

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİD ELEKTRİKLİ YOL TAŞITLARININ  
MODELLENMESİ ve KONTROLÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**Y. Müh. Ali BOYALI**

**Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği**

**Programı: Makina Mühendisliği Doktora**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Levent GÜVENÇ**

**MAYIS 2008**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİD ELEKTRİKLİ YOL TAŞITLARININ  
MODELLENMESİ ve KONTROLÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**Y. Müh. Ali BOYALI**

**Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği**

**Programı: Makina Mühendisliği Doktora**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Levent GÜVENÇ**

**MAYIS 2008**

## ÖNSÖZ

Sürekli artan dünya nüfusu, gelişmekte olan ülkeler ve insan ihtiyacı için artan üretim gereksinimi, insanlığın faaliyetlerinin devamı için enerji talebini artırmaktadır. Günümüzde dünya üzerinde, enerji büyük oranda petrol türevi yakıtlardan elde edilmektedir. Petrol türevi yakıt rezervlerinin bir gün tükeneceği, bu yakıtların yanması ile açığa çıkan doğaya ve insan sağlığına zarar veren atık yanma ürünleri, küresel ısınma tehdidi ve petrol kaynaklarına hükmetmek amaçlı yapılan petrol savaşları, insanlığın, huzurlu, barışçıl ve daha doğal yaşam alanları oluşturabilmek için temiz enerji elde etme arayışlarını da artırmıştır. Petrol türevi yakıtların en çok kullanıldığı sektörlerden biri ulaşım ve ulaştırma sektörüdür. Dünya üzerinde ulaşımın büyük bir bölümü karayolu araçları ile yapılmaktadır. Karayolu araçlarında temiz enerji arayışları nedeniyle, otomotiv üreticileri, hibrid elektrikli araç üretimi çalışmalarına hız vermiş ve çeşitli araştırma kurumları ile işbirliklerini artırmışlardır. Ford-Otosan tarafından başlatılan, Tubitak-Mam, İTÜ-Mekar ve İTÜ-Otam işbirliği ile gerçekleştirilen FOHEV-I ve FOHEV-II (Ford Otosan Hibrid Elektrikli Araç) projesi de ülkemizde, hibrid elektrikli araç teknolojilerini sürükleyici bir etki yapmıştır.

Bu doktora tezi çalışmasında, FOHEV-I ve FOHEV-II projesi sonucunda ortaya çıkan hibrid elektrikli bir aracın modellenmesi, kontrol algoritmasının geliştirilmesi ve prototiplerinin yol testleri ile ilgili bazı çalışmalar konu edilmiştir. Yazara, bu tezi öneren, uzun yıllar birlikte çalıştığım ve çalıştığımız süre içerisinde her türlü olanağı sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Levent GÜVENÇ'e, destekleri için A.B. 6. çerçeve projesi AUTOCOM (INCO-16427) ve Ford-Otosan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2008

Ali BOYALI

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>x</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1    Kısa Tarihçe.....	1
1.2    Enerji Dönüşümü ve Hibrid Araçlar .....	3
1.3    Tezin Amacı ve Kapsamı.....	7
<b>2. HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLAR</b> .....	<b>9</b>
2.1    Motor Küçültme .....	9
2.2    Motor Durdurma.....	9
2.3    Rejeneratif Frenleme .....	10
2.4    Güç Yönetimi .....	11
2.5    Hibrid Elektrikli Araçların Avantaj ve Dezavantajları .....	13
2.6    Hibrid Araç Tipleri .....	14
2.6.1    Mikro Hibrid Araçlar .....	15
2.6.2    Hafif Hibrid Araçlar .....	15
2.6.3    Tam Hibrid Araçlar.....	15
2.6.4    Seri Hibrid Araçlar .....	16
2.6.5    Paralel Hibrid.....	17
2.6.6    Seri – Paralel Hibrid .....	18
<b>3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN MODELLENMESİ</b> .....	<b>19</b>
3.1    Tekerlek Modeli .....	22
3.2    Araca Etkiyen Boyuna ve Düşey Kuvvetler .....	24
3.3    Rüzgâr Direnci.....	24
3.4    Yokuş Direnci.....	25
3.5    Yuvarlanma Direnci .....	25

3.6	Dönen Kütle Faktörü .....	26
3.7	Boyuna Hareket Denklemi .....	28
3.8	Motor Modeli.....	28
3.9	Güç Aktarma Organları .....	33
3.10	Elektrik Motoru Modeli.....	37
3.11	Batarya Modeli .....	39
3.12	Sürüş Çevrimleri.....	42
3.13	Hibrid Araçlarda Kontrol Yöntemleri .....	43
<b>4.</b>	<b>FOHEV-I HİBRİD ELEKTRİKLİ ARACIN YAPISI VE KONTROLÜ ..</b>	<b>47</b>
4.1	Fohev-I Aracının Yapısı .....	47
4.2	Fohev-I Aracı Kontrol Sistemi Donanımı .....	52
4.3	Kural Tabanlı Kontrol Algoritması .....	55
4.4	Benzetim ve Test Sonuçları .....	69
<b>5.</b>	<b>HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BİLEŞEN BOYUTLANDIRMASI</b>	<b>78</b>
<b>6.</b>	<b>DİNAMİK PROGRAMLAMA YÖNTEMİ İLE OPTİMAL KONTROL ..</b>	<b>92</b>
6.1	DP Çözümü Uygulanan Araç Yapılanması .....	95
6.2	Hibrid Elektrikli Araç DP Güç Dağılımı Hesabı.....	96
6.3	DP Çözümü Sonuçları .....	98
<b>7.</b>	<b>SİNİRSEL – DİNAMİK PROGRAMLAMA .....</b>	<b>101</b>
7.1	Yapay Sinir Ağları.....	103
7.2	Aktivasyon fonksiyonları.....	106
7.3	Hatanın Geri Yayılımı (Error Backpropagation) Yöntemi .....	109
7.4	Sinir Ağları için Hız Profili ve Optimum Güç Dağılımının Oluşturulması.....	113
7.5	Ön Görülü Kontrol.....	122
<b>8.</b>	<b>SONUÇLAR ve TARTIŞMA .....</b>	<b>136</b>
	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>139</b>
	<b>EKLER .....</b>	<b>145</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>160</b>

## KISALTMALAR

<b>IYM</b>	: İçten Yanmalı Motor
<b>EM</b>	: Elektrik Motoru
<b>HEA</b>	: Hibrid Elektrikli Araç
<b>SOC</b>	: Batarta Şarj Miktarı (State of Charge)
<b>DC</b>	: Doğru Akım
<b>NiMH</b>	: Nikel Metal Hybrid
<b>ECU</b>	: Elektronik Kontrol Unitesi
<b>CAN</b>	: Controller Area Network
<b>DP</b>	: Dinamik Programlama
<b>YSA</b>	: Yapay Sinir Ağları
<b>GJ</b>	: Giga Joule
<b>MJ</b>	: Mega Joule
<b>RPM</b>	: Rotation Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)
<b>ms</b>	: Mili Saniye
<b>mg</b>	: Mili Gram

## TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 : Hibridleştirme dereceleri .....	15
Tablo 3.1 : Viteslere göre değişen dönen kütle faktörleri .....	27
Tablo 3.2 : Avrupa Emisyon Regülasyonları .....	32
Tablo 4.1 : Batarya karakteristikleri [45] .....	50
Tablo 4.2 : Geçiş şartları [11] .....	69
Tablo 4.3 : Yakıt tüketimi ve emisyon değerleri .....	70
Tablo 4.4 : Hibrid ve konvansiyonel araç hızlanma performansı .....	77
Tablo 5.1 : Ölçeklendirme katsayıları ve yakıt tüketimindeki iyileşme miktarları.....	85
Tablo 5.2 : Ölçeklendirme katsayıları ve yakıt tüketimindeki iyileşme miktarları.....	86
Tablo 6.1 : Yakıt tüketimi karşılaştırma tablosu .....	98
Tablo 7.1 : Geçiş olasılık matrisi .....	115
Tablo 7.2 : DP ve YSA çözümlerinin karşılaştırılması (1).....	132
Tablo 7.3 : DP ve YSA çözümlerinin karşılaştırılması (2).....	134

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 : Kaynaktan Hareket Enerjisine Dönüşüm Adımları .....	3
Şekil 1.2: Çeşitli Tipteki Araçların Net Verimlilikleri [3].....	4
Şekil 1.3 : Orta Boyutlu Bir Aracın Şehir İçi ve Otoban Çevriminde Harcadığı Enerji Oranları [6] .....	5
Şekil 1.4 : Örnek Bir İYM Verim Haritası .....	6
Şekil 2.1 : ECE R15 çevrimi güç gereksinimleri .....	11
Şekil 2.2 : Motor devrine göre en verimli çalışma çizgisi .....	12
Şekil 2.3 : Farklı iki motor devri için yakıt tüketimi miktarları [8].....	13
Şekil 2.4 : Seri hibrid elektrikli araç yapılanması.....	16
Şekil 2.5 : Paralel hibrid elektrikli araç yapılanması .....	17
Şekil 2.6 : Seri-Paralel birleşik hibrid elektrikli araç.....	18
Şekil 3.1 : Geri akışlı araç modeli.....	20
Şekil 3.2 : İleri akışlı araç modeli .....	21
Şekil 3.3 : MATLAB/Simulink araç modeli .....	21
Şekil 3.4 : Kayma değerlerine göre tekerlek kuvvetlerinin değişimi.....	23
Şekil 3.5 : Tekerlek blok diyagramı .....	23
Şekil 3.6 : Araç üzerine etkiyen kuvvetler [9] .....	24
Şekil 3.7 : Dönen kütle faktörü.....	26
Şekil 3.8 : Pedal haritası .....	29
Şekil 3.9 : Yakıt tüketimi [g/s] .....	30
Şekil 3.10 : Özgül yakıt tüketimi .....	31
Şekil 3.11 : Motor karbondioksit emisyon haritası .....	33
Şekil 3.12 : Aktarma organları [9] .....	34
Şekil 3.13 : En iyi ivmelenme vites değiştirme noktaları [11].....	36
Şekil 3.14 : Vites yükseltme eğrileri .....	37
Şekil 3.15 : Elektrik motoru verim ve karakteristik eğrisi [12].....	38
Şekil 3.16 : Eşdeğer devre diyagramı .....	40
Şekil 3.17 : ECE R15 – NEDC Sürüş çevrimleri .....	42
Şekil 4.1 : Prototiplerde kullanılan Ford Transit Van modeli .....	47
Şekil 4.2 : UQM elektrik motoru [44] .....	49
Şekil 4.3 : Elektrik motoru tork - hız karakteristiği [12] .....	49
Şekil 4.4 : Elektrik motoru yerleşimi.....	50
Şekil 4.5. Batarya yerleşimi .....	51
Şekil 4.6 : Batarya ve elektrik motoru için araca eklenen radyatör .....	51
Şekil 4.7 : Prototip araçta HEA kontrolcüsü olarak kullanılan dSpace sistemleri.....	52
Şekil 4.8 : Elektronik kontrol ünitesi bağlantı şeması [11].....	53
Şekil 4.9 : Sinyal akış şeması [11]. .....	54
Şekil 4.10 : Elektrik motoru elektrikselsel ve mekanik bağlantıları [11].....	54
Şekil 4.11 : Stateflow kural tabanlı kontrol diyagramı .....	55
Şekil 4.12 : Vites çevrim oranları bant genişlikleri [11] .....	57



Şekil 4.13 : Yalnız EM modunda güç akışı .....	58
Şekil 4.14 : Yalnız İYM ile tahrik durumu .....	58
Şekil 4.15 : Durumlar arası geçiş profili – tork paylaşımı [11] .....	59
Şekil 4.16 : Durumlar arası geçiş profili – StateFlow diyagramı .....	59
Şekil 4.17 : Şarj modunda güç akış diyagramı .....	60
Şekil 4.18 : EM destek durumu .....	61
Şekil 4.19 : Rejeneratif frenleme durumu - güç akış diyagramı .....	61
Şekil 4.20 : Fren pedal haritası .....	62
Şekil 4.21 : Fren pedalı kuvvet sensörü yerleşimi .....	62
Şekil 4.22 : Doğrusal ve yanal kuvvet bağlantı katsayıları [26] .....	63
Şekil 4.23 : Doğrusal kuvvet bağlantı katsayısı $\mu_x = 0.08$ için arka akstan alınabilecek fren gücü [26] .....	64
Şekil 4.24. İdeal Fren Kuvveti Dağılımı .....	67
Şekil 4.25 : Arka tekerlekler için kullanılabilir frenleme torku [26] .....	67
Şekil 4.26 : İYM çalışma noktaları (Hibrid) .....	70
Şekil 4.27 : İYM ve EM tork dağılımı benzetim sonuçları .....	71
Şekil 4.28 : Araç hızı ve durumları .....	72
Şekil 4.29. Gaz pedalı açıklığı - araç durumları .....	73
Şekil 4.30 : Batarya şarj ve gerilimi – araç durumları .....	73
Şekil 4.31 : Hibrid araç şarj durumu .....	74
Şekil 4.32 : Konvansiyonel araç gerçek ve benzetim hızlanma profillerinin karşılaştırılması .....	75
Şekil 4.33 : Hibrid araç gerçek ve simülasyon hızlanma profillerinin karşılaştırılması .....	75
Şekil 4.34 : Hibrid ve konvansiyonel araç hızlanma performansı .....	76
Şekil 5.1 : Enerji akışı blok diyagramı ve araç yapılanması .....	78
Şekil 5.2 : Şarj ve deşarj halinde eşdeğer yakıt tüketimi katsayıları [27] .....	81
Şekil 5.3 : Değişen EM güçleri için şarj ve deşarj halinde eşdeğer yakıt tüketimi katsayıları [27] .....	82
Şekil 5.4 : Birim elektrik motoru karakteristik eğrisi [12] .....	84
Şekil 5.5 : Ön elektrik motoru karakteristik eğrisi ve çalışma noktaları [12] .....	87
Şekil 5.6 : Arka elektrik motoru karakteristik eğrisi ve çalışma noktaları [12] .....	88
Şekil 5.7 : Güç kaynaklarının güç paylaşım grafikleri [27] .....	89
Şekil 5.8 : Batarya güç, akım ve gerilim grafikleri [27] .....	90
Şekil 5.9 : Her bir güç kaynağının devrede olduğu güç bölgeleri .....	91
Şekil 6.1 : DP en iyileme ilkesi [14] .....	93
Şekil 6.2 : Ayırıştırma .....	94
Şekil 6.3 : Seçilen hibrid elektrikli araç yapılanması .....	96
Şekil 6.4 : Batarya durum uzayı ve DP çözümü .....	97
Şekil 6.5 : DP batarya şarj seviyesinin zamanla değişimi .....	99
Şekil 6.6 : Eşdeğer Yakıt Tüketimi batarya şarj seviyesinin zamanla değişimi .....	99
Şekil 6.7 : ECE Hız çevrimi ve DP ile elde edilen optimum tork dağılımları .....	100
Şekil 7.1: Yapay sinir ağları ile fonksiyon yaklaşımı .....	101

Şekil 7.2 : Hibrid elektrikli araç neuro-kontrol blok diyagramı .....	103
Şekil 7.3 : Biyolojik sinir hücresi [40].....	104
Şekil 7.4 : Biyolojik sinir ağı [30] .....	104
Şekil 7.5 : Yapay sinir hücresi [30].....	105
Şekil 7.6 : Eşik değeri sabit giriş olarak kabul edildiğinde yapay sinir hücresi [30]	106
Şekil 7.7 : Yapay Sinir Hücresi Aktivasyon Fonksiyonları, (a) Eşik, (b) Parçalı Doğrusal Eşik, (c) Sigmoid Fonksiyonları [30].....	107
Şekil 7.8 : Sinir ağı katmanları [30].....	108
Şekil 7.9 : İki katmanlı bir sinir ağı [31].....	110
Şekil 7.10 : Durumlar arası geçiş olasılıkları.....	113
Şekil 7.11 : Birleşik standart hız profilleri.....	114
Şekil 7.12 : Markov Zincirleri ile oluşturulan hız profili ve kesitleri.....	116
Şekil 7.13 : İki farklı hız profili için DP çözümü ile elde edilen optimum güç dağılımları.....	117
Şekil 7.14 : İki farklı hız profili için DP çözümü ve altı katmanlı, 100 sinir hücreli yapay sinir ağları ile elde edilen optimum EM güç dağılımları ( $x$ -ekseni zaman, $y$ -ekseni normalleştirilmiş güç).....	118
Şekil 7.15 : Birinci rastgele hız profili için optimum EM gücü yapay sinir ağları ve DP çözümü.....	119
Şekil 7.16 : İkinci rastgele hız profili için optimum EM gücü yapay sinir ağları ve DP çözümü.....	120
Şekil 7.17 : Üçüncü rastgele hız profili için optimum EM gücü yapay sinir ağları ve DP çözümü.....	120
Şekil 7.18 : Yapay sinir ağı, DP çözümü ve gerçekleşen hata .....	121
Şekil 7.19 : Yapay sinir ağı giriş ve çıkışları .....	122
Şekil 7.20 : MA(3) Oto-Korelasyon fonksiyonu .....	125
Şekil 7.21 : AR(p) Oto-Korelasyon fonksiyonu .....	126
Şekil 7.22 : AR(3) Kısmi Oto-Korelasyon fonksiyonu.....	126
Şekil 7.23 : Rastlantısal hız profili.....	127
Şekil 7.24 : MATLAB aicbic komutu ile elde edilen en iyi model derecesi (AR) ...	128
Şekil 7.25 : ECE hız çevrimi model derecesi AR(2) .....	128
Şekil 7.26 : Tahmin ufku uzunluğuna göre gerçekleşen ve tahmin edilen hız profilleri .....	129
Şekil 7.27 : Tahmin ufku uzunluğuna göre gerçekleşen ve güncellenen edilen hız profili .....	130
Şekil 7.28 : Rastlantısal bir hız profili için tahmin edilen ve gerçekleşen hız profilleri (1).....	131
Şekil 7.29 : DP ve YSA çözümü sonucu gerçekleşen şarj profilleri (1) .....	131
Şekil 7.30 : DP ve YSA çözümü, EM güç profilleri (1) .....	132
Şekil 7.31 : Rastlantısal bir hız profili için tahmin edilen ve gerçekleşen hız profilleri (2).....	133
Şekil 7.32 : DP ve YSA çözüm sonucu gerçekleşen şarj profilleri (2) .....	133
Şekil 7.33 : DP ve YSA çözümü, EM güç profilleri (2) .....	134

# HİBRİD ELEKTRİKLİ YOL TAŞITLARININ MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

## ÖZET

Bu çalışmada, hibrid elektrikli araçların modellenmesi ve kontrol yöntemleri ile üniversite-sanayi işbirliği kapsamında içten yanmalı motorla tahrik edilen hafif ticari bir yol taşıtının hibrid elektrikli araca dönüştürülmesi anlatılmıştır. Dönüştürülen araç için optimizasyon hesaplamaları, kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi ve ayrıntılı seyir dinamiği analizlerinin yapılabilmesi amacıyla basit ve göreceli olarak daha karmaşık modeller oluşturulmuştur. Hibrid elektrikli aracın kontrolü için bir çok ticari hibrid araçta kullanılan kural tabanlı kontrol yöntemi uygulanmıştır. Bahsi geçen proje kapsamında, hibrid araçtan beklenen tüm özellikleri sergileyen iki adet hibrid elektrikli araç prototipi geliştirilmiştir. Hibrid elektrikli araç tasarımı en baştan yapıldığında araç bileşenlerinin, belirlenen hedefler doğrultusunda optimum şekilde boyutlandırılması gerekmektedir. Tez kapsamında ayrıca, arka akstan bir elektrikli motoru ve ön aksta, birbirleri ile uygun bir şekilde bağlanan bir elektrik motoru ve içten yanmalı motor ile tahrik edilen hibrid bir elektrikli araç için yakıt tüketimini minimize edecek en uygun bileşen boyutlarının da, eşdeğer yakıt tüketimi ve tasarım optimizasyonu yöntemleri yardımı ile hesaplanması gösterilmiştir.

Hibrid elektrikli araç tasarımında temel sorun aracın seyahati esnasında tahrik organları arasında optimum güç paylaşımının hesaplanmasıdır. Araç güzergahının ve hız profilinin bilinmemesi, sürücü davranışları, yol ve trafik koşulları önceden bilinmediğinden, bilinse dahi sistemin karmaşıklığı ve bu tür problemlerde kullanılan optimizasyon algoritmalarının hesaplama yükü nedeniyle gerçek zamanlı güç dağıtım optimizasyonu yapılamamaktadır. Bu nedenle belirli çevrimler için önceden yapılan optimizasyon hesaplarına göre kontrol kuralları geliştirilmektedir. Tez içerisinde, bu soruna çözüm olarak global optimuma yakın sonuçlar veren yapay sinir ağları ve dinamik programlama yöntemlerinin kullanıldığı (neuro-dinamik

programlama) bir kontrol algoritması geliştirilmiş ve yapılan simülasyonlar ile sonuçları analiz edilmiştir.

# **MODELING AND CONTROL OF HYBRID ELECTRIC VEHICLES**

## **SUMMARY**

In this study, modeling and control of Hybrid Electric Vehicles (HEVs) and contribution towards conversion of a light duty road vehicle which is propelled by an internal combustion engine to a HEV in the context of an university-industry collaboration project are explained. HEV models of different complexity are developed for the purposes of analyzing vehicle dynamic behavior and for optimization computations. Commonly used rule based algorithm on commercial HEVs are adopted. Two full functioning HEV prototypes were developed during the Project that was mentioned. When a HEV design is performed from scratch power limits should be computed regarding pre-defined objective functions. Optimum power limit computation of a HEV which has an electric motor at the rear axle and appropriately coupled an internal combustion engine with an electric motor at the front axle by using equivalent fuel consumption and design optimization methods is also presented in this study.

The main problem in HEV design is the computation of optimum power distribution between the power generation components. Since, route and speed profile of the vehicle is not known in advance due to traffic and road conditions, the optimum power distribution cannot be computed real-time. Therefore, optimum power distribution is computed off-line for a specific cycle and control rules are defined. As a solution to this problem, neuro-dynamic programming method which combines neural networks and dynamic programming and approaches global optimum results is proposed and presented in this thesis.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Kısa Tarihçe

İlk buhar makinesinin icadı ile 18'nci yüzyılın sonlarında sanayi devrimi gerçekleşmiş, tarım, üretim ve ulaşım alanlarında hızlı bir gelişim başlamıştır. Endüstrileşme ile birlikte insanların ulaşım ihtiyaçlarının giderilmesi için farklı güç kaynakları ile çalışan tekerlekli ulaşım araçları geliştirilmiştir. 19'ncü yüzyılın sonunda elektrik ve manyetik alanın keşfinden yararlanılarak elektrik ile çalışan ilk motorlu araçlar ortaya çıkmıştır. Fosil yakıtlar ile çalışan ilk otomobillerin ortaya çıkması da hemen hemen aynı yıllara denk gelmektedir. O yıllarda, gürültülü çalışması ve havayı yüksek oranda kirletmesine rağmen dünya savaşları süresince, uzun menzilli olması ve yakıtının kolay bulunması nedeniyle içten yanmalı motorlu araç teknolojisi hızlı bir gelişim göstermiş, elektrik ile çalışan motorlu araç teknolojisi güç elektroniği ve bataryalar alanında yapılan gelişmelere kadar askıya alınmıştır. Ulaşım ve diğer üretim sektörlerinde fosil yakıtların uzun yıllar boyunca yoğun olarak kullanımı, atmosfere uzun yıllar boyunca yanma ürünü gazlarının salınmasına neden olmuştur. Sanayi devriminden günümüze kadar atmosfer ısısında düzenli bir artış gözlemlenmiştir. Şubat (2007) ayında yapılan hükümetler arası iklim değişikliği panelinde bilim adamlarının yayımladığı ortak metinde [1], bu ısı artışı büyük oranda insan faktörüne bağlanmıştır. Fosil yakıtlarının kullanımı sonucunda ortaya çıkan karbondioksit, nitrojen oksitler gibi kirletici gazların atmosferde sera etkisi yaptığı ve dünya iklimini değiştirdiği bilinmektedir. Dünya tarihinde bu tür ani ısı artış ve azalışları birçok defa gerçekleşmiştir. Atmosfer ısısındaki dönemsel artışlara okyanus akıntılarının neden olduğunu öne süren tezler de vardır. Her ne kadar farklı tezler de olsa, fosil yakıtlarının kullanılmasıyla ortaya çıkan atık gazların

insan sağlığını tehdit ettiği, atmosferi kirlettiği ve sera gazı etkisi yaparak atmosferin ısınmasına neden olduğu somut bir Şekilde bilinmektedir. Sanayi devriminden bu güne kadar düzenli olarak gözlemlenen atmosfer ısısındaki artış, küresel ısınma tehdidi, dönemsel enerji krizleri ve fosil yakıtlarının yakın bir gelecekte tkeneceğinin öngörülmesi, temiz enerji arayıŐının yeniden baŐlamasına neden olmuştur.

Fosil yakıt kullanımında ikinci sırada olan ve en hızlı büyüyen sektörlerden biri, elektrik üretimi sektöründen sonra ulaşım sektörüdür [2]. Bu nedenle ulaşım sektörü içerisinde üretim yapan firmalar üzerinde, ürettikleri ulaşım araçlarının atmosfere saldıkları egzoz gazları oranlarına hükümetler giderek daralan sınırlamalar getirmiŐlerdir. İçten yanmalı motor teknolojisi, her ne kadar gelişmiş de olsa, kademeli olarak getirilen bu kısıtlamaları sağlayacak hızlarda gelişim gösteremediğinden, araç üreticileri yeni enerji kaynakları üzerinde araŐtırmalarına hız vermiŐler ve bilimsel kurumlar ile işbirliklerini artırmışlardır.

Bu iŐbirlikleri ve araŐtırmalar sonucunda, öncelikle getirilen kısıtlamaları karŐılamak, sıfır emisyonlu araçlar geliŐtirebilmek ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltabilmek için çeşitli fikirler ortaya atılmıŐtır. Yapılan alıŐmalar, üretilen cihazın verimliliğini artırmak, daha az ya da hidrojen gibi hiç karbon içermeyen yakıtlar ile çalışabilen araçlar geliŐtirmek üzerine yođunlaŐmıŐtır. Bu süreç içerisinde, daha düşük oranlarda karbon içeren ya da hiç içermeyen yakıtların verimlerinin düşük, batarya ve güç elektroniği teknolojilerinin yeteri kadar gelişmiş olmaması nedeniyle, bütün bir aracın verimliliğinin artırılması fikri ön plana çıkmıŐ ve en az iki güç kaynağı kullanan hibrid (melez) araçlar devri yeniden başlamıştır.

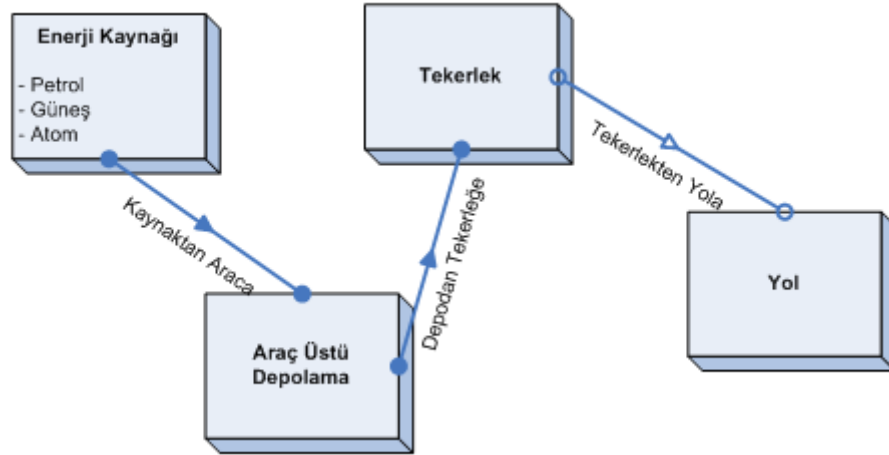
Hibrid elektrikli araçlar, sıfır emisyonlu araçların alt yapısının gelişmesi açısından araç üreticileri tarafından büyük bir ilgi görmektedir. Toyota ve Honda gibi Japon firmalarının 1997 yılında pazara sürdükleri Toyota Prius ve Honda Insight modelleri, hibrid elektrikli araç sektöründe pazarı sürükleyici etki yapmıştır. Toyota, 2012 yılında banttan çıkaracağı tüm araçları hibrid elektrikli araç olarak üretmeyi ve

sürdürülebilir enerji kaynakları teknolojileri ilerlediğinde de yakıt hücreli araçları geliştirmeyi planlamaktadır. [3].

## 1.2 Enerji Dönüşümü ve Hibrid Araçlar

Fosil bazlı yakıt kullanan karayolu araçlarında yakıt tüketimi; araç ağırlığının düşürülmesi, yol ve sinyalizasyondaki trafik akışını düzenleyen iyileştirmeler, araç bileşenlerinin verimlerinin artırılması gibi uygulamalar ile düşürülebilmektedir. Yalnızca taşıt söz konusu olduğunda, taşıt bileşenlerinin her enerji dönüşümü adımında kayıplarının azaltılması, birbirleri ile etkileşimli olduğu durumlarda en yüksek verimli noktalarda çalıştırılması ile yakıt tüketimi ve egzoz gazları oranları düşürülebilir.

Sistemin enerji dönüşümü analizi yapılırken en az üç enerji dönüşümü adımından bahsedilebilir. Bunlar; Şekil 1.1’de gösterildiği gibi sırasıyla, yakıtın kaynağından alınarak araç üzerinde kullanılabilir hale getirilmesi ve depolanması, araç deposundaki yakıtın tekerleklerde mekanik enerjiye dönüştürülmesi, tekerleklerdeki mekanik enerjinin menzile dönüştürülmesi aşamalarıdır [4] (Şekil 1.1).

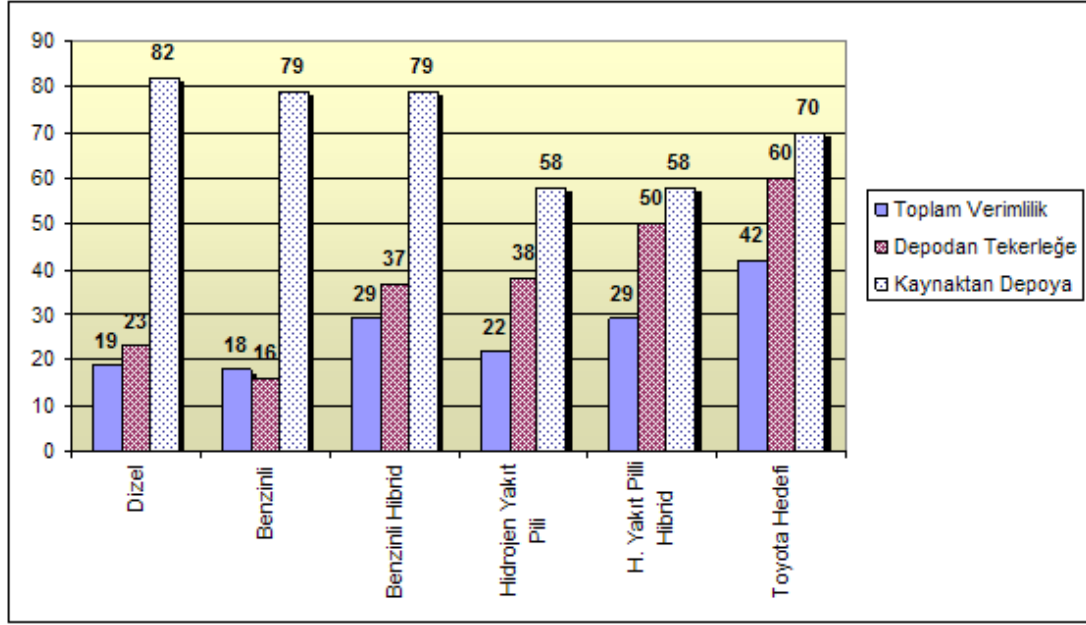


Şekil 1.1 : Kaynaktan Hareket Enerjisine Dönüşüm Adımları

Her enerji dönüşümü aşamasında enerji kayıpları gerçekleşmektedir. İlk aşamada rafinasyon ve yakıtın hazırlanmasında harcanan enerji kayıpları, ikinci aşamada elde



edilen yakıtın tekerleklerde harekete dönüştürülmesinde gerçekleşen mekanik kayıplar, üçüncü aşamada ise araç aero-dinamiği ve yol yüklerinden dolayı gerçekleşen kayıplar söz konusudur [4]. Farklı enerji sistemleri ile çalışan bir karayolu aracı için enerji dönüşümünün ilk iki aşaması dikkate alınarak kaynaktan-tekerleğe toplam verimlilikleri Şekil 1.2’de verilmiştir.

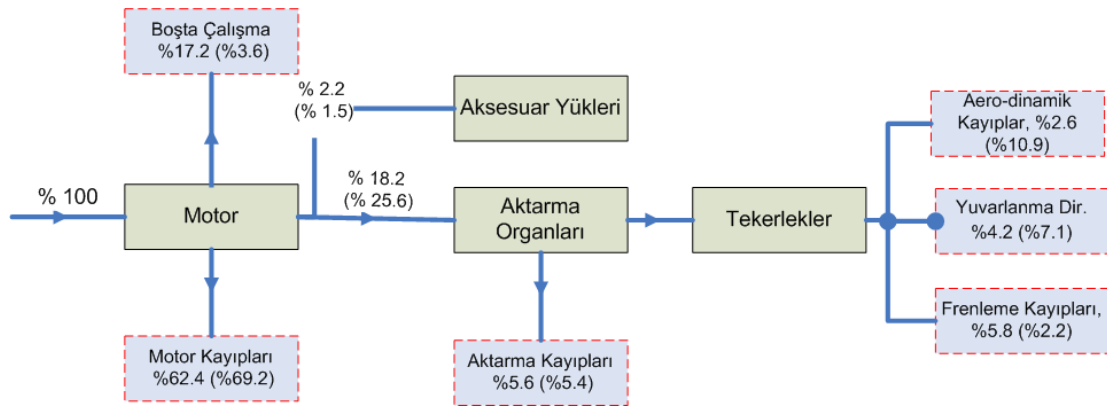


Şekil 1.2: Çeşitli Tipteki Araçların Net Verimlilikleri [3]

Hibrid elektrikli araçların, konvansiyonel araçlara göre, daha yüksek toplam verimle çalıştığı şekilde gösterilmiştir. Yakıt hücreli araçların verimliliği, hibrid elektrikli araç toplam verimliliğinden düşüktür. Bunun nedeni hidrojen’in elde edilmesindeki verimin daha düşük olmasıdır. Günümüzde hidrojen, genellikle fosil kökenli yakıt ve enerji kaynakları yardımı ile üretilmektedir. Her ne kadar araç üzerinde Hidrojen kullanımı sonucu su buharından başka atık yanma ürünü çıkmasa da, yakıtın ilk elde edilmesinde fosil yakıtlar kullanıldığından kirletici gazlar açığa çıkmaktadır. hidrojenin, saf halde doğada bulunmaması ve yardımcı enerji kaynakları ile ayrıştırılması nedeniyle enerji taşıyıcısı olarak sınıflandırılmaktadır. Hidrojen bu yöntemler ile elde edilirse, günümüzde karayolu taşıtlarının ürettiği oranlardan daha

yüksek oranlarda fazla kirletici gaz açığa çıkacağı hesaplanmaktadır [5]. Eğer hidrojen, nükleer enerji, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile verimli bir şekilde üretilebilir ise gelecekte sıfır emisyonlu araç devri başlayacaktır. Bu nedenle, Toyota, yayımladığı rapora göre [3], gelecekte üretmeyi planladığı hibrid yakıt hücreli elektrikli aracın verimini günümüzdeki araçların veriminin iki katının üzerine çıkararak yaklaşık sıfır emisyonlu araç üretmeyi hedeflemektedir.

İçten yanmalı motorlarda üretilen enerjinin büyük bir bölümü egzoz gazları ve motor gövdesi aracılığıyla ısı olarak dışarı atılmaktadır. Orta boyutlu bir aracın şehir içi ve dışındaki seyirlerde harcadığı yakıt oranları Şekil 1.3'de verilmiştir [6]. Parantez içerisindeki değerler otoyol çevrimindeki oranlarını göstermektedir.



**Şekil 1.3** : Orta Boyutlu Bir Aracın Şehir İçi ve Otoyol Çevriminde Harcadığı Enerji Oranları [6]

İçten yanmalı motorlarda dönüştürülen kimyasal enerjinin şehir içi çevrimde %62,4'ü ısı olarak dışarı atılmaktadır. Kullanılabilir enerjinin % 17,2'si motor boşta olduğu durumda hareket enerjisine dönüştürülmeden harcanmakta, % 5,8'i fren enerjisi, % 5,6'sı ise mekanik kayıp olarak tüketilmektedir [6].

İçten yanmalı motorlu araçlar tasarlanılırken, sürüş performansları söz konusu olduğunda, ivmelenme, yokuş çıkma ve en yüksek seyir hızı gibi amaçları sağlayabilecek motorlar seçilmektedir. Bu nedenle tam yükte daha yüksek verimle



yukarıda sözü edilen potansiyeli kullanmak için günümüzdeki en uygun depolama araçlarından biridir. Ford Transit boyutunda hafif ticari bir hibrid elektrikli araçta bir depo yakıt karşılık gelen yakıt enerjisi yaklaşık 4 GJ iken aynı araçta kullanılacak batarya kapasitesi, hedeflenen işlevler için 8,5 MJ değerindedir. Bataryaların enerji yoğunluğunun düşük olması nedeniyle yalnızca elektrik enerjisinin kullanılması, menzil göz önüne alındığında, fosil yakıtlara henüz bir alternatif seçenek değildir. Trafik koşulları ve motor verimleri dikkate alındığında, içten yanmalı motorun ortalama verimini, uygun matematiksel araçlar ve tasarım yöntemleri ile yükseltmek amacı ile pahalı yakıt tüketimi bölgelerinde bir tampon bölge olarak kullanılabilir.

Elektrik motoru, batarya ve içten yanmalı motor güç kaynaklarının avantajlarını bir araya getirerek, daha yüksek verimler ile çalışabilen araçları üretmek fikrinden hibrid elektrikli araç teknolojileri ortaya çıkmıştır.

Otomotiv üreticileri düşük emisyon düzenlemelerine uyabilmek için orta vadeli bir çözüm olarak elektrikli araçlara yönelmişlerdir.

### **1.3 Tezin Amacı ve Kapsamı**

Bu tez, üniversite sanayi işbirliği ile gerçekleştirilen konvansiyonel hafif ticari bir aracın hibridleştirilmesi projesi üzerine kurulmuştur. Bu proje süresince iki konvansiyonel araç, bir elektrik motoru ve bir batarya paketi eklenilerek, konvansiyonel araçta köklü yapısal değişiklikler yapılmadan hibrid elektrikli araca dönüştürülmüş ve bu araçların yol testlerinde sürüş konforundan ödün vermeden prototip araçların bir hibrid elektrikli araçtan beklenen tüm işlevlerini yerine getirdiği gözlemlenmiştir. Tezin ilk bölümünde, yol araçlarının tarihsel gelişimine kısa bir vurgu yapılmakta ve hibrid araç gereksiniminin nedenleri anlatılmaktadır. Hibridleştirme, bir enerji dönüşümü olgusu olduğu için ilk bölümde, enerji dönüşümü üzerinde tartışılmıştır. İkinci bölümde, hibrid elektrikli araçların yakıt tüketimi ve kirlenici gaz emisyonlarının azaltılmasındaki potansiyel yararları anlatılmış ve hibrid

araçların sınıflandırılması tanımlanmıştır. Bir hibrid elektrikli aracın modelinin oluşturma aşamaları ve model denklemleri üçüncü bölümde verilmiştir. Hibride dönüştürülen konvansiyonel hafif ticari aracın yapısı, üzerinde gerçekleştirilen düzenlemeler ile hibrid araca dönüştürüldüğünde kullanılan kontrol algoritması ve hibrid prototipi ortaya çıktığında yapılan yol testleri ile benzetim sonuçları dördüncü bölümde açıklanmıştır. Beşinci bölümde, eş değer yakıt tüketimi optimizasyon yöntemi ile hibrid bir elektrikli aracın bileşenlerinin seçimi üzerinde durulmuştur. Belirlenen bir çevrimde, güç kaynaklarının en iyi güç dağılımının hesaplanabilmesi için dinamik programlama yönteminin uygulaması altıncı bölümde verilmiştir. Son olarak yedinci bölümde, hibrid elektrikli araçlarda gerçek zamanlı optimum güç dağılımı hesabı için alternatif bir çözüm önerilmiştir.

