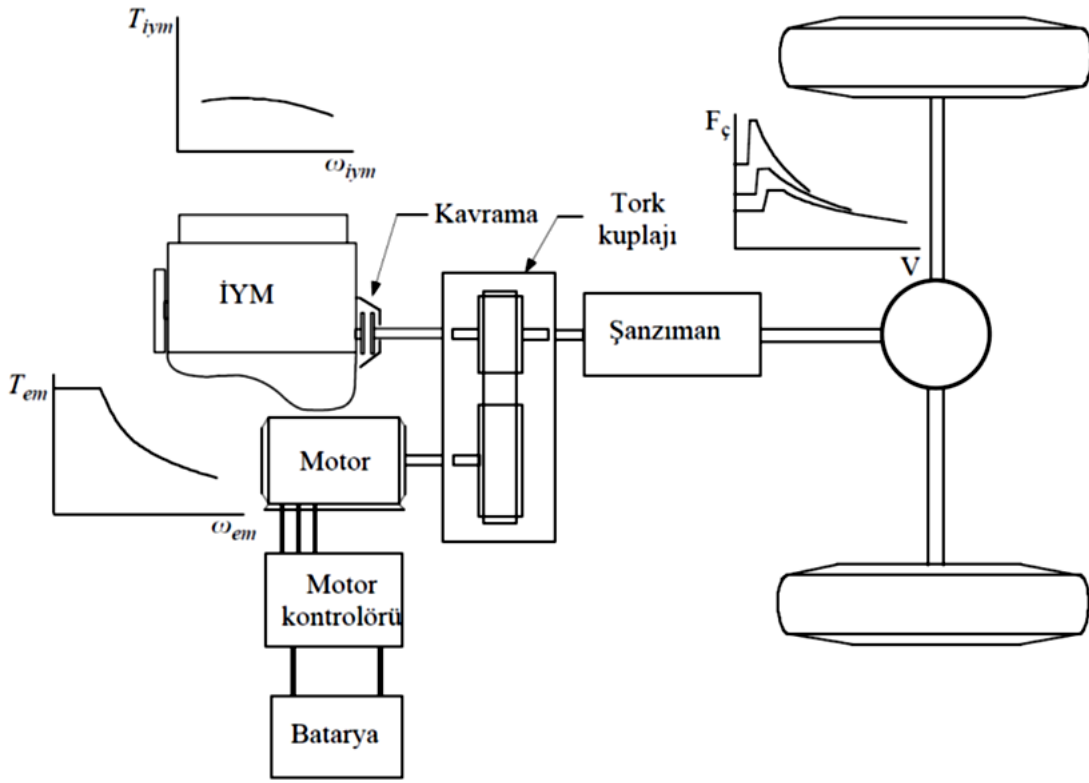
Şekil 2.32, iki şanzımanın kullanıldığı iki şaftlı bir konfigürasyon tasarımını göstermektedir. Bunlardan biri İYM ile tork kaplini arasına, diğeri elektrik motoru ile tork kaplini arasına yerleştirilmiştir. Her iki şanzıman da tek veya çok dişli olabilir. Aktarma organının performansı ve genel verimliliği, diğr tasarımlardan daha üstün olabilir çünkü iki çok dişli şanzıman, hem İYM hem de elektrikli çekiş sisteminin (elektrik makinası ve batarya) optimum bölgelerinde çalışması için daha fazla olanak sağlar. Bu tasarım aynı zamanda İYM'nin tasarımında ve elektrik motoru özelliklerinde büyük esneklik sağlar. Bununla birlikte iki farklı çok dişli şanzıman aktarma organlarını önemli ölçüde karmaşıktıracaaktır.



Şekil 2.32. İki şanzıman ve iki şaftlı konfigürasyon

İki şaftlı paralel hibrit aktarma organının başka bir konfigürasyonu şanzımanın tork kaplini ile tahrik mili arasına yerleştirildiği Şekil 2.33'te gösterilmektedir. Şanzıman hem motorun hem de elektrik motorunun torklarını aynı ölçekte artırma işlevi görür. Tork kaplininde k_1 ve k_2 sabitinin tasarlanması, elektrik motorunun İYM'den farklı bir hız aralığında çalışabilmesini sağlar ve yüksek hızlı bir motor kullanılabilir. Bu konfigürasyon, nispeten küçük bir İYM ve elektrik motorunun kullanıldığı ve düşük hızlarda çekiş gücünü artırmak için çok dişli bir şanzımanın gerekli olduğu durumlarda uygun olacaktır.

Tork kuplajlı paralel hibritinin daha basit ve kompakt mimarisi elektrik motorunun rotorunun tork kuplajı olarak işlev gördüğü tek şaftlı konfigürasyondur. Şanzıman, İYM'ye bir debriyaj aracılığıyla bağlı bir elektrik motorunun arkasına veya İYM ile elektrik motoru arasına yerleştirilebilir. İlk yapılandırmaya "şanzıman öncesi" (motor şanzımanın önündedir) denir ve ikinci yapılandırmaya "şanzıman sonrası" (motor şanzımanın arkasında) denir. Şanzıman öncesi konfigürasyonda hem İYM hem de elektrik motoru torku şanzıman tarafından değiştirilir. İYM ve elektrik motoru aynı hız aralığına sahip olmalıdır. Bu konfigürasyon genellikle elektrik motorunun bir İYM marşı, elektrik generatörü, İYM güç yardımcısı ve rejeneratif frenleme olarak işlev gördüğü, hafif hibrit aktarma organları olarak adlandırılan küçük bir motor durumunda kullanılır.

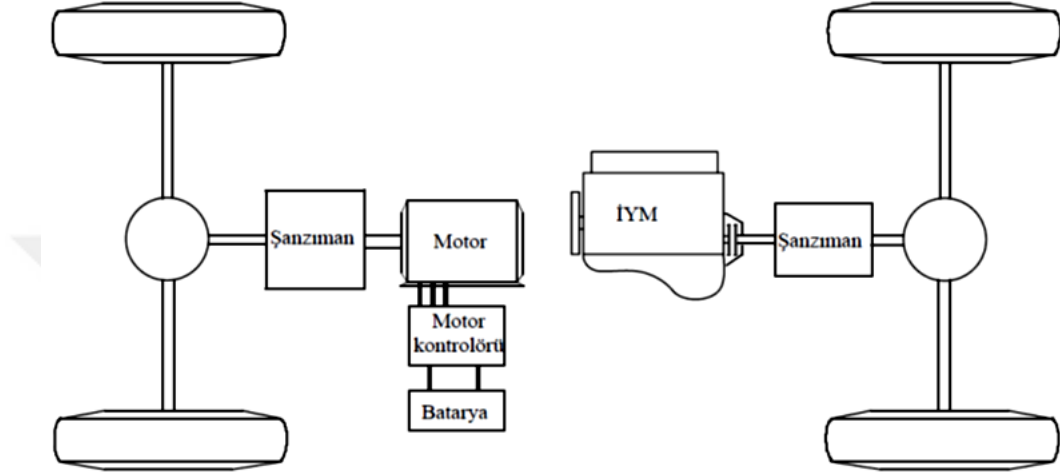


Şekil 2.33. İki şaft ve tek şanzımanlı konfigürasyon

Ancak, şanzıman sonrası konfigürasyonda, şanzıman yalnızca İYM torkunu değiştirebilirken, elektrik motor torku doğrudan tahrik edilen tekerleklerle iletilir. Bu konfigürasyon uzun bir sabit güç bölgesine sahip büyük bir elektrik motorunun kullanıldığı aktarma organlarında kullanılabilir. Şanzıman sadece araç performansını ve İYM'nin çalışma verimliliğini artırmak için İYM'nin çalışma noktalarını değiştirmek için kullanılır. Bu durumda araç dururken ve elektrik motorunu, tahrik tekerleklerine rijit bir şekilde bağlıyken, generatör olarak çalıştırarak bataryaların İYM'den şarj edilemediğine dikkat edilmelidir.

Diğer bir tork kuplajlı paralel hibrit aktarma organı, bir aksa İYM tarafından ve diğer bir aksa elektrik motoruyla güç verildiği ayrı aks mimarisidir (Şekil 2.34). İki güç aktarma organının çekiş gücü, araç şasisi ve yol üzerinden etkileşir ve çalışma prensibi, iki şaftlı konfigürasyona benzer. Ayrılmış aks mimarisi geleneksel araçların bazı avantajlarını sağlar. Orijinal İYM'yi ve şanzımanı değiştirmeden korur ve diğer aksa elektrikli bir çekiş sistemi eklenir. Ayrıca kaygan yollarda çekişi optimize eden ve her bir tekerlekte çekiş gücünü ayarlayabilen dört tekerlekten çekiş sistemine sahiptir. Lüks segment araçlarda yüksek performansı daha küçük hacimli ve yakıt tüketimli bir İYM'den elde edebilmek, ön ve arka akslar arasına şaft yerleştirmeden dört tekerden çekiş sistemine sahip olabilmek için günümüzde çokça tercih edilen bir yapı konumundadır. Elektrik motoru ve nihai diferansiyel dişli sistemi önemli ölçüde yer kaplar ve bu durumda yolcu ve bagaj alanını azaltabilir. Bu sorun, motor şanzımanı tek dişli ise veya tek bir elektrik motoru

yerine iki tahrik tekerleğinin içine yerleştirilebilen iki küçük boyutlu elektrik motoru ile değiştirilirse çözülebilir. Araç dururken bataryaların motordan şarj edilemediğine dikkat edilmelidir. Elektrik motorunun gücü ve bataryanın ebatlarının büyük olması gerektiği göz önünde bulundurulduğunda daha çok fişli hibrit yapılarda kullanılacağı ve bataryaların haricen de şarj edilme imkanının olduğu düşünülürse bu da çok büyük bir dezavantaj olmayacaktır.



Şekil 2.34. Ayrılmış aks tork kuplajlı paralel hibrit elektrikli aktarma organları

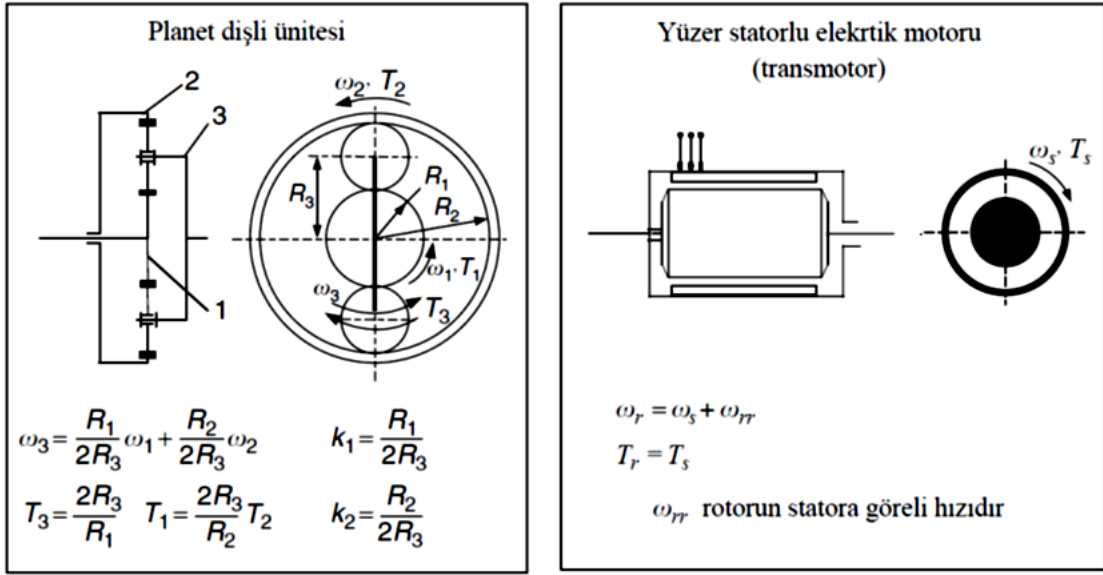
Hız kuplajlı Paralel Hibrit Elektrikli Tahrik Sistemlerinde ise iki güç kaynağından gelen güçler, hızları birleştirilerek birbirine bağlanabilir. Bir hız kuplajının özellikleri Denklem 2.33 ve 2.34 ile şu şekilde açıklanabilir.

$$\omega_{\zeta} = k_1 \omega_{g1} + k_2 \omega_{g2} \quad (2.33)$$

$$\tau_{\zeta} = \frac{\tau_{g1}}{k_1} = \frac{\tau_{g2}}{k_2} \quad (2.34)$$

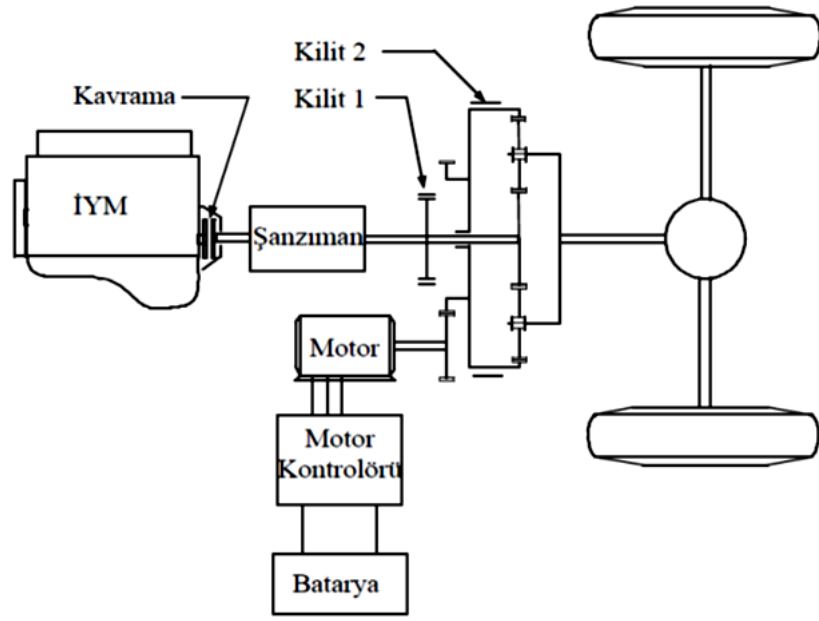
Şekil 2.35 iki tipik hız kavrama cihazını göstermektedir. Biri planet dişli redüktör, diğeri ise transmoteur olarak adlandırılan yüzer statorlu bir elektrik motorudur. Bir planet dişli ünitesi, sırasıyla 1, 2 ve 3 olarak etiketlenmiş güneş dişlisi, halka dişli ve boyunduruktan oluşan üç portlu bir ünite. Üç bağlantı noktası arasındaki hız ve tork ilişkisi, ünitenin hız, güneş dişlisi ve halka dişlinin birbirine eklendiği ve boyunduruktan çıktığı bir hız kuplaj cihazı olduğunu gösterir. k_1 ve k_2 sabitleri yalnızca her dişlinin yarıçapına veya her dişlinin diş sayısına bağlıdır.

Hız bağlantısında kullanılan bir başka cihaz, genellikle bir gövdeye sabitlenen statorun güç giriş portu olarak serbest bırakıldığı bir elektrik motorudur. Diğer iki bağlantı noktası rotor ve elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürüldüğü hava aralığıdır. Motor hızı, genel olarak rotorun statora göre göreceli hızıdır. Etki ve tepki nedeniyle, stator ve rotor üzerindeki tork etkisi her zaman aynıdır ve $k_1=1$ ve $k_2=1$ sabitleriyle sonuçlanır.



Şekil 2.35. Tipik hız kuplaj cihazları

Tork kuplaj cihazları gibi, hız kuplaj cihazları da çeşitli hibrit aktarma organları oluşturmak için kullanılabilir. Şekil 2.36 ve 2.37, planet dişli redüktörün ve bir elektrikli transmotorun hız bağlantısına sahip iki hibrit aktarma organı örneğini göstermektedir. Şekil 2.36’te İYM, gücünü bir debriyaj ve şanzıman aracılığıyla güneş dişlisine sağlar. Şanzıman, çekiş gereksinimlerine uyacak şekilde İYM’nin hız-tork özelliklerini değiştirmek için kullanılır. Elektrik motoru gücünü bir çift dişli aracılığıyla halka dişliye sağlar. Kilit 1 ve 2, farklı çalışma modu gereksinimlerini karşılamak için güneş dişlisini ve halka dişliyi hareketsiz gövdeye kilitlemek için kullanılır. Bu şekilde aşağıdaki çalışma modları sağlanabilir.



Şekil 2.36. Planet dişli ünitesinin hız kuplajlı hibrit elektrikli aktarma organları

Hibrit çekiş: Kilit 1 ve 2 serbest bırakıldığında, güneş dişlisi ve halka dişli dönebilir ve hem İYM hem de elektrik makinası, tahrik edilen tekerleklere pozitif hız ve tork (pozitif güç) sağlar.

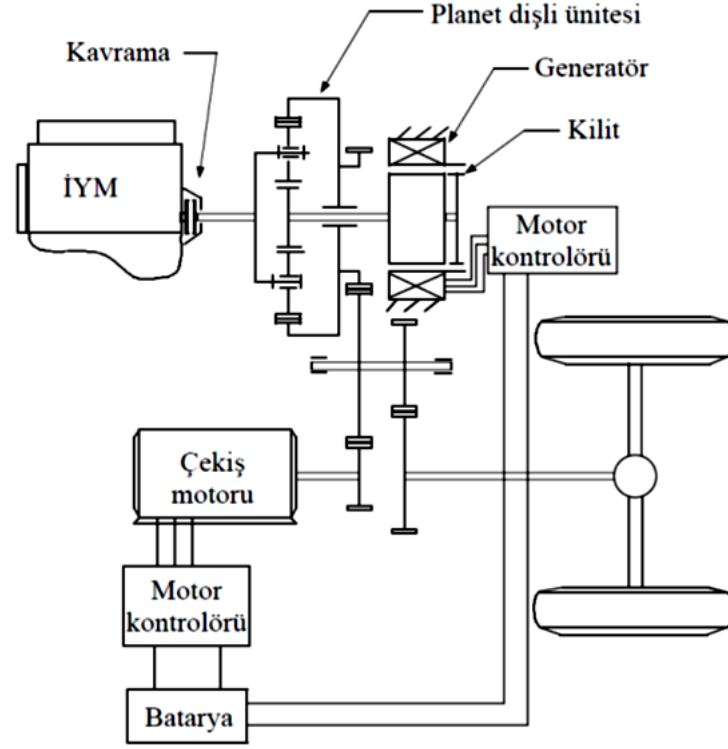
Tek başına İYM çekişi: Kilit 2, halka dişliyi sabit gövdeye kilitletiğinde ve kilit 1 serbest bırakıldığında, yalnızca İYM tahrik edilen tekerleklere güç sağlar.

Tek başına elektrik motor çekişi: Kilit 1, güneş dişlisini sabit gövdeye kilitletiğinde (motor kapatılır veya kavrama ile devre dışı bırakılır) ve kilit 2 serbest bırakıldığında, yalnızca elektrik motoru tahrik edilen tekerleklere güç sağlar.

Rejeneratif frenleme: Kilit 1, kilitleme durumuna ayarlanır, İYM kapatılır veya debriyaj ile devre dışı bırakılır ve elektrik makinası, rejenerasyon işlemine göre (negatif tork) kontrol edilir. Aracın kinetik veya potansiyel enerjisi elektrik sistemi tarafından çekilebilir.

İYM'den batarya şarjı: Kontrolör elektrikli makine için negatif bir hız ayarladığında, elektrik makinası generatör modunda İYM'den enerji çeker.

sağlar. Optimum hız aralığında çalışmak için motor devrini ayarlamak gerekir ve bunun için de planet dişli ve motor/generatör kullanıldığında yüksek bir yakıt ekonomisi sağlanabilir.



Şekil 2.39. Entegre hız ve tork kuplajlı hibrit elektrikli aktarma organları (Toyota Prius)

2.6. Hibrit ve Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorları

HEA ve BEA'ların satışlarındaki hızlı artışla birlikte bu araçlarda kullanılan cer motorlarına yönelik gereksinimler ve tasarımlar da önemli ölçüde değişti. BEA ve HEA'larda tahrik için kullanılan elektrik makinalarının verimliliğinin, nominal torkunun, başlangıç torkunun, aşırı yük kapasitesinin, seyir hızlarında gücünün ve güvenilirliğinin yüksek olması beklenir. Dinamik tepkilerinin hızlı, yüksek hızlarda akı zayıflatma etkisinin az, hata toleransının da iyi olması istenir. Bu gereksinimler, makinenin türünden bağımsız olarak gereklidir ve makinenin topolojisi ve çalışma prensibi, bu gereksinimleri karşılamak için gereken tasarım ve kontrol yöntemlerini belirler. Tüm bu gereksinimleri karşılayan makinalar kabul edilebilir bir maliyette olmalıdır. Kullanılan elektrik motorunun yüksek bir başlangıç torku hızlanma gereksinimlerini karşılamaya, yüksek güç yoğunluğu gerekli hacmin azalmasına ve yüksek verimlilik bataryanın sağladığı menzili genişletmeye yaradığı için önemlidir. Yine motor sürücüsünün geniş bir sabit güç-hız aralığına (SGHA) sahip olması gerekir. Böylece güç yoğunluğu yüksek ve kontrolü basit, tek vitesli bir şanzıman kullanılabilir. Ancak daha geniş bir SGHA elde etmek için motor güç yoğunluğundan fedakârlıkta bulunmak gerekebilir. Yine geniş SGHA, motor sürücüsünün güç gereksinimlerinde

bir artışa yol açacaktır. Esnek sürücü kontrolü, yüksek güvenilirlik, hata toleransı ve düşük akustik gürültü, bir BEA/HEA uygulaması için elektrik motoru tahrik ünitesinin temel özellikleridir.

Tablo 2.7’de, 2010-2020 yılı itibari ile piyasaya çıkmış bazı HEA ve BEA’larda kullanılan elektrik makinalarının bir takım özellikleri gösterilmektedir. Bu verilerle araçlar hakkında bir miktar öngörü elde edilebilse de araçların tahrik sistemlerini ve/veya hibridizasyon stratejisini hesaba katmadan bu verileri karşılaştırmak zordur. Listelenen tüm makinalar, bir asenkron makina bulunduran Tesla Model S 60 dışında sürekli mıknatıslı makinelerin kullanımına geçişin olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, elektrikli araçlarda potansiyel olarak uygulanabilecek çok daha fazla makina türü vardır.

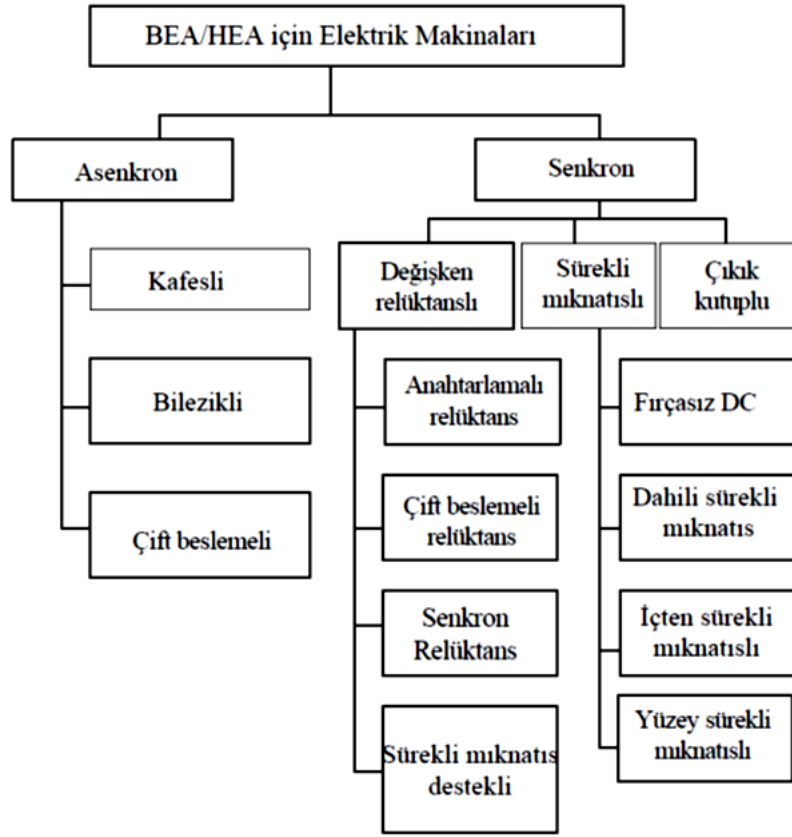
Bu makinaların tork ve güç yoğunluğunu artırmak için tasarım trendi, kutup sayısını ve maksimum hızı artırmak olmuştur böylece araç platformu içinde paketlemeye ve yakıt verimliliğini artırmaya yardımcı olunmuştur. Yüksek kutuplu tasarım, sırasıyla verimliliği artırmaya ve maliyeti düşürmeye yardımcı olan uç dönüş uzunluğunu ve mıknatıs malzemelerinin sayısını azaltır. Motor tasarımları ayrıca daha yüksek güç yoğunluklu makinalarda bakır-mıknatıs kütle oranını düşürmeye doğru ilerlemiştir. Daha yüksek maksimum hız çalışması, güç yoğunluğunu artırmaya ve sistem kütlesini düşürmeye yardımcı olur. Bunun sonucunda yük tamamen şanzıman dişlisine düşer ve motor hızı ile araç tekerlek hızına uyum sağlamak için şanzıman dişli oranının da orantılı olarak artması gerekir. Yüksek hızlı makinaların daha yüksek zıt elektromotor kuvvetlerini karşılamak için dc bağlantı gerilimini artırmak gerekir. Maksimum hızdaki sınırlama, yüksek frekanslı motor kayıpları, motor sürücüsü ve şanzıman kısıtlamalarından kaynaklanmaktadır.

Şekil 2.40 elektrikli araç uygulamaları için potansiyel motor tiplerini ve olası seçenekleri göstermektedir. Elektrikli araçlarda kullanılan temel makine türleri DC makinalar, asenkron makinalar (ASM), sabit mıknatıslı senkron makinalar (SMSM), anahtarlamalı relüktans makinalar (ARM) ve senkron relüktans makinalardır (SRM).

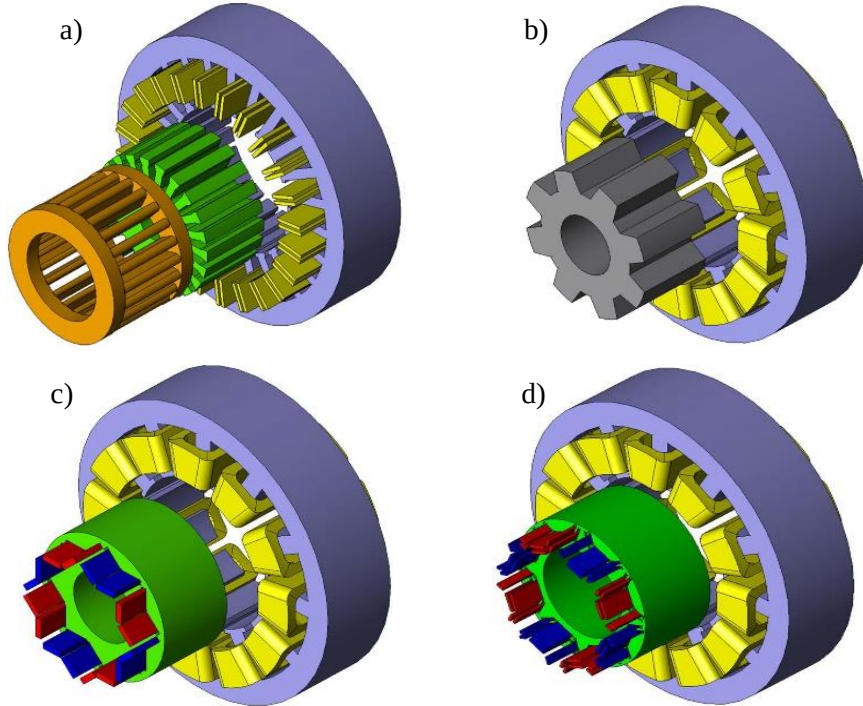
Şekil 2.41’de gösterildiği gibi en son uygulamalarda genellikle asenkron, anahtarlamalı relüktans, sürekli mıknatıslı senkron ve sürekli mıknatıs destekli senkron relüktans makinalar (SMSRM) kullanılır [100]. Bu tür gelişmiş elektrikli makina topolojileri, elektrikli araç üreticileri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu makinalar olgunlaşmış olmalarına rağmen, daha fazla geliştirmeye hala daha açıktırlar. Özellikle elektrikli araçlar için uygulama özelliklerine değinilerek dört kategori ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Tablo 2.7. Ticari olarak bulunan BEA ve HEA'larda kullanılan elektrikli makinalarının özellikleri [101].

Model	Tür	Yıl	Güç kW	Tork Nm	Hız(d/d)	SGHA	Slot/ kutup	Sargı	Soğutma	Güç yoğunluğu kW/L
Toyota Prius	HEA	2010	60	207	13.500	4,87	48/8	Dağıtılmış	Sulu	4,8
Nissan Leaf	BEA	2012	80	280	10.390	3,8	48/8	Dağıtılmış	Sulu	4,2
Tesla Model S 60	BEA	2013	225	430	14.800	2,96	-/4	Dağıtılmış	Sulu	-
Honda Accord	HEA	2014	124	306	14.000	-	12/8	Yoğunlaştırılmış	-	2,9
BMW i3	BEA	2016	125	250	11.400	3,0	72/12	Dağıtılmış	Sulu	9,1
Chevy Volt	HEA	2016	125	370	12.000	3,71	72/12	Dağıtılmış-Toka	Yağlı	-
Tesla Model 3	BEA	2017	192	410	18.000	4,02	54/6	Dağıtılmış	-	-
Toyota Prius	HEA	2017	53	163	17.000	5,4	48/8	Dağıtılmış-Toka	Sulu	5,7
Nissan Leaf	BEA	2017	80	280	10.390	3,8	48/8	Dağıtılmış	Sulu	4,2
Chevy Bolt	BEA	2017	150	360	8.810	2,2	48/8	Dağıtılmış-Toka	Yağlı	-
BMW iX3	BEA	2020	210	400	15.000	3	48/6	Toka	-	-
Nissan Leaf	BEA	2020	160	340	-	-	48/8	Dağıtılmış	Sulu	-



Şekil 2.40. BEA ve HEA'lar için mevcut motor tipleri



Şekil 2.41. a) Asenkron makine, b) Anahtarlama relüktans makina, c) Sürekli mıknatıslı senkron makina, d) Sürekli mıknatıs destekli senkron relüktans makina

2.6.1. Asenkron Makinalar

ASM, Şekil 2.41 a'da gösterildiği gibi, stator üzerindeki manyetik uyarma sargılarından ve rotor üzerindeki armatürlerden oluşur. ASM'lerin en büyük avantajı rotoruna elektrik aktarımı fırça ve komütatöre ihtiyaç duymamasıdır bu nedenle fırçasız bir sürücü elde etmek için kullanılabilir. ASM'lar Tesla Model 3 ve Model S, Model X, BMW i3, Mercedes-Benz B-Class-Electric, Toyota RAV-4 ve Nissan Leaf gibi elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmıştır. Silisyum karbür gibi yeni gelişmiş güç cihazları entegre edildiğinde, yüksek güç seviyeli bir sistemde ASM sürücülerinden faydalanılabilir [102].

ASM esas olarak sincap kafesli ve bilezikli tip olmak üzere iki tip rotor topolojisine sahiptir. Güç yoğunluğu ve tork yoğunluğu açısından sürekli mıknatıslı makinalarla rekabet edebilmesi için maliyetleri biraz artsa da, çubuk sargılı stator sargıları ve dökme bakır iletkenli rotor kafesi ile donatılmış ASM'ler olası çözümler olabilir [103]. Bu teknoloji, dünyanın önde gelen elektrik motoru ve elektrikli araç tedarikçisi Tesla firması tarafından ticari olarak kullanılmıştır.

ASM'ler imalat, işletme ve bakım maliyeti açısından sürekli mıknatıslı makinalardan daha ucuzdur. Böylece araç tahrik sistem maliyeti büyük ölçüde azaltılır. Sürekli mıknatısların olmaması sağlamlığı ve güvenilirliği artırır. Bu da ASM'lerin zorlu yol koşullarında veya ortamlarda çalışan araç uygulamaları için tercih edilmelerini sağlar. Üç fazlı ASM'ler, senkron makinelerdekinden daha yüksek bir başlangıç torkuna sahiptir. Böylece araç uygulamalarında iyi bir kalkış performansı garanti edilebilir. ASM'ler, SMSM kadar olmasa da yüksek verimlilik değerlerine ulaşabilir. Bu, tahrik sistemi kayıplarını azaltır ve tüm aracın verimliliğini artırır. ASM'nin en sorunlu kısmı ise hassas hız kontrolü diğer makine türlerine göre daha zordur.

2.6.2. Anahtarlama Relüktans Makinalar

ARM, Şekil 2.41 b'de gösterildiği gibi, çift çıkıntılı topoloji ailesine aittir. Lucas Chloride 1980'li yılların başında elektrikli araç konsepti için ARM tabanlı bir elektrikli tahrik sistemi geliştirildi [104]. Tork yoğunluğunun sınırlı olması nedeniyle pratikte ARM tabanlı elektrikli araç tahrik sistemleri pek bulunmaz [105]. Buna rağmen, ARM sürücüsü golf arabaları, skuterler veya yemek dağıtım arabaları gibi küçük boyutlu ve hizmet tipi elektrikli araçlar için hala uygundur [106].

Rotorda sargı veya sürekli mıknatıs yoktur bu nedenle rotor basit, sağlam ve güvenilir bir yapıya sahiptir. Belirli bir çekiş gücü seviyesinde 10.000 rpm'nin üzerinde yüksek hızlı tahrik elde edilebilir. Yüksek redüksiyon oranına sahip bir dişli kutusu ile birleştiğinde ARM tahriki temel olarak elektrikli araç tork ve hız gereksinimlerini karşılayabilir. Yüksek hızlı ARM, elektrikli araçlarda cer motorları için önemli bir konu olan yüksek güç yoğunluğu avantajına sahiptir [107]. Rotor mekanik arızaları, rotor manyetik köprüleri olmadan bastırılabilir. Bu elektrikli araç

uygulamaları için güvenliği ve hata toleransını artıran bir avantajdır. Çalışma periyodunda hem motor hem de generatör modları görünür. ARM elektrikli araçlar için bir çekiş motoru işlevi gördüğünde elektrik geri beslemesi ve ters torktan kaçınılmalıdır [108]. ARM'de büyük bir tork dalgalanması ve önemli elektromanyetik titreşim vardır ve bu akustik gürültü kirliliğine neden olabilir.

2.6.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalar

Sürekli mıknatısların hızlı gelişimi nedeniyle, BEA ve HEA'lar için elektrikli tahrik sistemlerinde SMSM'ler giderek daha fazla tercih edilmektedir [108]. Chevrolet Bolt, Ford Focus Electric, Hyundai Ioniq ve Jaguar I-Pace gibi birçok elektrikli araçlarda, sürüş menzili iyileştirmek için temel tahrik bileşeni olarak SMSM'ler kullanılmıştır. Bu SMSM'lerin elektrikli araçlarda iyi bir performans gösterdiğini kanıtlamaktadır. SMSM topolojisi Şekil 2.41 c'de gösterilmiştir.

Neodyum mıknatısları kullanan dahili sürekli mıknatıslı senkron motor (DSMSM), bir elektrikli tahrik aktarma organının zorlu gereksinimlerini karşılamak için elde edilebilecek benzersiz güç/tork yoğunluğu ve verimliliği nedeniyle, cer elektrik makinelerinin tasarımında ilk seçim haline gelmiştir. Rotor yapısı da sağlamdır çünkü mıknatıslar rotorun içine gömülü vaziyettedir. Nadir toprak ve ağır nadir toprak malzemelerinin kullanılması nedeniyle IPM makinaların maliyeti yüksek olsa da, başka hiçbir elektrik makinası DSMSM'lerin güç yoğunluğuna yetişemediği için tercih edilmektedir. Motorun kaçak endüktansları tarafından belirlenen daha küçük elektriksel zaman sabiti nedeniyle ASM'nin elektriksel yanıt özellikleri en hızlı olmasına rağmen, motor kontrolü açısından bakıldığında, rotor kafesi olmayan sürekli mıknatıslı makinelerin de hızlı yanıt süresine yardımcı olan düşük ataletleri söz konusudur. Daha yüksek güç yoğunluğu ile DSMSM, aynı güç derecesine sahip bir ASM'den daha küçüktür. DSMSM 'ler yine ASM'lere kıyasla rotor bakır kaybının olmaması nedeniyle daha verimlidir ve daha kolay soğutulur. Diğer taraftan ASM, yapılarında sürekli mıknatıs bulunmaması nedeniyle daha düşük maliyete ve vuruntusuz bir torka sahiptir. ASM, kalıcı mıknatısların demanyetizasyon tehlikesi olmaksızın, nominal akımın birkaç katı yüksek bir stator akımında çalıştırılabilir.

Manyetik olarak güçlü sürekli mıknatıslar, bobinler için genel makine performanslarını büyük ölçüde artıran atık bir akı sağlar. SMSM'lerin en yüksek tork yoğunluğuna, güç yoğunluğuna ve verimliliğe sahip olduğu bilinmektedir. Bunlar avantajlar elektrikli araçlar için en büyük sorunların başında gelen menzil sorunun bir nebze hafifletilmesini ve araçların sürüş menzili artırılmasını sağlayacaktır. Demanyetizasyon riskini arttıran yüksek hızlı sürüş esnasında akı zayıflatma tekniği uygulanmalıdır. Daha karmaşık kontrol stratejilerine yer verilmelidir [109]. Nadir toprak sürekli mıknatısları girdap akımı kaybı, demanyetizasyon riski ve mekanik arızalardan zarar görebilir bu nedenle elektrikli aracın sistem güvenilirliği ve hata toleransı dikkat edilmesi

gereken bir konudur. Sürekli mıknatıslar güçlü manyetik kuvvetler oluşturacağından, elektrikli aracın tahrik sisteminde önemli titreşimlere neden olabilir.

2.6.4. Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Makinalar

Son yıllarda, nadir toprak malzeme kaynaklarının kıt olduğu ve nadir toprak sürekli mıknatıslarının bazı koşullarda çalışamayacağı göz önünde bulundurularak mevcut durumda nadir toprak sürekli mıknatıs içermeyen elektrik makinaları arayışı başlamıştır. SMSRM'ler bahsedilen nedenlerden dolayı elektrikli araçlar için iyi bir tercih olacaktır [110]. Çıkık kutuplu rotor yapısının avantajını kullanır bu nedenle rotor yapısı, büyük relüktans torku üretmek amacıyla yüksek relüktansa sahip olacak şekilde tasarlanabilir [111]. Ayrıca, SMSRM'lerde nadir toprak içermeyen sürekli mıknatısların uygulanması genel performansın iyileştirilmesine özellikle SMSM'lerdekine benzer şekilde kalkış torkunun artırılmasına yardımcı olur. Böylece Şekil 2.41 d'de gösterildiği gibi, SMSRM'ler adı verilen bir makina tipi ortaya çıkar. Bu makine tipi, oldukça az performans düşüşü olan düşük maliyetli elektrikli araç sürücü sistemleri için oldukça uygundur [112].

3. SÜRÜŞ ÇEVİMLERİ VE TASARIMI

Bir sürüş çevrimi zamanın bir fonksiyonu olarak bir araç hızı programı ile tanımlanır [113]. Sürüş çevrimleri, araçların performansını örneğin yakıt tüketimi, elektrikli araç otonomisi ve kirletici emisyonlar gibi çeşitli kriterler açısından değerlendirmek için farklı ülkeler ve kuruluşlar tarafından oluşturulur [114]. Sürüş çevrimleri araçların değerlendirilmesi için önemli bileşenlerdir ve sürüş çevrimi, araçların maliyetini, yakıt tüketimini ve emisyonlarını etkilediği için araç tasarımında temel bir rol oynar [115]. Geçmişte her ne kadar sürüş çevrimleri esas olarak araçların egzoz gazı emisyonlarını değerlendirmek için kullanılmaktaydılar ise de günümüzde aynı zamanda araçlar için farklı kontrol stratejilerini değerlendirmek için de kullanılabilirler. Ayrıca sürüş çevrimleri, araç tasarımında ve bileşenlerin boyutlandırılmasında da kullanılmıştır [116].

Sertifikasyon sürüş çevrimleri bazen gerçek dünyadaki sürüşü temsil etmedikleri için eleştirilir; bu da, bunların değerlendirme ve tasarım için kullanılmasının sorgulanabileceği anlamına gelir [117]. Temsili bir sürüş çevrimi genellikle, sürüş çevriminin ortalama hızı veya seyir modundaki zaman oranı gibi çeşitli istatistiksel ölçümlerin gerçek dünyadaki sürüş koşullarına yakın olması gerektiği anlamına gelir. Bugün bir sürüş döngüsü temsili olarak başarılı olsa bile, bölgeden bölgeye değişiklikler gösteren; yol ağının gelişmesi, araç filosu kompozisyonundaki değişiklikler, trafikte artan araç sayısı ve sürüş davranışındaki değişiklikler gibi nedenlerle gelecekte de bu başarılı temsili sürdürebileceği garanti edilemez [118]. Bu nedenle var olan çevrimlerin yenilenmesi veya yeni sürüş çevrimlerine ihtiyaç duyulması kaçınılmaz olacaktır.

Bir araç tasarlarken yalnızca tek bir sürüş çevrimini referans almak ve aracın bu özel sürüş çevrimi için optimize edilmesi önemli bir risk oluşturabilir. Ortaya çıkan tasarım tüm gereksinimleri karşılayamayacağı gibi diğer sürüş çevrimlerinde gerekenin altında bir performans sergileyebilir [119]. Böyle bir durumda araç üreticisinin bir çevrim şartlarına göre sadece motorun sınırlı çalışma bölgelerine odaklanması anlamına gelir ki, diğer sürüş çevrimlerinde motorun farklı çalışma bölgelerinde tahriki gerektiğinde, farklı ve istenilmeyen egzoz gazı emisyonları ve yakıt tüketimi özellikleri ile karşılaşılabilir.

Sürüş çevrimlerinin kullanımı ile farklı araçların aynı sürüş çevrimini izlemesini sağlanarak sonuçlar; örneğin, emisyon seviyelerine veya yakıt tüketimine göre araçları sıralamak için, karşılaştırılır [120]. Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (New European Driving Cycle, NEDC) gibi sertifikasyon sürüş döngülerinden elde edilen yakıt tüketimi rakamları böyle bir karşılaştırmadır. Sürüş çevrimlerinin başka bir kullanımı da belirli kontrol stratejilerini değerlendirmek ve karşılaştırmaktır. Ancak, sürüş döngüleri arasında doğrudan bir karşılaştırma her zaman adil olmayabilir. Bunun nedeni, farklı sürüş çevrimlerinde aracın farklı şekilde tahrik edilmesi ve araç parametrelerinin araç üzerindeki etkisini belirlenmesidir. Bu nedenle, bileşenlerin kontrolü ve verimliliği ile araçta farklı güç taleplerine neden olabilecek araç parametreleri arasında ayrım

yapılamaz. Ancak tüm sürüş çevrimleri benzer araç uyarımına sahip olmaları durumunda sürüş çevrimlerinin karşılaştırılması daha adil olacaktır çünkü o zaman araç parametrelerinin sürüş çevrimi talebi üzerindeki etkisi benzer olacaktır. Böyle bir durumda araç kontrolü ve bileşen verimliliği, kontrolün veya bileşenlerin özellikle hangi sürüş çevrimleri için uygun olduğunu ve hangi sürüş çevrimlerinde yetersiz performans sergilediklerini görmek için değerlendirilebilir. Böylece belirli bir sürüş çevriminin diğer sürüş çevrimlerine kıyasla neden daha iyi veya daha kötü olduğu daha fazla analiz edilebilir [121].

Sürüş çevrimleri araç simülasyonlarında içten yanmalı motorların, şanzımanların, elektrikli tahrik sistemlerinin, bataryaların, yakıt hücresi sistemlerinin ve benzer bileşenlerin performansını tahmin etmek için de kullanılırlar. Çekiş gücü ve buna bağlı olarak ana güç aktarma sistemi özellikleri açısından aracın tasarım özelliklerini belirlemek için ilk kriterler azami hız ve tırmanabilirlik gibi performans parametreleridir. Bundan sonra, güç boyutlandırma tasarım aşaması, aracın önceden belirlenmiş bir hız sinyalini "takip etme" yeteneğinin doğrulanmasını gerektirir. Çevrimler, aracın enerji boyutlandırma tasarım aşamasında, birim mesafede tüketilen birim enerjinin ifade edilmesinde de kullanılır. Bununla birlikte bu tür veriler çevrim seçiminden etkilenir ve farklı çevrimlerin kullanılmasının farklı sonuçlara yol açabileceği kolayca doğrulanabilir [122]. Genel olarak sürücü yetenekleri, sürüş bağlamı (şehir, kırsal, otoyollar), trafik koşulları, ortam sıcaklığı vb. dahil olmak üzere enerji tüketimi üzerinde çok sayıda faktör etkilidir. Bu tür değişkenlik son geliştirme aşamasında her türlü aracın yol üzerinde kapsamlı test edilmesi ihtiyacını belirleyen nedendir. Bu kritik aşamanın maliyetini azaltmak için sanal test ve test ortamı metodolojileri kullanılmaktadır ve bu aşamada kontrollü ortamlarda girdi olarak temsili bir sürüş çevrimine ihtiyaç vardır. Bir sürüş çevrimi simülasyon ortamı, güç emici şasi dinamometresi ve/veya test ortamı gibi laboratuvar koşullarında araç performansını tekrarlanabilir bir şekilde değerlendirmeyi amaçlayan standartlaştırılmış bir prosedür olarak düşünülebilir. Ana giriş verileri olarak bir zaman-arac hızı sinyali içermesi gerekir ancak geniş bir sınır koşulları kümesi de tanımlanabilir; dinamometre ayarları, vites değiştirme noktaları, referans atmosfer koşulları (rüzgar, nem, basınç, sıcaklık,...), araç koşulları (lastik basıncı, aydınlatma, yağ viskozitesi..), “soğuk çalıştırma” koşulları (hem İYM hem de EA araçları için farklı nedenlerle kritik) ve uygulamanın performansını etkileyen herhangi bir parametre. Bu nedenle tek bir sürüş çevriminin aracın ömrü boyunca kullanılabileceği tüm olası koşulları temsil edemeyeceği ancak bazı tavizlerin gerekli olduğu açıktır. Sürüş çevrimleri ile ilgili araştırmanın 1970'lerin başında başlamasına rağmen sürüş çevrimlerinin tanımı bilimsel ve teknik literatürde hala geliştirilmekte olan bir konudur. Mevzuat bağlamında, standartlaştırılmış sürüş çevrimleri üzerinden kabul testi planları, tip onayı prosedürlerine dâhil edilmiştir. Değerlendirilen parametreler esas olarak aracın çevresel etkisinin değerlendirilmesi ile ilgilidir; İYM testlerinde, öncelik aslında sera gazı emisyonlarıyla ilgili olan hava kirleticileri ve yakıt tüketimine odaklanmıştır. Şu anda dünya çapında çok sayıda

sürüş çevrimi kullanılmaktadır; örneğin AB döngüleri, ABD döngüleri, Japon döngüleri. Bu çevrimler esas olarak şu noktalarda farklılık gösterirler:

- Araç türü (Farklı araç sınıfı – örneğin hafif veya ağır hizmet, düşük güçlü araç, motosikletler),
- Yük modelleri (Geçici fazların varlığı),
- Uygulanabilirlik bağlamı (Şehir içi, şehir dışı, otoyollar),
- Beklenen araç görevi (Örneğin özel kullanım, yük teslimatı, otobüs servisi vb.).

En son formülasyonda, tam EA ve HEA performansları, elektrik enerjisi tüketimi ve birleştirilmiş yakıt tüketimi için ağırlık formülünün kullanılması yoluyla da dikkate alınabilir (daha fazla ayrıntı için bkz. Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UNECE) Yönetmeliği R101). Göz önünde bulundurulması gereken önemli bir sınırlama, herhangi bir sürüş çevriminin süresinin ve/veya toplam uzunluğunun (koşul mesafesi açısından) hem simülasyon hem de test yatağı uygulaması sırasında pratik ihtiyaçlarla sınırlı olmasıdır; tipik süre 500–1500s aralığında, tipik mesafeler ise 5–15 km aralığındadır.

EA'lar, performanslarının değerlendirilmesi için yeni parametreler sunar ve geleneksel araçlara kıyasla belirli, yeni kritikliklerden etkilenir. Bu tür yeni faktörlerin kısa bir listesi şunları içerir:

- Sürücülerin enerji tüketimlerini optimize etmek için tarzlarını değiştirmelerine neden olabilecek, frenleme sırasında enerji geri kazanım olasılığı
- Sınırlı menzil (şu anda piyasada bulunan çoğu EA için en uygun koşullarda yaklaşık 150 km), sürücüler özellikle daha sakin ve stabil sürüş tarzına teşvik edebilir. Bazı özel koşullar (örneğin, ara sıra yüksek günlük mesafe sürüşü, şarj noktalarının olmaması) özellikle "menzil kaygısı" olgusunu belirlemededir.
- Farklı akustik duyular, gaz keleşliği hissi ve güç aktarma organından gelen tork mevcudiyeti nedeniyle araç performanslarının farklı bir "algısı"
- Yardımcı sistemlerin kullanımına karşı aracın farklı bir duyarlılığı.

Bu tezde, hem literatür bilgisi hem de deneysel sürüşlerden gelen veriler kullanılarak temsili çevrimler simüle edilmiştir. Burada temel amaç, elektrikli araçların performans değerlendirmesi için bir sürüş çevrimi alt kümesinin tanımlanması olmuştur.

3.1. Sürüş Çevrimlerinin Sınıflandırılması

Sürüş çevrimleri, kökenlerine ve uygun uygulama alanlarına bağlı olarak farklı şekillerde sınıflandırılabilir.

3.1.1. Yasama Karakteristiği

Ana kapsamını tanımlar (düzenleme ve/veya araştırma)

- Yasal sürüş çevrimleri, dikkate alınan devletlerin yetki alanlarına göre tip onayı için kullanılır. Ana örnekler, Avrupa'da yasal değeri olan NEDC sürüş döngüsü hem ECE15 (Şehir İçi Sürüş Çevrimi – Düşük Güçlü Araçlar) segmenti hem de EUDC (Şehir Dışı Sürüş Çevrimi) segmenti dahil), Japonlar için 10-15 mod döngüleri, FTP-72, FTP-75 (Federal Test Prosedürleri) ve benzeri gibi ABD döngüleridir.
- Yasal olmayan sürüş çevrimleri, bilimsel veya uygulamalı araştırmalar için oluşturulmuştur ve araç performanslarını ayrıntılı olarak araştırmak için otomobil üreticileri, geliştiriciler ve araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Yakıt tüketimi ve egzoz emisyon tahmini için çevrimler kullanılabilir. Bir örnek olarak, Artemis çevrimleri, Avrupa sürüş koşullarını temsil edecek şekilde tasarlanmıştır ve hedeflerden biri bir Avrupa emisyon envanterinin oluşturulmasıdır. Geçerliliği geniştir ama buna rağmen birkaç ana veri alt kümesi de önerilmiştir (ana döngüler kentsel, kırsal yol ve otoyollardır). Bazı sürüş çevrimleri, Avrupa Birliği'nde tercih edildiği gibi teorik olarak türetilirken, diğeri kabul edilen temsili bir sürüş modelinin doğrudan ölçümleri ile de oluşturulabilir.

3.1.2. Sinyal Kaynağı ve İlgili Şekil

Sentetik çevrimler girdi olarak kullanılan verilere bağlı olarak, ilk bakışta iki ana kategoriye ayrılabilir.

- Tipik veya poligonal sürüş çevrimleri, bir dizi sabit durum modundan oluşur. Erken araştırma yıllarından beri, bu tür sentetik çevrimlerin geçici ivmeleri doğru bir şekilde tanımlamadığı ve bu nedenle tahmini çıktı verileri (örneğin emisyonlar) açısından ayrıntı kaybına neden olduğu konusunda genel bir fikir birliği vardır [122]. NEDC, poligonal sürüş döngüsünün bir örneğidir.
- Transient sürüş çevrimleri, uygun prosedürler kullanılarak işlenen, segmentlere ayrılan ve bir araya getirilen karayolu sürüş verilerinden geliştirilir. Avrupa Geçici Çevrimi (European Transient Cycle, ETC), geçici sürüş çevrimine bir örnektir. Bu döngüler aynı zamanda türetilmiş “gerçek dünya” olarak da tanımlanır. Genellikle rakım değışimi, gerçek dünya verilerinden gelse bile sürüş döngülerinin bir parçası değildir.