## **2. HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLAR**

Karayolu araçlarında seyir için kullanılan enerji tüketiminin azaltılabilmesi için, araç kütlesinin düşürülmesi, yuvarlanma direnci ve aero-dinamik dirençlerinin azaltılması, güç aktarma organlarının ve çalışma bölgelerinin optimizasyonu, trafik akışındaki düzenlemeler gibi birçok yöntem mevcuttur. Hibrid elektrikli araçlarda, motor küçültme, aracın hareket etmediği durumlarda motor kapatma, güç organları yönetimi ve optimizasyonu, enerjinin geri kazanımı olanakları nedeniyle yüksek oranlarda yakıt tasarrufu yapılabilmekte ve egzoz emisyonları düşürülebilmektedir. Hibridleştirilmenin yakıt tüketimi ve egzoz gazı emisyonlarının düşürülmesi için sağladığı yöntemler aşağıda alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

### **2.1 Motor Küçültme**

İçten yanmalı motorlarda verimi etkileyen faktörlerin en başında, dışarıya atılan ısı, sürtünme ve pompalama kayıpları gelmektedir. Küçük motorlarda, silindir hacminin düşük olması nedeniyle, pompalama ve ısı kayıpları daha az olmaktadır. Hareketli parçaların küçük olması nedeniyle sürtünme için harcanan enerji miktarı da düşüktür. Verilen bir çevrim için büyük motorlar ile kıyaslandığında küçük motorlar en yüksek tork eğrisi referans alındığında daha fazla yükleneceğinden daha verimli bölgelerde çalışırlar.

### **2.2 Motor Durdurma**

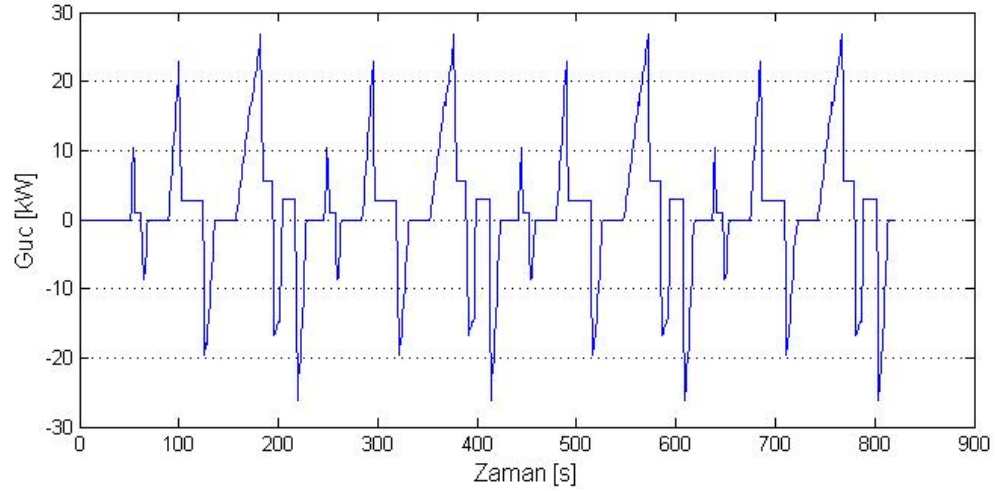
Şehir içi trafik şartlarında, araç duruyorken içten yanmalı motorlar rölanti durumunda çalışmaktadır. Avrupa şehir içi çevriminde motorun rölantide olduğu süre toplam çevrim zamanının % 35,4'ü oranında gerçekleşmektedir. Frenlemede geçen süre %13,8'dir. İçten yanmalı motor, bu durumlarda kapatılarak büyük oranlarda yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir. İçten yanmalı motorlarda, ilk çalıştırma anında motorun kararlı çalışma konumuna geçebilmesi için silindirlere daha yüksek miktarda yakıt püskürtülmektedir. İlk çalışma esnasında motor sıcak iken hızla 1500 rpm devire

ulaştıktan sonra yavaşça rölanti devrine döner. Bu ilk çevrimlerde her bir silindire 600 mg yakıt gönderilmektedir. Motor rölanti devrine oturduğunda bu miktar 18 mg olur [7]. Hafif hibrid araçlarda motor ilk çalıştırılmadan önce, kayış kasnak yardımı ile İYM'a bağlanan düşük güçlü bir elektrik motoru yardımı ile İYM denge durumuna geçene kadar elektrik motoru ile tahrik edilmektedir [7].

Burada dikkat edilecek diğer hususlar ise katalitik konvertör ve motor sıcaklığıdır. İçten yanmalı motorlar rejim sıcaklığında daha az emisyon üretirken, katalitik konvertörler yüksek sıcaklıklarda daha verimli çalışmakta, atmosfere salınan karbon monoksit ve hidro-karbon gazlarının yakılarak sağlığa zararsız gazlara dönüştürülmesinde büyük rol oynamaktadırlar. Bu nedenler ile motor kapatılırken motor ve katalitik konvertör sıcaklıkları göz önünde bulundurulmalıdır.

### **2.3 Rejeneratif Frenleme**

Avrupa şehir içi çevriminde, aracı hızlandırmak ve sabit hızla götürmek için gereken toplam pozitif enerji miktarı 3000 kg kütleli bir araç için 2.82 MJ iken, bu çevrimde fren ile atılan enerji miktarı 1.76 MJ değerindedir. Aynı zamanda toplam çevrim zamanının %13,8'i frenlemek için harcanmaktadır. Bu sürede, atılan enerji miktarı, çevrimdeki pozitif enerji miktarı ile kıyaslandığında oldukça büyük bir kayıp olarak göze çarpmaktadır. Hibrid elektrikli araçlar ile gelen en büyük avantaj atılan fren enerjisinin bir kısmının geri kazanılabilmesi olanağıdır. Genellikle fren ile atılan enerji miktarı araç üzerinde bulundurulmuş elektrik motorunun alabileceği kapasitenin üzerinde gerçekleşmektedir. Avrupa şehir içi çevriminde üç ton araç ağırlığı için ihtiyaç duyulan fren gücü 27 kW civarındadır (Şekil 2.1). Rejeneratif frenleme de dikkat edilmesi gereken en önemli husus ise regülasyonlar ile düzenlenen ön ve arka aks fren momentleri dağılımıdır. Rejeneratif frenleme ile ilgili detaylı bilgiler tezin devamında verilecektir.



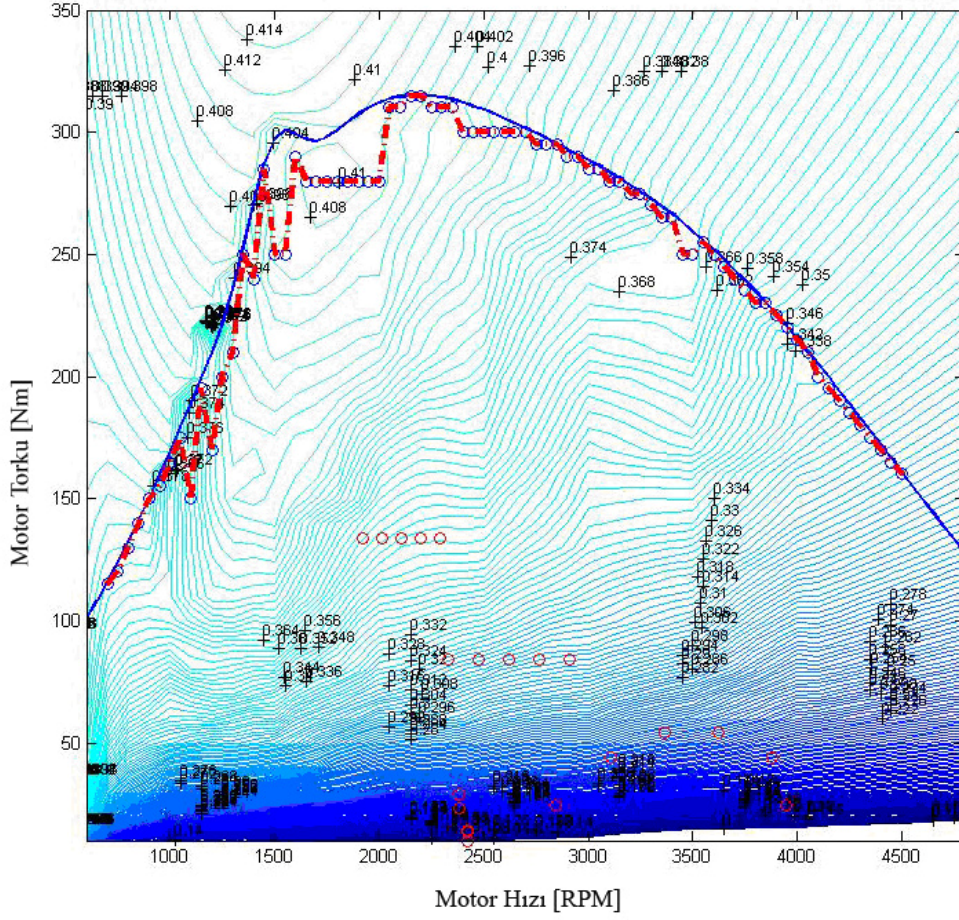
**Şekil 2.1 :** ECE R15 çevrimi güç gereksinimleri

## 2.4 Güç Yönetimi

Güç ve güç aktarma organlarının en yüksek verim ve ucuz enerji bölgelerinde çalıştırılması hibrid elektrikli araçlarda önemli oranlarda yakıt tüketimi azaltma potansiyeli oluşturmaktadır. Konvansiyonel bir araca, elektrik motoru eklendiğinde, içten yanmalı motorların pahalı enerji tükettiği bölgelerde bütün sistemin verimi göz önüne alınarak elektrik motoru devreye alınabilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi içten yanmalı motorların en yüksek verimi %40 civarında iken, bu oran şehir içi seyirlerde ortalama %20'dir [4]. İyi tasarlanmış bir kontrolcü yardımı ile bu potansiyel açığa çıkarılabilmektedir.

Artan motor devri için içten yanmalı bir motorun en verimli çalıştığı noktalar kesikli çizgi ile Şekil 2.2'de verilmiştir. Birçok kontrol uygulamasında içten yanmalı motorun çalışma noktasını mümkün olduğu durumlarda en verimli olan çizgiye çekmek amacı hedeflenmektedir. Bu yaklaşım kısmi olarak doğru bir yaklaşım da olsa, doğru yaklaşım, hesaplamaların zaman boyutunun da dikkate alınması ve denklemlerin buna göre kurularak en iyileme (optimizasyon) yapılmasıdır.

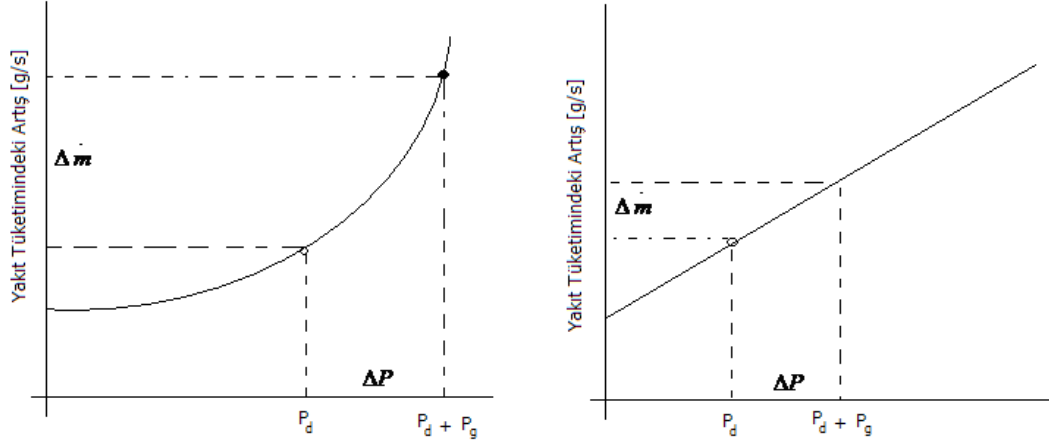




Şekil 2.2 : Motor devrine göre en verimli çalışma çizgisi

İçten yanmalı motorun, çevrim içerisinde, en iyi verimlerde çalışacağı noktaya çekilmesi, batarya şarj kısıtları da düşünüldüğünde en doğru yaklaşım olmayabilir.

İçten yanmalı motorlarda, motor gücü ve boyutları arttığında pompalama ve sürtünme kayıpları da artış göstermektedir. Farklı motor devirleri için artan motor gücüne karşılık gelen yakıt tüketimi miktarları Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Şekilde  $P_d$  aracın seyahati için gerekli gücü,  $P_g$  ise bataryayı şarj etmek için ilave edilecek gücü temsil



Şekil 2.3 : Farklı iki motor devri için yakıt tüketimi miktarları [8]

Buna göre, motorun optimum güç eğrisi üzerine çekilmesi ile birim yakıt tüketimindeki artış oranı aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir [8].

$$\xi = \frac{\Delta \dot{m}}{\Delta P} \quad (2.1)$$

Burada,  $\xi$  artım değeri olarak adlandırılmaktadır. Bu değerin düşük olduğu bölgelerde, elektrik motorunun kısıtlar dahilinde jeneratör olarak çalıştırılması, yüksek olduğu bölgelerde ise yalnızca elektrik motorunun kullanılması, matematiksel açıdan daha doğru olacaktır.

Farklı motor devirlerinde ve farklı güç gereksinimlerinde, artım değeri büyüklüğü  $\xi$  değişebilmektedir. Zaman boyutu da dikkate alındığında, seçilen amaç fonksiyonunu, optimum kontrol yöntemleri ile elde edilebilir.

## 2.5 Hibrid Elektrikli Araçların Avantaj ve Dezavantajları

Yakıt tüketimindeki iyileşme ve egzoz gazlarının azaltılması yanında hibrid elektrikli araçlar, konvansiyonel araçlara göre aşağıdaki avantajlara sahiptir.

- Elektrik motoru ile hızlanma desteği

- Tasarıma göre yokuş çıkma kabiliyetinde artış
- Sessiz sürüş
- Konfor ve lüks ihtiyaçları için gerekli elektrik enerjisinin sağlanabilmesi
- Bazı ülkelerde vergi avantajı
- Dört çekiş yapılanmalarında sportif sürüş
- Araç kararlılık ve kontrol uzayının genişlemesi

Dezavantajları ise;

- Batarya teknolojilerinin henüz gelişmekte olması nedeniyle, düşük faydalı batarya çevrim ömrü
- Faydalı hacmin azalması, araç kütleindeki artış
- Araç karmaşıklığında artış
- Maliyet artışı
- Batarya geri dönüşümü

olarak sıralanabilir [6, 28].

## **2.6 Hibrid Araç Tipleri**

Son yıllarda, taşıt teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte, artan güvenlik, konfor ve lüks ihtiyaçları nedeniyle mekanik ve hidrolik sistemlerin yerini elektrikli cihazlara bırakması, araçtaki elektrik gücü tüketimini her yıl yaklaşık olarak % 4-5 oranında arttırmaktadır. [8]. Araç üreticileri, bu artış dolayısı ile günümüzde kullanılan standart 14V (12V Batarya) elektrik ağından, 42V (36V Batarya) elektrik ağına geçmeyi planlamaktadır. Araç yardımcı donanımlarının motordan ayrılarak elektrik enerjisi ile işletilmesi küçük çapta da olsa hibridleştirmeyi beraberinde getirmektedir.

Hibrid elektrikli araçlar, hibridleştirme seviyesine göre, mikro, hafif ve tam hibrid olmak üzere üç, güç organlarının birbirleri ile ilişkisine göre üç grupta sınıflandırılmaktadır. Hibridleştirme oranı araçta kullanılan elektrik motoru gücünün toplam araç gücüne oranı olarak tanımlanabilir. Hibrid araçların hibridleştirme derecesine göre sınıflandırılması Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

### 2.6.1 Mikro Hibrid Araçlar

Mikro hibrid araçlarda elektrik motoru bir kayış kasnak mekanizması ile içten yanmalı motora bağlanmaktadır. Mikro hibridler araç üzerinde bulunan tüm aksesuar yüklerini karşılayacak şekilde tasarlanmaktadır. Araca konulan elektrik motoru, içten yanmalı motor rölanti devrinde iken motorun açılıp kapatılması için kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlar ilk çalıştırma anında yüksek yakıt tükettiğinden mikro hibrid araçlarda ilk çalışma ve stabilizasyon süresi 800 ms'lerden 200 ms'lere kadar düşürülmekte ve ilk çalışma anında harcanan fazla yakıttan tasarruf edilmektedir [8].

**Tablo 2.1 : Hibridleştirme dereceleri**

	<b>Mikro Hibrid</b>	<b>Hafif Hibrid</b>	<b>Tam Hibrid</b>
<b>Motor Durdurma, Aksesuar Yükl Paylaşımı</b>	√	√	√
<b>Yalnız EM ile Araç Sürme</b>	--	--	√
<b>Fren Enerjisinin Geri Kazanımı</b>	√	√	√
<b>Seyir Gücü Paylaşımı</b>	--	√	√

### 2.6.2 Hafif Hibrid Araçlar

Hafif hibrid araçlarda elektrik motoru içten yanmalı motora destek verebilmektedir fakat bu araçlarda elektrik motoru aracı yalnız başına götürebilecek kadar güçlü değildir. Mikro hibridlerde olduğu gibi rejeneratif frenleme de bu tiplerde mevcuttur.

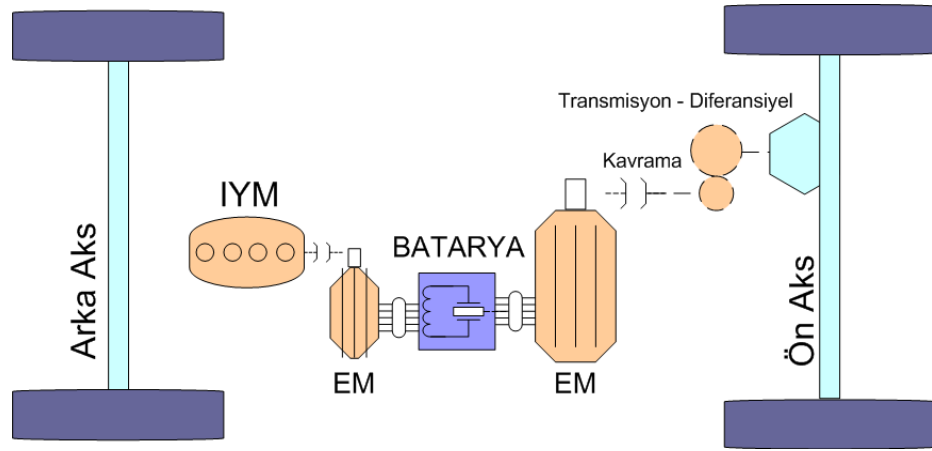
### 2.6.3 Tam Hibrid Araçlar

Diğer hibridlerden farklı olarak, tam hibrid araçlarda, araç yalnızca elektrik motoru ile de sürülebilmektedir. Seyir hızına bağlı olarak tam hibrid araçlarda elektrik motoru araç yükünün bir kısmını ya da tamamını kendi başına sağlayabilir. Önceki sistemlere göre daha güçlü motor ve batarya gerektirdiğinden sistem kontrolü de daha karmaşıktır. Tam hibrid araçlarda yüksek oranlarda yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir.

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

#### 2.6.4 Seri Hibrid Araçlar

Seri hibrid araçlarda, bataryayı şarj etmek için ufak bir içten yanmalı motor, bir jeneratör ve aracın hareketi için kullanılan bir elektrik motoru bulunmaktadır (Şekil 2.4).

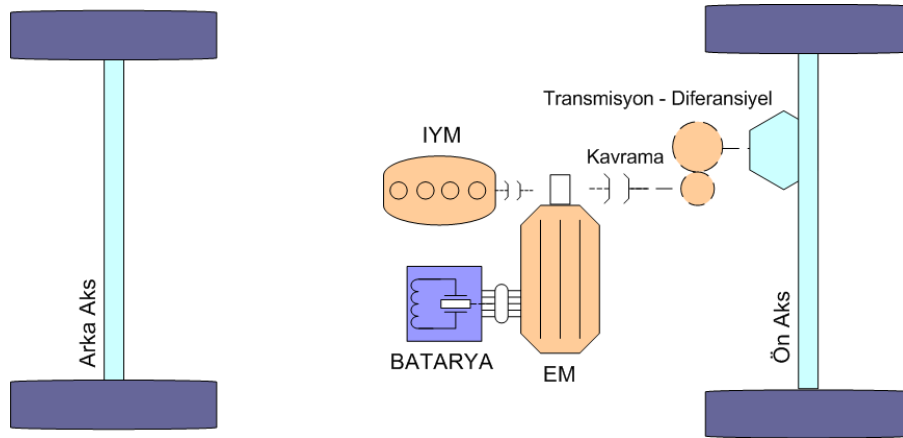


Şekil 2.4 : Seri hibrid elektrikli araç yapılanması

Seri hibrid araç yalnızca elektrik motoru ile sürüldüğünden, elektrik motoru ve batarya aracın performans gereksinimlerini karşılayacak kadar büyük boyutlarda olmalıdır. Batarya şarjı, belirlenen alt eşikten aşağı düştüğünde içten yanmalı motor bataryayı şarj etmektedir. Diğer yapılandırmalara göre, içten yanmalı motor mekanik olarak araç sistemine bağlı olmadığından, jeneratör ve İYM'nin yerleşimlerinde serbestlik vardır. Ancak enerji dönüşümü adımlarının sayısı fazla olduğundan verimliliği diğer yapılandırmalara oranla daha düşüktür. Seri hibrid araçlarda İYM şasi ile bağlantılı olmadığından kavrama gereksinimi de ortadan kalkmaktadır.

### 2.6.5 Paralel Hibrid

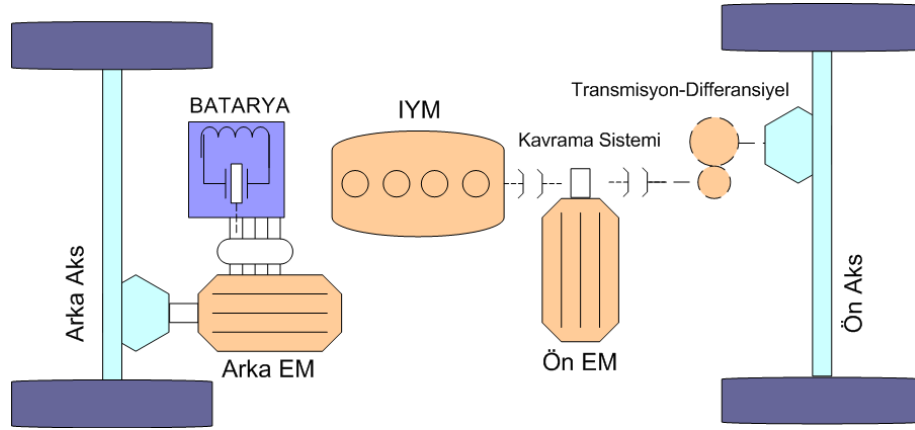
Paralel hibrid araç yapılanmasında, elektrik motoru kısmi ya da tam olarak aracı tahrik edebilmektedir. Uygun bağlama sistemleri ile elektrik motoru ile içten yanmalı motor aracı tek tek ya da birlikte yürütecek şekilde birbirleri ile bağlanabilmektedir (Şekil 2.5). Seri hibridlere kıyasla güç yönetimi daha da karmaşıktır. Göreceli olarak daha küçük boyutlarda elektrik motoru kullanılabilir. Sürücü güç gereksinimine bağlı olarak, içten yanmalı motorun gücünün yetmediği durumlarda, elektrik motoru, içten yanmalı motoru desteklemek için kullanılabilir. Paralel hibrid elektrikli araçlarda elektrik motoru güç aktarma organlarına farklı şekillerde bağlanabilmektedir.



Şekil 2.5 : Paralel hibrid elektrikli araç yapılanması

Elektrik motoru, İYM' un çıkış miline, kavrama önüne veya arkasına ya da transmisyon önüne veya arkasına yerleştirilebilir. Her iki aksa düşen frenleme momentlerinden yararlanılmak isteniyor ise, her iki aksa da uygun boyutlarda elektrik motoru yerleştirilebilmektedir.

### 2.6.6 Seri – Paralel Hibrid



Şekil 2.6 : Seri-Paralel birleşik hibrid elektrikli araç

Bu hibrid yapılanmasında araç hem seri hem de paralel hibrid araç özelliklerini gösterebilmektedir. Genellikle araç üzerinde biri jeneratör olarak kullanılmak üzere iki adet elektrik motoru vardır. İçten yanmalı motor bir kavrama yardımı ile şasiden ayrılarak, jeneratör olarak elektrik motoru ile bataryayı şarj edebilmektedir (Şekil 2.6).

### 3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN MODELLENMESİ

Bir hibrid elektrikli araç tasarlanılırken iki seçenek mevcuttur. Bunlardan ilki var olan bir araç modelinin, yardımcı bir güç kaynağı ve donanımı ile hibride dönüştürülmesi, diğeri ise, en baştan aracın hibrid olarak çalışacak şekilde tasarlanması seçeneğidir. Bir hibrid elektrikli araç tasarlanılırken ana hedefler aşağıda sırası ile verilmiştir.

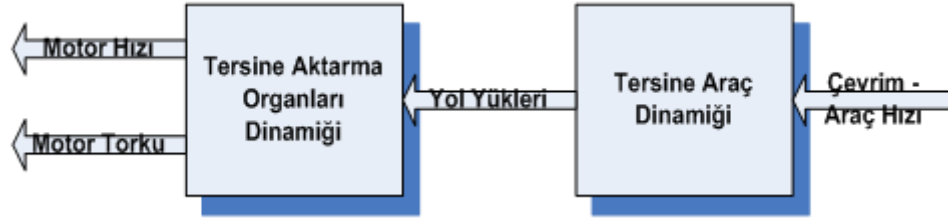
- Yakıt ekonomisi,
- Düşük emisyon,
- Düşük maliyet,
- Bakım masraflarının az olması,
- Sürüş konforu ve yüksek sürüş performansı,
- Güvenilirlik

Eğer hibrid araç baştan tasarlanılıyor ise, güç organlarının dizilişi ve birleri ile bağlantı şekli, batarya, elektrik motoru ve içten yanmalı motorun boyutlarının seçilmesi için çeşitli optimizasyon çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Hibrid araç bileşen seçimi ve güç yönetim stratejileri belirleniyorken dikkat edilmesi ve hesaplarda göz önüne alınması gereken en önemli hususlar aşağıda verilmiştir.

- Hibrid araç, asgari şart olarak konvansiyonel araçtan beklenen tüm performans isteklerini karşılayabilmelidir.
- İçten yanmalı motorlar dinamik yüklerde geçiş bölgelerinde çok daha fazla yakıt tükettiği ve kirletici gaz ürettiği için bu bölgelerde mümkün olduğunda az çalıştırılmalıdır.
- Batarya teknolojileri göz önüne alındığında, bataryaların işletme ömrü, batarya yönetiminde bağlı olarak az olduğundan, mümkün olduğunca anlık batarya kullanımından sakınılmalıdır. Batarya sıcaklığı, ortam sıcaklığı, şarj derinliği dikkate alınmalı ve iyi bir batarya yönetimi algoritması kullanılmalıdır.
- İYM'nin hareket sağlamadığı durumlarda, eğer İYM kapatılacak ise, katalitik konvertör ve motor sıcaklıkları hesaba katılmalıdır.

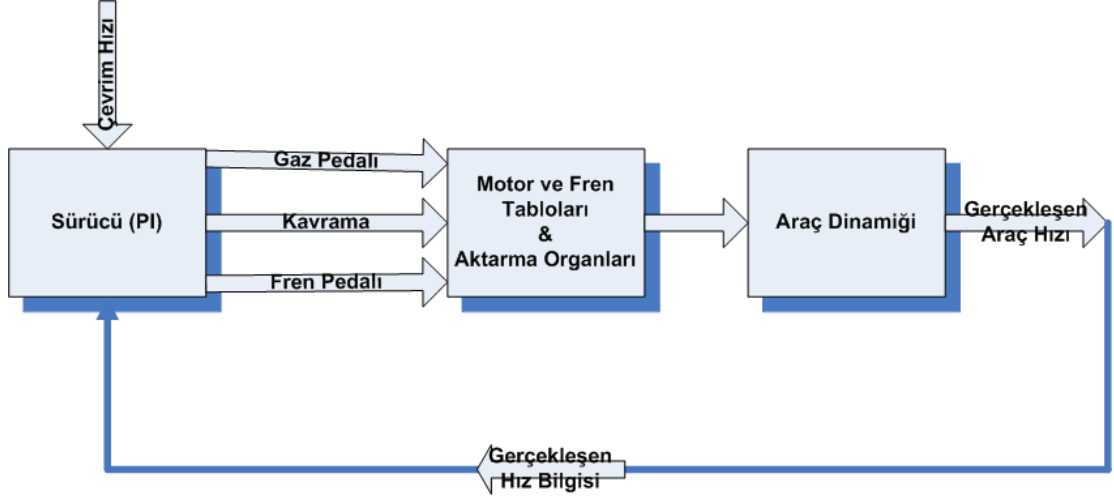


Hibrid elektrikli araçlarda, öncelikle güç ve güç aktarma organlarının hedeflenen amaçlar dahilinde en iyi bölgelerde çalıştırılması ön planda olduğu için, verilen bir çevrim için aracın güç ihtiyacının belirlenmesi gerekmektedir. Öncelikle boyuna bir araç modeli kurularak güç ve güç aktarma organlarının davranışları hesaplanabilir. Boyuna araç modeli nedensellik ilkesine göre iki şekilde kurulabilmektedir. İlk yöntem geri akış yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Hız profili belirli olduğundan, hız profiline karşılık gelen araç yükleri hesaplanılarak, tekerlekten başlayarak güç aktarma organları üzerinden güç kaynaklarının vermesi gereken tork ve güç miktarı ile devirleri hesaplanılabilmektedir (Şekil 3.1).



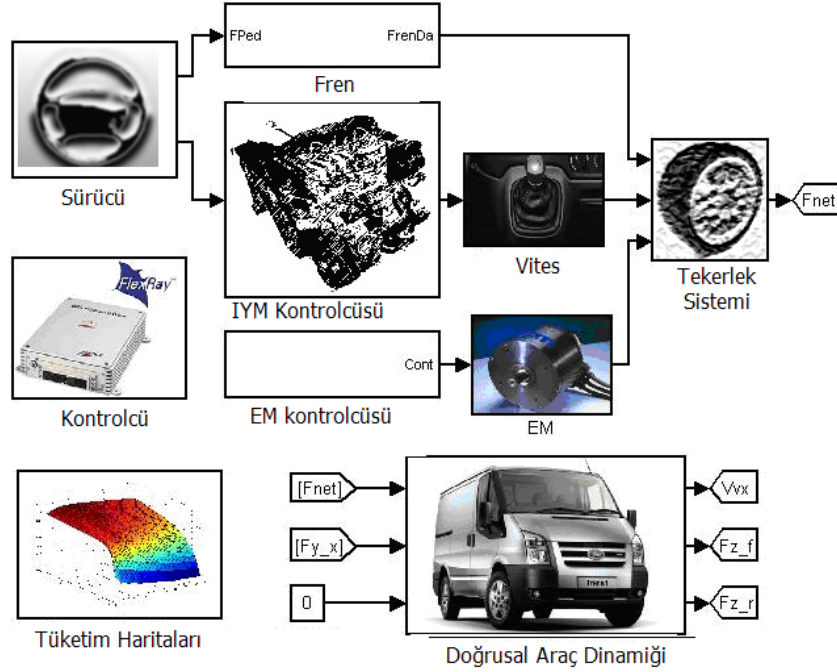
Şekil 3.1 : Geri akışlı araç modeli

İleri akış yöntemi kullanılan modelde ise mutlaka güç sistemlerini kumanda eden bir sürücü modeli kullanılmaktadır. Sürücü genellikle bir oransal-integral (PI) kontrolcü yardımı ile modellenir. Sürücü modeli kendisine verilen hız profilini takip etmek amacıyla, gaz, fren ve kavrama pedallarını kontrol ederek gerçekleşen hız ile verilen hız arasındaki hatayı azaltmaya çalışır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : İleri akışlı araç modeli

Bu tez kapsamında geri akışlı ve ileri akışlı araç modelleri MATLAB/Simulink programında hazırlanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : MATLAB/Simulink araç modeli

Geri akışlı model göreceli olarak daha basit olduğundan optimizasyon çalışmaları için daha uygundur. Hibrid elektrikli aracın yanal dinamiği ve kararlılığını incelemek amacıyla, detaylı bir tekerlek modelini içeren model kurulmuştur. Araç modelinde kullanılan denklem ve yöntemler aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Kurulan model içerisinde, tekerlek dinamiği, dişli kutusu ve diferansiyel, içten yanmalı motor, elektrik motoru ve batarya modeli blokları kurulmuştur. Hız profilinden yola çıkarak araca etki eden yuvarlanma, aero-dinamik, yokuş ve ivmelenme dirençleri uygun denklemler yardımı ile hesaplanmaktadır.

### 3.1 Tekerlek Modeli

Tekerlek modeli olarak Pacejka 2002 modeli kullanılmaktadır. Model parametreleri ve formülleri ADAMS 2005 tekerlek özellik ve yardım dosyalarından alınmıştır. Pacejka modeli oluşturan, hem doğrusal hem de yanal kuvvetlerin hesabında kullanılan denklemler;

$$Y(x) = D \cdot \cos[C \cdot \text{atan}(B_{x(y)} - E(B_{x(y)} - \text{atan}(B_{x(y)})))] \quad (3.1)$$

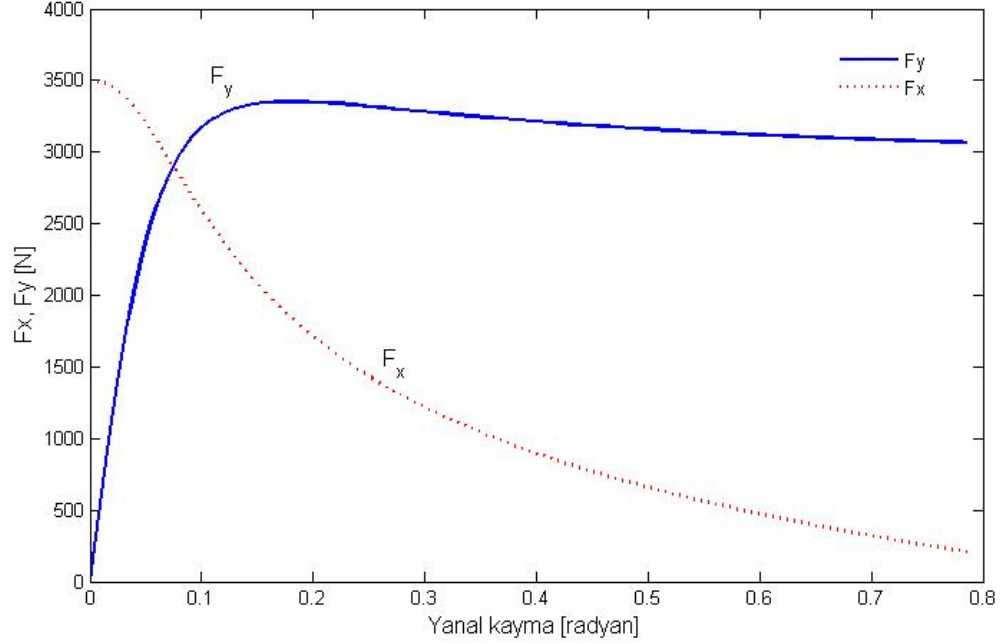
şeklindedir.

Burada kullanılan,  $C$ ,  $D$ ,  $B_{x(y)}$ ,  $E$  gibi katsayılar, deneysel yöntemler ile elde edilen ampirik katsayılardır.

Pacejka modeli ile değişen yanal kayma açısı değerlerine göre hesaplanan tekerlek doğrusal ve yanal kuvvetleri Şekil 3.4'de verilmiştir. Modelin en büyük avantajı, tüm tekerlek kuvvetleri ve momentlerini verebildiği için hem yanal araç dinamiği hem de boyuna araç dinamiği hesaplamalarında kullanılabilmesidir.

Şekil 3.4'de, çeşitli yanal kayma değerlerine karşılık yanal ve boyuna kuvvetlerin değişimi gösterilmektedir. Boyuna kayma  $s=0$  olduğunda, tekerlek ile yer arasında oluşabilecek toplam kuvvetin tamamı yanal kuvvetler için kullanılabilir. Boyuna kayma miktarı  $s=0.01$  olduğunda, değişen yanal kayma açısına göre, boyuna ve yanal kuvvetlerin değişimi Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Şekil 3.4'ün incelenmesi ile tekerlek

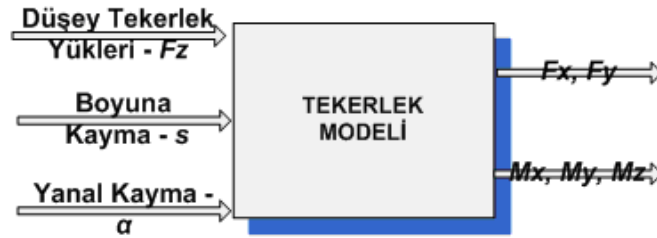
kuvvetlerinde doyma olduğu ve yanal ve boyuna kuvvetlerin birbirinden bağımsız olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.4 : Kayma değerlerine göre tekerlek kuvvetlerinin değışimi

Tekerlek modeline giriş olarak, tekerlek üzerindeki yük, doğrusal kayma ve yanal kayma değerleri kullanılmaktadır (Şekil 3.5).

Çıkış olarak ise dinamik tekerlek yarıçapı, boyuna tekerlek kuvveti, yanal tekerlek kuvveti ve  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenleri etrafında oluşan tekerlek momentleridir.



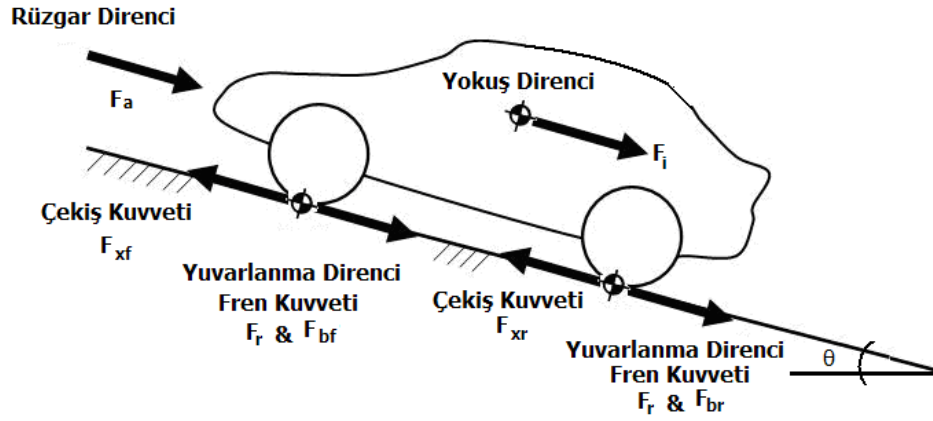
Şekil 3.5 : Tekerlek blok diyagramı

### 3.2 Araca Etkiyen Boyuna ve Düşey Kuvvetler

Boyuna araç dinamiği modelinde, tekerlek kuvvetleri ve araca etkiyen, yokuş, rüzgâr, yuvarlanma direnci gibi dirençlerin bilinmesi durumunda aracın hız ve konumu Newton'un ikinci yasası yardımı ile elde edilebilmektedir [9].

Araç üzerine etkiyen dış kuvvetler aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Şekil 3.6).

- Rüzgâr direnci
- Yokuş direnci
- Yuvarlanma direnci
- İvmelenme direnci
- Fren kuvvetleri



Şekil 3.6 : Araç üzerine etkiyen kuvvetler [9]

### 3.3 Rüzgâr Direnci

Rüzgâr direnci aşağıdaki denkleme göre hesaplanabilmektedir. Burada aracın yan profilinden etkiyen rüzgâr kuvvetleri ihmal edilmiş olup, rüzgârın sadece seyahat doğrultusunda estiği varsayımı yapılmaktadır. Buna göre rüzgâr direnci;

$$F_a = \frac{1}{2} A \rho C_D V_{ref}^2 \quad (3.2)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada;

- $F_a$  : Rüzgâr direnci [N]  
 $A$  : Araç ön cephe alanı [m<sup>2</sup>]  
 $\rho$  : Hava yoğunluğu [kg/m<sup>3</sup>]  
 $C_D$  : Aerodinamik direnç katsayısı  
 $V_{ref}$  : Rüzgâr bağıl hızı [m/s] büyüklerini temsil etmektedir.

### 3.4 Yokuş Direnci

Yokuş direnci basit trigonometrik hesaplar ile elde edilebilmektedir. Burada dikkat edilmesi gerek nokta, araç ağırlığı ve tekerlek yüklerinin eğim ile birlikte değişmesidir.

Yokuş direnci;

$$F_i = W \sin(\theta) \quad (3.3)$$

formülü yardımı ile hesaplanabilmektedir.

Burada;

- $F_i$  : Yokuş direnci [N]  
 $W$  : Araç ağırlığı [N]  
 $\theta$  ise yokuş eğimini temsil etmektedir.

### 3.5 Yuvarlanma Direnci

Tekerleğin elastik yapısı nedeniyle, tekerlek temas merkezinin önünden yuvarlanmaya karşı tekerlek yuvarlanma dirençleri oluşmaktadır. Yuvarlanma direnci, kurulan modelde SAE J2452 standardında belirtilen yöntem ve katsayılar yardımı ile hesaplanmaktadır.

Buna göre;

$$F_r = P^\alpha W^\beta (a + bV + cV^2) \quad (3.4)$$

$P$  : Tekerlek basıncı [kPa]

$W$  : Tekerlekler üzerindeki yük [N]

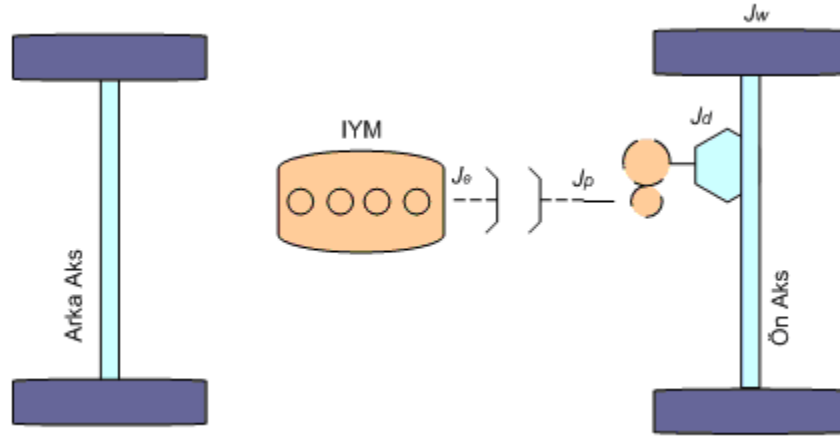
$V$  : Araç hızını [m/s] temsil etmektedir.

$a$ ,  $b$  ve  $c$  deneysel yöntemler ile elde edilmiş katsayılardır.

Tekerlekler aracılığı ile araca etkiyen yuvarlanma direnci aynı zamanda tekerlek modelinde de hesaplanmaktadır. Kolaylık olması açısından yuvarlanma direnci hesabında SAE J2452’de belirtilen yöntem kullanılmıştır [10].

### 3.6 Dönen Kütle Faktörü

Araca kütesinden dolayı etkiyen ivmelenme direncinden başka, araçta dönen aktarma organları da ivmelenme direnci oluşturmaktadır. Bu dönen kütlelerin ataleti her bir vites çevrim oranı için farklı büyüklükte olarak toplam atalet direncine etki etmektedir. Dönen kütle faktörünün hesabı için, dönen organların ataleti kinetik enerji denklemleri yardımı ile aşağıda verildiği şekilde tekerleklere indirgenmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 : Dönen kütle faktörü

$$\frac{J_e \omega_e^2}{2} + \frac{J_p \omega_p^2}{2} + \frac{J_t \omega_t^2}{2} + \frac{mV^2}{2} = \frac{m_{denk} V^2}{2} \quad (3.5)$$

$$\omega_e = \omega_t i_g i_d \quad (3.6)$$

$$\omega_e = \omega_p i_g \quad (3.7)$$

$$V = \omega_t R_e \quad (3.8)$$

$$m_{denk} = m + \frac{\left( \frac{J_e}{(i_g i_d)^2} + \frac{J_p}{(i_d)^2} + J_t \right)}{R_e^2} = \lambda m \quad (3.9)$$

- $J_e$  : Motor atalet momenti  
 $J_p$  : Diferansiyel şaftı atalet momenti  
 $J_t$  : Toplam tekerlek atalet momenti  
 $J_d$  : Diferansiyel atalet momenti  
 $i_g$  : Dişli kutusu çevrim oranı  
 $i_d$  : Diferansiyel çevrim oranı  
 $\omega$  : Açısız hız  
 $\lambda$  : Döner kütle faktörü

Yukarıdaki denkleme göre, her bir vites için elde edilen döner kütle faktörleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

**Tablo 3.1 :** Viteslere göre değişen döner kütle faktörleri

Vites	Döner Kütle Faktörü $\lambda$
1	1.2281
2	1.1184
3	1.0877
4	1.0769
5	1.0725



### 3.7 Boyuna Hareket Denklemi

Araca etkiyen kuvvetlerin toplamından hareketle Newton'un ikinci yasasında kullanılan denklemler yardımı ile aracın ivme ve hız profili hesaplanılabilmektedir.

$$F_{net} = \lambda m a_x = F_{xf} + F_{xr} - F_a - F_i - F_r \quad (3.10)$$

Bir karayolu taşıtında, rüzgâr direnci, yuvarlanma direnci gibi yol yüklerine karşılık, tekerleklere güç organları tarafından aktarılan pozitif çekiş kuvvetleri bulunmaktadır. Dirençler yenildiği takdirde, arta kalan çekiş kuvvetleri aracın ivmelenmesi için kullanılmaktadır. Yukarıda verilen eşitlikte, aracın kütlesi, dönen güç aktarma organları nedeniyle ortaya çıkan dönen kütle faktörü ile çarpılmaktadır [9, 11].

Frenleme durumunda frenleme ivmesi  $b_x$  aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$F_{net} = \lambda m b_x = -F_{bf} - F_{br} - F_a - F_i - F_r \quad (3.11)$$

### 3.8 Motor Modeli

İçten yanmalı motorların iç dinamiklerini incelemek için termodinamik modeller ve sonlu elemanlar yöntemi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Hibrid araç hesaplamalarında, sistemin karmaşık olması, optimizasyon hesaplarının gerekliliği nedeniyle içten yanmalı motor, yakıt tüketimi ve emisyon hesaplamaları, tablolar halinde gösterilmektedir.

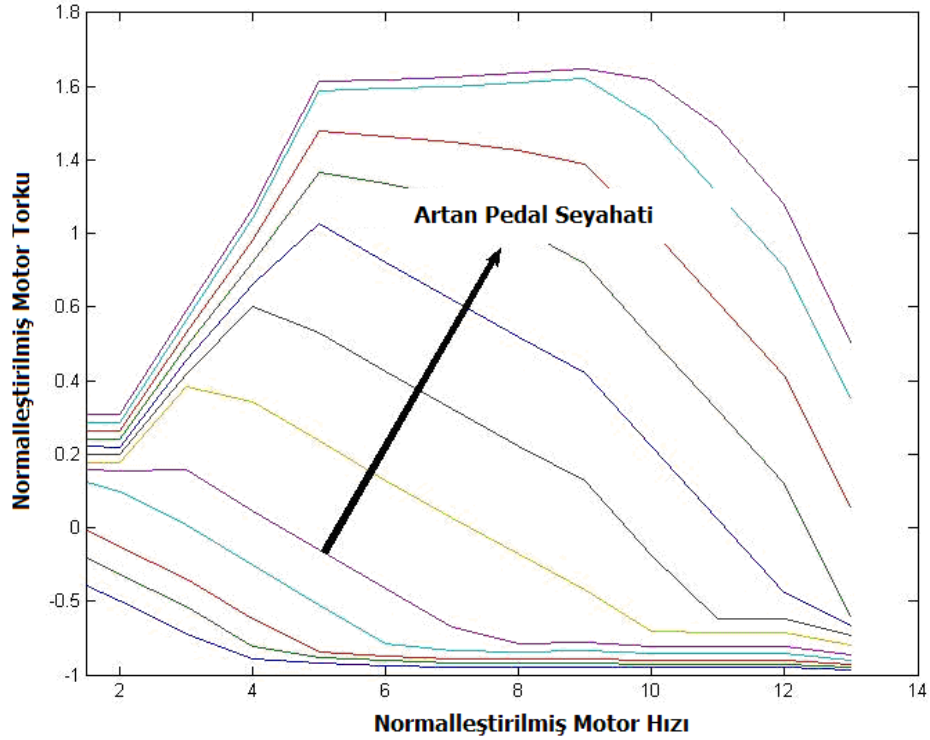
Yakıt tüketimi ve emisyon haritaları deneysel yöntemler ile elde edilmektedir. Elde edilen veriler motorun sürekli rejime girdiği statik durumları için ölçülen değerleri ifade etmektedir. İçten yanmalı motorlar, gaz pedalı açıklığının değiştiği geçici rejim durumlarında daha fazla yakıt tüketmekte ve kirletici gaz emisyon miktarı da artmaktadır. Yakıt tüketimi ve emisyon haritalarında, motorun dinamik davranışları göz ardı edilmiştir.

Motor modeli için yakıt tüketimi ve emisyon haritalarının kullanılması ile birlikte aşağıdaki kabuller yapılmaktadır:

- Silindirler ve her çevrimdeki farklılıklar ihmal edilmektedir.
- Motor sürekli rejim sıcaklığındadır.
- Motorda dinamik rejimler göz ardı edilmiştir.

Geçici rejimlerdeki motor çalışma bölgelerinin emisyon haritaları üzerindeki etkisi, yakıt tüketimi üzerindeki etkisinden daha büyüktür. Bu nedenle, yapılacak optimizasyon çalışmalarında geçici motor rejimlerinin parametrik olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Yapılacak optimizasyon hesaplamalarında, gaz pedalının dinamik hareketleri de hesaplara dahil edilmelidir.

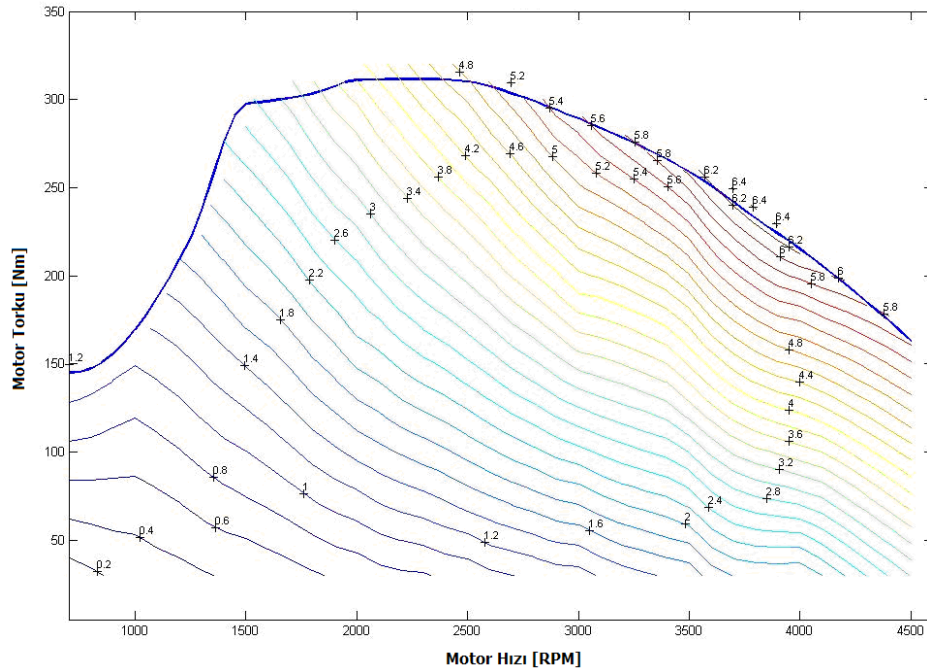
Boyuna hibrid elektrikli araç modelinde içten yanmalı motorun ürettiği tork ve gücü hesaplamak için pedal haritası kullanılmıştır (Şekil 3.8) .



Şekil 3.8 : Pedal haritası

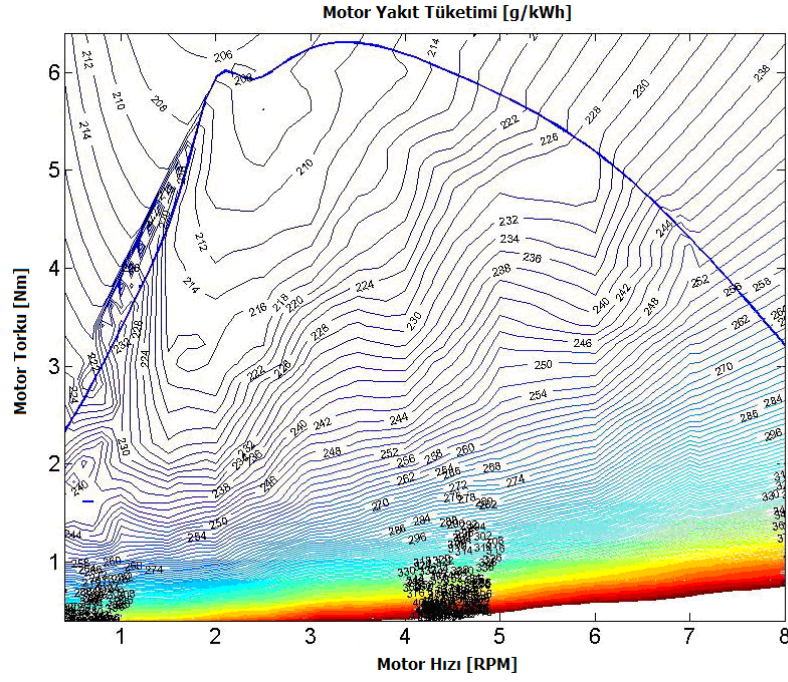
Pedal haritasında motorun vereceği tork miktarı, pedal konumu ve motor hızına göre hesaplanmaktadır.Şekil 3.8’de, belirli pedal konumları ve motor devirleri için motorun negatif tork ürettiği görülmektedir. Motorun negatif tork vermesi, motor iç sürtünme kuvvetleri ve kompresyon freninden kaynaklanmaktadır.

Yakıt tüketimi hesaplamaları için yakıt tüketimi haritaları kullanılmıştır. Çevrim süresince harcanan toplam yakıtın hesaplanabilmesi için yakıt tüketimi haritası (Şekil 3.9), motorun çalışma bölgelerinin optimizasyonu için ise özgül yakıt tüketimi haritası (Şekil 3.10) kullanılmıştır.



**Şekil 3.9 :** Yakıt tüketimi [g/s]

Otomotiv mühendisliğinde yakıt tüketimi genellikle, birim güç başına harcanılan yakıt miktarı (özgül yakıt tüketimi) ile ifade edilmektedir (Şekil 3.10). Özgül yakıt tüketimi haritasında, kütleli olarak püskürtülen yakıtla karşılık elde edilen güç miktarı oranlandığından aynı zamanda yakıt tüketimi ve verim ilişkisi de kolay bir şekilde görselleştirilmektedir.



**Şekil 3.10** : Özgül yakıt tüketimi

İçten yanmalı motorlarda yanma ürünü olarak su buharı ( $H_2O$ ), karbondioksit ( $CO_2$ ), ve azot oksit ( $NO_x$ ) gazları bileşenleri açığa çıkmaktadır. Yanmanın ideal şartlarda gerçekleşmemesi durumunda hidrokarbonlar (HC) ve karbon monoksit (CO) gibi kirlenici gazlar da açığa çıkmaktadır. Yakıt içerisinde bulunan katkı maddeleri de göz önüne alındığında, içten yanmalı bir motorda gerçekleşen yanma sonucunda aşağıda verilen atık gazlar ortaya çıkar.

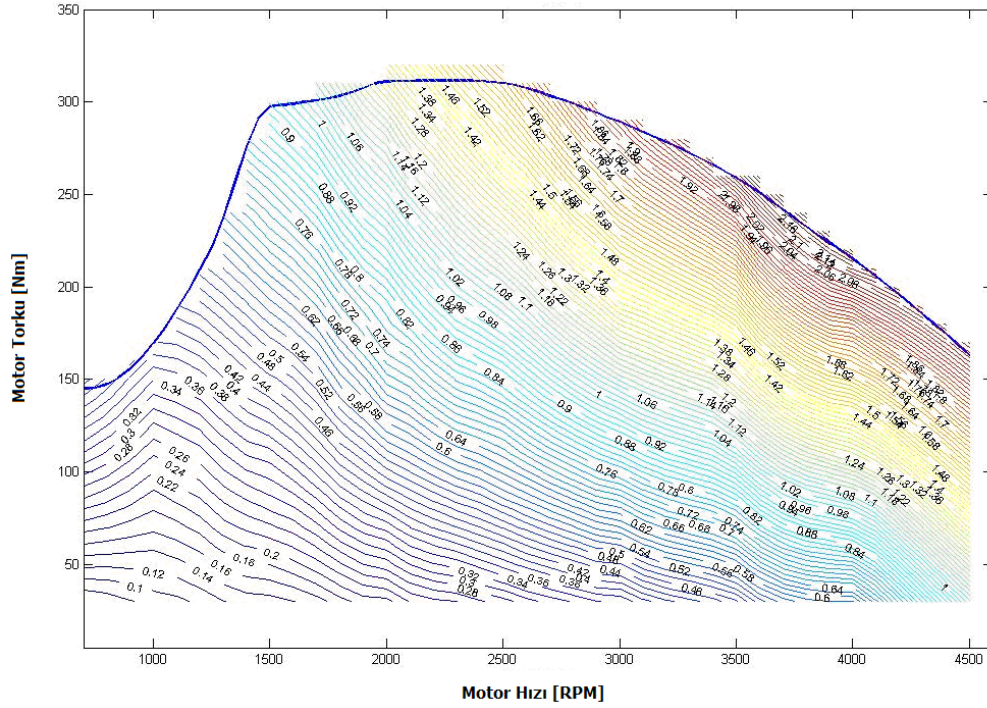
- Yanmamış hidrokarbonlar (HC)
- Karbon monoksit (CO)
- Azot oksitler, ( $NO_x$ )
- Aldehitler (HC, HO vb.)
- İs ve partiküller
- Kükürt dioksit ( $SO_2$ )
- Kurşun bileşenleri [15]

İçten yanmalı motorlardan çevreye yayılan yanma ürünü gazlarının su buharı dışında tamamı insan sağlığına ve çevreye olumsuz etki yaptığından egzoz gazı emisyonlarına sıkı kısıtlamalar getirilmektedir. Tablo 3.2’de Avrupa ülkelerindeki emisyon kısıtlamaları gösterilmiştir. Bu nedenle hibrid elektrikli araç güç dağılımı optimizasyonu için egzoz gazları da probleme dahil edilmektedir.

**Tablo 3.2 : Avrupa Emisyon Regülasyonları**

Standart	Euro-1	Euro-2	Euro-3	Euro-4	Euro-5
Uygulama	1992	1996	2000	2005	2010
<b>Benzinli Araçlar gr/km</b>					
CO	2.72	2.7	2.3	1	1
HC+NO <sub>x</sub>	0.97	0.59	0.35	0.18	-
HC	-	0.34	0.2	0.1	0.05
NO <sub>x</sub>	-	0.25	0.15	0.08	0.08
<b>Dizel Araçlar gr/km</b>					
CO	2.72	1.06	0.64	0.5	1
HC+NO <sub>x</sub>	0.97-1.36	0.71-0.91	0.56	0.3	-
HC	-	-	-	-	0.05
NO <sub>x</sub>	-	0.63-0.81	0.5	0.25	0.08
PM10	0.14-0.19	0.08-0.1	0.05	0.03	0.005

İçten yanmalı motorlarda CO emisyonları yüksek silindir içi sıcaklıklarında tam yanma nedeniyle azalırken, NO<sub>x</sub> gazlarının emisyonları artmaktadır. Motor haritalarında, araç yakıt tüketimi ve emisyon gazlarının her birinin en az olduğu bölgeler birbirleri ile çelişmektedir. Bu nedenle hem yakıt tüketiminin hem de tüm kirlenici gaz emisyon miktarlarının azaltılması birbirleriyle çelişen hedefler ortaya çıkartmaktadır. Hibrid elektrikli araç kontrolünde, optimizasyon problemi tanımlanıyorken, bu durum dikkate alınarak amaç fonksiyonlarında her bir hedef için ağırlık katsayısı öncelik durumuna göre belirlenmelidir. Tez kapsamında emisyon hesaplamaları için emisyon haritaları kullanılmıştır. Örnek bir karbondioksit emisyon haritası Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11 : Motor karbondioksit emisyon haritası

### 3.9 Güç Aktarma Organları

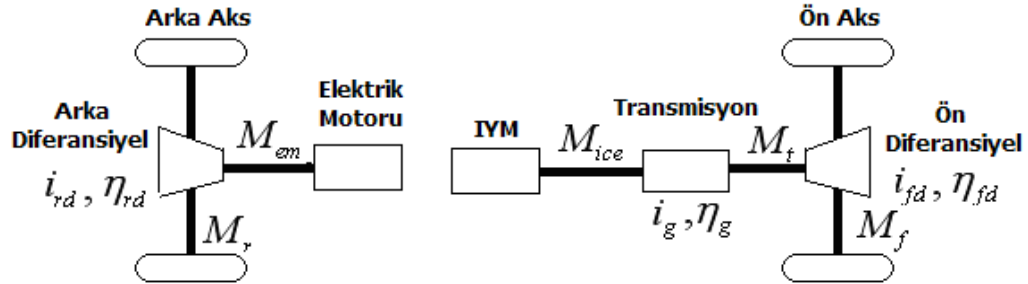
İçten yanmalı motorlar belirli bir hızın altında çalışmadıklarından dolayı, motorlu araçlarda kavrama, vites kutusu gibi hız ve moment dönüştürücü mekanizmalara gereksinim duyulmaktadır. İçten yanmalı motorlar rölanti devrinin altındaki devirlerde kararlı bir çalışma gösteremezler. Bu nedenle araç hızının sürekliliği ve araç sürüşünün konforu için kavrama sistemine, tekerleklerde sürücü tarafından talep edilen çeki kuvvet ve momentlerini, uygun motor devirlerinde karşılayabilmek için vites kutusuna ve aracın dönme manevralarında iç ve dış tekerlek hızlarının kontrol edilebilmesi için, akslar üzerine yerleştirilen diferansiyel mekanizmalarına gereksinim duyulmaktadır. Boyuna araç modeli oluşturulurken bu sistemlerin de model içerisinde matematiksel olarak ifade edilmesi gerekmektedir.

Araç üzerinde bulunan kavrama, iletilen tork sabit kalıyorken bir hız dönüştürücü, vites kutusu ise hız ve moment dönüştürücü olarak kullanılmaktadır. Oluşturulan

hibrid elektrikli araç modelinin optimizasyon çalışmalarına uygunluğu için kavrama mekanizması modellere dahil edilmemiştir. Kavrama, basit bir şekilde, motor ile araç gövdesi bütünleşik, kavrama devrede “bir” ya da motor araç gövdesinden bağımsız, rölanti devrinde “sıfır” şeklinde ikili mantık sisteminde modele dahil edilmiştir.

Modellerde, vites kutusu ve diferansiyel sistemleri ise, karşılıklı olarak, belirli bir çevrim için tekerleklerde ihtiyaç duyulan hız ve momentleri içten yanmalı motora aktarmak için yalnızca verim ve çevrim oranları ile ifade edilmiştir. Üzerinde model oluşturulan ve hesaplamaların yapıldığı hibrid araç güç aktarma organları yapılanması Şekil 3.12’de verilmiştir.

Şekil 3.12’de gösterildiği gibi, içten yanmalı motor ile ön aks tekerlekleri arasındaki hız ve tork ilişkisi arada bulunan hız ve moment dönüştürücülerin karakteristikleri ile kurulabilmektedir. Diğer yandan, arka aks tekerlekleri ile EM arasında yalnızca diferansiyel çevrim oranı vardır [9].



Şekil 3.12 : Aktarma organları [9]

Çevrim oranları dikkate alındığında, güç aktarma organlarındaki matematiksel ilişkiler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$M_r = \eta_{rd} M_{em} i_{rd} \quad (3.12)$$

$$M_f = \eta_{fd} M_t i_{fd} \quad (3.13)$$

$$M_t = \eta_g M_{ice} i_g \quad (3.14)$$

Burada;

$M_r$  : Arka tekerleğe etkiyen tork

$M_{ice}$  : Motor torku

$M_{ice}$  : Motor torku

$M_t$  : Diferansiyel şaftı torku

$M_{em}$  : Elektrik motoru torku

$i_g$  : Dişli kutusu çevrim oranı

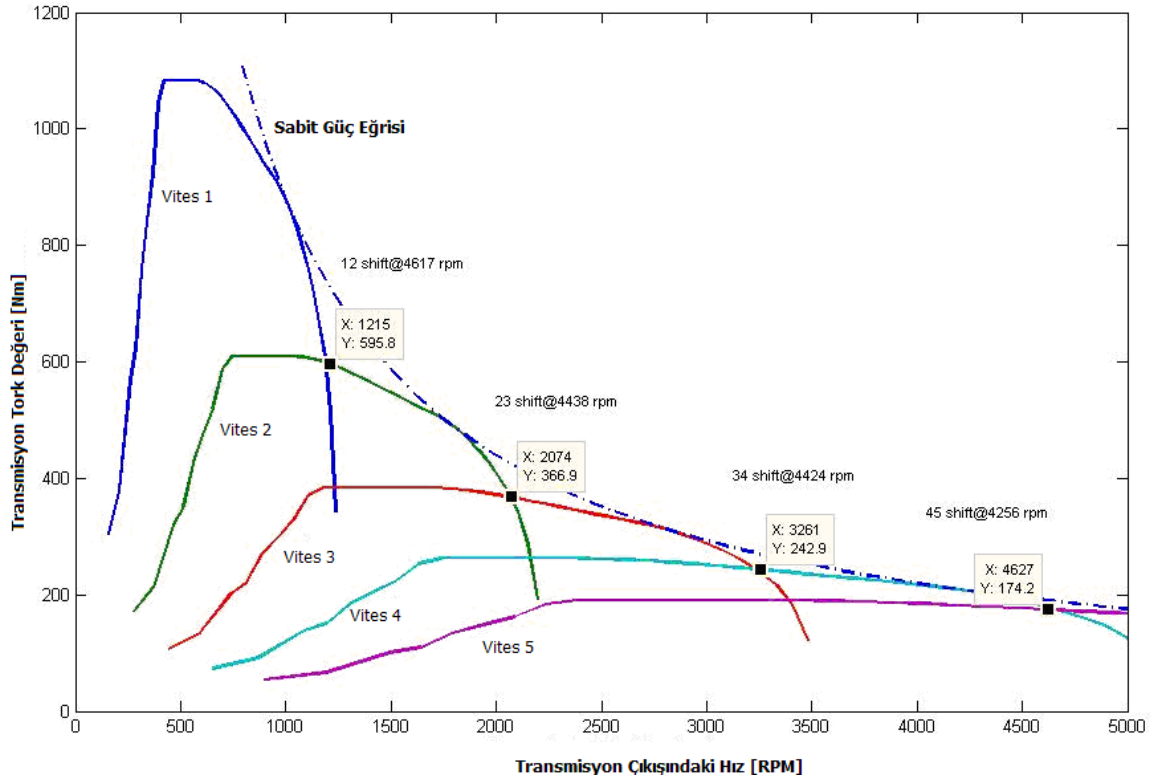
$i_{rd}$  : Arka diferansiyel çevrim oranı

$i_{fd}$  : Ön diferansiyel çevrim oranı

$\eta_{(g), (fd), (rd)}$  : Vites kutusu, ön ve arka diferansiyel verimleridir.

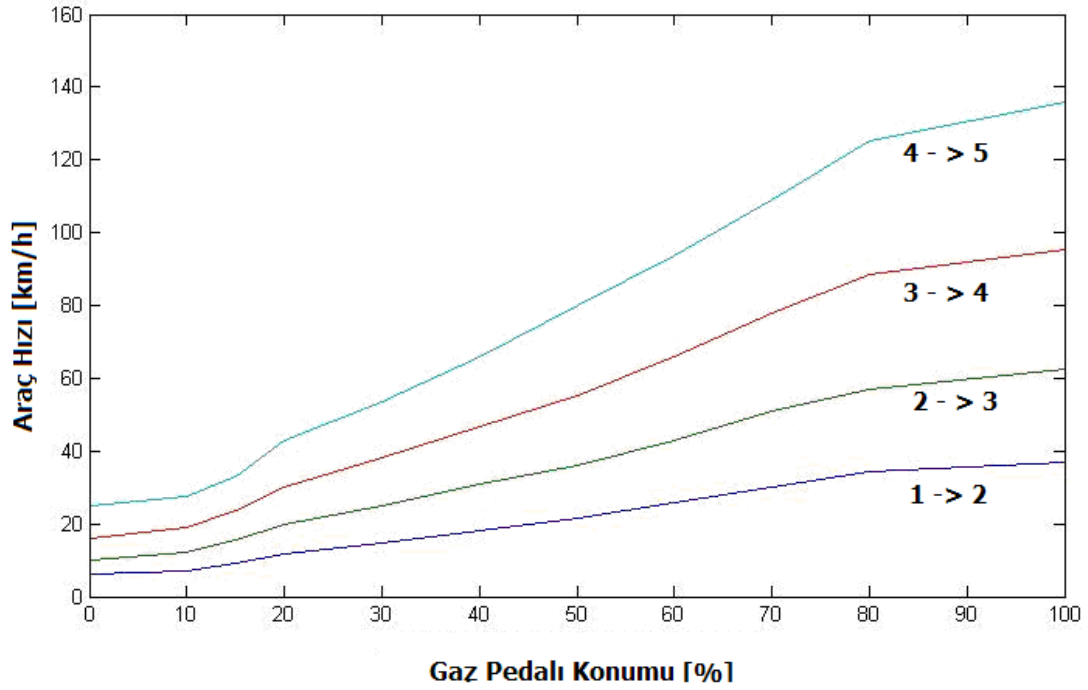
Yukarıda yapılan hesaplamaların yanı sıra, vites değiştirme noktalarının da eldeki motor-pedal haritalarının kullanılarak elde edilebiliyor olması gerekmektedir. Eğer maksimum performans ve maksimum ivmelenme göz önünde bulundurulur ise araç hızı veya motor hızı ile motor torku grafiğinde, eğriler altında kalan alanın maksimum olması için gerekli vites değiştirme noktaları gaz pedalı konumuna göre belirlenebilmektedir (Şekil 3.13).





**Şekil 3.13 :** En iyi ivmelenme vites değiştirme noktaları [11]

Şekil 3.13’de, tekerleklerdeki motor devrinde, %85’lik pedal yer değiştirme miktarına karşılık gelen 1, 2, 3, 4 ve 5’nci viteslerdeki motor momentleri verilmiştir. Maksimum performans için bu eğrilerin kesiştiği noktaların altında kalan alanın da maksimum (maksimum güç) olması gerekmektedir. Bu nedenle %0-%100 pedal yer değiştirmesine karşılık gelen tüm viteslerdeki momentler çizdirilerek kesişme noktaları tablo haline getirildiğinde, her hangi bir gaz pedalı konumu için en uygun vites değiştirme motor devri seçilebilmektedir (Şekil 3.14).



**Şekil 3.14** : Vites yükseltme eğrileri

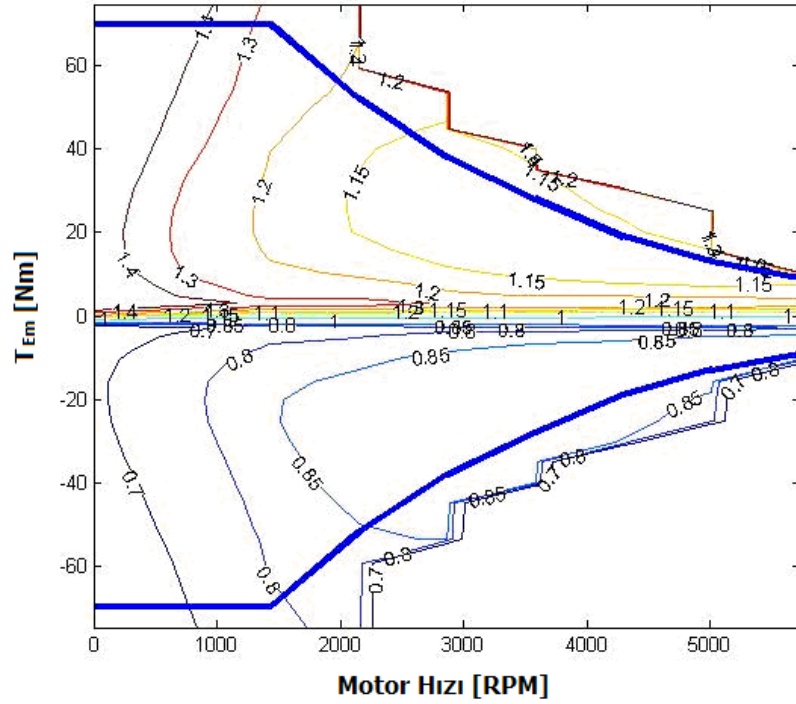
Şekil 3.14'de,  $x$  eksenini gaz pedalı konumunu,  $y$  eksenini ise araç hızını temsil etmektedir. En alttaki eğri aracın 1'nci vitesten 2'nci vitese geçme konumundaki hız-pedal yer değiştirmesi grafiğini ifade etmektedir. Diğerleri ise sırası ile 2-3, 3-4 ve 4-5 vites geçiş konumlarını ifade etmektedir.

Şekil 3.14, vites yükseltmek için kullanılacak grafiği göstermektedir. Her ne kadar aynı grafikler vites küçültme grafiği olarak kullanılabilirler ise de, simülasyonlarda sürekli geçişlere neden olacağından, küçültme grafikleri olarak belirli bir oranda ölçeklendirilmiş grafik kullanılması zorunluluğu vardır.

### 3.10 Elektrik Motoru Modeli

Hibrid elektrikli araçlarda elektrik motoru, içten yanmalı motora ek olarak çalışabilen tahrik elemanıdır. Hibrid yapılanmasında elektrik motoru, içten yanmalı motor ile mekanik bağlantı şekline bağlı olarak, hem İYM'a aracı itmek için destek olmakta hem de İYM' dan aldığı güç ile jeneratör olarak çalıştırılarak bataryayı şarj

edebilmektedir. Aynı zamanda aracın fren yaptığı durumlarda, fren enerjisinin geri kazanımı için yine jeneratör olarak çalıştırılmaktadır. Yapılan hesaplamalarda elektrik motoru için yalnızca verim tabloları ile karakteristik eğrileri kullanılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 : Elektrik motoru verim ve karakteristik eğrisi [12]

Motor tork eğrisi üzerinde gösterilen verim kontör eğrilerinde, tek yönlü verim ifadesi kullanıldığından pozitif tork bölgesinde verim, bir'den büyük değerler almaktadır. Verim ifadesinde, giren enerji, elektrik motorundan istenilen mekanik güç, çıkan enerji ise elektrik motorunun bataryadan çektiği güç olarak kabul edilmektedir.

$$Verim = \frac{VI}{T\omega} \quad (3.15)$$

Burada;

$V$  : Gerilim [Volt]

$I$  : Akım [Amper]

$T$  : Tork [Nm]

$\omega$  : Açısal hız [rad/s]

Elektrik motoru seçiminde dikkat edilecek hususlar, motorun boyutları ve ağırlığı ile verebileceği maksimum tork ve güç ile motor verimliliğidir.

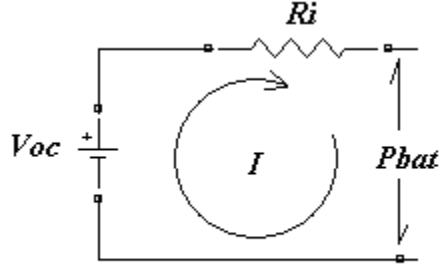
### 3.11 Batarya Modeli

Hibrid elektrikli araçlarda aracın durumunu ve karakteristiğini belirleyen en önemli bileşenlerden biri bataryadır. Yakıt tüketimi ve araç emisyonlarının düşürülmesi için yapılan optimizasyon çalışmalarında, batarya şarjı, batarya şarj derinliği, batarya ömrü denklemlerde ilk sırada ifade edilen büyüklüklerdir. Hibrid elektrikli araçlarda kullanılacak bataryalarda;

- Yüksek enerji yoğunluğu, düşük ağırlık
- Uzun servis ömrü
- Güvenilirlik
- Geri dönüşüm kolaylığı
- Yüksek şarj kabul kapasitesi
- Düşük ısı üretimi
- [-20, +50] derece aralığında performans isteklerinin karşılanması
- Şarj kapasitesinin belirlenmesi kolaylığı
- Kendi kendine düşük deşarj
- Bakım ve hazırlama kolaylığı

gibi özellikler aranmaktadır. Batarya geri dönüşümünün zor, batarya üretiminde kullanılan malzemelerin pahalı ve batarya servis ömrünün kısa olması, hibrid elektrikli araçlarda iyi bir batarya yönetimini gerekli kılmaktadır.

Benzetimlerde kullanılan batarya denklemleri, Şekil 3.16’da verilen eşdeğer devre şeması kullanılarak elde edilmiştir [13].



Şekil 3.16 : Eşdeğer devre diyagramı

Batarya iç direnci  $R_i$ , batarya şarj miktarı (SOC) ile batarya sıcaklığının fonksiyonu olarak modelde tablolardan elde edilmektedir. Şarj ve deşarj sırasında, bataryadan çekilen veya batarya terminaline verilen akım büyüklüğü  $I$ , batarya açık devre voltajı  $V_{oc}$  ve iç direnç kullanılarak hesaplanmaktadır [4, 14, 28].

Buna göre,  $P_s$  ve  $P_{batt}$  sırasıyla batarya iç gücü ve batarya terminal gücü olmak üzere:

$$P_s(t) = V_{oc}(SOC(t))I(t) \quad (3.16)$$

$$P_{batt}(t) = V_{oc}(SOC(t))I(t) - I(t)^2 R_i(SOC(t), sign(P_{batt})) \quad (3.17)$$

Batarya şarj miktarı (SOC) genellikle bataryada kalan şarj'ın  $Q(t)$ , batarya nominal kapasitesine  $Q_0$  oranı olarak verilmektedir. Bu değer 0-1 arasında değişmektedir.

Batarya şarjı hesaplamalarında kullanılan diferansiyel denklemler;

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} \quad (3.18)$$

$$\dot{Q}(t) = I(t) \quad (3.19)$$

$$\frac{dSOC}{dt} = \frac{I(t)}{Q_0} \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Şarj ve deşarj durumlarında, batarya terminalindeki güç ve akım işaret değiştireceğinden ve batarya iç dirençleri bu durumlarda farklılık gösterdiğinden her bir durum için 3.17 denklemi aşağıdaki şekilde düzenlenilebilir.

$$R_i \cdot I(t)_{chg}^2 + V_{oc} \cdot I(t)_{chg} - P_{chg} = 0 \quad (3.21)$$

$$R_i \cdot I(t)_{dischg}^2 - V_{oc} \cdot I(t)_{dischg} + P_{dischg} = 0 \quad (3.22)$$

Şarj akımı, daima pozitif, deşarj akımı daima negatif olacağından, 3.17, 3.20 içerisinde yerine konulduğunda akımlar aşağıda verilmiş denklemler yardımı ile elde edilmektedir.

$$I_{chg} = \frac{-V_{oc} + \sqrt{V_{oc}^2 + 4 \cdot R_i \cdot P_{chg}(t)}}{2R_i} \quad (3.23)$$

$$I_{dischg} = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_i \cdot P_{dischg}(t)}}{2R_i} \quad (3.24)$$

Batarya iç dirençleri nedeniyle, batarya terminalindeki güç ile batarya iç gücü farklı olduğundan batarya verimi aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir. Verim, batarya şarj seviyesi ve iç dirençlerin bir fonksiyonudur.

$$\eta_{batt}(t) = \frac{P_s(t)}{P_{batt}(t)} = \frac{V_{oc} I(t)}{V_{oc} I(t) + I(t)^2 R_i} \quad (3.25)$$

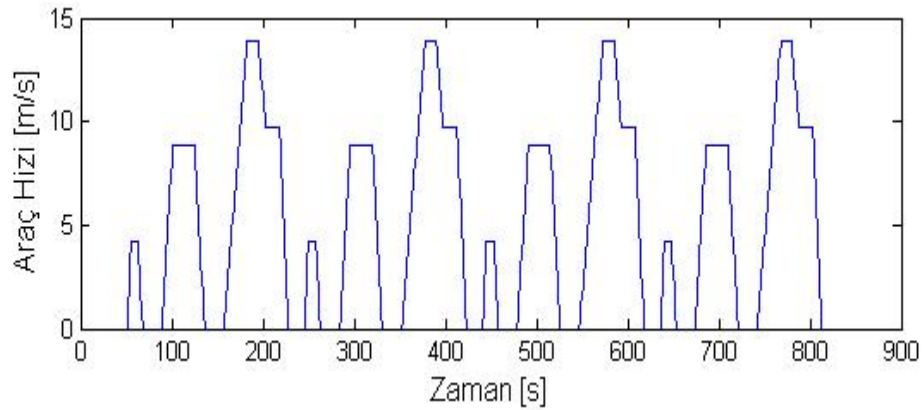
Batarya iç direnci, batarya şarjı *SOC* ve batarya sıcaklığına göre değişim göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda batarya iç direnci daha yüksektir. Bu nedenle, bataryanın çalışacağı hava şartları dikkate alınmalıdır.