3.1.3. Araç Sınıfı ve/veya Güç Sınıfı

Herhangi bir araç için, tipik hızlanmaların ve ulaşılabilir hızın özellikleri güç/kütle oranına, kullanıcılardan farklı tipik kullanımına ve özel sınırlamalara bağlıdır. Bu nedenle, her sürüş çevrimi için uygulanabilirlik alanı netleştirilmelidir. Ana sınıflar şunlardır:

- Motosikletler
- Hafif araçlar
 - N1¹–M1² sınıfları
 - Düşük güçlü sınıflar
- Ağır araçlar

3.1.4. Çevrime Özel Uygulanabilirlik

Çevrimin geliştirildiği bilgilere bağlı olarak, çevrimin uygulanabilirliği belirli bir kullanım için tamamen genel veya özel olabilir. Bazı örnekler:

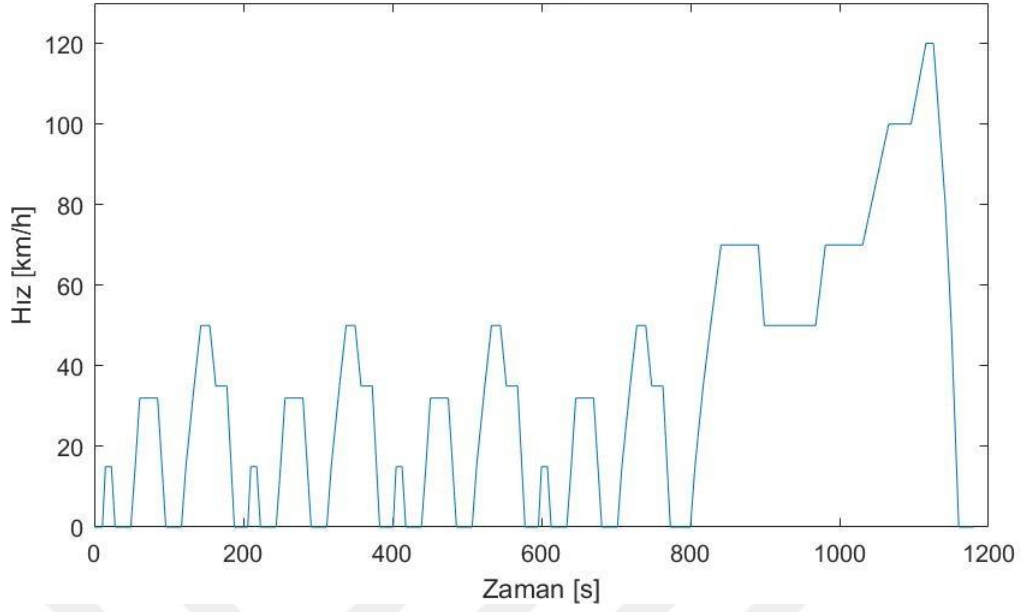
- Genel Uygunluk çevrimleri: Giriş olarak kullanılan verilerin genliği nedeniyle, geniş bir alan için uygun birkaç döngü sunar. Burada amaç belirli bir deseni temsil etmek yerine büyük giriş veri kümesinin ortalama sonuçlarını kullanmaktır.
- Hizmete özgü çevrimler: Giriş verileri güçlü değişkenliklere sahip bir sürüş durumuyla ilgili ise, geçerliliği genel olamaz, ancak ortaya çıkan çevrim belirli durumun analizi için kullanılabilir.
 - Teslimat hizmeti çevrimleri: Kentsel bağlamda küçük kargoların teslimatı, sık durmalarla karakterize edilen ve dolayısıyla genel olarak yüksek yakıt tüketimine neden olan belirli bir hizmettir.
 - Otobüs hizmet çevrimleri: Toplu taşıma araçları sistematik durmalara tabi tutulur, böylece çevrim hem geçici faktörlerle (trafik) hem de bilinen faktörlerle (durma aralıkları) belirlenir, bu nedenle diğer ağır araçlardan farklı özel çevrimler geliştirilmiştir. Manhattan otobüs döngüsü, bu tür sürüş döngüsü sınıfının bir örneğidir.

3.1.5. Sürüş Çevrim Örnekleri

Bir önceki bölümlerde açıklanan ana ayrımları açıklığa kavuşturmak için birkaç sürüş çevrimi örneği sunulmuştur. Şekil 3.1 ve Şekil 3.3 benzer uygulamalar için uygun iki çevrimi temsil etmektedir (genel şehir içi/şehir dışı kullanımında hafif araç) görünüşleri arasındaki karşılaştırma, poligonal çevrimlerin ve gerçek dünyadan türetilen transient çevrimlerin seçimiyle ilgili farklılıkları gösterir. Düşük güçlü araçlar için alternatif bir yüksek hızlı çevrimin Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

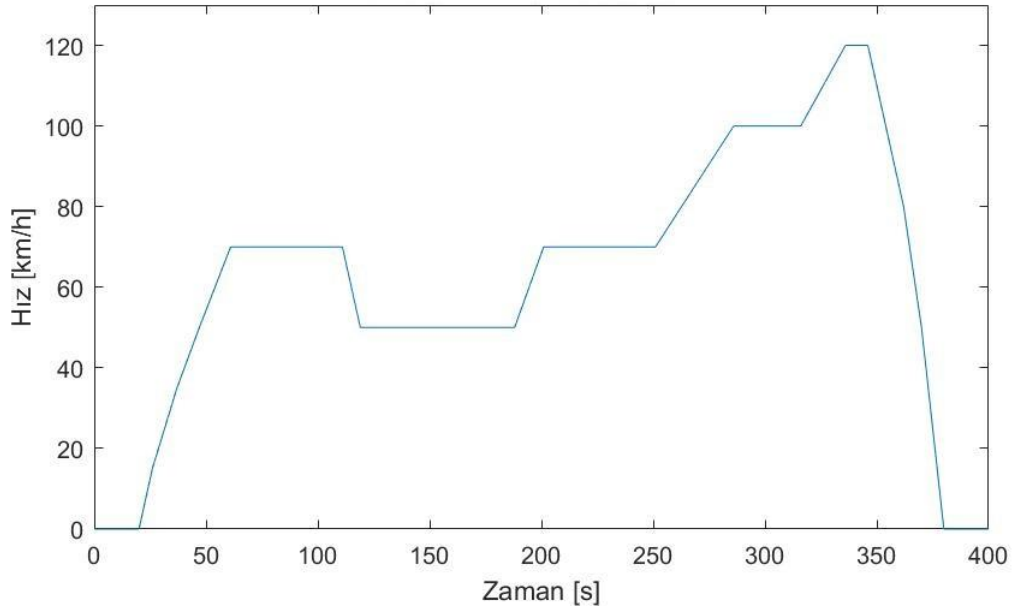
¹ Yolcuların taşınması için tasarlanmış ve yapılmış, sürücü koltuğuna ek olarak en fazla sekiz koltuktan oluşan ve azami ağırlığı (Teknik olarak izin verilen azami yüklü ağırlık) 3,5 tonu geçmeyen araçlar.

² Azami ağırlığı 3,5 tonu geçmeyen, eşya taşımaya mahsus araçlar.



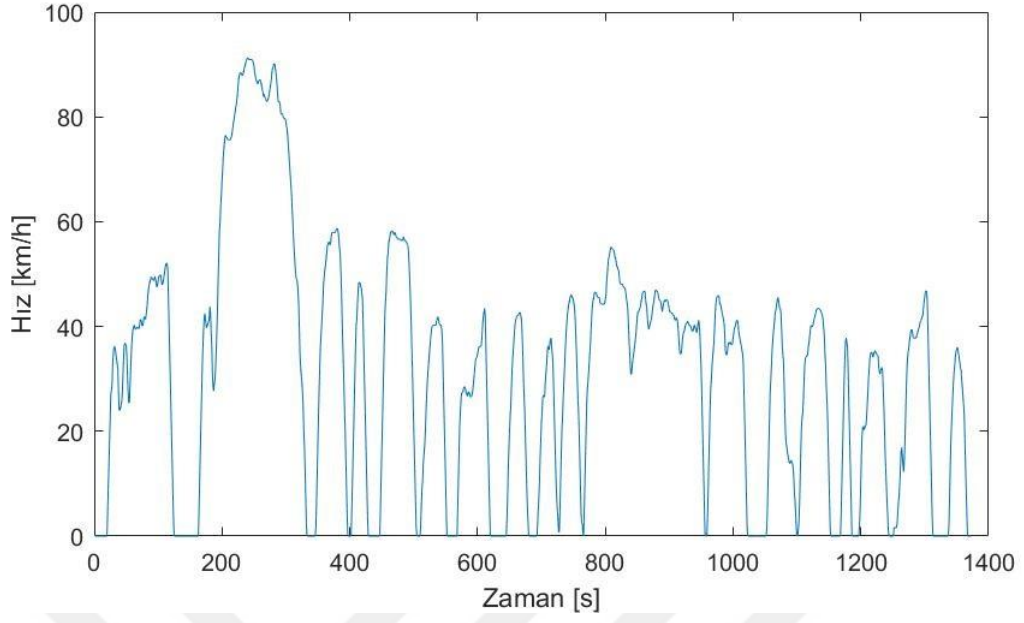
Şekil 3.1. NEDC, Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (New European Driving Cycle)

NEDC düşük hızlı bir çevrimin dört döngüsünden (0-800s) ve yüksek hızlı bir döngüden (800-1400s) oluşur. Avrupa N1 ve M1 araçları için referans çevrimdir. Farklı alternatifleri türetilabilir, örneğin ilk boşta kalma süresi azaltılabilir. Toplam mesafe yaklaşık 11 km olup tipik bir döngüdür. Yüksek hızlı faz için alternatif bir çevrim Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



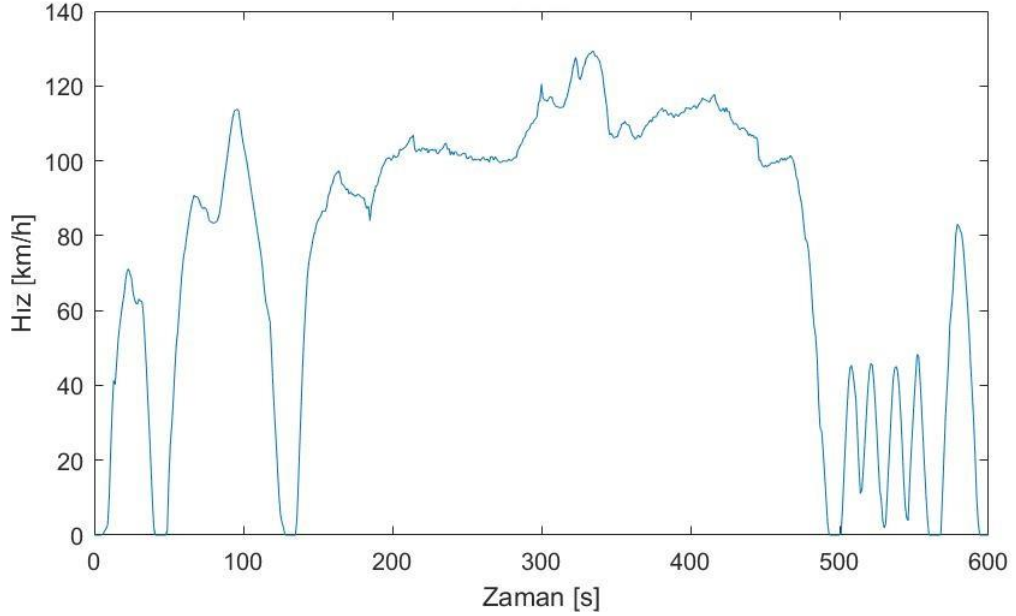
Şekil 3.2. EUDC, Şehir Dışı Sürüş Çevrimi (Extra Urban Driving Cycle)

EUDC şehir dışı sürüş aşamasının analizi için uygundur.



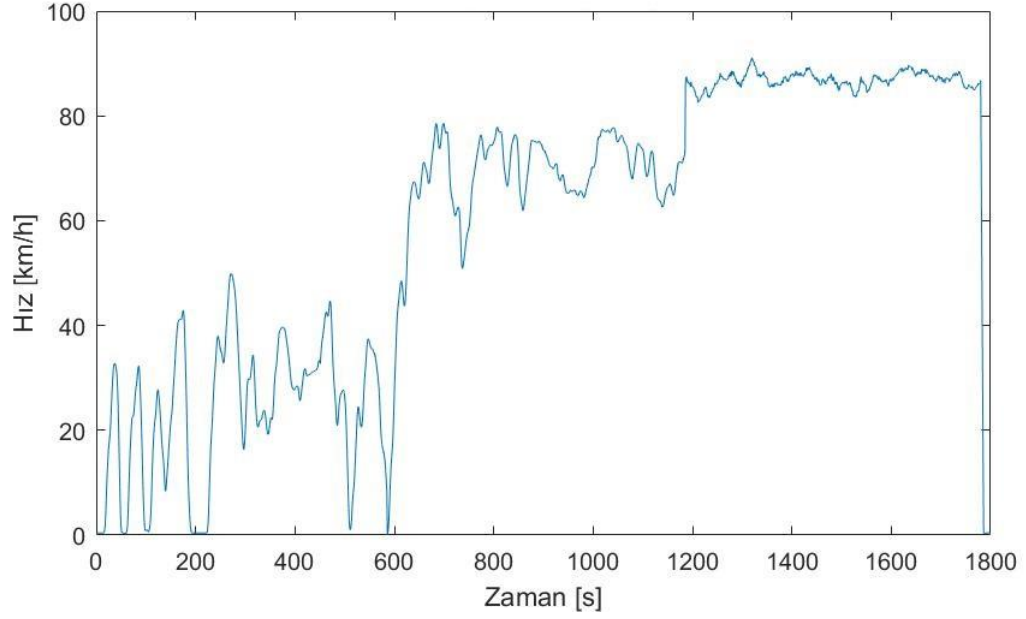
Şekil 3.3. FTP-72 döngüsü, Federal Test Prosedürü 72

Amerika Birleşik Devletleri'ndeki hafif araçların emisyon tahmini için kullanılır. NEDC'ye benzer bir yasal çevrimdir ancak transient sinyal döngülerinden oluşur. Yüksek hız segmenti Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



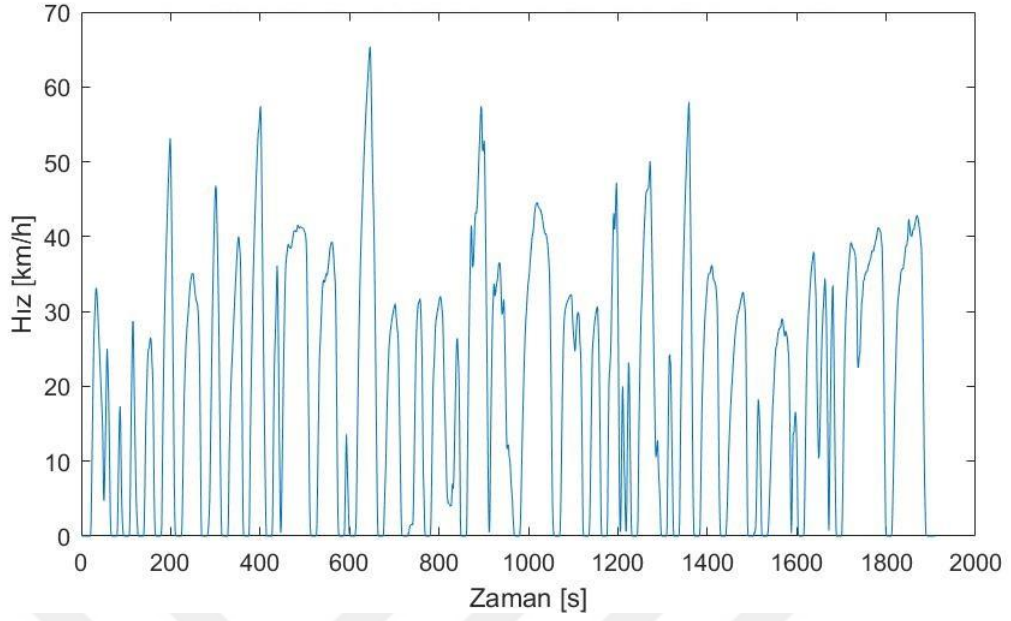
Şekil 3.4. US06 Çevrimi, Ek Federal Test Prosedürü

US06 çevrimi, hafif araçların emisyon tahmini için kullanılır. Yüksek hızlı içeriği ile FTP–72 test aşamasının tamamlayıcısıdır. Şekil 3.5 ve 3.6 ağır araçlara uygulanabilen iki çevrim örneğini göstermektedir. Birincisi Avrupa Transient Çevrimi (ETC), esas olarak dizel motor emisyonunun değerlendirilmesi için geliştirilmiş bir yasal çevrimdir. İkincisi, otobüs seferlerine özeldir, bu nedenle desenleri, ana durakların çok benzer mesafelerle ayrıldığını gösterir.



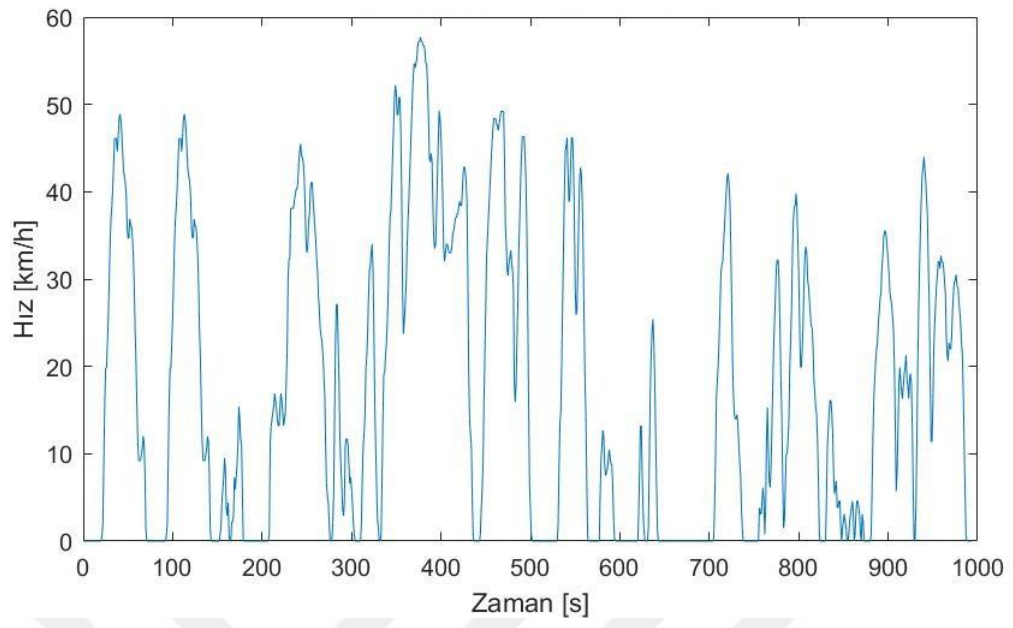
Şekil 3.5. ETC, Avrupa Transient Çevrimi

ETC transient hız sinyallerinden oluşan yasal bir çevrimdir. Ağır nakliye araçları için uygundur.

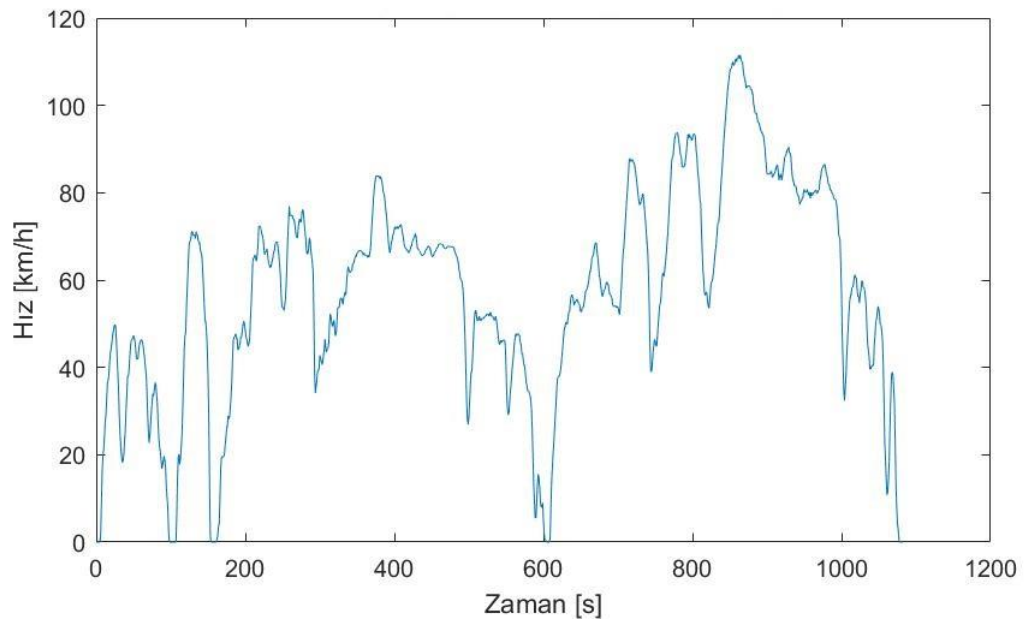


Şekil 3.6. West Virginia Üniversitesi tarafından geliştirilen Orange County Otobüs Çevrimi

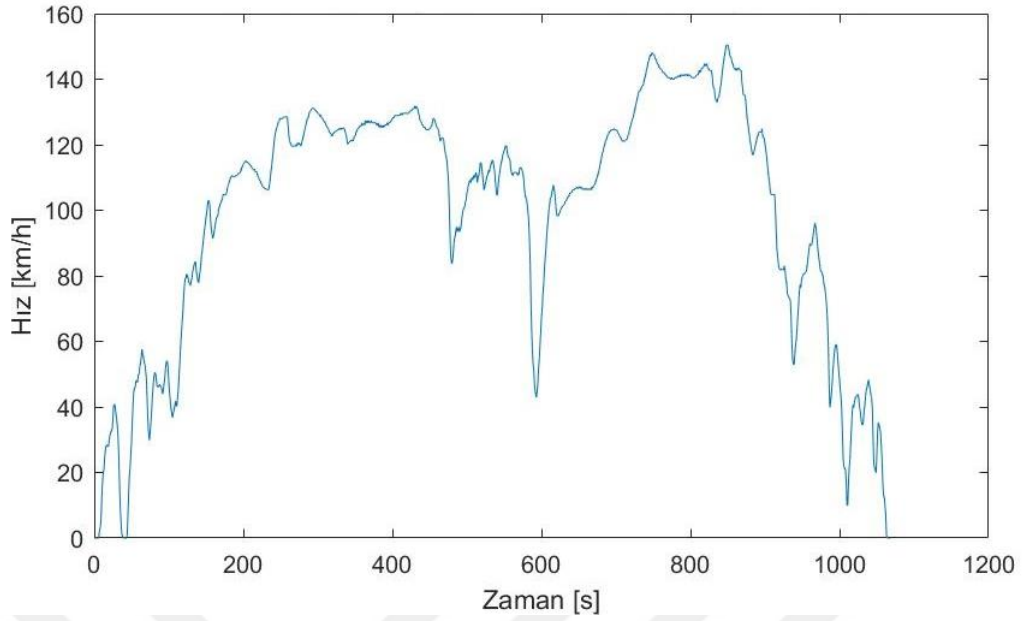
Orange County Otobüs Döngüsü, otobüs hizmeti için beklenen tipik dur-kalk özelliği gösterir. Şekil 3.7-3.9, ARTEMIS araştırma projesinin sonuçlarını göstermektedir. Özellikle, bu eksiksiz dizilim, kentsel, kırsal yol ve otoyol dizisini içerir toplam mesafesi yaklaşık 52 km'dir. ARTEMIS projesi, kapsamlı araç testlerinden gelen verileri dikkate aldığından, diğer bağlamlar ve diğer kategoriler için başka döngüler geliştirilmiştir. Ayrıca, sürüş çevrimi analizi esas olarak bir emisyon değerlendirme yöntemi olarak tasarlandığından, sürüş verileri, İYM performansları ve hava emisyonunun korelasyonu üzerinde güçlü araştırma çalışmaları yoğunlaştırılmıştır, bu kısım mevcut çalışmada elektrikli araçlar üzerine yoğunlaşıldığı için dahil edilmemiştir.



Şekil 3.7. Artemis Kentsel Sürüş Çevrimi



Şekil 3.8. Artemis Kırsal Yol Sürüş Çevrimi

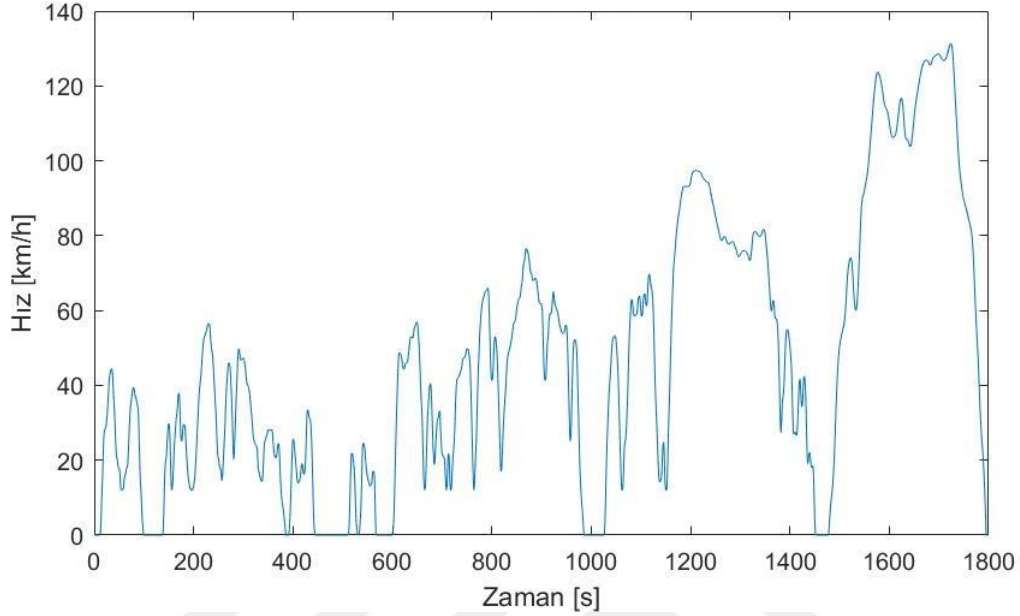


Şekil 3.9. Artemis Otoyol 150 km/h Sürüş Çevrimi (ArtMW150)

Mevzuat çevrimleri hakkında önemli bir not düşmek gereklidir. Globalleşen dünya şartları ile herhangi bir yerde üretilen araçların hemen hemen tüm dünyada kullanılabilir olması birçok üreticinin farklı ülke ve kıtalarda üretim tesislerinin olması gibi nedenlerden dolayı dünya çapında bir ölçekte test metodolojilerinin uyum sağlar hale gelmesini zorunlu kılmaktadır. Bu ihtiyaç sonucunda UNECE, Dünya Hafif Hizmet Test Prosedürlerini (WLTP) geliştirme faaliyetlerine başlamış ve 1998 yılında UNECE İç Ulaştırma Komitesi tarafından kabul edilmiştir [123]. Anlaşma, 25 Haziran 1998 tarihinde Çin, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri tarafından da kabul edilmiş olup Avrupa Birliği tarafından onaylanmıştır [124]. WLTP hafif hizmet araçlarının tip onayı için tamamlayıcı bir test prosedürü oluşturur. Kasım 2007'deki 29. oturumda, WLTP'nin geliştirilmesi için bir yol haritası hazırlamak üzere Kirlilik ve Enerji Çalışma Grubu altında gayri resmi bir WLTP grubu kurmaya karar verildi. Çeşitli toplantılar ve yoğun tartışmalardan sonra, WLTP Haziran 2009 yılında 3 aşamadan oluşan ve daha sonra birkaç kez revize edilen ve aşağıda ana görevleri verilen ilk yol haritası sunulmuştur [125].

- Aşama 1 (2009–2014): Kriter bileşikleri, CO₂, yakıt ve enerji tüketiminin ortak ölçümü için dünya çapında uyumlu hafif hizmet sürüş çevriminin ve ilgili test prosedürünün geliştirilmesi.
- Aşama 2 (2014–2018): Düşük sıcaklık/yüksek irtifa test prosedürü, dayanıklılık, hizmet içi uygunluk, yerleşik tanılama (OBD) için teknik gereksinimler, mobil klima (MAC) sistemi enerji verimliliği, çevrim dışı/gerçek sürüş emisyonları.
- Aşama 3 (2018-...): Emisyon sınır değerleri ve OBD eşik sınırları, referans yakıtların tanımı, bölgesel gereksinimlerle karşılaştırma.

1 Haziran 2017 ve 5 Kasım 2018 tarihlerinde WLTP için birinci ve ikinci eylem planları yayımlandı [14,15]. Şekil 3.10'da WLTP çevrimi Class 3 gösterilmiştir.



Şekil 3.10. WLTP çevrimi Class 3

3.2. Sürüş Çevrimlerinin Karakterizasyonu

Sürüş çevrimi özelliklerinin analizi, zaman-hız sinyali üzerinden hesaplanacak bir dizi sayısal parametrenin tanımlanmasını ve değerlendirilmesini gerektirir. Bu işleme genel olarak birden çok nedenden dolayı ihtiyaç duyulur. Bunların başlıcası, bir sürüş stilinin ve bir sürüş bağlamının farklı özelliklerini sayısal olarak ayırt etme yeteneğidir. Kısacası, bir sinyalin veya parçalarının seçilmesini ve kümelenmesini sağlamak.

3.2.1. Sürüş Çevrimlerini Tanımlayan Parametreler

Farklı ölçümlerden gelen sinyallerin karşılaştırılması için sayısal parametrelere ihtiyaç vardır. Sentetik sürüş çevrimi bir tür sıkıştırma algoritmasından geldiği için, girdi verilerinin ve çıktı çevriminin sayısal özelliklerinin tanımlanması, sıkıştırılmış çevrimlerin temsil edilebilirliğini doğrulama imkânı da sunar. Bu bölümde, çok sayıda olası göstereyi tanımlamak için birkaç referans makale kullanılarak sayısal parametreler tanımlanacaktır. Bunların çoğu, sürüş çevrimleri üzerine eski araştırma faaliyetleri için oluşturulan art.kinema yardımcı programına atıfta bulunmaktadır [16 - 18]. Sürüş segmenti/çevrimi fiziksel boyutlarına bağlı olarak altı ana parametre kategorisine bölünebilir. Bunlar; mesafe, zaman, hız, ivme, duraklama (hız yokluğu) ve dinamiklerdir. Tablo 3.1'de altı ana kategori ve bu kategorilerdeki tüm parametreler gösterilmiştir.

Tablo 3.1. ARTEMIS içinde kullanılan 40 parametrelerin tam listesi [128].

Grup	Parametre	Birim
Mesafe ile ilgili	Toplam mesafe	m
Zamanla ilgili	Toplam süre	s
	Sürüş süresi	s
	Seyir süresi	s
	Hızlanmak için harcanan sürüş süresi	s
	Yavaşlamak için harcanan sürüş süresi	s
	Frenlemede harcanan süre	s
	Durma süresi	s
	Yüzde olarak sürüş süresi	%
	Yüzde olarak seyir süresi	%
	Yüzde olarak hızlanmak için harcanan sürüş süresi	%
	Yüzde olarak yavaşlamak için harcanan sürüş süresi	%
	Yüzde olarak frenlemede harcanan süre	%
	Yüzde olarak Durma süresi	%
Hızla ilgili	Ortalama yolculuk hızı	km/h
	Ortalama sürüş hızı	km/h
	Hızın standart sapması	km/h
	Hız: 75. – 25. yüzdelik dilim	km/h
	Maksimum hız	km/h
İvmelenme ile ilgili	Ortalama ivme	m/s ²
	Ortalama pozitif ivme	m/s ²
	Ortalama negatif ivme	m/s ²
	İvmelenmenin standart sapması	m/s ²
	Pozitif ivmenin standart sapması	m/s ²
	İvmelenme: 75. – 25. yüzdelik dilim	m/s ²
	İvmelenme sayısı	adet
	Km başına hızlanma sayısı	/km
Durma ile ilgili	Duraklama sayısı	adet
	Km başına duraklama sayısı	/km
	Ortalama durma süresi	s
	Duraklar arasındaki ortalama mesafe	m
Dinamikler ile ilgili	Göreceli pozitif ivme (RPA)	m/s ²
	Pozitif kinetik enerji (PKE)	m/s ²
	Göreceli pozitif hız (RPS)	m/s
	Göreceli gerçek hız (RRS)	m/s
	Göreceli kare hız (RSS)	m/s
	Göreceli pozitif kare hız (RRSS)	m/s
	Bağıl kübik hız (RCS)	m/s
	Göreceli pozitif kübik hız (RPCS)	m ² /s ²
	Bağıl gerçek kübik hız (RRCS)	m ² /s ²
	Ortalama ivme karesi (RMSA)	m ² /s ²

Konuyu tanıtmak için sürüş çevrimi analizi bağlamında tur ve mikrotur kelimelerinin anlamlarını da tanımlamak gerekir.

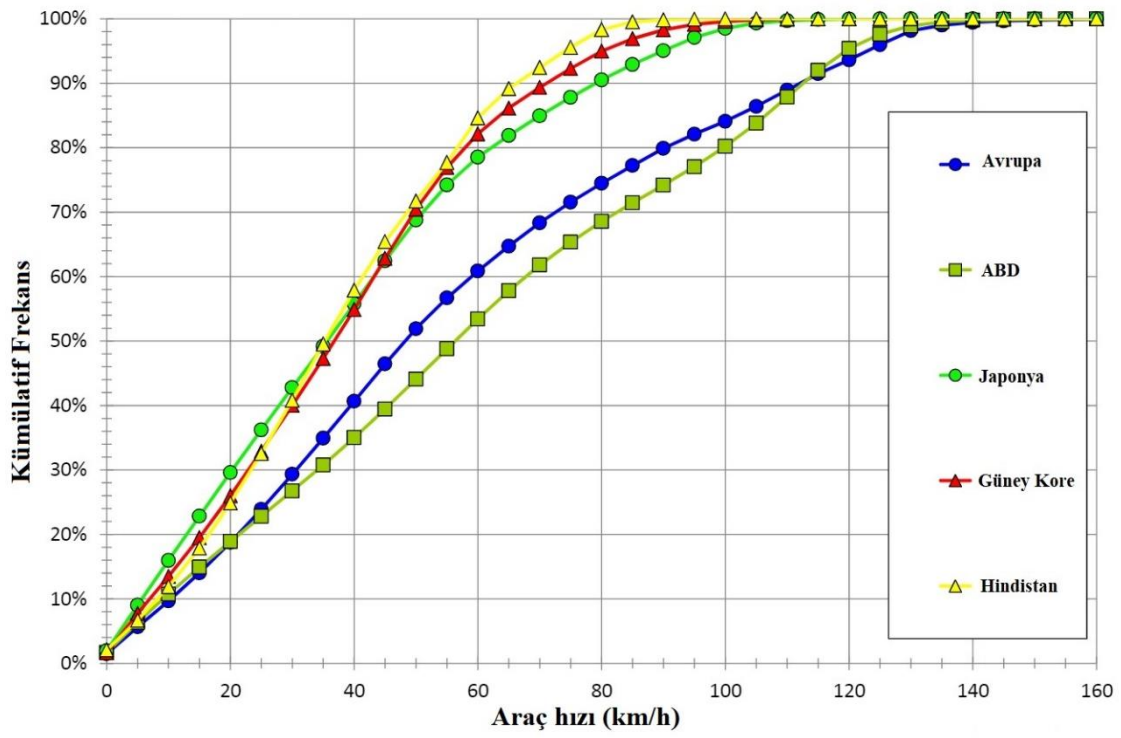
- Tur, bir kontak açma ve kapama olayı arasında ölçülen bir dizidir.
- Mikrotur, iki duraklama olayı arasında ölçülen bir dizidir (örneğin, trafik ışığından trafik ışığına). Bu nedenle bir yolculuktaki mikroturların sayısı duraklamaların sayısına eşittir.

3.2.2. Performans Dağılım Analizi

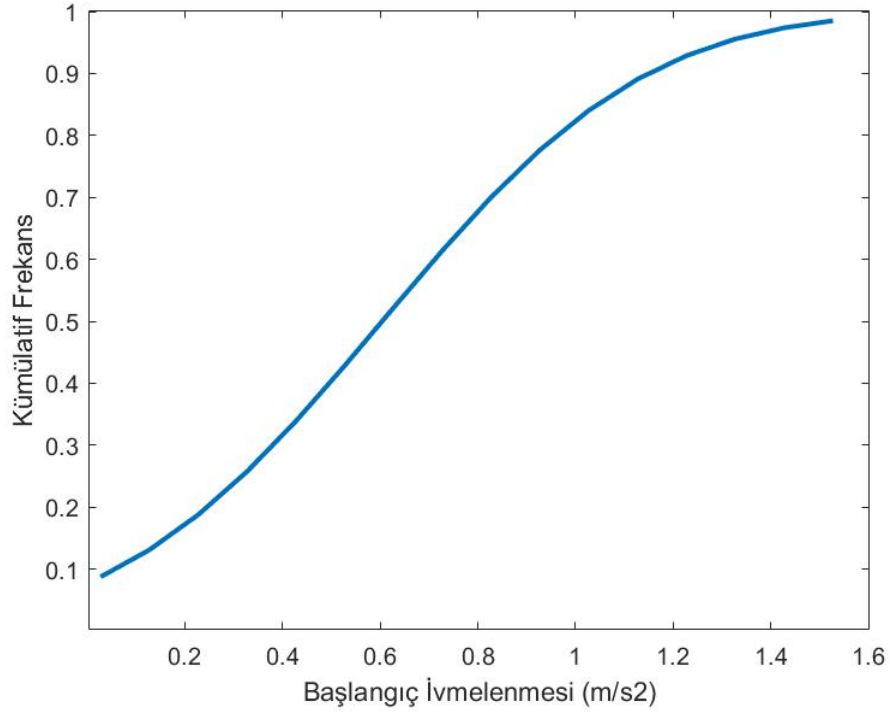
Yukarıda açıklanan sayısal parametreler, çevrim analizinin nihai, ortalama sonuçlarına ilişkin toplu bir bilgi sunar. Çevrimin nicel bilgiler temelinde karşılaştırılması, çevrimleri tanımlayan daha büyük bir veri setini hesaba katmayı gerektirir, bu nedenle literatürde genellikle geniş bir değer aralığı üzerinden veri dağılımının hesaplanması gerçekleştirilir. Dağılım, mutlak göstergeler (örneğin zaman, mesafe) veya bağıl frekanslar (örneğin bir olay sınıfı üzerinden bir olayın meydana gelme sayısı) açısından hesaplanabilir ve karşılaştırma iki değişkenli analizin bir değişkenli analizi temelinde oluşturulabilir. Amaca bağlı olarak analiz, diğer faktörlerin “serbest” veya “koşullu” olduğu varsayılarak da yapılabilir. Aynı zamanda “anlık” noktalara veya “segment” verilerine (örneğin sinyaldeki tüm nokta sayısı yerine belirli mikro turlar için ortalama hız ve ortalama pozitif ivmeyi hesaba katarak) dayanabilir.

Bir değişkenli dağılımın tipik örnekleri şunlardır:

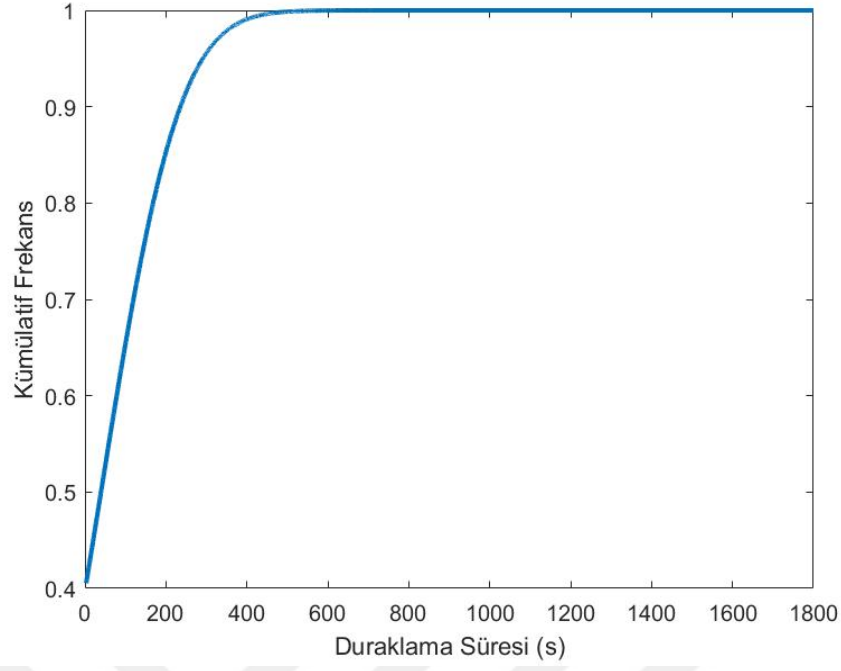
- Hıza bağlı frekans analizi (Şekil 3.11), bu durum kümülatif eğri olarak ifade edilir.
- İvme dağılım analizi, Şekil 3.12’de, hızın sıfıra eşit olduğu anlardan aralıksız artış gösterdiği durumlardaki ivme gösterilmektedir, dolayısıyla “hız” faktörü koşullandırılmaktadır.
- Duraklama süresi dağılım analizi (Şekil 3.13).
- İvme değişimi (sarsıntı) dağılım analizi (Şekil 3.14).



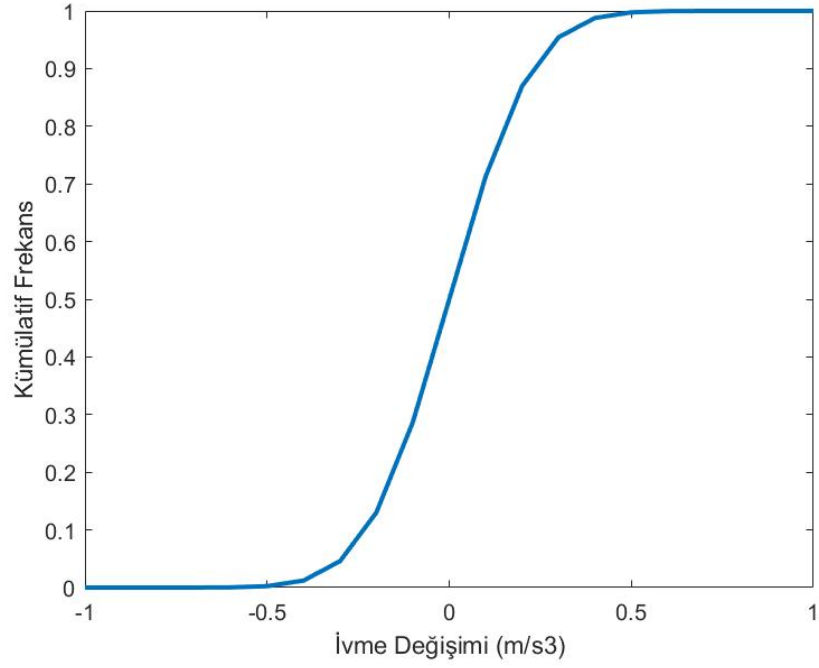
Şekil 3.11. Farklı bölgelerde araç hız dağılımı [131].



Şekil 3.12. WLTP çevrimi Class 3 başlangıç ivmelenmesi dağılım analizi



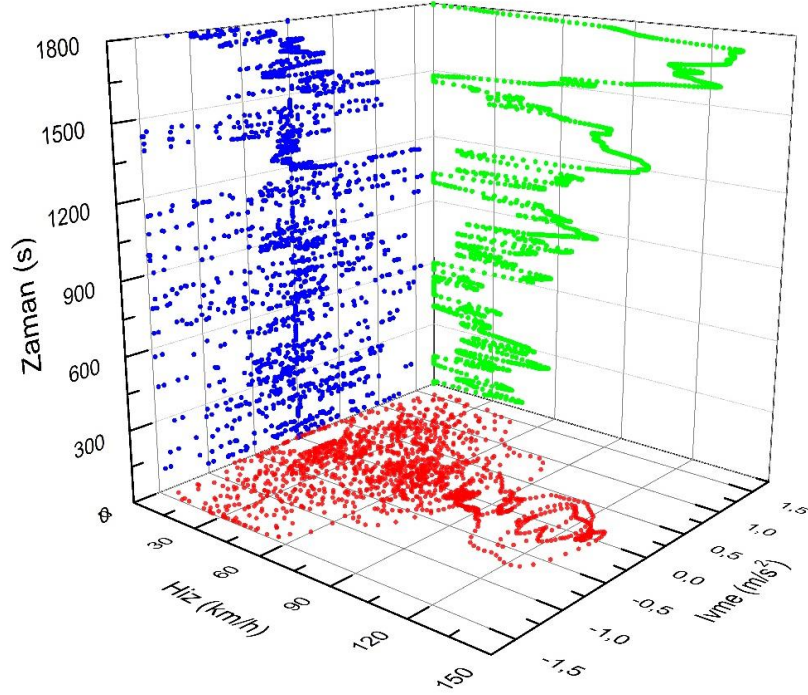
Şekil 3.13. WLTP çevrimi Class 3 duraklama süresi dağılım analizi



Şekil 3.14. WLTP çevrimi Class 3 ivme değişimi (sarsıntı) dağılım analizi

Şekil 3.15'te WLTP çevrimine ait verilerin dağılım analizinin kapsamı, hem ilgili verilerin görsel yorumu hem de genişletilmiş veri işleme işlemi için gereklidir. Özellikle rasgeleleştirme

yöntemleri kullanılarak yeni bir döngü oluşturulması durumunda, koşullu dizi seçimi için veri dağılımı kullanılır.



Şekil 3.15. WLTP çevrimi Class 3 zamana göre hız-ivme dağılım analizi

3.3. Tezde Kullanılacak Sürüş Çevrimleri

Bu tez çalışmasında, MATLAB ortamında tasarlanan FCHEV aracın simülasyonu yapılırken yararlanılacak olan resmi sürüş çevrimleri NEDC, WLTP Class 3, (Bu bölümden itibaren WLTP çevriminden kasıt Class 3 versiyonu olacaktır.), US06 Ek Federal Test Prosedürü ve Artemis Otoyol 150 km/h (ArtMW150) olacaktır. Bunlardan NEDC ve WLTP temel sürüş çevrimi iken US06 ve ArtMW150 ise tamamlayıcı veya ek sürüş çevrimleri olarak sınıflandırılabilirler. Bu resmi çevrimlere ek olarak gerçek verilere dayalı bütüncül bir çevrim de tasarlanmıştır.

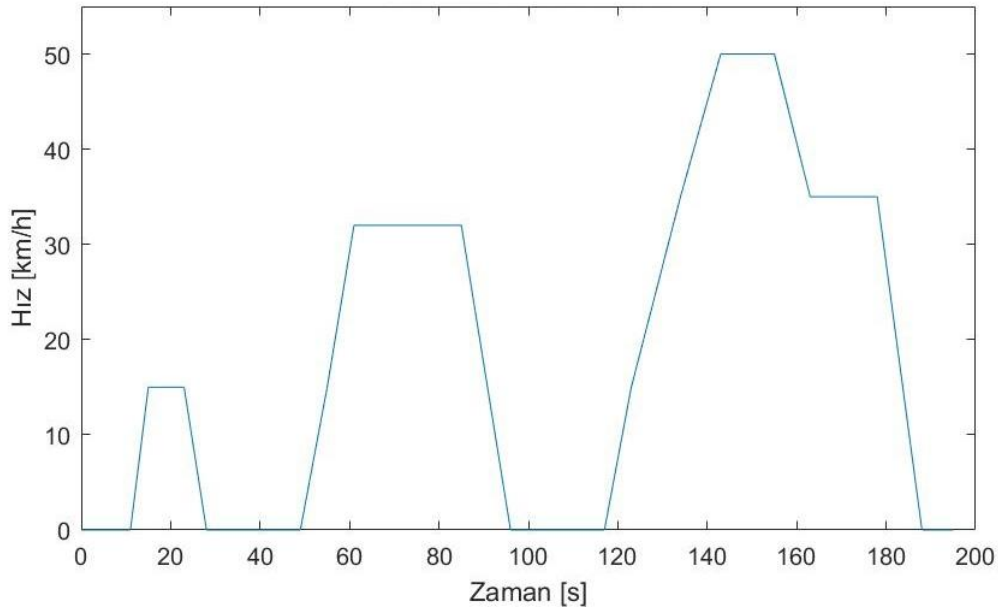
3.3.1. NEDC, Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi

Araç emisyon düzenlemesi Avrupa'da ilk kez 1960 ve 1970'te uygulamaya konuldu. İlk homologasyon döngüsü sadece maksimum hızı 50 km/h olan kentsel kısım içeriyordu. O yıllarda iklim değişikliği sorunu bugünkü kadar önem arz etmediği için CO₂ emisyonu ölçümü gerek duyulan bir konu değildi ve bu tarihlerde, zorunlu bir CO₂ emisyon düzenlemesi mevcut değildi. 1990 yılında, NEDC'ye maksimum 120 km/h hıza sahip ekstra bir kırsal kısım eklenmiş ve bu şekilde, NEDC son halini almıştır [132].

NEDC, Avrupa Topluluğu tarafından kullanılan homologasyon döngüsüdür ve iki farklı alt döngüden oluşur.

- Yoğun Avrupa şehirlerinde araçlar için klasik bir kentsel yolu temsil eden UDC (Kentsel Sürüş Çevrimi). Bu kısmın maksimum hızı 50 km/h'dir,
- Diğer kısım ise EUDC'den (Ekstra kırsal Sürüş Çevrimi) oluşmaktadır. Bu kısım, ilk kısımdan daha yüksek hızda kat edilen bir yolu simüle eder. Bu kısmın maksimum hızı 120 km/h'dir.

UDC, dört ECE kentsel sürüş çevrimine bölünebilir. Bu alt çevrimde, hızlanma ve yavaşlamanın üç rampası vardır. Hızlanmanın ilk rampasında araç 15 km/h hızı ulaşır ve 8 saniye boyunca bu hızda seyrederek. İkincisinde 32 km/h hızı ulaşır ve 24 saniye bu hızda seyrederek. Son rampada araç 50 km/s hızı ulaşana kadar hızlanır, bu hızda 12 s seyrederek daha sonra yavaşlayarak 35 km/h hızı ulaşır ve bu hızda 13 s seyrederek. Son olarak araç yavaşlayarak durur (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. ECE kentsel sürüş Çevrimi (Tek çevrim)

EUDC iki rampadan oluşur, ilk hızlanma rampasında araç 70 km/h hızı ulaşır ve 30 s boyunca seyrederek. Bundan sonra araç 50 km/h hızı yavaşlar. Daha sonra tekrar 70 km/h ardından 100 km/h ve son olarak araç maksimum 120 km/h hızı ulaşır ve 20 s bu hızda seyrederek. Son olarak araç durmak için yavaşlar.

Aracın vitesi sabit ve testin yapıldığı ortam sıcaklığı 20°C ile 30°C arasında olmalıdır. Elektrik yükleri çok düşük olmalıdır çünkü araç test sırasında iken yardımcı sistemler minimum miktarda kullanılır (Klima kapalı, zorunlu ışıklar hariç aydınlatma da kapalı olmalıdır.) [133]. Tablo 3.2'de NEDC'in ana özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.2. NEDC'in ana karakteristikleri [128].

Karakteristik	Birim	ECE 15	EUDC	NEDC
Mesafe	m	995	6955	11016,6
Toplam Süre	s	195	400	1180
Durma Süresi	s	45	35	241
Ortalama Hız (Duraklamalar dâhil)	km/h	18,4	62,6	33,6
Ortalama Sürüş Hızı (Duraklamalar hariç)	km/h	23,9	68,6	42,2
Maksimum Hız	km/h	50	120	120
Ortalama pozitif ivme	m/s ²	0,348	0,266	0,528

3.3.2. WLTP, Dünya Hafif Hizmet Test Prosedürleri

2007 yılında teknik bir çalışma grubu tarafından, araçların daha gerçekçi sürüş koşullarında test edilebilmesi için farklı bir çevrim hakkında çalışmalar başlatıldı. NEDC'in sürüş koşullarını daha iyi bir şekilde yansıtabilecek gerçekçi bir çevrim olarak WLTP oluşturuldu.

Güç-kütle oranı (kW/ton olarak PWR) fonksiyonunda üç tip sınıf vardır:

- Sınıf 1: $PWR \leq 22$ olan düşük güçlü araçlar,
- Sınıf 2: $22 \leq PWR \leq 34$ olan araçlar,
- Sınıf 3: $PWR > 34$ olan yüksek güçlü araçlar.

WLTP'de dikkate alınan test kütlesi NEDC'den daha yüksektir. Her sınıf için, sınıfın işlevine göre (süre, şekil,...) farklı özelliklere sahip çevrim türleri vardır. Dünya çapında araçlarının büyük bir kısmı 3. sınıfa aittir ($PWR > 34$ kW/ton). Şekil 3.10'da görüldüğü üzere WLTP Class 3 dört bölüme ayrılmıştır; düşük, orta, yüksek ve ekstra yüksek. Her aşama için ana özellikler Tablo 3.3'de gösterilmektedir.

Tablo 3.3. WLTP'nin ana karakteristikleri [134].