Hibrid elektrikli araç kontrolünde hibridleştirilmenin potansiyelinden tam anlamı ile yararlanabilmek için tüm sistemlerinin en verimli oldukları bölgelerde çalıştırılmaları gerekmektedir. Bu nedenle eğer batarya ve elektrik motoru verimleri elde edilebilir ise bu cihazları en verimli oldukları bölgelerde çalıştırabilecek algoritmalar geliştirilebilir.

Batarya servis ömürlerinin henüz istenilen seviyelerde olmaması nedeniyle, batarya ömrünü uzun tutmak için hem batarya sıcaklığı hem de batarya şarj süresi, akım derinliği gibi batarya parametreleri iyi bir şekilde yönetilmelidir.

### 3.12 Sürüş Çevrimleri

Aracın yakıt tüketimi ve atmosfere saldığı kirletici emisyon miktarlarının karşılaştırılması amacıyla sürüş çevrimleri kullanılmaktadır. Yapılan hesaplamalarda Avrupa için geçerli olan ECE R15 ve NEDC çevrimleri kullanılmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 : ECE R15 – NEDC Sürüş çevrimleri

Sürüş çevrimlerinde her zaman dilimine karşılık gelen araç hızı ve o hızdaki vitesler tablolar halinde belirlenmektedir.

### 3.13 Hibrid Araçlarda Kontrol Yöntemleri

Hibrid elektrikli araç kontrol strateji, sürücünün talep ettiği gücü, verimli bölgeler göz önüne alınarak optimum şekilde iki güç kaynağı arasında paylaşımına esasına dayanmaktadır. Hibrid elektrikli araç kontrolünde genellikle yakıt tüketimi azaltılmaya çalışılırken, emisyon değerlerinin de azaltılması ek hedef olarak belirlenir. Emisyon hedefleri ile araç performansı ve yakıt tüketiminin düşürülmesi çelişen hedeflerdir. Bu nedenle bu tür bir problem optimizasyon algoritmaları kullanılarak çözülebilir.

Optimizasyon problemi kuruluyorken aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir.

- İYM' un geçici rejimlerde çalıştırılmaması
- Batarya sıcaklığı, şarj – deşarj derinliği ve bataryanın devreye girme sıklığı
- Motor açma-kapatma sırasında, motor ve katalitik konvertör sıcaklıkları
- Bütün sistemin ortak verimliliğinin yüksek tutulması
- Fren enerjisinin olabildiğince yüksek oranlarda geri kazanılması.

Yakıt tüketim miktarı ile egzoz gazları verilen bir çevrimde toplanarak hesaplandığı için global optimum, optimal kontrol yöntemleri ile elde edilebilmektedir. Hibrid araç sisteminde birçok parametre ve bileşen oluşu, optimizasyon problemini güçleştirmektedir. Sistemde, ayrık ve sürekli dinamik hesaplamaların bulunması bu tür bir optimizasyon probleminin analitik olarak çözülmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle çeşitli kontrol uygulamaları geliştirilmiştir. Genel olarak hibrid elektrikli araç kontrolünde yapılan çalışmalar, öğrenmeye dayalı kontrol yöntemleri [16-17], global optimizasyon [18-19] ve anlık optimizasyon yöntemleri [20-22] şeklinde üç başlık altında toplanmaktadır. Birinci tip kontrol yöntemlerinde çeşitli kurallar belirlenmektedir. Örneğin, sürücünün araçtan talep ettiği güç miktarı önceden belirlenen bir değerin altında ise yalnızca elektrik motoru, üzerinde ise yalnızca içten yanmalı motor veya her iki güç kaynağı kullanılabilir. Kural tabanlı kontrolüne verilebilecek örneklerden bir tanesi güç dengeleme yöntemidir [23]. Bu kontrol yaklaşımında, eğer batarya şarj miktarı belirlenen minimum batarya şarj miktarından



büyük ise motor belli güç değerlerinin altında kapatılarak araç yalnızca elektrik motoru ile hareket ettirilmektedir. Batarya şarjının düşük olduğu durumlarda ise, motor yüklenilerek verimli bir bölgede çalıştırılmaktadır. Bu durumda motordan elde edilen fazladan güç miktarı elektrik motorunun bataryayı şarj etmesi için kullanılmaktadır.

Diğer bir kural tabanlı kontrol yöntemi ise bulanık mantık denetimidir [17]. Bu kontrol yönteminde kural tabanlı kontrol yöntemine avantaj olarak, çalışma noktaları üye fonksiyonlar kullanılarak ayarlanabilir olmasıdır. Bulanık mantık tabanlı bir kontrolcüde kurallar ikiden fazla derecede ifade edilebildiğinden daha yumuşak geçişler mümkün olmakla birlikte, matematiksel tabanı nedeniyle optimizasyona da elverişlidir. Bununla birlikte model belirsizliği olan karmaşık sistemlerin kontrolünde de kullanılıyor olabilmeleri, kural tabanlı kontrole göre avantaj sağlamaktadır.

Kural tabanlı kontrol yöntemlerinde genellikle, kurallar, önceden yapılan çevrim dışı optimizasyon hesaplamalarının incelenmesi sonucu elde edilmektedir. Hibrid elektrikli araçlarda global optimumun hesaplanabilmesi için kullanılan sayısal yöntemlerden biri de dinamik programlamadır. Bu hesaplar sadece belirli bir çevrim için yapıldığından ve araç seyahatinde trafik ve yol şartları değiştiğinden yapılan hesaplarda elde edilen sonuçlar da hesaplanıldığı çevrim için global optimum değerlerini vermektedir. Çözüm için, Dinamik Programlama (DP) kullanıldığında, hesaplamalar, problemin boyutunun büyük olması nedeniyle uzun sürdüğünden, DP araç seyahat halinde iken uygulanamamaktadır [18-19]. Bu nedenle güç paylaşımının yapılması için, global optimum yerine lokal, anlık optimumu veren yöntemler önerilmiştir.

Anlık optimumu veren ve global optimum sonuçlarına yakınsayan kontrol yöntemleri, eşdeğer yakıt tüketimi hesapları üzerine kurulmuştur. Dinamik programlama yönteminde, batarya şarjının korunması ana sınırlamalardan biridir. Eşdeğer yakıt tüketiminde ise bataryadan çekilen veya bataryaya gönderilen şarj miktarının yakıtı karşılık gelen miktarı hesaplanmaktadır.

Bu kontrol yöntemlerinin yanı sıra yine global optimuma yaklaşan çözümler elde etmek için, sürüş profilinin tanımlanması, öngörülü kontrol gibi farklı yöntemler geliştirilmiştir [24-25].

Yakıt tüketimi ve katalitik konvertör çıkış emisyonları sürüş profiline ve sürücü davranışına bağlıdır. Sürüş profilini tanımlama yönteminde çeşitli tiplerdeki çevrimler, ortalama hız, durma zamanı, toplam zaman, ortalama ivmelenme gibi değerler ile ifade edilerek, şablonlaştırılır [24]. Sürüş sırasında kontrolcü, önceden eğitilen yapay sinir ağları yardımı ile hangi çevrimin hangi profile uyduğunu belirleyerek, yine önceden elde edilmiş optimizasyon çalışmalarından yola çıkarak oluşturulan kurallar ile kontrol algoritmasını değiştirmektedir.

Dinamik programlamanın gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılması zordur. Dinamik programla;

- Gelecek sürüş çevriminin bilinmesi
- Sürüş çevrimindeki beklenilmeyen değişikliklere karşı esnek olmaması
- Yüksek hesaplama kapasitesi gereksinimleri nedeniyle gerçek zamanlı olarak uygulanamamaktadır.

Ön görülü kontrolde, gerçek zamanlı uygulama için, araç seyahat halinde iken, aracın belirli bir gelecek ufku kadar olan hız profili, istatistiksel yöntemler ile tahmin edilerek, bu aralıkta dinamik programlama yöntemi ile optimum güç dağılımı hesaplanabilmektedir.

Hibrid araçlarda kullanılan öngörülü kontrol yönteminin bir türü ise, geri çekilen ufuk (receding horizon) yöntemidir. Bu yöntemde, geçmiş verilerden belli bir zaman ufku içerisindeki gelecek veriler öngörülerek, kontrol sinyalleri hazırlanır ( $u(k), \dots, k+N|k$ ). Bu kontrol sinyalinin yalnızca ilk değeri uygulandıktan sonra, ölçülen yeni değişkenler üzerinden yeni gelecek değerler hesaplanır ve zaman ufku bir adım ileriye kaydırılır [25].

Bir değişkenin geçmiş değerleri üzerinden gelecek değerlerinin hesaplanması için bir modele ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekteki değerler aynı zamanda belirsizlik içerdiğinden, kullanılan modellerde belirsizlik etkisini de modellemek amacı ile AR-MA modelleri kullanılmaktadır. İlerleyen bölümlerde bu modelleme yöntemi ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

#### 4. FOHEV-I HİBRİD ELEKTRİKLİ ARACIN YAPISI VE KONTROLÜ

Doktora tezinin bu bölümü, Ford-Otosan, Tübitak-Mam, İTÜ-Otam ve İTÜ-Mekar araştırma kurumlarınca üzerinde çalışılan iki akstan tahrikli hibrid elektrikli araç projesi (Fohev-I) kapsamında ortaya çıkan hibrid elektrikli araç prototiplerinin yapısı ve kontrol algoritması üzerinedir. Ortak yürütülen çalışmalarda, iki adet, iki akstan tahrikli hibrid elektrikli araç prototipi hazırlanmıştır. Konsept araç olarak hibride dönüştürülmesi kolay olduğundan, piyasada hem önden hem arkadan tahrik versiyonları bulunan ön aks tahrikli Ford Transit Van hafif ticari araç seçilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : Prototiplerde kullanılan Ford Transit Van modeli

##### 4.1 Fohev-I Aracının Yapısı

Mevcut araç güç aktarım organları üzerinde hiç bir şekilde değişiklik yapılmadan, arka aksa bir elektrik motoru bağlanarak hibrid elektrikli araca dönüştürülmüştür. Araç üzerinde manüel vites kutusu bulunmaktadır. Elektrik motoru arka aksa bağlandığından vites kutusu ve içten yanmalı motor ile her hangi bir mekanik

bağlantıya sahip değildir. Bu nedenle hibridleştirme esnasında büyük yapısal değişiklikler gerekmemiştir.

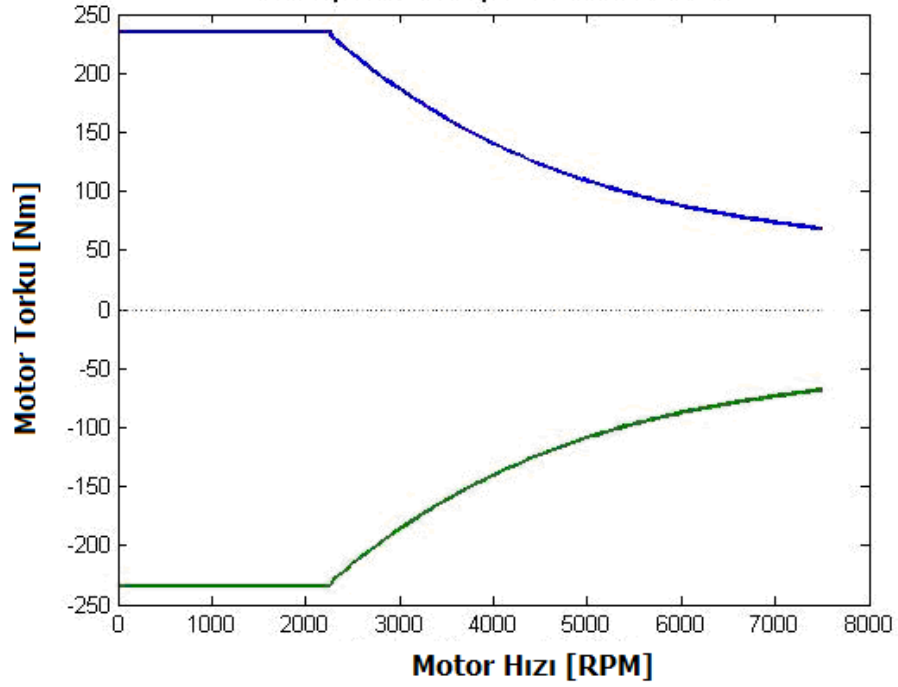
Daha önce de belirtildiği gibi, hibrid araç tasarımında iki yöntem mevcuttur. Bu yöntemler sırası ile var olan bir aracın hibridleştirilmesi ya da en baştan hibrid bir aracın tasarlanmasıdır. En baştan hibrid araç tasarımı yapılırken öncelikle aracın, yokuş çıkma, ivmelenme gibi performans hedefleri belirlendikten sonra, uygun güç organları kapasiteleri ve bunların birbirleri ile olan bağlantı şekillerine karar verilmektedir. Mevcut bir araç hibridleştirildiğinde, elektrik motorunun yerleşimine göre araç güç aktarma organları üzerinde değişiklikler yapmak gerekebilmektedir. Hibrid elektrikli araçların bütün potansiyelinden yararlanabilmek için içten yanmalı motorunun da performans hedeflerine uygun olarak küçültülmesi gerekmektedir. Fohev-I projesinde araç üzerindeki motor değiştirilmeden hibridleştirme gerçekleştirilmiştir. Önden bir dizel motor ile tahrik edilen konvansiyonel bir aracın arka aksına bir elektrik motorunun bağlanması 2+2 çekişli bir aracın avantajlarını da yanında getirmektedir. Böylelikle kaygan yollarda kararlılık için her iki aks ta araç kararlılığı için kullanılabilir. Araç üzerinde sadece arka aksın elektrik motoru ile tahrik edilmesi, geri kazanımlı frenleme durumunda sadece arka aksa düşen frenleme enerjisinin geri kazanılabilmesi olanağını sağlamaktadır. Aracın ısı olarak dışarı attığı frenleme enerjisinden olabildiğince yararlanabilmek için mümkünse her iki akstan da geri kazanımlı frenleme yapılması yararlı olur. Bu hibrid araç düzenlemesinde bir dezavantaj, batarya şarj modunda, araç seyahat halinde iken içten yanmalı motordan şarj için alınan ek gücün elektrik motoruna iletilinceye kadar izlediği yolun (İYM, kavrama, vites kutusu, diferansiyel, tekerlek, diferansiyel, elektrik motoru ) uzun ve bu nedenle şarj veriminin düşük olmasıdır.

Hibrid dönüşümü için UQM firması tarafından üretilen 30 kW sabit, 75 kW anlık güç verebilen bir Doğru Akım (DC) elektrik motoru seçilmiş ve kullanılmıştır (Şekil 4.2). Motorun sağlayabildiği en yüksek tork 240 Nm'dir (Şekil 4.3). Araç üzerindeki mevcut dizel motorun, 90 kW güç ve 340 Nm tork sağlayabildiği düşünüldüğünde

seçilen elektrik motorunun küçük boyutlarına ve hafif olmasına rağmen oldukça iyi performansa sahip olduğu görülebilir.

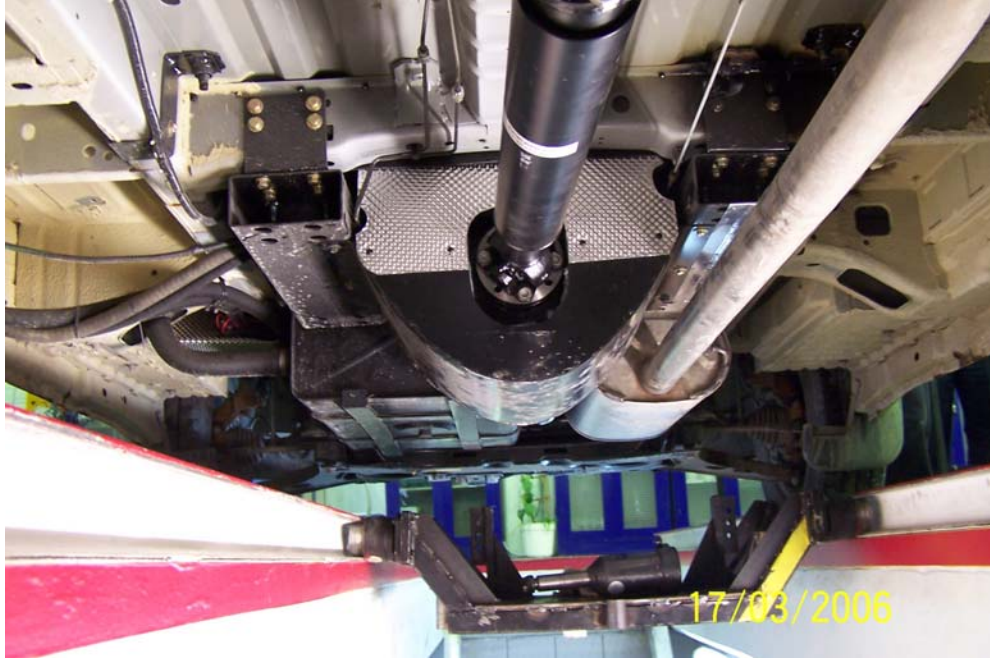


Şekil 4.2 : UQM elektrik motoru [44]



Şekil 4.3 : Elektrik motoru tork - hız karakteristiği [12]

Elektrik motoru bir şaft yardımı ile arka aksa monte edilmiştir (Şekil 4.4). Motor boyutlarının küçük olması ve doğrudan arka aksa bağlanabilmesi nedeniyle araç faydalı hacminden kayıp olmamıştır.



Şekil 4.4 : Elektrik motoru yerleşimi

Elektrik motorunun elektrik ihtiyacı için toplam üç ayrı paketten oluşan Cobasys marka NiMH batarya kullanılmıştır (Şekil 4.5). Batarya, birbirlerine seri olarak bağlanmış her biri 12 V kapasiteli 24 adet modülden oluşmaktadır. Batarya karakteristikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 : Batarya karakteristikleri [45]

Kapasite	Anlık Güç	Gerilim	Enerji	Ağırlık
8.5 Ah	60 kW	288 V	2.4 kWh	150 Kg



Şekil 4.5. Batarya yerleşimi

Batarya gücü sıcaklık ile büyük oranda farklılık gösterdiğinden, kullanım kılavuzunda bataryanın 25-45 °C aralığında çalıştırılması önerilmektedir. Hedef sıcaklık ise 35 °C olmalıdır [45]. Hem batarya hem de elektrik motoru, araç üzerine, motor soğutma radyatöründen ayrı olarak kurulan radyatörlü bir soğutma düzeneği ile soğutulmaktadır (Şekil 4.6).

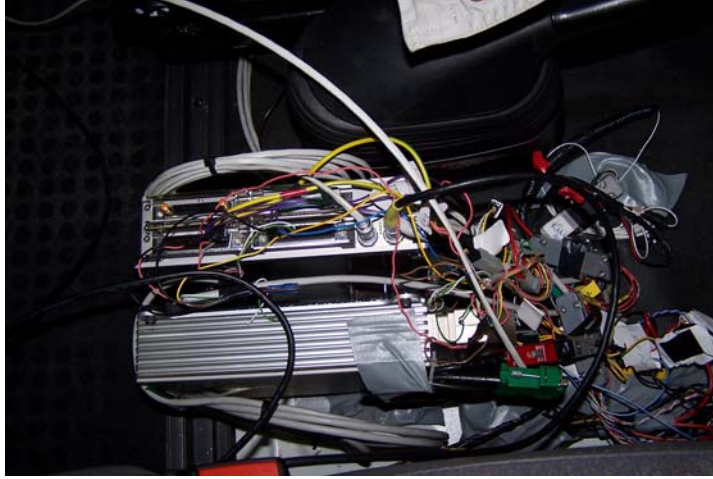


Şekil 4.6 : Batarya ve elektrik motoru için araca eklenen radyatör



## 4.2 Fohev-I Aracı Kontrol Sistemi Donanımı

Hibrid elektrikli araçta, ana kontrolcü olarak dSpace MicroAutobox işlemci ünitesi ve RapidPro sinyal şartlandırıcıları kullanılmıştır (Şekil 4.7).

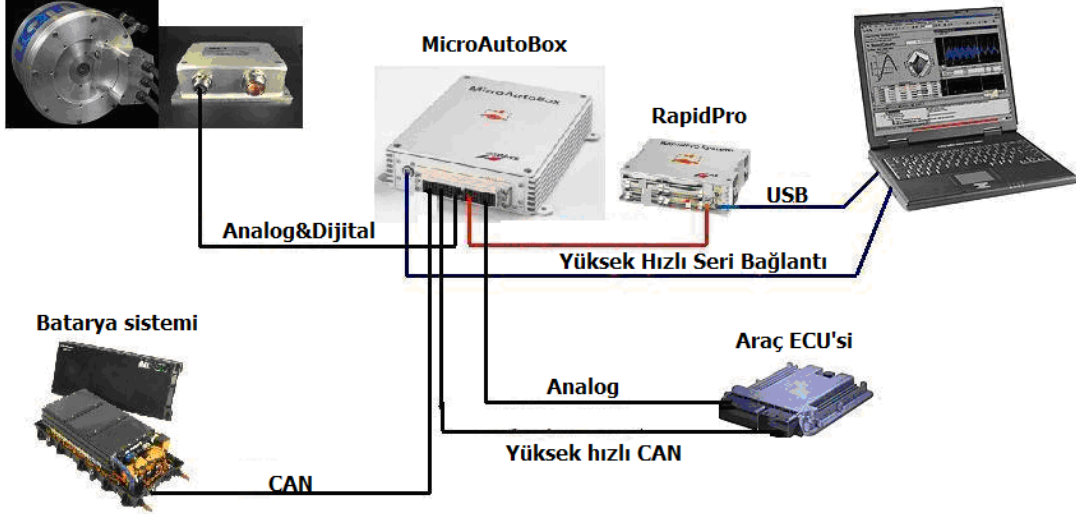


**Şekil 4.7 :** Prototip araçta HEA kontrolcüsü olarak kullanılan dSpace sistemleri

Alınan ve gönderilen sinyal seviyelerini kontrol etmek amacı ile RapidPro, aracın içerisinde bulunduğu durumu tespit etmek, sinyal göndermek ve işlem yapmak amacıyla da MicroAutobox (MABX) kullanılmıştır. MABX ve RapidPro sinyal şartlandırıcınının, elektrik motoru, batarya, içten yanmalı motor kontrolcü ünitesi ve tekerlek açışal hız ABS sensörleri gibi araç üzerinde bulunan diğer donanımlarla ilişkisi Şekil 4.8'de şematik olarak gösterilmiştir.

Sinyaller, analog ve sayısal olarak, MABX ve RapidPro sistemlerinin bağlantılı olduğu sistemlerden okunmakta, MABX üzerinde yüklü olan, kural tabanlı kontrolcü üzerinden, araç üzerindeki bileşenlere kontrol sinyalleri gönderilmektedir. Konvansiyonel aracı kontrol eden, Elektronik Kontrol Ünitesi (ECU) yazılımına müdahale edilmemiştir. Konvansiyonel aracı kontrol eden, ECU'ne gönderilen gaz pedalı sinyallerine müdahale edilerek ve elektrik motoru ile bataryayı kontrol ederek hibrid araç kontrolü gerçekleştirilmiştir.

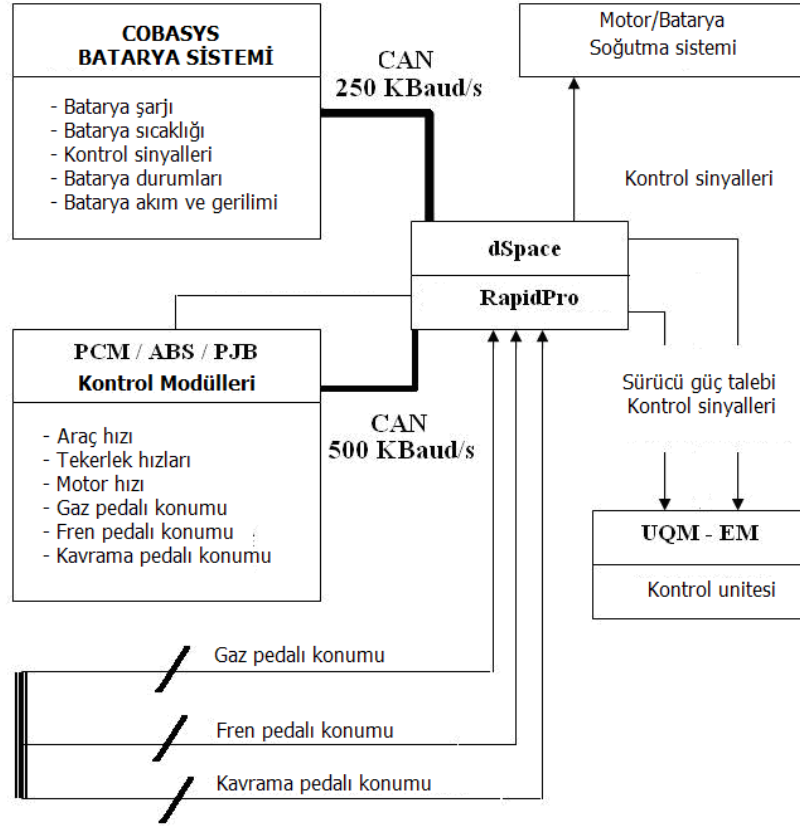
#### Elektrik motoru ve kontrolcüsü



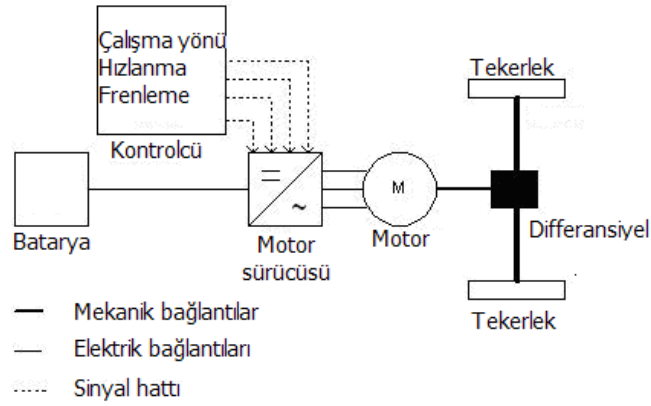
Şekil 4.8 : Elektronik kontrol ünitesi bağlantı şeması [11]

MABX ve RapidPro tarafından okunan ve oluşturulan sinyaller, araç, motor ve tekerlek hızları, fren, gaz ve kavrama pedalı konumları, vites pozisyonu ve batarya ve MABX üzerinden sistemlere gönderilen kontrol sinyaleridir. Araç ve batarya sinyalleri, CAN (Controller Area Network) üzerinden okunmaktadır. Elektrik motoru, üzerinde mevcut bir CAN bağlantısı olmasına rağmen analog sinyaller ile kontrol edilmiştir. Okunan sinyaller ve sinyal bağlantıları diyagramda verilmiştir (Şekil 4.9).

Elektrik motoru arka aksa bağlanmıştır. Elektrik motorunun, batarya ve kontrolcü ile olan elektriksel bağlantıları ile araca mekanik olarak bağlanma şekli diyagramda gösterilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.9 : Sinyal akış şeması [11].



Şekil 4.10 : Elektrik motoru elektriksel ve mekanik bağlantıları [11]



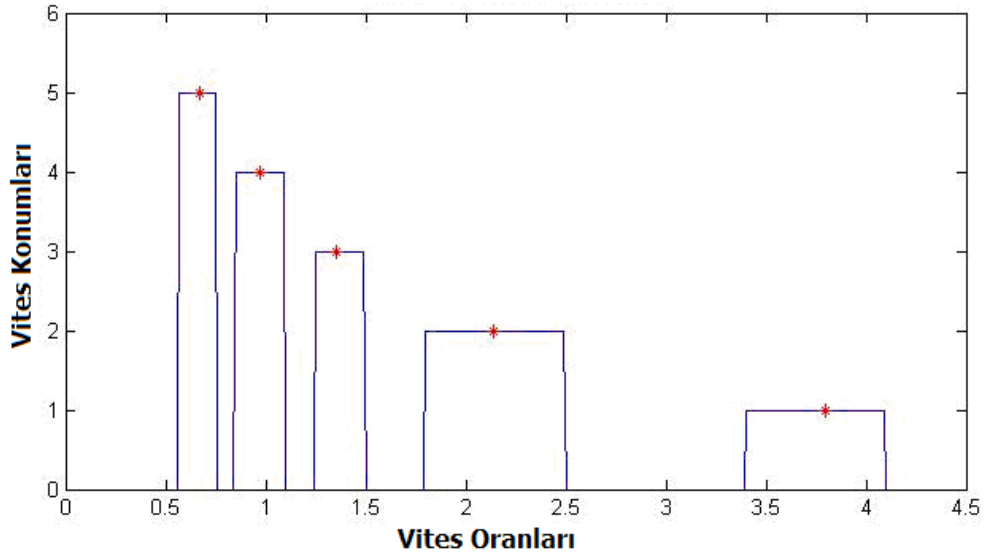
- Aracın duruyor olması
- Aracın yalnızca elektrik motoru ile tahrik edilmesi
- Aracın yalnızca içten yanmalı motor ile tahrik edilmesi
- Araç seyahat halinde iken, içten yanmalı motor ile tahrik ediliyor iken elektrik motorunun jeneratör olarak çalıştırılması ya da elektrik motorunun içten yanmalı motorla birlikte aracı tahrik etmesi (EM destek modu)
- Aracın frenliyor olması (rejeneratif frenleme)

ana durumları söz konusudur.

Aracın hangi durumda olduğu, araca yerleştirilen ve araç elektronik kontrol biriminden elde edilen sensor verileri değerlendirilerek yapılmaktadır. Örneğin, sensörlerden elde edilen araç hızı değeri 5 km/h hız değerinin altında ise araç hareketsiz olarak kabul edilmektedir. Araç duruyor iken içten yanmalı motor rölanti devrinde çalışmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi hibrid elektrikli araçlarda, yakıt ekonomisini iyileştirmek için motor kapatma ve açma seçeneği yüksek oranda yakıt tüketimi düşürme olanağı vermektedir. İçten yanmalı motorlar devre dışı bırakıldığında, fren, direksiyon gibi yardımcı donanımların gücünü elektrik aksamından alacak şekilde tasarlanmalıdır. Oluşturulan prototiplerde, yardımcı donanımlarda bir değişiklik yapılmadığından, aracın durduğu durumlarda içten yanmalı motor, konvansiyonel araçtaki şekliyle rölanti devrinde çalıştırılmaktadır.

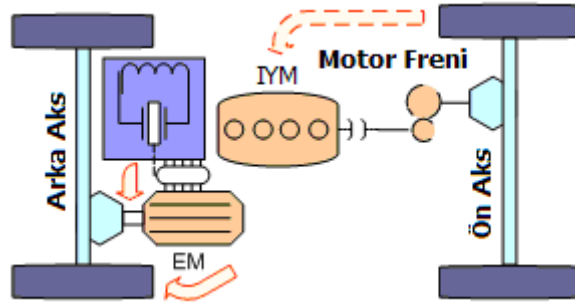
Araç, hareket halinde iken eğer araç hızı 40 km/h hızın altında ise ve batarya yeterince doluyorsa araç yalnızca elektrik motoru ile tahrik edilir. Bu durumda sürücü aracı konvansiyonel aracı kullandığı şekliyle vites değiştirerek kullanabilmektedir. Sürücünün güç talebi, gaz pedalı pozisyonu ölçülerek değerlendirilmektedir. Sürücünün içten yanmalı motordan istediği tork miktarı, pedal haritasından pedal yer değiştirme miktarına karşılık gelen içten yanmalı motorun verdiği tork değeridir. Motor çıkışından elde edilen bu tork miktarı, aracın o andaki vites çevrim oranı ile çarpılarak ön tekerleklerdeki, arka diferansiyel çevrim oranına bölünerek elektrik motoru milindeki tork gereksinimi hesap edilmektedir.

Bu hesap için vites konumunun hesaplanması gerekmektedir. Araç elektronik kontrol ünitesinden MABX ile okunan motor devri ile araç hızı birbirlerine bölünerek o andaki vites konumu ve vites çevrim oranı kolaylıkla hesaplanılabilmektedir. Motor devri ve araç hızı salınımları nedeniyle, elde edilen oranlar için bir bant genişliği belirlenmiştir (Şekil 4.12). Hesaplanan oranlar hangi bant genişliği içerisinde ise vites çevrim oranı da o bant içerisindeki oran olarak alınmaktadır.



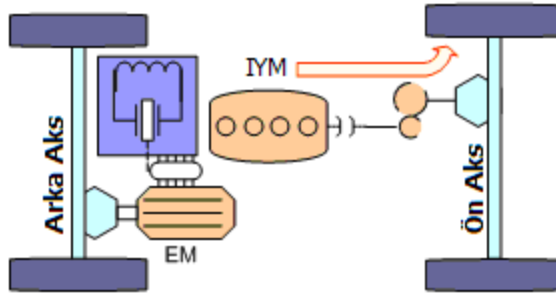
Şekil 4.12 : Vites çevrim oranları bant genişlikleri [11]

Araç yalnızca elektrik motoru ile tahrik ediliyorken, kontrol algoritması tarafından devreye alınıp çıkartılabilecek kontrollü bir kavrama olmaması nedeniyle içten yanmalı motor daima gövde ile mekanik bağlantılı durumda olacaktır (Şekil 4.13). Bu durumda içten yanmalı motora gaz gönderilmediğinden, motor bir yandan araç hızını takip etmekteyken diğer yandan, motor devrinin fazla olması ve motora yakıt püskürtülmemesi nedeniyle oluşan yüksek sürtünme kayıpları da elektrik motoruna yüklenmektedir. Bu durumda bataryada, aracı sürmek için gerekenden daha fazla şarj bu durum telafi edilmektedir.



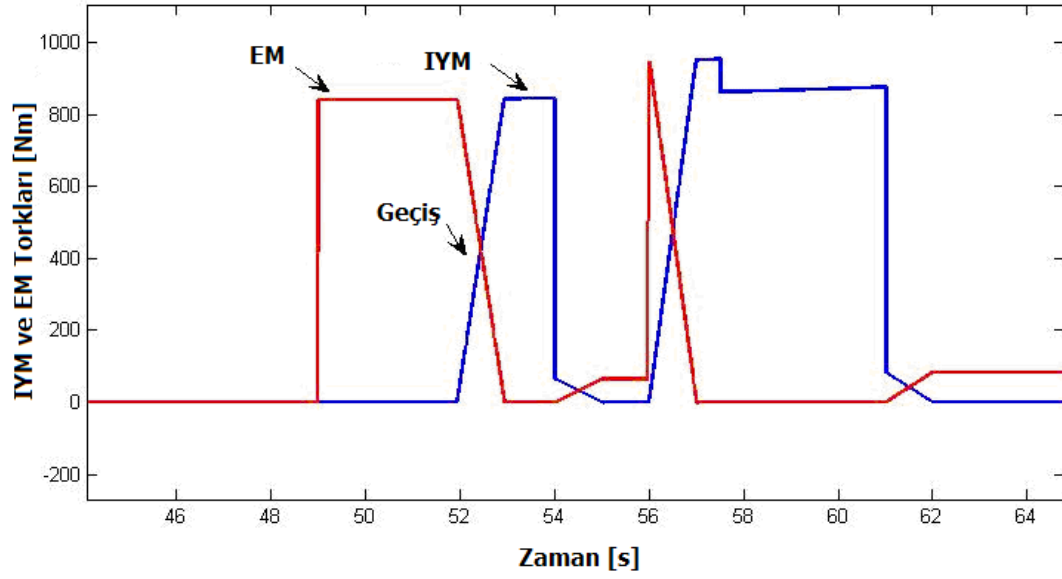
Şekil 4.13 : Yalnız EM modunda güç akışı

Araç, hızı 40 km/h hızı aştığında, yalnız elektrik motoru ile tahrik edildiği durumdan yalnız İYM ile tahrik edildiği duruma geçmektedir (Şekil 4.14).

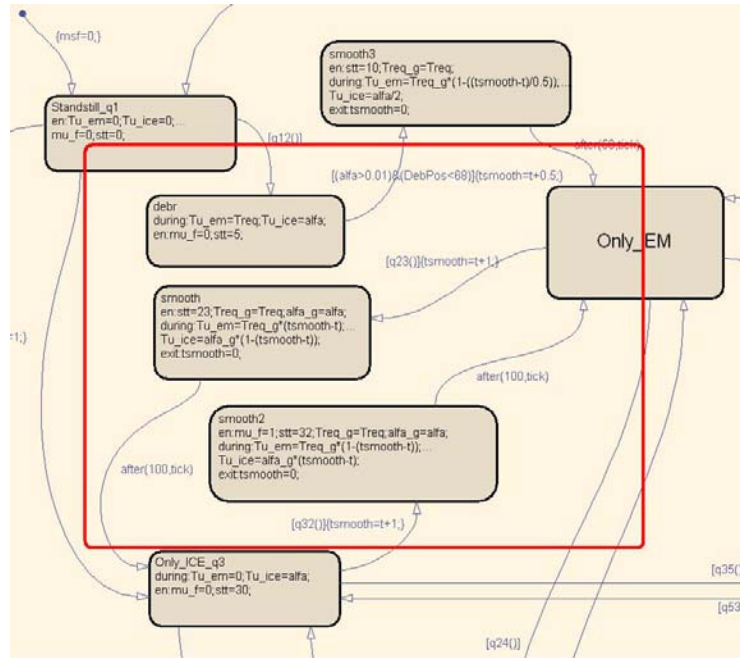


Şekil 4.14 : Yalnız İYM ile tahrik durumu

Değişik tahrik modları arasındaki geçişler esnasında sürücüyü rahatsız edecek geçiş gürültüleri olmaması amacı ile geçiş noktalarına histerisiz konulmuş ve geçişlerin yumuşak olması için kademeli geçiş kontrolü uygulanmıştır. Hibrid araç, 40 km/h hız değeri aşıldığında yalnız içten yanmalı motor ile çalıştırılma durumuna geçer iken, hız 37 km/h altına düştüğünde elektrik motoru modu devreye girer. Geçişler bölgesinde, bir güç kaynağı kademeli olarak devreden çıkıyorken diğer güç kaynağı, belirlenen süre içerisinde kademeli olarak devreye girdiğinden, sürücü, geçişlerde karşılaşılabilecek ani durum değişikliklerini hissetmemektedir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Durumlar arası geçiş profili – tork paylaşımı [11]



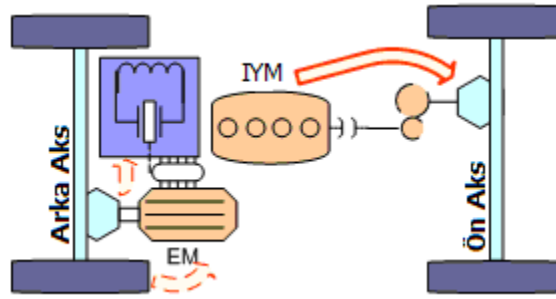
Şekil 4.16 : Durumlar arası geçiş profili – StateFlow diyagramı



Hibrid elektrikli araç için kullanılan bataryanın kılavuzunda, %50-70 şarj aralığında çalıştırılması önerilmektedir. Bataryanın işletilmesinde, şarj değerinin izin verilen en az ve en çok olabileceği sınırlar, %20 ile %90'dır.

Eğer batarya şarjı, aracın her hangi bir durumunda, önerilen alt sınır %50 şarj seviyesinin altına düştüğünde, araç şarj durumuna geçmektedir. Araç bu duruma geçtiğinde, içten yanmalı motor belirli bir oranda yüklenilerek fazladan tork elde edilmekte, elde edilen fazla tork miktarı ile elektrik motoru jeneratör olarak çalıştırılarak batarya şarjı üst limit olan %70 seviyelerine çıkartılmaktadır.

Bu hibrid araç düzeneğinde özellikle şarj modunda, içten yanmalı motordan elde edilen fazladan güç ve tork miktarının, elektrik motoruna aktarıldığı yolda birçok kayıp gerçekleşmektedir (Şekil 4.17).

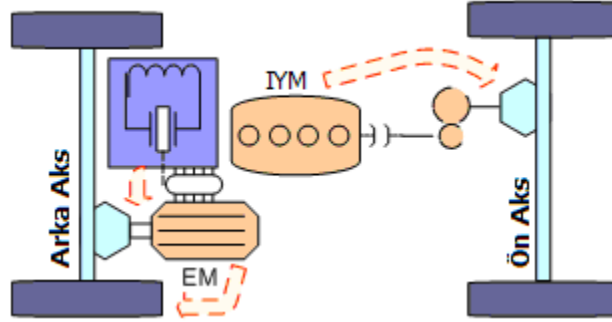


Şekil 4.17 : Şarj modunda güç akış diyagramı

Bu araç durumunda dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise, tekerlekler üzerinden aktarılan şarj torkunun araç dinamik kararlılığına olan etkisidir. Kuru yol şartlarında, içten yanmalı motor, sürücü güç talebinin %20'si oranında fazladan yüklenilerek elde edilen fazla tork miktarı ön ve arka tekerlekler üzerinden elektrik motoruna iletilmektedir. Eğer sürücünün talep ettiği güç ve aynı zamanda şarj torku, içten yanmalı motor tarafından sağlanabiliyorsa şarj işlemi, batarya şarjı %70 şarj seviyesine erişinceye kadar devam etmektedir.