Karakteristik	Birim	Düşük	Orta	Yüksek	Çok Yüksek	Toplam
Mesafe	m	3095	4756	7158	8254	23262
Toplam Süre	s	589	433	455	323	1800
Durma Süresi	s	156	48	31	7	242
Ortalama Hız (Duraklamalar dâhil)	km/h	18,9	39,5	56,6	92	46,5
Ortalama Sürüş Hızı (Duraklamalar hariç)	km/h	25,7	44,5	60,8	94,0	53,8
Maksimum Hız	km/h	56,5	76,6	97,4	131,3	
Minimum ivme	m/s ²	-1,47	-1,49	-1,49	-1,21	
Maksimum ivme	m/s ²	1,47	1,57	1,58	1,03	

3.3.3. NEDC ve WLTP Arasındaki Farklar

NEDC ve WLTP Arasındaki Farklar Önceki bölümlerde belirtildiği gibi WLTP çevrimi, NEDC'den farklı bir karakteristiklere sahiptir. WLTP'yi karakterize eden rampalar NEDC'dekilerden daha keskindir ve bu nedenle, WLTP'deki ivmelenmeler daha yüksektir. Bu da WLTP'nin daha agresif bir döngü olduğu anlamına gelmektedir. Çevrimlerle ilgili temel farklılıklar Tablo3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. NEDC ile WLTP'nin temel farklılıkları

	Birim	NEDC	WLTP
Başlama Koşulu		soğuk	soğuk
Süre	s	1180	1800
Mesafe	m	11016,6	23262
Ortalama Hız	km/h	33,6	46,5
Maksimum Hız	km/h	120,0	131,3
Süreler			
Duraklama sayısı		14	9
Duraklama	s	241	242
Sürüş	s	458	193
Hızlanma	s	278	688
Yavaşlama	s	204	677
Oranlar			
Duraklama	%	20,4	13,4
Sürüş	%	38,8	10,7
Hızlanma	%	23,5	38,2
Yavaşlama	%	17,3	37,6
İvmelenme ve Dinamikler			
Ortalama pozitif ivme	m/s ²	0,53	0,41
Maksimum pozitif ivme	m/s ²	1,04	1,58
Ortalama pozitif 'Hız*İvme'	m ² /s ³	1,04	4,64
Maksimum pozitif 'Hız*İvme'	m ² /s ³	9,22	20,86
Ortalama negatif ivme	m/s ²	-0,82	-0,42
Minimum ivme	m/s ²	-1,39	-1,49

- **Soğuk Başlangıç**

WLTP çevrimi hem süre olarak hem de mesafe olarak NEDC'den daha uzundur ve bu nedenle WLTP'de soğuk çalıştırmanın etkisi nispeten daha az olur. Motor, çalışma sıcaklığına ulaştıktan

sonra NEDC'ye göre daha uzun süre çalışır. Soğuk motor, sıcak motordan daha yüksek emisyonu ve yakıt tüketimine neden olur, çünkü soğuk motorda yağ da soğuk olup yüksek viskoziteye sahip olduğundan mekanik sürtünme daha yüksek olur. Bu nedenle soğuk çalıştırmanın WLTP 'ye göre NEDC üzerinde daha yüksek etkisi vardır ama bu konular elektrikli araçlarda çok daha az bir etkiye sahiptir çünkü elektrikli motorlarda herhangi bir yağlama gereksinimi yoktur.

- **Araç Yüğü**

WLTP çevriminde, NEDC'den daha yüksek hızlara çıkılmakta olup, daha yüksek ivmelenme değerleri bulunmaktadır ve bunun yanında araç boş ağırlığı da daha fazladır. Bu nedenle de eylemsizlik kuvveti daha fazladır.

- **Duraklama Oranı**

NEDC'de duraklama sayısı fazla olup oransal olarak duraklama süresi de daha yüksektir. Bu nedenle NEDC'de Start-Stop teknolojisi, CO₂ emisyonu konusunda sadece İYM araçlarda, yakıt ekonomisi olarak hem İYM hem de elektrikli araçlarda nispeten daha iyi sonuçlar vermektedir.

- **Test Kütlesi**

NEDC'de, araç modelinin en düşük kütlesini kullanılır, WLTP test döngüsü iki farklı durumda incelenebilir. İlki (WLTP-L), opsiyonel cihazların göz önünde bulundurulmadığı, en düşük yuvarlanma direncini ve en düşük aerodinamik sürtünmeyi dikkate alır. Diğer konfigürasyonda ise, opsiyonel cihazların hepsi dahil edilerek en yüksek kütle durumunda(WLTP-H), daha yüksek yuvarlanma direnci ve en büyük aerodinamik sürtünmenin uygulanır. Özetlemek gerekirse, ilk durumda araç en düşük enerji talebine ihtiyaç duyarken, diğer durumda ise araç en yüksek enerji talebine ihtiyaç duymaktadır.

- **Motor Sıcaklığı**

WLTP için sıcaklık 23±5°C'dir. NEDC testinde ise 20 ile 30 °C arasında olmalıdır. Bu bakımdan aralarında çok fazla bir farklılık söz konusu değildir.

3.3.4. US06 ve ArtMW150 Sürüş Çevrimleri

Bu iki çevrim türü genellikle ek çevrimler olarak kullanılmaktadırlar. US06 daha agresif bir sürüşü, Artemis MW150 ise daha yüksek hızlarda seyredilen otoyol koşullarını temsil etmektedir. US06 Ek Federal Test Prosedürü, agresif, yüksek hızlı ve yüksek ivmeli sürüş davranışı, değişken hız dalgalanmaları ile FTP-75 test döngüsündeki eksiklikleri gidermek için geliştirilmiştir. Çevrim, ortalama hızı 77,62 km/h, maksimum hızı 128,9 km/h ve 596 saniyelik bir süreye sahip 12893,7 m bir rotayı temsil eder. 2008 model yılından beri, US06 sonuçları aynı zamanda EPA 5-döngü yöntemi kullanılarak EPA'nın yol yakıt ekonomisi derecelendirmelerinin belirlenmesi için de kullanılmaktadır.

Ortak Artemis Sürüş Çevrimleri (CADC), Avrupa Artemis (Ulaştırma Emisyon Modellerinin ve Envanter Sistemlerinin Değerlendirilmesi ve Güvenilirliği) Projesi kapsamında Avrupa gerçek dünya sürüş modellerinin geniş bir veri tabanının istatistiksel analizine dayalı olarak geliştirilen şasi dinamometre prosedürleridir. 3 farklı konfigürasyondan oluşmakta olup otoyol çevrimi iki farklı varyanttan oluşur. Kentsel çevrim, kırsal çevrim, 130 km/h ve 150 km/h otoyol çevrimleri Artemis çevrimlerini oluşturur. Her iki çevrime ait temel parametreler Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. US06 ve Artemis MW150 karakteristikleri

	Birim	US06	Artemis MW150
Başlama Koşulu		soğuk	soğuk
Süre	s	586	1068
Mesafe	m	12893,8	29546,5
Ortalama Hız (Duraklamalar dâhil)	km/h	77,9	99,6
Ortalama Sürüş (Duraklamalar hariç)	Hız1 km/h	79,6	100,4
Maksimum Hız	km/h	128,9	150,4
Süreler			
Duraklama sayısı		6	3
Duraklama	s	13	8
Sürüş	s	153	297
Hızlanma	s	216	424
Yavaşlama	s	214	339
Oranlar			
Duraklama	%	2,2	0,8
Sürüş	%	25,7	27,8
Hızlanma	%	36,2	39,7
Yavaşlama	%	35,9	31,7
İvmelenme ve Dinamikler			
Ortalama pozitif ivme	m/s ²	0,54	0,27
Maksimum pozitif ivme	m/s ²	3,24	1,74
Ortalama pozitif 'Hız*İvme'	m ² /s ³	9,34	7,27
Maksimum pozitif 'Hız*İvme'	m ² /s ³	43,16	24,11
Ortalama negatif ivme	m/s ²	-0,57	-0,34
Minimum ivme	m/s ²	-2,82	-2,93

3.4. Gerçek Bir Sürüş Çevrimi Tasarımı

Bu bölümde, yeni bir sürüş çevrimi geliştirmek için yol ölçümlerinden gelen sürüş verilerinin analizi ve bu verilerle uygulanabilir bir sürüş çevrimi geliştirmeye odaklanmıştır.

3.4.1. Metodoloji

Bir sürüş çevrimi tanımlama süreci aşağıdaki adımlara dayanmaktadır [122]:

- Önceden tanımlanmış bir bağlamda yol/araç verilerinin alınması
- Veri ön işleme ve analiz için hazırlık
 - Aykırı değer incelemesi
 - Filtreleme
- Veri işleme
 - Kinematik parametre değerlendirmesi
 - SAPD (Hız İvme Olasılık Dağılımı) oluşturma
 - Kümeleme
- Döngü sentezi
 - Sınır koşulu tanımı
 - Veri seçimi/rasgeleleştirme
 - Doğrulama
- Ek veri önerisi
 - Eğim bağımlılığı
 - Yardımcı sistemlerin tüketimi
 - Çevresel bilgi

3.4.1.1 Veri Toplama

Araçlardan veri elde etmek genellikle çok sayıda parametreyi kapsayabilir, ana kategoriler şunlardır:

- Araçtaki araç sensörlerinden gelen sinyaller,
 - Hız,
 - Hızlanma (boylamasına, yanal, yalpalama vb.),
 - Aktarma organları parametreleri (d/d, gaz keleşbeği konumu, İYM ise motor parametreleri, EV veya HEA ise akü/inverter/güç aktarma organları parametreleri),
- Global Konumlama Sistemi (GPS) sensörlerinden gelen sinyaller,
- Emisyon ölçüm sisteminden gelen sinyaller (İYM ve HEA için).

Bu tezde incelemelerinde emisyon ölçümleri dikkate alınmayacaktır çünkü tasarlanan araç saf elektrikli olup sürüş emisyonu söz konusu değildir. GPS verileri hem jeoreferanslama ve irtifa tanıma için kullanılacaktır, hem de zamana bağlı bir fonksiyon ile hız ve ivme gibi diğer parametrelerin hesaplanmasında da kullanılacaktır. Özellikle kentsel bağlamda ("tünelleme" olarak

adlandırılan olay nedeniyle, yani binalar gibi engeller içinde sinyal değişikliği) GPS hassasiyeti ve güvenilirliği tehlikeye girebileceğinden, yüksek binalar veya alt geçit gibi engellerin bulunduğu rotalar tercih edilmemiştir.

3.4.1.2 Ön İşleme ve Analiz İçin Hazırlık

Verilerin ön işlenmesi sırasında, ilk ihtiyaç bilginin sürekliliğini doğrulamaktır. Güçlü soğuk başlatma belirsizliklerinden, büyük sinyal eksikliğinden veya benzerlerinden etkilenen veriler ihmal edilmelidir. Bununla birlikte, GPS cihazlarının kendi kendini düzeltme algoritması içerip içermediği belirlenmelidir. Ayrıca, bir araç natüralist koşullarda izleniyorsa, bazı olaylar (park etme, bekleme gibi) sürüş düzeni analizinde hariç tutulmalıdır. Bundan sonra, veri sinyali analiz edilmeli ve uygun şekilde filtrelenmelidir.

Bu tezde GPS verileri Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri'ne bağlanabilen bir mobil telefon ile elde edilmiştir. Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS), bağlı cihazların coğrafi konumu hakkında bilgi sağlamak için uydu teknolojisini kullanır. GNSS, GPS, GLONASS, BeiDou (BDS) ve Galileo dâhil olmak üzere küresel sistemler kategorisi için kapsayıcı bir terimdir. Akıllı mobil telefonlardan elde edilen GNSS gözlemleri ile konum belirleme performansının araştırıldığı birçok makalede mobil telefon verilerinin gerekli doğruluğu sağladığı gösterilmiştir [135].

Elde edilen verilerin süreklilik ve güvenilirliğini doğrulamak ve geliştirmek için aynı güzergâhta 5 defa ölçüm alınmıştır. Bu ölçümlerde alınan değerler birbiriyle karşılaştırılıp aykırı değer incelemesi ve filtreleme işlemi yapılmıştır.

3.4.1.3 Sürüş Veri İşleme

Sürüş dizilerinin işlenmesi, kinematik parametrelerin değerlendirilmesini, Hız-ivme Performans Dağılımı (HİPD) matrislerinin oluşturulmasını ve son olarak kümelerdeki ayrımı kapsar.

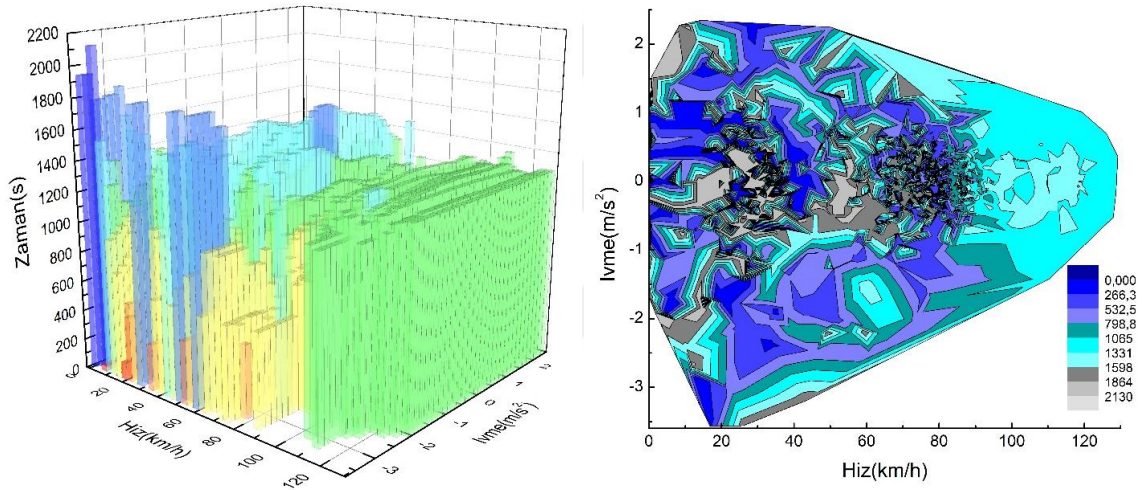
Bağlam (kentsel, kırsal, otoyol) ve araç gücü için uygun sınıfla ilgili bölümlerin seçimi sonraki tüm faaliyetlerin sonuçlarını belirlediğinden döngü sıkıştırması için uygulanan yöntemle bağlı olarak, yolculukların ve mikro gezilerin gruplandırılması kritik bir aşama olmaktadır.

Her yolculuk sınıfında yapılan mesafe (Tablo 3.6) ve HİPD (Şekil 3.17). Bu nedenle bu önsel sınıflandırma bağımlılığının iki ana sonucu vardır:

- Çevrim sentezi sırasında, hedef araçların kütle-güç oranında önemli bir farkı varsa, farklı HİPD kullanılır
- Bir çevrimin (Kentsel/kırsal/otoyol) her bir alt aşamasının uzunluğu, bu tür bir aracın ömrü boyunca beklenen “tipik” göreve göre ayarlanabilir.

Tablo 3.6. Tasarlanan sürüş çevriminin ana karakteristikleri

Karakteristik	Birim	Kentsel	Kırsal	Otoyol	Toplam
Mesafe	m	2428,5	14467,8	19055,4	35951,7
Toplam Süre	s	385	906	839	1800
Durma Süresi	s	57	91	22	170
Ortalama Hız (Duraklamalar dâhil)	km/h	22,7	57,5	81,8	60,8
Ortalama Sürüş Hızı (Duraklamalar hariç)	km/h	25,7	44,5	60,8	66,0
Maksimum Hız	km/h	43,8	88,5	129,2	
Minimum ivme	m/s ²	-3,56	-3,56	-2,42	
Maksimum ivme	m/s ²	2,31	2,35	1,72	



Şekil 3.17. Tasarlanan sürüş çevriminin SAPD matrisi 3d bar (solda) ve kontur çizimi (sağda)

3.4.1.4 Veri Sentezi İçin Metodolojiler

Lyons ve diğerleri tarafından 1986 yılında yapılan ilk çalışmaya göre, genel olarak gerçek sürüşün zaman-hız geçmişi birleştirilmiş verilerden veri setinin genel özet özellikleriyle eşleşecek şekilde seçilir. Bu, belirli bir rota boyunca sürüşün bitişik bir dizisi veya kısmi dizisi, belirli bir rota boyunca seçici olarak azaltılmış daha uzun bir yolculuk veya anket verilerinden rastgele karıştırılmış ve eşleşen mikro gezilerin bir bileşimi olabilir. Genellikle doğru istatistiksel özellikleri elde etmek için bazı deneme yanılgılar barındırabilir. Bu tür çevrimler, gerçek sürüşün karakteristiği olan birçok geçici olayı içerir ve saniye saniye hız değerleri genellikle km/h olarak belirtilir [136]. Bu tür erken çalışmalarda, benzer yöntemlerin çok sayıda uygulaması önerilmiştir. Bir sentez yöntemi genellikle üç ana aşamadan oluşur:

- Mevcut sürüş dizileri ve ilişkili kinematik parametreler veri tabanını kullanarak, çevrimlerin istenen özelliklerine göre bir dizi mikro yolculuk veya segment rastgele seçilir,

- Diziler eşleşme kriterlerine göre birleştirilirler,
 - Sınıfların sırası için bir referans sırası uygulanabilir,
 - Önceki bölümün son hızı ile bir sonraki bölümün hızı açısından tutarlılık; mikro çevrimlerin bağlanması durumunda hız sıfırdır, bu nedenle bir hızlanma değeri ile birlikte durma aşaması için bir süre gereklidir,
- Hedef süreye ulaşıldığında, döngünün temsil edilebilirliğinin doğrulanması gerçekleştirilir.

3.4.1.5 Ek Veriler Hakkında Notlar

Elektrikli araçlarla ilgili olarak, eksiksiz bir sürüş çevriminin oluşturulması için gereken ana ek veriler şunlardır:

- Gerçekleştirilen yolculuklarla ilişkilendirilecek rakım profili (GPS ile elde edilebilir). Genellikle sentetik bir sürüş döngüsüyle eğimi ilişkilendirmek olağan değildir.
- Dış sıcaklıkla ilgili yardımcı sistemlerin tüketimi.
- Araç hızı, hızlanma ve sürüş momenti (gaz kelebeği veya fren pedallarındaki basınç) ile ilişkilendirmek için güç aktarma organının (elektrik sisteminin en az bir noktasında, örneğin aküde) voltajı veya akımı.

Sonuncu maddenin özellikle incelenmesi önemli olabilir. Kalifiye sürücülerin fren sisteminden yüksek rejenerasyon elde etmek için sürüş stilini optimize etmesi beklendiğinden, aktarma organları rejenerasyon sistemi ile bağlantılı yavaşlama değerlerinin baskın olması beklenir. Yavaşlama değerlerinin sınırları, aslında, sistemin ayarlanması ve araç güç aktarma organlarının özellikleri ile ilgilidir.

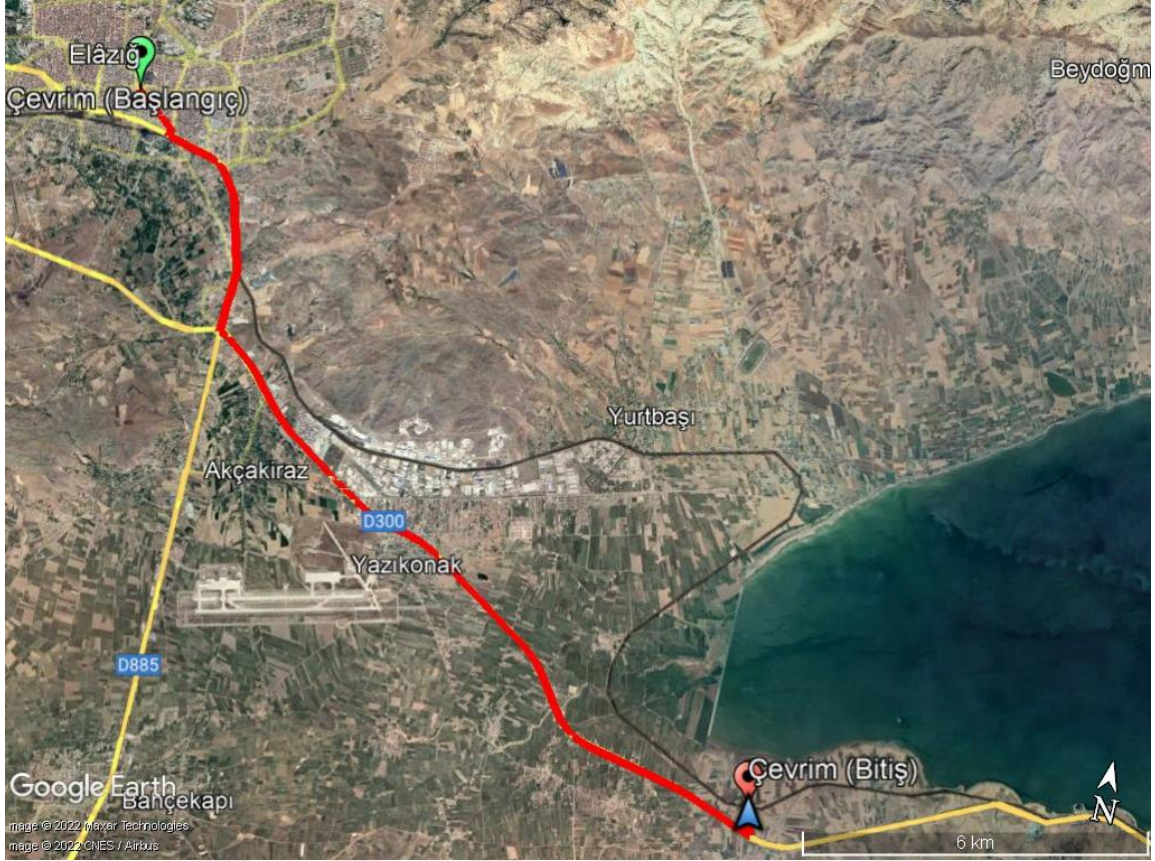
3.4.2. Elazığ İli Gerçek Sürüş Çevrim Tasarımı

Gerçek bir sürüş çevrimi tasarımı bir önceki metodoloji bölümü göz önünde bulundurularak iki alt başlıkta gerçekleştirilmiştir.

3.4.2.1 Deneysel Sürüş Verilerinin Toplaması

Elazığ ilinde gerçekleştirilen deneysel sürüşlerden elde edilen veriler üç ana kaynağı içermektedir. Gerçek çevrime ait güzergâh Şekil 3.18’de verilmiştir.

- GPS kaydetme özelliği olan bir mobil telefon aracılığıyla elde edilen GPS verileri (koordinat ve rakım),
- GPS verilerinin alındığı zamanlar.



Şekil 3.18. Elazığ ili araç GPS izleri

Belirlenen güzergâh 39,23 doğu boylamı, 38,67 kuzey enlemi koordinatlarında Elazığ şehir merkezinde başlayıp; 39,38 doğu boylamı, 38,58 kuzey enlemi koordinatlarında bitmektedir. Belirlenen güzergâh çevrimi kentsel, kırsal ve otoyol alt aşamalarını içerecek şekilde belirlenmiştir. Çevrim, güzergâhı hem gidiş hem de dönüş olarak içermektedir. Her ne kadar veri toplanırken rakım verisi alınsa ve aracın gidiş yönünde rakım azalıp dönüş yönünde rakım artsa da çevrim eğimden bağımsız olarak tasarlanmıştır. Burada amaç günlük hayatta genellikle iki nokta arasında gidiş ve dönüşlerin çok sık yapılması nedeniyle bunu yansıtabilmek, şehir içinden dışına veya şehir dışından içine hareketlerde aynı noktada farklı hız ve ivmelenmelerin gözlemlenebilmesini sağlamaktır. Tasarlanan gerçek sürüş çevriminin ana karakteristikleri Tablo 3.7’de hız grafiği ise Şekil 3.19’da verilmiştir. Tasarlanan çevrimin otoyol alt çevrimi Artemis Otoyol 130 km/h ile benzerlik göstermekte olup kentsel ve kırsal alt çevrimi olarak da WLTP çevrimine benzer özellikler göstermektedir. Bir bütün olarak ele aldığımızda ise Artemis URM130 Common Artemis Driving Cycle ile benzer özellikler göstermektedir. Sürüş çevriminin kodu ELZ130 olarak belirlenmiş olup bu bölüm itibari ile bu şekilde kullanılmıştır.

3.4.2.2 Deneysel Sürüş Verilerinin İşlenmesi

Elde edilen GPS verilerindeki koordinat ve rakım bilgileri kullanılarak ilk olarak her bir saniye aralık ile bulunan noktalar belirlenir. Bu noktalar arasındaki mesafeyi hesaplayabilmek için öncelikle bulunan enlem ve rakıma göre dünya yarıçapı Denklem 3.1 ile bulunmuştur.

R_d = Herhangi bir noktada Dünya'nın yarıçapı

R_e = Ekvatorda Dünya'nın yarıçapı,

R_k = Kutuplarda Dünya'nın yarıçapı

φ = Enlem

$$R_d = \sqrt{\frac{(R_e^2 \cos(\varphi))^2 + (R_k^2 \sin(\varphi))^2}{(R_e \cos(\varphi))^2 + (R_k \sin(\varphi))^2}} + \text{Rakım} \quad (3.1)$$

Bulunan enlem ve rakıma göre dünya yarıçapı bulunduktan sonra iki nokta arasındaki mesafeyi bulmak için Denklem 3.2'de gösterilen Haversine formülü kullanılmıştır.

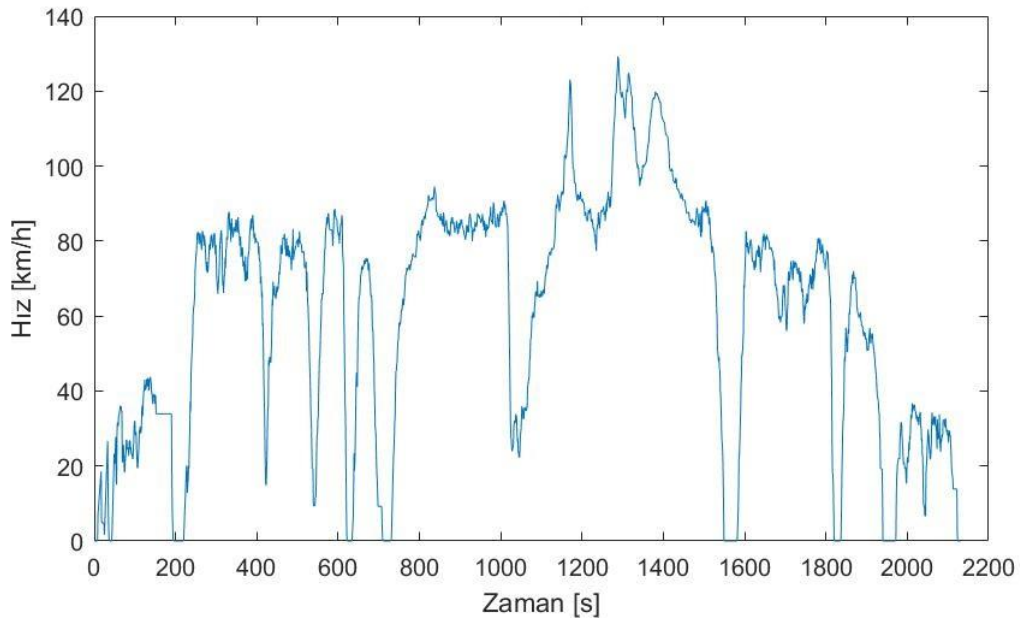
d = İki nokta arasındaki mesafe,

φ_1 = İlk noktanın enlemi, φ_2 = İkinci noktanın enlemi,

λ_1 = İlk noktanın boylamı, λ_2 = İkinci noktanın boylamı olmak üzere:

$$d = 2 * R * \arcsin \left(\sqrt{\left(\sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \right)^2 + \cos(\varphi_1) * \cos(\varphi_2) * \left(\sin\left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2}\right) \right)^2} \right) \quad (3.2)$$

Bu şekilde her bir saniye süre ile yer değiştirme miktarı metre cinsinden bulunmuş olup zaman ve mesafe verilerinden hız ve ivme verileri de elde edilmiştir.



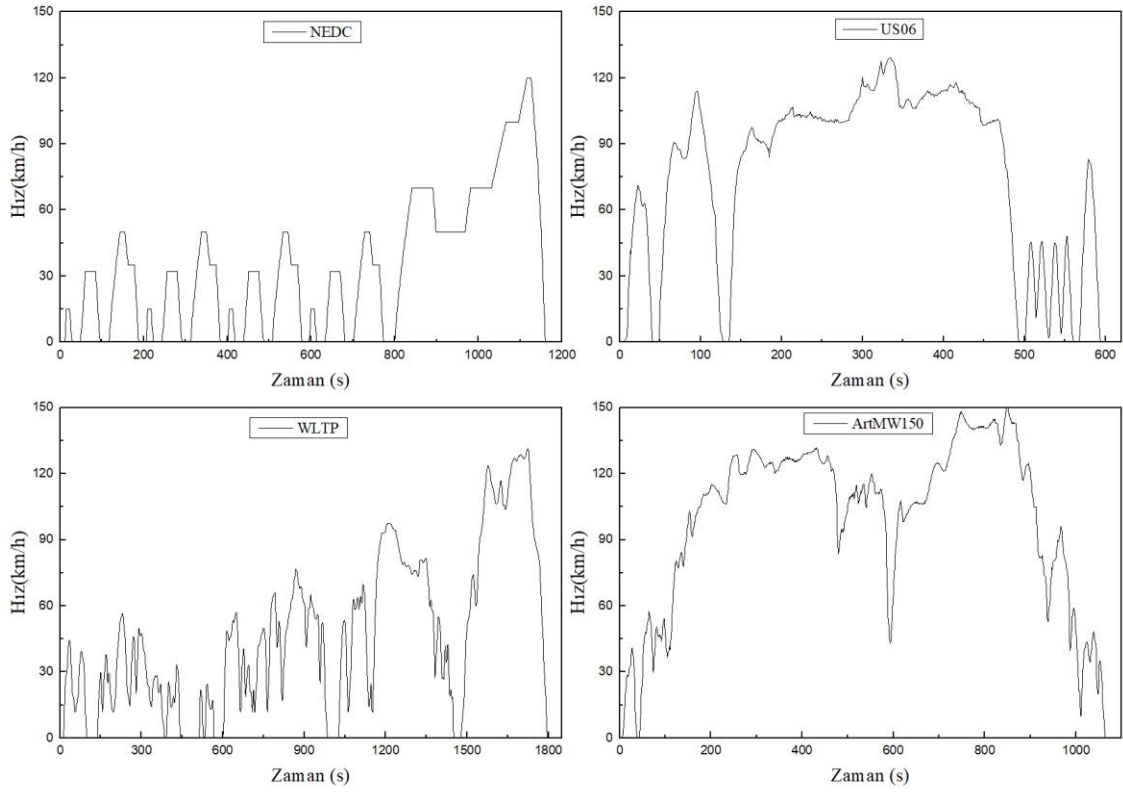
Şekil 3.19. Gerçek sürüş çevrimi ELZ130 hız-zaman grafiği

Tablo 3.7. Tasarlanan sürüş çevrimi ELZ130'a ait karakteristikler

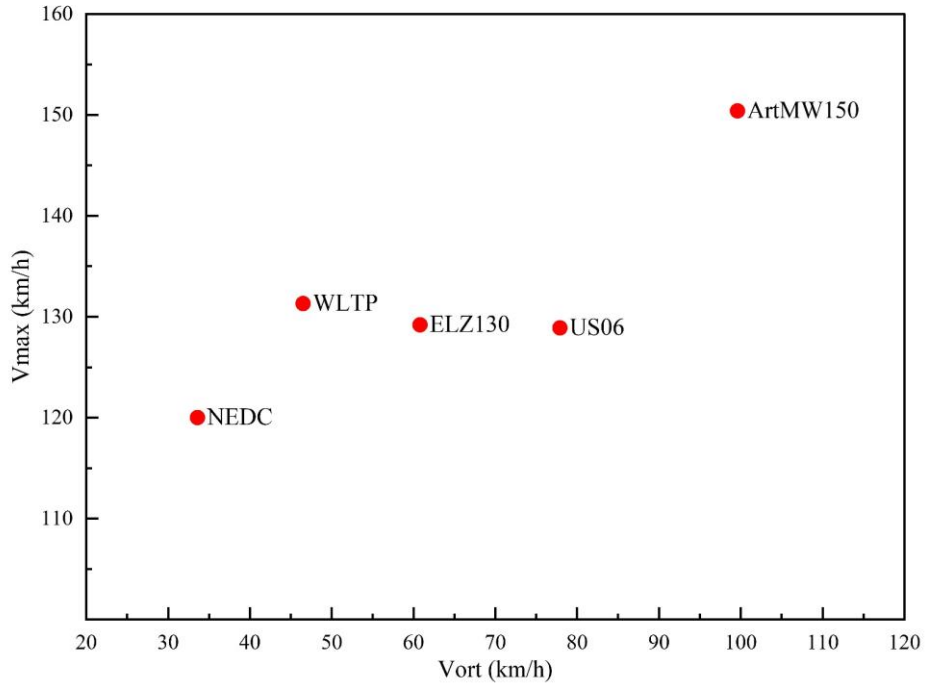
	Birim	ELZ130 Sürüş Çevrimi
Başlama Koşulu		soğuk
Süre	s	2130
Mesafe	m	35951,7
Ortalama Hız (Duraklamalar dâhil)	km/h	60,76
Ortalama Sürüş Hızı (Duraklamalar hariç)	km/h	66,03
Maksimum Hız	km/h	129,2
Süreler		
Duraklama sayısı		9
Duraklama	s	170
Sürüş	s	260
Hızlanma	s	854
Yavaşlama	s	846
Oranlar		
Duraklama	%	8,0
Sürüş	%	12,2
Hızlanma	%	40,1
Yavaşlama	%	39,7
İvmelenme ve Dinamikler		
Ortalama pozitif ivme	m/s ²	0,41
Maksimum pozitif ivme	m/s ²	2,35
Ortalama pozitif 'Hız*İvme'	m ² /s ³	6,18
Maksimum pozitif	m ² /s ³	33,58
Ortalama negatif ivme	m/s ²	-0,41
Minimum ivme	m/s ²	-3,56

3.5. NEDC, WLTP, US06, ArtMW150 ve ELZ130 Sürüş Çevrimlerinin Analizi

Bu çalışmada MATLAB ortamında tasarlanan YPHEA aracın simülasyonu bu beş farklı çevrim kullanılarak gerçekleştirilecektir. Bu çevrimlerden NEDC tipik bir çevrim olup uzun yıllar boyunca kullanılmıştır. WLTP ise transient bir çevrim olup daha gerçekçi bir sürüşü temsil eder. US06 ve ArtMW150 ise aslında tamamlayıcı çevrimler olup US06 daha agresif bir sürüşü temsil ederken ArtMW150 ise daha yüksek hızları barındıran otoyol sürüşünü temsil etmektedir. ELZ130 çevrimi ise Artemis URM130 çevrimi gibi bütüncül gerçekçi bir çevrimi temsil etmektedir. Şekil 3.20'de dört sürüş çevrimine ait hız zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 3.21'de ise tüm çevrimlerin maksimum ve ortalama hızlarının karşılaştırılması verilmiştir.



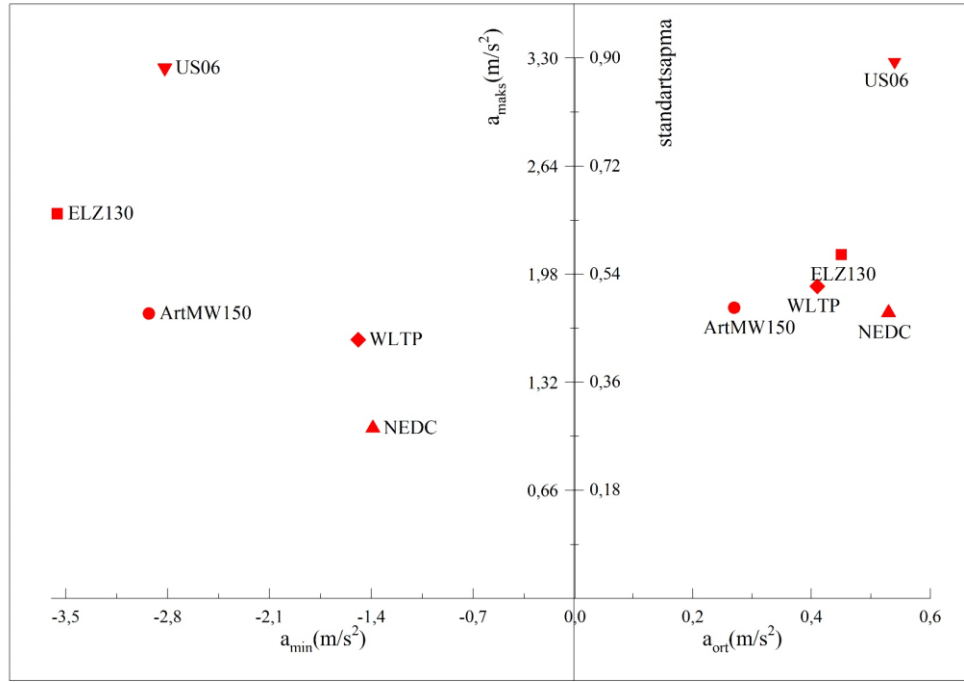
Şekil 3.20. Simülasyonda kullanılan çevrimler



Şekil 3.21. Çevrimlerin maksimum ve ortalama hızlarının karşılaştırılması

Çevrimlerin maksimum ve ortalama hızları karşılaştırıldığında NEDC ve WLTP gibi kentsel alt çevrimlerin olduğu çevrimlerde ortalama hızın düşük olup, US06 ve ArtMW150 gibi agresif ve otoyol sürüşleri olan çevrimlerde ortalama hız yüksek olmaktadır. ELZ130 çevriminde bu kentsel, kırsal ve otoyol alt çevrimlerinin hepsi bulunduğundan ortalama hız konusunda bu iki grubun tam ortasında yer almaktadır. WLTP, ELZ130 ve US06 çevrimlerde maksimum hız birçok ülkede uygulanan kırsal hız limiti olan 130 km/h ile sınırlı kalmıştır.

Şekil 3.22’de çevrimlerin maksimum, minimum, ortalama ivmeleri ve ivme standart sapma grafikleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere US06 agresif bir sürüş çevrimi olup hem ortalama pozitif ivmesi fazla olup hem de ivme standart sapması daha yüksektir. ArtMW150 ve NEDC sürüş çevrimleri ivmelenme olarak en sakin sürüş çevrimleridir. ELZ130 çevrimi diğer dört çevrimin ağırlıklı ortalamalarına yakın bir noktadır.



Şekil 3.22. Çevrimlerin maksimum, minimum, ortalama ivmeleri ve ivme standart sapmaları

4. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde tasarlanan araca ait genel araç dinamikleri ve tahrik sistem bileşenleri modellenmiş ve MATLAB Simscape’de oluşturulmuştur. İlk olarak araç dinamiklerine ait denklemler çıkarılmış olup bu denklemler sonucunda gerekli performans kriterleri belirlenmiştir. Bu performans kriterlerine göre yakıt pili, batarya ve cer motor performans parametreleri çıkarılmıştır. Belirlenen parametreler Simscape bloklarındaki “Workspace’lere” veri olarak girilmiştir.

4.1. Araç Dinamikleri ve Modellenmesi

Araç dinamiği, bir aracın lastik ile yol arasındaki ve aerodinamik sürtünme ile yerçekimi kuvvetlerin etkisi altındayken nasıl hareket ettiğini tanımlamayı amaçlar. Aktarma organlarının tasarımı aşamasında araç dinamiğine ilişkin temel bilgiler, aktarma organının sürüş sırasında hangi yükler ve yük seviyelerini karşılaması gerektiğini ortaya koyduğu için önemlidir. Araç dinamiklerinin anlaşılması güç aktarma sisteminin hızlanma zamanı, enerji tüketimi, vb. gibi araç performansı üzerindeki etkilerini değerlendirilirken da aynı derecede önemlidir.

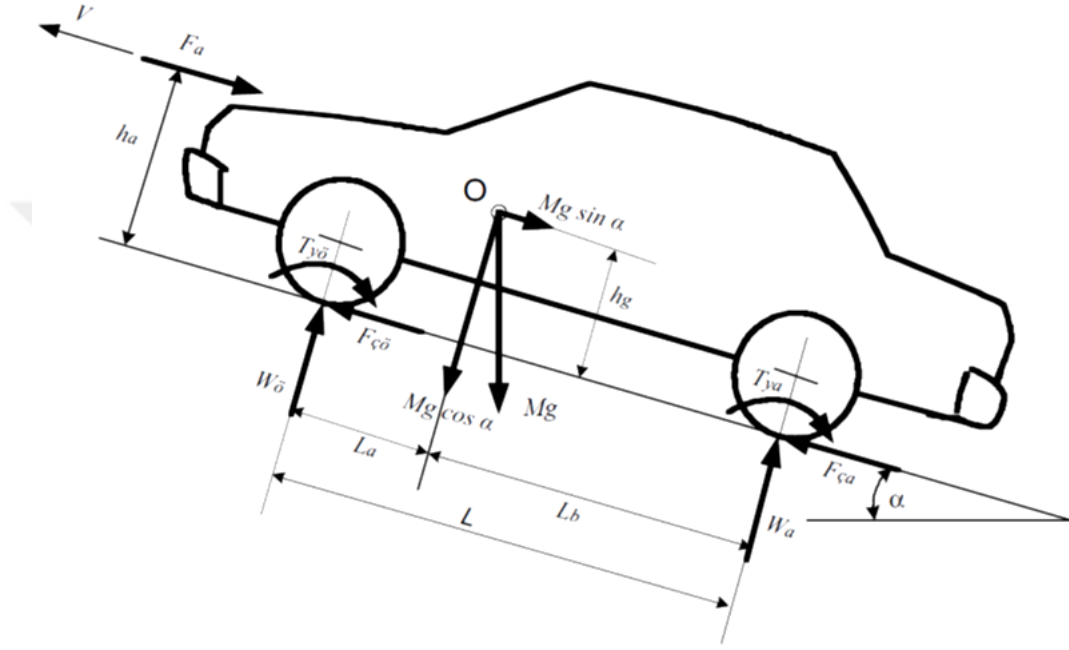
Herhangi bir sistemin modellenmesinde olduğu gibi bir araç, çalıştırılması hedeflenen temel amaca bağlı olarak farklı yönlerde ve ayrıntı seviyelerinde modellenebilir. Aktarma organları yük seviyelerinin, bu yükü tahrik edecek sistemin gücü, bu gücün yakıt pili ve batarya arasındaki paylaşımı, yine sistemin enerji tüketiminin analiz edileceği bu tezde dinamik çalışmalarda araç gövdesinin rijit olduğunu varsaymak mantıklıdır. Böylece araç ağırlık merkezinde tek bir kütle olarak modellenebilir [137]. Ayrıca, araç kararlılığının hiçbir koşulda ihlal edilmediği varsayımıyla, yalnızca uzunlamasına ileri yöndeki dinamikler tezin ilgi alanına girmektedir. Newton'un ikinci mekanik yasasına göre, bir aracın bir koordinat eksenindeki dinamik hareketi, tamamen aynı yönde ona etki eden tüm kuvvetlerin toplamı tarafından Denklem 4.1'deki gibi belirlenir.

$$Ma = M \frac{d}{dt} v(t) = F_c(t) - F_d(t) \quad (4.1)$$

burada, M , güç aktarım mekanizmasındaki olası dönme ataletleri dâhil eşdeğer kütle olup, a , araç hızının zamana bağlı değişimidir. $F_c(t)$ araç hızını artırmak için etki eden tüm çekme kuvvetlerinin toplamıdır ve $F_d(t)$ ise hızı azaltmak için hareket eden direnç kuvvetlerinin toplamıdır.

Ana çekiş gücü, aktarma organlarından dişli, diferansiyel ve tekerlek mili aracılığıyla tekerlekler ve yol arasındaki temas alanına aktarılan kuvvettir. Yokuş aşağı sürüş sırasında yerçekimi de büyük bir çekme kuvveti işlevi görebilir, ancak yokuş yukarı sürüş sırasında bunun yerine büyük bir direnç kuvveti olabilir. Diğer büyük direnç kuvvetleri, aerodinamik sürtünme, yuvarlanma direnci, elektrikli güç aktarma sistemini kullanan rejeneratif frenleme ve geleneksel

sürtünmeli frenlemedir. Özetle bir aracın çekme kuvvetlerinin toplamı, direnç kuvvetlerinin toplamından büyük olduğunda hızlanacak ve bunun tersi durumunda yavaşlayacaktır. Sabit bir hızı korumak için net direnç kuvveti net çekme kuvveti ile tam olarak eşitlenmelidir. Şekil 4.1, rampa yukarı hareket eden bir araca etki eden kuvvetleri göstermektedir. Tahrik edilen tekerleklerin lastikleri ile yol yüzeyi arasındaki temas alanındaki toplam çekme kuvveti, $F_{\phi} = F_{\phi o} + F_{\phi a}$, aracı ileri doğru iter.



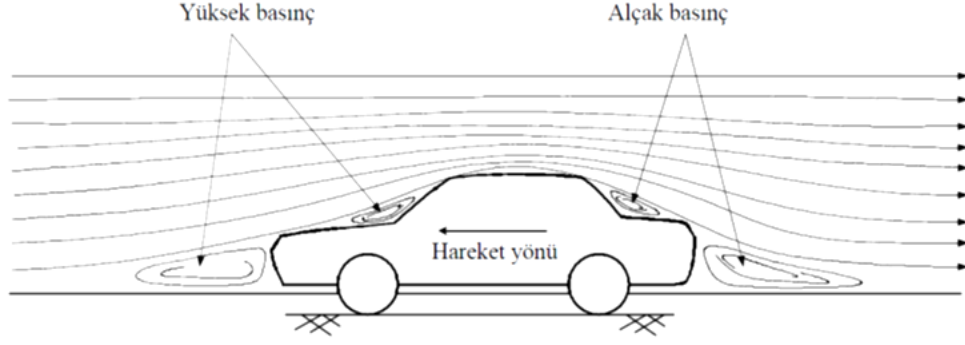
Şekil 4.1. Bir araca etki eden kuvvetler

4.1.1. Aerodinamik Sürtünme

Havada belirli bir hızla hareket eden araç, hareketine karşı direnç gösteren bir kuvvetle karşılaşır. Herhangi bir aracın sürüş sırasında kaçınılmaz olarak maruz kaldığı aerodinamik sürtünme, genellikle dış ve iç akışlar olarak da adlandırılan, aracın etrafındaki ve cidarındaki hava akışından kaynaklanır. Esas olarak iki bileşenden kaynaklanır bunlar şekil sürüklemesi ve yüzey sürtünmesidir. Otomobillerin karmaşık şekli ve akışkanlar dinamiğinin daha da karmaşık doğası nedeniyle, eldeki gelişmiş yazılımlarla bile aerodinamik sürtünmenin doğru ve güvenilir analitik modellerini geliştirmek çok zordur. Aerodinamik sürüklenme kuvvetini modellemek için sıklıkla kullanılan bir yöntem kısmen ampirik olup araç hızının karesine bağlı olan dinamik basınç ifadesine dayanmaktadır.

Şekil sürüklemesinde araç ilerlerken önündeki havayı iter ama hava bir anda yoldan çekilemez ve bu nedenle basıncı artarak yüksek hava basıncına neden olur. Ayrıca aracın arkasındaki hava, aracın ilerlerken arkasında bıraktığı boşluğu anında dolduramaz ve düşük hava

basıncı bölgesi oluşur. Bu nedenle hareket, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, öndeki yüksek basınç bölgesinde aracın ön tarafında hareket yönüne ters bir itme kuvveti ve arkadaki düşük basınç bölgesinde aracın arka tarafında yine hareket yönüne ters bir çekme kuvveti oluşur. Araç üzerinde ortaya çıkan bu kuvvet, şekil sürüklemesidir.



Şekil 4.2. Şekil sürüklemesi

Cidar sürtünmesi olayında ise araçtan uzaktaki hava hareketsizken aracın dış yüzeyine yakın olan hava neredeyse aracın hızında hareket eder. İki hava molekülü arasındaki hız farkı aerodinamik sürtünmenin ikinci bileşeniyle sonuçlanan bir sürtünme kuvveti üretir.

Aerodinamik sürtünme, araç hızının v , araç ön alanının A_f , aracın şekli ve hava yoğunluğunun ρ bir fonksiyonudur. Aerodinamik sürüklenme olarak ifade edilir ve Denklem 4.2’de gösterilmiştir.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A_f C_d (v + v_r)^2 \quad (4.2)$$

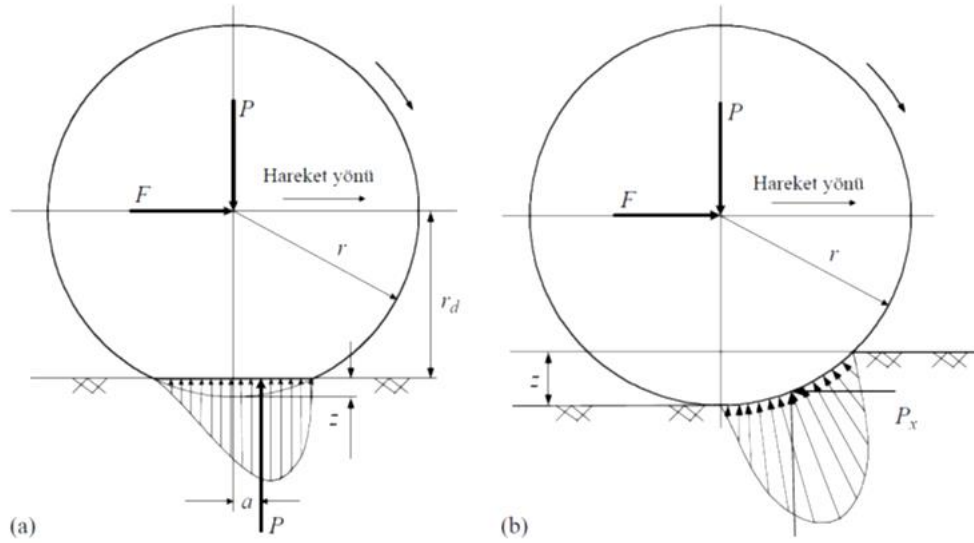
C_d , aracın şeklini karakterize eden aerodinamik sürtünme katsayısıdır ve v_r , aracın hareket yönündeki rüzgâr hızının bileşenidir. Bu bileşen, araç hızının tersi yönünde olduğunda pozitif bir işarete ve araç hızı ile aynı yönlü olduğunda negatif bir işarete sahiptir. Aerodinamik sürtünme aracın ön tarafından esen rüzgâr hızıyla artar. 10 m/s’lik bir rüzgâr hızı, rüzgarsız 36 km/h giden bir araca eşit bir ek sürüklemeye neden olur ve 25 m/s’lik bir rüzgâr hızı 90 km/h’lik bir araç hızına eşit bir dirence neden olur. Araca etki eden rüzgârın yönü pratikte rastgeledir ve araçla aynı yönlü olmayan rüzgârlar sadece aracın etkin kesit alanını değil, aynı zamanda binek otomobiller için genel rüzgâr koşullarında hesaplanan aerodinamik sürüklenme katsayısını da %5 ila %10 civarında arttırır [137]. Havanın yoğunluğu sıcaklığa, neme ve basınca bağlı olarak değişiklik gösterir.

Aracın efektif kesit alanı, araç boyutuna ve şekline göre değişir. Otomobil üreticileri için, belirli bir otomobil modelinin alanının değeri, ayrıntılı çizimler veya belki rüzgâr tüneli testleri yoluyla bulunabilir. Sürtünme katsayısı, C_d , araç üzerinde aktif olan tüm sürüklenme etkilerini temsil eden boyutsuz bir parametredir. Tipik olarak C_d değeri, günümüz binek otomobillerinde 0,20-0,35 aralığındadır. Sürüş esnasında aracın etrafındaki ve içindeki hava akımı değiştirilirse C_d değeri de değişecektir. Örneğin açık bir yan cam C_d değerini yaklaşık % 5 artırabilir [138]. Son yıllarda yeni

biner otomobillerde genel eğilim, yakıt verimliliği ve düşük emisyonlara artan ilgiden dolayı C_d değerlerini düşürmek olmuştur. Aerodinamik sürtünmeyi azaltma üzerine yapılan çalışmaların çoğu yolcular için tasarım ve kompartıman konforundan çok fazla taviz vermemek için muhtemelen alandan ziyade C_d değerini düşürmeye odaklanacaktır [139].

4.1.2. Yuvarlanma Direnci

Lastiklerin sert yüzeylerdeki yuvarlanma direnci esas olarak lastik malzemenin yuvarlanırken karkas yapısının bükülmesi sonucu oluşan histerezisten kaynaklanır [138]. Histerezis, yer tepki kuvvetlerinin asimetrik dağılımına neden olur ve temas alanının ön yarısındaki basınç, Şekil 4.3 (a)'da gösterildiği gibi arka yarısından daha büyük olur. Bu durum zemin tepki kuvvetinin ileriye doğru kaymasına neden olur ve bu tepki kuvveti, tekerlek merkezine etki eden normal yük ile tekerleğin yuvarlanmasına zıt yönde bir moment oluşturur. Yumuşak yüzeylerde Şekil 4.3 (b)'de gösterildiği gibi temel olarak zemin yüzeyinin deformasyonu yuvarlanma direncine neden olur ve yer tepki kuvveti neredeyse tamamen ön yarıya kayar.