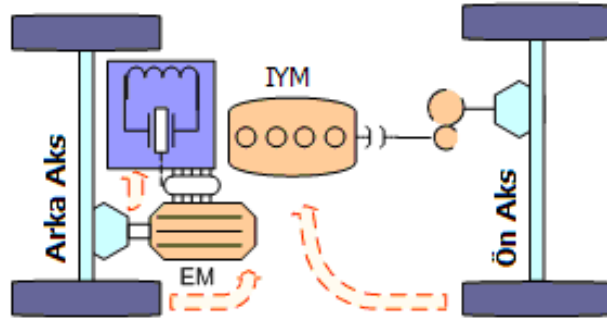
Her iki güç kaynağının bir arada çalıştığı diğer bir hibrid araç durumu ise elektrik motorunun İYM'u desteklediği durumdur. Bu durumda, gaz pedalı konumu, mekanik

hareket aralığının %90'nını aştığında elektrik motoru kalan %10'luk kısımda kademeli olarak araca ek tahrik etmeğe başlamaktadır (Şekil 4.18).



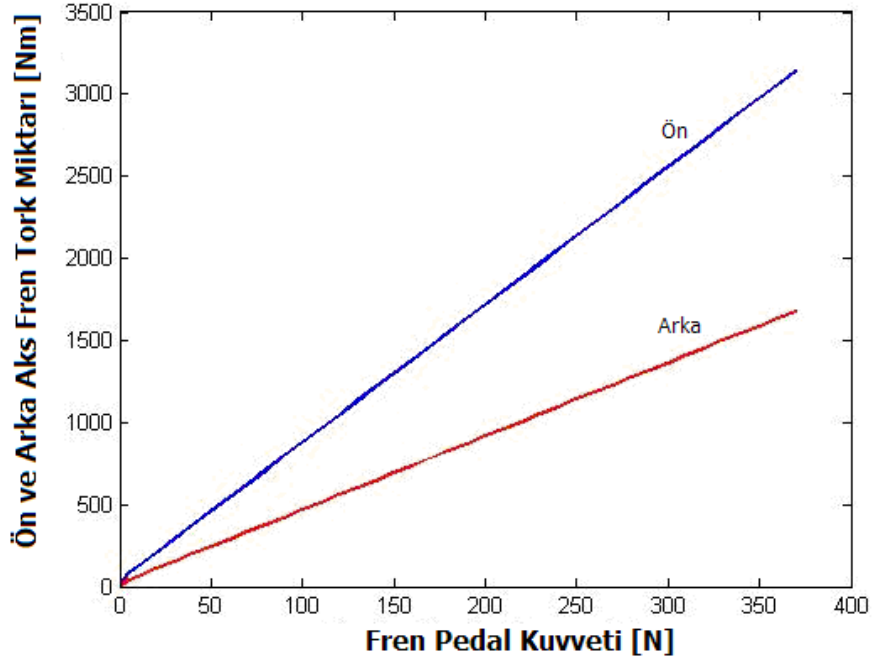
Şekil 4.18 : EM destek durumu

Araç seyahat halinde iken fren pedalına basıldığında araç rejeneratif frenleme durumuna girmektedir. Bu durumda eğer batarya şarjı, üretici firma tarafından önerilen en üst şarj seviyesi olan %90'ın üzerinde değil ise elektrik motoru jeneratör olarak çalıştırılıp fren enerjisi geri kazanılmaktadır (Şekil 4.19).



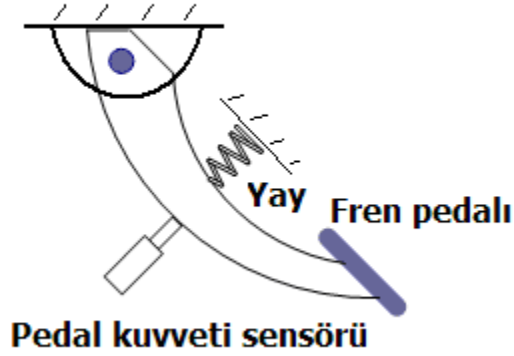
Şekil 4.19 : Rejeneratif frenleme durumu - güç akış diyagramı

Sürücünün fren gücü talebi, aracın fren pedalı basma gücüne karşılık gelen fren tork isteği haritasından elde edilmektedir. Bu haritada ön ve arka aksa dağıtılan fren torku gösterilmiştir. Arka aksa düşen fren kuvveti miktarı, aks yükleri nedeniyle aracın toplam frenleme torkunun üçte biridir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 : Fren pedal haritası

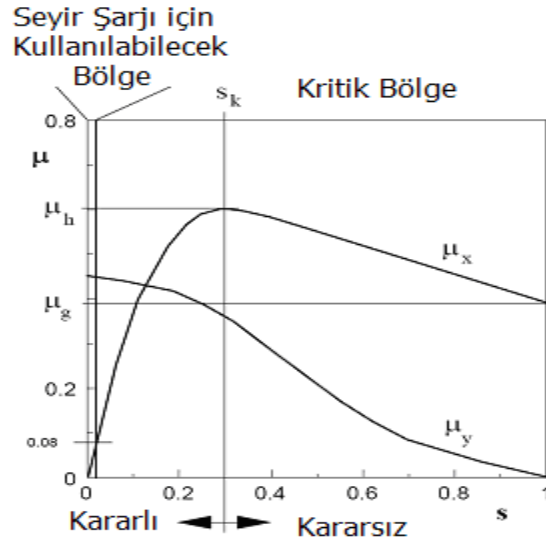
Fren pedalı basma kuvvetinin ölçülebilmesi için pedal altına bir adet kuvvet sensörü yerleştirilmiştir. Sensörün yerleşimi Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21 : Fren pedalı kuvvet sensörü yerleşimi

Ön ve arka aks fren dağılımı, aracın frenleme esnasında ön ve arka tekerleklerin kilitlenme noktasına aynı anda ulaşmasını sağlamak için regülasyonlar ile belirlenmektedir.

Tekerlek yer tutunma katsayısı, tekerlek üzerindeki yük ve tekerlek çekiş ya da fren kuvvetine bağlıdır. Tekerleğin tutunma kuvvetinin tümü eğer boyuna kullanılıyor ise yanal yönde tekerleklerin tutunması mümkün olmayacak ve aracın yanal kararlılığı kontrol edilemez duruma gelecektir. Bu nedenle, rejeneratif fren bölgesi, boyuna ve yanal kuvvet bağlantı katsayılarının değişiminin gösterildiği Şekil 4.22'deki araç dinamiği için kararlı olan bölgede seçilmiştir [26].



Şekil 4.22 : Doğrusal ve yanal kuvvet bağlantı katsayıları [26]

Rejeneratif frenleme için, yanal kuvvet bağlantı katsayısının önemli miktarlarda değişmediği bölge kullanılmaktadır. Doğrusal kuvvet bağlantı katsayısı  $\mu_x=0.08$  değeri için hıza bağlı olarak arka tekerlekten alınabilecek fren gücü Şekil 4.23'de verilmiştir. Kuvvetler her ne kadar büyük olsa da, geri kazanılabilecek enerji miktarı batarya-elektrik motoru verimleri ve kapasiteleri ile orantılı olacaktır [26].



**Şekil 4.23** : Doğrusal kuvvet bağlantı katsayısı  $\mu_x = 0.08$  için arka akstan alınabilecek fren gücü [26]

Aracın kararlılığının korunabilmesi ve ideal fren kuvveti dağılımının hesaplanabilmesi için iki ön şart belirtilmektedir.

- Ön ve arka tekerlek kuvvet bağlantı katsayılarının eşit olması
- Ön tekerleklerin kilitlenmemesi ya da önce arka tekerleklerin kilitlenmesi

Ön tekerlekler kaymaya başladığında, ön tekerlek yan kuvvet bağlantısı olmadığından araç yanal olarak da kontrol edilemeyecektir. Aracın frenleme gibi ivmelendiği durumlarda tekerlekler üzerine düşen dikey kuvvetler, yük transferleri nedeniyle değişmektedir. Kuvvet bağlantı katsayıları, tekerlek üzerindeki yük ile tekerleğe etki eden fren ya da çekiş kuvvetlerinin oranı ile ifade edilmektedir.

Frenleme durumunda, ön ve arka tekerlek boyuna kuvvet bağlantı katsayıları  $\mu_{xf}$  ve  $\mu_{xr}$  aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$\mu_{xf} = \frac{B_f}{F_{zf}} \quad (4.1)$$

$$\mu_{xr} = \frac{B_r}{F_{zr}} \quad (4.2)$$

$F_{zr}$  ve  $F_{zf}$  tekerlekler üzerine gelen düşey yükler,  $B_f$  ve  $B_r$  ise ön ve arka aksa uygulanan frenleme kuvvetleridir.

İvmelenme esnasında tekerlek üzerine düşen dikey kuvvetler;

$$F_{zf} = F_{zf.statik} + mg \frac{h}{l} z = mg \left( \frac{l_r}{l} + \frac{h}{l} z \right) \quad (4.3)$$

$$F_{zr} = F_{zr.statik} + mg \frac{h}{l} z = mg \left( \frac{l_f}{l} + \frac{h}{l} z \right) \quad (4.4)$$

$$z = \frac{a_x}{g} \quad (4.5)$$

$$z = \frac{B_f + B_r}{mg} \quad (4.6)$$

Burada;

$h$  : Aracın ağırlık merkezinin yerden yüksekliği

$m$  : Araç kütlesi

$l$  : Dingiller arası mesafe

$l_f$  : Ön dingilin aracın ağırlık merkezine olan mesafesi

$l_r$  : Arka dingilin aracın ağırlık merkezine olan mesafesidir.

İdeal fren kuvveti diyagramı için ilk şart olan, ön ve arka tekerlek kuvvet bağlantı katsayılarının eşit olması ( $\mu_{xf} = \mu_{xr}$ ) şartı ele alındığında;

$$B = B_f + B_r = \mu_{xf} F_{xf} + \mu_{xr} F_{xr} \quad (4.7)$$

$\mu_{xf} = \mu_{xr}$  eşit olduğu için, her ikisi de  $\mu_i$  şeklinde ifade edilir ise:

$$B = \mu_i (F_{xf} + F_{xr}) \quad (4.8)$$

$$\mu_i = \frac{B}{(F_{xf} + F_{xr})} = z = \mu_{xf} = \mu_{xr} \quad (4.9)$$

$$z = \mu_{xf} = \frac{B_f}{mg\left(\frac{l_r}{l} + \frac{h}{l}z\right)} \quad (4.10)$$

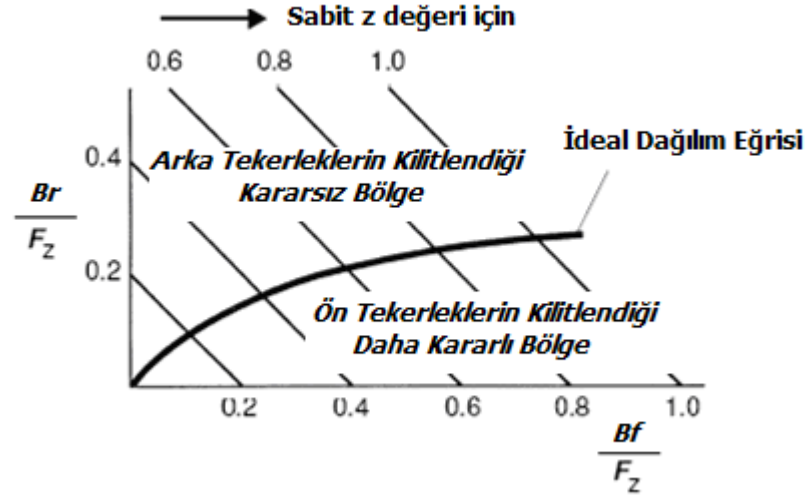
Buradan  $z$  çözülür ise,

$$z = -\frac{l_r}{2h} + \sqrt{\left(\frac{l_r}{2h}\right)^2 + \frac{B_f l}{F_z h}} \quad (4.11)$$

$$\frac{B_r}{F_z} = z - \frac{B_f}{F_z} \quad (4.12)$$

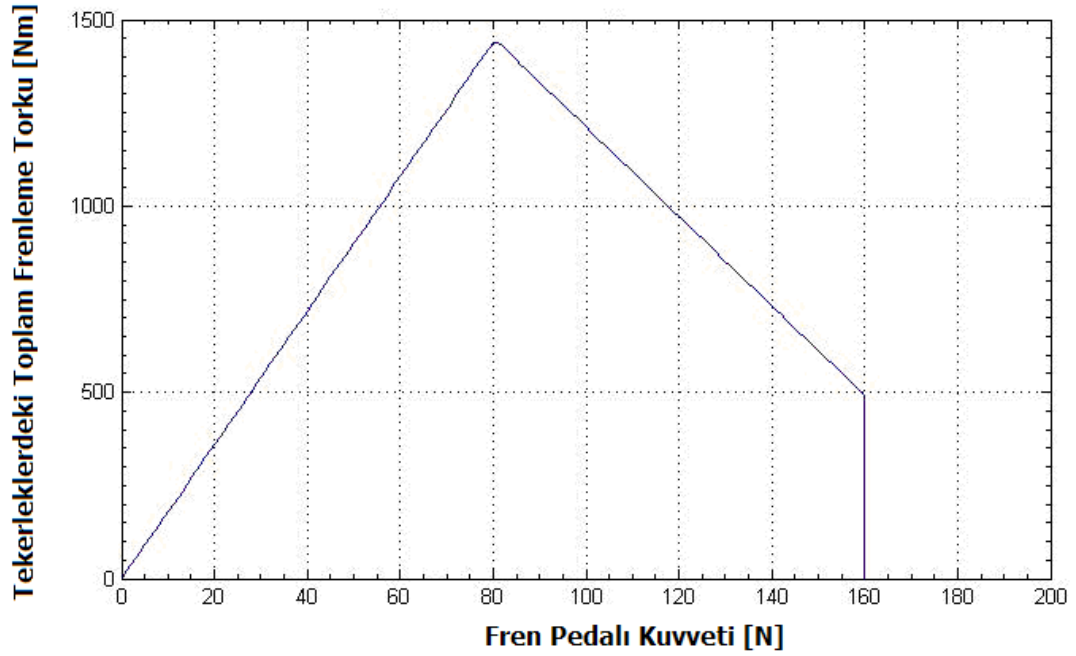
$$\frac{B_r}{F_z} = -\frac{l_r}{2h} + \sqrt{\left(\frac{l_r}{2h}\right)^2 + \frac{B_f l}{F_z h}} - \frac{B_f}{F_z} \text{ olacaktır.} \quad (4.13)$$

Bu denklemden yola çıkılarak, ön ve arka akslar arasındaki ideal fren kuvvetinin dağılımı, değişin frenleme ivmesine göre Şekil 4.24'deki gibi çizdirilebilir.



Şekil 4.24. İdeal Fren Kuvveti Dağılımı

Araç kararlılığı ve frenleme ile ilgili regülasyonlar göz önüne alındığında, sürücü fren gücü talebine karşılık, arka tekerlekten alınabilecek frenleme torku Şekil 4.25'de verilmiştir.



Şekil 4.25 : Arka tekerlekler için kullanılabilir frenleme torku [26]



Rejeneratif frenleme için fren pedalı mekanik seyahat aralığının 2 cm'lik boşluğu kullanılmış ve boşluğu almak için pedal bir yay ile araç gövdesine bağlanmıştır. Pedal üzerine konulan kuvvet sensörü 80 N gösterdiğinde bu boşluk kapanmakta ve hidrolik fren devreye girmektedir. Bu noktaya kadar yalnızca elektrik motoru ile frenleme yapılmakta, bu noktadan sonra, hidrolik fren de devreye girdiği için regülasyon sınırlarında kalabilmek amacıyla, elektrik motorunun yaptığı frenleme miktarı kademeli olarak azaltılmaktadır. Fren pedalı basma kuvveti 160 N olarak ölçüldüğünde, rejeneratif frenleme tamamen devreden çıkmakta ve frenleme yalnızca hidrolik frenler ile sağlanmaktadır.

Araçta kullanılan kural tabanlı kontrol, hız kriteri üzerine kurulmuştur. Kural tabanlı kontrol güç kriteri ile de kurulabilmektedir. Hız kriteri ile oluşturulan ve araca yüklenen kontrol algoritması ile yapılan simülasyonlarda batarya şarjı çevrim sonunda ilk şarj ile aynı olmadığından yakıt tüketimi miktarında, konvansiyonel araca göre karşılaştırma yapılamamaktadır. Bu nedenle simülasyonlarda güç kriteri kullanılmıştır. Eğer sürücünün talep ettiği güç 6 kW'nin altında ise araç yalnız EM, üzerinde ise yalnız İYM ile çalıştırılmaktadır. ECE R15 – ECE çevrimi bu şartlar arasında koşurulduğunda batarya başlangıç ve bitiş şarj miktarları eşit olmaktadır. Güç kriteri ile oluşturulan kurallar Tablo 4.2'de verilmiştir. Kurallar, belirli bir güç seviyesinin altında, batarya şarjı uygun aralıkta ise, aracın yalnızca EM ile üzerinde ise yalnızca İYM ile sürülebileceği şekilde tasarlanmıştır. Araç kontrol algoritması, hız kriteri üzerine kurulduğu için, 40 km/h hızların altında bir ve ikinci viteslerde batarya şarjı uygun ise araç yalnızca elektrik motoru ile tahrik edilmektedir. Yalnızca EM modunda, sürüş dinamiği konvansiyonel araca benzetildiği için ilk iki vites kullanımında konvansiyonel araca göre bir farklılık hissedilmemektedir.

**Tablo 4.2 : Geçiş şartları [11]**

	$V_x$ Doğrusal Hız	SOC	Güç Gereksinimi	Dizel Motor Torku-maks	EM. Torku- maks	Fren Pedal Kuvveti
Araç Duruyor	< 5 km/h	--	--	--	--	--
Yalnız EM	--	> SOClow	< 6 kW	--	< Treq	--
Yalnız IYM	--	< SOClow	< 6 kW	--	--	--
Yalnız IYM	--	> SOClow	> 7 kW	> Treq	--	--
EM Asist	--	> SOClow	--	< Treq	--	--
EM Jeneratör	--	< SOClow	--	< Treq+Tchg	< Tchg	--
Rejen. Frenleme	--	< SOChigh	--	--	--	< 80
Azalan Rejen. + Hidrolik Fren	--	< SOChigh	--	--	--	80<-<160
Konv. Frenleme	--	>= SOChigh	--	--	--	--
Konv. Frenleme	--	< SOChigh	--	--	--	> 160

#### 4.4 Benzetim ve Test Sonuçları

Elde edilen araç bilgileri ile oluşturulan modelde çeşitli benzetimler gerçekleştirilmiş ve araç üzerine yüklenen kontrol algoritması ile araç testleri yapılarak batarya ve araç elektronik kontrol ünitelerinden veriler toplanmıştır.

Güç kriteri ile iki farklı araç kütlesi için yapılan simülasyonlarda yakıt tüketimi ve emisyonlardaki iyileşmeler Tablo 4.3'de verilmiştir. Araç toplam ağırlığı 3000 Kg alınarak yapılan benzetimlerde, güç kriteri kullanılan kural tabanlı kontrol algoritması ile batarya şarjında bir değişiklik olmadan % 15.5 yakıt tüketimi iyileşmesi hesaplanmaktadır. Araç kütlesi 3300 Kg'a yükseltildiğinde, konvansiyonel araç hesaplamalarında yakıt tüketiminin artmasına karşılık, hibrid araç hesaplamalarında yakıt tüketimindeki iyileşme miktarı %21.3 olarak hesaplanmaktadır. Bu durumun başlıca nedeni, içten yanmalı motorların tam yükte daha verimli çalışmasıdır.

**Tablo 4.3 : Yakıt tüketimi ve emisyon değerleri**

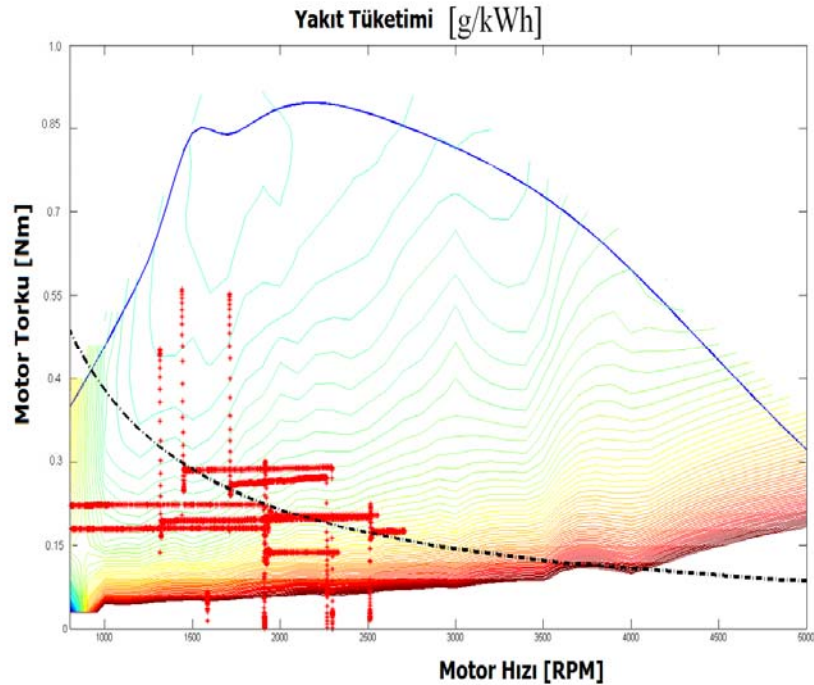
$m = 3000$ kg	Konvansiyonel	Hibrid	İyileşme
<b>Yakıt Tüketimi</b>	11 litre/100 km	9.3 litre/100 km	% 15.5
<b>SOC Değişimi</b>	--	% 0	--
<b>NO<sub>x</sub></b>	0.77 gr/km	0.55 gr/km	% 28
<b>CO<sub>2</sub></b>	2.76 gr/km	2.26 gr/km	% 18

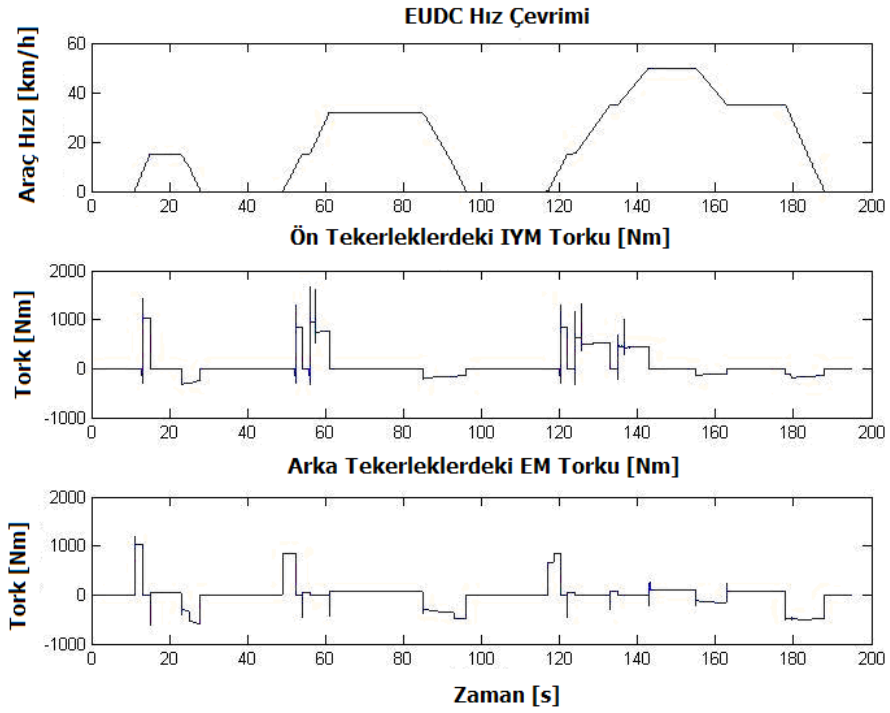
$m = 3300$ kg	Konvansiyonel	Hibrid	İyileşme
<b>Yakıt Tüketimi</b>	11,33 litre/100 km	8,92 litre/100 km	% 21,3
<b>SOC Değişimi</b>	--	% 0	--
<b>NO<sub>x</sub></b>	0.91 gr/km	0.84 gr/km	% 18,7
<b>CO<sub>2</sub></b>	2.85 gr/km	2.17 gr/km	% 23,9

Bir Avrupa şehir içi çevrimi için yapılan simülasyon sonucunda elde edilen İYM ve EM çalışma bölgeleri ve tork miktarları Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de verilmiştir.

Şekil 4.26’daki çalışma noktalarının dağılımı, ECE çevrimindeki vites farklılıklarına göre gerçekleşmekte ve istenmeyen düşük hız ve düşük tork bölgelerinde yoğunlaşmaktadır.



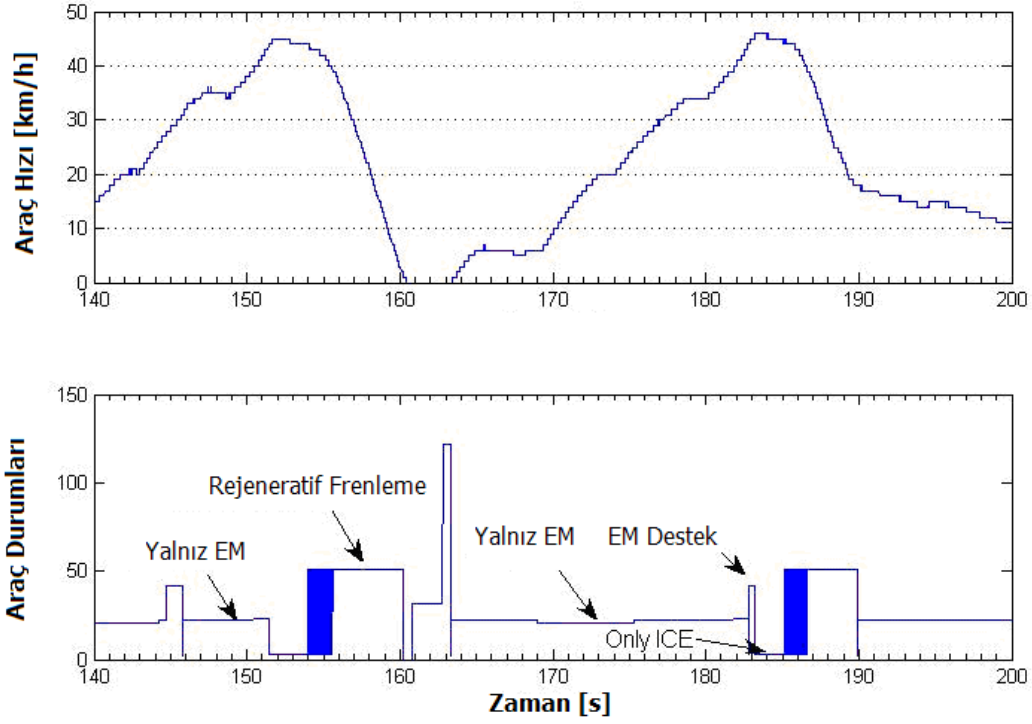
**Şekil 4.26 : İYM çalışma noktaları (Hibrid)**



**Şekil 4.27** : İYM ve EM tork dağılımı benzetim sonuçları

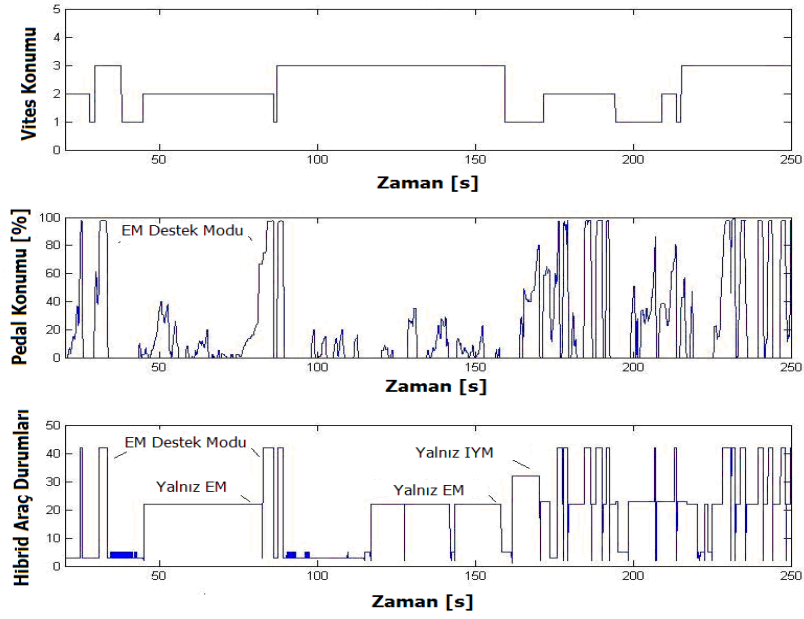
Şekil 4.27’de, İYM’un çevrimin frenleme bölgelerinde negatif tork verdiği görülmektedir. Bunun nedeni, içten yanmalı motorun, belirli gaz pedalı açıklıklarının altında motor freni yapmasıdır.

Araç ile yapılan bu yol testlerinde, pedal ve vites pozisyonları, araç ve tekerlek hızları, batarya şarj durumu, batarya akım ve gerilim değerleri, elektrik motorundan istenilen tork değerleri ile aracın girdiği durumlar da kaydedilmiştir. Aracın seyir esnasında birçok duruma girdiği Şekil 4.28’de görülmektedir. Şekilde, aracın 40 km/h hızın altında yalnızca EM motoru ile sürüldüğü ve araç hızının azaldığı bölgelerde aracın rejeneratif frenleme yaptığı görülmektedir. Yine aynı şekilden elektrik motorunun destek verdiği kısa zaman aralığında araç hızının daha dik olduğu görülebilir.

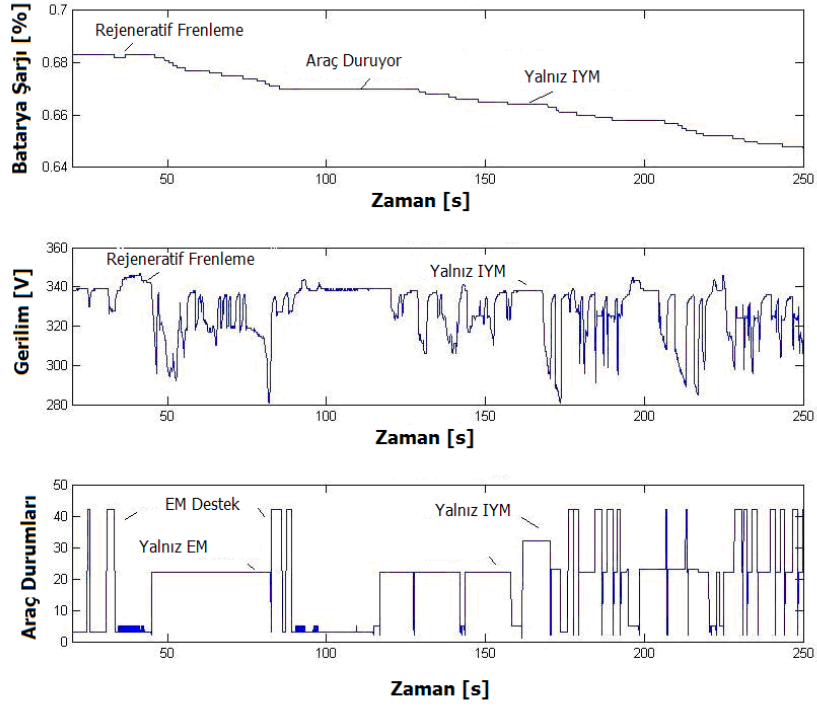


**Şekil 4.28 :** Araç hızı ve durumları

Gaz pedalı, vites konumları ile aracın girdiği durumlar Şekil 4.29’da verilmiştir. Gaz pedalının tam açık olduğu durumlarda EM’nun destek verdiği hibrid araç durumuna geçtiği bu şekilde görülmektedir. Yine aynı şekilde aracın vites konumları gösterilmiştir. Araç hangi viteste olursa olsun, “kick down” yapıldığında elektrik motoru kademeli olarak artan destek vermekte ve aracın yüksek hızlara çıktığı bu şekilde görülmektedir. Yine aynı şekilde aracın 40 km/h hız değerlerinin altında yalnızca elektrik motoru, bu hız değerinin üzerinde yalnızca IYM ile çalıştığı görülebilir. Buna karşılık batarya şarj ve gerilimin araç durumlarındaki değişimi Şekil 4.30’da gösterilmiştir. Elektrik motorunun destek verdiği durumlarda, batarya terminalinden okunan gerilimi anlık olarak çok düşük değerlere inmekte olduğu bu şekilden görülmektedir. Rejeneratif frenleme durumlarında batarya gerilimi artış eğilimi göstermektedir.

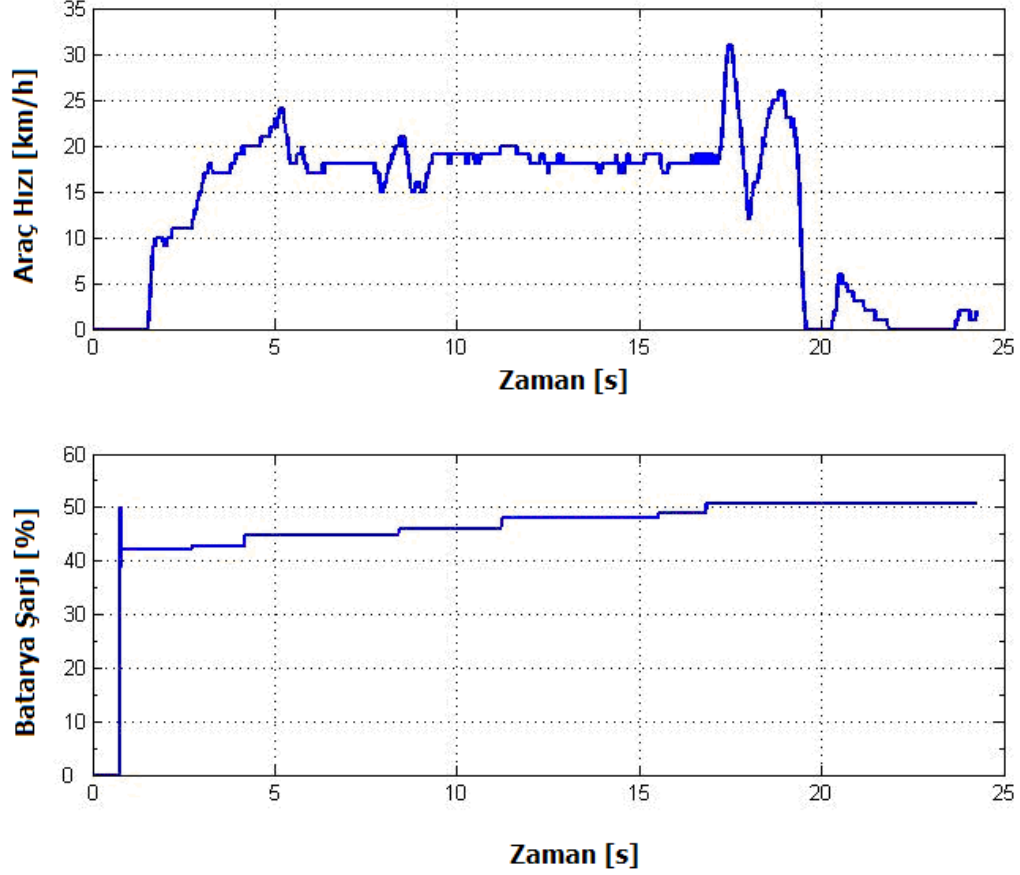


Şekil 4.29. Gaz pedalı açıklığı - araç durumları



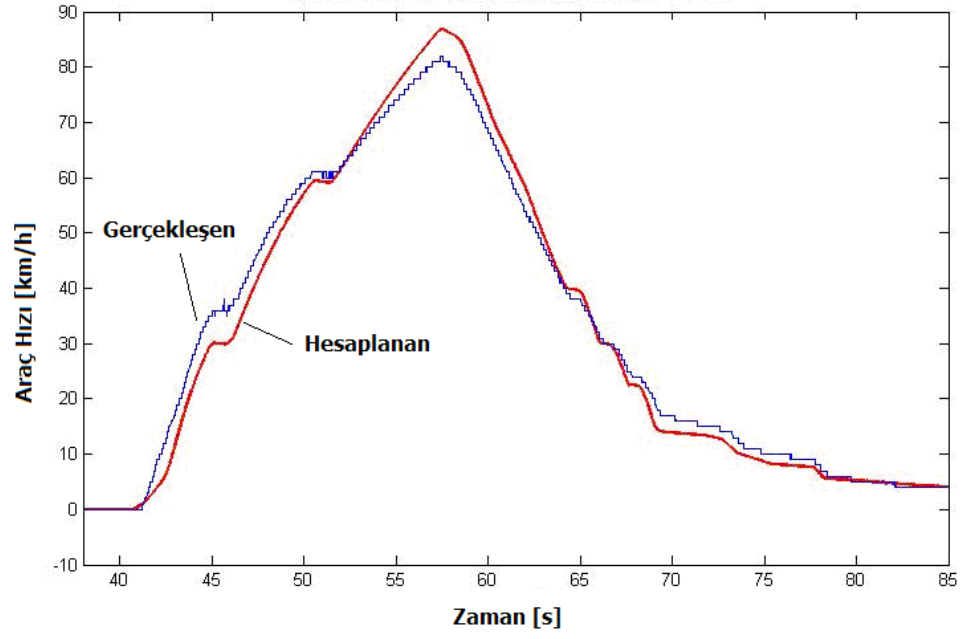
Şekil 4.30 : Batarya şarj ve gerilimi – araç durumları

Araç aynı zamanda şarj durumuna geçerek, elektrik motoru jeneratör olarak çalışmış ve batarya şarjının kademeli olarak arttığı kaydedilmiştir (Şekil 4.31).

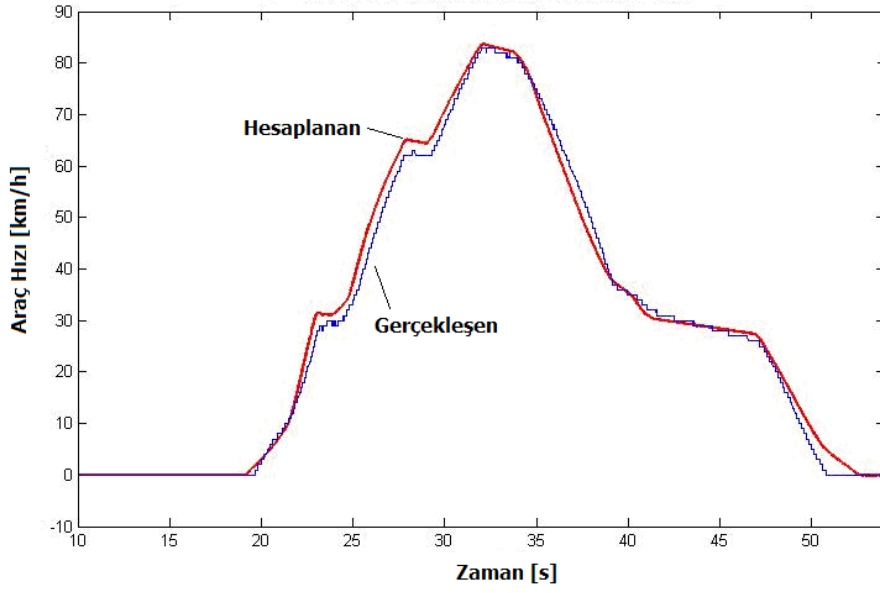


**Şekil 4.31** : Hibrid araç şarj durumu

Yapılan yol testlerinde kaydedilen pedal ve vites pozisyonları simülasyonlarda kontrol girişi olarak kullanılarak, gerçek ve simülasyonun verdiği hız profilleri de karşılaştırılmıştır. Hibrid ve konvansiyonel araçlar için elde edilen benzetim sonuçları ile gerçek hız profillerinin bir birlerlerine yakın olduğu Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'deki yavaşlama testlerinde görülmektedir.



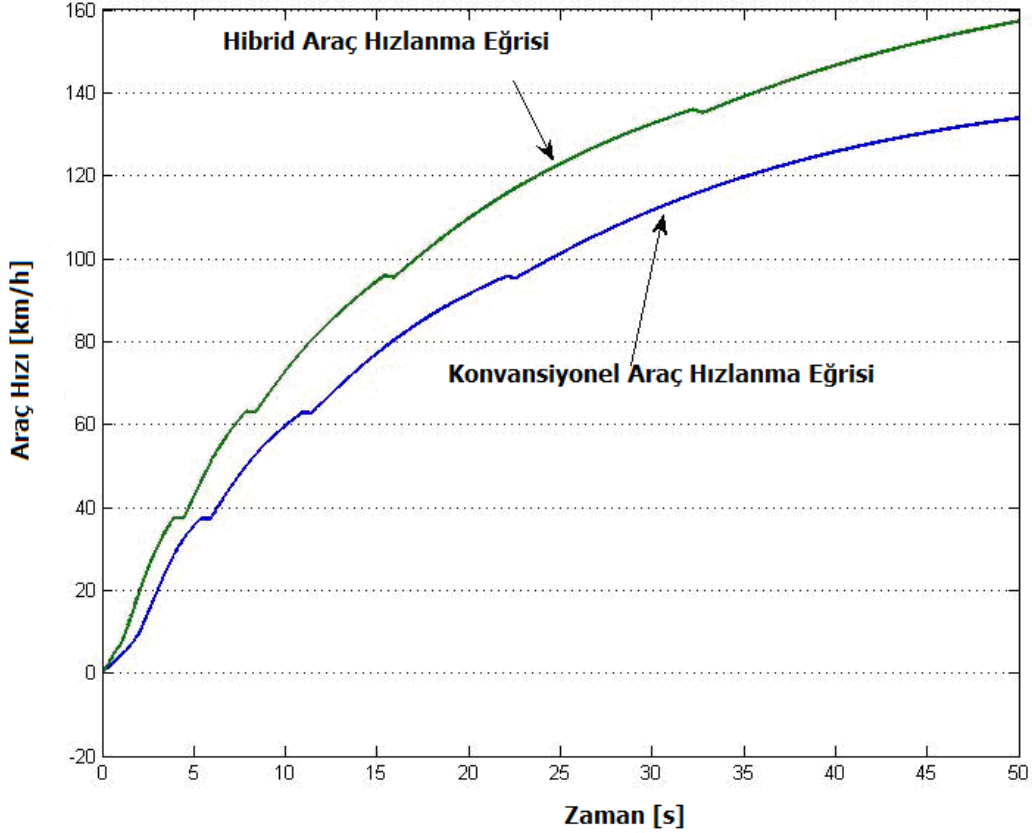
Şekil 4.32 : Konvansiyonel araç gerçek ve benzetim hızlanma profillerinin karşılaştırılması



Şekil 4.33 : Hibrid araç gerçek ve simülasyon hızlanma profillerinin karşılaştırılması



Yukarıdaki şekillerde, oluşturulan modelin aracın hızlanma performanslarını iyi bir hassasiyette hesapladığı görülmektedir. Bu nedenle aracın belirli hız aralıklarındaki hızlanma performansları hesaplanmış Şekil 4.34 ve Tablo 4.4’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.34 : Hibrid ve konvansiyonel araç hızlanma performansı

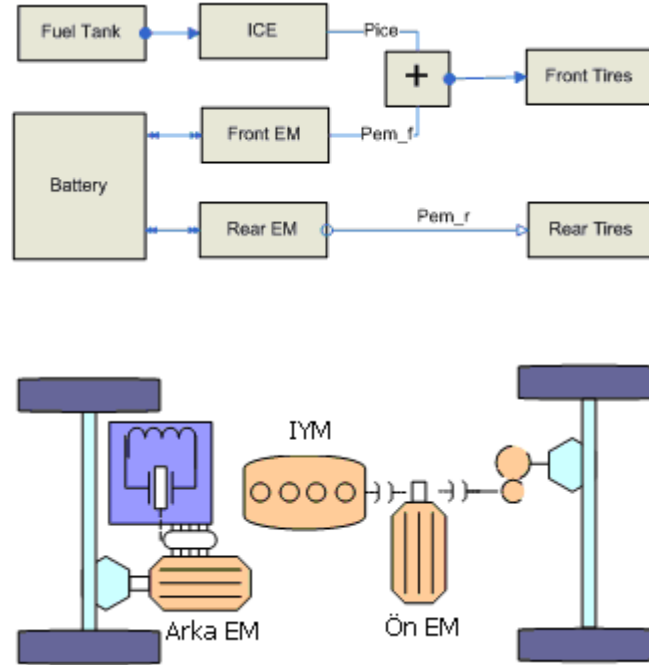
Şekil ve tablodan da görülebileceği gibi 60 km/h hız değerinin altında hızlanma sürelerinde çok farklılık görünmemektedir. Kontrol algoritması gereğince, aracın yalnız elektrik motoru ya da yalnız içten yanmalı motorla tahrik edildiği durumlarda dinamik olarak fark olmadığından, eğer elektrik motoru destek vermiyorsa hızlanma süreleri hemen hemen aynı değerde kalmaktadır.

**Tablo 4.4 :** Hibrid ve konvansiyonel araç hızlanma performansı

	<b>Konvansiyonel [s]</b>	<b>Hibrid [s]</b>
<b>8-32,3 km/h</b>	2,086	2,08
<b>8-56,4 km/h</b>	5,6	5.6
<b>0-100 km/h</b>	22,37	17,13
<b>80-120 km/h</b>	18,76	13

## 5. HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BİLEŞEN BOYUTLANDIRMASI

Bir hibrid elektrikli araç, eğer en baştan tasarlanıyor ise, belirlenen performans kriterleri doğrultusunda seçilen bileşen dizilimi için, yakıt tüketimini ve egzoz gazları salınımını en aza indirecek bileşen güçlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Seçilen yapılanma için hem performans hem de yakıt tüketimi hedeflerini sağlayacak en iyi güç sınırları, yine optimizasyon yöntemleri ile elde edilebilmektedir. Bu çalışma, iki elektrik motoru ile bir içten yanmalı motorun kullanıldığı (Şekil 5.1) bir hibrid araç yapılanması için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1 : Enerji akışı blok diyagramı ve araç yapılanması

Bu yapılanmada, frenleme durumunda her iki aksa düşen frenleme enerjisinin olabildiğince geri kazanılabilmesi için, biri ön aks tarafına diğeri ise arka aksa bağlanılmak üzere iki adet elektrik motoru kullanılması tasarlanmıştır. Arka aksa kullanılacak elektrik motoru doğrudan diferansiyele bağlanırken, ön aks için düşünülen elektrik motoru, iki kontrollü kavrama arasında içten yanmalı motora

bağlanılmaktadır. Bu şekilde, ön elektrik motoru ile içten yanmalı motor bir yandan kontrollü kavrama ile gövdeden ayrılarak seri hibrid şeklinde çalıştırılabilmekte, diğer yandan frenleme durumunda, içten yanmalı motorun kompresyon freni yapmaması amacıyla araç gövdesi ile ilişkisi kontrollü kavrama yardımı ile kesilebilmektedir. Bu yapılanmanın tüm potansiyelinden yararlanabilmek için, elektrik motorları ile bataryanın doğru bir şekilde boyutlandırılması da gerekmektedir. Hem maliyet, hem artan güce karşılık artan ağırlık ile motor ve batarya verim karakteristikleri bu boyutlandırmayı gerekli kılmaktadır.

Her hangi bir sabitlenmiş araç yapılanması için, yakıt ekonomisindeki iyileşme miktarı, dinamik programlama gibi global optimumu veren optimizasyon yöntemleri ile hesaplanılabilmektedir. Değişen bileşen boyutlarına karşılık, yakıt tüketimindeki iyileşme miktarını hesaplamak, dinamik programlama yöntemi ile oldukça zahmetlidir. Bu nedenle değişen bileşen boyutlarına karşılık gelen yakıt tüketimindeki iyileşmenin hesaplanabilmesi için eşdeğer yakıt tüketimi yöntemi daha hızlı sonuçlar vermektedir.

Eşdeğer yakıt tüketimi hesaplamaları literatürde iki şekilde önerilmektedir. İlk önerilen yöntem ortalama verimler yöntemidir [22]. Verilen herhangi bir çevrim için, elektrik motorunun nerede hangi verim noktasında şarj edeceği ya da bataryadan şarj çekeceği zaman dilimi belirli olmadığı için, çevrim boyunca tüm bileşenlerin ortalama verimleri hesaplanılarak, harcanılan ya da elde edilen şarj miktarının yakıt enerjisine karşılık gelen değeri, elde edilen bu ortalama verim üzerinden hesaplanmaktadır.

Elektrik motorunun anlık olarak çektiği enerji miktarı denklem de verilmiştir.

$$\Delta E_{elec} = \frac{P_{em}(t)}{\eta_{bat}(P_{em}(t))\eta_{em}(P_{em}(t))} \quad (5.1)$$

Burada  $P_{em}(t)$ , elektrik motoru milindeki anlık gücü,  $\eta_{bat}$  ve  $\eta_{em}$  sırasıyla o güce denk gelen batarya ve elektrik motorunu ifade etmektedir. Bataryadan çekilen bu enerji miktarı farkı, eğer daha önceden elde edilen, İYM, batarya ve EM ortalama verimlerine bölünür ise, yakıtın yanması ile elde edilecek enerji miktarı hesaplanmaktadır.

$$\Delta E_{fuel\_eq} = \frac{\Delta E_{elec}}{\eta_{ice,chg} \eta_{em,chg} \eta_{batt,chg}} \quad (5.2)$$

Elektrik enerjisine karşılık gelen yakıt enerjisi, yakıtın Alt Isıl değerine bölüldüğünde, kütsel olarak, elektrik enerjisine karşılık gelen yakıt miktarı hesaplanmaktadır.

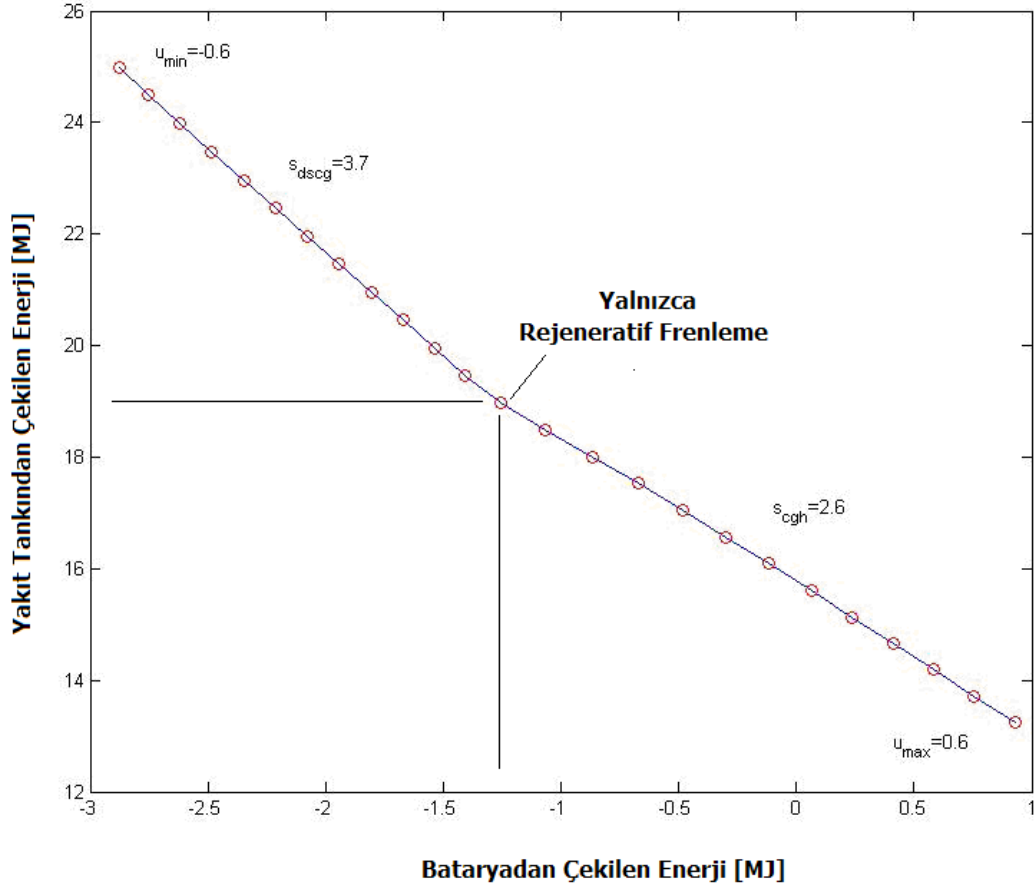
$$\dot{m}_{ice\_eqv} = \frac{\Delta E_{fuel\_eqv}}{H_{LHV}} \quad (5.3)$$

$H_{LHV}$  [J/g] yakıtın alt ısıl değeri,  $\dot{m}_{ice\_eqv}$  ise gram cinsinden karşılık gelen yakıt miktarıdır.

Benzer bir yöntemde ise, seçilen bir kontrol parametresi ( $u = \frac{P_{em}}{P_{ice}}$ ), batarya şarjının en düşük ve en yüksek değerlerine karşılık gelen  $[-u_b, u_h]$  aralığında değiştirilip, bütün bir çevrim her bir sabit kontrol değeri ile koşturularak yakıt tankı ve bataryadan çekilen enerji miktarları hesaplanmaktadır [20]. Her bir kontrol parametresi için elde edilen bu değerler bir grafik üzerinde gösterildiğinde aşağıda verilen şekil ortaya çıkmaktadır (Şekil 5.2). Grafikteki doğruların eğimleri, bataryadan çekilen enerji miktarının yakıt enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan katsayıları vermektedir.

Şekil incelenildiğinde,  $u=0$  değerinde, elektrik motorunun yalnızca frenleme bölgelerinde jeneratör olarak çalıştırılması nedeni ile bataryadan çekilen enerji miktarının, doğruların kırılma noktasında -1.3 MJ civarında olduğu görülmektedir.

Yine aynı şekilde,  $u=0.35$  değeri için tüm çevrimde batarya şarjının aynı kaldığı, bataryadan çekilen ve bataryaya verilen enerji miktarlarının toplamın sıfır olduğu görülebilmektedir.

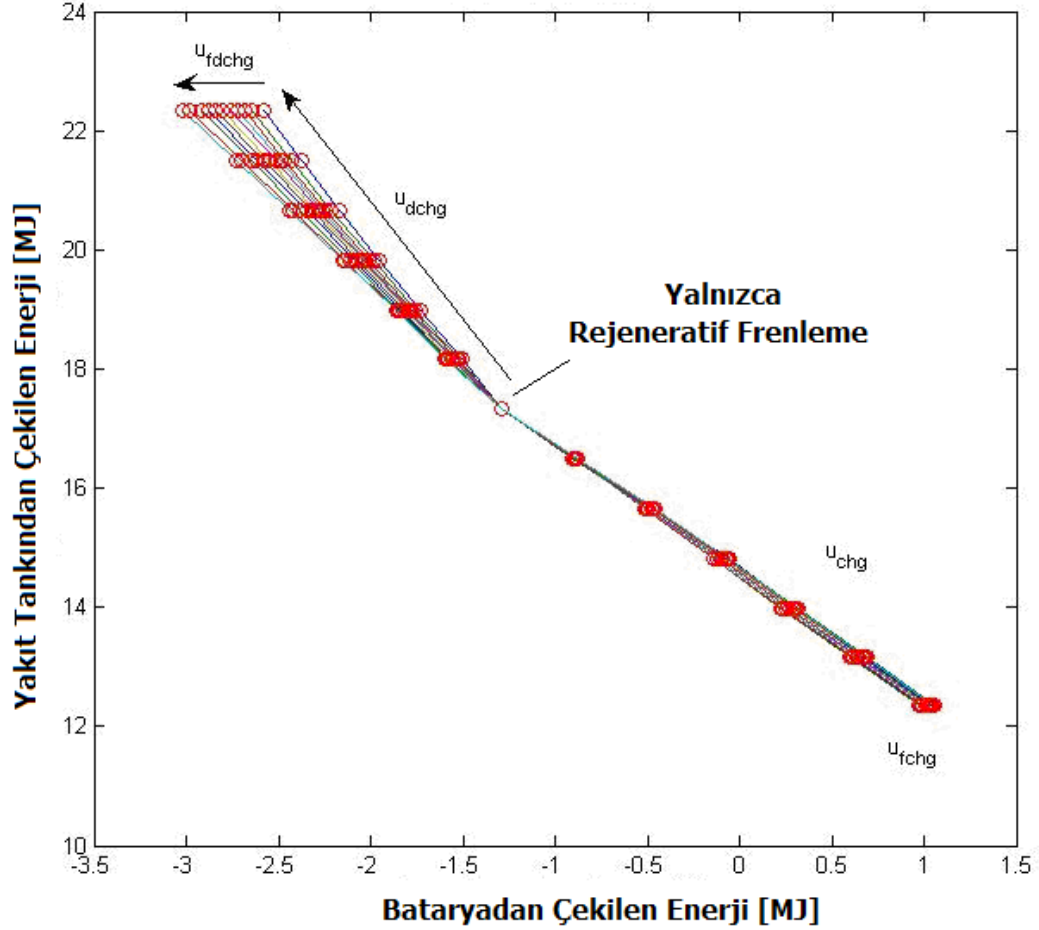


Şekil 5.2 : Şarj ve deşarj halinde eşdeğer yakıt tüketimi katsayıları [27]

Elde edilen bu doğruların eğimi ( $s_{cgh}$ ,  $s_{dscg}$ ), şarj ve deşarj durumlarında, bataryadan çekilen enerji miktarının, eşdeğer yakıt tüketim miktarını hesaplamak için kullanılmaktadır.

Hibrid araç yapılanmasında çift elektrik motoru düşünüldüğünden; yukarıdaki çalışma, elektrik motorları arasındaki güç paylaşımını belirleyen kontrol değişkeni de eklenerek tekrarlanmıştır. Elektrik motorlarının değişen güç paylaşım katsayıları ve elektrik sistemi ile İYM arasında değişen güç paylaşım oranları ile yapılan

benzetimler sonucunda aşağıdaki grafik elde edilmiştir (şekil 5.3). Elde edilen doğruların eğimleri, elektrik motorları arasındaki her bir gúc paylaşımı oranları için, bataryadan çekilen elektrik enerjisinin, yakıt tüketimi karşılığını hesaplamak için benzetimlerde kullanılmıştır.



**şekil 5.3 :** Değişen EM güçleri için şarj ve deşarj halinde eşdeğer yakıt tüketimi katsayıları [27]

Her yapılanmanın, eşdeğer yakıt tüketimi katsayılarının belirlenmesi ile verilen her hangi bir aday çalışma noktasında harcanacak yakıt tüketimi aşağıdaki değer fonksiyonuyla ifade edilebilmektedir:

$$J_t = m_{ice}(P_{ice}(t) + \zeta P_{em}(t)) \quad (5.4)$$

Sınırlar da aşağıdaki şekilde ifade edildiğinde her bir güç kaynağının optimum çalışma noktaları hesaplanabilmektedir:

$$\{P_{em}^{opt}(t), P_{ice}^{opt}(t)\} = \arg \min(J_t) \quad (5.5)$$

$$P_{req}(t) = P_{ice}(t) + P_{em}(t) \quad (5.6)$$

$P_{req}$ ,  $P_{ice}$  ve  $P_{em}$  sırasıyla, sürücünün talep ettiği, İYM ve EM güçleridir.

$$SOC_{\min} < SOC(t) < SOC_{\max} \quad (5.7)$$

$$0 \leq P_{ice}(t) \leq P_{ice, \max}(t) \quad (5.8)$$

$$P_{em, \min(t)} \leq P_{em}(t) \leq P_{em, \max}(t) \quad (5.9)$$

$$m_{elec\_eqv} = \gamma s_{dis} \frac{P_{em}(t)}{\eta_{batt}(P_{em}) \eta_{em}(P_{em}) H_{LHV}} + (1 - \gamma) s_{chg} \eta_{batt}(P_{em}) \eta_{em}(P_{em}) \frac{P_{em}(t)}{H_{LHV}} \quad (5.10)$$

$$\gamma = \frac{1 + \text{sgn}(P_{em})}{2} \quad (5.11)$$

Bataryadaki şarj miktarının, çevrim başı ile sonunda aynı kalmasını sağlamak amacı ile aşağıdaki ceza optimizasyon denklemlerine eklenmiştir.

$$x_{SOC}(t) = \frac{SOC(t) - \frac{SOC_{\max} + SOC_{\min}}{2}}{\frac{SOC_{\max} + SOC_{\min}}{2}} \quad (5.12)$$



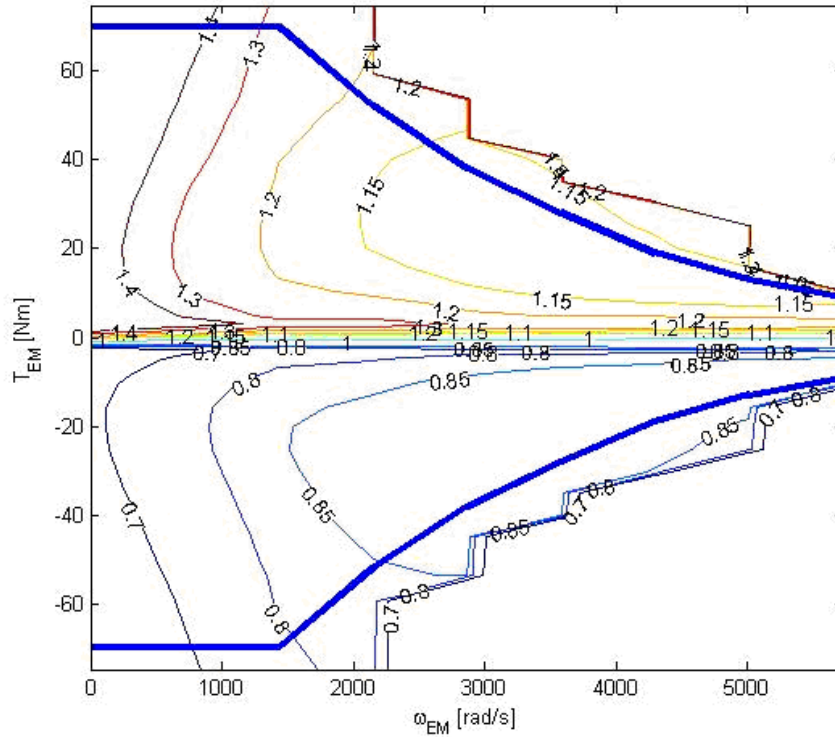
$$-1 \leq x_{SOC}(t) \leq 1 \quad (5.13)$$

$$\Omega(SOC) = 1 - x_{SOC}(t) + \mu \sum_1^{tf} x_{SOC}(t) \quad (5.14)$$

Burada  $\mu$  birikimli şarj değişimini kontrol etmek için kullanılan bir katsayıdır.

$$J_t = \dot{m}_{ice}(P_{ice}(t)) + \Omega(SOC) \dot{m}_{elec\_eqv}(P_{em}(t)) \quad (5.15)$$

Farklı boyutlardaki elektrik motorlarının yakıt tüketimine etkisini araştırabilmek için bir adet birim elektrik motoru eğrisi oluşturulmuş (Şekil 5.4), ve bu birim eğri araç üzerinde kullanılacak ön ve arka elektrik motorları için farklı katsayılar ile çarpılarak, EM boyutlarının yakıt tüketimine etkisi eşdeğer yakıt tüketimi yöntemi ile araştırılmıştır.



Şekil 5.4 : Birim elektrik motoru karakteristik eğrisi [12]

İlk olarak ön ve arka EM birden dörde kadar ölçeklendirilerek yakıt tüketimindeki iyileşme ve şarj miktarındaki değişimler tablolandırılmıştır (Tablo 5.1). Bu çalışmadan çıkan sonuçlar değerlendirilerek daha uygun ölçeklendirme katsayıları belirlenmiş ve çalışma tekrarlanmıştır.

**Tablo 5.1 : Ölçeklendirme katsayıları ve yakıt tüketimindeki iyileşme miktarları**

<b>Ön-Arka EM Katsayıları</b>	<b>1-1</b>	<b>1-2</b>	<b>1-3</b>	<b>1-4</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,67	70,06	70,01	70,02
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	13,06	15,04	15,02	15,02
<b>Ön-Arka EM Katsayıları</b>	<b>2-1</b>	<b>2-2</b>	<b>2-3</b>	<b>2-4</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,73	69,88	69,85	69,84
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	15,74	17,92	17,88	18,06
<b>Ön-Arka EM Katsayıları</b>	<b>3-1</b>	<b>3-2</b>	<b>3-3</b>	<b>3-4</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,76	69,92	69,92	69,9
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	15,68	17,39	17,37	17,61
<b>Ön-Arka EM Katsayıları</b>	<b>4-1</b>	<b>4-2</b>	<b>4-3</b>	<b>4-4</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,75	<b>69,89</b>	69,88	69,89
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	15,54	<b>18,58</b>	18,55	18,55

Tablo 5.1’de görüldüğü üzere, en iyi sonuç ön elektrik motorunun ölçeklendirme katsayısının 4, arka EM’nin ölçeklendirme katsayısının 2 olduğu durumda gerçekleşmektedir. Aynı çalışma ön EM katsayısının 1 ile 4 arasında değişirken arka EM katsayısının 0,2 ile 1 arasında değiştiği durumlar için de tekrarlanarak Tablo 5.2’deki değerler elde edilmiştir.

**Tablo 5.2 : Ölçeklendirme katsayıları ve yakıt tüketimindeki iyileşme miktarları**

<b>Ön-Arka EM katsayıları</b>	<b>1-0,2</b>	<b>1-0,4</b>	<b>1-0,6</b>	<b>1-0,8</b>	<b>1-1</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,61	70,03	70,01	70,03	70,04
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	12,57	15,03	15,49	15,36	15,22
<b>Ön-Arka EM katsayıları</b>	<b>1,5-0,2</b>	<b>1,5-0,4</b>	<b>1,5-0,6</b>	<b>1,5-0,8</b>	<b>1,5-1</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,69	69,92	69,88	69,87	69,93
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	14,72	17,71	18,07	18,29	18,2
<b>Ön-Arka EM katsayıları</b>	<b>2-0,2</b>	<b>2-0,4</b>	<b>2-0,6</b>	<b>2-0,8</b>	<b>2-1</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,73	69,86	69,86	<b>69,85</b>	69,87
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	15,11	18,53	18,71	<b>18,83</b>	18,55
<b>Ön-Arka EM katsayıları</b>	<b>2,5-0,2</b>	<b>2,5-0,4</b>	<b>2,5-0,6</b>	<b>2,5-0,8</b>	<b>2,5-1</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,73	69,86	69,83	<b>69,87</b>	69,92
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	15,18	18,48	18,87	<b>18,86</b>	18,45
<b>Ön-Arka EM katsayıları</b>	<b>3-0,2</b>	<b>3-0,4</b>	<b>3-0,6</b>	<b>3-0,8</b>	<b>3-1</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,76	69,86	69,87	69,87	69,91
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	15,14	18,84	18,7	18,76	18,57
<b>Ön-Arka EM katsayıları</b>	<b>3,5-0,2</b>	<b>3,5-0,4</b>	<b>3,5-0,6</b>	<b>3,5-0,8</b>	<b>3,5-1</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,75	69,87	69,86	69,88	69,91
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	14,82	18,75	18,62	18,65	18,48
<b>Ön-Arka EM katsayıları</b>	<b>4-0,2</b>	<b>4-0,4</b>	<b>4-0,6</b>	<b>4-0,8</b>	<b>4-1</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,76	69,89	69,89	69,89	69,88
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	15,28	18,54	18,44	18,52	18,42
<b>Ön-Arka EM katsayıları</b>	<b>5-0,2</b>	<b>5-0,4</b>	<b>5-0,6</b>	<b>5-0,8</b>	<b>5-1</b>
<b>Şarj Miktarı – İlk Şarj % 70</b>	70,36	70,13	70,12	70,16	70,16
<b>Yakıt Tüketimindeki İyileşme -%</b>	9,2	11,41	11,27	10,78	10,86

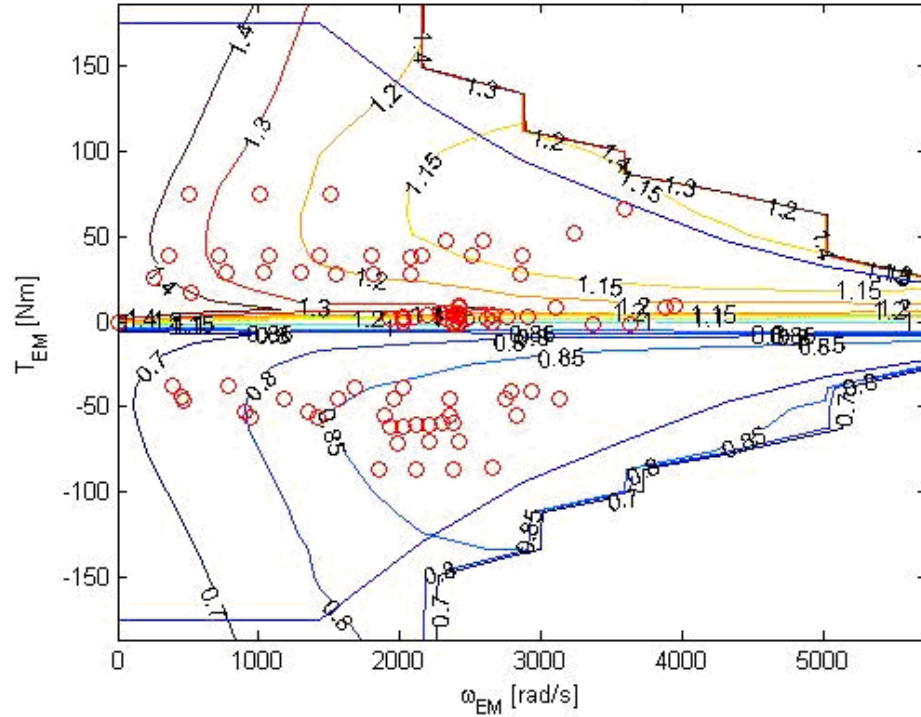
Elektrik motoru boyutları da düşünüldüğünde en uygun adaylar kutu içerisindeki katsayılara sahip motorlar olarak ortaya çıkmaktadır. Ön EM katsayısı “2” arka EM katsayısı “0,8” alındığında aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmaktadır:

Ön EM Gücü : 28,5 kW

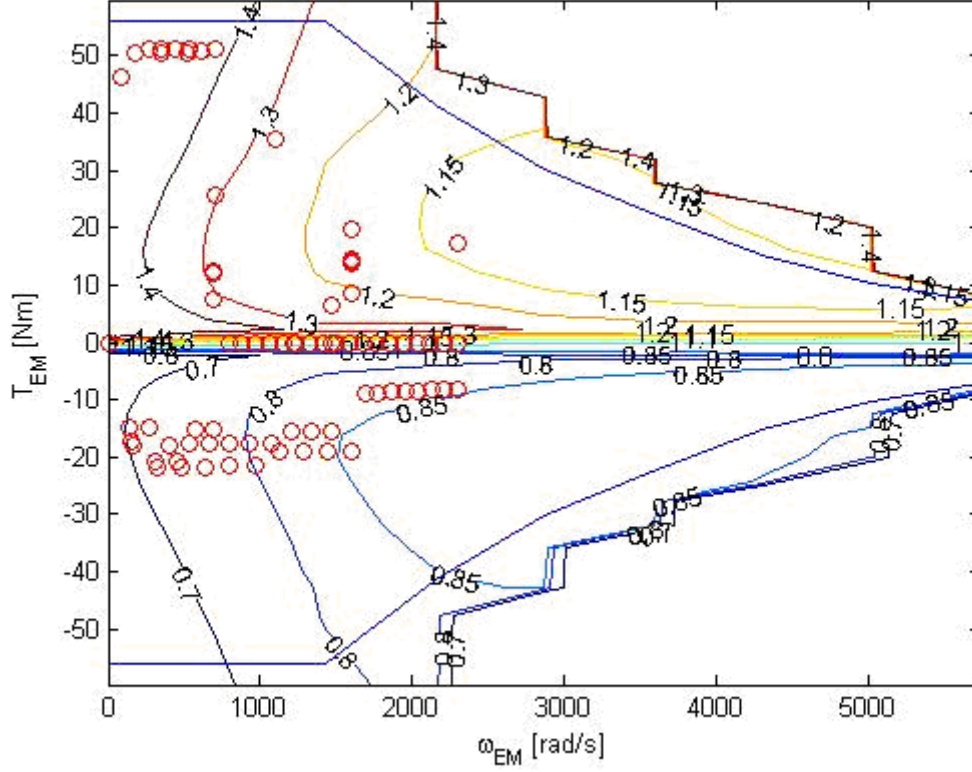
Arka EM Gücü : 9,2 kW

Hibridleştirme Oranı : % 30

Bu sonuçlar, aracın fren dağılımına göre uygunluk göstermektedir. Arka aksa düşen frenleme kuvvetleri, öndeki fren kuvvetinin yaklaşık üçte biridir. İkinci elektrik motorunun kullanılmasının amacına uygun bir sonuç ortaya çıkmıştır. Hesaplamanın önerdiği bu sonuçlara göre yapılan benzetimlerde, ön ve arka elektrik motorunun çalıştığı bölgeler, EM karakteristik eğrisi üzerinde çizdirilerek Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da verilmiştir.



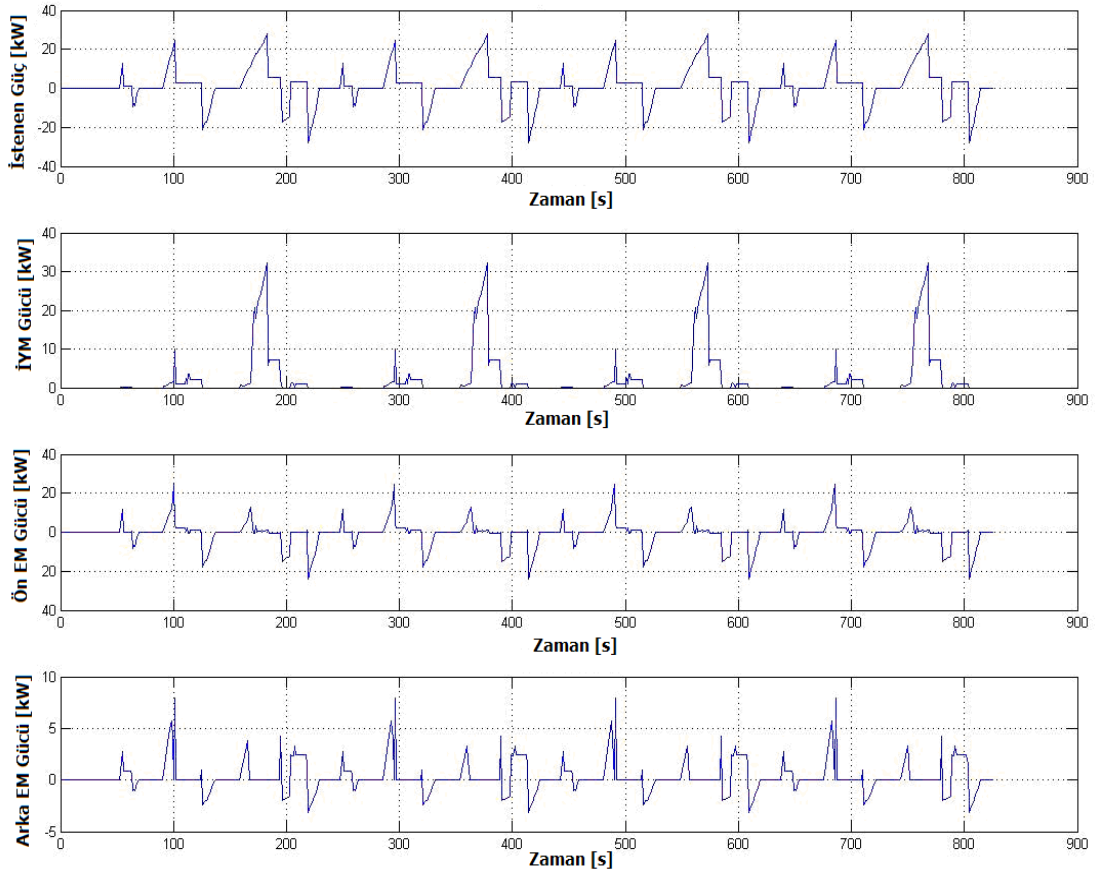
Şekil 5.5 : Ön elektrik motoru karakteristik eğrisi ve çalışma noktaları [12]



**Şekil 5.6 :** Arka elektrik motoru karakteristik eğrisi ve çalışma noktaları [12]

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da, ön elektrik motorunun yaklaşık 170 Nm, arka elektrik motorunun ise 60 Nm sabit tork verdiği görülmektedir. Her iki grafik karşılaştırıldığında, arka elektrik motorunun büyük oranda rejeneratif frenleme için kullanılmakta, ön motora kıyasla, tahrik için daha az sıklıkta kullanılmaktadır.

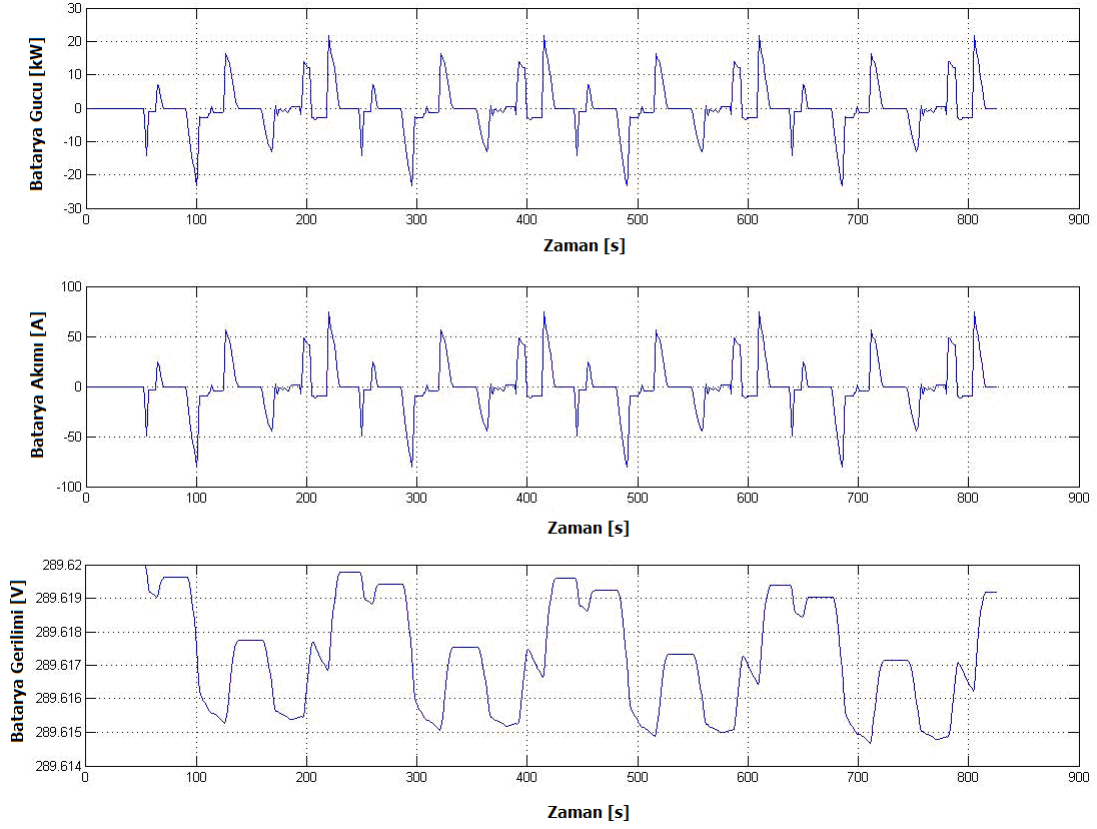
Sürücü tarafından istenen çevrim gücü, İYM, ön ve aks güç dağılımları Şekil 5.7'de verilmiştir. Grafiklerde, ön elektrik motorunun, hem tahrik hem de rejeneratif frenleme ve batarya şarjı için  $\pm 20$  kW güç sınırlarında, arka elektrik motorunun ise +9, -5 kW aralığında çalıştığı görülmektedir.