Şekil 4.3. (a) sert ve (b) yumuşak yol yüzeyinde lastik yön değiştirme ve yuvarlanma direnci

Yuvarlanma direncinin analitik modelleme yoluyla tahmin edilmesi çok zordur çünkü yediden fazla farklı olguya bağlıdır. Bu nedenle, uzunlamasına yönde bir araca etki eden yuvarlanma direnci kuvveti F_y , genellikle aracın efektif normal yükü ile boyutsuz yuvarlanma direnci katsayısı, C_r çarpımı olarak ifade edilir. M , araç kütlesi, g , yerçekimi ivmesi, α , yol eğim açısıdır. Denklem 4.3 ile F_y aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$F_y = C_r M g \cos \alpha \quad (4.3)$$

Yuvarlanma direnci katsayısı, C_r , lastik malzemesi, lastik yapısı, lastik sıcaklığı, lastik şişirme basıncı, diş geometrisi, yol pürüzlülüğü, yol malzemesi ve yolda çeşitli sıvıların bulunup bulunmaması gibi birçok faktöre göre değişiklik gösterir. Son yıllarda yakıt tasarrufu için binek otomobillere yönelik düşük dirençli lastikler geliştirilmiştir olup yuvarlanma direnci katsayıları 0,01'in altına düşürülmüştür. Lastik basıncının ve sıcaklığının artmasıyla C_r değeri düşerken hız ile artmaktadır. DeneySEL sonuçlara dayanarak, sert bir yüzeyde yuvarlanma direncini hesaplamak için birçok ampirik formül önerilmiştir. Örneğin, beton yol üzerindeki binek otomobillerin yuvarlanma direnci katsayısı aşağıda verilen Denklem 4.4'teki gibi hesaplanabilir.

$$C_r = C_0 + C_h \left(\frac{v}{100} \right)^{2,5} \quad (4.4)$$

burada v , km/h cinsinden araç hızıdır ve C_0 ve C_h , lastiğin şişirme basıncına bağlıdır. Araç performans hesabında yuvarlanma direnci katsayısını hızın lineer bir fonksiyonu olarak ele almak yeterlidir. En yaygın şişirme basıncı aralığı için, beton yolda bir binek otomobil için aşağıdaki Denklem 4.5 kullanılabilir.

$$C_r = 0,01 \left(1 + \frac{v}{100} \right) \quad (4.5)$$

Bu denklem ile 128 km/h'e kadar olan hızlar için kabul edilebilir doğrulukla C_r değeri tahmin edilebilir. Araç performansı veya yakıt ekonomisi tahminleri sırasında, kuru beton veya asfalt üzerindeki binek otomobil lastiklerini temsil eden radyal tipler için değerler 0,011 ila 0,015 aralığında sabit değerler kullanılabilir [140]. Son yıllarda artan çevresel kaygılar nedeniyle, artık düşük yuvarlanma dirençli lastikler de mevcuttur, bu nedenle 0,007 ila 0,009 arasındaki düşük C_r değerleri de uygulanabilir [141]. 2005'teki yeni lastiklerin lastik üreticisi verilerine göre, düşük hızlı lastiklerin (180-190 km/h) ortalama C_r 'si 0,0098, yüksek hızlı lastikler (210-240 km/h) için 0,0101 iken çok yüksek hızlı lastikler için (240 km/h üzeri) 0,0113'tür [142].

4.1.3. Eğim Direnci

Bir araç yokuş yukarı çıktığında veya aşağı indiğinde ağırlığı, Şekil 1'de gösterildiği gibi, daima aşağı yönde bir bileşen oluşturur. Bu bileşen eğim tırmanmada ileri harekete karşı, eğim inişte aynı yönde olur. Araç performans analizinde sadece yokuş yukarı çalışma dikkate alınır. Bu eğim kuvvetine genellikle eğim direnci denir ve Denklem 4.6 ile ifade edilebilir.

$$F_e = Mg \sin \alpha \quad (4.6)$$

Enerji açısından bakıldığında düz olmayan bir yolda sürüş, aracın potansiyel enerjinin artmasına ve azalmasına neden olacaktır. Binek otomobillerin genel kullanım şartlarında, başlangıç konumundan itibaren (örneğin evden) gidilen rota ne olursa olsun başlangıç noktasına tekrar geri döndüğünde potansiyel enerji aynı kalır. Bu noktada BEA veya HEA'lar rejeneratif frenlemede olduğu gibi, yokuş aşağı giderken kaybettikleri potansiyel enerjinin bir kısmını geri kazanabilir.

Bazı literatürde, lastiğin yuvarlanma direnci ve eğim direnci birlikte yol direnci olarak adlandırılır ve Denklem 4.6 ile şu şekilde ifade edilir.

$$F_y + F_e = C_r Mg \cos \alpha + Mg \sin \alpha = Mg(C_r \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (4.7)$$

Hem hızlanma kuvveti hem de eğim kuvveti, araç kütlesinin bir fonksiyonudur bu nedenle herhangi bir araç için belirli bir hızlanma seviyesinin, belirli bir yol eğim seviyesiyle aynı tekerlek kuvvetine neden olduğu sonucu ortaya çıkar. Eşdeğer tekerlek kuvvetine sahip tipik hızlanma ve eğim seviyeleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Eşdeğer tekerlek kuvvetine sahip tipik hızlanma ve eğim seviyeleri

a (m/s ²)	1	2	3	4	5	6
Eğim (%)	10,3	20,8	32,1	44,7	59,2	77,3
Eğim (%)	5	10	15	20	25	30
a (m/s ²)	0,49	0,98	1,46	1,92	2,38	2,82

4.1.4. Dinamik Eşitlikler

Şekil 1'de gösterildiği gibi, iki dingilli bir araca etki eden ana dış kuvvetler, ön ve arka lastiklerin yuvarlanma direnci $F_{y\bar{o}}$ ve F_{ya} , yuvarlanma direnci momenti $T_{y\bar{o}}$ ve T_{ya} , aerodinamik sürtünme F_a , eğim direnci F_e ve ön ve arka lastiklerin çekiş gücü, $F_{\bar{c}o}$ ve F_{ca} ile temsil edilir. Arkadan çekişli bir araç için $F_{\bar{c}o}$ sıfır iken, önden çekişli bir araç için F_{ca} sıfırdır. Uzunlamasına yön boyunca araç hareketinin dinamik denklemi Denklem 4.8'deki gibi ifade edilir.

$$M \frac{dv}{dt} = (F_{\bar{c}o} + F_{ca}) - (F_a + F_y + F_e) \quad (4.8)$$

Lastik-zemin temasının destekleyebileceği maksimum çekiş gücünü tahmin etmek için ön ve arka akslardaki normal yükler belirlenmelidir. Tüm kuvvetlerin lastik-yer alanının merkezinde oluşturdukları momentleri toplanarak, ön aks üzerindeki nominal yük $W_{\bar{o}}$ ve arka aks üzerindeki nominal yük W_a şu Denklem 4.9 ve 4.10 ile belirlenebilir.

$$W_{\bar{o}} = \frac{L_b}{L} Mg \cos \alpha - \frac{h_g}{L} \left[F_{\bar{c}} - F_y \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right] \quad (4.9)$$

$$W_a = \frac{L_a}{L} Mg \cos \alpha + \frac{h_g}{L} \left[F_{\bar{c}} - F_y \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right] \quad (4.10)$$

Bu denklemlerin sağ tarafındaki ilk terim, araç düz bir zeminde dururken ön ve arka aks üzerindeki statik yük olup ikinci terim ise normal yükün dinamik bileşenidir. Lastik-zemin temasının destekleyebileceği maksimum çekiş gücü genellikle nominal yük ve C_r 'nin çarpımı olarak tanımlanır ve önden çekişli bir araç için şu Denklem 4.11'deki gibi ifade edilir.

$$F_{\bar{c},maks} = C_r W_{\bar{o}} = C_r \left\{ \frac{L_b}{L} Mg \cos \alpha - \frac{h_g}{L} \left[F_{\bar{c},maks} - F_y \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right] \right\} \quad (4.11)$$

Aracın sürüş şartlarında, güç kaynağından tahrik tekerlekleri üzerine maksimum çekiş gücü, Denklem 4.11'de lastik-zemin uyumu ile sınırlanan maksimum değerleri aşmamalıdır. Aksi takdirde tahrik tekerlekleri zeminde patinaj yaparak aracın dengesinin bozulmasına neden olur. Bu durum özellikle araç ıslak, buzlu, karla kaplı veya yumuşak toprak yollarda giderken de geçerlidir. Deneysel sonuçlar çeşitli zemin türlerinde tahrik tekerleğinin maksimum çekiş gücünün, çalışan tekerleğin kaymasıyla yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu aynı zamanda lastiğin esnekliği nedeniyle kaymanın çok az olduğu iyi asfaltlanmış kuru bir yolda da geçerlidir. Bir lastiğin kayması, s , genel olarak da Denklem 4.12'deki gibi tanımlanabilir.

$$s = \left(1 - \frac{v}{r\omega}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{r_e}{r}\right) \times 100 \quad (4.12)$$

burada, v , lastik merkezinin öteleme hızı, ω , lastiğin açısal hızı, r , serbest dönen lastiğin yuvarlanma yarıçapı ve r_e , lastik merkezinin öteleme hızının açısal hızına oranı olarak tanımlanan, lastiğin etkin yuvarlanma yarıçapıdır. Çekiş esnasında v hızı $r\omega$ 'den küçüktür ve lastiğin kayması 0 ile 1 arasında pozitif bir değere sahiptir. Frenleme sırasında lastik kayması şu şekilde tanımlanır (Denklem 4.13).

$$s = \left(1 - \frac{r\omega}{v}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{r}{r_e}\right) \times 100 \quad (4.13)$$

Küçük kayma aralığında çekme kuvveti kayma değeriyle neredeyse doğrusal orantılıdır. Bu küçük kayma, temas alanında lastik ile zemin arasındaki nispi kaymadan ziyade lastiğin esnekliğinden kaynaklanır. Lastiğe bir çekiş torku uygulandığında, lastik-zemin temas alanında bir çekiş kuvveti geliştirilir ve temas alanı içindeki lastik sırtı sıkıştırmaya maruz kalır. Sırt elemanları temas bölgesine girmeden önce sıkıştırıldığından, lastiğin kat ettiği mesafe, serbest dönen bir lastikteki mesafeden daha az olacaktır. Lastiğin neredeyse lineer elastik özelliği nedeniyle, çekme kuvveti-kayma eğrisi neredeyse lineerdir. Tekerlek torkunda ve çekiş kuvvetinde daha fazla artış lastik sırtının bir kısmının yerde kaymasına neden olur ve çekme kuvveti ile kayma arasındaki ilişki doğrusal olmaktan çıkar.

4.2. Tasarlanan Aracın Performansı Parametrelerinin Belirlenmesi

Bir aracın sürüş performansı genellikle hızlanma süresi, maksimum hızı ve tırmanma kabiliyeti ile değerlendirilir. EA aktarma organları tasarımında uygun motor gücü derecelendirmesi ve şanzıman parametreleri, performans özelliklerini karşılamaya yönelik başlıca hususlardır. Tüm bu parametrelerin tasarımı, çoğunlukla cer motorunun hız-güç (tork) özelliklerine bağlıdır. Araca ait temel bilgiler Tablo 4.2'de verilmiştir. Araç önden çekişli olarak tasarlanmıştır.

Eğimsiz bir yolda ve son hıza ulaşılmış ivmelenmenin olmadığı bir durumda gerekli çekme kuvvetini hesaplamak için Araç Dinamikleri bölümündeki formüllerden yararlanılarak Denklem 4.14 oluşturulmuştur. Aracımızın daha sonraki bölümlerde nedeni belirtileceği üzere azami hızının

eğimsiz bir yolda 218 km/h olacağı hesaplanmıştır. Bu azami hızı sağlaması için gerekli çekme kuvveti, $F_{\zeta}=2042$ N olarak bulunmuştur.

$$F_{\zeta} = F_a + F_y = \frac{1}{2} \rho A_f C_d (v + v_r)^2 + \left[C_0 + C_h \left(\frac{v}{100} \right)^{2,5} \right] Mg \cos \alpha \quad (4.14)$$

Azami hız ile bulunan kuvvet değeri bize tekere aktarılması gereken gücü verecektir ve bu değer 123,66 kW'tır. Elektrikli bir araçta motordan tekerleğe verimin %92 olduğu düşünülürse cer motorunun üretmesi gereken mekanik gücün 134,4 kW olması gerekir [143]. Bu tez çalışmasında bu nedenle kullanılacak olan cer motoru 136 kW olarak seçilmiştir. Cer motoru olarak kullanılacak elektrik motorunun maksimum güç bölgelerinde çalışma verimi yaklaşık %90 olarak alınmıştır ki bu değer nasıl alındığı ilerleyen bölümde gösterilmiştir. Bu verim değerinde motorun çıkışından 136 kW güç alabilmek için girişine 151,1 kW'lık bir elektrik enerjisi uygulanması gerekmektedir. Bu elektriksel gücü sağlayacak olan iki kaynağımızdan biri olan yakıt pilinin ekipmanlarının güç tüketimi, yine her iki güç kaynağının soğutma ihtiyacı ve araçtaki diğer güç tüketen cihazlar da göz önünde bulundurulursa gerekli toplam güç 160 kW civarında olacaktır.

Tablo 4.2. Tasarlanan araca ait temel özellikler

Özellik	Değer
Kütle	1800 kg
Ön alan (A_f)	2,58 m ²
Aerodinamik katsayı (C_d)	0,25
Tekerlek yarıçapı	0,351 m
Etkin tekerlek yarıçapı	0,347 m
Dişli aktarma oranı	6
Akslar arası mesafe	2,8 m
Yük dağılımı (ön/arka aks)	%52/48
Ağırlık merkezinin yerden yüksekliği (h_g)	0,52 m

Hesaplanan 160 kW'lık güç yakıt pili ile batarya arasında paylaşımını optimum seviyede yapmak için ortalama güç tüketimi seviyesinde bir yakıt pili seçimi ve artan güç talebinin yüksek bir C oranına sahip batarya tarafından karşılanması hedeflenmiştir. Ortalama bir güç seviyesi belirlemek için en genel kullanım oranına sahip çevrim olan WLTP çevriminin son bölümünde duraklamasız hız ortalaması olan 94 km/h hızla giderken yine bu bölümde gerekli ivme değeri olan 1,03 m/s²'lik bir ivmelenme sağlayabilmek için tekerlere aktarılması gereken güç 62,5 kW olarak hesaplanmıştır. Bu gücün sağlanabilmesi için elektriksel gücün 75,5 kW olduğu yardımcı ekipman güçleriyle bu değer 80 kW alınabileceği hesaplanmıştır. Yakıt pillerinin gerekli durumlarda

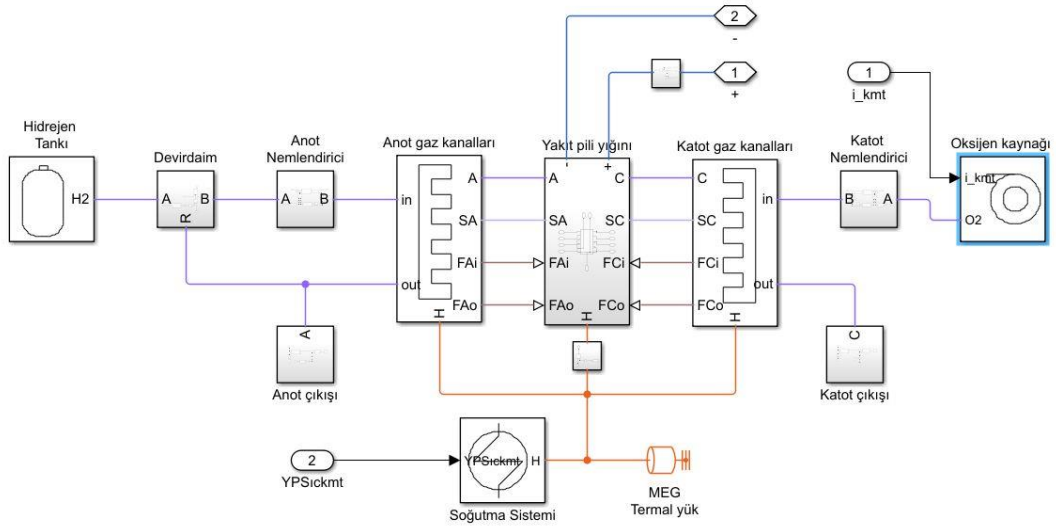
nominal gücünün %30 üzerinde güç sağlayabildiği göz önünde bulundurularak tez çalışmasında simülasyonda kullanılacak olan yakıt pili 60 kW olarak tasarlanmıştır [144]. Kalan 80 kW'lık güç 5C'lik bir deşarj kapasitesine sahip 16 kWh'lik bir batarya seçimi ile sağlanmıştır.

4.3. Yakıt Pili ve Karakteristiklerinin Modellenmesi

Bu çalışmada yakıt pili olarak PEM yakıt pili türü tercih edilmiştir. Bu türün tercih edilmesinde işletme sıcaklığının düşük olması güç yoğunluğunun nispeten yüksek olması yakıt olarak saf hidrojen kullanıldığından ek bir yakıt işleme teçhizatı gerektirmemesi ve yine yakıt beslemesinin düşük basınçlarda gerçekleştirilebilmesi gibi nedenler yatmaktadır. MATLAB'da Simscape Yakıt Pili bloğu kullanılmıştır. Bloğa ait model Şekil 4.4'te görülmektedir. Yakıt pili yığınının ait Matlab metin dosyasına değer olarak girilen özellikler ise Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Tasarlanan PEM yakıt pili yığınının ait temel özellikler

Özellik	Değer
Hücre sayısı	300
Hücre aktif alanı	280 cm ²
Membran kalınlığı	125 µm
Katot gaz difüzyon tabakası kalınlığı	250 µm
Anot gaz difüzyon tabakası kalınlığı	0,347 m
Azami akım yoğunluğu ($i_{y,maks}$)	1,4 A/cm ²
Değişim akımı yoğunluğu (i_0)	8×10^{-5} A/cm ²
Açık devre gerilimi (20 °C'de)	367.4 V
Devrilme akımı (i_{maks})	389 A
Nominal güç (240V, 250 A)	60 kW
Azami güç (211,63 V, 379,2 A)	80,25 kW



Şekil 4.4. MATLAB Simscape yakıt pili bloğu

Yakıt pilleri ve performanslarına ait ayrıntılı bilgi daha önceki bölümlerde verilmiştir. Yakıt piline ait Gibbs serbest enerjisiyle yakıt hücresinin elektromotor kuvvetini (EMK) tersinir açık devre gerilimi Denklem 2.7 ile verilmişti ve 80°C'de çalışan bir hidrojen yakıt hücresinde bu değerin 1,18 V olduğu hesaplanmıştı. Tasarım aşamasında bu değer Nernst gerilimi, V_{nt} , olarak Denklem 2.15'te belirtildiği üzere 1,164 V bulunmuştur. Bu değer belirli bir sıcaklık ve basınçta var olabilecek tersinir hücre gerilimidir. Burada gerilim düşümüne neden üç farklı olgu daha mevcut olup bunlar Tafel denklemleriyle belirlenen aktivasyon gerilim (V_{akt}) kayıpları, kütle transfer gerilim (V_{dif}) kaybı ve direnç gerilim (V_{ohm}) kaybıdır. Bu nedenle Denklem 19'da net hücre gerilimini (V_c) bulabilmek için Denklem 4.15-4.18'de bulunan bu gerilim düşümlerini Nernst geriliminden çıkarmak gerekir.

$$V_{akt} = \frac{RT}{F} \log \frac{i}{i_0} \quad (4.15)$$

$$V_{dif} = \frac{RT}{F} \log [-3 - 1000 \times (i/i_{y,maks} - 0.999)] \quad (i < 0.999i_{y,maks}) \quad (4.16)$$

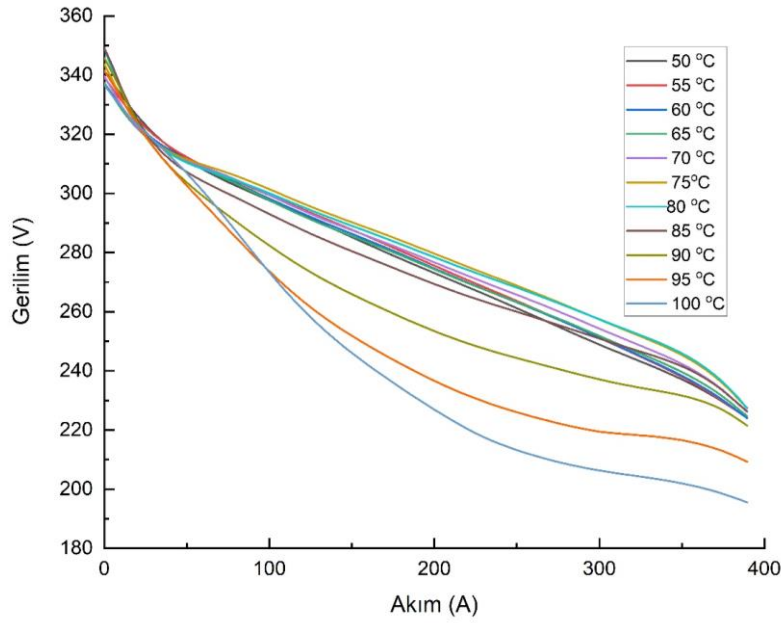
$$V_{dif} = \frac{RT}{F} \log [1 - (i/i_{y,maks})] \quad (i \geq 0.999i_{y,maks}) \quad (4.17)$$

$$V_{ohm} = R_{ohm} \times i \quad (4.18)$$

$$V_c = V_{nt} - V_{akt} - V_{dif} - V_{ohm} \quad (4.19)$$

Tasarlanan yakıt pilinin farklı sıcaklık değerlerinde akım-gerilim karakteristikleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Yakıt pilleri akışkan bir yakıttaki kimyasal bağ enerjisini çeşitli kimyasal işlemler sonucunda elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bu nedenle akım-gerilim karakteristikleri çok farklılık gösterebilir. Bu değişikliğe sebep olabilecek birçok parametre, membran kalınlığı, anot ve katot gaz difüzyon tabakalarının kalınlığı gibi, yakıt pilinin üretimi ile ilgili olup işletme şartlarında bu karakteristiği en çok etkileyecek olanı ise sıcaklıktır. Daha önceki bölümlerde yakıt piline ait

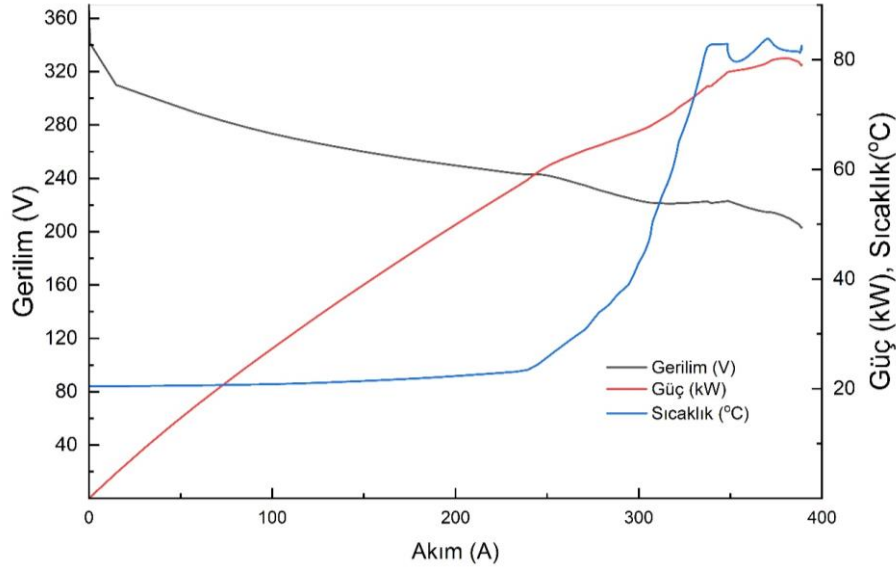
verilen birçok denklemin sıcaklık ifadesi içerdiği görülmüştür. Şekil 2.6’da verilen yakıt hücresi için hücre gerilimi ve akım yoğunluğu grafiğine benzer bir grafik burada da elde edilmiştir. Akım çekilmesi ile birlikte gerilimdeki hızlı ilk düşüşün ağırlıklı sebebi aktivasyon kaybıdır. Gerilim düşümünün daha yavaş grafiğin daha doğrusal olduğu bölgelerde ise omik kayıplar etkilidir. Burada sıcaklık farkı ile gerilim değişiminin daha net görülebilmesi için gerilim ölçeğinin 180 V’tan başladığı göz önünde bulundurulmalıdır. Yine daha yüksek akım bölgelerinde gerilimin de çok daha hızlı düşüşe geçtiği görülmüştür ki bunun sebebi ise bu bölgede kütle transfer kayıplarının çok fazla olmasıdır. Kütle transfer kaybının çok fazla olduğu bu bölgede yakıt pilinin işletilmesi pek istenilmez çünkü akımdaki küçük bir artış oransal olarak gerilimde çok daha büyük bir düşüşe neden olmaktadır. Bu durumda ise akım ve gerilimin çarpımına eşit olan güç değeri artmak yerine azalmaya başlar ki bu istenilenin aksi bir durum oluşturacağı için uygun bir işletme gerçekleştirilemez.



Şekil 4.5. 60 kW PEM yakıt pili akım-gerilim karakteristikleri

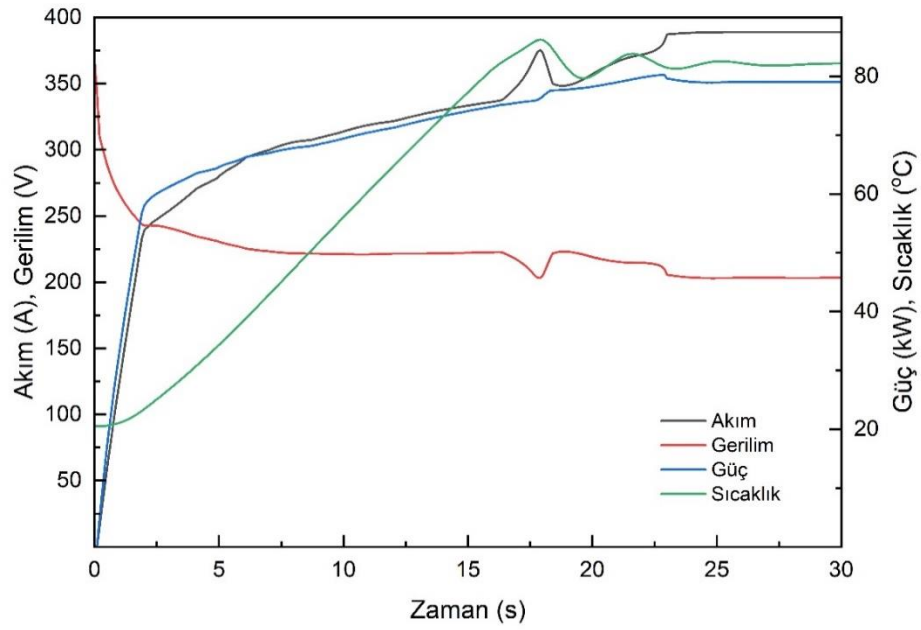
Şekil 4.6’da ise yakıt pilinin tam gaz çalışmadaki akım, gerilim, güç ve sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Yakıt pilinin ilk çalışma aşamasında çok küçük bir akım çekilmesi durumunda bile açık devre gerilimindeki keskin düşüş burada da gözlemlenmiştir. Daha sonraki doğrusal bölge burada daha net gözlemlenebilir. Burada araç ilk çalışma anında ortam sıcaklığı normal şartlar altında 20 °C alındığından yakıt pilinin ilk çalışma sıcaklığı da bu değerde olmuştur. Aracın ilk çalışma anında güç talebi ilk olarak batarya tarafından sağlanmıştır. Bu nedenle yakıt pilinin sağladığı akım keskin bir artış göstermemiştir. Bu nedenle nominal işletme sıcaklığı olan 80 °C’ye

daha uzun bir sürede ulaşmıştır. Nominal akım değeri sonrasında yakıt pilindeki reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısıнын da artmasıyla sıcaklıkta artış görülmeye başlanmıştır. Bu artış genelde nominal işletme sıcaklığı olan 80 °C'ye kadar olup bu değer biraz aşılp ısı atılım kontrolüyle tekrar bu değerde tutulmaya çalışılmaktadır. Tabi ki uzun süreli olarak yüksek güç talebi altında yakıt pili nominal gücünün üzerinde çalıştırılırsa sıcaklık değerleri 80 °C'lerin üzerinde seyredebilir.



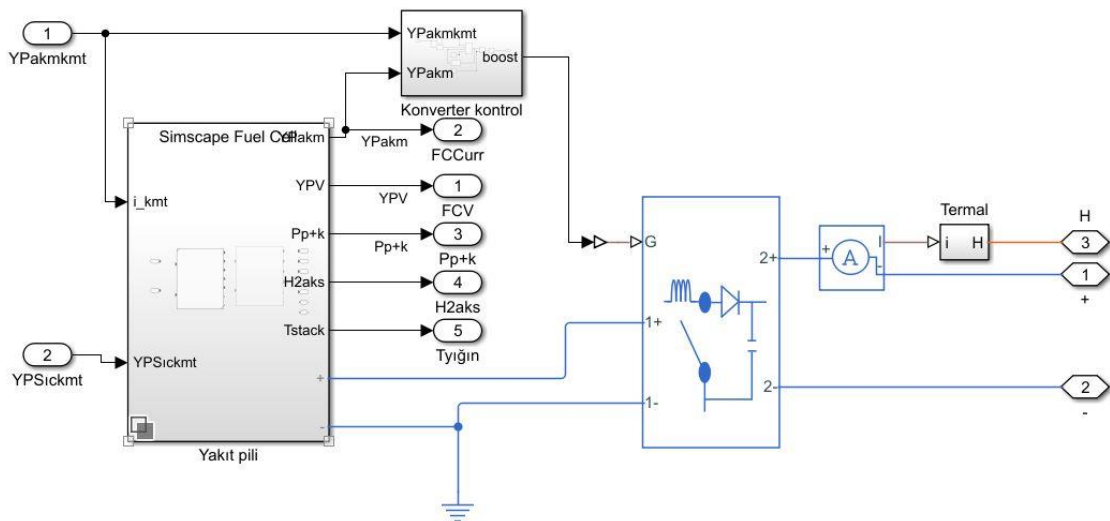
Şekil 4.6. 60 kW PEM yakıt pili tam gaz çalışmadaki akım, gerilim, güç ve sıcaklık değerleri

Şekil 4.7'de ise yakıt pilinin tam gaz çalışmada karakteristiklerinin zaman bağlı değişimi verilmiştir. Sıcaklığın 80 °C'yi aşmasıyla hücrelerin Nernst gerilimi düşmüş olup gerilimin azalmasına karşın artan güç talebiyle akım daha da keskin bir artış göstermiştir. Akımdaki artış da tekrar gerilimde düşüşe neden olmuştur. Burada termal yönetim oldukça önemli olup özellikle ani güç taleplerinin nedeniyle ani akım artışlarının olduğu durumlarda açığa çıkan ısıнын yakıt pilinin nominal işletme şartlarında kalabilecek şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. 16. saniye civarı sıcaklık nominal değer olan 80 °C'yi aşıp 18. saniyede 86 °C'yi görmüştür. Burada yakıt pilinin 80 °C'de işletilmeye çalışılmak istenmesi nedeniyle sıcaklık bu değere ulaşınca kadar müdahale edilmemektedir. Bu değeri geçtiğinde müdahale edilmeye başlanır ama ısı fazlasını uzaklaştırmak çok hızlı olarak gerçekleştirilemez. Belirli bir gecikmeyle sıcaklık tekrar 19,4. saniyede tekrar 80 °C'ye düşürülen sıcaklık bir miktar bu değerinde altına inip tekrar yükselişe geçmiştir. 21,6. saniyede 84 °C'lere çıkan sıcaklık tekrar düşürülerek 81 °C'lere inmiştir. Bu şekilde bir dalgalanmayla sıcaklık en sonunda 84 °C'lerde sabit bir seyir izlemiştir.



Şekil 4.7. 60 kW PEM yakıt pili tam gaz çalışmadaki karakteristiklerinin zaman bağılı değişimi

Yakıt pilinin çıkışında elde edilen değişken gerilimi regüle edip motor beslemesine vermek için tek yönlü Boost konverter kullanılmaktadır. Boost konverter bloğu, bağlı bir kontrolör ve kapı sinyali üretici tarafından sürülerek DC gerilimi yükselten bir dönüştürücüyü temsil eder. Boost dönüştürücüler gerilimi artırdıkları için yükseltici gerilim regülatörleri olarak da bilinir. Boost konverter bloğu Matlab kütüphanesinde Simscape / Elektrik / Yarı İletkenler ve Dönüştürücüler / Dönüştürücüler bölümünden alınmıştır ve Şekil 4.8’de yakıt pili konverter blok modelleri görülmektedir.



Şekil 4.8. Yakıt pili ve konverter blok modelleri

Boost konverter bloğu bir asenkron dönüştürücüyü bir anahtarlama cihazıyla veya bir senkron dönüştürücüyü iki anahtarlama cihazıyla modellememizi sağlar. Anahtarlama cihaz türü içindeki Ortalamalanmış Anahtar (Averaged Switch) seçeneği kullanılmıştır. Ortalamalanmış Anahtar paralel olmayan diyotlu yarı iletken anahtardır. Kontrol sinyali bağlantı noktası (G) 0 ile 1 aralığındaki değerler giriş olarak verilir. Bağlantı noktasındaki değer 0 veya 1'e eşit olduğunda, ortalama anahtar ya tamamen açılır ya da tamamen kapanır. Bağlantı noktasındaki değer 0 ile 1 arasında olduğunda, ortalama anahtar kısmen açılır.

4.4. Batarya ve Karakteristiklerinin Modellenmesi

Bu tez çalışmasında batarya paketinde kullanılmak üzere piyasada hâlihazırda bulunan ve Panasonic firması tarafından üretilen NCR18650BD kodlu Li-ion NCA tipi pil seçilmiştir. Bu batarya birçok farklı uygulamada kullanılmakta olup özellikle Tesla firması tarafından gerek elektrikli araçlarda gerekse güç ünitelerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Tablo 4.4'te tasarlanan bataryaya ait temel özellikler Şekil 4.11'de ise boyutlar verilmiştir. Pile ait tüm gerekli parametreler üretici kataloglarından elde edilmiş olup Matlab'da pil bloğunun Workspace'lerine girilmiştir. Bu nedenle matematiksel bir modelleme yapıma ihtiyacı duyulmamıştır. Şekil 4.9'da Batarya ve DC-DC konverter blok modelleri verilmiştir.

Tablo 4.4. Tasarlanan batarya paketinde kullanılan pile ait temel özellikler

Özellik	Değer
Pil gerilimi (25 °C'de, %60 BDO)	3,73 V
Pil kapasitesi (25 °C'de)	3037,3 mAh
Pil ağırlığı	49 g
Şarj sıcaklığı	0 – 45 °C
Deşarj sıcaklığı	-20 – 60 °C
Pil enerji yoğunluğu (Hacimsel)	645 Wh/L
Pil enerji yoğunluğu (Kütlesel)	231 Wh/kg

3037,3 mAh olan bu seri gruplardan 20 tanesi paralel bağlanarak 60,75 Ah'lık bir kapasite elde edilmiştir. Batarya gerilimi ve kapasitesi çarpılarak depolanan enerji miktarı 16,3 kWh olmuştur. Batarya 10 s süre ile kısıtlı olmak üzere nominal akım kapasitesinin 5 katını yani 300 A'lık bir akım verebilmektedir. Bu süre değeri sadece 3 s ile sınırlı olmak şartıyla 450 A'e kadar çıkabilmektedir. Bu batarya kullanımını gerekli kılan en büyük avantajdır çünkü bu sayede bataryadan gerekli durumlarda 80 kW ve yine çok ani aşırı güç gereksinimlerinde 100 kW'ın üzerinde bile güç sağlanabilmektedir.

Tablo 4.5. Tasarlanan batarya paketine ait temel özellikler

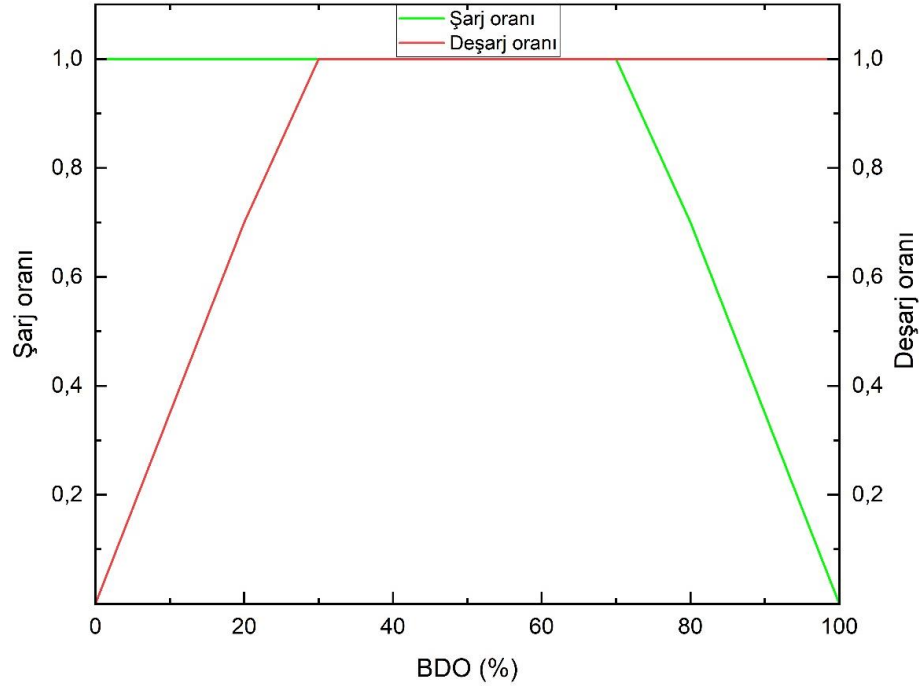
Özellik	Değer
Pil sayısı (72 seri × 20 paralel)	1440
Batarya gerilimi (25 °C'de, %60 BDO)	268,33 V
Batarya kapasitesi (25 °C'de)	60,75 Ah
Batarya enerjisi	16,3 kWh
Deşarj akımı (Sürekli)	60 A
Deşarj akımı (5C-10 s)	300 A
Deşarj akımı (7,5C-3 s)	450 A
Şarj akımı (nominal 1 C-maksimum 2C)	60-120 A
Şarj sıcaklığı	0 – 45 °C
Deşarj sıcaklığı	-20 - 60 °C
Batarya enerji yoğunluğu (Hacimsel)	363,84 Wh/kg
Batarya enerji yoğunluğu (Kütlesel)	207,7 Wh/kg

Pil enerji yoğunluğu kütleli olarak ne kadar 231 Wh/kg olsa da batarya paketi oluşturma amacıyla bunların bir araya getirilmesinde kullanılan elektriksel ve fiziksel bağlantı aparatları, soğutma ekipmanları ve koruyucu metal mahfaza gibi ek teçhizatlar nedeniyle toplam kütlenin artması nedeniyle enerji yoğunluğu bir miktar düşerek 207,7 Wh/kg olmaktadır. Bir batarya paket görseli Şekil 4.11'de verilmiştir. Burada paket ölçüleri yaklaşık olarak 40cm×140cm×8cm toplam 44,8 L eder ki bu da hacimsel olarak yaklaşık 364 Wh/L değerine tekabül eder.



Şekil 4.11. Batarya paketinin model görünümü ve tipik bir 18650 tipi pile ait boyutlar

Bu tasarımda BDO %10 ila %90 arasında tutulması hedeflenmiştir. %80'lik BDO'da şarj oranı %70'e, %90'da ise %35'e düşürülerek pilin ömrünün azalmasına neden olacak sürekli yüksek şarj durumu engellenmeye çalışılmıştır. %20'lik BDO'da ise deşarj oranı %70'e, %10'da ise %35'e düşürülerek bataryanın tamamen deşarj olmasının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Tasarlanan araç fişli hibrit olduğu ve batarya kapasitesi normal hibritlere nazaran daha yüksek olduğu için bu sınırlar hibrit araçlarda genellikle %40 ila %80 olarak uygulanan aralıktan daha geniş tutulmuştur. Bu oranlar Şekil 4.12'da görülebilmektedir.

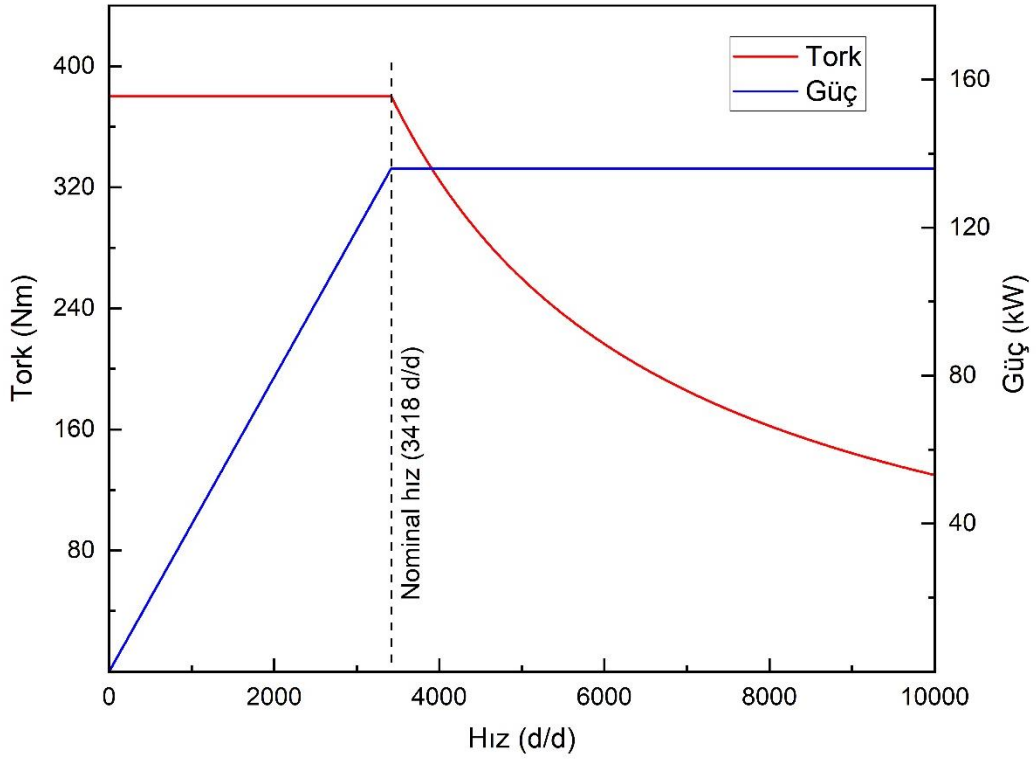


Şekil 4.12. BDO'na göre şarj ve deşarj oranlarının değişimi

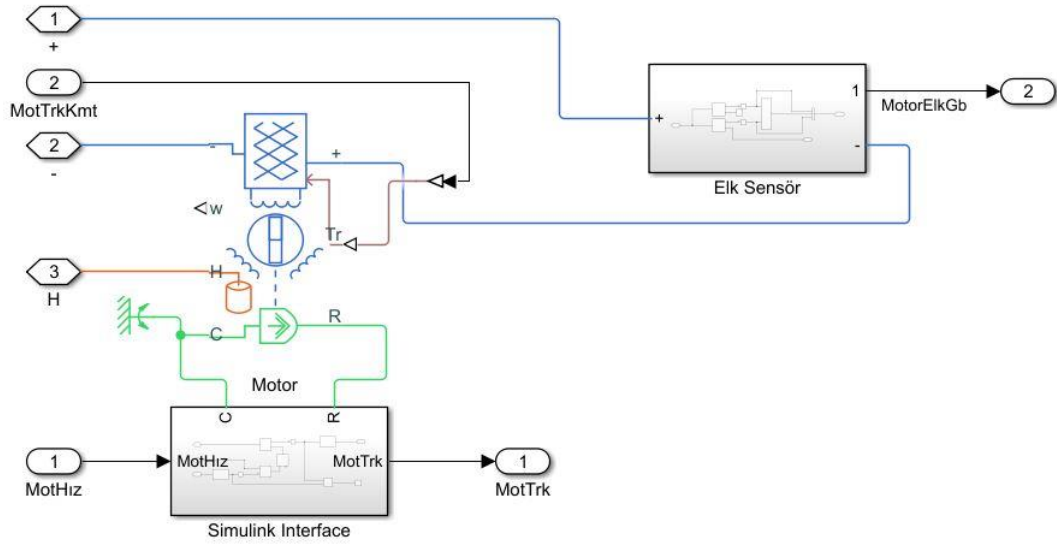
Bataryanın çıkışındaki güç çift yönlü bir DC-DC konverter üzerinden motor beslemesine verilmiştir. DC-DC konverter bloğu bir güç konverterinin davranışsal bir modelini temsil eder. Bu güç konvertörü yük tarafındaki voltajı düzenler. Giriş gücü, çıkış gücü ve kayıpları dengelemek için gerekli miktarda güç, batarya tarafından çekilir. Çift yönlü konverter sayesinde, yükten beslemeye rejeneratif güç akışı desteklenmiştir. DC-DC konverter bloğu MATLAB kütüphanesinde Simscape / Elektrik / Yarı İletkenler ve Dönüştürücüler / Dönüştürücüler bölümünden alınmıştır. Bu konverter görev döngüsü ayarlanarak buck, boost veya buck-boost konverter olarak kullanılabilir. Batarya çıkış gerilimi 270 V ve motor gerilimi 650 V olduğu düşünülürse bataryadan motora güç akışı sağlanırken boost, rejeneratif frenleme esnasında yükten bataryaya güç akışı sağlanırken ise rejeneratif frenleme gücüne bağlı olarak değişen gerilim seviyesi nedeniyle buck-boost modda çalışabilmektedir. Rejeneratif frenlemede her zaman frenleme gücünün tamamı bataryaya aktarılamaz. Burada bataryanın azami şarj kapasitesi sınırlayıcı bir faktör olup bu nedenle rejeneratif frenleme gücü bataryanın 2C şarj oranı nedeniyle 32 kW olarak belirlenmiştir.

4.5. Cer Motoru ve Karakteristiklerinin Modellenmesi

Değişken hızlı elektrik motoru sürücüleri genellikle Şekil 4.13'te gösterilen özelliklere sahiptir. Düşük hız bölgesinde motorun sabit bir torku vardır. Yüksek hız bölgesinde, motor sabit bir güce sahiptir. Düşük hızlı işlemlerde, akı sabit tutulurken elektronik dönüştürücünden geçen sinyalin artmasıyla motora uygulanan gerilim artar. Nominal hız noktasında motor gerilimi nominal gerilim değerine ulaşır. Nominal hızdan sonra, motor gerilimi sabit tutulur ve akı, artan hız ile hiperbolik olarak düşerek zayıflatılır. Bu nedenle tork da artan hız ile hiperbolik olarak düşer. Şekil 4.13'te bu tez çalışmasında tasarlanan araçta kullanılan 136 kW DSMSM'nin Moment-Hız ve Güç-Hız karakteristiği gösterilmiştir. Tasarlanan motora ait belirlenen parametreler MATLAB kütüphanesindeki Şekil 4.14'te gösterilen tablolaştırılmış motor bloğuna girilerek simüle edilmiştir.



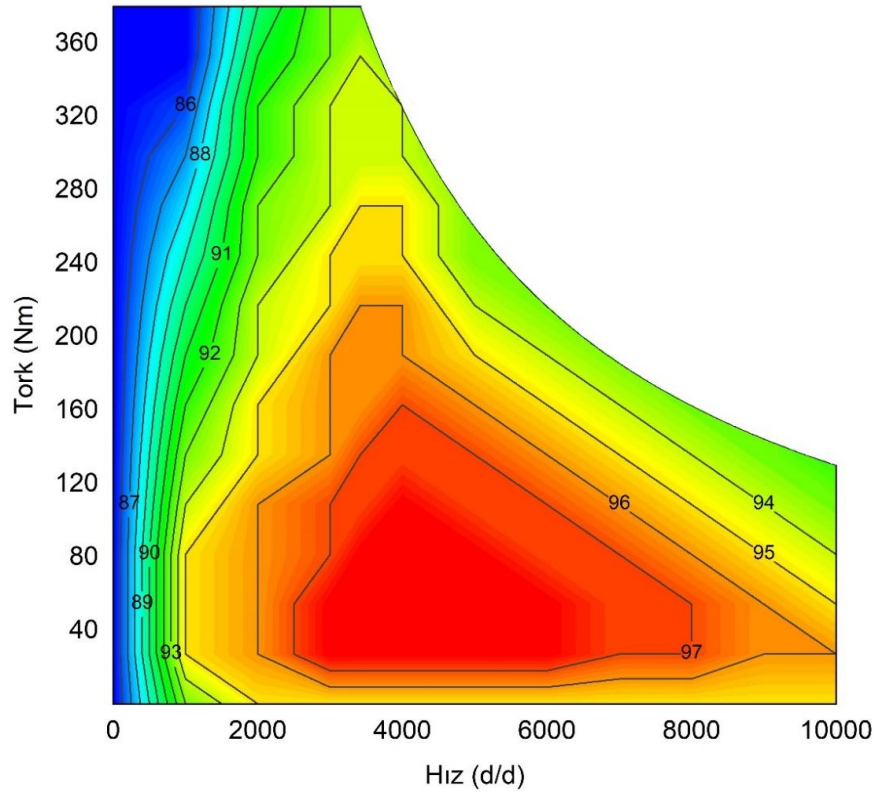
Şekil 4.13. 136 kW DSMSM Moment-Hız ve Güç-Hız karakteristiği



Şekil 4.14. MATLAB kütüphanesindeki tablolaştırılmış motor blok modeli

Uzun bir sabit güç bölgesi ile motorun maksimum torku önemli ölçüde artırılabilir ve dolayısıyla araç hızlanma ve tırmanma performansı iyileştirilirken şanzıman basitleştirilir. Tasarlanan motorda $SGHA = 10000/3418 = 2,926$ değerinde çıkmaktadır ki bu değer Tesla Model S 60 ile hemen hemen aynıdır. Bununla birlikte her motor tipi doğası gereği sınırlı maksimum hız

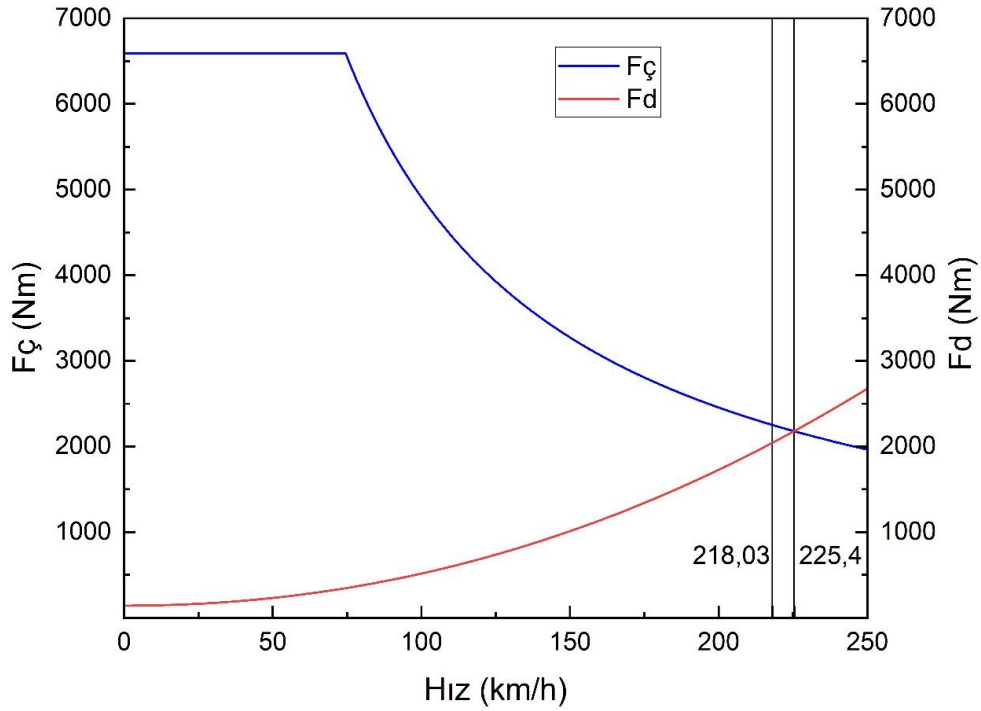
oranına sahiptir. Her ne kadar sürekli mıknatıslı motorlar zıt EMK etkileri dolayısıyla yüksek hız oranlarında kullanılamasa da sürekli mıknatısların rotor yüzeyinden iç bölgelerine kayırılarak oluşturulan DSMSM'lerde zıt EMK etkisi de azaltıldığından hız oranı 6 veya 8 gibi değerlerde seçilebilir. Burada motorun çıkarılabilmesi istenen maksimum hızı, yakıt tüketimi parametreleri ve elektrikli araçlarda iyileştirilmiş enerji tüketimi için tek hızlı aktarma organının optimum dişli oranı seçimi konusunda yapılan referans çalışmalar göz önünde bulundurularak optimum hız oranı 6 olarak belirlenmiştir [145]. Böylece aracın 200 km/h'in üzerindeki hızlara ulaşabilmesi sağlanırken hız oranının 8 olması durumuna göre yakıt tüketiminin hem hidrojen hem de benzin eşdeğeri bazında daha düşük olması sağlanır. Yapılan simülasyonlarda WLTP çevriminde bu düşüş miktarları sırasıyla %2,6 ila %2,7 iken daha yüksek hız ortalaması olan ArtMW150 çevriminde %4,3 ila %4,2 olmaktadır. Burada tercih edilen hız oranıyla motorun aslında daha verimli çalışma bölgeleri içinde kalması sağlanmıştır. Tasarlanan cer motoruna ait verimlilik haritası Şekil 4.15'te görülmektedir. Bu harita DSMSM'ler için yapılan tahmini ve gerçek verim analizleri referans alınarak hazırlanmıştır [146].



Şekil 4.15. 136 kW DSMSM verimlilik haritası

Düşürücü dişli oranının 6, etkin tekerler yarıçapının 0.347 m ve motorun maksimum dönme hızı 10.000 d/d olarak tasarlanmıştır. Bu durumda ulaşılacak maksimum hız değeri Denklem 2.9'a göre 218,03 km/h olarak bulunmuştur.

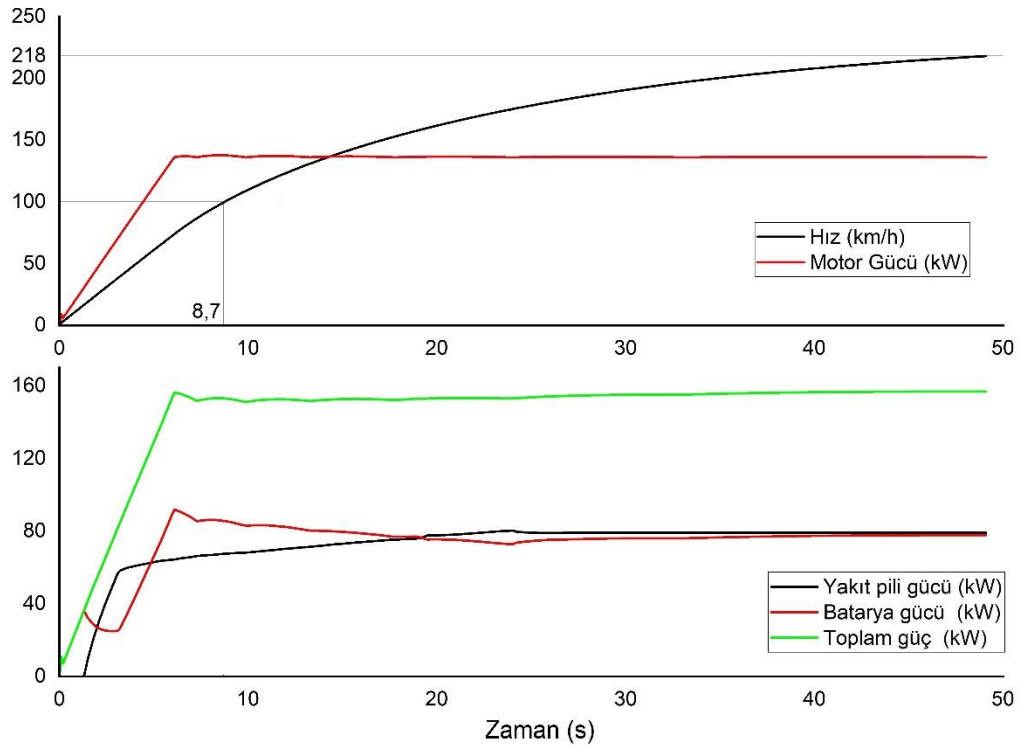
Bu tasarım parametreleri ile aracın 218,03 km/h hıza ulaşabileceği teorik olarak hesaplanmıştır. Tabii bu hesaplama tek başına bu değere ulaşılabilceği anlamına gelmemektedir. Bu hız değerinde zıt dirençlerin üreteceği kuvvetin, F_d , motor tarafından üretilen çekme kuvvetinden, $F_ç$, büyük olmaması da gerekmektedir. Şekil 4.16'da da gösterildiği üzere 218,03 km/h değerinde çekme kuvveti direnç kuvvetinden daha büyüktür. Bu hızın üzerinde motorun gücünün sabit kaldığı kabulüyle işleme devam edilirse çekme ve direnç kuvvetlerinin 225,4 km/h değerinde eşitlendiği yani teorik olarak aracın bu hıza çıkabileceği anlamına gelir. Tabi tasarlanan motorun azami devir değerinden sonra çıkış gücünde zayıflama olacağından bu değere ulaşamayacaktır. Yapılan simülasyon sonuçlarında azami hızın aşılmasına izin verilmesi durumunda aracın en fazla 223,6 km/h hıza ulaşabildiği görülmüştür.



Şekil 4.16. Hız değerlerine göre çekme kuvveti $F_ç$ ve direnç kuvveti, F_d

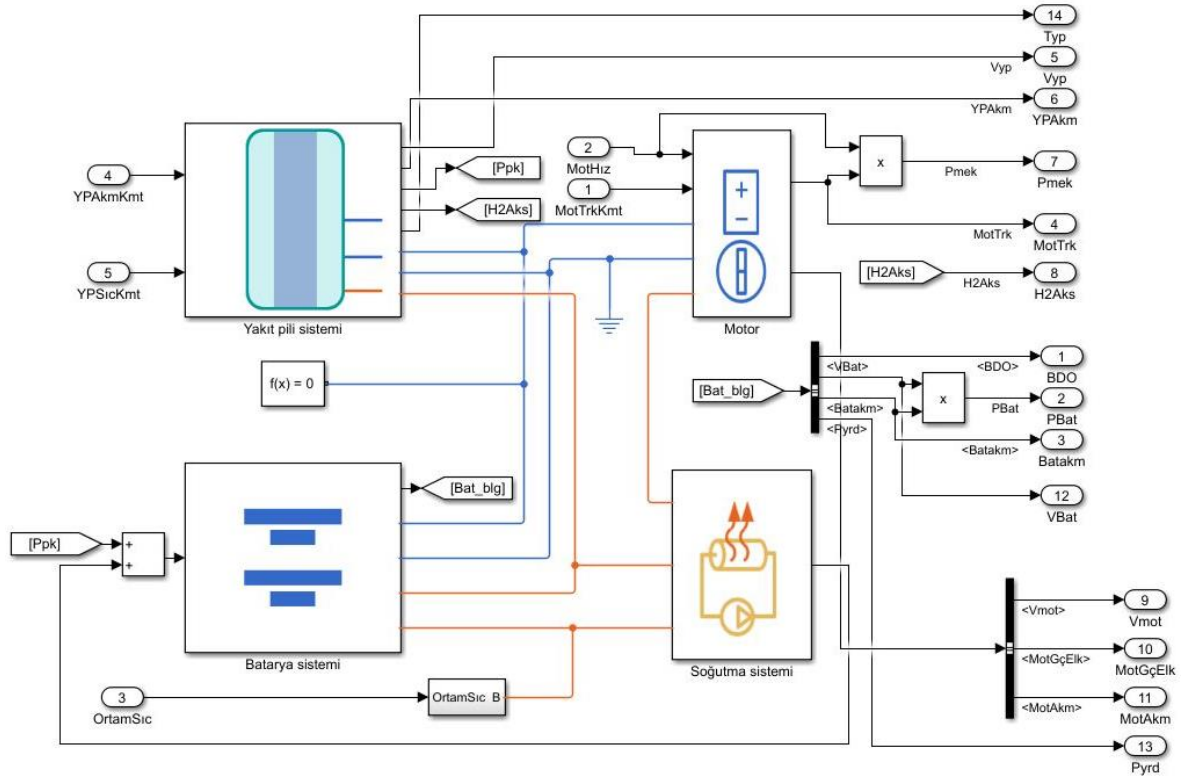
Bu hız değerlerinin birbirine yakın olması tasarım parametrelerinin optimum değerlerde seçildiğini de göstermektedir. Yani dişli aktarma oranı, motorun azami devri ve torku, ön alan (A_f) ve sürtünme katsayısı (C_d) gibi parametreler uygun değerlerde seçilmiştir. A_f ve C_d değerleri piyasada mevcut araçlara ait değerler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Şekil 4.17'de aracın durur halde iken tam gaz uygulanarak azami hıza kadar zaman hız grafiği çıkarılmıştır. Bu grafik üzerinden aracın 0-100 km/h hızlanma süresinin de 8,7 s olduğu görülmüştür. Aracın güç ağırlık oranı 13.24 kg/kW olduğu göz önünde bulundurulursa piyasadaki emsal araç verileriyle

örtüşmektedir. Örneğin 1920 kg ağırlığa 150 kW gücünde bir motora sahip Skywell ET5 aracında güç ağırlık oranı 12,8 kg/kW olup 0-100 hızlanması 7,9 s'dir. 1690 kg ağırlığında 120 kW gücünde bir motora sahip Seres 3 aracında güç ağırlık oranı 14,08 kg/kW olup 0-100 hızlanması 8,9 s'dir [147,148]. Yakıt pilli bir araç göz önünde bulundurulursa Toyota Mirai II aracının güç ağırlık oranı 14.02 kg/kW olup 0-100 hızlanması 9,2 s'dir [149]. Yaklaşık olarak aynı güç ve ağırlık değerlerine sahip olan tasarlanan araçla Mirai II aracı arasında 0,5 s bir süre farkı oluşmaktadır ki yakıt pilinin geç tepki süresi nedeniyle olağandır. Tasarlanan araçta kullanın yakıt pilinin gücü ve dolayısıyla aktif malzeme miktarı yarı yarıya düşürülmesine rağmen küçük kapasiteli bir batarya eklenerek daha performanslı bir araç elde edilebilmiştir. Şekil 4.17'de görüldüğü üzere ilk anda gereken güç talebi herhangi bir gecikme olmaksızın batarya tarafından karşılanmış olup yakıt pilinin de devreye girmesiyle talep gücünün de çok fazla olmadığı 1,3-2,8 saniyeleri arasında batarya gücü azalmıştır. Çünkü gerekli gücü yakıt pili sağlayabilmiştir. Daha sonra güç talebinde ki devam eden artış nedeniyle yakıt pili tek başına yeterli olmayıp tekrar batarya gücü artmaya başlamıştır. 4,9 saniyede yakıt pili ve batarya güçleri eşitlenmiştir. Güç talebindeki artış 6,1. saniyeye kadar devam etmiş ve motor maksimum gücü olan 136 kW'a ulaşmıştır. Bu noktada 156 kW'lık üretilen gücün yaklaşık %59'ine denk gelen 92 kW'lık bölümü bataryadan %41'si yakıt pili tarafından sağlanmıştır. 19. Saniye itibariyle güç paylaşımı %50-%50 olmuştur ve bu noktadan sonra genel olarak yakıt pili az bir farkla fazla güç sağlayarak batarya ile birlikte gerekli gücü sağlamışlardır.



Şekil 4.17. Araca ait tam gaz hızlanma grafiği

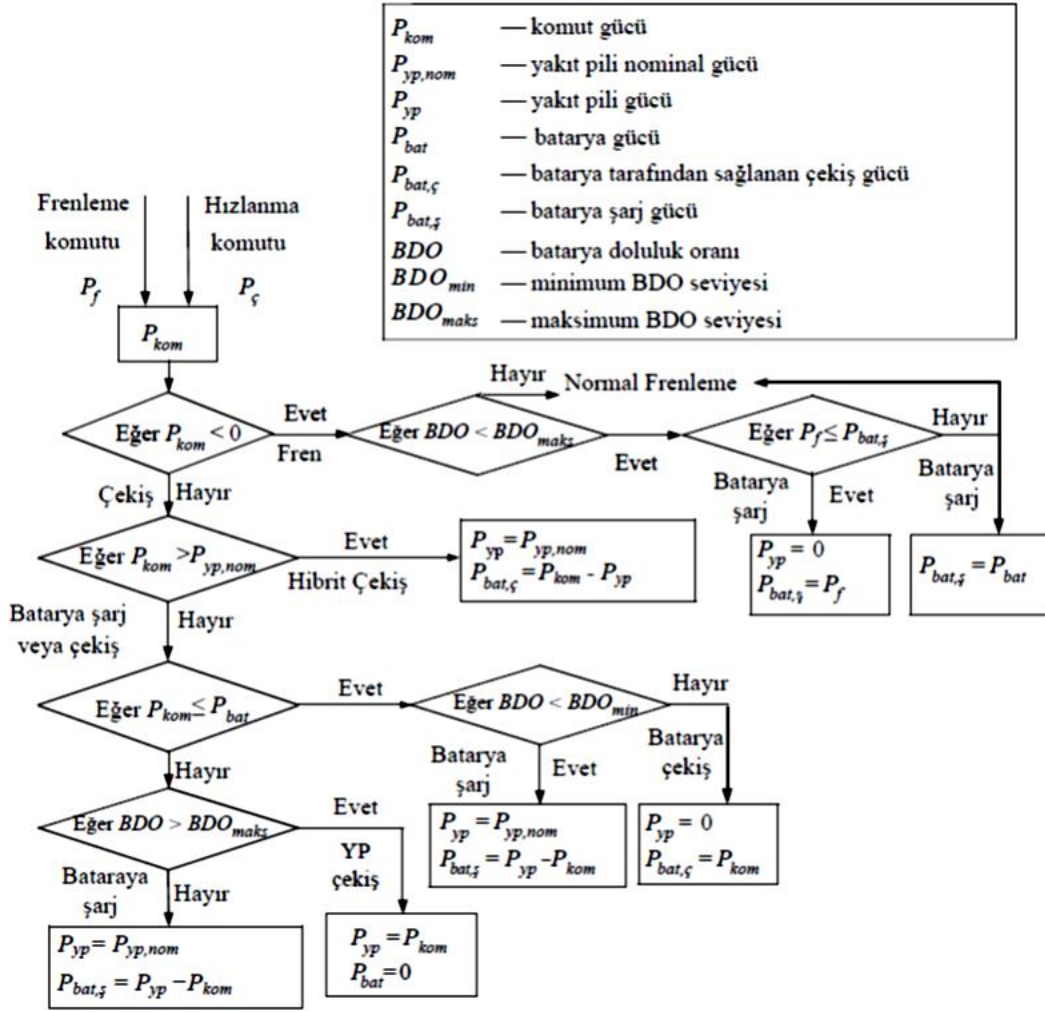
Her ne kadar 6,1. saniyede motor azami gücüne ulaşsa da ilk etapta daha verimli bir çalışma bölgesine geçildiği için sonrasında üretilen güçte düşme görülmüştür. 13. saniye sonrasında verimlilikteki düşüşle beraber üretilen güçte artış görülmüştür. 6,1. saniyede hız 74 km/h olup talep gücünü karşılamak için üretilen toplam güç 156 kw iken bu gücün 151 kW'ı motora verilmektedir. Motor çıkış gücü 136 kW olup tekere aktarılan güç 124 kW olmaktadır. Bu durumda motor verimi %90 iken güç sisteminden tekere olan verimlilik %79,5 olmaktadır. 7,9. saniyede ise bu verimlilikler sırasıyla %93,2 ve %81,7, 13. saniyede ise %93,5 ve %80,8 olmuştur. Burada motor verimliliği az da olsa artarken güç sisteminden tekere olan verimlilik azalmıştır çünkü artan hızla sürtünme kayıpları da artmıştır. Daha yüksek hızlarda hem motor verimi düştüğü hem de sürtünme kayıpları çok arttığı için güç sisteminden tekere olan verimlilik çok daha fazla azalmıştır. Örneğin azami hıza ulaşılan 49,1. saniyede motor verimi %91 iken güç sisteminden tekere olan verimlilik %76'ya kadar düşmüştür. Bu esnada üretilen toplam güç 156,9 kW olup bunun 79,1 kW'ı yakıt pili % 77,8 kW'ı da batarya tarafından karşılanmıştır. Bu sonuçlar seçilen yakıt pili ve batarya güç değerlerinin doğruluğunu kanıtlamaktadır. Şekil 4.18'de aracın elektrik tahrik sisteminin genel modeli verilmiştir.



Şekil 4.18. Elektrik tahrik sisteminin MATLAB Simscape blok modeli

4.6. Güç Yönetim Sisteminin Modellenmesi

Yakıt pili ile yedek bir güç kaynağından oluşan hibrit sisteme ait genel bir akış şeması daha önceki bölümlerde verilmişti. Bu bölümde yedek güç kaynağı olarak batarya seçildiği için ifadeler batarya olarak güncellenerek Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19. Güç yönetim sistemi akış şeması

Öncelikle gelen komutun frenleme mi yoksa hızlanma mı olduğuna karar verilir. Eğer frenleme komutu verilmişse komut gücü sıfırdan küçük olacaktır. Bu durumda ilk kontrol edilecek parametre bataryanın doluluk oranı olacaktır. Eğer bataryanın doluluk oranı maksimum değerinden küçük değilse bu bataryanın daha fazla şarj edilemeyeceği anlamına geleceğinden frenleme işlemi fiziksel sürtünme yoluyla gerçekleştirilecek ve rejeneratif frenleme gerçekleşmeyecektir. İşletme şartlarında bu durum istenilen bir durum değildir. Çünkü hem batarya aşırı şarjlı durumda tutulmak istenmeyecek hem de verimliliği artırma adına enerji geri kazanımını maksimize etmek için

batarya kapasitesinin bir kısmının daima boş tutulması gerekmektedir. Eğer bataryanın doluluk oranı maksimum değerinden küçük ise bu durumda değerlendirme kriterimiz frenleme gücünün batarya şarj gücünden büyük olup olmadığıdır. Karşılaştırma sonrasında batarya şarj gücü frenleme gücünden büyükse tüm frenleme işlemi rejeneratif olarak gerçekleşir. Eğer küçükse yine maksimum şarj gücü kadarı rejeneratif olmak üzere kalanı normal sürtünme yoluyla frenleme işlemi gerçekleşecektir.

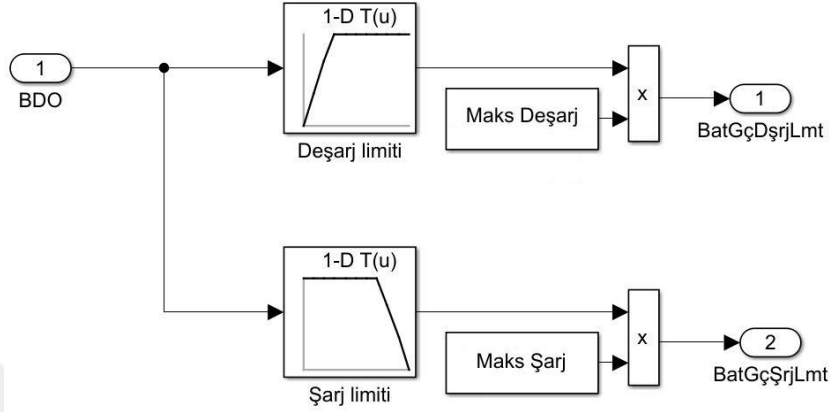
Verilen komut hızlanma komutu ise komut gücü sıfırdan büyük olacaktır. Bu durumda ilk kıyasımız gerekli çekiş komut gücü ile yakıt pili nominal gücü arasında olacaktır. Komut gücü yakıt pili gücünden büyükse bu durumda hibrit çekiş modunda gerekli güç birincil güç kaynağı olarak yakıt pilinden sağlanacaktır. Yakıt pilinin nominal gücünün üzerinde kalan güç talebi ise batarya tarafından sağlanacaktır. Tabi işletme şartlarında bu esnada BDO yine göz önünde bulundurulmalıdır eğer BDO %80'lerin üzerinde ise bataryada daha fazla boş kapasite elde edebilmek için yakıt pili gücü nominal değerinin altında tutularak ilk duruma göre bataryadan daha fazla güç çekilebilir.

Hızlanma komut gücü yakıt pili nominal gücünden küçük ise bu durumda komut gücü bu defa batarya gücü ile karşılaştırılır. Batarya gücünden de düşükse bu durumda bataryanın doluluk oranı kontrol edilir. Eğer BDO minimum değerlerden yüksek bir değerde ise gerekli güç sadece bataryadan sağlanır ve yakıt pili gücü bu şartlarda sıfır olur. Böylece verimi kısmi yüklerde düşük olan yakıt pili çalıştırılmayarak hem verim yükseltilirken hem de yakıt pilinin çalışma süresi kısaltılarak işletme ömrü de uzatılmış olur. Eğer BDO minimum değerlerde ise bu durumda yakıt pili devreye girerek nominal güç değerinde bir güç üretir bu gücün gerekli kısmı tahrik sistemine aktarılırken geriye kalan kısmı bataryayı şarj etmek için kullanılır. Böylece hem yakıt pili nominal değerlerinde daha verimli çalıştırılmış olur hem de batarya dip şarj durumuna düşmemiş olur ve hem sistem verimi hem de batarya ömrü arttırılmış olur.

Hızlanma komut gücü yakıt pili nominal gücünden küçük olup batarya gücünden yüksek olması durumunda ise BDO kontrol edilir ve maksimum değerlerde değilse bir önceki durumdaki gibi yakıt pili nominal şartlarında çalışarak hem çekişi sağlarken hem de bataryayı şarj eder. BDO maksimum değerlerde ise yakıt pili sadece komut gücünü karşılayacak şekilde nominal gücünün altında bir güç üretecektir.

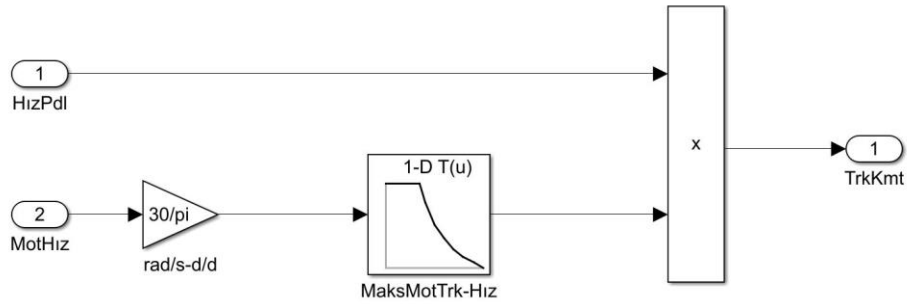
Batarya için bu kontrol ve karşılaştırmaların yapılarak şarj ve deşarj komut limitlerinin tanımlanması Şekil 4.20'de görülen basit bir batarya yönetim sistemi ile sağlanmıştır. Burada ana parametre girişi batarya doluluk oranı olup bu değer yukarıda da anlatıldığı gibi birçok karşılaştırmada gerekli bir bilgidir. Şekil 4.12'de verilen şarj ve deşarj oranları BDO bilgisine göre belirlenerek maksimum şarj ve deşarj kapasitesi ile çarpılarak nihai limitler elde edilmiştir. Burada BDO %30-70 aralığında hem şarj hem de deşarj oranı 1 olmakta olup %0-30 aralığında şarj oranı yine 1 iken deşarj oranları %20'de 0,7 ve %10'da 0,35'e düşmektedir. Bu şekilde bataryanın dip

şarjda çalıştırmasının önüne geçilmiş olur. BDO %70-100 aralığında isedeşarj oranı 1 olarak kalmakta iken şarj oranı %80’de 0,7 ve %90’da 0,35’e düşürülerek aşırı şarj durumunun önüne geçilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi araç fişli hibrit olduğundan ve bataryayı araç dışından bir kaynakla şarj edebilme imkânı bulunduğundan bu aralıklar geniş tutulmuştur.



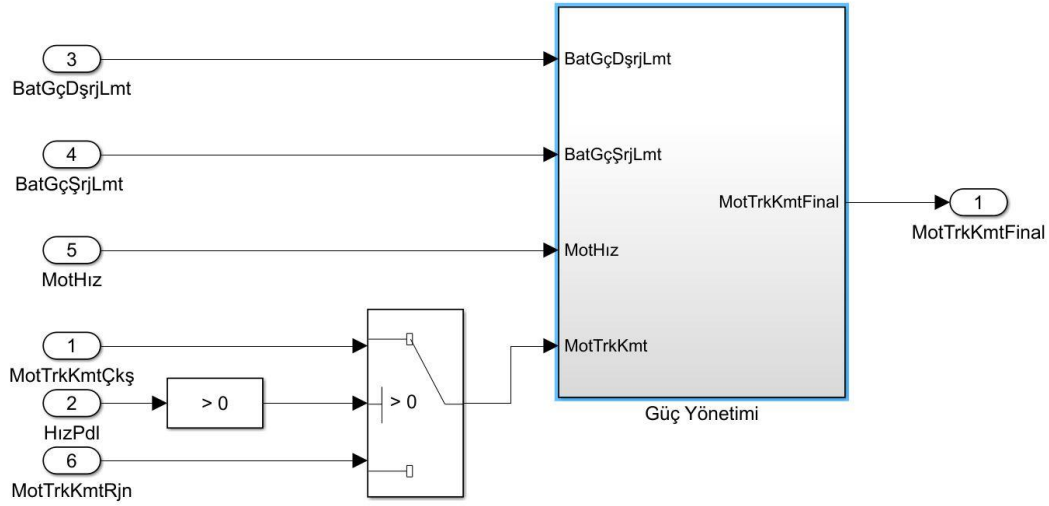
Şekil 4.20. Batarya yönetim sistemine ait blok diyagramı

Aracın kontrolünde önemli bir parametre olan tork komutudur. Bu komut, Şekil 4.21’de gösterildiği gibi gaz pedalından alınan hızlanma bilgisinin mevcut hız bilgisine göre motorun üretebileceği azami tork değeri ile çarpımıyla elde edilmiştir.



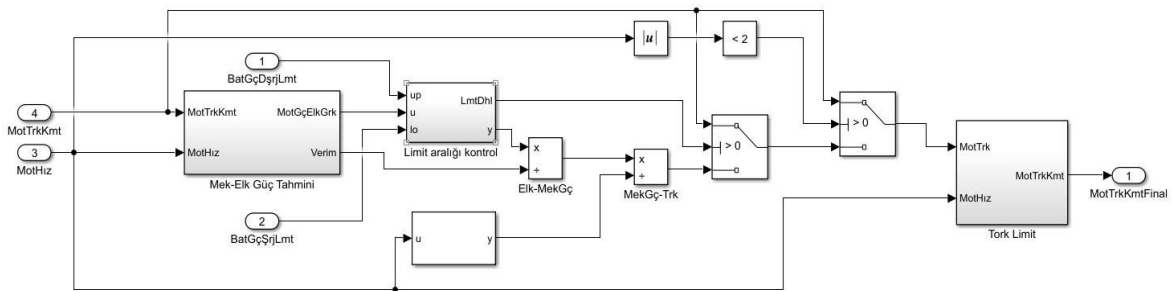
Şekil 4.21. Tork komutunun türetilmesinin blok diyagramı

Tahrik sistemi güç yönetiminin yapılmasına ise cer motorunun motor olarak çekiş mi sağlayacağı yoksa generatör olarak rejeneratif frenleme mi yapacağı belirlenerek başlanır. Bu belirlemeyi yapmak için Şekil 4.22’de görülen hız komutunun mantıksal değerlendirilmesi ile yapılır. Hız komutu hızlanma esnasında sıfırdan büyük olacağı için motora çekiş torku sağlamasına yönelik bir komut verilir. Aksi durumda frenleme işlemi gerekeceği için rejenerasyon komutu verilir.



Şekil 4.22. Motor veya generatör çalışma karar bloğu

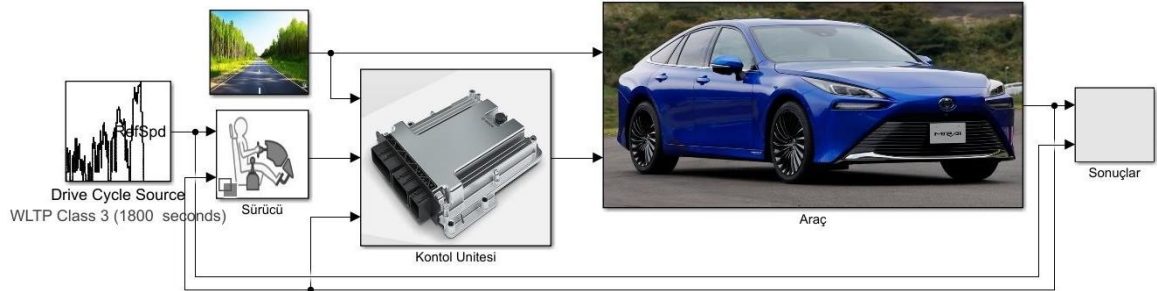
Bu karar neticesi ve hız komutuna göre oluşturulan ilk komut, tahrik güç yönetim sistemi ile nihai sinyal durumuna getirilmiştir. Güç yönetim algoritmasında ilk olarak çıkarılan verimlilik haritası kullanılarak motorun çıkış mekanik gücüne göre çekeceği elektrik gücü hesaplanmıştır. İlk olarak hesaplanan bu gücün batarya güç limitleri içinde olup olmadığı kontrol edilmiştir ve eğer bu sınırlar dâhilinde ise ilk tork komutu kullanılmıştır. Çünkü batarya güç sınırları dâhilinde talep gücünü çok hızlı bir tepki ile kısa sürede sağlayabilir. Gerekli elektriksel güç batarya sınırlarını aşması durumunda ise yakıt pilinin devreye girmesi gerekecektir. Yakıt pilinin gerek güç yoğunluğu batarya kadar iyi olmadığı gerekse yanıt süresinin daha uzun bir zaman alacağı göz önünde bulundurularak tork limiti sınırlandırılır. Burada ek olarak motorun açısal hızının çok düşük olduğu (< 2 rad/s) durumlarda ise yine ilk tork komutu direkt olarak kullanılmıştır. Bunun nedeni bu hız değerlerinde gerekli gücün batarya limitlerini zorlama imkânı olmadığından daha basit bir algoritma kullanma imkânı sağlamaktır. Tasarlanan modele ait blok diyagramı Şekil 4.23'te görülmektedir.



Şekil 4.23. Tahrik güç yönetim sistemi

Mekanik güçten gereken tork hesaplanırken bölünen olarak kullanılan hız bilgisinin sıfır geçişlerde tanımsız ifadelerle neden olmaması için sıfıra bölme koruma bloğu kullanılmıştır. Tork limit bloğunda ise batarya limitleri aşıldığında tork gereksinimini biraz daha yumuşatmak için bir dinamik doyum bloğu eklenmiştir. Bu sayede çok yüksek değerleri bulabilecek olan tork komutu doyuma sokularak sağlanabilecek değerlerin üzerine çıkması engellenmiştir. Tüm bunlara ek olarak elektrikli araç 0-100 gibi ani ve sürekli hızlanmanın gerektiği durumlar da ise ilk komut doğrudan çıkışa verilerek yakıt pilinin aşırı besleme durumuna sokulması sağlanabilir.

Şekil 4.24'te görüldüğü üzere nihai tasarımda araç ve kontrol alt sistemlerine ek olarak çevre, boylamasına sürücü, sürüş çevrim ve sonuç blokları eklenmiştir. Bu tezde tasarlanan araca ait model, MATLAB Simscape referans uygulamaları baz alınarak oluşturulmuştur. Referans uygulamadaki özellikle kontrol ünitesi ve araç alt sisteminde bulunan tahrik sistemi (yakıt pili, batarya ve cer motoru) geliştirilen araca uygun şekilde tasarlanmış ve özellikle fişli hibrit yapı özellikleri eklenmiştir. Sadece burada bataryanın dışarıdan şarj edilmesi tasarlanmamıştır. Bunun yanında sürücü, çevre ve araç dinamiğine ait bloklarda ise sadece parametre değişikliğine gidilmiştir.



Şekil 4.24. Yakıt pili batarya hibrit araç MATLAB Simscape modeli

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

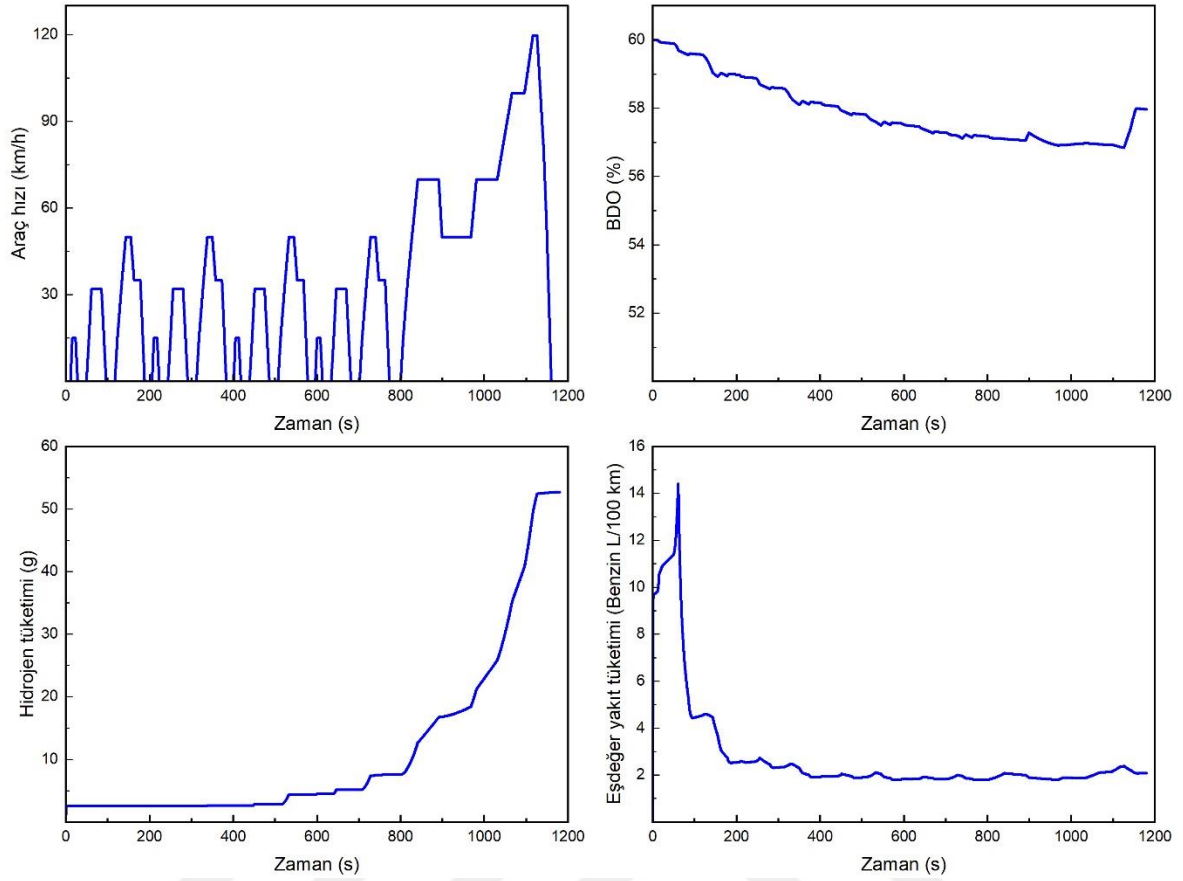
Bu bölümde modellenen yakıt pili batarya hibrit elektrikli araç, Sürüş Çevrimleri bölümünde bahsedilen dünya çapında yaygın olarak kullanılan farklı sürüş çevrimleri ve tasarlanan gerçek çevrim hız zaman bilgileri sürüş çevrimi bloğuna giriş olarak verilerek simüle edilmiştir. Elde edilen bulgular farklı sürüş çevrimleri bazında özellikle yakıt tüketimi ve performans olarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular ayrıca piyasadaki mevcut elektrikli, yakıt pilli ve geleneksel İYMA'lar ile karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında MATLAB ortamında tasarlanan YPHEA aracın simülasyonu NEDC, WLTP, US06, ArtMW150 ve ELZ130 sürüş çevrimleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çevrimlerden NEDC tipik bir çevrim olup uzun yıllar boyunca kullanılmıştır. WLTP ise transient bir çevrim olup daha gerçekçi bir sürüşü temsil eder. US06 ve ArtMW150 ise aslında tamamlayıcı çevrimler olup US06 daha agresif bir sürüşü temsil ederken ArtMW150 ise daha yüksek hızları barındıran otoyol sürüşünü temsil etmektedir. ELZ130 çevrimi ise Artemis URM130 çevrimi gibi bütüncül gerçekçi bir çevrimi temsil etmektedir.

5.1. NEDC Sürüş Çevrimi Simülasyonu

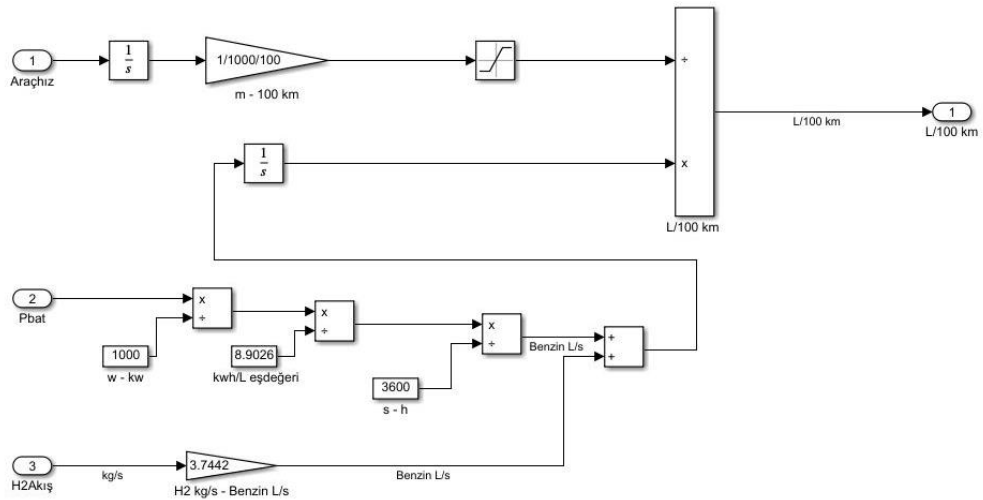
NEDC uzun yıllar Avrupa ülkeleri ve birçok farklı ülke tarafından kullanılmış bir sürüş çevrimidir. Günümüz şartlarında gerçek sürüş koşullarını çok fazla temsil edememesi ve giderek artan emisyon kaygısı nedeniyle alınan tedbirleri uygulamada yetersiz kaldığı için yerini WLTP'ye bırakmıştır. Tüm bunlara rağmen araç literatüründe çok önemli bir yere ve etkiye sahiptir. Bu nedenle bu tez çalışmasının simülasyon kısmında NEDC'ye de yer verilmiştir. Böylece yerini bıraktığı WLTP ile arasındaki farklar daha net gösterilebilmiştir.

NEDC tipik bir çevrim olduğu için hız komutları genellikle şekilsel ve trapezoidaldir. Simülayonlar da kullanılan çevrimler içerisinde en az performans gereksinimi olan ve dolayısıyla yakıt tüketimi ve emisyon verileri en düşük olan çevrimdir. Şekil 5.1'de NEDC çevriminde araç hızına bağlı olarak BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi verilmiştir. Çevrim 11016,6 m olup toplam hidrojen tüketimi 52,72 g ve benzin eşdeğer yakıt tüketimi çevrim sonunda 2,08 Benzin L/100 km olmuştur. Bu değerler kümülatif olup tüm çevrim sonucunu göstermektedir.



Şekil 5.1. NEDC çevriminde araç hızına bağlı olarak BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi

Şekil 5.2’de tüketilen hidrojen ve bataryadan sağlanan net gücün benzin eşdeğere dönüşümünü yapan Simulink modeli görülmektedir. Burada bataryadan çekilen veya bataryaya verilen enerjinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Çünkü araç fişli hibrit olup dışarıdan bir elektrik kaynağından da şarj edilme durumu mevcuttur.



Şekil 5.2. Benzin L/100 km eşdeğer yakıt tüketimi hesap modeli

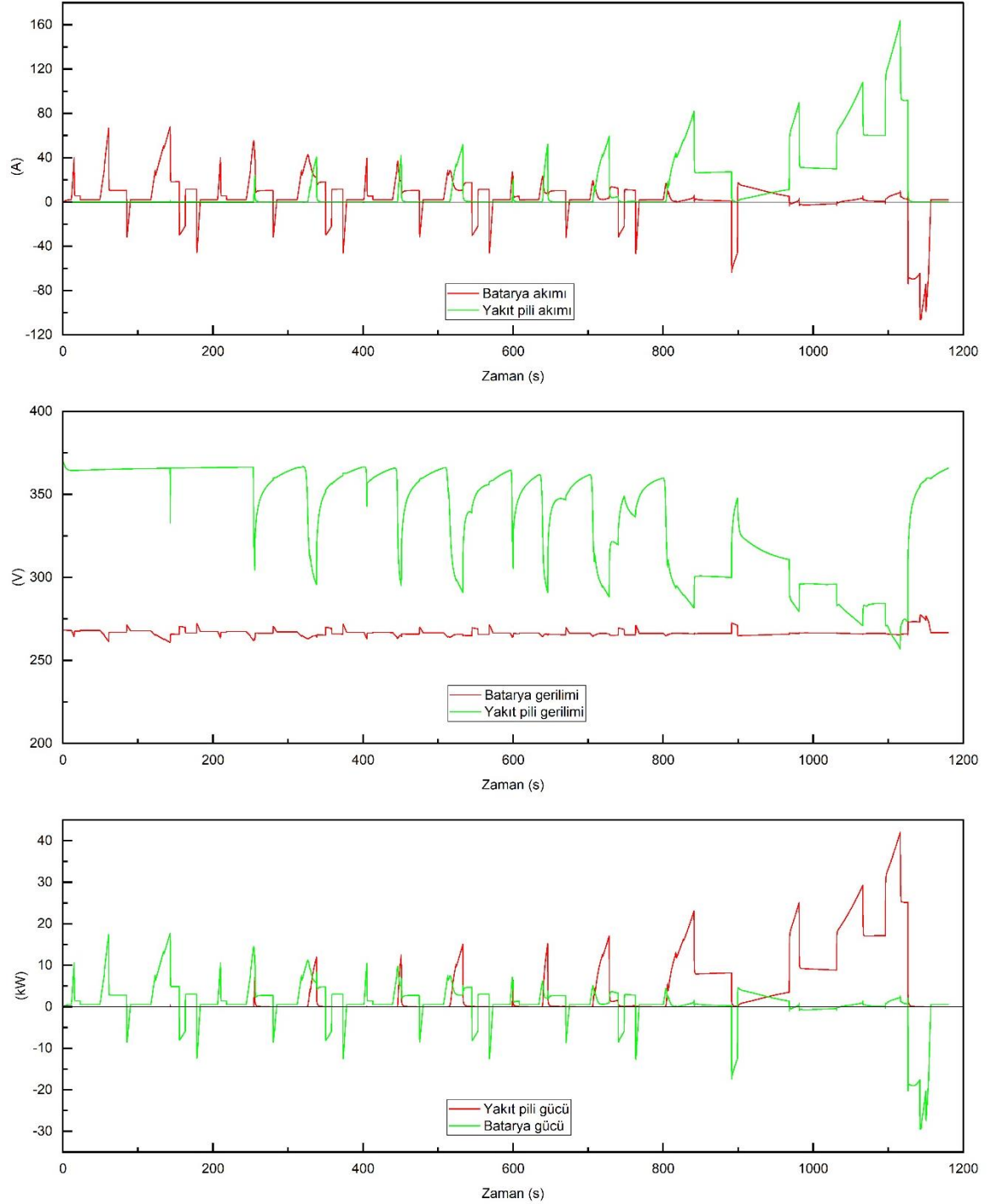
İlk olarak kg/s cinsinden tüketilen hidrojen miktarı 3,7442 değeri ile çarpılarak L/s cinsinden eşdeğer benzin miktarına dönüştürülür. İkinci güç kaynağı olan bataryadan gelen net güç ise W cinsinden olduğu için 1000 ile çarpılarak kW'a dönüştürülür. Bir litre benzinin enerji içeriği 8,9026 kWh'a eşit olduğu için bu değere bölünmüştür. Saat saniye dönüşümü için daha sonra 3600'e bölünmüştür. Böylece hem hidrojen hem elektriksel güç verisi L/s cinsinden kullanılan eşdeğer benzin debi verisine dönüştürülmüştür. Bu güç ifadesi zamana göre integrali alınarak benzin litre cinsinden enerji ifadesine dönüştürülmüştür. Diğer taraftan araç hızının zamana göre integrali alınıp kat edilen mesafe bulunmuş ve m cinsinden 100 km'ye dönüştürülmüştür çünkü standart birimin kullanıldığı ülkelerde araç yakıt tüketim değeri genellikle L/100 km cinsinden verilmektedir. Son olarak tüketilen toplam benzin miktarı kat edilen mesafeye bölünerek eşdeğer yakıt tüketimi eşdeğer Benzin L/100 km olarak verilmiştir.

Çevrim süresince BDO %60'tan %57,97'ye düşmüştür. Aracın hidrojen tankının kapasitesinin 5,6 kg olduğu ve normal araçlardaki gibi bunun %10'unun rezerv olarak ayrıldığı düşünülürse kullanılabilir kısmı 5,04 kg'dır [150]. Batarya tarafında da tam kapasite 16,3 kWh olup bunun %90'ının kullanılabilir olduğu düşünülürse net kapasitesi 14,67 kWh olacaktır. 5,04 kg hidrojen 18,87 L, 14,67 kWh elektrik enerjisi ise 1,65 L benzine tekabül etmektedir. Yani toplamda 20,52 L benzine eşdeğer bir yakıt taşınabilmektedir ki bu da 22,8 L benzin deposuna sahip bir araç gibi düşünülebileceği anlamına gelir. Burada benzinin hacimsel enerji yoğunluğunun gerek hidrojen gerekse elektrik enerjisine göre ne kadar yüksek olduğu görülebilir. Çünkü tasarlanan araçta 5,6 kg hidrojeni depolamak için 140 L depoya ihtiyaç duyulmuştur. Batarya paketinin hacmi ise 44,8 L hesaplanmıştı ve toplamda 184,8 L enerji depolamaya ayrılmıştır. Bu değer benzin karşılığı ise 22,8 L olmuştur. Bu durumda benzinin hacimsel enerji yoğunluğu tasarlanan sisteminkinden 8,1 kat daha yüksektir. Bu sistemin tamamen dezavantajlı olduğu anlamına gelmez çünkü tasarlanan aracın eşdeğer yakıt tüketimi sadece 2,08 litredir. NEDC çevrimine göre bu verilerle 986 km'lik bir menzile sahiptir ki bu değer geleneksel İYM araçlar ile hemen hemen aynı değerlerdedir.

Her ne kadar elektrikli araçlar sıfır emisyonlu araçlar olarak lanse edilse de bu sadece sürüş esnasında geçerlidir. Burada tüketilen hidrojen ve elektriğin üretiminde açığa çıkan emisyon değerlerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu durumda hidrojenin emisyon değeri 8,5 kgCO₂e/kgH₂, Türkiye şartlarında üretilen elektrik için ise 437 gCO₂e/kWh olarak alınabilir [151,152]. Araçta depolanan tüm yakıtın kullanılması durumunda açığa çıkacak emisyon 49250,8 gCO₂e olacaktır. Bu değer menzile bölünerek aracın NEDC emisyonu 49,95 gCO₂e/km olarak bulunmuştur.

Şekil 5.3'te tasarlanan araca ait yakıt pili ve bataryanın akım gerilim karakteristikleri ve çevrim esnasında ürettikleri güçler verilmiştir. Görüldüğü üzere çevrimin çok yüksek güç gerektirmeyen 800. saniyeye kadar olan ilk 4 döngüsünde yakıt pili çok fazla devreye girmemiştir.

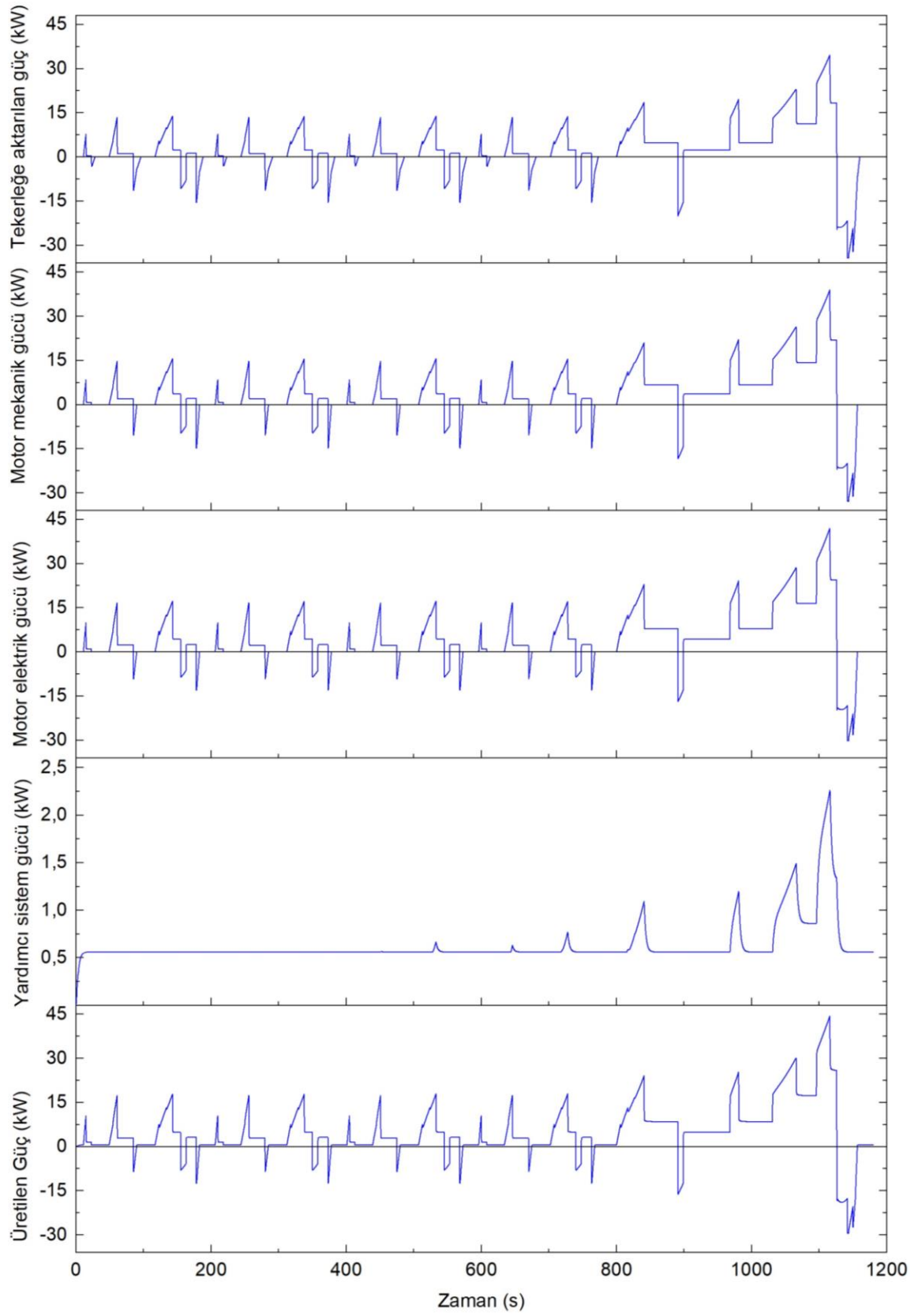
Daha sonraki nispeten daha fazla güç talebi olan bölgede ise devreye girmeye başlamıştır. Batarya gerilimi akımla çok fazla değişmezken yakıt pili geriliminde ise çok yüksek akımlar çekilmemesine rağmen dalgalanmalar mevcuttur. Batarya geriliminde belirgin dalgalanmalar sadece 40 A ve üzerindeki akımlarda oluşmakta olup deşarj esnasında aşağı yönlü iken şarj esnasında yukarı yönlü olmaktadır.