**Şekil 5.7 :** Güç kaynaklarının güç paylaşım grafikleri [27]

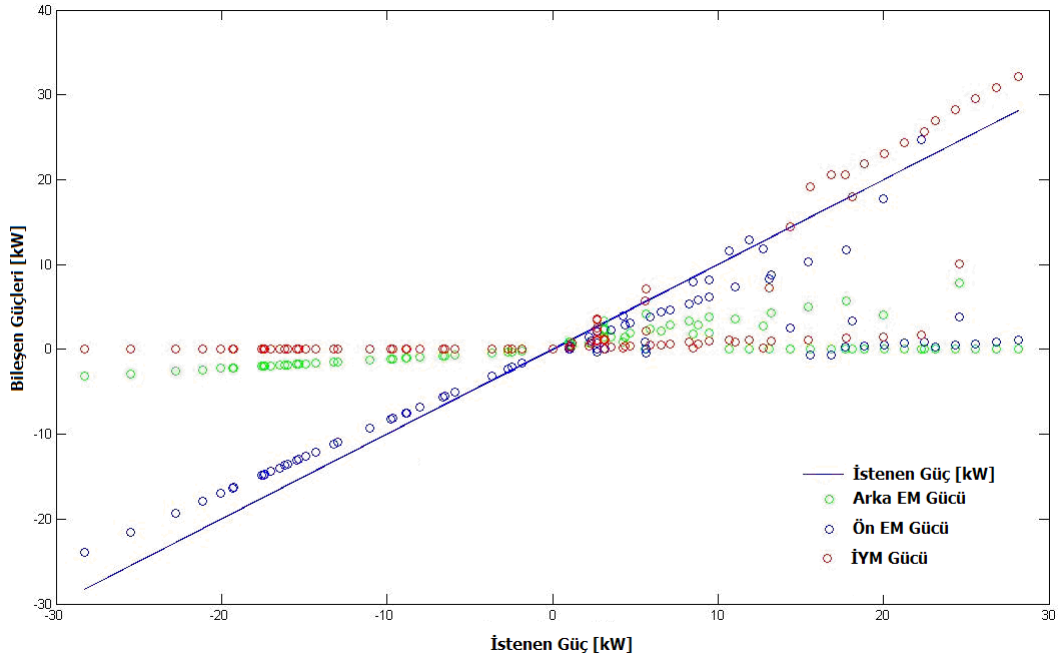
Çevrim süresince bataryanın güç, gerilim ve akım değerleri Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Güç grafiği incelenildiğinde, bataryanın  $\pm 20$  kW sınırları arasında çalıştığı görülmektedir. Dolayısı ile toplam elektrik motoru gücü yaklaşık 38 kW olarak hesaplanırsa da, bu elektrik motorları ile uyumlu olacak şekilde çalışabilen batarya gücü 20 kW olarak hesaplanmıştır.

Dikkat edilmesi gereken başka bir husus da, batarya gerilim grafiğinin, kullanılan denklemler nedeniyle batarya şarj seviyesindeki karakteristiği göstermesidir.



**Şekil 5.8 :** Batarya güç, akım ve gerilim grafikleri [27]

Dinamik programlama ve eşdeğer yakıt tüketimi ile çevrim süresince hesaplanan güç dağılımları Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Belirli bir çevrim için kurallar çıkartılırken bu dağılımdan çıkartılmaktadır. Şekilden, içten yanmalı motorun 10 kW güç gereksinimi üzerinde yoğun olarak devreye girdiği görülebilmektedir. Güç gereksiniminin negatif olduğu frenleme bölgelerde, atılan fren enerjisinin büyük bir bölümü ön elektrik motoru tarafından emilmektedir. Bu bilgilerden yola çıkılarak, belirli bir sürüş çevrimi için optimum hedef fonksiyonu değerlerine erişmek için kural tabanlı kontrolcü iyileştirilebilir.



Şekil 5.9 : Her bir güç kaynağının devrede olduğu güç bölgeleri

Hesaplamalar için oluşturulan MATLAB kodları EK A'da verilmiştir.



## 6. DİNAMİK PROGRAMLAMA YÖNTEMİ İLE OPTİMAL KONTROL

Dinamik sistemlerin kontrolünde, içerisinde integral bileşeni olan bir değer fonksiyonu var ise, en iyi değeri verecek kontrol dizisi optimal kontrol yöntemi ile bulunabilmektedir.

Sistemin durum uzayı denklemi;

$$\dot{x} = f[x(t), u(t), t], \quad t_0 \leq t \leq t_f \quad \text{ve } x(t) \text{ verilmiş olsun.} \quad (6.1)$$

Amaç fonksiyonu;

$$J = \varphi[x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt \quad (6.2)$$

Denklemleri ile ifade edilmektedir. Burada;

$u(t)$  : Kontrol sinyali

$x(t)$  : Durum vektörü

$t_f$  : Bitiş zamanı

$t_0$  : Başlangıç zamanını ifade etmektedir [33].

Burada problem, amaç fonksiyonunu  $J$  minimize edecek kontrol sinyali serisini  $u(t)$  bulmaktır. Sisteme uygulanacak kısıtlar da eklendiğinde, amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazılabilir.

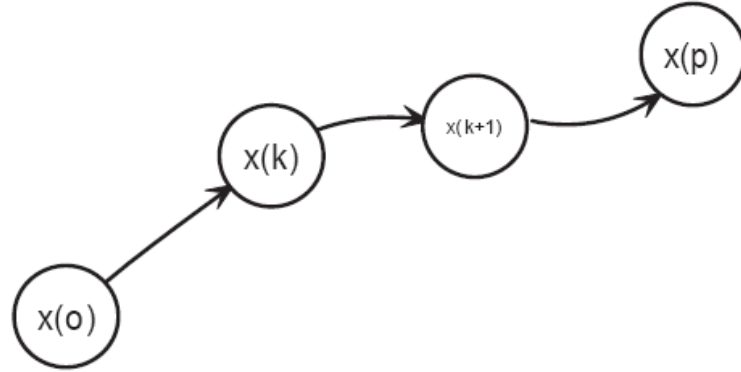
$$J = \varphi[x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} \left[ L(x(t), u(t), t) - \lambda(t)^T \left\{ f[x(t), u(t), t] - \dot{x} \right\} \right] dt \quad (6.3)$$

$\lambda(t)$  Lagrange çarpanı olarak ifade edilmektedir. Sistemin dinamik denklemi (6.1) ve değer fonksiyonu (6.2-3) yukarıdaki şekilde verildiğinde, belirli bir ilk ve son değer aralığında, amaç fonksiyonu minimum hale geldiğindeki sistem durum yörüngelerine

$x^*$  optimum rota, bu durumlara getirecek kontrol vektörüne de  $u^*$  optimum kontrol denilmektedir. Bir optimizasyon probleminin çözümünde, gerek ve yeter şartların incelenmesi için birinci ve ikinci kısmi türevler alınmakta, eğer bir optimum değer var ise denklemler analitik olarak çözülebilmektedir.

Hibrid elektrikli araç sisteminde, çok sayıda bileşenin olması, sistemin sürekli ve ayrık durumlarda çalışması, sürücü, trafik gibi modellenmesi zor etkenler ile batarya gibi iç dinamiğini ifade etmesi zor sistemlerin olması nedeniyle analitik çözümler zorlaşmaktadır. Bu nedenle, bu tür bir problemin çözümü için geliştirilmiş Dinamik Programlama (DP) gibi yöntemler kullanılmaktadır.

1950'li yıllarda Richard E. Bellman tarafından geliştirilen DP yöntemi, "Optimal parçaları da optimaldır", ilkesi üzerine kurulmuştur. Bu ilkeye göre, eğer  $x(0)$  ile  $x(p)$  arasındaki yol optimum yol ise,  $0 < k < p$  olmak üzere  $x(k)$  ile  $x(k+1)$  arasında kalan alt yollar da optimum olmak zorundadır (Şekil 6.1.).



Şekil 6.1 : DP en iyileme ilkesi [14]

Dinamik programlama yönteminde, herhangi bir zamanda (kontrol adımında) sistemin bulunabileceği durumlar tespit edilerek ayrıklaştırılır (Şekil 6.2).



DP uygulamasında, her bir durum ve zaman adımı için en optimum değer tablolar halinde saklandığı için yapılacak hesaplama sayısı yüksek oranlarda düşmektedir. Bu durumda toplam işlem sayısı  $n^2 \cdot t_f$  olacaktır.

Dinamik programlamada ayrık zamanlı dinamik sistem:

$$x(k+1) = f[x(k), u(k), w(k)], \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (6.4)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Burada:

$k$  ayrık zaman dizini

$x_k$  sistem durumu

$u_k$   $k$  zaman adımında seçilen kontrol büyüklüğü

$w_k$  gürültüye bağlı rastgele sayı

$N$  kontrol sinyallerinin uygulanacağı zaman ufkudur [46]

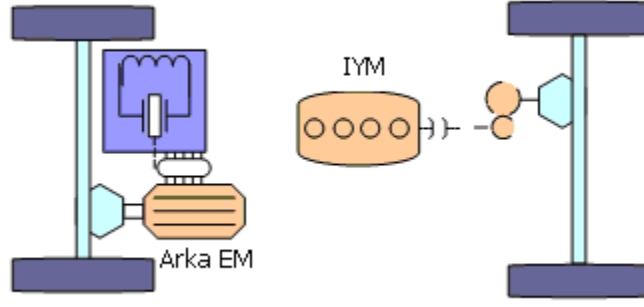
Amaç fonksiyonu zaman içerisinde toplama içerdiğinden:

$$J = g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k, w_k) \quad (6.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $g_N(x_N)$ , son durumda gerçekleşen amaç fonksiyonu değeridir.

## 6.1 DP Çözümü Uygulanan Araç Yapılanması

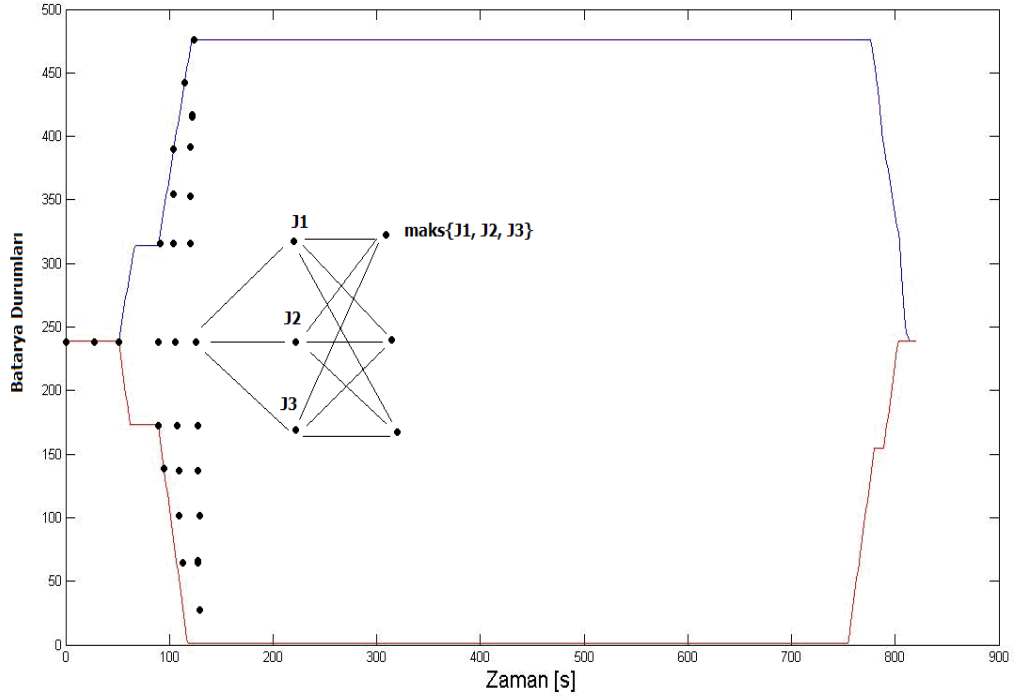
DP için Şekil 6.3'deki araç yapılanma modeli kullanılmıştır. Eşdeğer yakıt tüketimi hesaplarında kullanılan modelden farklı olarak, hesaplama zamanını kısaltmak için göreceli olarak daha basit bir model kullanılmıştır. DP için hazırlanan modelde, İçten Yanmalı Motor (İYM), araç sisteminden kontrollü bir kavrama ile ayrılabilir. Araç, arka akstan bir elektrik motoru ile tahrik edilebilirken, ön aksta konvansiyonel araçta kullanılan içten yanmalı motor kullanılmaktadır.



Şekil 6.3 : Seçilen hibrid elektrikli araç yapılanması

## 6.2 Hibrid Elektrikli Araç DP Güç Dağılımı Hesabı

Hibrid elektrikli araçta, kontrol büyüklüğü olarak batarya şarj seviyesi seçilmiştir. Bu konuda iki farklı yaklaşım vardır. Eğer kontrol büyüklüğü olarak elektrik motoru gücü seçilir ise, batarya şarj seviyesini istenilen sınırlar arasında tutmak için değer fonksiyonunun da batarya şarj değişimini cezalandıran denklemlerin de kullanılması gerekir. Bu çalışmada, durum uzayı olarak, her bir saniye için, -10 kW ile +10kW arasında 100 kW adımlarla değişen kontrol vektörü ile batarya iç şarj seviyesi olarak belirlenmiştir. Her zaman adımındaki en düşük ve en yüksek kontrol büyüklükleri uygulandığında bataryanın bulunabileceği durum sınırları Şekil 6.4’de gösterilmiştir.



Şekil 6.4 : Batarya durum uzayı ve DP çözümü

Batarya ve EM verimleri de hesaba katılarak EM milindeki güç vektörü hesaplanmaktadır.

Her bir kontrol büyüklüğüne denk gelen EM gücü ve çevrimde, o anda gerekli olan güç belirli olduğu için, güç dengesinden içten yanmalı motorun gücü aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir.

$$P_{IYM} = P_{Req} - P_{EM} \quad (6.6)$$

Hesaplanılan içten yanmalı motor tork ve açısal dönme hızları kullanılarak, motor yakıt tüketimi haritaları yardımı ile çevrim boyunca, durum uzayı için gereken yakıt miktarı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$J = \sum_{t_0}^{t_f} \dot{m}(P_{EM}) \quad (6.7)$$

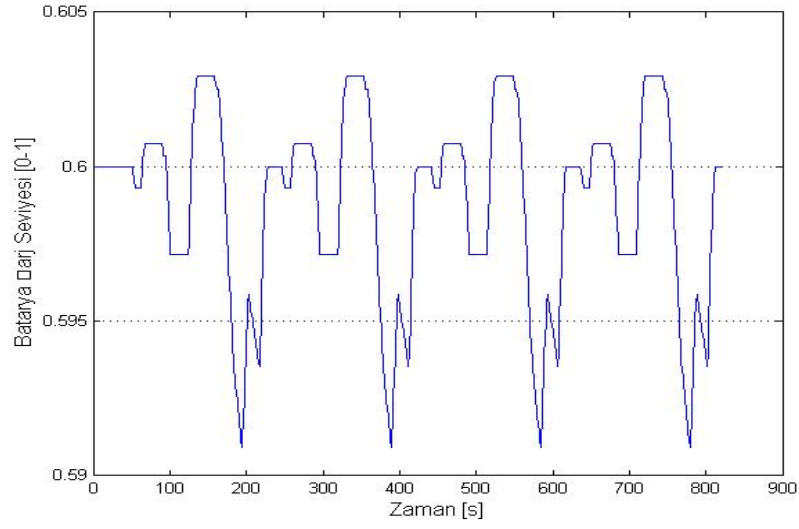
### 6.3 DP Çözümü Sonuçları

DP ve eşdeğer yakıt tüketimi ile yapılan optimizasyon çalışmalarında ECE çevrimi için gerçekleşen konvansiyonel ve hibrid araç yakıt tüketimleri tablo'da karşılaştırmak amaçlı olarak verilmiştir. Bu tabloya göre DP ile yapılan optimizasyonda yakıt tüketimindeki iyileşme %23 olarak gerçekleşmektedir. Eş değer yakıt tüketimi hesaplarında kontrollü kavrama kullanılmıştır. Kontrollü kavrama kullanıldığında, içten yanmalı motor, frenleme zamanlarında araç gövdesinden ayrılmakta ve bu esnada rölanti devrinde çalışmaktadır. Kavrama kullanılmadığı durumlarda, İYM frenleme zamanlarında araç gövdesine bağlı olduğundan ve bu esnada motor freni yaptığından yakıt kesmekte dolayısıyla DP çözümünde daha fazla oranda iyileşme gerçekleşmektedir.

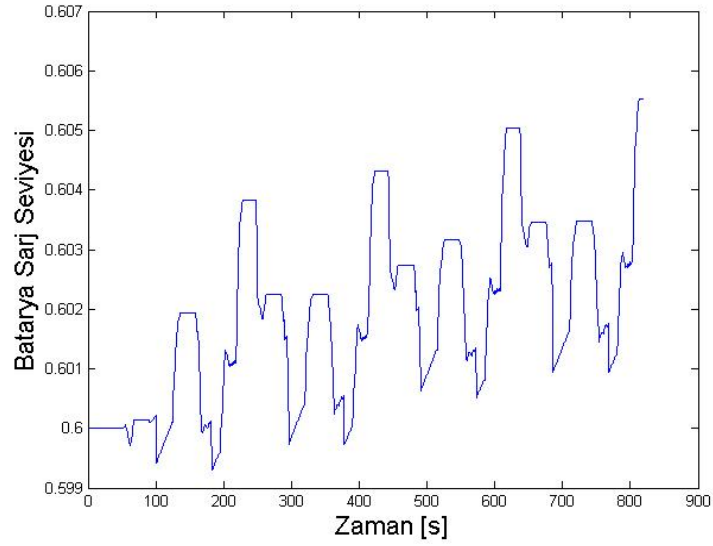
**Tablo 6.1** : Yakıt tüketimi karşılaştırma tablosu

	<b>DP</b>	<b>Eş Değer Yakıt Tüketimi</b>
<b>Konvansiyonel</b>	11. 142 litre/100 km	11.4 litre/100 km
<b>Hibrid</b>	8.54 litre/100 km	9.63 litre/100 km
<b>İyileşme</b>	%23,33	%15.5

Tablo 6.1'de verilen değerler 3000 kg ağırlığındaki araç için hesaplanmıştır. Her iki yöntemde de frenleme enerjisinin arka aksa düşen kısmının tümü kadar geri kazanılmaktadır. Batarya şarj durumu, EM ve İYM güç ve tork grafikleri her bir yöntem için karşılaştırmak amacı ile verilmiştir. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da her iki çözüm yöntemi için elde edilen batarya şarj seviyeleri gösterilmiştir. Her iki şekilde de benzer şarj durumu eğilimleri olduğu görülmektedir.



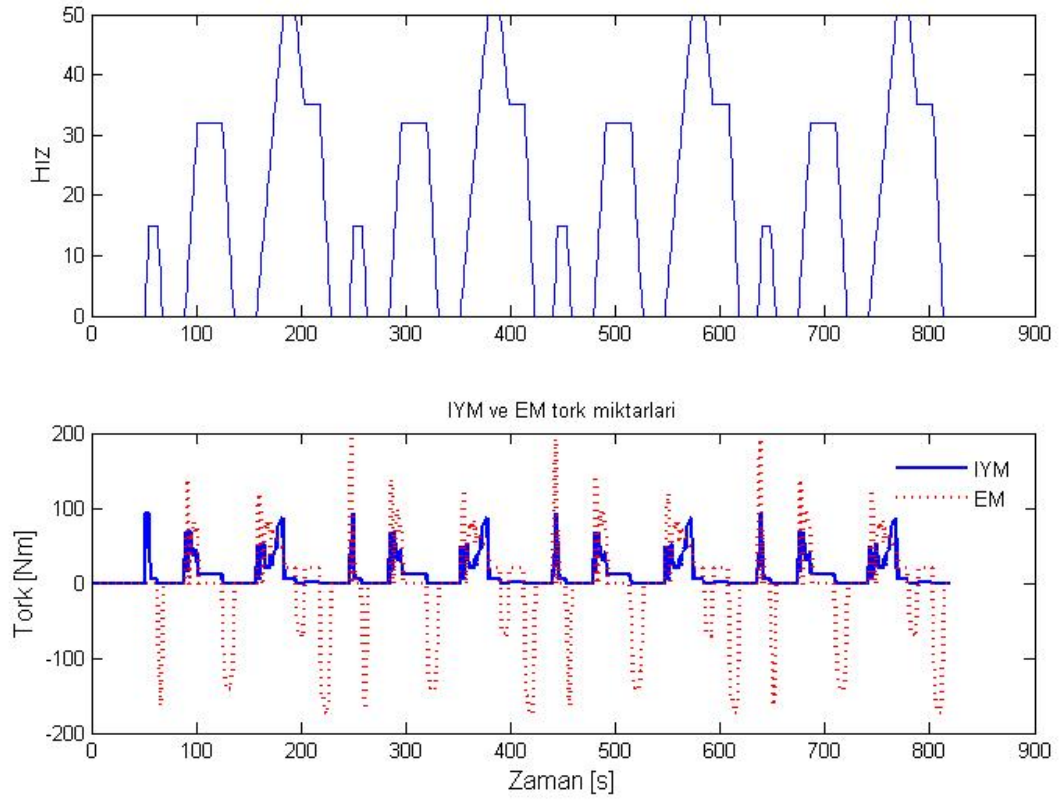
**Şekil 6.5 :** DP batarya şarj seviyesinin zamanla değışimi



**Şekil 6.6 :** Eşdeğer Yakıt Tüketimi batarya şarj seviyesinin zamanla değışimi

ECE hız çevrimi için DP yöntemi ile hesaplanılan İYM ve EM torqları Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi frenleme bölgelerinde, EM’u batarya sınırları dahilinde (hesaplarda kullanılan kontrol sinyali sınırı  $\pm 10$  kW’dır) rejeneratif fren yapmakta, belirli bölgelerde EM, İYM’a destek vermektedir.



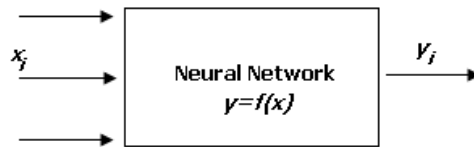


**Şekil 6.7 :** ECE Hız çevrimi ve DP ile elde edilen optimum tork dağılımları

Hesaplamalar için oluşturulan MATLAB kodları EK B'de verilmiştir.

## 7. SİNİRSEL – DİNAMİK PROGRAMLAMA

Geçmişte yapılan bazı çalışmalarda dinamik programlama ve öğrenmeye dayalı yöntemlerin birleştirildiği ve dinamik programlama sonuçlarına yaklaşık çözümler veren yöntemler geliştirilmiştir [29, 37]. Öğrenme yöntemleri, bir öğreticinin bulunduğu (supervised) ve bir öğreticinin bulunmadığı (unsupervised) yöntemler olarak iki sınıfa ayrılır. Bir öğreticinin bulunduğu yöntemlerde, öğrenen sistem giriş değerine  $x$  karşılık gelen sistem yanıtları  $y$  sağlanmakta ve giriş – çıkış değerleri arasındaki ilişkiye yakınsayacak bir fonksiyon elde edilmektedir. Eğer verilen giriş değeri  $x$  için bir çıkış değeri sağlanamıyor ise sistemde bir öğretici bulunmadığından uygun iteratif yöntemler ile ziyaret edilecek durumların değerleri ile uygulanan kontrol sinyallerinin değerleri karşılaştırılarak, bulunulan durum için en iyi sonucu veren kontrol sinyali dizisi belirlenerek optimum kontrol sinyali dizisi bulunmaktadır. İkinci tipteki öğrenme yöntemi takviyeli öğrenme ya da yaklaşık dinamik programlama olarak anılmaktadır. Dinamik programlama ve yaklaşık dinamik programlama yöntemlerinde elde edilen giriş ve çıkış değerleri arasındaki ilişkiyi belirlemek amacı ile yapay sinir ağları kullanılması Sinirsel-Dinamik Programlama (SDP) olarak adlandırılmaktadır. Dünya şampiyonası çapında tavla programının geliştirilmesi [38], iş atölyesi planlanması [39] gibi alanlarda diğer öğrenme yöntemlerinden daha başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Yeni bir konu olması nedeniyle, yakınsama fonksiyonu modelinin seçilmesi, teorisinin çok anlaşılması nedeniyle deneme yanılma yöntemleri ile yapılmaktadır [29]. SDP yönteminde, verilen bir eğitim verisi  $x_i, y_i$  için  $y=f(x)$  şeklinde bir yakınsama fonksiyonu aranmaktadır (Şekil 7.1).



Şekil 7.1: Yapay sinir ağları ile fonksiyon yaklaşımı

SDP yönteminde, dinamik programlamada ifade edilen amaç fonksiyonu,

$$J = g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k, w_k) \quad (7.1)$$

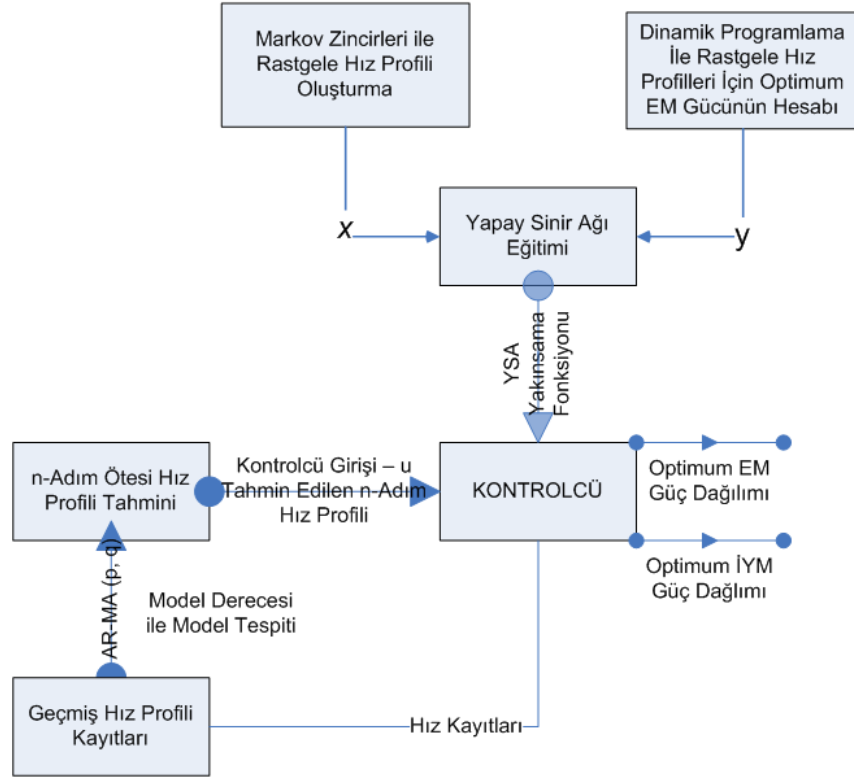
şeklinde ifade edildiğinde, bu amaç fonksiyonuna yakınsayacak fonksiyon matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [29].

$$\tilde{J} = r(0) + \sum_{k=0}^K r(k)\phi(i) \quad (7.2)$$

Burada  $r(k)$  ağırlık katsayılarını  $\Phi(i)$  ise eşik fonksiyonlarını ifade etmektedir. Sinir ağlarının eğitimi sırasında performans fonksiyonu olarak gerçekleşen ve yakınsayan değerler arasındaki farkın karelerinin toplamı  $\sum_{k=0}^K [J(i) - \tilde{J}(i)]^2$ , en aza indirilmeye çalışılmaktadır [29]. Sinir ağlarının yapısı ile ilgili ayrıntılı bilgi ilerleyen bölümlerde verilecektir.

Hibrid elektrikli araçlarda belirlenen bir amaç fonksiyonunun global minimumunun elde edilmesi, çok sayıda bileşeni olması nedeniyle analitik çözümü güç bir problemdir ve dinamik programlama yönteminin kullanılmasını gerektirmektedir. Global güç dağılımının dinamik programlama ile hesaplanması günümüz bilgisayar teknolojileri ile problemin boyutu nedeni ile büyük ölçekli zaman dilimleri gerektirdiğinden, DP sonucuna yakın sonuçları verebilecek bir fonksiyonun elde edilmesi fikrinden yola çıkılarak SDP yöntemi, hibrid elektrikli araç güç dağılımı probleminde uyarlanmıştır. Yöntemin uyarlanması üç aşamada gerçekleşmektedir (Şekil 7.2). Bu aşamalar, yapay sinir ağlarının eğitilmesi ve doğrulanması için araç dinamiğine uygun hız profillerinin  $x$  Markov Zincirleri ile elde edilmesi, rastgele hız profilleri için DP çözümünün  $y$  elde edilerek oluşturulan giriş  $x$ , çıkış  $y$  değerleri ile yapay sinir ağlarının eğitilmesi ve araç seyahati esnasında kestirilen kısa aralıklı hız

profilleri için eğitim sonucunda ortaya çıkan yakınsama fonksiyonu ile güç dağılımının yakınsamasından oluşmaktadır.



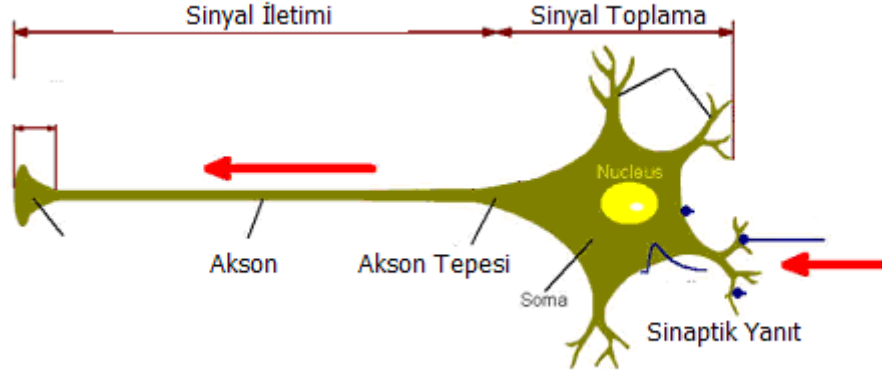
Şekil 7.2 : Hibrid elektrikli araç neuro-kontrol blok diyagramı

Markov zincirleri ile olasılık matrisinin hesaplanması ve rastgele hız profilinin oluşturulması için kullanılan MATLAB kodları EK C ve EK D’de verilmiştir.

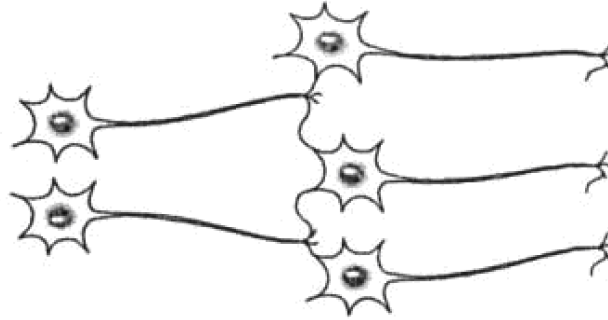
## 7.1 Yapay Sinir Ağları

İnsan beyni, günümüz bilgisayarlarından farklı olarak, çok sayıda sinir hücresinin (nöron) birbirleri ile ilişki içerisinde paralel işlem yapabilmesi yeteneğine sahiptir. Beynin paralel ve çok sayıda işlem yapabilme kabiliyeti, yapay zekâ araştırmaları için esin kaynağı olmuştur. İnsan beynindeki sinir hücresinin yapısı şekilde gösterilmiştir. Her nöron, biyokimyasal reaksiyonlar ile bilgi alımı, bilginin aktarılması gibi işlevleri

gerçekleştirebilmekte ve diğer nöronlardan gelen biyokimyasal sinyalleri işleyebilmektedir. Soma (sinir hücresi gövdesi) kısmında bulunan dentridler aracılığı ile diğer nöronlardan gelen sinyaller toplanmakta, gelen bu sinyallerin toplamı akson sinyal eşik değerini aştığında sinir hücresi akson üzerinden diğer sinir hücrelerine kimyasal sinyal göndermektedir (Şekil 7.3).



Şekil 7.3 : Biyolojik sinir hücresi [40]

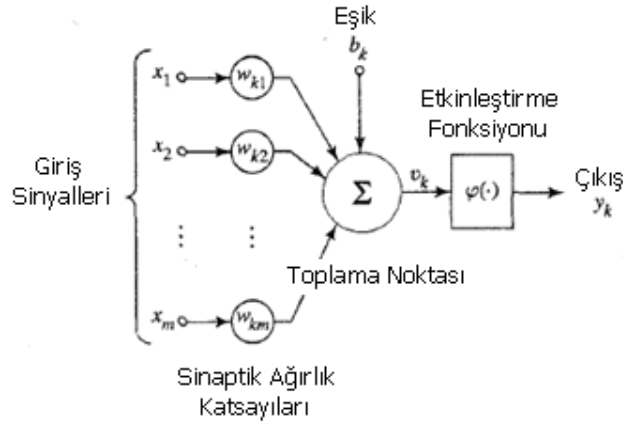


Şekil 7.4 : Biyolojik sinir ağı [30]

Öğrenme süreci birbirleri ile ilişkili sinir hücrelerinin yapılanması ile gerçekleşmektedir. Her bir sinir hücresi belirli bir bilgi edinimi sırasında kendisine bağlı diğer sinir hücrelerinden gelen sinyallerin toplamını kendi akson yapısına göre

diğer sinir hücrelerine iletmektedir (Şekil 7.4). Sinir hücreleri arasında kurulan bu ilişkiler öğrenme mekanizmalarını oluşturmaktadır.

Sinir hücrelerinin, bir ağ oluşturarak son nerece karmaşık olan işlemleri paralel işlem yapabilmeleri nedeniyle gerçekleştirebilmesi, genelleştirme yapabilmesi, yapay zekâ uygulamalarında yapay sinir ağlarının kullanımını başlatmıştır. Sinir hücresinin matematiksel gösterimi Şekil 7.5’de verilmiştir.



Şekil 7.5 : Yapay sinir hücresi [30]

Sinir hücresine diğer sinir hücresinden gelen sinyaller, ağırlıkları ile çarpılıp toplanmakta ve eşik değeri eklenmekte, elde edilen bu değere aktivasyon fonksiyonu uygulanmasından sonra yapay sinir ağının yanıtı elde edilmektedir.

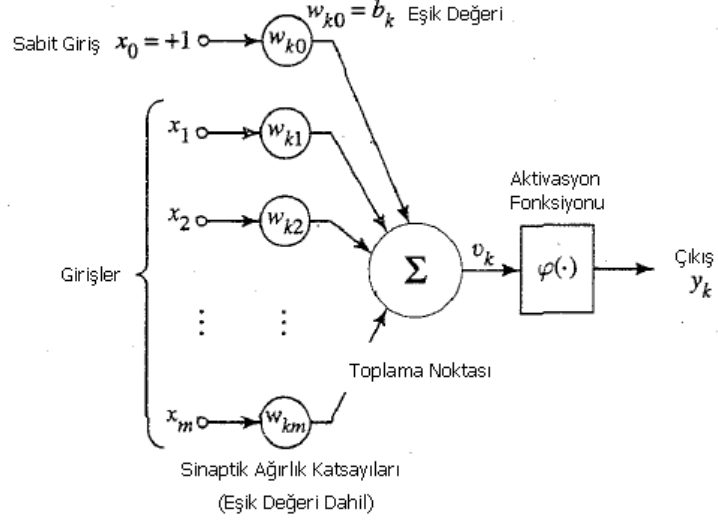
Girişlerin toplamı;

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (7.3)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (7.4)$$

Burada,  $x_1, x_2, \dots, x_m$  diğer sinir hücrelerinin çıkış değerlerini,  $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ ,  $\varphi$  ve  $y_k$  ise sırasıyla  $k$  indisli sinir ağının sinaptik ağırlık katsayıları, aktivasyon

fonksiyonunu ve çıkışını temsil etmektedir.



**Şekil 7.6 :** Eşik değeri sabit giriş olarak kabul edildiğinde yapay sinir hücresi [30]

Sinir hücresi eşik değeri de sabit bir giriş olarak ifade edildiğinde (Şekil 7.6) eşitlikler aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir.

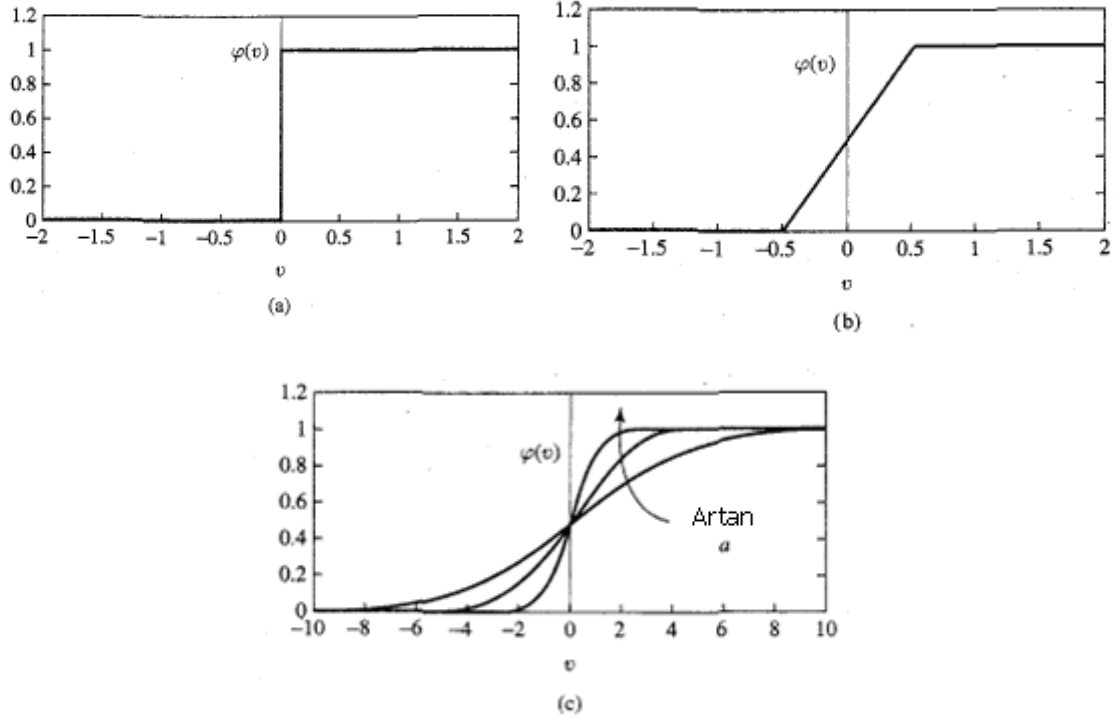
$$y_k = \varphi(v_k) \quad (7.5)$$

$$v_k = u_k + b_k \quad (7.6)$$

$$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} x_j \quad (7.7)$$

## 7.2 Aktivasyon fonksiyonları

Yapay sinir ağlarında, aktivasyon fonksiyonu, parçalı doğrusal aktivasyon fonksiyonu ve sigmoid fonksiyonları olmak üzere üç temel aktivasyon fonksiyonu tipi kullanılmaktadır (Şekil 7.7).



**Şekil 7.7 :** Yapay Sinir Hücresi Aktivasyon Fonksiyonları, (a) Eşik, (b) Parçalı Doğrusal Eşik, (c) Sigmoid Fonksiyonları [30]

Aktivasyon fonksiyonu;

$$\varphi(v_k) = \begin{cases} 1; & v \geq 0 \\ 0; & v < 0 \end{cases} \quad (7.8)$$

Parçalı doğrusal aktivasyon fonksiyonu;

$$\varphi(v_k) = \begin{cases} 1; & v \geq \frac{1}{2} \\ v; & -\frac{1}{2} < v < \frac{1}{2} \\ 0; & v \leq -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (7.9)$$

Sigmoid fonksiyonuna örnek olarak bu aileden lojistik fonksiyonu verilmiştir:

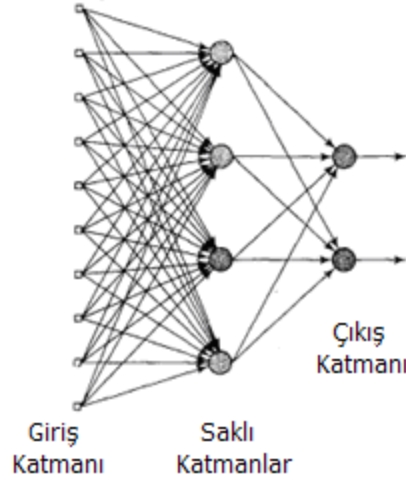


$$\varphi(v_k) = \frac{1}{1 + e^{-av}} \quad (7.10)$$

Burada  $a$  eğim parametresidir.

Yapay sinir ağlarında türevi alınabildiği için genellikle sigmoid fonksiyonları kullanılmaktadır.

Sinir hücreleri katmanlar halinde bir araya getirilerek yapay sinir ağı oluşturulur (Şekil 7.8).



Şekil 7.8 : Sinir ağı katmanları [30]

Sinir ağlarının eğitilmesi, kendilerine sağlanan giriş-çıkış değerleri arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmesi açısından, yapay sinir hücrelerinin sinaptik ağırlık katsayılarının değiştirilmesi ile gerçekleşmektedir. Yapay sinir ağlarında nöronların katsayılarının değiştirilmesi Delta Kuralı ile gerçekleştirilmektedir [30]. Delta Kuralı, azalan eğimler (Gradient Descent) yöntemini esas almaktadır. Bu yöntemde, her hangi bir fonksiyonun bulunulan noktadaki eğimi hesaplanılarak eğimin negatif olduğu yöne doğru önceden belirlenen miktar  $h$  ile orantılı olarak ilerletilerek fonksiyonun minimum olduğu değere erişilmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle iteratif bir yöntemdir.

Azalan eğimler yönteminin matematiksel ifadesi aşağıdaki denklemler ile verilmiştir.

$$w_{yeni} = w_{eski} - h dE/dw \quad (7.11)$$

$$\Delta w = -h dE/dw \quad (7.12)$$

Burada;

$h$  : Öğrenme faktörü

$dE/dw$  : Hatanın ağırlık katsayısına göre türevidir.