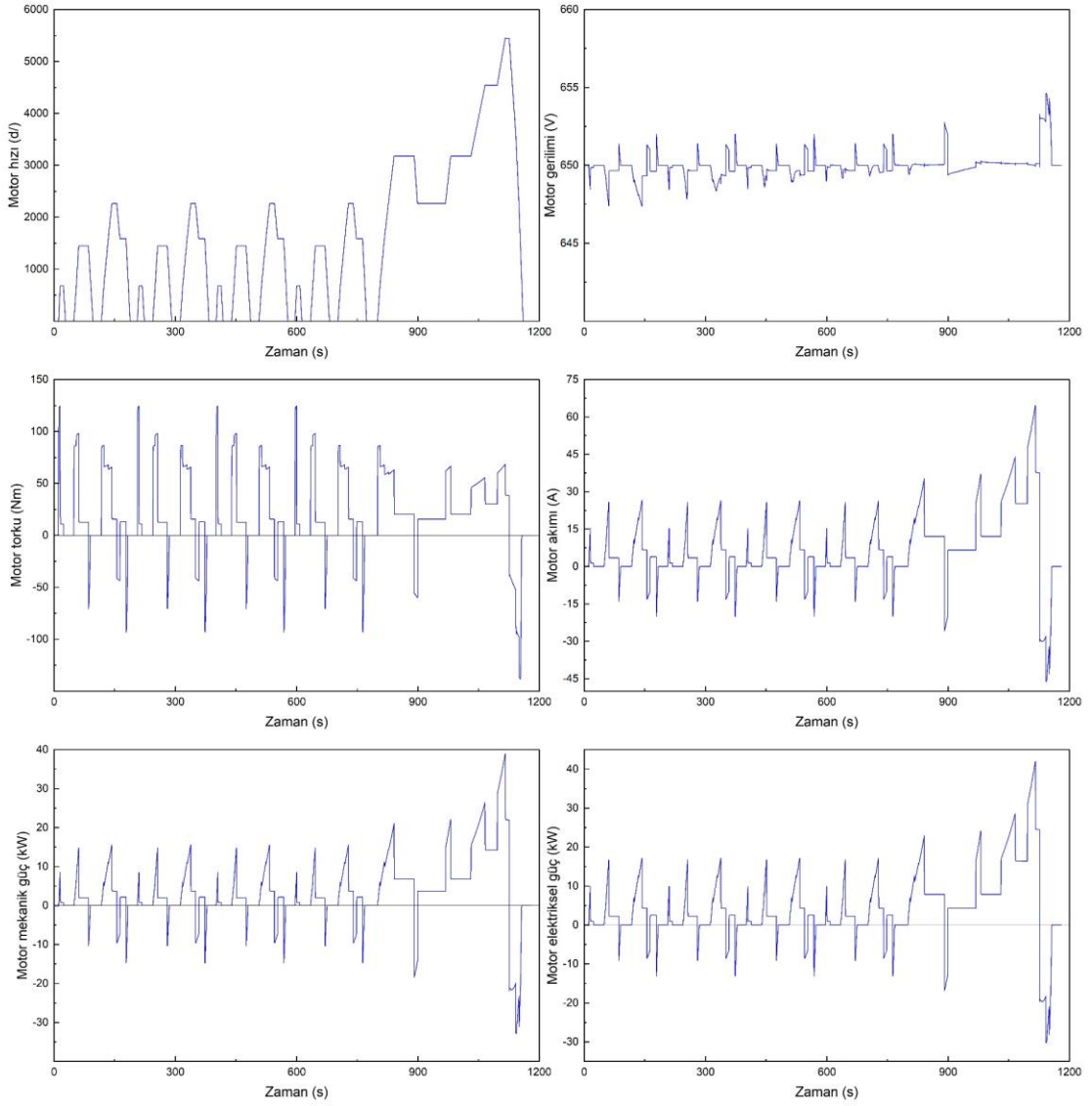
Şekil 5.3. NEDC çevrimi esnasında yakıt pili ve bataryanın akım, gerilim ve güç karakteristikleri

Şekil 5.4'te çevrim esnasındaki güç akışı görülmektedir. Üretilen güç yakıt pili ve batarya tarafında üretilen toplam güçtür ve bu güçten ilk olarak sistemin çalışmasını sağlayan yardımcı sistemlere güç aktarılmaktadır. Yardımcı sistem gücü araç hareket etmese dahi tüketilmekte olup yaklaşık 0,56 kW'tır ve özellikle büyük bölümü yakıt pilinin koşullandırılması amacıyla tüketilmiştir. Bu durum yakıt pilindeki güç artışı ile yardımcı sistem gücü arasındaki paralellikten de anlaşılabilir. Çünkü yakıt pili çalışmasında gerek besleme gerek kompresörleri gerek ısı atılımı amaçlı pompalar kullanılmaktadır. Üretilen güçten yardımcı sistem gücü çıkarılınca kalan güç cer motoruna verilmektedir. Cer motoru ise çalışma bölgesindeki verimi nispetinde çektiği enerjiyi mekanik enerjiye çevirmektedir. Bu mekanik güç aktarma sistemleri vasıtasıyla tekerleğe iletilmiştir ve burada da mekanik kayıplar söz konusudur. Bu akış motor çalışmaya ait olup Şekil 4'teki grafiğin pozitif tarafını temsil etmektedir. Bu kısımda değerler azalarak grafikte aşağıdan yukarıya doğru çıkmıştır. Generatör çalışmada ise tam tersi bir durum söz konusu olup bu defa tekerlekten alınan güç mekanik kayıplar düşüldükten sonra cer motoruna giriş olarak verilmiştir. Elektrik makinamız bu durumda generatör çalışarak giriş mekanik gücünü çıkışta elektriksel güce dönüştürmüştür. Burada motor çalışmadaki verimlilik haritası generatör çalışmada da kullanılmıştır. Elde edilen bu güç ise bataryaya verilerek bataryanın şarj edilmesi sağlanmıştır. Böylece fren enerjisinin bir kısmı rejenerasyonla geri kazanılmıştır.

Burada verimlilikler incelenecek olursa ilk olarak üretilen gücün çevrim boyunca motor çalışmada ortalama %87,3'ü elektrik motoruna giriş olarak verilebilmiştir. Buradaki kayıplar yakıt pili koşullandırma ekipmanlarının tüketimleri ile yakıt pil ve batarya konverterlerinden kaynaklanmaktadır. Yine generatör çalışmada bu verim ortalama %90,6 olarak hesaplanmıştır. Bu generatör çalışmada verimin yüksek olması bu durumda yakıt pilinin çalışmayıp sadece bataryanın şarj edilmesinden kaynaklanmaktadır. Yardımcı sistemler her ne kadar bu durumda da güç tüketse sadece batarya konverteri çalışmaktadır. Elektrik motoruna verilen gücün ise %86,6'sı motor çıkışında mekanik enerjiye dönüştürülmüştür. Bu değer nominal bölgelerde %95 ve üzeri verime sahip motorun daha çok düşük güç bölgelerinde yani verimin de daha düşük olduğu bölgelerde çalışmasından kaynaklanmıştır. Cer motorunun çevrim esnasındaki akım, gerilim, tork, hız ve güç gibi verileri Şekil 5.5'te verilmiştir. Generatör çalışmada ise elektrik makinasının verimi %88,4 olarak hesaplanmıştır. Cer motoru ile tekerlek arası verim sabit olarak %92 alındığı modelleme bölümünde belirtilmişti. Bu durumda aracımızın verimi güç akışından hesaplanacak olursa motor çalışmada yani frenleme ve durma harici çalışma koşullarında %69,6 ve frenleme esnasında %73,7 olarak bulunmuştur.



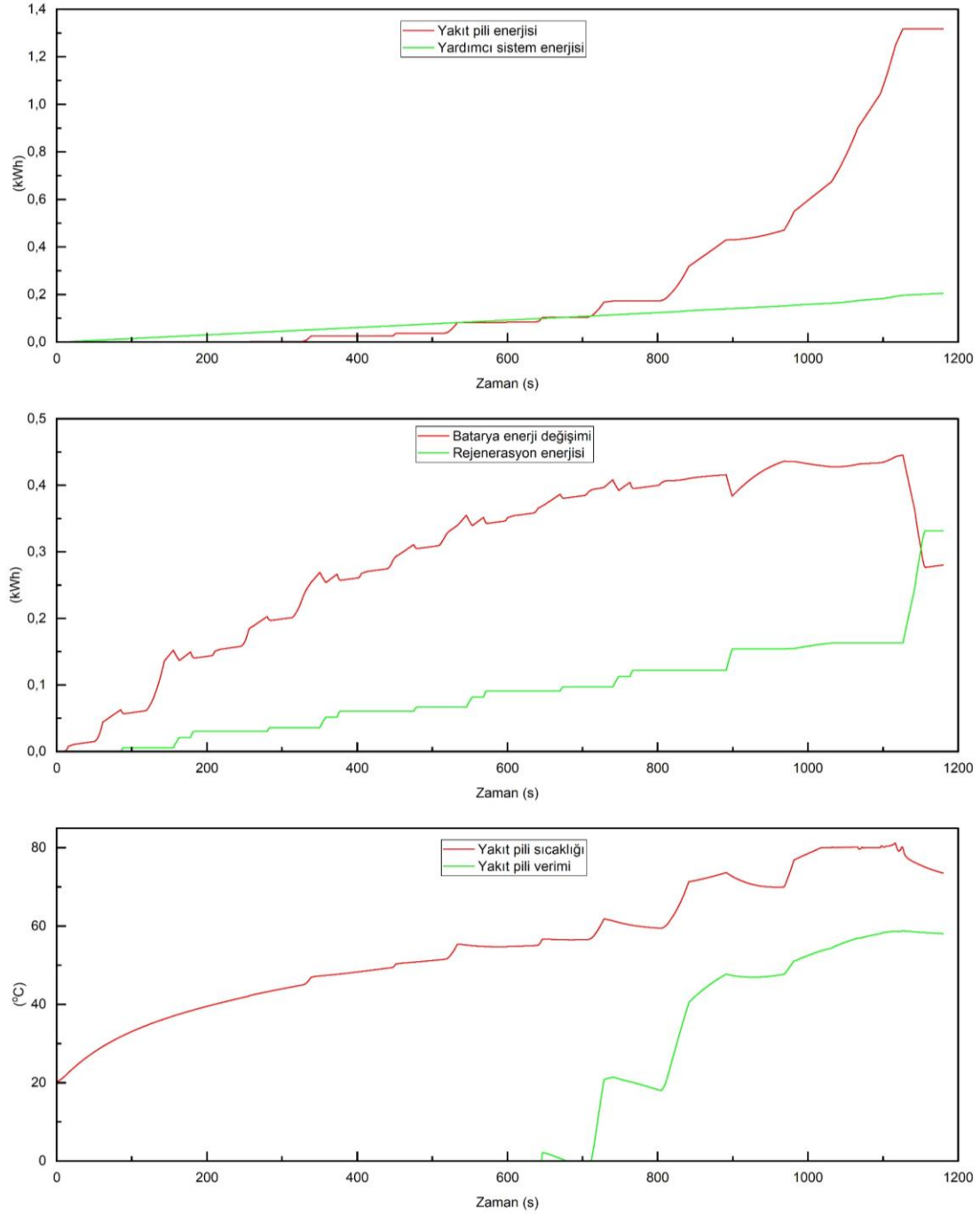
Şekil 5.4. NEDC çevrimi esnasında güç akışı



Şekil 5.5. NEDC çevrimi esnasında cer motoruna ait akım, gerilim, tork, hız ve güç verileri

Sisteme ait yakıt pili ve bataryanın enerji analizi yapılacak olursa yakıt pilinin veriminin uzun süre 700. saniyelere kadar sıfır olduğu Şekil 5.6’da görülmektedir. Bunun nedeni bu süre zarfında yakıt pili tarafından üretilen enerji tüketilen enerjiden daha fazla olmuştur ve Şekil 5.6’da en üstteki grafikte görülmektedir. Yakıt pili etkin bir biçimde çalışmaya başladıktan sonra enerji verimi %58’ ulaşabilmiştir. Bu verim değerleri anlık olmayıp aracın çalışması ile kümülatif olarak hesaplanmıştır. Yani %58’lik verim yakıt pilinin çevrim sonundaki kümülatif verimidir. Burada yakıt pilinin enerji verimi hesaplanırken, girişte kullanılan hidrojenin ısı değeri alınırken, çıkışta yakıt pilinin ürettiği elektriksel enerji ve kayıp olarak da yakıt pilinin koşullandırılması için gerekli enerji ele alınmıştır.

Hidrojene ait üst ısı değeri 141,8 MJ/kg iken alt ısı değeri 119,96 MJ/kg'dır [153]. Hesaplamalarda bu iki değerin ortalaması alınarak yani ortalama ısı değeri 130,88 MJ/kg olarak alınmıştır. Böylelikle daha objektif sonuçların alınabilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 5.6. NEDC çevrimi esnasında yakıt pili ile batarya enerji değişimi ve yakıt pili sıcaklığı ile verimi

Bataryadaki enerji değişimi ise çevrim sonunda 0,28 kWh olmuştur. Rejenerasyonla geri kazanılan enerji miktarı ise 0,33 kWh olmuştur. Batarya doluluk oranındaki değişim ise %2 olmuştur yani bataryadan harcanan güç 0,33 kWh'dir. Burada 0,05 kWh lik bir fark oluşmuştur ki bunun nedeni şarj ve deşarj esnasındaki verimsizliklerdir.

5.2. WLTP Sürüş Çevrimi Simülasyonu

WLTP çevrimi günümüzde hemen hemen tüm dünya genelinde kabul gören ve en yaygın olarak kullanılan sürüş çevrimi durumundadır. NEDC çevriminin eksikliklerini tamamlamak emisyon verilerini belirlemede daha gerçekçi bir yaklaşım sergilemek için geliştirilmiştir. Her ne kadar bir çok tüketici tarafından en önemli parametre olan yakıt tüketim değerinin saptanmasında bu çevrim kullanılsa da özellikle AB ülkeleri gibi gelişmiş ülkeler için bundan daha önemli olan konu emisyon değerleridir. Çünkü bir çok araç üreticisi aracın üretim aşamasında dahi zorunlu emisyon kullarına uymak zorundadır. Yine araçlara uygulanan vergiler genellikle emisyon değerlerine göre belirlemektedir. Düşük emisyonlu araçlar daha az vergiye hatta belirli değerden daha az olursa hiç vergi alınmamaktadır.

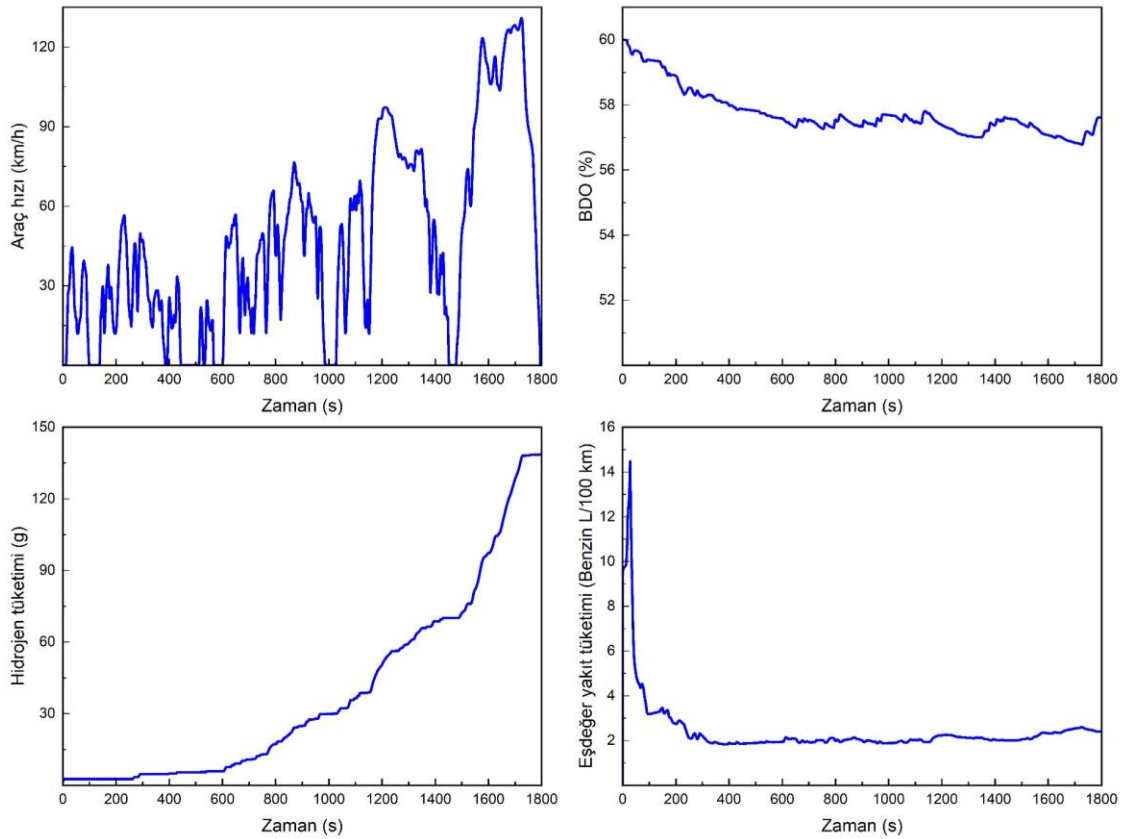
Bu çevrimde araca ait BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi Şekil 5.7'de verilmiştir. Çevrim 23262 m olup toplam hidrojen tüketimi 138,55 g ve benzin eşdeğer yakıt tüketimi çevrim sonunda 2,39 Benzin L/100 km olmuştur. Bu değerler yine kümülatif olmakla beraber tüm çevrim sonucunu göstermektedir. Bu değer NEDC değerine göre %15 daha fazla olmaktadır. Ticari olarak bakıldığında bir aracın tüketim verisini WLTP yerine NEDC çevrimine göre belirtmek daha cazip olabilir. Bunun önüne geçebilmek için ise her iki çevrime göre daha farklı sınırlar belirlenmiştir. Mesela emisyon değeri olarak NEDC'de sınır daha düşük tutulmuşken WLTP'de bu sınır daha yüksek tutularak üreticiler WLTP kullanmaya teşvik edilmektedir [154].

Aracın toplamda 20,52 L benzine eşdeğer bir yakıtı sahip olduğu bir önceki çevrimde belirtilmişti. Eşdeğer tüketiminin de WLTP için 2,39 L/100 km olduğu göz önünde bulundurularak aracın menzili 858,6 km olarak hesaplanmıştır. Bu değer hâlihazırda piyasada en yaygın olarak bulunan ve benzer özellikleri nedeniyle performans kısmında da tasarlanan araçla karşılaştırılan Toyota Mirai II'nin menzili ise 650 km'dir [155]. Bu aracın deposu 5,6 kg hidrojen almaktadır ama yakıt pili gücü 128 kW olup sadece 1,2 kWh'lik bir bataryası bulunmaktadır [156]. Emisyon açısında yakıt tüketim değeri değerlendirilmiş ve toplam yakıttan açığa çıkacak olan 49250,8 gCO₂e değeri 858,6 km'lik menzile bölününce 57,36 gCO₂e/km'lik bir emisyon değeri bulunmuştur.

Global olarak ortalama yakıt ekonomisinin 2017 yılında 7,2 eşdeğer benzin L/100 km olduğu düşünülürse tasarlanan araçla aynı menzile sahip bir aracın kullanılabilir deposunun en az 61,8 L olması gerektiği hesaplanmıştır. Türkiye şartları ele alınacak olursa ortalama yakıt ekonomisi 2019 yılı için 5,5 eşdeğer benzin L/100 km olmuştur [157]. Türkiye'deki değer bu kadar düşük olması

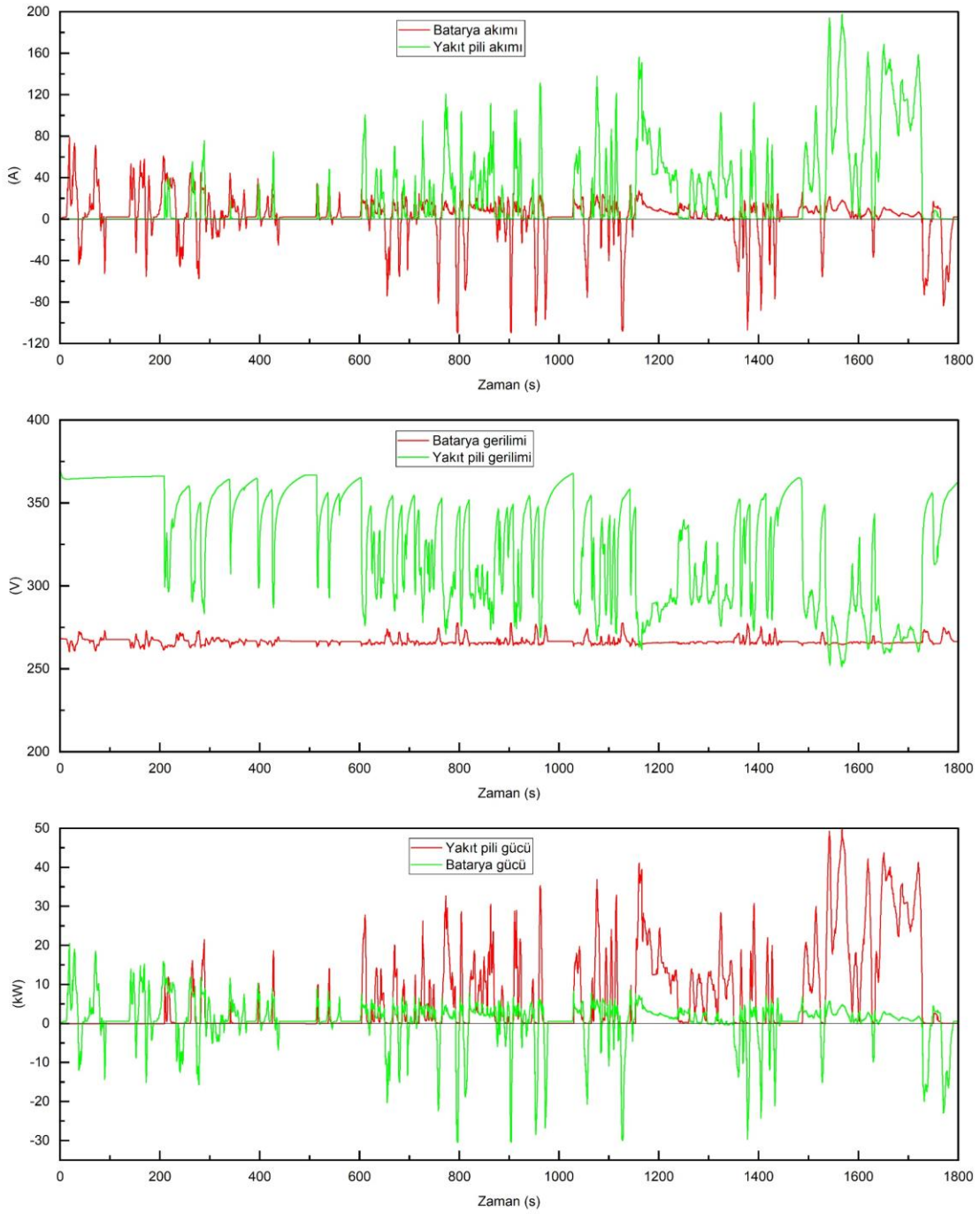
emisyona yaptırımlarından ziyade motor hacmine oranla vergilendirme yapılması bu nedenle küçük hacimli araçların daha yaygın kullanımının teşvik edilmesi nedeniyledir. Bu değer özellikle bu konuya oldukça önem veren AB ülkelerinin bile ortalama değerlerinden daha düşüktür. Tasarlanan araç ülkemiz şartlarında karşılaştırılacak olursa bir 47,2 L kullanılabilir deposunun olması gerekmektedir. %10 rezerv miktarı da hesaba katılacak olursa 52,5 L'lik bir deposunun olması gerektiği hesaplanmıştır.

Tasarlanan aracın yakıt tüketimi elektriksel olarak Wh/km cinsinden 213 Wh/km olarak hesaplanmıştır. Mevcut batarya elektrikli araçların ortalama tüketim değeri ise 200 Wh/km'dir [158]. Tabi bu değer bataryadan tekerleğe değeri olup daha objektif bir karşılaştırma için şarj verimlerinin de hesaba katılması gerekmektedir. Bu durumda ortalama şarj verimi %85,7 olarak alınırsa BEV için ortalama tüketim değeri 233,4 Wh/km olarak bulunur [159]. Tasarlanan aracın da batarya kapasitesinin toplam kapasitenin %8'ini oluşturduğunu hesaba katmak lazım bu durumda düzeltilmiş tüketim 215,8 Wh/km olarak hesaplanır. Yine ülkemiz şartlarında elektrikli araçlara ait emisyon değeri hesaplanacak olursa ortalama 233,4 Wh/km için 102 gCO₂e/km olarak bulunur. Bu da bize aslında elektrikli araçların ne kadar emisyonu sebep olduklarının kullandıkları elektriğin üretiminin ne kadar emisyon açığa çıkardığına bağlı olduğunu gösterir.



Şekil 5.7. WLTP çevriminde araç hızına bağlı olarak BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi

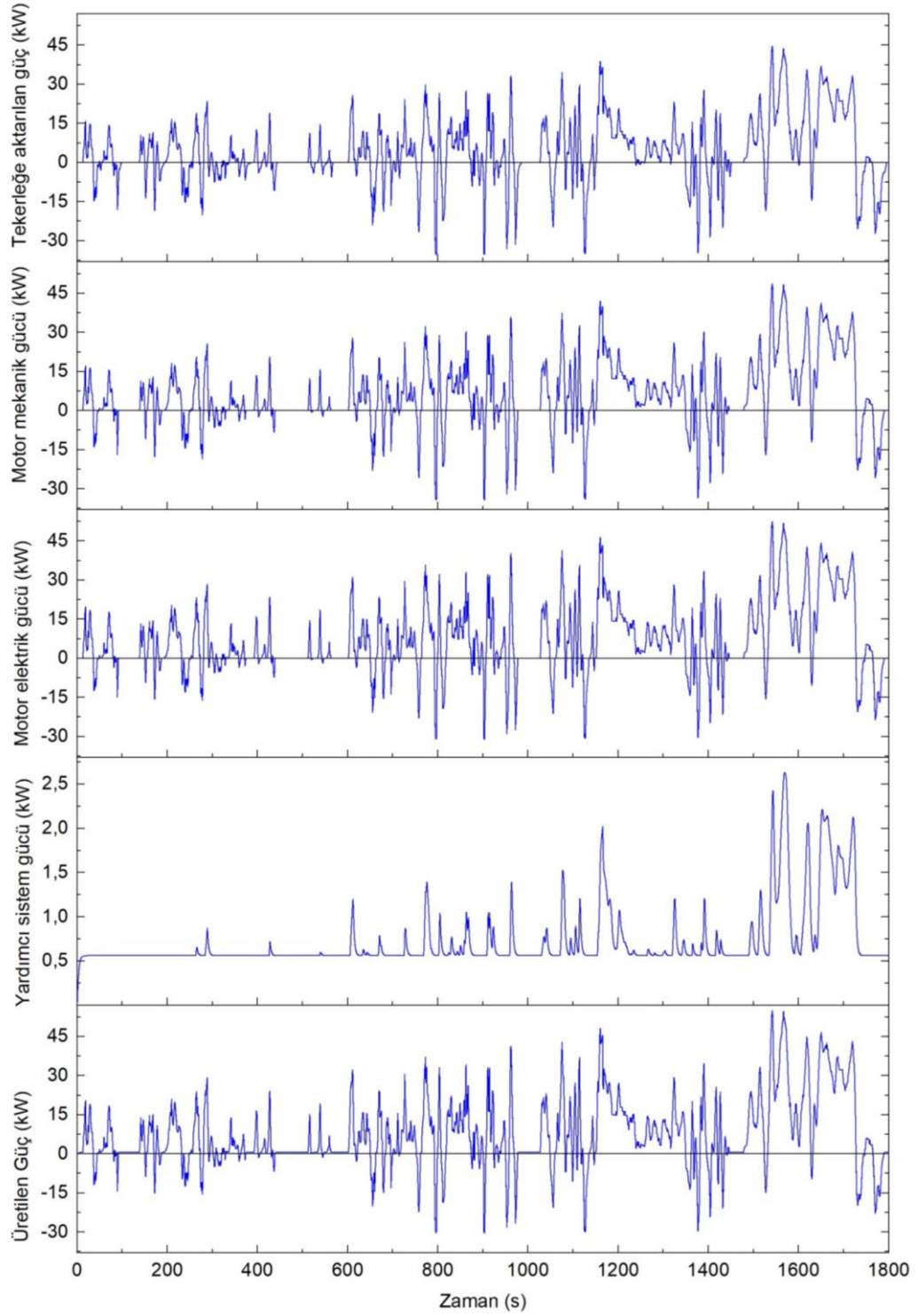
Şekil 5.8’te yakıt pili ve bataryanın akım gerilim karakteristikleri ve WLTP çevrimi esnasında ürettikleri güçler verilmiştir. Görüldüğü üzere çevrimin çok yüksek güç gerektirmeyen durumlarda yakıt pili çok fazla devreye girmemiştir. Yüksek güç bölgesinde birincil güç kaynağı olarak devreye girmiştir ve çekilen akım 200 amperlere dayanmıştır. Şekil 8’deki akım grafiğinde batarya akımı iki yönlü olarak duraklamalar hariç tüm çevrim boyunca bir değere sahiptir. Yakıt pili akımı ise duraklamalar haricinde düşük güç bölgelerinde de sıfır olmuştur. Bu tasarlanan sistemin en büyük amaçlarından biri olup gerçekleştirilebilmiştir. Böylece hem yakıt pilinin çalışma süresi azaltılarak ömrü uzatılmış hem de kısmi yüklerde çok çalışmayıp genel olarak nominal değerinde çalıştırılmıştır. Batarya gerilimi bu çevrimde de akımla birlikte çok fazla değişmezken yakıt pili geriliminde ise dalgalanmalar mevcuttur. Güçler incelendiğinde daha hızlı yanıt süresine sahip batarya her zaman ilk gücü karşılayan kaynak olmuştur. Yakıt pili daha geç bir tepkiyle artmış ve gerekli gücü sağlayabildiği noktada batarya gücü giderek azalmaya başlamıştır. Yine bu çevrimde büyük güçlü frenlemeler olduğu için daha yüksek güçlü şarjlar da mevcuttur.



Şekil 5.8. WLTP çevrimi esnasında yakıt pili ve bataryanın akım, gerilim ve güç karakteristikleri

Şekil 5.9’da WLTP çevrimi esnasındaki güç akışı görülmektedir. Araç hareket etmese dahi tüketilmekte olan yardımcı sistem gücü yaklaşık 0,56 kW’tır ve yakıt pili gücünün yüksek olduğu bölgelerde 2,63 kW’a kadar çıkmıştır. Bu çevrimde verimlilikler incelenecek olursa ilk olarak üretilen gücün çevrim boyunca motor çalışmada ortalama %86,5’i elektrik motoruna giriş olarak verilebilmiştir. Verim NEDC çevriminden %0,8 daha az olmuştur bunun nedeni yakıt pilinin daha uzun süreli ve daha yüksek güçlerde çalışmış olmasıdır. Generatör çalışmada bu verim ortalama

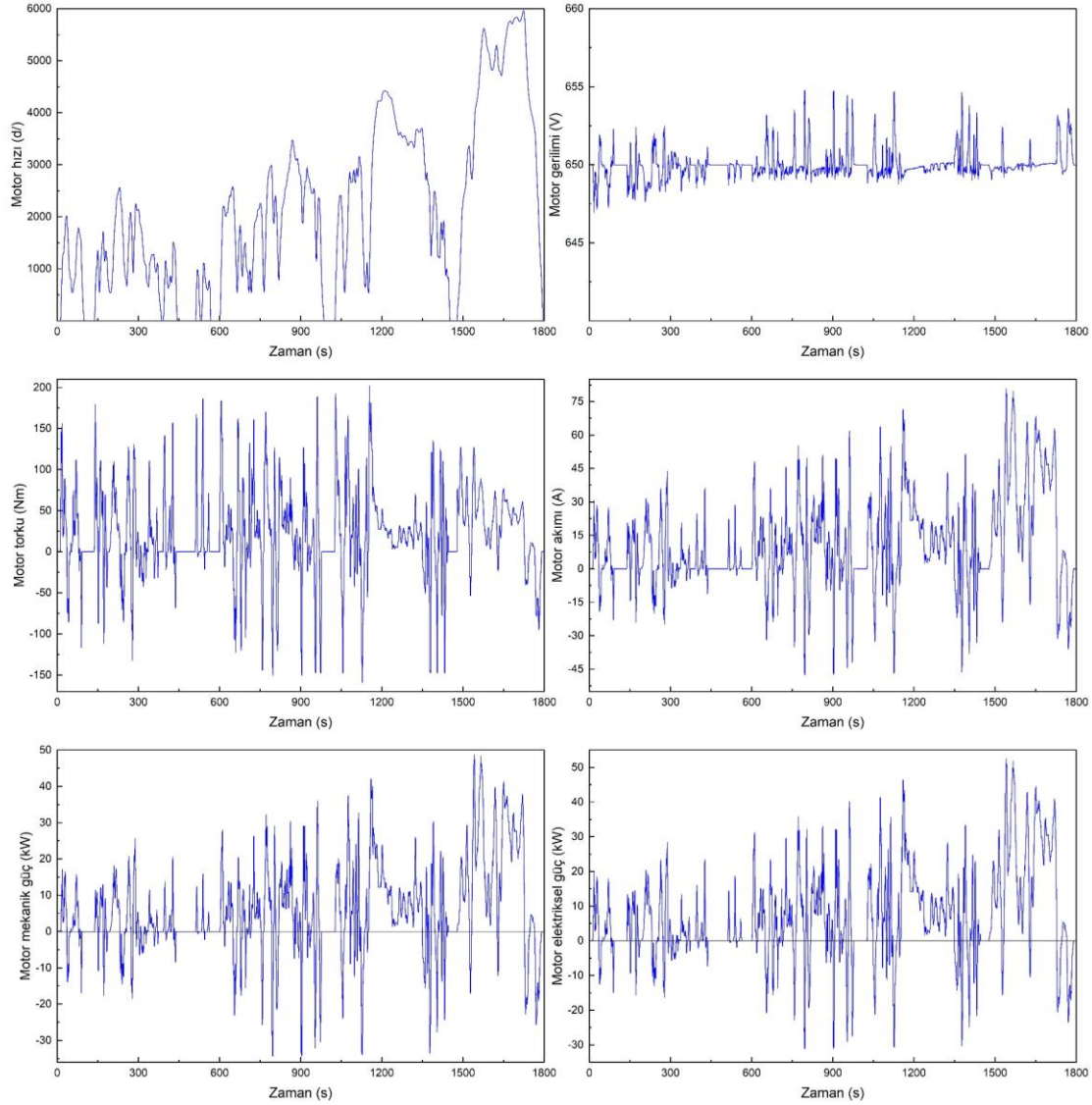
%81,6 olarak hesaplanmıştır ki bu değer NEDC'e göre %9 daha azdır. Bu durumun oluşmasındaki ana neden bu çevrimde daha büyük güçlü frenlemelerin olması ve bu frenleme gücünün bataryanın maksimum şarj gücünü aşmasıdır. Elektrik motoruna verilen gücün ise %87,1'si motor çıkışında mekanik enerjiye dönüştürülmüştür. Bu çevrimde NEDC'e göre nispeten nominal çalışma bölgesine daha yakın çalışma bölgeleri olduğundan verimlilik de %0,5 artmıştır. Generatör çalışmada ise elektrik makinasının verimi %86,9 olarak hesaplanmıştır. Bu değer de NEDC çevrimine göre %1,5 daha düşüktür ve bunun sebebi yine frenleme esnasında batarya şarj gücünü aşan zamanların olmasıdır. Cer motoru ile tekerlek arası verim de hesaba katıldığı durumda aracımızın verimi motor çalışmada yani frenleme ve durma harici çalışma koşullarında %69,3 ve frenleme esnasında %65,2 olarak bulunmuştur. Bu verimler NEDC'de sırasıyla %69,6 ve %73,7 olarak hesaplanmıştı. Aracın WLTP'de NEDC'e göre %15 daha fazla enerji tüketmesinin ilk sebebi daha yüksek hız ortalaması nedeniyle daha yüksek yuvarlanma ve aerodinamik sürtünmeye maruz kalması ise ikinci bir sebep olarak bu verimlerin düşmesidir.



Şekil 5.9. WLTP çevrimi esnasında güç akışı

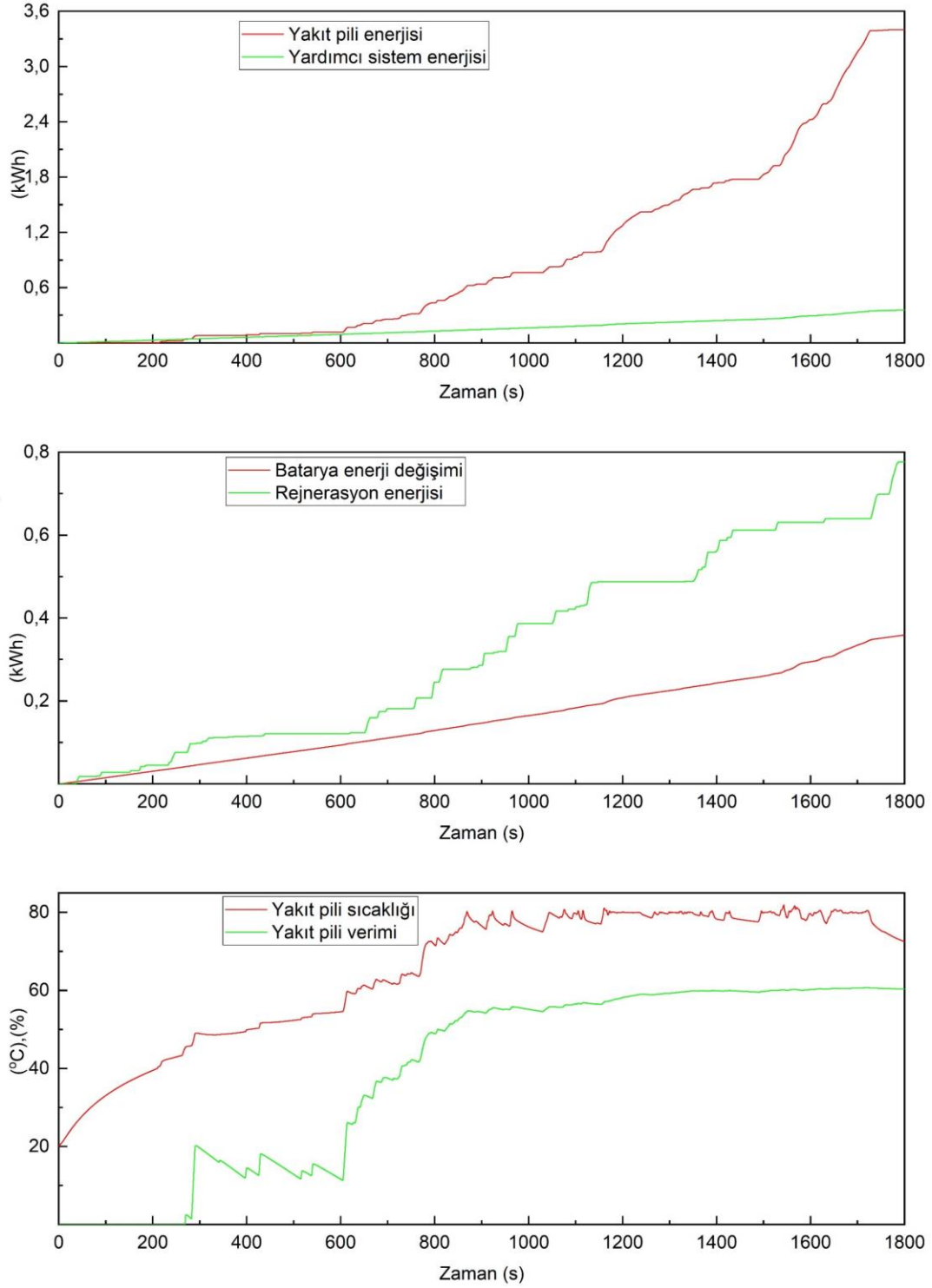
Cer motorunun WLTP çevrimi esnasındaki akım, gerilim, tork, hız ve güç verileri Şekil 5.10'da verilmiştir. Çevrimin çok yüksek hız bölgesinde motor hızı 6000 d/d'ya ulaşmıştır. Daha yüksek frenleme güçleri nedeniyle rejenerasyon esnasında gerilim artışları daha büyük değerler ve

daha sık olmuştur. NEDC’de 125 Nm değerini geçmeyen tork bu çevrimde 200 Nm değerine ulaşmıştır.



Şekil 5.10. WLTP çevrimi esnasında cer motoruna ait akım, gerilim, tork, hız ve güç verileri

WLTP çevrimi için yakıt pili ve bataryanın enerji verileri Şekil 5.11’de görülmektedir. Bu çevrimde yakıt pili daha yüksek güç talebiyle daha erken devreye girmiştir. Yakıt pili etkin bir biçimde çalışmaya başladıktan sonra enerji verimi %60,7’ ulaşabilmiştir. Bu verim değerleri anlık olmayıp aracın çalışması ile kümülatif olarak hesaplanmıştır ve çevrim sonunda %60,4’e düşmüştür. Çünkü araç belirli bir süre durur halde çalışır konumda beklemiştir. Bataryadaki enerji değişimi ise çevrim sonunda 0,32 kWh, rejenerasyonla geri kazanılan enerji miktarı ise 0,78 kWh olmuştur. Batarya doluluk oranındaki değişim ise %2,4 olmuştur yani bataryadan harcanan güç 0,39 kWh’dir ve enerji değişimi ile arasındaki fark 0,07 kWh olmuştur.

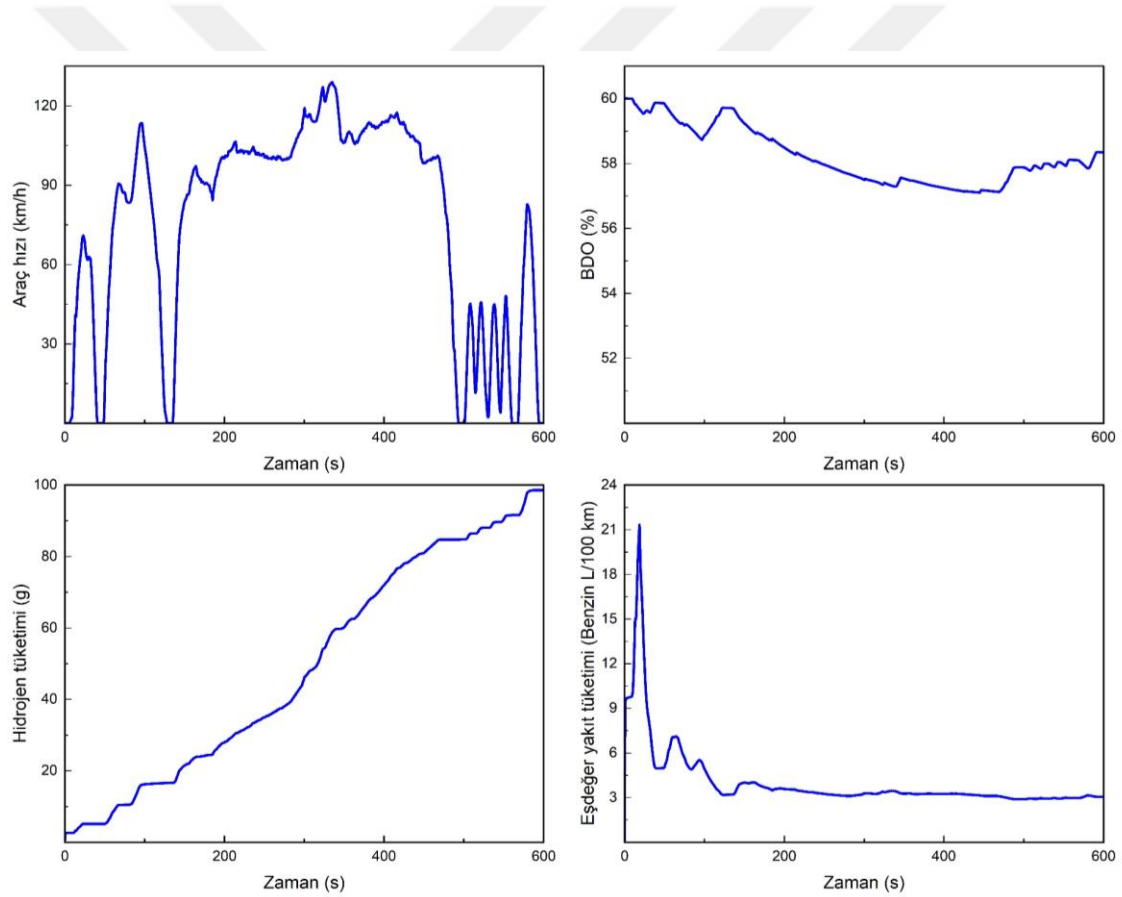


Şekil 5.11. WLTP çevrimi esnasında yakıt pili ile batarya enerji değişimi ve yakıt pili sıcaklığı ile verimi

5.3. US06 Sürüş Çevrimi Simülasyonu

Kullanılan çevrimler içerisinde en agresif sürüş şartlarına sahip olan çevrim US06 çevrimidir. Bu çevrimin ABD’de FTP-72’ye ek olarak uygulana tamamlatıcı bir çevrim olduğundan daha önce bahsedilmiştir. Tasarlanan aracın agresif sürüş şartlarında ne gibi sonuçlar

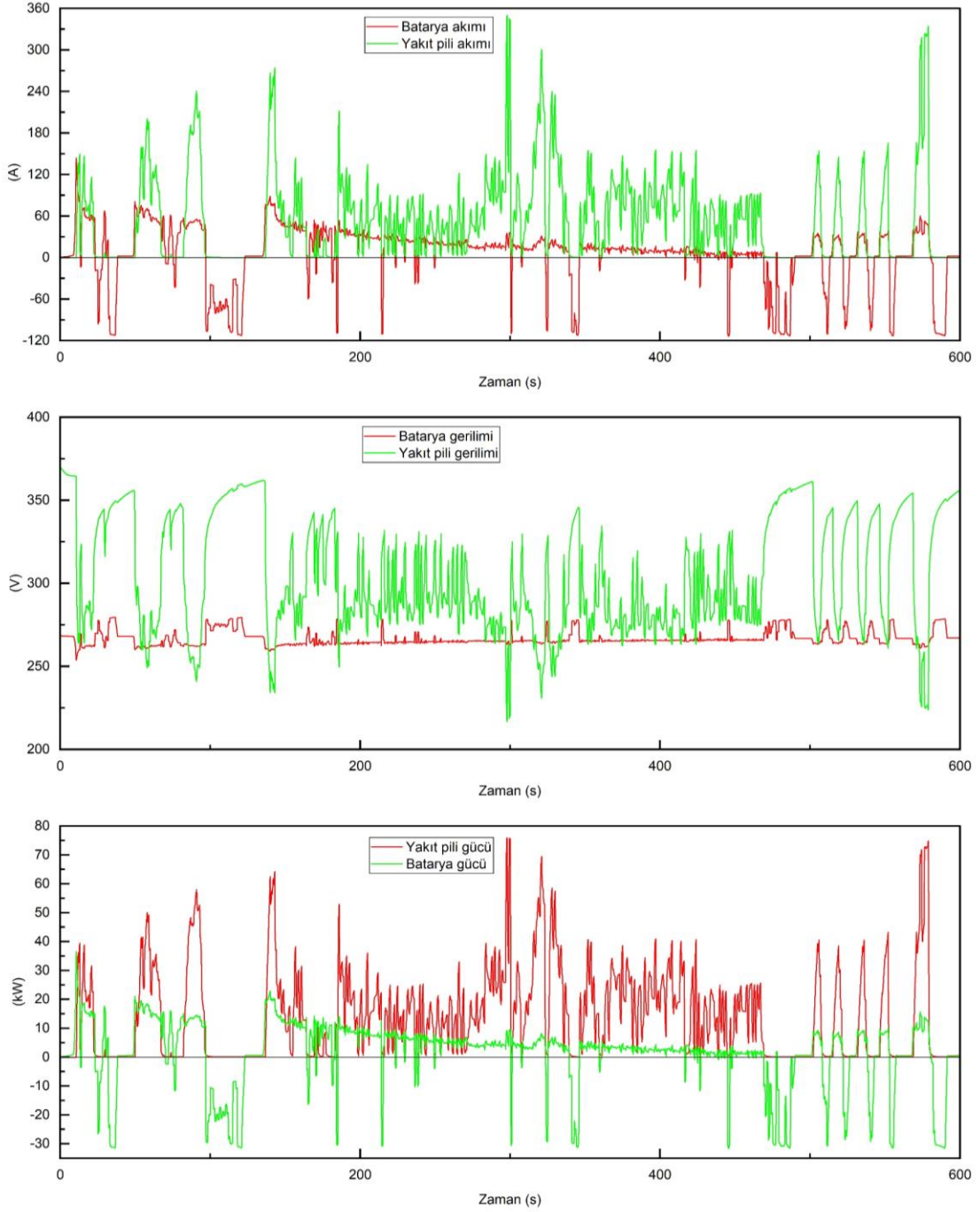
vereceğini görebilmek amacıyla bu çevrim de simülasyonda kullanılmıştır. Çevrimler içinde hem azami ivmelenmesi hem de ivmelenmedeki standart sapması en yüksek olan çevrimdir. 12894 m olan çevrim boyunca araç 98,57 g hidrojen tüketmiş olup ortalama yakıt tüketimi ise 3,05 eşdeğer benzin L/100 km olmuştur (Şekil 5.12). Görüldüğü üzere agresif kullanım nedeniyle ortalama yakıt tüketimi ise 2,39 L/100 km olan WLTP'ye göre %27,6 artmıştır. Bu durum geleneksel araçlarda da söz konusu olmakla beraber bu fark çok daha fazla olabilmektedir. Çünkü bu tür sık sık yavaşlama ve hızlanma olan çevrimlerde rejeneratif frenlemenin önemi daha çok ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle hibrit ve elektrikli araçların birçoğu bu konuda İYM araçlara göre daha avantajlıdır. Çevrim sonunda BDO %58,34'e düşmüştür. Ortalama yakıt tüketimi ilk hareket esnasındaki aşırı ivmelenmeyle 21 L/100 km değerini bile aşmıştır. Aracın sürekli bu tarzda sürüldüğü düşünülecek olursa menzil değeri 672,8 km olacaktır.



Şekil 5.12. US06 çevriminde araç hızına bağlı olarak BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi

Şekil 5.13'te yakıt pili ve bataryanın akım gerilim karakteristikleri ve US06 çevrimi esnasında ürettikleri güçler verilmiştir. Önceki çevrimlere nazaran ilk anlarda yüksek güç talebi nedeniyle yakıt pili ufak bir gecikmeyle bataryanın hemen ardından devreye girmiştir. Çok ani ve sürekli hızlanmalar nedeniyle hem yakıt pili hem de batarya akımı diğer çevrimlere göre çok daha

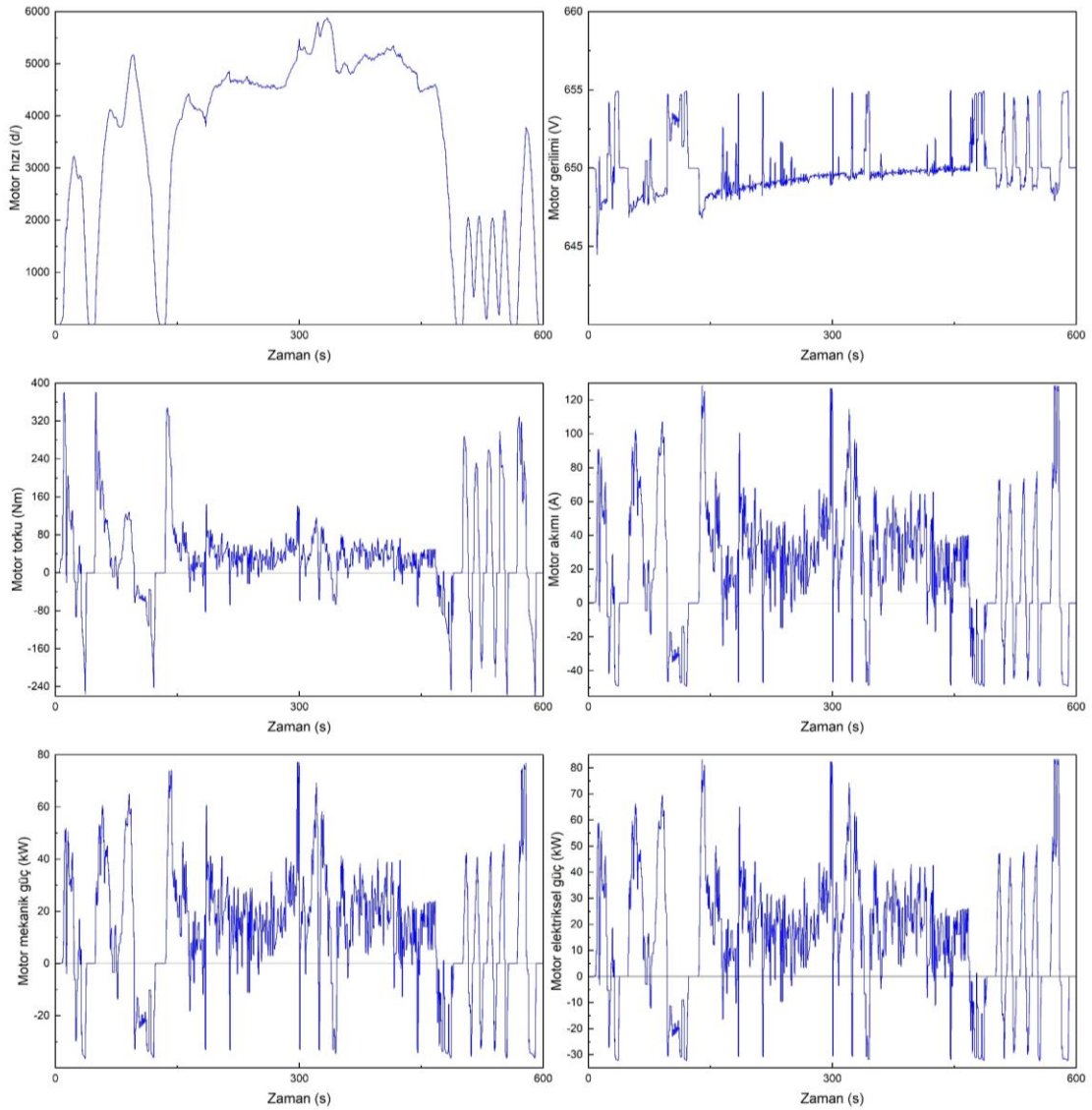
fazla olmuştur. 298. saniyede yakıt pili 350 A'e ulaşmış olup bu esnada gerilim 217 V'a kadar düşmüştür. Burada tüm yüksek güçlü frenlemeler esnasında maksimum deşarj akımı olan 120 A değerinin hiç geçilmemiş olması önemlidir.



Şekil 5.13. US06 çevrimi esnasında yakıt pili ve bataryanın akım, gerilim ve güç karakteristikleri

Şekil 5.14'te US06 çevrimi esnasında cer motoruna ait veriler verilmiştir. İlk etapta diğer çevrimlere nazaran daha büyük ölçeklerde değişimler gözle çarpmaktadır. Özellikle diğer çevrimlerde

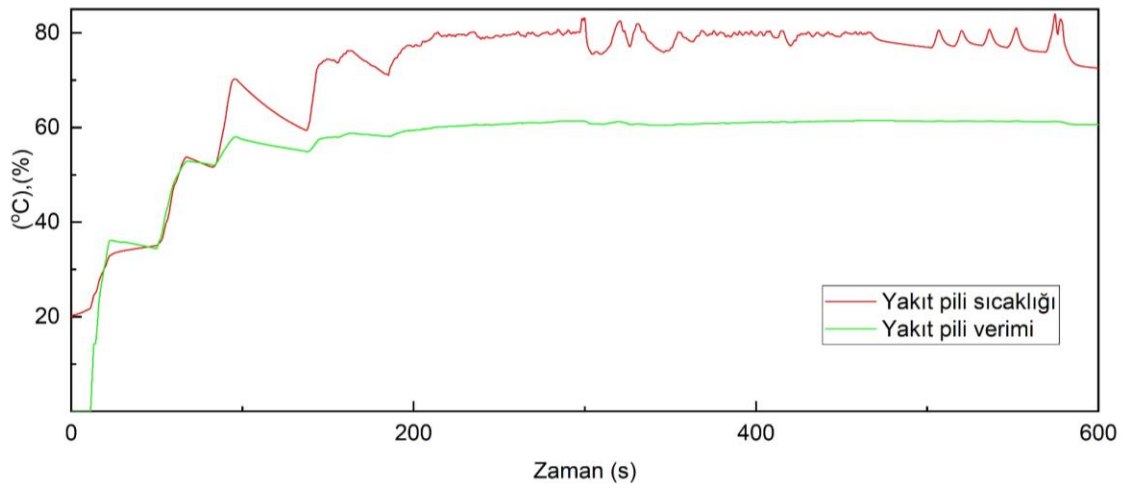
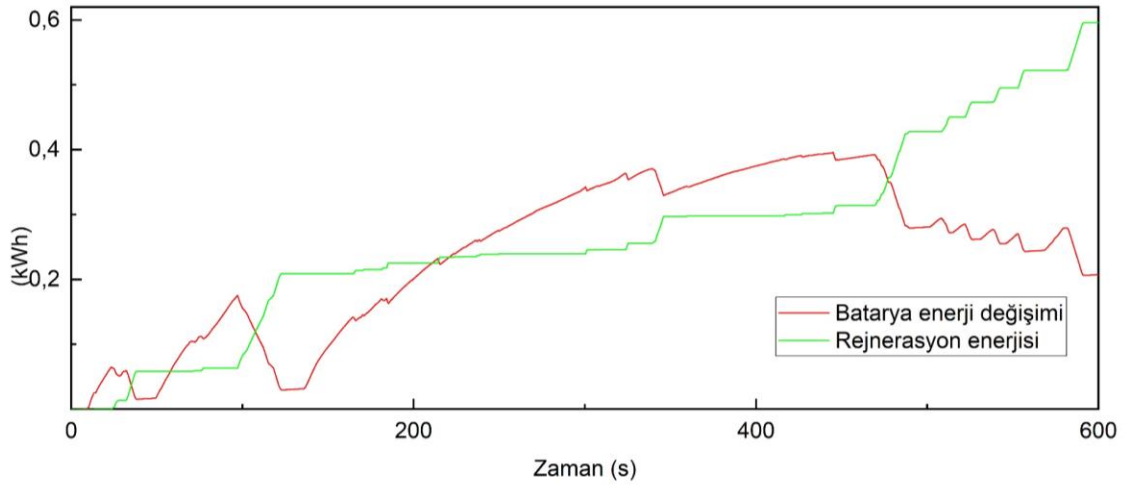
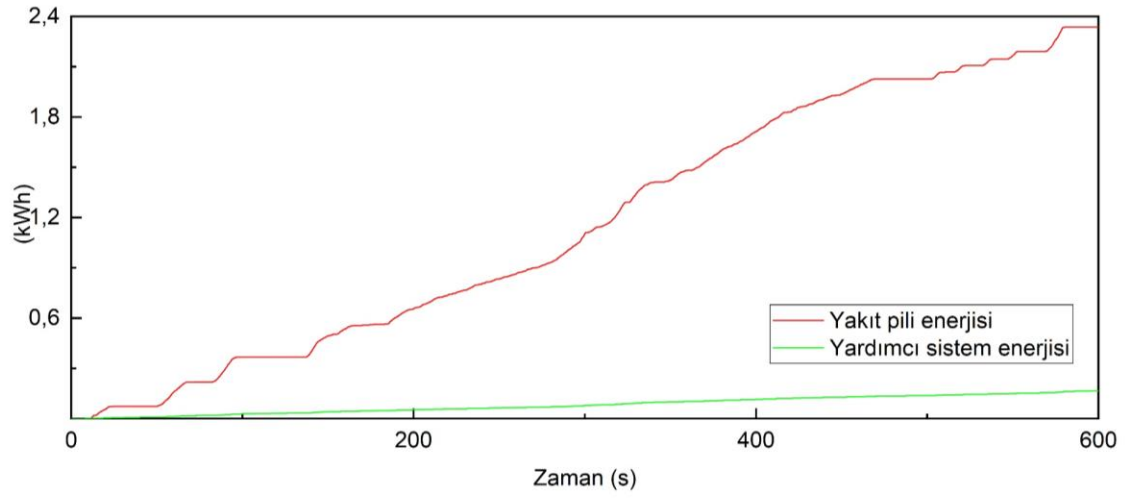
daha sabit olan gerilim değerleri burada daha fazla değişkenlik göstermiştir. Motor torku ilk anlarda azami değeri olan 380 Nm değerine ulaşmıştır. Motor akımı ilk defa 100 amperlerin üzerine çıkmıştır. Motor elektriksel ve mekanik güç değerleri sırasıyla 76 ve 83 kW değerlerini aşmıştır. Bu çevrimde diğer çevrimlere nazaran daha yüksek güçlere ulaşılmıştır. Özellikle ani hızlanmalar ve frenlemeler çok sayıda güç piklerinin oluşmasına neden olmuştur. Frenleme esnasında tekerlek gücü -50 kW'ı aşmıştır. Tabi bu güç ne kadar yüksek olursa olsun 32 kW'lık şarj gücü limiti nedeniyle elektriksel tarafta bu değer aşılmamıştır.



Şekil 5.14. US06 çevrimi esnasında cer motoruna ait akım, gerilim, tork, hız ve güç verileri

Şekil 5.15'te görüldüğü üzere bu çevrimde de WLTP'ye benzer bir yakıt pili verimliliği görülmüştür fakat daha uzun süreli nominal güçte çalışılmasından dolayı verimlilik %61,4 değerini görmüştür. Bu çevrimde batarya enerji değişimi 0,21 kWh, rejenerasyon enerjisi ise 0,6 kWh

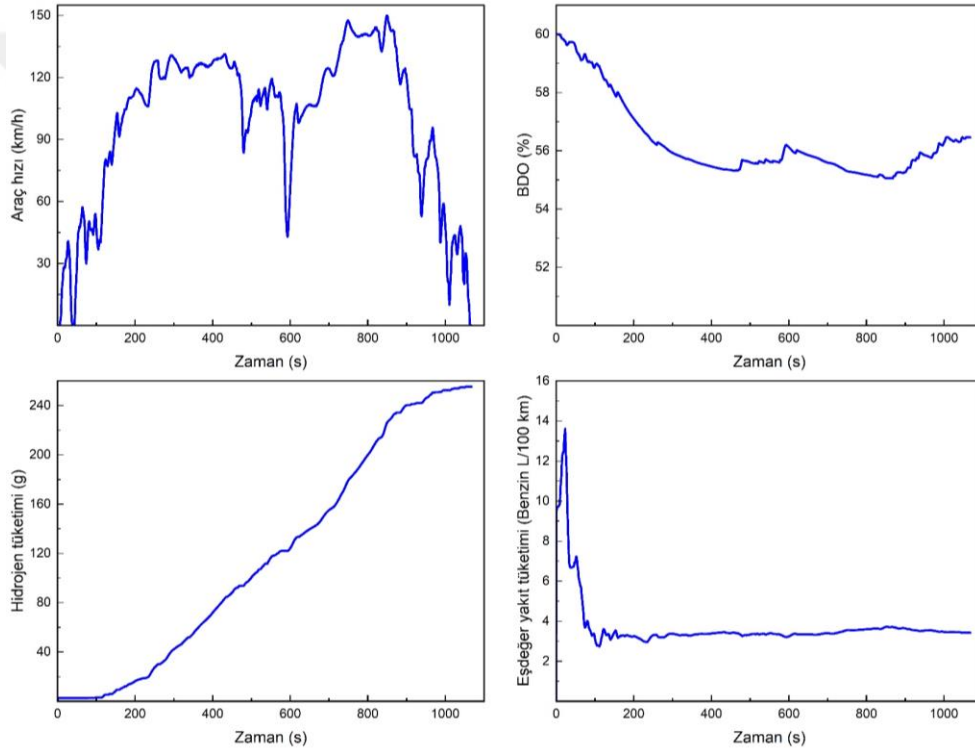
olmuştur. BDO'ndaki değişim ise 1,66 olmuştur ki bunun kapasite karşılığı 0,27 kWh'tir. Bu çevrimde her ne kadar yüksek güçlü frenlemeler olsa da bunlar çoğunlukla maksimum şarj sınırının üzerinde kaldığı için verimli bir şekilde geri kazanılamamıştır. Buradan, hibrit araçlarda verimliliğin daha yüksek olması sadece hızlanma anlarında bataryanın destek vermesi değildir ayrıyeten ve daha da önemlisi frenleme işlemidir. Bu işlem genlik olarak ne kadar düşük bir ivmeyle yapılırsa o kadar çok enerji geri kazanılabilir. Bu konuda birçok araç üreticisi, kullanıcının sürüş alışkanlıklarına ve sürüş koşullarına bağlı olarak rejenerasyon gücünü ayarlayabilme olanağı sağlamaktadır. Tabi ki bu işlemler frenleme gibi hayati önem taşıyan bir durumda gerçekleştiği için rejeneratif frenleme işlemi çok hassas ve optimum düzeyde yapılmalıdır. Aksi takdirde can ve mal kaybına neden olacak kazalar meydana gelebilir. Daha ileri teknolojilerde araç anlık navigasyon verisiyle yavaş aşağı, yukarı veya viraj gibi hem yol hem de internet bağlantı ile trafik koşullarını işleyerek optimum sürüş performansı konusunda sürücüyü yönlendirebilir. Böylece gereksiz hızlanma ve frenlemelerin önüne geçilerek ve tahrik sistemi optimum verim bölgesinde çalıştırılarak hem yakıt ekonomisi en üst seviyeye çıkarılırken hem de sürüş menzili artırılmış olmaktadır [160]. Bu tür akıllı asistan özellikleri içten yanmalı ve hibrit araçlarda yakıt verimliliğine olan katkısı daha önemli iken elektrikli araçlarda menzil olarak sağlayacağı fayda daha da önem kazanacaktır.



Şekil 5.15. US06 çevrimi esnasında yakıt pili ile batarya enerji değişimi ve yakıt pili sıcaklığı ile verimi

5.4. ArtMW150 Sürüş Çevrimi Simülasyonu

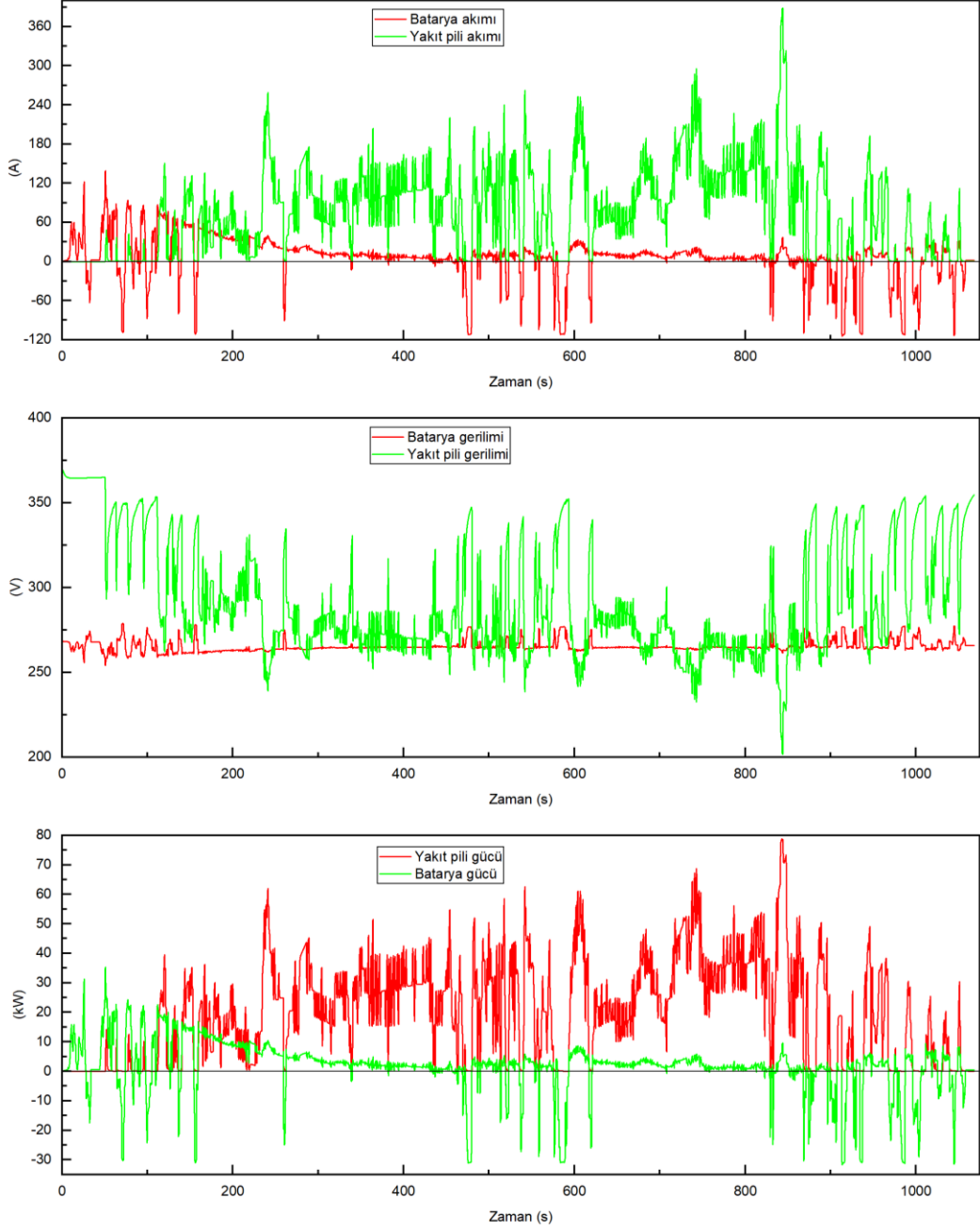
Bu çevrim ise diğer çevrimlerden farklı olarak tamamen yüksek hız odaklı bir çevrimdir. Çoğunluk olarak otoyol sürüşleri esas alınmıştır. En yüksek azami hıza sahip çevrim olası nedeniyle tasarlanan aracın yüksek hızlarda sergileyeceği davranışları gözlemlemek için uygun bir çevrimdir. En uzun süreli çevrim olmasa da yüksek hız ortalaması nedeniyle 29547m gibi bir mesafeye sahiptir. Şekil 5.16'da görüldüğü üzere hidrojen tüketimi de haliyle en yüksek değer olup 255,27 g olup ortalama benzin eşdeğer tüketimi de 3,42 L/100 km olmuştur. Bu değer US06 çevrimininkinden bile yüksek olmuştur. Bu değer yüksek olmasında özellikle yüksek hızlarda hızın karesiyle artan sürtünmeler etkili olmuştur. BDO değeri ise %56,46'ya düşmüştür.



Şekil 5.16. ArtMW150 çevriminde araç hızına bağlı olarak BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi

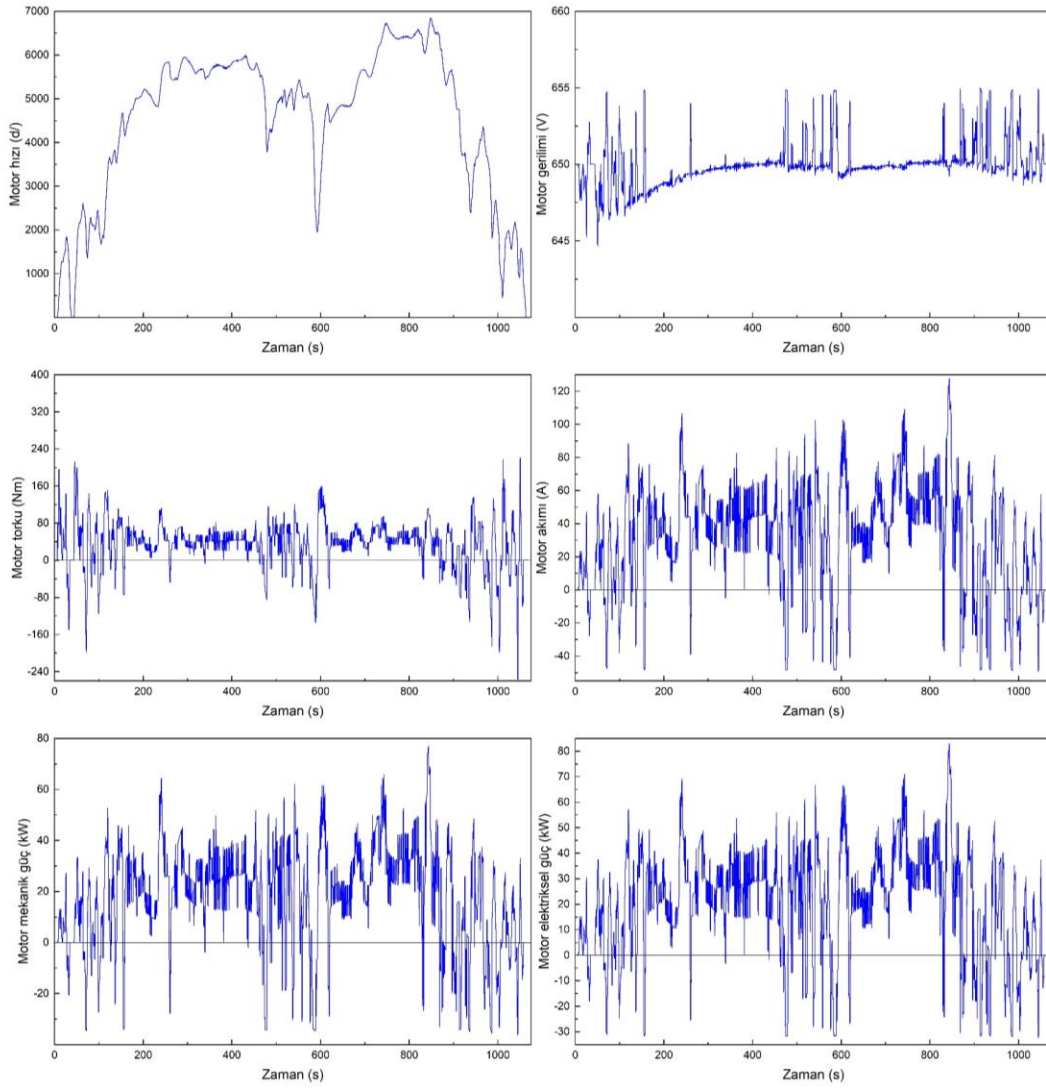
Yüksek güç talebi nedeniyle yakıt pili akımı devrilme akımı olan değere çok yaklaşarak 388 A'e ulaşmıştır. Bu esnada yakıt pili gerilimi 202 V'a kadar gerilemiştir. Bu durum Şekil 5.17'de açıkça görülmektedir. Aslında BDO %55 olmasına rağmen batarya burada çok devreye girmemiş olması pek de istenen bir durum olmasa da üstesinden gelinebilmiştir. Ara ara bu tür kararsız davranışlar oluşmuştur. Bunu düzeltmek için batarya etkinliğinin artırılması durumunda ise batarya tamamen birincil güç kaynağı durumuna kaymıştır. Çünkü güç yönetiminde yakıt pilinin nominal şartlara ulaştığında çok fazla devre dışı bırakılması verimini düşüreceği nedeniyle çok

fazla istenilmemiştir. Yüksek hızlarda ani frenlemenin yapıldığı 477 ve 585. saniyelerde tekerlekte oluşan frenleme gücü -75 kW'ı bulmuştur.



Şekil 5.17. ArtMW150 çevrimi esnasında yakıt pili ve bataryanın akım, gerilim ve güç karakteristikleri

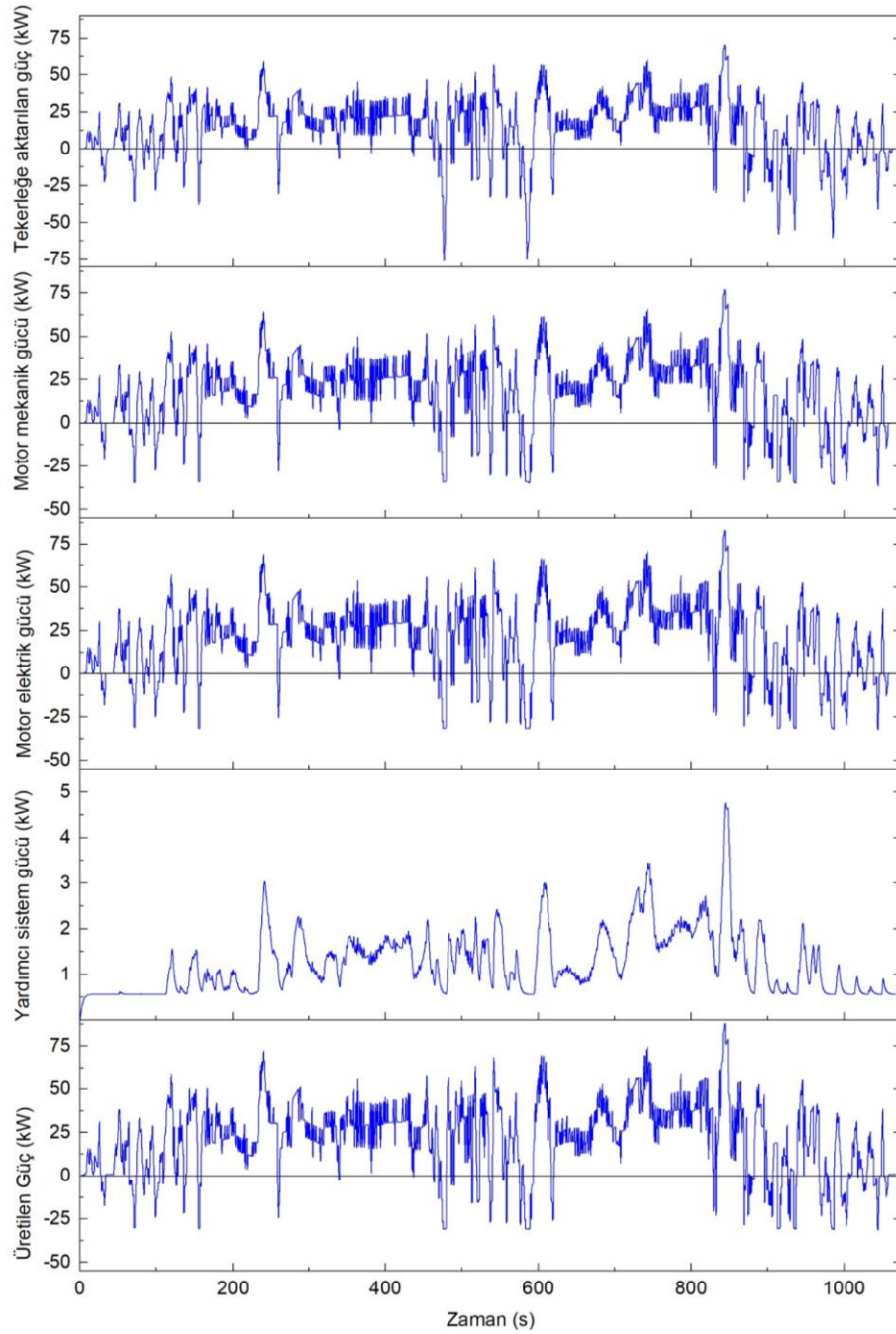
Şekil 5.18’de görüldüğü üzere 849. saniyede azami hıza ulaşılmış ve bu esnada motor hızı ise 6840 d/d olmuştur. 844. saniyede ise motor akımı en yüksek seviyesi olan 127 A’e ulaşmıştır. Azami güç tüketimi 83 kW olmuştur.



Şekil 5.18. ArtMW150 çevrimi esnasında cer motoruna ait akım, gerilim, tork, hız ve güç verileri

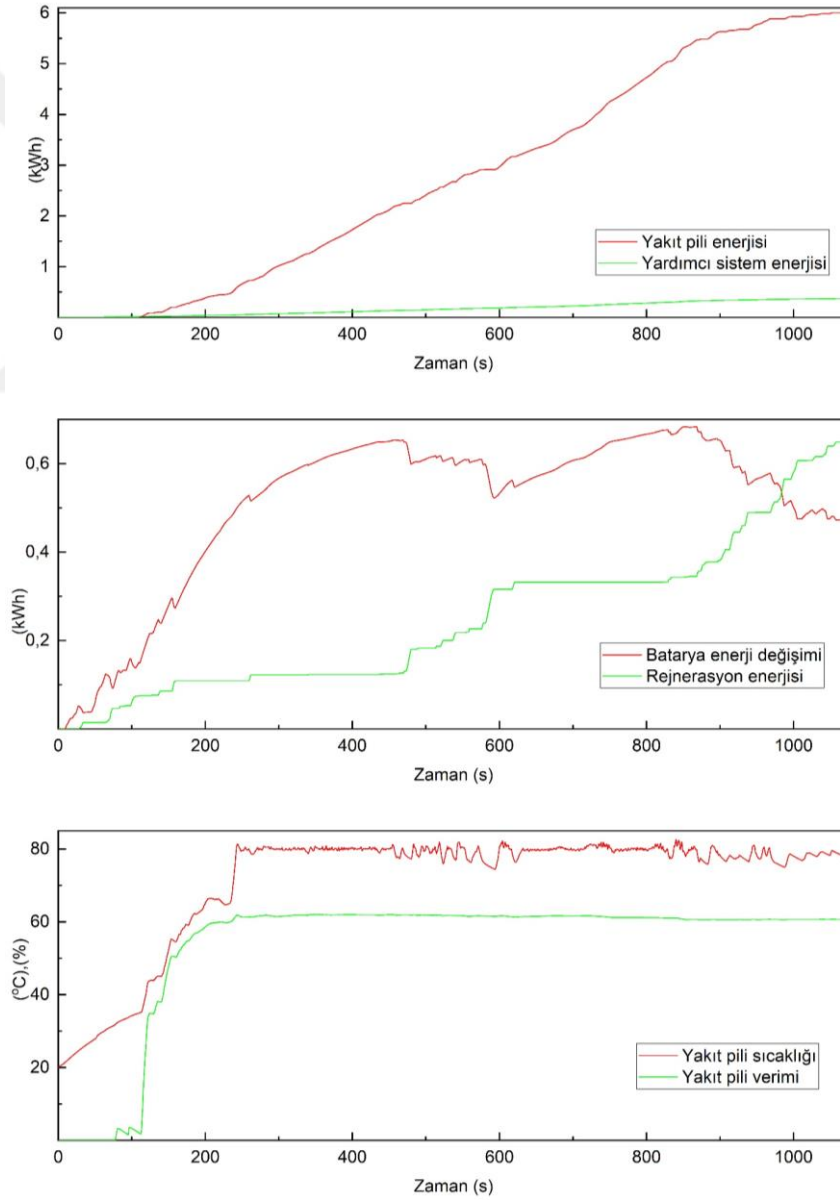
ArtMW150 çevrimde verimlilikler Şekil 5.19’da incelenecek olursa ilk olarak üretilen gücün çevrim boyunca motor çalışmada ortalama %93,4’ü elektrik motoruna giriş olarak verilebilmiştir. Verim WLTP çevriminden %6,9 daha fazla olmuştur bunun iki nedeni vardır. Birincisi yakıt pilinin nominal çalışma bölgelerinde çalışmış olmasıdır ikincisi ise bu çevrimde duraklamaların diğerlerine göre çok az olmasıdır. Generatör çalışmada bu verim ortalama %88,3 olarak hesaplanmıştır ki bu değer WLTP’ye göre %6,7 daha fazladır. Bu durumun oluşmasındaki ana nedenler ise bu çevrimde çok fazla frenlemenin olmaması ve bu frenleme gücünün birkaç pik hariç bataryanın maksimum şarj gücünü aşmamasıdır. Elektrik motoruna verilen gücün ise %90’nı motor çıkışında mekanik enerjiye dönüştürülmüştür. Bu çevrimde WLTP’ye göre nispeten nominal çalışma bölgesine daha yakın çalışma bölgeleri olduğundan verimlilik de artmıştır. Generatör çalışmada ise elektrik makinasının verimi %88,5 olarak hesaplanmıştır. Bu değer WLTP çevrimine göre daha yüksektir ve bunun sebebi yine frenleme esnasında batarya şarj gücünü aşan durumların

çok olmamasıdır. Cer motoru ile tekerlek arası verim de hesaba katıldığı durumda aracımızın verimi motor çalışmada yani frenleme ve durma harici çalışma koşullarında %77,3 ve frenleme esnasında %71,9 olarak bulunmuştur. Bu verimler WLTP’de sırasıyla %69,3 ve %65,2 olarak hesaplanmıştı. Aracın verimliliklerinin daha yüksek olmasına rağmen ArtMW150’de WLTP’e göre %43 daha fazla enerji tüketmesinin sebebi daha yüksek hız ortalaması nedeniyle çok daha fazla yuvarlanma ve aerodinamik sürtünmeye maruz kalmasıdır. Çünkü WLTP’de duraklamalar hariç ortalama hız 53,8 km/h iken ArtMW150’de ise 100,4 km/h’tir.



Şekil 5.19. ArtMW150 çevrimi esnasında güç akışı

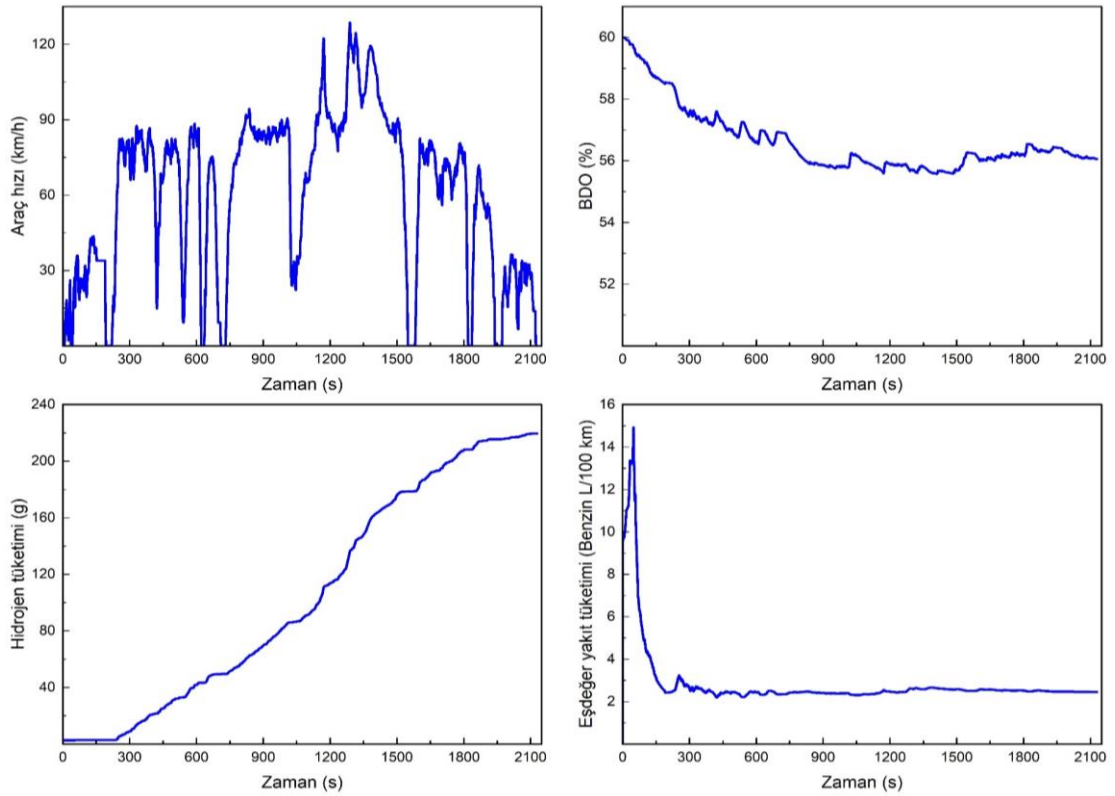
Şekil 5.20’de görüldüğü üzere bu çevrimde de WLTP ve US06’ya benzer bir yakıt pili verimliliği görülmüştür ve verimlilik %62 değerini görmüştür. Bu çevrimde batarya enerji değişimi 0,47 kWh, rejenerasyon enerjisi ise 0,65 kWh olmuştur. BDO’ndaki değişim ise 3,54 olmuştur ki bunun kapasite karşılığı 0,58 kWh’tir. Bu çevrim US06 çevriminin mesafe olarak 2,3 katı iken rejenerasyon enerjisinin aynı olması daha düşük ivmelenmelerin olmasıyla açıklanabilir. Burada rejenerasyonun fazla olmasının her zaman daha iyi bir durum olmayacağını görebiliriz. Çünkü her ne kadar US06’da daha fazla rejenerasyon olsa da bu daha verimli bir çevrim olduğu anlamına gelmez. Tam tersi olarak ArtMW150 çevrimi daha verimlidir çünkü hem hızının daha az değişken, dur-kalkların daha az olması hem de motorun daha verimli bölgelerde çalışması etkili olmuştur.



Şekil 5.20. ArtMW150 çevriminde yakıt pili ile batarya enerji değişimi ve yakıt pili sıcaklığı ile verimi

5.5. ELZ130 Sürüş Çevrimi Simülasyonu

Bu çevrim Elazığ ilindeki gerçek sürüşlerden elde edilen verilerle oluşturulmuş olup WLTP, US06 ve ArtMW150 çevrimlerinin hepsini içerisinde barındıran bütüncül bir çevrimdir. Bu yönüyle yine bütüncül bir çevrim olan Artemis URM130 çevrimine benzerlik göstermektedir. Kentsel bir alt döngüyle başlayan çevrimi sonrasında kırsal alt döngü takip etmektedir. Daha sonra ise otoyol alt çevrimiyle devam eden çevrim aynı yol tekrar geri dönülerek kırsal ve kentsel alt çevrimlerle sonlandırılmıştır. Bu sayede hep soğuk başlama anında kat edilen kentsel sürüş çevrimin sonuna da bırakılarak yakıt pilinin sıcak çalışma bölgesine de denk getirilmiştir. Şekil 5.21’de görüldüğü üzere bu çevrim boyunca 219,52 g hidrojen tüketilmiş olup ortalama benzin eşdeğer tüketimi de 2,44 L/100 km olmuştur. Bu tüketim değeri WLTP’deki 2,39 L/km olan değerle birbirine çok yakındır. BDO’daki değişim ise %3,94 olmuştur ki en uzun mesafeli olan çevrimde bu değer de en yüksek olması normaldir.

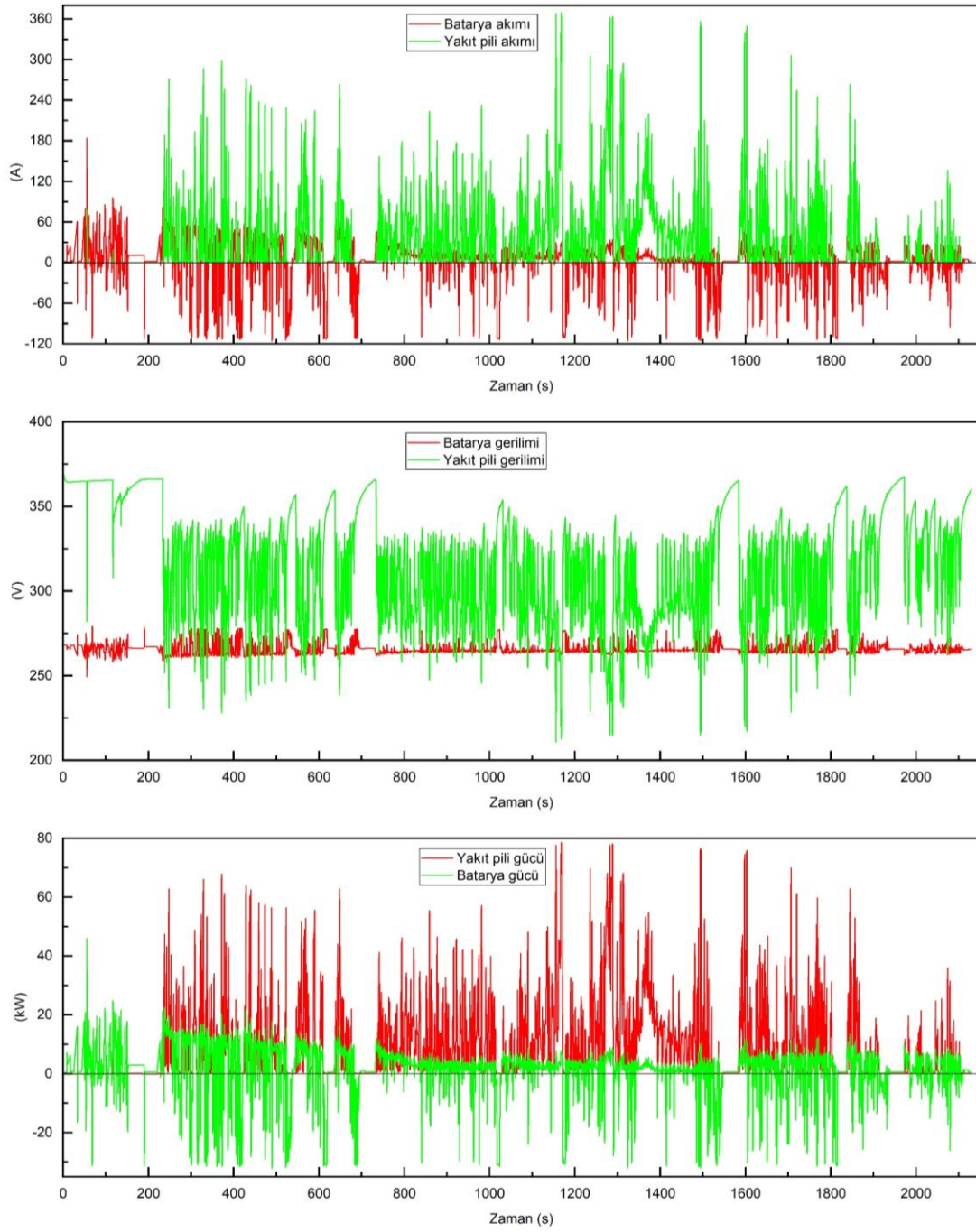


Şekil 5.21. ELZ130 çevriminde araç hızına bağlı olarak BDO, hidrojen tüketimi ve eşdeğer yakıt tüketimi

Bu çevrimdeki şartlara aracın menzili 841 km olarak ve bu menzil değeriyle aracın emisyon değeri bu çevrim için 58,56 gCO₂e olarak bulunmuştur. Gerçek bir sürüş çevrimiyle bulunan bu menzil değeri birçok İYM aracın gerçek şartlardaki değerinden daha iyidir. Sürüş alışkanlıkları ve şartları tüm araçlarda yakıt tüketimini ve haliyle menzili etkilese de bu elektrikli ve hidrojen gibi

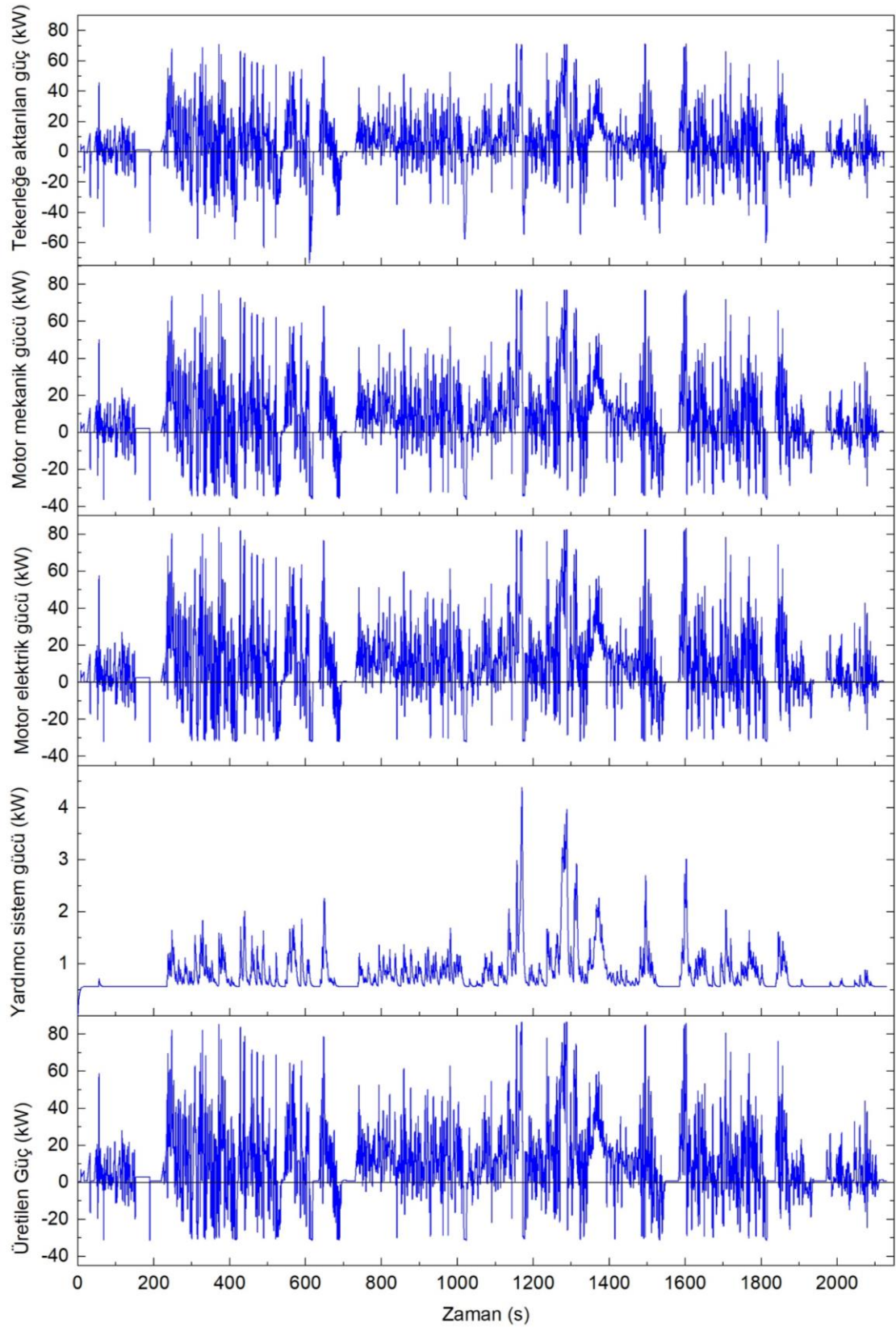
alternatif yakıtlı araçlarda çok daha fazla önem arz etmektedir. Çünkü bu araçlarda kullanılan güç kaynaklarının enerji yoğunluğu İYM araçlarda kullanılan benzin ve mazota göre oldukça düşüktür. Elektrikli araçların ortalama 61,7 kWh kullanılabilir enerji depolayabildikleri göz önünde bulundurulursa 6,93 benzin eşdeğer L'ye tekabül eder [161]. Tasarlanan araca ait toplam enerji benzin eşdeğeri olarak 20,52 L bulunmuştu, bu nedenle verimlilik bu araçlar için çok önemlidir. Bunun yanında bu araçların yakıt ikmalleri geleneksel araçlar kadar kolay değildir. BEA için her ne kadar şarj noktası artsa da şarj süreleri hala daha çözülmesi gereken önemli bir konudur. Hidrojen de ise durum her ne kadar ikmal süresi geleneksel araçlarla aynı olsa da dolum noktası olarak Japonya, ABD ve bir takım AB ülkesi haricinde imkânsız gibidir.

Gerçek bir çevrim esnasında daha fazla ivmelenmelerin olduğu Şekil 5.22'de görülmektedir. Yakıt pili gücü ArtMW150'de iki defa olduğu gibi burada da dört defa azami değerine yaklaşmış ve bu noktalarda yakıt pili gerilimi oldukça düşmüştür. Yakıt pili bu çevrim esnasında şarj-deşarj olarak çokça yön değiştirmiştir. Yakıt pili gerilimi bahsedilen noktalar haricinde nominal değer ve üzerinde seyretmiştir.



Şekil 5.22. ELZ130 çevrimi esnasında yakıt pili ve bataryanın akım, gerilim ve güç karakteristikleri

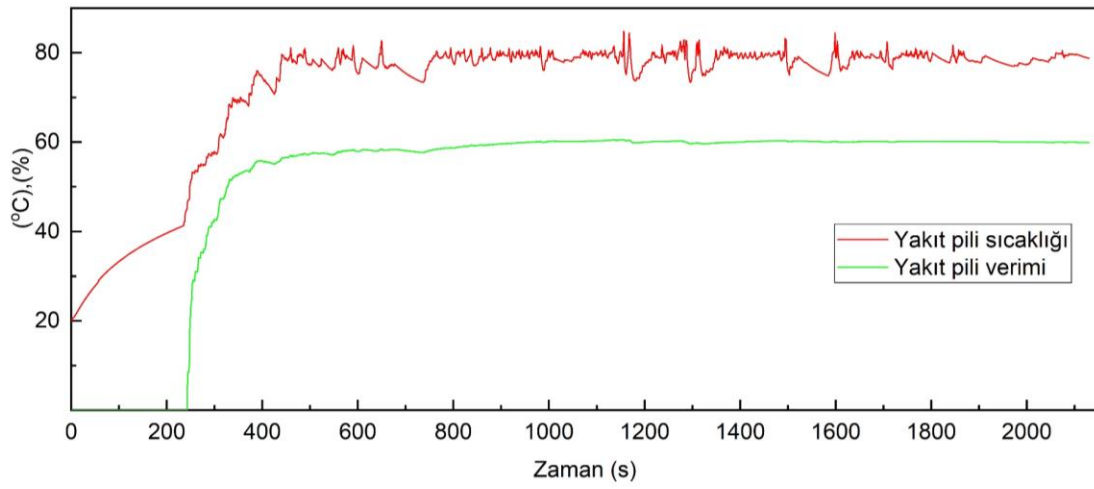
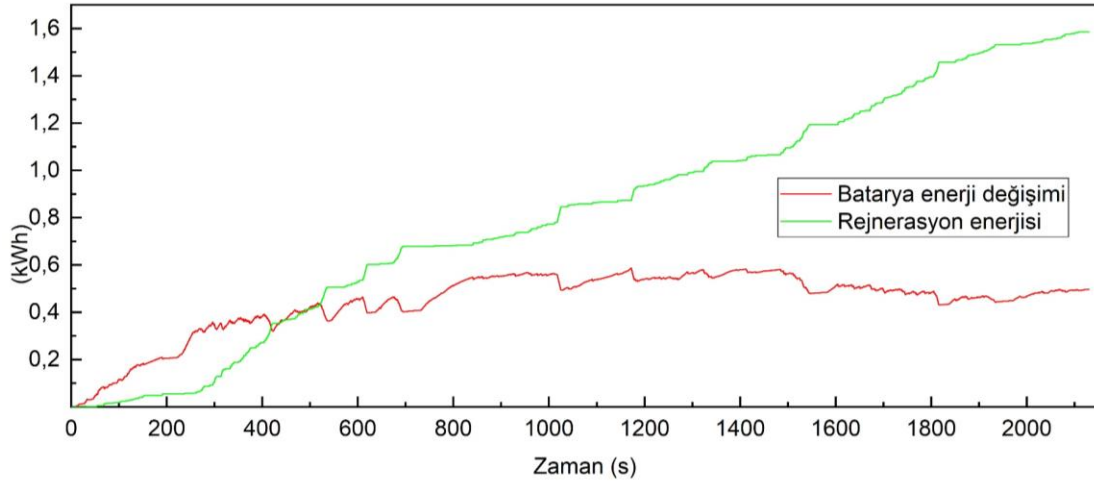
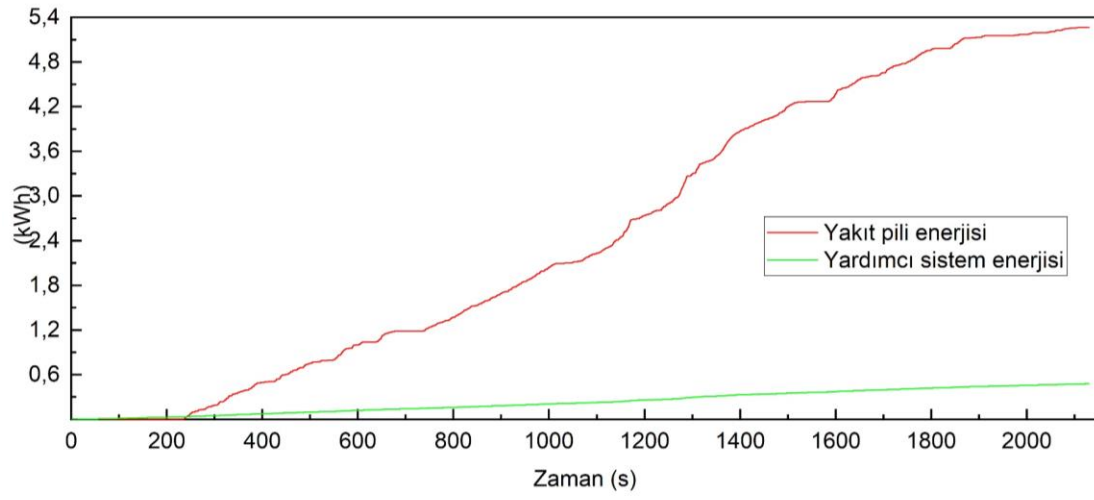
Bu çevrim esnasında US06 veya ArtMW150’de olduğu gibi çok aşırı bir güç talebi olmadığı Şekil 5.23’te görülmektedir. Üretilen güç 86,6, motor elektriksel gücü 83,9 kW’ı geçmemiştir. Regeneratif yönde ise 70 kW’ı geçen frenleme olmuştur.



Şekil 5.23. ELZ130 çevrimi esnasında güç akışı

ELZ130 çevrimde verimlilikler incelenecek olursa ilk olarak üretilen gücün çevrim boyunca motor çalışmada ortalama %89,3'ü elektrik motoruna giriş olarak verilebilmiştir. Verim WLTP çevriminden fazla ama ArtMW150 çevriminden az olmuştur. Bu çevrimde yakıt pili nominal çalışma bölgelerinde WLTP çevriminden fazla ama ArtMW150 çevriminden az çalışmıştır. Duraklamalar ise WLTP çevrimine benzer ama ArtMW150 çevriminden fazla sayıda olmuştur. Generatör çalışmada bu verim ortalama %85,9 olarak hesaplanmıştır ki bu değer yine WLTP ve ArtMW150 çevrimlerinin arasında bir değerdir. Elektrik motoruna verilen gücün ise %88,3'nü motor çıkışında mekanik enerjiye dönüştürülmüştür. Burada da yine iki çevrimin arasında bir değerde olmuştur. Generatör çalışmada ise elektrik makinasının verimi %88,2 olarak hesaplanmıştır. Bu değer ArtMW150 çevriminden bir miktar azdır. Cer motoru ile tekerlek arası verim de hesaba katıldığı durumda aracımızın verimi motor çalışmada yani frenleme ve durma harici çalışma koşullarında %72,5 ve frenleme esnasında %69,7 olarak bulunmuştur. Bu verimler WLTP'de sırasıyla %69,3 ve %65,2 olarak hesaplanmıştır. Aracın verimliliklerinin daha yüksek olmasına rağmen ELZ130'da WLTP'e göre %2,1 daha fazla enerji tüketmesinin sebebi daha yüksek hız ortalaması nedeniyle daha fazla yuvarlanma ve aerodinamik sürtünmeye maruz kalmasıdır. WLTP'de duraklamalar hariç ortalama hız 53,8 km/h iken ELZ130'da ise 66,03 km/h'tir ve buna rağmen yakıt tüketimi çok fazla artmamıştır çünkü ELZ130 çevriminde verimlilikler daha fazladır.

Şekil 5.24'te ELZ130 çevrimi süresince yakıt pili ile batarya enerji değişimi ve yakıt pili sıcaklığı ile verimi verilmiştir. Çevrimin büyük bölümünde yakıt pili verimi %60 değerinde sabit kalmıştır. Bataryadaki enerji değişimi 0,5 kWh olup rejenerasyon enerjisi ise 1,59 kWh olmuştur. Rejenerasyon enerjisinin yüksek olmasında hem ivmeli sürüşün hem de çevrimin mesafesinin uzun oluşu etkili olmuştur. Batarya kapasitesindeki azalma ise 0.64 kWh olmuştur ve bataryadaki enerji değişimi ile arasındaki farkın az olması bize frenleme güçlerinin azami şarj gücünden çok fazla olmadığını ve rejenerasyon veriminin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.24. ELZ130 çevrimi esnasında yakıt pili ile batarya enerji değişimi ve yakıt pili sıcaklığı ile verimi

5.6. Bulguların Analizi

Sürüş çevrimlerinde simüle edilen tasarım aracının farklı koşullarda çalışması ve bu koşullar altında sergilediği performans ve verimlilik değerleri incelenmiştir. Bu çevrimlere ait veriler Tablo 5.1’de verilmiştir. İlk olarak tüketim değerlerine bakılacak olursa en düşük ortalama tüketim 2,08 benzin eşdeğer L/100 km ile NEDC, en yüksek ortalama tüketim ise 3,44 benzin eşdeğer L/100 km ile ArtMW150 çevrimi olmuştur. Menzil değerleri ise 600 ila 986 km arasında değişmektedir. Emisyon verileri yakıt tüketimi ile orantılı olarak en düşük 49,95 gCO₂e/km ile NEDC, en yüksek 82,1 gCO₂e/km ile ArtMW150 çevrimi olmuştur. Beş sürüş çevrimi içinde bütüncül bir çevrim olarak tasarlanan ELZ130 çevrimi öngörülebilir bir şekilde ortalama verilere sahip olmuştur.

Tablo 5.1. Sürüş çevrimlerinde elde edilen simülasyon sonuçları

	NEDC	WLTP	US06	ArtMW150	ELZ130
Mesafe (m)	11016,6	23262	12894	29547	35951,7
Ortalama hız (km/h)	42,2	53,8	79,6	100,4	66,03
Tüketim					
Hidrojen (g)	52,72	138,55	98,57	255,27	219,52
ΔBDO (%)	2,03	2,4	1,66	3,54	3,94
Eşdeğer benzin L/100 km	2,08	2,39	3,05	3,42	2,44
Wh/km	185	213	272	304	217
Menzil km	986	858,6	672,8	600	841
Emisyon (gCO ₂ e/km)	49,95	57,36	73,2	82,1	58,56
Tahrik sistem verimi (%)	69,6	69,3	76	77,3	72,5
Yakıt pili verimi (%)	%58	60,4	60,6	60,7	59,9
Genel verim (%)	47,9	46,8	49,6	50	47,8

Tasarlanan araç Tablo 5.2’de piyasada bulunan YPEA, EA ve İYMA’lar ile verilen parametreler üzerinden karşılaştırılmıştır. İlk olarak hâlihazırda piyasada en yaygın olarak bulunan ve tasarlanan araca benzer özellikleri olan Toyota Mirai II karşılaştırılacak olursa bu aracın menzili 650 km’dir. Deposu tasarım aracındaki ile aynı miktarda yani 5,6 kg hidrojen almaktadır ve bu değerlerle ortalama benzin eşdeğeri yakıt tüketimi WLTP için 2,9 L/100 km olarak hesaplanmıştır. Yakıt pili gücü 128 kW olup sadece 1,2 kWh’lik bir bataryası bulunmaktadır ve elektrikli cer motorunun gücü 134 kW’tır [155,156]. Bu aracın 0-100 km/h hızlanması 9,2 s, azami hızı ise 173,4 km/h olarak verilmiştir [149]. Bu değerler tasarlanan araçta 8,7 s ve 218 km/h olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.2. Tasarım aracının diğer araçlarla karşılaştırılması[162–173].

	Tasarım aracı	YPEA	BEA	İYMA
Hidrojen (kg)	5,6 (5,04)*	5,6 (5,04)*	-	-
Batarya (kWh)	16,3 (14,67)*	1,2	61.7	-
Benzin (L)	22,8 (20,52)*	20,97(18,87)*	6,93	55
Depo hacmi (L)	184,8	140	240	55
Tüketim Benzin eşdeğer L/100	2.39	2,9	-	7,2 (5,5)**
Wh/km (Yakıttan tekerleğe)	213	258	200	641 (490) **
Wh/km (Kaynaktan tekerleğe)	215,8	258	233,4	641(490) **
Emisyon gCO ₂ e/km	57,36	65,9	102	168,5(128,7)**
0-100 km/h süresi (s)	8,7	9,2	8,1	-
Azami hız (km/h)	218	173,4	175	-
Menzil (km)	858,6	650	322	764 (1000) **
Genel verimlilik (%)	46,8	41,6	58,3	16

* Kullanılabilir miktarları göstermektedir.

** Türkiye için değerleri göstermektedir.

Tasarlanan araç, mevcut batarya elektrikli araçlarla karşılaştırılabilmesi için tüketim değeri 213 Wh/km olarak hesaplanmıştır. Elektrikli araçlara ait ortalama tüketim verisi ise 200 kWh olarak alınmıştır ve bu değer bataryadan tekerleğe olan tüketim değerini yansıtmaktadır. Burada ortalama şarj veriminin de %85,7 olduğu hesaba katılırsa düzeltilmiş ortalama tüketim değeri 233,4 Wh/km olarak bulunur. Aynı işlem tasarım aracına da yapılırsa ki bataryanın toplam enerji kapasitesindeki oranı sadece %8 olup düzeltilmiş ortalama tüketim değeri 215,8 Wh/km olarak bulunmuştur. Elektrikli araçların ortalama menzili ise yine aynı sayıda araç için 322 km olarak verilmiştir. Bu durumda düzeltilmiş ortalama tüketim değeri olarak tasarım aracı %8,2 daha az enerji tüketmekte iken menzil olarak %167 daha fazla bir değer sağlamıştır. Performans olarak kıyaslandığında elektrikli araçların 0-100 km/h hızlanması 8,1 s ve ortalama azami hızı 175 km/h olarak verilmiştir. Emisyon açısından araçlar karşılaştırıldıklarında en düşük değer tasarım aracına ait olup en yüksek değerler İYMA'lara aittir. Burada BEA emisyonu hesaplanırken ülkemize ait elektrik üretimi emisyon yoğunluğu referans alınmıştır. Eğer AB değeri referans olarak alınacak olursa bu değer sadece 63 gCO₂e/km olacaktır. Bu değer YPEA'nın değerinin dahi altında olacaktır. Verimlilik açısından incelendiğinde en verimli araç, yapısında herhangi bir enerji dönüşümü yapılmadan depolanan elektriğin doğrudan kullanıldığı, BEA olmuştur. BEA'yı tasarım aracı takip etmiş olup fişli hibrit yapısıyla YPEA'ya göre %5,2 daha yüksek bir verimliliğe sahip olduğu görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Günümüzde artan enerji talebi ile her ne kadar yenilenebilir ve daha sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ilgi büyük oranda artsa da bu gelişme fosil yakıtların yüksek miktarda ve uzun vadeli kullanımını tamamen ortadan kaldıracak nitelikte değildir. Tüm dünyada enerji tüketiminde ikinci sırada bulunan ve büyük bir paya sahip olan ulaşım sektöründe, çevresel zararları en aza indirmek ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji çözümlerine son yıllarda gelişen bir ilgiyle odaklanılmaktadır. Bu nedenle içten yanmalı araç teknolojilerinden elektrikli araç teknolojilerine doğru bir yönelim söz konusu olmuştur ve bunun ilk adımı İYM ile bir elektrik motorunun farklı oranlarda birleştirilerek oluşturulan hibrit araçlar olmuştur. Bu konuda çok farklı topolojiler gerçekleştirilmiş olup ana odak noktası ekonomik anlamda rekabetçi olan ve gerek yakıt tüketimi gerekse emisyon konusunda daha başarılı araçlar üretilmektedir. Bu yönelimin günümüzde ulaştığı son nokta ise tamamen elektrikli araçlar olmuştur. Dünya genelinde birçok geleneksel ve yeni araç üreticisi elektrikli araç pazarında boy göstermeye başlamıştır ve dünya genelinde elektrikli araçlar çok yeni olmalarına rağmen ciddi bir pazar payı elde etmiştir.

Elektrikli araçların yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel, ekonomik anlamda benzer İYM araçlara göre daha pahalı olması, kullanım anlamında ise kısa menzil ve uzun şarj süreleridir. Bu nedenle menzili arttırmak ve geleneksel araçlara yakın yakıt ikmal süresi sağlamak amacıyla farklı çözüm arayışlarına girilmiştir. Rekabetçi bir sürüş menzili, yakıt ikmal süresi soruna bir çözüm bulma ve bunu yaparken elektrikli araçların en büyük sloganı olan sıfır emisyon ilkesinden ödün vermeme adına yakıt pilli elektrikli araç teknolojileri en olası bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, bu doğrultuda yakıt pilli hibrit elektrikli araç tasarımı yapılmış ve MATLAB programı vasıtasıyla modellenerek simüle edilmiştir. Bu simülasyonlar farklı çevrimlerde gerçekleştirilerek tasarım aracının farklı koşullarda çalışması ve bu koşullar altında sergilediği performans ve verimlilik değerleri incelenmiştir. Ortalama tüketim değerlerinin 2,08 ile 3,44 benzin eşdeğer L/100 km olduğu görülmüştür. Bu sonuç ortalama yakıt tüketimi ile ortalama hızın doğrudan ilişkili olduğunu gösterir. Tüketim verisi ve dolayısıyla emisyon değerleri araç hızı ile doğru orantılı olmuştur. Artan araç hızı ile ters orantılı olarak azalan veri ise menzil olmuştur. Burada hız haricinde ortalama yakıt tüketimini etkileyecek en büyük parametre ise aslında verim değerleri olmalıydı. Ama verim ile yakıt tüketimi arasında doğrudan bir korelasyon kurulamamıştır. Bunun nedeni ise çevrimler arasındaki verim değerlerinin birbirine çok yakın olup büyük farklılıklar oluşmamasıdır. Buna rağmen yuvarlanma ve aerodinamik sürtünme kuvvetlerinin karesi ile orantılı olduğu hız değerleri arasında büyük farklılıklar vardır. Bu nedenle tüketim noktasında hız faktörü daha baskın olmuştur.

Bir araç tasarlanırken yalnızca tek bir sürüş çevriminin referans alınmasının ve aracın bu özel sürüş çevrimi için optimize edilmesinin önemli bir risk oluşturabileceği bilinmektedir. Bu sonuçlar ışığında bu ifadenin doğruluğu ortaya konmuştur. Tasarlanan araç, sürüş çevrimlerindeki tüm performans gereksinimlerini karşılamış olup bazı sürüş çevrimlerinde hedeflenen tüm özellikleri tam olarak sergileyememiştir. Özellikle sürekli yüksek güç taleplerinde hızlı tepki süresiyle ani güç taleplerine cevap veren batarya sürekli yüksek güç bölgelerinde görevini tam olarak yerine getirirken kısa süreli pik yüklerde istenilen düzeyde yük taleplerini karşılamamıştır. Bu nedenle yakıt pilinin devrilme akımlarına yakın akımlar üretmesi gerekmiş ve yüksek kütle transfer gerilim düşümü nedeniyle yakıt pili gerilim seviyesinin çok fazla düştüğü durumlar gözlemlenmiştir.

Akım grafikleri incelendiğinde duraklamalar hariç bataryanın tüm çevrim boyunca şarj veya deşarj durumunda bir akıma sahip olduğu görülmüştür. Yakıt pili akımı ise duraklamalar haricinde düşük güç bölgelerinde de sıfır olmuştur. Bu tasarlanan sistemin en büyük amaçlarından biri olup gerçekleştirilebilmiştir. Böylece hem yakıt pilinin çalışma süresi azaltılarak ömrü uzatılmış hem de kısmi yüklerde bile genel olarak nominal değerinde çalıştırılmış ve daha verimli çalışması başarılmıştır.

Batarya bu tasarımda sadece yakıt pilini desteklemekle veya gerekli durumlarda tek başına aracı hareket ettirmekle kalmayıp rejenerasyonla hızın azaltılması gereken frenleme gibi durumlarda enerji geri kazanımına da olanak sağlamıştır. Bu aracın genel anlamda verimliliğini arttıran bir özellik olup yakıt tüketimine büyük ölçekte katkı sağlamaktadır. Bu durum geleneksel içten yanmalı ve hibrit araçlarda da karşımıza çıkmaktadır. Burada mikro ya da yarı hibrit araçlardakinin aksine daha büyük kapasiteli bir bataryanın kullanılması daha büyük frenleme güçlerinin geri kazanılabilmesini sağlamıştır. Bu konu, simülasyonlarda farklı çevrimlerdeki rejenerasyon değerlerinde ayrıntılı olarak işlenmiştir.

Tasarlanan araç ile YPEA karşılaştırıldığında her iki aracın motor güçleri çok yakın olup tasarım aracının yakıt pili karşılaştırılan aracın %47'sine tekabül etmektedir. Bu ciddi bir boyut azaltma oranıdır. Bu nedenle hem maliyet azalacak hem de yakıt pilini koşullandırmak amacıyla kullanılan yardımcı ekipmanların boyutlarının azalmasına olanak sağlayacaktır. Burada yakıt tankı kapasitesi ve miktarı aynı kalmakla beraber daha büyük bir batarya kullanımı gerekmiştir. Bu tasarım avantajlarının yanında tasarlanan aracın ortalama yakıt tüketimi %18,8 daha düşük olup, menzili %32 daha yüksektir ve gerek hızlanma gerekse azami hız olarak performansı da daha iyidir. Sürüş çevrimleri haricinde tam gaz ve azami hız uygulamalarında da tasarlanan araç istenen performansı gösterebilmiştir. Bu performansların, sadece yakıt pilli veya bataryalı araçlardaki tekil kullanımlardakine nazaran daha küçük kapasitelerde yakıt pili ve bataryanın uygun güçlerde hibritlenmesiyle elde edilebileceği gösterilmiştir. Böylece tezde belirtilen amaçlara ulaşılmış ve araştırma sorularına cevaplar bulunmuştur.

Tasarlanan araç, mevcut batarya elektrikli araçlarla karşılaştırılmış ve tasarım aracı %8,2 daha az enerji tüketmekte iken menzil olarak 2,67 katı bir değer sunmuştur. Bataryaların yüksek güç yoğunlukları ne hızlı tepki süreleri gibi avantajlı karakteristikleri nedeniyle BEA'ların ortalama hızlanma performansı tasarım aracından daha iyi olmuştur. Azami hız da bu yüksek güç değerine daha uzun süreli ihtiyaç duyulması nedeniyle ve bataryaların sadece kısıtlı bir süre için nominal deşarj akımlarının üzerine çıkabilmeleri nedeniyle bir çok BEA'da azami hız sınırlaması mevcuttur. Aksi durumda batarya kapasiteleri çok erken düşebilir. Bu hem menzilin hem de batarya ömrünün aşırı derecede düşmesine neden olacaktır. YPEA geleneksel araçlarda olduğu gibi yakıt beslemesi yapıldığı müddetçe güç elde edilebilmesi nedeniyle azami hızı da geleneksel araçları aratmayacak bir değer de olabilir. Bu nedenle bu konuda BEA'lara kıyasla daha iyi bir performans göstermiştir.

Bu tez çalışmasında tasarlanan araç geleneksel içten yanmalı araçlarla karşılaştırıldığında gerek performans, gerek menzil konusunda rekabet edebilecek düzeyde olduğu söylenebilir. Geleneksel İYM araçlara göre en büyük avantajı ise yakıt tüketimi konusunda olmuştur. Tasarım aracına ait ortalama benzin eşdeğeri yakıt tüketimi WLTP için 2,39 L/100 km olarak bulunmuştur. Bu değer dünya geneli geleneksel araçlar için ortalama 7,2 L/100 km ve Türkiye için 5,5 L/100 km'dir. Bu değerlerle karşılaştırıldığında tasarım aracı dünya geneline göre 3 kat, ülkemiz ortalamasına göre ise 2,3 kat düşük yakıt ortalamasına sahiptir. Bu değerler genel verimlilik ile doğrudan örtüşmektedir.

Yakıt pilli, bataryalı elektrikli araçlar ve İYM araçlar, bu tez çalışmasının en önemli motivasyonlarından biri olan emisyon konusunda da irdelenmelidir. Bu açıdan bakıldığında tasarım aracı en düşük emisyon değerine sahiptir. Onu sırasıyla YPEA, BEA ve İYMA takip etmektedir. Tabii burada elektrik üretimine esas olarak Türkiye değerleri sunulmuştur. Bu değer yerine global ortalama alınırsa BEA emisyonu biraz daha artacaktır. Fakat AB gibi temiz enerjiye daha fazla önem verilen bir yer referans alınırsa bu değer 63 gCO₂e/km değerine kadar düşebilir.

Bu tez çalışmasında modellenen araç tasarımı amaç ve hedeflerine ulaşmış olup yakıt tüketimi, verimlilik, emisyon ve performans konusunda sağladığı değerlerle gelecekteki çalışmalara ışık tutmuştur. Ayrıca, "Yakıt pillerinin diğer elektrokimyasal enerji depolama cihazları ile hibridizasyonu ile verimlilik ve performans açısından önemli kazanımlar elde etmek ve bu kazanımlara ek olarak karbon ayak izi ve emisyon değerlerini azaltmak mümkündür." hipotezleri bu çalışma ile desteklenmiştir.

ÖNERİLER

Bu tez çalışmasıyla yakıt pili batarya hibrit bir elektrikli araç tasarlanmış olup araç iki farklı güç kaynağından beslenmektedir. Bu neden bu iki güç kaynağının güç yönetim sistemlerinin kontrolü ve optimizasyonu çok önemlidir. Tez çalışmasındaki tasarımda bazı durumlarda yaşanan yük paylaşım problemlerinin yaşanmaması için daha gelişmiş güç yönetim kontrol sistemleri tasarlanabilir. Daha gelişmiş güç yöntem sistemleriyle saf bataryalı sürüş gibi farklı sürüş modları belirlenip bu modlar arasında geçiş yapma olanağı tanınabilir.

Tez çalışmasında tek bir elektrik motoru ile önden çekişli bir yapı incelenmiştir. Elektrik motoru sayısı arttırılarak daha farklı çekiş ve hibridizasyon senaryoları oluşturulabilir. Yine iki farklı motorla tek bir aks, elektronik sürekli değişken bir şanzıman üzerinden sürülebilir.

Tez çalışmasında tahrik sistemi özelinde genel bir konsept üzerinde durulmuş ve özellikle teknik parametreler üzerinden ilerlenmiştir. Ticari bir yönü de olan araçlarla ilgili bir çalışmada ekonomik analizlere de yer verilebilirdi.

Bu çalışmada batarya ile hibritlenen yakıt pilinin farklı çalışmalarda farklı yardımcı güç sistemleriyle desteklenmesi incelenip sonuçlar bu konfigürasyonla karşılaştırılabilir. Yine kullanılan batarya çeşidi ve kapasitesi değiştirilerek farklı konfigürasyonlar elde edilebilir ve bunların performans ve ekonomik analizleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Wikipedia, Motor vehicle, (2021). https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_vehicle (accessed April 3, 2022).
- [2] OICA, Vehicles in use, (2016). <https://www.oica.net/category/vehicles-in-use/> (accessed April 3, 2022).
- [3] European Environment Agency., Transport, increasing oil consumption and greenhouse gas emissions hamper EU progress towards environment and climate objectives., (2019).
- [4] J. Larminie, A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained Second Edition, (2003). www.wiley.co.uk/fuelcellsystems. (accessed April 2, 2022).
- [5] E. Pipitone, S. Caltabellotta, L. Occhipinti, A life cycle environmental impact comparison between traditional, hybrid, and electric vehicles in the european context, Sustain. 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/su131910992>.
- [6] V. Krithika, C. Subramani, A comprehensive review on choice of hybrid vehicles and power converters, control strategies for hybrid electric vehicles, Int. J. Energy Res. 42 (2018) 1789–1812. <https://doi.org/10.1002/ER.3952>.
- [7] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, K.M. Ebrahimi, Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles, (2018) 546.
- [8] S. Wang, S.P. Jiang, Prospects of fuel cell technologies, Natl. Sci. Rev. 4 (2017) 163–166. <https://doi.org/10.1093/NSR/NWW099>.
- [9] S. Njoya Motapon, L.A. Dessaint, K. Al-Haddad, A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft, IEEE Trans. Ind. Electron. 61 (2014) 1320–1334. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2257152>.
- [10] S. Thomas, M. Zalbowitz, Fuel Cells Green Power, Fuel Cells Green Power. (1999) 1–36.
- [11] UNEP, Emissions Gap Report 2021, 2021.
- [12] IEA, Data & Statistics, (2019). [https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=CO2 emissions&indicator=CO2BySector](https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySector) (accessed April 2, 2022).
- [13] TÜİK, Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2020, (2020). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2020-45862> (accessed April 2, 2022).
- [14] P. Mock, Reducing Vehicle Emissions in Turkey Policy Measures to Address Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions from the Road Transport Sector, (2016). www.theicct.org.
- [15] M. Şenzybek, P. Mock, Passenger Car Emissions In Turkey A Baseline Analysis Of Current Vehicle Taxation Policies In Turkey And Their Impact On New And Used Passenger Cars, (2019). www.theicct.org (accessed April 2, 2022).
- [16] Gelir İdaresi Başkanlığı, Motorlu Taşıtlar Vergisi Genel Tebliği, (2021). <https://www.gib.gov.tr/motorlu-tasitlar-vergisi-genel-tebligleri> (accessed April 3, 2022).
- [17] IEA, Transport – Innovation Gaps – Analysis, (2019). <https://www.iea.org/reports/innovation-gaps/transport> (accessed April 3, 2022).
- [18] S.H. Mohr, J. Wang, G. Ellem, J. Ward, D. Giurco, Projection of world fossil fuels by country, Fuel. 141 (2015) 120–135. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2014.10.030>.
- [19] H. Sarıtaş, A. Genç, T. Avcı, Türkiye’de Enerji İthalatı, Cari Açık ve Büyüme İlişkisi: VAR ve Granger Nedensellik Analizi, (2018).
- [20] TEİAŞ, Yerli Enerji Kaynaklarına Ait Kurulu Gücün Türkiye Toplam Kurulu Gücü İçindeki Payının Yıllar İtibariyle Gelişimi (2000-2020), (2021).
- [21] International Energy Agency, Global EV Outlook 2021 - Accelerating ambitions despite the pandemic, Glob. EV Outlook 2021. (2021) 101. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed5f4484->

f556-4110-8c5c-4ede8bcba637/GlobalEVO Outlook2021.pdf.

- [22] IEA, Global EV Data Explorer – Analysis, (2021). <https://www.iea.org/articles/global-ev-data-explorer> (accessed April 4, 2022).
- [23] TÜİK, Trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı, (2022). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2021-37411>.
- [24] TÜİK, Motorlu Kara Taşıtları, Aralık 2021, (2021). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Aralik-2021-45703> (accessed April 4, 2022).
- [25] Wikipedia, Energy density, (n.d.). https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density (accessed April 4, 2022).
- [26] B.T. Lokesh, J.T. Hui Min, A Framework for Electric Vehicle (EV) Charging in Singapore, Energy Procedia. 143 (2017) 15–20. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.12.641>.
- [27] S. Wang, Y. Xu, Battery Electric Vehicle with a Fuel Cell Stack A System Study of Propulsion Concepts and Scenarios, (2019).
- [28] C. Marks, E.A. Rishavy, F.A. Wyczalek, Electrovan-A Fuel Cell Powered Vehicle, SAE Tech. Pap. (1967). <https://doi.org/10.4271/670176>.
- [29] N. Qin, A. Raissi, P. Brooker, Analysis of Fuel Cell Vehicle Developments, (2014).
- [30] R. Von Helmolt, U. Eberle, Fuel cell vehicles: Status 2007, J. Power Sources. 165 (2007) 833–843. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2006.12.073>.
- [31] U. Eberle, B. Müller, R. Von Helmolt, Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: status 2012, Energy Environ. Sci. 5 (2012) 8780–8798. <https://doi.org/10.1039/C2EE22596D>.
- [32] IEA Hydrogen, Global Trends And Outlook For Hydrogen 2, (2017).
- [33] Statista, • Hydrogen fuel cell vehicles worldwide 2020, (2022). <https://www.statista.com/statistics/1291480/hydrogen-fueled-road-vehicles-worldwide/> (accessed April 5, 2022).
- [34] California Fuel Cell Partnership, By The Numbers, (2022). https://cafcp.org/by_the_numbers (accessed April 5, 2022).
- [35] Statista, • Japan: number of fuel cell vehicles in use 2021, (2021). <https://www.statista.com/statistics/1252727/japan-fuel-cell-electric-vehicles-in-use/> (accessed April 5, 2022).
- [36] Statista, • Fuel cell electric vehicle deployment in Europe 2030, (2021). <https://www.statista.com/statistics/1272461/fuel-cell-electric-vehicle-deployment-in-europe/> (accessed April 5, 2022).
- [37] Report, Global Market for Hydrogen Fueling Stations, 2021, (2021). <https://www.researchandmarkets.com/reports/5350926/global-market-for-hydrogen-fueling-stations-2021> (accessed April 5, 2022).
- [38] L. Keqiang, Report on the Work of the Government, (2019). http://english.www.gov.cn/premier/speeches/2019/03/16/content_281476565265580.htm (accessed April 5, 2022).
- [39] M. Muthukumar, N. Rengarajan, B. Velliyangiri, M.A. Omprakas, C.B. Rohit, U.K. Raja, The development of fuel cell electric vehicles - A review, Mater. Today Proc. 45 (2021) 1181–1187. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.679>.
- [40] B. Tanç, H.T. Arat, E. Baltacıoğlu, K. Aydın, Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles, Int. J. Hydrogen Energy. 44 (2019) 10120–10128. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.112>.
- [41] H. Fathabadi, Combining a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack with a Li-ion battery to supply the power needs of a hybrid electric vehicle, Renew. Energy. 130 (2019) 714–724. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.104>.
- [42] B. Tanç, H.T. Arat, Ç. Conker, E. Baltacıoğlu, K. Aydın, Energy distribution analyses of an

- additional traction battery on hydrogen fuel cell hybrid electric vehicle, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 26344–26356. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.241>.
- [43] S.D. Gaikwad, P.C. Ghosh, Sizing of a fuel cell electric vehicle: A pinch analysis-based approach, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 8985–8993. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.116>.
- [44] H. Fathabadi, Fuel cell hybrid electric vehicle (FCHEV): Novel fuel cell/SC hybrid power generation system, *Energy Convers. Manag.* 156 (2018) 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.001>.
- [45] S. Sagaria, R. Costa Neto, P. Baptista, Assessing the performance of vehicles powered by battery, fuel cell and ultra-capacitor: Application to light-duty vehicles and buses, *Energy Convers. Manag.* 229 (2021) 113767. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113767>.
- [46] Z. Dimitrovar, W.B. Nader, PEM fuel cell as an auxiliary power unit for range extended hybrid electric vehicles, *Energy*. 239 (2022) 121933. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121933>.
- [47] A. Jacome, C. Dépature, L. Boulon, J. Solano, A benchmark of different starting modes of a passive Fuel Cell/Ultracapacitor hybrid source for an electric vehicle application, *J. Energy Storage*. 35 (2021) 102280. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102280>.
- [48] P. Di Trollo, P. Di Giorgio, M. Genovese, E. Frasci, M. Minutillo, A hybrid power-unit based on a passive fuel cell/battery system for lightweight vehicles, *Appl. Energy*. 279 (2020) 115734. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115734>.
- [49] S. Angalaeswari, D. Subbulekshmi, T. Deepa, K. S., A. Jha, Bidirectional DC-DC converter for regenerative fuel cell electric vehicle, *Mater. Today Proc.* (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.243>.
- [50] A. Affam, Y.M. Buswig, A.K.B.H. Othman, N. Bin Julai, O. Qays, A review of multiple input DC-DC converter topologies linked with hybrid electric vehicles and renewable energy systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 135 (2021) 110186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110186>.
- [51] M.N. Sid, M. Becherif, A. Aboubou, A. Benmouna, Power control techniques for fuel cell hybrid electric vehicles: A comparative study, *Comput. Electr. Eng.* 97 (2022) 107602. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107602>.
- [52] G. Şefkat, M.A. Özel, Experimental and numerical study of energy and thermal management system for a hydrogen fuel cell-battery hybrid electric vehicle, *Energy*. 238 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121794>.
- [53] X. Lin, Y. Xia, W. Huang, H. Li, Trip distance adaptive power prediction control strategy optimization for a Plug-in Fuel Cell Electric Vehicle, *Energy*. 224 (2021) 120232. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120232>.
- [54] S. Çeven, A. Albayrak, R. Bayır, Real-time range estimation in electric vehicles using fuzzy logic classifier, *Comput. Electr. Eng.* 83 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106577>.
- [55] S. Modi, J. Bhattacharya, P. Basak, Estimation of energy consumption of electric vehicles using Deep Convolutional Neural Network to reduce driver's range anxiety, *ISA Trans.* 98 (2020) 454–470. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.055>.
- [56] X. Tang, H. Zhou, F. Wang, W. Wang, X. Lin, Longevity-conscious energy management strategy of fuel cell hybrid electric Vehicle Based on deep reinforcement learning, *Energy*. 238 (2022) 121593. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121593>.
- [57] M. Kandidayeni, J.P. Trovão, M. Soleymani, L. Boulon, Towards health-aware energy management strategies in fuel cell hybrid electric vehicles: A review, *Int. J. Hydrogen Energy*. 47 (2022) 10021–10043. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.064>.
- [58] A. Smaragdakis, S. Kamenopoulos, T. Tsoutsos, How risky is the introduction of fuel cell electric vehicles in a Mediterranean town?, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 18075–18088. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.224>.
- [59] G.G. Nassif, S.C.A. d. Almeida, Impact of powertrain hybridization on the performance and costs of a fuel cell electric vehicle, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 21722–21737. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.138>.

- [60] S.C.A. de Almeida, R. Kruczan, Effects of drivetrain hybridization on fuel economy, performance and costs of a fuel cell hybrid electric vehicle, *Int. J. Hydrogen Energy*. 46 (2021) 39404–39414. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.144>.
- [61] J. Li, M. Liang, W. Cheng, S. Wang, Life cycle cost of conventional, battery electric, and fuel cell electric vehicles considering traffic and environmental policies in China, *Int. J. Hydrogen Energy*. 46 (2021) 9553–9566. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.100>.
- [62] X. Liu, K. Reddi, A. Elgowainy, H. Lohse-Busch, M. Wang, N. Rustagi, Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 972–983. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.192>.
- [63] W. Li, R. Long, H. Chen, F. Chen, X. Zheng, Z. He, L. Zhang, Willingness to pay for hydrogen fuel cell electric vehicles in China: A choice experiment analysis, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 34346–34353. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.046>.
- [64] H. Hwang, Y. Lee, I. Seo, Y. Chung, Successful pathway for locally driven fuel cell electric vehicle adoption: Early evidence from South Korea, *Int. J. Hydrogen Energy*. 46 (2021) 21764–21776. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.057>.
- [65] G. Trencher, Strategies to accelerate the production and diffusion of fuel cell electric vehicles: Experiences from California, *Energy Reports*. 6 (2020) 2503–2519. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.008>.
- [66] B. Wu, Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Powertrain Modelling and Testing, (2014) 243.
- [67] S. Salisbury, Understanding Fuel Cell Plug-In Hybrid Electric Vehicle Use, Design and Functionality, 34 (2014) 71209.
- [68] T. Fletcher, Optimal energy management strategy for a fuel cell hybrid electric vehicle, (2017). <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/25567>.
- [69] M.A. Biberici, Yakıt Hücreli Hibrit Bir Taşıtın Modellenmesi Ve Verimliliğinin İncelenmesi, (2020). <http://acikerisim.karabuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/902> (accessed April 12, 2022).
- [70] P. Brooker, Fuel Cells as Electric Vehicle Range Extenders, Florida Sol. Energy Cent. (2015). <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/fsec-cr-1995-14.pdf>.
- [71] G.J. Offer, D. Howey, M. Contestabile, R. Clague, N.P. Brandon, Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system, *Energy Policy*. 38 (2010) 24–29. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2009.08.040>.
- [72] K. Kendall, B.G. Pollet, Hydrogen and fuel cells in transport, Elsevier Ltd., 2012. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00419-4>.
- [73] Chemistry LibreTexts, 20.7: Batteries and Fuel Cells, (2019). [https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_Missouri/MU%3A__1330H_\(Keller\)/20%3A_Electrochemistry/20.7%3A_Batteries_and_Fuel_Cells](https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_Missouri/MU%3A__1330H_(Keller)/20%3A_Electrochemistry/20.7%3A_Batteries_and_Fuel_Cells) (accessed April 13, 2022).
- [74] P.A. Shapley, Fuel Cells, (2011). <http://butane.chem.uiuc.edu/pshapley/Environmental/L11/2.html> (accessed April 13, 2022).
- [75] Hydrogen Energy Association, Fuel Cell Basics — Fuel Cell &, (n.d.). <https://www.fchea.org/fuelcells> (accessed April 13, 2022).
- [76] V. Neburchilov, J. Martin, H. Wang, J. Zhang, A review of polymer electrolyte membranes for direct methanol fuel cells, *J. Power Sources*. 169 (2007) 221–238. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2007.03.044>.
- [77] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Fuel Cell Basics | Department of Energy, (2011). <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-basics> (accessed April 13, 2022).
- [78] Department of Energy, Fuel Cells Fact Sheet, (2015). <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/fuel-cells-fact-sheet> (accessed April 13, 2022).
- [79] J. Larminie, A. Dicks, Fuel cell systems explained: Second edition, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118878330>.

- [80] MEA Membrane Electrode Assembly, (n.d.). <https://www.alphaomega-electronics.com/en/electrochemistry/3829-mea-membrane-electrode-assembly.html> (accessed April 13, 2022).
- [81] P.J. Berlowitz, C.P. Darnell, Fuel Choices For Fuel Cell Powered Vehicles, SAE Tech. Pap. (2000). <https://doi.org/10.4271/2000-01-0003>.
- [82] A. Lanz, J. Heffel, C. Messer, Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, Fuel Cell Technol. (2001) 53. http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm04r0.pdf.
- [83] M. Ehsani, Y. Gao, S.E. Gay, A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, Mod. Electr. Hybrid Electr. Fuel Cell Veh. (2004). <https://doi.org/10.1201/9781420037739>.
- [84] M. Gay, S.E.; Routex, J.Y.; Ehsani, M.; Holtzapple, Investigation of Hydrogen Carriers for Fuel-Cell Based Transportation., SAE Tech. Pap. Ser. (2002).
- [85] E. Abohamzeh, F. Salehi, M. Sheikholeslami, R. Abbassi, F. Khan, Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes, J. Loss Prev. Process Ind. 72 (2021) 104569. <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2021.104569>.
- [86] D.A.J. (David A.J. Rand, R. Woods, R. Dell, Batteries for electric vehicles, Research Studies Press ;John Wiley & Sons, Somerset England ;New York, 1998.
- [87] I. Buchmann, Batteries in a portable world : a handbook on rechargeable batteries for non-engineers, (2011) 328.
- [88] Battery University, BU-205: Types of Lithium-ion -, (n.d.). <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion> (accessed April 24, 2022).
- [89] S. Vonsien, R. Madlener, Cost-Effectiveness of Li-Ion Battery Storage with a Special Focus on Photovoltaic Systems in Private Households, SSRN Electron. J. (2019). <https://doi.org/10.2139/ssrn.3335106>.
- [90] Teknoloji | DMA.com.tr, (n.d.). <http://www.dmaoto.com/tr/teknoloji> (accessed April 25, 2022).
- [91] P. Hofmann, Hybridfahrzeuge, Hybridfahrzeuge. (2014). <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1780-4>.
- [92] Y. Gao, H. Maghbelli, M. Ehsani, G. Frazier, J. Kajs, S. Bayne, Investigation of proper motor drive characteristics for military vehicle propulsion, SAE Tech. Pap. (2003). <https://doi.org/10.4271/2003-01-2296>.
- [93] H. Helms, U. Lambrecht, J. Jöhrens, M. Pehnt, A. Liebich, U. Weiß, C. Kämper, Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität, 2013 (2013) 1–113.
- [94] K. Rajashekara, H. Vehicles, E.V. Charging, N. Steps, Electric and Hybrid Vehicles : Current trends and future strategies, (2021) 1–25.
- [95] W. Enang, C. Bannister, Modelling and control of hybrid electric vehicles (A comprehensive review), Renew. Sustain. Energy Rev. 74 (2017) 1210–1239. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.01.075>.
- [96] M.A. Danzer, V. Liebau, F. Maglia, Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles, Elsevier, 2015. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423775000145> (accessed April 30, 2022).
- [97] D.S. Cardoso, P.O. Fael, A. Espírito-Santo, A review of micro and mild hybrid systems, Energy Reports. 6 (2020) 385–390. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2019.08.077>.
- [98] M. Awadallah, P. Tawadros, P. Walker, N. Zhang, Dynamic modelling and simulation of a manual transmission based mild hybrid vehicle, Mech. Mach. Theory. 112 (2017) 218–239. <https://doi.org/10.1016/J.Mechmachtheory.2017.02.011>.
- [99] Toyota, Toyota and the success of hybrid vehicles, (2022). <https://www.toyota-europe.com/world-of-toyota/feel/environment/better-air/hybrid-vehicle> (accessed May 1, 2022).
- [100] K.T. Chau, C.C. Chan, C. Liu, Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles, IEEE Trans. Ind. Electron. 55 (2008) 2246–2257. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918403>.

- [101] I. Husain, B. Ozpineci, M.S. Islam, E. Gurpinar, G.J. Su, W. Yu, S. Chowdhury, L. Xue, D. Rahman, R. Sahu, Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles, *Proc. IEEE*. 109 (2021) 1039–1059. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3046112>.
- [102] J.K. Noland, M. Leandro, J.A. Suul, M. Molinas, High-Power Machines and Starter-Generator Topologies for More Electric Aircraft: A Technology Outlook, *IEEE Access*. 8 (2020) 130104–130123. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007791>.
- [103] N. Riviere, G. Volpe, M. Villani, G. Fabri, L. Di Leonardo, M. Popescu, Design analysis of a high speed copper rotor induction motor for a traction application, 2019 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2019. (2019) 1024–1031. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785124>.
- [104] Graces Guide, Lucas Chloride EV Systems, (n.d.). https://www.gracesguide.co.uk/Lucas_Chloride_EV_Systems (accessed May 1, 2022).
- [105] J.W. Jiang, B. Bilgin, A. Emadi, Three-Phase 24/16 Switched Reluctance Machine for a Hybrid Electric Powertrain, *IEEE Trans. Transp. Electr.* 3 (2017) 76–85. <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2664778>.
- [106] W. Ding, S. Yang, Y. Hu, S. Li, T. Wang, Z. Yin, Design Consideration and Evaluation of a 12/8 High-Torque Modular-Stator Hybrid Excitation Switched Reluctance Machine for EV Applications, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 64 (2017) 9221–9232. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2711574>.
- [107] A.M. Omekanda, Switched reluctance machines for EV and HEV propulsion: State-of-the-art, *Proc. - 2013 IEEE Work. Electr. Mach. Des. Control Diagnosis, WEMDCD 2013*. (2013) 70–74. <https://doi.org/10.1109/WEMDCD.2013.6525166>.
- [108] Z. Yang, F. Shang, I.P. Brown, M. Krishnamurthy, Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications, *IEEE Trans. Transp. Electr.* 1 (2015) 245–254. <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2470092>.
- [109] P.B. Reddy, K.K. Huh, A.M. El-Refaei, Generalized approach of stator shifting in interior permanent-magnet machines equipped with fractional-slot concentrated windings, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 61 (2014) 5035–5046. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2297515>.
- [110] N. Bianchi, S. Bolognani, E. Carraro, M. Castiello, E. Fornasiero, Electric Vehicle Traction Based on Synchronous Reluctance Motors, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 52 (2016) 4762–4769. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2599850>.
- [111] S. Taghavi, P. Pillay, A Sizing Methodology of the Synchronous Reluctance Motor for Traction Applications, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2 (2014) 329–340. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2299235>.
- [112] C.M. Spargo, B.C. Mecrow, J.D. Widmer, Application of fractional slot concentrated windings to synchronous reluctance machines, *Proc. 2013 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2013*. (2013) 618–625. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2013.6556159>.
- [113] D, Dict. Energy. (2015) 146–176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096811-7.50004-4>.
- [114] K. Brundell-Freij, E. Ericsson, Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 10 (2005) 213–229. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2005.01.001>.
- [115] E. Ericsson, Variability in urban driving patterns, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 5 (2000) 337–354. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(00\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(00)00003-1).
- [116] X. Hu, N. Murgovski, L.M. Johannesson, B. Egardt, Comparison of Three Electrochemical Energy Buffers Applied to a Hybrid Bus Powertrain With Simultaneous Optimal Sizing and Energy Management, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 15 (2014) 1–13. <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2294675>.
- [117] A. Ashtari, E. Bibeau, S. Shahidinejad, Using large driving record samples and a stochastic approach for real-world driving cycle construction: Winnipeg driving cycle, *Transp. Sci.* 48 (2014) 170–183. <https://doi.org/10.1287/TRSC.1120.0447>.
- [118] H.Y. Tong, H.D. Tung, W.T. Hung, H. V. Nguyen, Development of driving cycles for motorcycles and light-duty vehicles in Vietnam, *Atmos. Environ.* 45 (2011) 5191–5199.

<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2011.06.023>.

- [119] V. Schwarzer, R. Ghorbani, Drive cycle generation for design optimization of electric vehicles, *IEEE Trans. Veh. Technol.* 62 (2013) 89–97. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2219889>.
- [120] P. Tulpule, V. Marano, G. Rizzoni, Energy management for Plug-in Hybrid Electric Vehicles using Equivalent Consumption Minimisation Strategy, *Int. J. Electr. Hybrid Veh.* 2 (2010) 329–350. <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2010.034985>.
- [121] P. Nyberg, Evaluation, Generation, and Transformation of Driving Cycles, *Linköping Stud. Sci. Technol. Diss.* (2015). www.vehicular.isy.liu.se (accessed January 12, 2022).
- [122] L. Berzi, *Dottorato Di Ricerca In Ingegneria Industriale, Design methods for modern electric and hybrid electric vehicles: concept design and context analysis*, (2013).
- [123] Economic Commission for Europe Inland Transport Committee, Agreement concerning the establishing of global technical regulations for wheeled vehicles (Titel gekürzt), (1998) 1–19.
- [124] UNTC, (n.d.). https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XI-B-32&chapter=11&clang=_en (accessed January 23, 2022).
- [125] United Nation, GTR 15 - Global Registry Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure, *Glob. Regist.* (2014) 17, 49–58. <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29r-1998agr-rules/ECE-TRANS-180a15e.pdf>.
- [126] EC, Commission Regulation (EU) 2018/1832 of 5 November 2018 amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) 2017/1151 for the purpose of improving the emission, *Off. J. Eur. Union.* 1832 (2018) 301. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1832&from=FR>.
- [127] European Commission, Commission Regulation (EU) 2017/1151 of 1 June 2017 supplementing Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 a, *Off. J. Eur. Union.* (2017) 1–643.
- [128] T. Barlow, S. Latham, I. McCrae, P. Boulter, A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions, *TRL Publ. Proj. Rep.* (2009) 280. http://www.trl.co.uk/online_store/reports_publications/trl_reports/cat_traffic_and_the_environment/report_a_reference_book_of_driving_cycles_for_use_in_the_measurement_of_road_vehicle_emissions.htm%5Cnhttps://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/a.
- [129] M. André, M. Rapone, Analysis and modelling of the pollutant emissions from European cars regarding the driving characteristics and test cycles, *Atmos. Environ.* 43 (2009) 986–995. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.013>.
- [130] M. André, R. Joumard, R. Vidon, P. Tassel, P. Perret, Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars, *Atmos. Environ.* 40 (2006) 5944–5953. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.057>.
- [131] H. Steven, Green Global NCAP labelling _ green scoring Workshop, (2013).
- [132] E. Commission, Regulation 2009/443 - Emission performance standards for new passenger cars as part of the EC's integrated approach to reduce CO 2 emissions from light-duty vehicles, (2009). <https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vitgbgiqypyz> (accessed March 16, 2022).
- [133] F. Millo, I. Elizabeth, J. Tettamanzi, P. Piero, Impact of WLTP homologation cycle on passenger cars cost and CO 2 compliance *Relatore*, (2016).
- [134] UNECE, DHC-12th session, (2012). <https://unece.org/dhc-12th-session> (accessed March 20, 2022).
- [135] C. Gül, A. Hasan Doğan, T. Öcalan, Akıllı mobil telefonlardan elde edilen çift frekanslı ham GNSS gözlemleri ile PPP konum belirleme performansının araştırılması Investigation of PPP performance with dual frequency raw GNSS observations obtained from smartphones, (2021). <https://doi.org/10.9733/JGG.2021R0009.T>.
- [136] T.J. Lyons, J.R. Kenworthy, P.I. Austin, P.W.G. Newman, The development of a driving cycle for fuel consumption and emissions evaluation, *Transp. Res. Part A Gen.* 20 (1986) 447–462.

- [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(86\)90081-6](https://doi.org/10.1016/0191-2607(86)90081-6).
- [137] T.D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Fundam. Veh. Dyn. (1992). <https://doi.org/10.4271/R-114>.
 - [138] J.Y. Wong, Theory of Ground Vehicles, 4th Edition, (2008) 592. <https://www.wiley.com/en-us/Theory+of+Ground+Vehicles%2C+4th+Edition-p-9780470170380> (accessed May 5, 2022).
 - [139] W.-H. Hucho, Aerodynamics of road vehicles : from fluid mechanics to vehicle engineering, (1998) 918. https://books.google.com/books/about/Aerodynamics_of_Road_Vehicles.html?hl=tr&id=k7U5ngEACAAJ (accessed May 5, 2022).
 - [140] Robert Bosch GmbH., Automotive handbook., (2011) 1265.
 - [141] J.M. Miller, Propulsion Systems for Hybrid Vehicles, (2010). <https://doi.org/10.1049/PBRN007E>.
 - [142] T.R. Menzies, Tires and passenger vehicle fuel economy informing consumers, improving performance, 2006.
 - [143] M.S. Sheng, A.V. Sreenivasan, B. Sharp, B. Du, Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions and energy consumption for electric vehicles: A comparative study in Oceania, Energy Policy. 158 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112552>.
 - [144] H. Şahin, Yakıt pili-batarya hibrit güç sisteminin performansının deneysel olarak incelenmesi, 2016. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=tr&user=1OPurwsAAAAJ&citation_for_view=1OPurwsAAAAJ:u5HHmVD_uO8C.
 - [145] P. Spanoudakis, G. Moschopoulos, T. Stefanoulis, N. Sarantinoudis, E. Papadokokolakis, I. Ioannou, S. Piperidis, L. Doitsidis, N.C. Tsourveloudis, Efficient gear ratio selection of a single-speed drivetrain for improved electric vehicle energy consumption, Sustain. 12 (2020) 1–19. <https://doi.org/10.3390/su12219254>.
 - [146] S. Kahourzade, A. Mahmoudi, W.L. Soong, N. Ertugrul, G. Pellegrino, Estimation of PM Machine Efficiency Maps from Limited Data, IEEE Trans. Ind. Appl. 56 (2020) 2612–2621. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2979975>.
 - [147] Skywell ET5 | İlk Sürüş, (n.d.). <https://insideevs.com.tr/reviews/555585/skywell-et5-ilk-surur/> (accessed May 14, 2022).
 - [148] 2019 DFSK Seres 3 53.61 kWh (163 bg) | Teknik özellikler, yakıt tüketimi , Boyutlar, (n.d.). <https://www.auto-data.net/tr/dfsk-seres-3-53.61-kwh-163hp-45159> (accessed May 14, 2022).
 - [149] 2020 Toyota Mirai II 1.2 kWh (182 Hp) FCEV | Technical specs, data, fuel consumption, Dimensions, (n.d.). <https://www.auto-data.net/en/toyota-mirai-ii-1.2-kwh-182hp-fcev-41840> (accessed May 14, 2022).
 - [150] How Far You Can Drive With the Gas Tank Warning Light on, (n.d.). <https://www.businessinsider.com/low-gasoline-fuel-reserve-range-2017-4> (accessed May 19, 2022).
 - [151] A. Sternberg, C. Hank, Battery electric and fuel cell electric vehicles with ranges over 300 kilometers study commissioned by H2 Mobility, (2019).
 - [152] H. Sahin, H. Esen, The usage of renewable energy sources and its effects on GHG emission intensity of electricity generation in Turkey, Renew. Energy. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.141>.
 - [153] Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools, (n.d.). <https://h2tools.org/hyarc/calculator-tools/lower-and-higher-heating-values-fuels> (accessed May 22, 2022).
 - [154] CO2 emission standards for cars and vans: how to make the switch to a WLTP-based compliance system a success - Öko-Institut e.V.: Blog, (n.d.). <https://blog.oeko.de/co2-emission-standards-for-cars-and-vans-how-to-make-the-switch-to-a-wltp-based-compliance-system-a-success/> (accessed May 19, 2022).
 - [155] 2022 Toyota Mirai Fuel Cell Vehicle | Innovation is Power, (n.d.). <https://www.toyota.com/mirai/> (accessed May 19, 2022).

- [156] Toyota, Toyota Mirai technical specifications vs FCHV-adv - Toyota, (2020) 0–1. <http://blog.toyota.co.uk/toyota-mirai-technical-specifications-vs-fchv-adv>.
- [157] GFEI, Fuel Economy in Major Car Markets, Glob. Fuel Econ. Initiat. - Int. ENEC Agency. (2017) 87–88. http://webstore.iea.org/download/direct/2458?fileName=Fuel_Economy_in_Major_Car_Markets.pdf; Lge = liters of gasoline equivalent%22.
- [158] Energy consumption of full electric vehicles cheatsheet - EV Database, (n.d.). <https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car> (accessed May 19, 2022).
- [159] J. Sears, D. Roberts, K. Glitman, A comparison of electric vehicle Level 1 and Level 2 charging efficiency, 2014 IEEE Conf. Technol. Sustain. SusTech 2014. (2014) 255–258. <https://doi.org/10.1109/SUSTECH.2014.7046253>.
- [160] L. Zhu, J. Holden, J. Gonder, Navigation API Route Fuel Saving Opportunity Assessment on Large-Scale Real-World Travel Data for Conventional Vehicles and Hybrid Electric Vehicles: Preprint, (2017). www.nrel.gov/publications.
- [161] Useable battery capacity of full electric vehicles cheatsheet - EV Database, (n.d.). <https://ev-database.org/cheatsheet/useable-battery-capacity-electric-car> (accessed May 19, 2022).
- [162] CO2 performance of new passenger cars in Europe, (n.d.). <https://www.eea.europa.eu/ims/co2-performance-of-new-passenger> (accessed May 23, 2022).
- [163] Emissions – Global Energy & CO2 Status Report 2019 – Analysis - IEA, (n.d.). <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019/emissions> (accessed May 23, 2022).
- [164] Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe, (n.d.). <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1> (accessed May 23, 2022).
- [165] Frequently Asked Questions (FAQs) - U.S. Energy Information Administration (EIA), (n.d.). <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11> (accessed May 23, 2022).
- [166] Wells to wheels: electric car efficiency | Energy Matters, (n.d.). <https://matter2energy.wordpress.com/2013/02/22/wells-to-wheels-electric-car-efficiency/> (accessed May 23, 2022).
- [167] A. Albatayneh, M.N. Assaf, D. Alterman, M. Jaradat, Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles, Environ. Clim. Technol. 24 (2020) 669–680. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0041>.
- [168] Energy consumption of full electric vehicles cheatsheet - EV Database, (n.d.). <https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car> (accessed May 23, 2022).
- [169] Useable battery capacity of full electric vehicles cheatsheet - EV Database, (n.d.). <https://ev-database.org/cheatsheet/useable-battery-capacity-electric-car> (accessed May 23, 2022).
- [170] Range of full electric vehicles cheatsheet - EV Database, (n.d.). <https://ev-database.org/cheatsheet/range-electric-car> (accessed May 23, 2022).
- [171] Top speed of full electric vehicles cheatsheet - EV Database, (n.d.). <https://ev-database.org/cheatsheet/top-speed-electric-car> (accessed May 23, 2022).
- [172] Acceleration of full electric vehicles cheatsheet - EV Database, (n.d.). <https://ev-database.org/cheatsheet/acceleration-electric-car> (accessed May 23, 2022).
- [173] B.G. Pollet, I. Staffell, J.L. Shang, Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects, Electrochim. Acta. 84 (2012) 235–249. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.172>.

ÖZGEÇMİŞ

Habip ŞAHİN

[illegible]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]

■ _____

■ _____

	[REDACTED]
	[REDACTED]

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. H. Sahin, H. Esen (2022). The usage of renewable energy sources and its effects on GHG emission intensity of electricity generation in Turkey, *Renew. Energy*. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.03.141>.

Bildiriler:

1. H. Sahin, H. Esen (2021). Emission Comparison Of Battery, Fuel Cell And Fuel Cell-Battery Hybrid Electric Vehicles. 3. International Baku Scientific Research Congress, 917-926. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:7273376

2. H. Sahin, H. Esen (2018). Experimental Test of a PEM Fuel Cell-Battery Hybrid Power System in the Absence and Presence of Power Management System. International Conference On Innovative Engineering Applications, 6 (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4519464)
3. H. Sahin, H. Esen (2017). PEM Fuel Cell-Battery Hybrid Power System. 8th International Advanced Technology Symposium, 2, 431-435. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3951060)