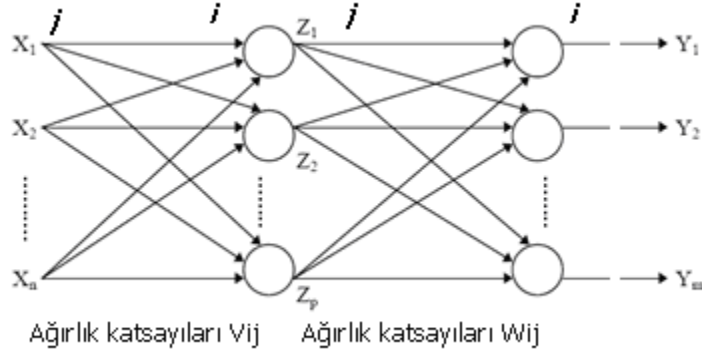
Çok katmanlı yapay sinir ağlarında, yapay sinir ağı çıkış değeri ve dinamik programlama yardımı kullanılarak hesaplanmış istenilen çıkış değerinin karşılaştırılması yapılmakta, gerçekleşen hatanın sinir ağı girişine kadar geri yayılarak hesaplanması ile her bir katmanda bulunan sinir ağlarının katsayıları bu yöntem ile güncellenmektedir. Çok katmanlı yapay sinir ağlarında uygulanan bu yöntem hatanın geri yayılması yöntemi olarak adlandırılmaktadır.

### 7.3 Hatanın Geri Yayılımı (Error Backpropagation) Yöntemi

Hatanın geri yayılımı eğitim yönteminde, her bir sinir hücresinin katsayısı, toplam hatayı azaltacak şekilde azalan eğimler yönteminin çeşitli tiplerinin kullanılması yardımı ile değiştirilmektedir. Eğitim yöntemi, genel olarak aşağıdaki denklemi ile ifade edilebilir.

$$w_{k+1} = w_k - hg_k \quad (7.13)$$

Burada  $g_k$  o andaki eğimdir. Eğimin hesaplanmasında, azalan eğimler, Newton yöntemleri, BFGS (Brayton, Fletcher, Goldfarb ve Shanno) gibi sayısal optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır [47]. Eğimin hesaplanabilmesi için türev alınması gerektiğinden sinir hücrelerinin aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonları kullanılmalıdır. Hatanın geri yayılımı yönteminin matematiksel gösterimi için iki katmanlı bir sinir ağı seçilmiştir (Şekil 7.9)



**Şekil 7.9 :** İki katmanlı bir sinir ağı [31]

Bu sinir ağı yapısında, giriş değerleri  $x_j$ ,  $V_{ij}$  ağırlık katsayıları ile gizli katmana bağlanmaktadır. Gizli katmanın çıkış değerleri  $Z_i$  aynı zamanda çıkış katmanının girişleridir.

Giriş  $x$  ve çıkış  $y$  değerleri bilindiği için sinir ağında bulunan sinir hücrelerinin ağırlık katsayıları geri besleme yardımı ile değiştirilmektedir. Başlangıçta tüm sinir hücrelerinin katsayıları rastgele olarak atanmaktadır. Sinir ağının giriş değerine verdiği cevap ile olması gereken arasında gerçekleşen hatalar arasındaki farkların karesinin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Bu aşamada, sinir ağlarının verdiği sonuçlar  $Y_i$ , eğitim verisi olarak kullanılmak üzere, belirli girişler için, dinamik programlama yöntemi ile elde edilen sonuçlar  $T_i$  ile karşılaştırılmakta ve her bir eğitim adımında iki sonuç arasındaki hatanın karesi alınmaktadır.

Amaç fonksiyonu;

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (Y_i - T_i)^2 \quad (7.14)$$

$$\Delta w_{ij} = -h \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \quad (7.15)$$

$w_{ij}$  katsayıları gizli katmanı çıkış katmanına bağladığı için, gizli katmanların çıkışı, çıkış katmanının giriş değerleri olacaktır [31]. Bu nedenle;

$$I_i = \sum_{j=1}^p w_{ij} Z_j \quad (7.16)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial I_i} \frac{\partial I_i}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial I_i} Z_j \quad (7.17)$$

$$\frac{\partial E}{\partial I_i} = \frac{\partial E}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial I_i} \quad (7.18)$$

$Y_i = F(I_i)$  fonksiyonu,  $F(I_i) = \frac{1}{1 + e^{-I_i}}$  lojistik fonksiyonu seçildiğinden;

$$\frac{\partial E}{\partial I_i} = \frac{\partial E}{\partial Y_i} F'(I_i), \text{ burada lojistik fonksiyonunun türevi } F'(I_i) = Y_i(1 - Y_i) \text{ şeklinde}$$

alınmaktadır.

$$F'(I_i) = Y_i(1 - Y_i) \quad (7.19)$$

$$\frac{\partial E}{\partial Y_i} = Y_i - T_i \quad (7.20)$$

Tüm denklemler yerlerine konulursa;

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = Z_j (Y_i - T_i) Y_i (1 - Y_i) \quad (7.21)$$

$$\Delta w_{ij} = -h Z_j (Y_i - T_i) Y_i (1 - Y_i) \quad (7.22)$$

denklemleri elde edilecektir. Aynı yöntem ilk katman için de tekrarlanır ise;

$$J_j = \sum_k v_{jk} X_k \quad (7.23)$$

$$Z_j = G(\sum_k v_{jk} X_k) \quad : \quad G(J) \text{ lojistik fonksiyonu} \quad (7.24)$$

$$I_i = \sum_{j=1}^p w_{ij} Z_j = \sum_{j=1}^p w_{ij} \left( G(\sum_k v_{jk} X_k) \right) \quad (7.25)$$

$$Y_i = F(I_i) = F\left(\sum_{j=1}^p w_{ij} \left( G(\sum_k v_{jk} X_k) \right)\right) \quad (7.26)$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left( F\left(\sum_{j=1}^p w_{ij} \left( G(\sum_k v_{jk} X_k) \right)\right) - T_i \right)^2 \quad (7.27)$$

$$\Delta v_{jk} = -h \frac{\partial E}{\partial v_{jk}} \quad (7.28)$$

Zincir kuralı yardımı ile aşağıdaki denklemler elde edilmektedir.

$$\frac{\partial E}{\partial v_{jk}} = \frac{\partial E}{\partial J_j} \frac{\partial J_j}{\partial v_{jk}} = \frac{\partial E}{\partial J_j} X_k \quad (7.29)$$

$$\frac{\partial E}{\partial J_i} = \frac{\partial E}{\partial Z_j} \frac{\partial Z_j}{\partial J_j} = \frac{\partial E}{\partial Z_j} G'(J_j) \quad \text{burada} \quad G(J_j) = \frac{1}{1 + e^{-J_j}} \quad \text{olduğundan}$$

$G'(J_j) = Z_j(1 - Z_j)$  şeklinde yazılır.

$$\frac{\partial E}{\partial J_i} = \frac{\partial E}{\partial Z_j} \frac{\partial Z_j}{\partial J_j} = \frac{\partial E}{\partial Z_j} G'(J_j) \quad (7.30)$$

$$\frac{\partial E}{\partial Z_j} = \frac{\partial E}{\partial I_i} \frac{\partial I_i}{\partial Z_j} = \frac{\partial E}{\partial I_i} w_{ij} \quad (7.31)$$

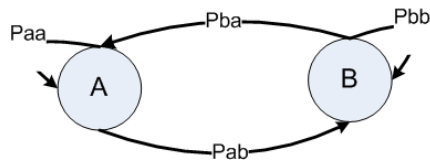
olduğundan;

$$\frac{\partial E}{\partial v_{jk}} = Z_j (1 - Z_j) X_k \sum_i (Y_i - T_i) Y_i (1 - Y_i) w_{ij} \text{ olarak hesaplanmaktadır.} \quad (7.32)$$

#### 7.4 Sinir Ağları için Hız Profili ve Optimum Güç Dağılımının Oluşturulması

Yapay sinir ağının eğitimi ve genelleştirme yeteneğinin iyileştirilmesi için çok sayıda giriş-çıkış değerinin sağlanması gerekmektedir. Hibrid elektrikli araçlarda, sürücünün talep ettiği güç profili ya da aracın hız profiline karşılık gelecek optimum güç dağılımı araştırıldığından, yapay sinir ağları için giriş olarak hız profili belirlenmiştir. Hız profillerinin elde edilmesi için iki yöntem önerilebilir. Bunlardan ilki, standart hız çevrimlerinden yararlanılarak her araç için uygun olabilecek hız profilleri oluşturmak, diğeri ise araç dinamiğine uygun sürücü güç gereksinimlerini hesaplayarak gaz pedalı girişine karşı araç modelinden elde edilebilecek hız profillerini elde etmektir. Bu hız profillerine karşılık gelen en iyi güç dağılımı ise yapay sinir ağlarının yakınsayacağı optimum güç dağılımı çıkış değerleridir.

Bu çalışmada, yapay sinir ağının eğitiminde giriş verisi olarak kullanılacak çok sayıda hız verisi, standart çevrimleri, Markov Zincirleri yardımı ile olasılık dağılımları hesaplanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 7.10 : Durumlar arası geçiş olasılıkları

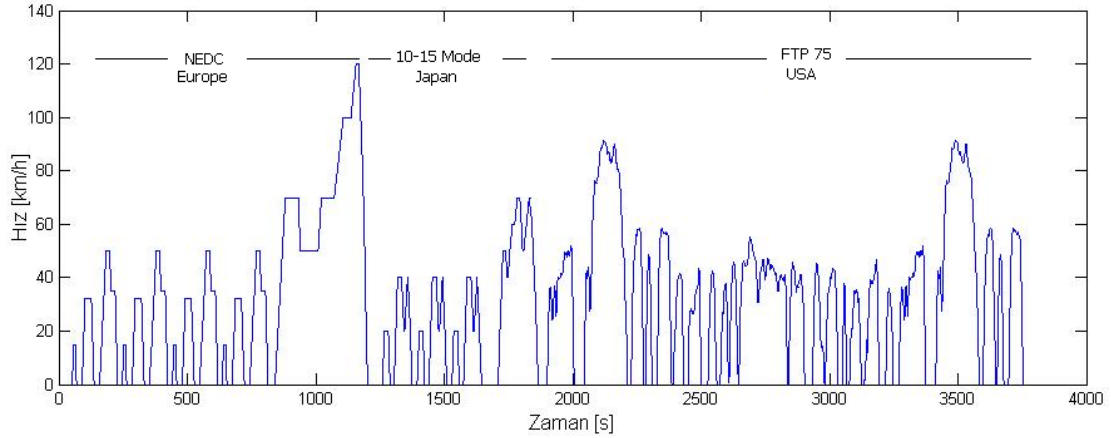
Markov Zincirlerinde, durumlar arasındaki geçiş, geçiş olasılık matrisine göre belirlenir. Şekil 7.10'da, A ve B durumları arasındaki geçiş olasılıkları temsil edilmektedir. İki durumlu bir sistemde, her bir durumda, mevcut durumda kalmak olasılığı ( $P_{aa}$ ,  $P_{bb}$ ) ve diğer duruma geçme olasılığı ( $P_{ab}$ ,  $P_{ba}$ ) vardır. Böyle bir durumda tüm olasılıkların toplamı bire eşit olacaktır.

Olasılık matrisi;

$$P = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} \\ P_{ba} & P_{bb} \end{bmatrix} \quad (7.33)$$

$$P_{aa} + P_{ab} = P_{bb} + P_{ba} = I; \quad (7.34)$$

Aracın her hangi bir hız değeri durum olarak alındığında, geçiş olasılık matrisi oluşturulduğunda bir sonraki hız durumu rastgele olarak elde edilebilir. Durumlar arası geçiş olasılık matrisinin oluşturulabilmesi için yalnızca bir standart çevrim yeterli olmayacağından Avrupa, Amerika ve Japonya'da kullanılan standart çevrimler birleştirilmiş (Şekil 7.11) ve bu standart çevrimlerden yararlanılarak hızlar arasındaki geçiş olasılık matrisi elde edilmiştir.



**Şekil 7.11** : Birleşik standart hız profilleri

Bu birleştirilmiş çevrimdeki her bir hız değeri aracın bulunabileceği durumlar olarak kabul edilmiştir. Her hangi bir anda aracın bulunduğu hız değerinden geçeceği hız

değerleri geçiş matrisi ile rastgele olarak seçilebilmektedir. Bir  $a$  hızından  $b$  hıza geçme olasılığı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$P_{ab} = \frac{N_{ab}}{N_a} \quad (7.35)$$

Burada,  $N_a$  birleştirilmiş hız çevrimindeki  $a$  hız değerinin sayısını,  $N_{ab}$  ise bu  $a$  hızından  $b$  hıza geçme sayısını ifade etmektedir. Araç hızı durum olarak alındığında, hızlar arasındaki olasılık geçiş matrisi için örnek olarak Tablo 7.1'deki matris verilmiştir.

**Tablo 7.1 : Geçiş olasılık matrisi**

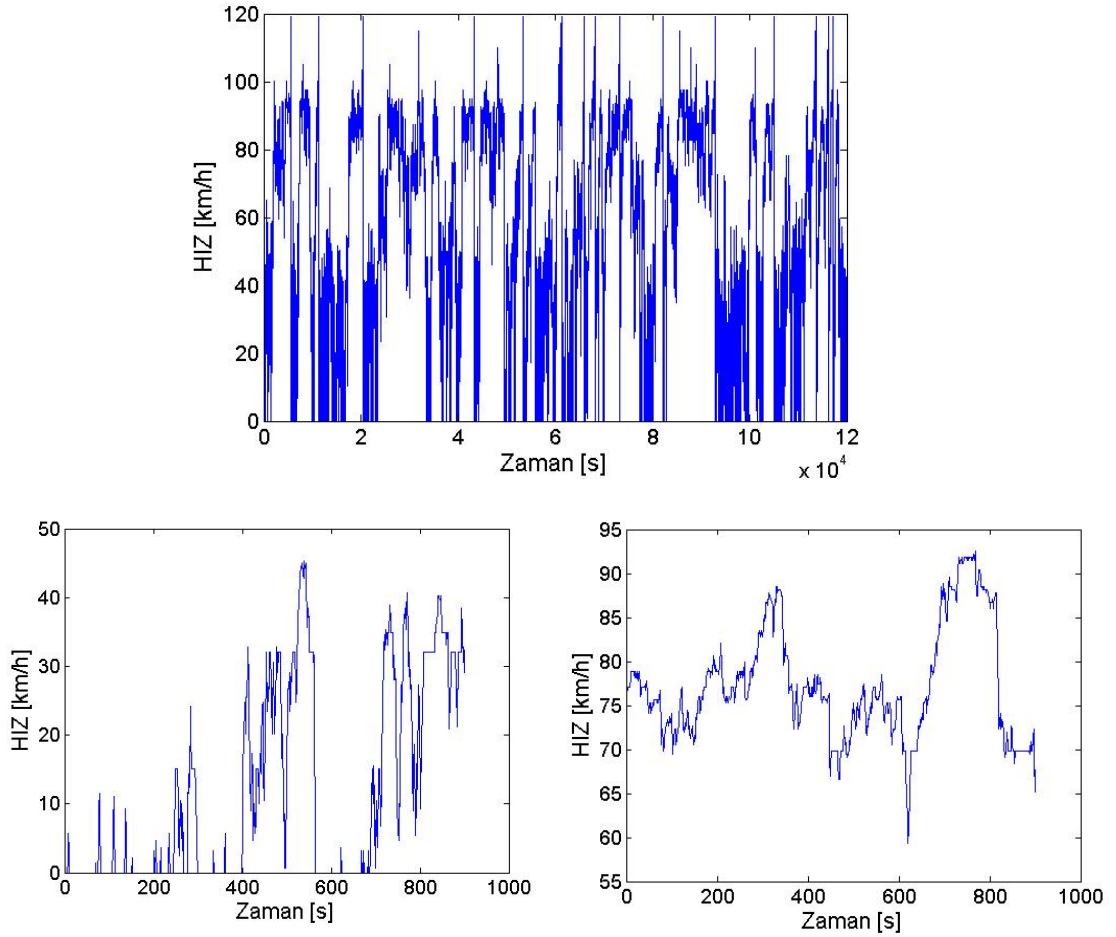
Hız [km/h]	0	1	2	.	.	119	120
0	0.94	0.03		.	.	0	0
1	0	0.25	0.42	.	.	0	0
2	0.5	0	0.25	.	.	0	0
.	.	.	.	.	.		
.	.	.	.	.	.		
119	.	.	.	.	.	0	1
120	.	.	.	.	.	0.06	0.90

Hızlar arasındaki geçiş olasılık matrisi kullanılarak, rastgele oluşturulan olasılık değerlerine göre, olasılık dağılım matrisi üzerinden rastgele hızlardan oluşan 120.000 saniye uzunluğunda bir hız çevrimi elde edilmiştir. Şekil 7.12'de bu hız çevrimi ve içerisinde rastgele seçilen 900 saniye uzunluğunda iki örnek hız çevrimi gösterilmiştir.

Araç dinamiğine uygun bu hız çevrimi için vites durumları, daha önceden en iyi araç performansı göz önünde tutularak hazırlanan otomatik vites modeli ile hesaplanmıştır. Oluşturulan 120.000 saniye uzunluğundaki hız profili 30'ar saniye uzunluğunda 4000 adet kısa hız profillerine bölünmüş ve her bir hız profili için gerekli güçler hesaplanarak matris formuna getirilmiş ve DP çözümleri elde edilerek



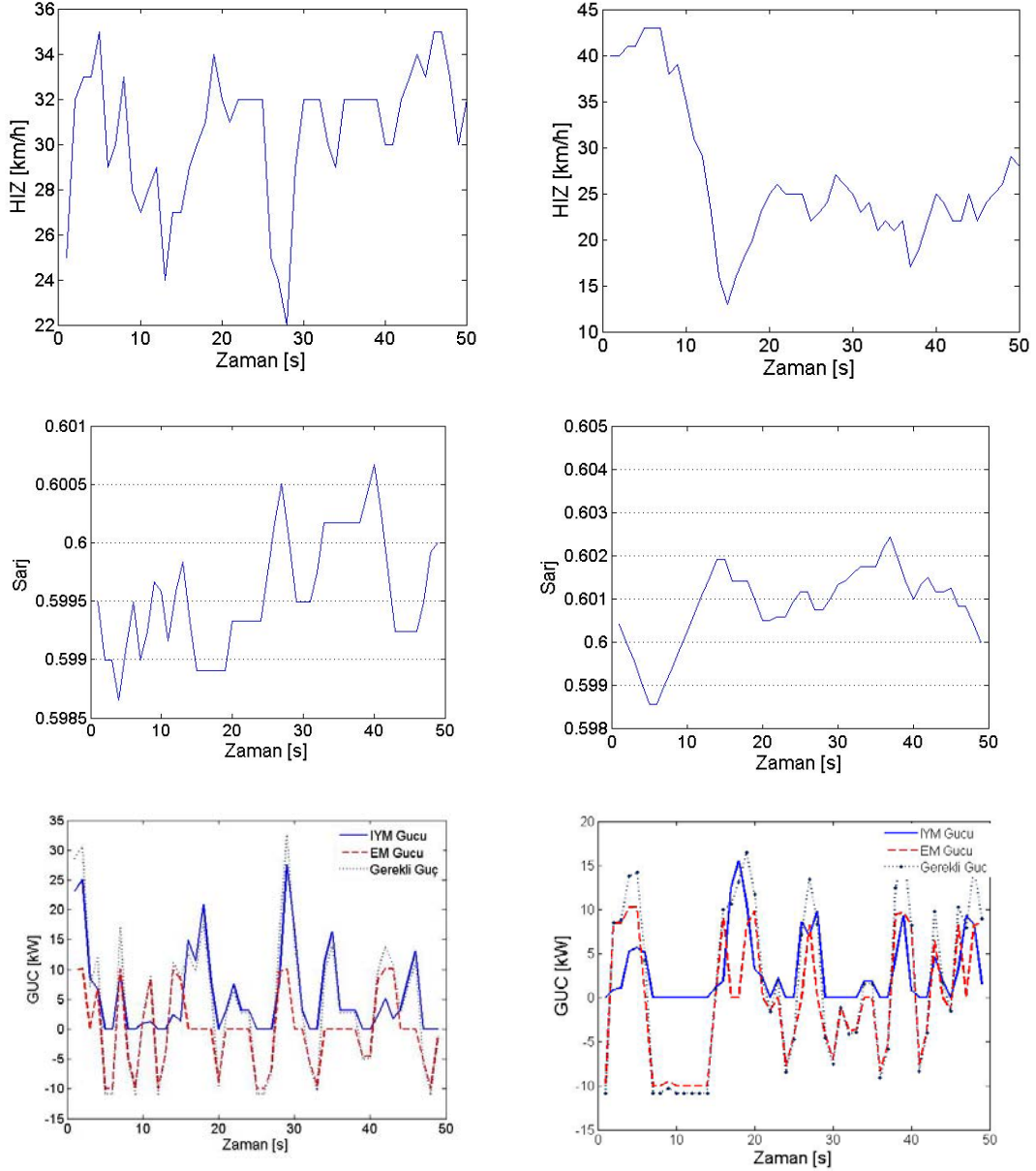
sinir ağının eğitimi için gerekli giriş ve çıkış eğitim verileri elde edilmiştir. Oluşturulan 4000 hız vektörünün tamamı için DP çözümü elde edilerek bunların ilk 3000 adedi yapay sinir ağının eğitimi için kullanılmıştır. Kalan 1000 adet hız vektörü ve DP çözümü ise yapay sinir ağı sonuçları ile DP çözümü sonuçlarının karşılaştırılması için kullanılmıştır. Bu hesaplamalar için örnek Matlab kodları EK-II' de verilmiştir.



**Şekil 7.12 :** Markov Zincirleri ile oluşturulan hız profili ve kesitleri

Yukarıda verilen rastgele hız profilleri içerisinde seçilen 50 saniye uzunluğundaki rastgele hız profilleri için DP çözümü ile hesaplanan optimum güç dağılımları, batarya şarjı ve yakıt tüketim değerleri Şekil 7.13'de iki örnek ile verilmiştir. Bu şekillerde, her iki rastgele hız profilinde de, hız profilinin sonundaki batarya şarj

değerinin başındaki ile aynı olduğu görülmektedir. Her iki hız profilinde de yakıt tüketimindeki iyileşme oranı yüksektir. Her bir zaman adımında, kontrol sinyalinin (bataryadan anlık olarak çekilebilecek güç)  $\pm 10$  kW ile sınırlandırılmış olması nedeniyle güç eğrilerinde EM maksimum gücü  $\pm 10$  kW olarak görülmektedir.



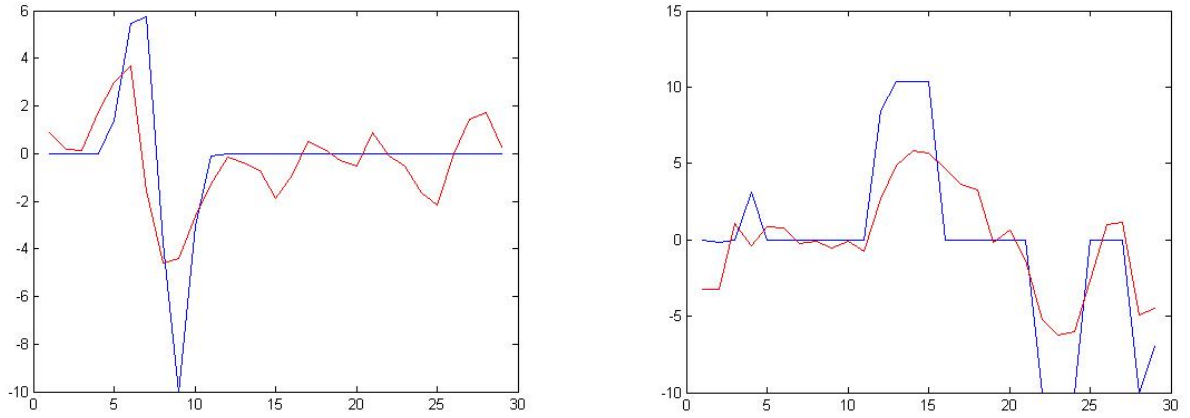
Konvansiyonel 8.95 l/100 km  
DP Çözümü 6.02 l/100 km, İyileşme %23

Konvansiyonel 6.74 l/100 km  
DP Çözümü 4.05 l/100 km, İyileşme %40

**Şekil 7.13** : İki farklı hız profili için DP çözümü ile elde edilen optimum güç dağılımları

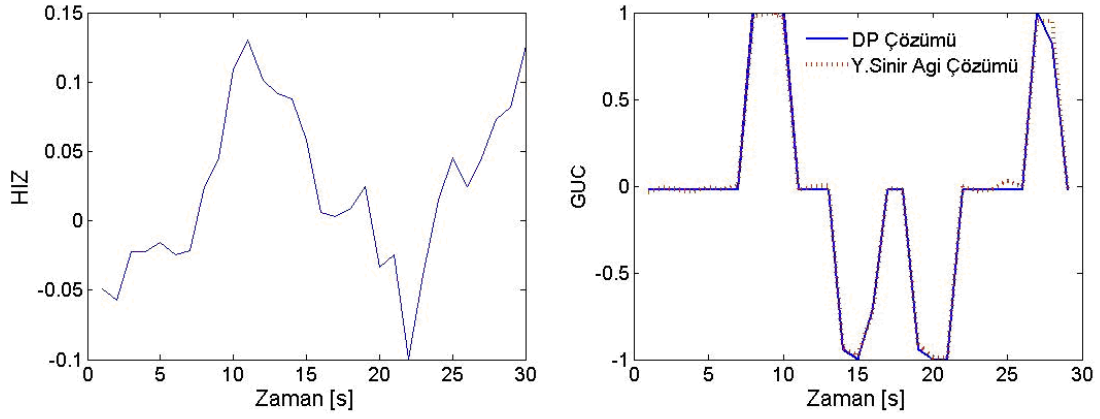
DP çözümünü yakınsamak için her biri 900 sinir hücresinden oluşan iki gizli katman ile 30 saniyelik hız verisi için 30 hücreden oluşan giriş katmanı ve bu hız profilleri için optimuma yakın elektrik motorunu gücünü verecek olan 29 sinir hücresine sahip çıkış katmanından oluşan bir sinir ağı oluşturulmuştur. Sinir ağının katman sayısı ve gizli katmanlarda bulunması gereken sinir hücresi sayısı deneme yanılma yöntemi ile elde edilmiştir.

Hibrid elektrikli araç probleminin geniş yapıları karmaşık bir problem olması, çok sayıda bileşen nedeniyle denklem sayısının fazla olması, trafik ve sürücü davranışlarındaki belirsizlikler dolayısıyla ile optimizasyon problemi güçleşmekte ve sonuca yakınsayacak sinir ağı yapısı karmaşıklaşmaktadır. Yapay sinir ağlarında iyi bir yaklaşım elde edebilmek için hem katman sayısının hem de bu katmanlar içerisindeki sinir hücresi sayısının yeteri kadar fazla olması gerekmektedir. Yapılan ilk çalışmalarda, katman ve sinir hücresi düşük tutulmuş ve DP çözümü ile elde edilen çözümler ile sinir ağı çözümleri karşılaştırılmıştır. Bu ilk denemelerden, altı katmanlı ve her bir katmanında 100 sinir hücresi olan bir sinir ağının verdiği sonuçlar DP çözümü ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7.14’de verilmiştir.

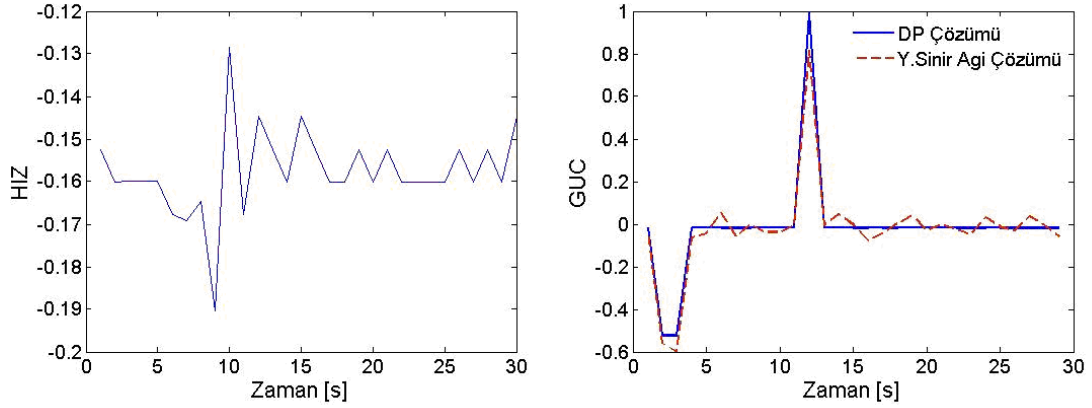


**Şekil 7.14 :** İki farklı hız profili için DP çözümü ve altı katmanlı, 100 sinir hücreli yapay sinir ağları ile elde edilen optimum EM güç dağılımları (x-ekseni zaman, y-ekseni normalleştirilmiş güç)





**Şekil 7.16 :** İkinci rastgele hız profili için optimum EM gücü yapay sinir ağları ve DP çözümü

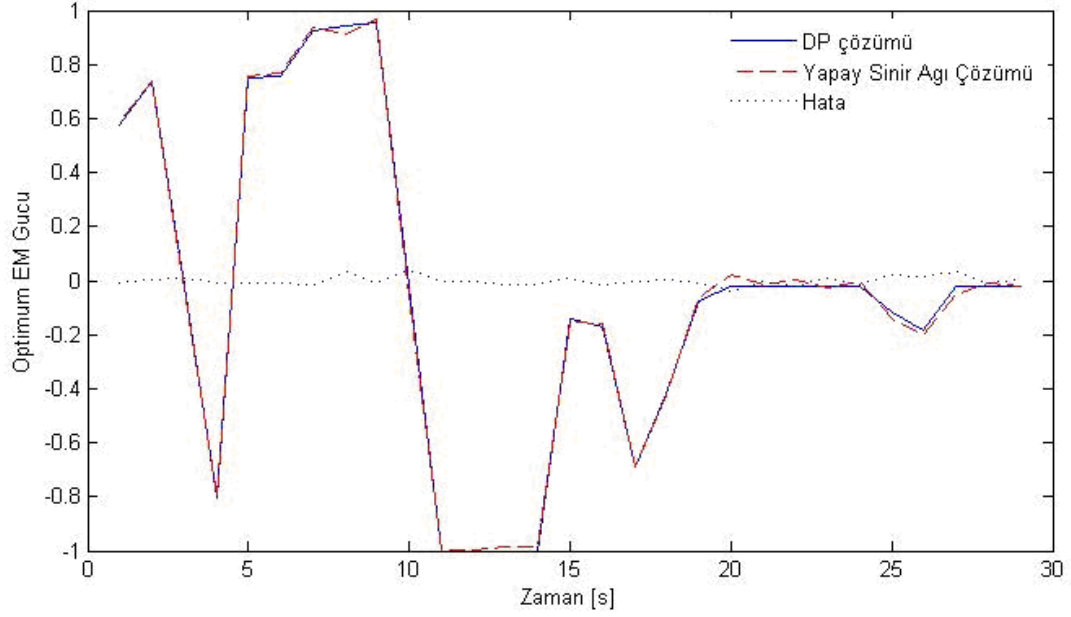


**Şekil 7.17 :** Üçüncü rastgele hız profili için optimum EM gücü yapay sinir ağları ve DP çözümü

Sol tarafta bulunan şekiller rastgele oluşturulan hız profillerini, sağ taraftakiler ise bu hız profiline karşılık gelen DP ve eğitilmiş sinir ağları ile hesaplanan optimumum elektrik motoru güç dağılımlarını temsil etmektedir. Şekillerden de görülebileceği gibi, gücün sabit olduğu bölgelerde, sinir ağlarını ufak boyutlarda dalgalı sonuçlar vermektedir. Güç gereksiniminin sıfır seviyesinde olacağı bölgeler önceden tahmin etme yöntemleri ile bilindiğinden, sinir ağlarının verdiği bu salınımlar filtrelenebilmektedir.

Rastgele bir hız profili için yapay sinir ağları ve DP ile elde edilen optimum EM güç

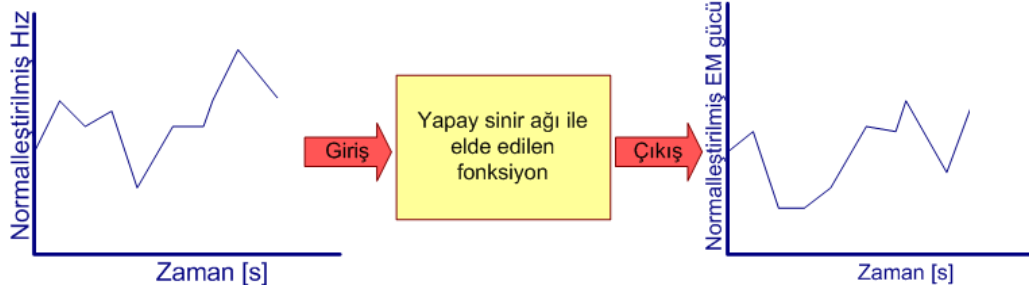
dağılımı ve gerçekleşen hata Şekil 7.18’de verilmiştir. Şekilden, 30 saniye uzunluğundaki bir hız çevrimi için yapay sinir ağı çözümü ile DP çözümü arasındaki hatanın düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 7.18 : Yapay sinir ağı, DP çözümü ve gerçekleşen hata

## 7.5 Ön Görülü Kontrol

Yapay sinir ağları ile elde edilen fonksiyonun giriş değeri, 30 saniye uzunluğundaki hız vektörü, vereceği çıkış ise, bu hız profili için DP çözümüne yakın optimum EM güç dağılımıdır (Şekil 7.19).



Şekil 7.19 : Yapay sinir ağı giriş ve çıkışları

Yapay sinir ağları ile elde edilen fonksiyonun gerçek zamanlı olarak kullanılabilmesi için, giriş olarak kullanılmak üzere araç hızının tahmin edilmelidir. Sinir ağları 30 saniyelik hız vektörleri ile eğitildiğinden, araç hareket halinde iken yine 30 saniye uzunluğunda gelecek hız vektörüne gereksinim vardır. Aracın hız profili, istatistikî bir veri olarak kabul edilebileceğinden, geçmiş hız değerlerinden öncelikle bir model oluşturulması ve bu model yardımı ile gelecek hız profillerinin tahmin edilmesi zaman serilerinde kullanılan yöntemler ile mümkün olmaktadır. Model oluşturmada, temel olarak AR (Auto-Regresive – Oto-Regresif), MA (Moving Average – Hareketli Ortalama) ve her ikisinin de etkin olduğu AR-MA modelleri ve sistem tanımlama için geliştirilen diğer yan yöntemler kullanılmaktadır. Oto-regresif modellerde, her hangi bir anda gerçekleşecek olan değer, sistem derecesine göre kendisinden önce gelen değerlerin doğrusal fonksiyonu ile hesaplanmaktadır. Zaman serisi içerisinde araç hızı  $y(n)$  olarak ifade edildiğinde,  $AR(p, q)$  modeli aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir [32].

$$y(n) + a_1 y(n-1) + a_2 y(n-2) + \dots + a_p y(n-p) = e(n) + c_1 e(n-1) + c_q e(n-q) \quad (7.36)$$

Yalnızca oto-regresif model kullanılacak ise  $AR(p)$  modelleri için (7.37) denklemi,

yalnızca MA(q) modeli kullanılacak ise (7.38) denklemi geçerlidir.

$$y(n) + a_1 y(n-1) + a_2 y(n-2) + \dots + a_p y(n-p) = e(n) \quad (7.37)$$

$$y(n) = e(n) + c_1 e(n-1) + \dots + c_q e(n-q) \quad (7.38)$$

Buradaki terimler;

$p, q$  : Model dereceleri

$e(n)$  : Beyaz gürültü

$y(n)$  : Araç hızı

$a_n, c_n$  : Model katsayılarını ifade etmektedir.

Gecikme operatörü olarak  $z$  kullanıldığında bir AR-MA modelinin transfer fonksiyonu aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir.

$$y(n) = \frac{C(z)}{A(z)} e(n) \quad (7.39)$$

$$y(n) = \frac{1 + \sum_{n=1}^q c_n z^{-n}}{1 + \sum_{n=1}^p a_n z^{-n}} e(n) \quad (7.40)$$

Burada  $A(z)$ , AR modelindeki polinom katsayılarını,  $C(z)$  ise MA modelindeki polinom katsayılarını ifade etmektedir. Bu yaklaşım ile sırası ile yalnızca AR ve yalnızca MA model denklemleri aşağıda verilmiştir.

AR modelleri için;

$$y(n) = \frac{1}{A(z)} e(n) \quad (7.41)$$

MA modelleri için;



$$y(n) = C(z)e(n) \quad (7.42)$$

denklemleri kullanılmaktadır.  $A(z)$  ve  $C(z)$  polinomları ise aşağıdaki şekilde açılabilir.

$$A(z) = 1 - a_1z^{-1} - a_2z^{-2} - \dots - a_nz^{-n} \quad (7.43)$$

$$C(z) = 1 - c_1z^{-1} - c_2z^{-2} - \dots - c_nz^{-n} \quad (7.44)$$

Her hangi bir zaman serisinin hangi model derecelerine sahip olduğunun tespit edilebilmesi için oto-korelasyon fonksiyonu ile kısmi oto-korelasyon fonksiyonları kullanılmaktadır. Oto-korelasyon fonksiyonu, zaman serisi içerisindeki büyüklüklerin birbirleri ile olan bağıntılarını incelemek için kullanılmaktadır. Her hangi bir sistemin modelinin belirlenmesi için oto-korelasyon ile kısmi korelasyon fonksiyonları incelenmektedir.

Oto korelasyon katsayısı (normalize edilmiş kovaryans) verilen bir gecikme için aşağıda verilen denklem ile ifade edilmektedir.

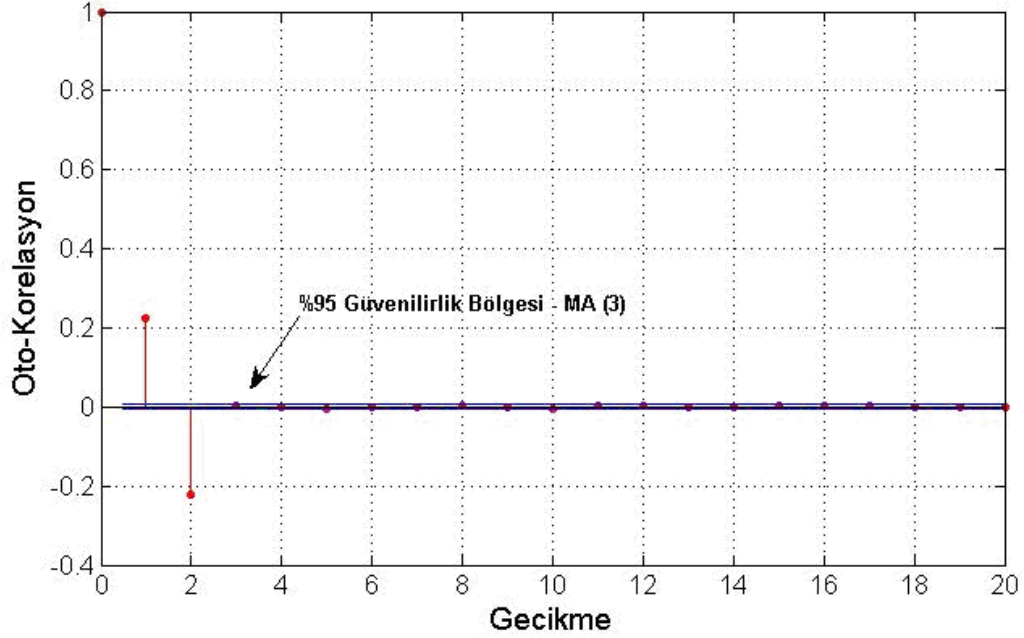
$$\rho(\tau) = \frac{\gamma(\tau)}{\gamma(0)} = \frac{E[y(t)y(t+\tau)]}{E[y(t)y(t)]} \quad (7.45)$$

Burada  $f(x)$  olasılık yoğunluk fonksiyonu olmak üzere beklenen değer;

$$E[x] = \int xf(x)dx \quad (7.46)$$

Şeklinde hesaplanmaktadır.  $MA(q)$  tipindeki zaman serilerinin hangi dereceden olduğu oto-korelasyon fonksiyonu ile incelenebilmektedir. Belirlenen bir güvenilirlik oranı için oto-korelasyon fonksiyonu değerleri çizdirilerek sistemin hangi derecede olduğu tespit edilebilmektedir. Şekil 7.20'de  $MA(3)$  modelinin (7.47) oto-korelasyon katsayıları görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi, %95 güvenilirlik aralığı için üçüncü dereceden sonraki modeller, gerçekleşen zaman serisini modelleyebilmektedir.

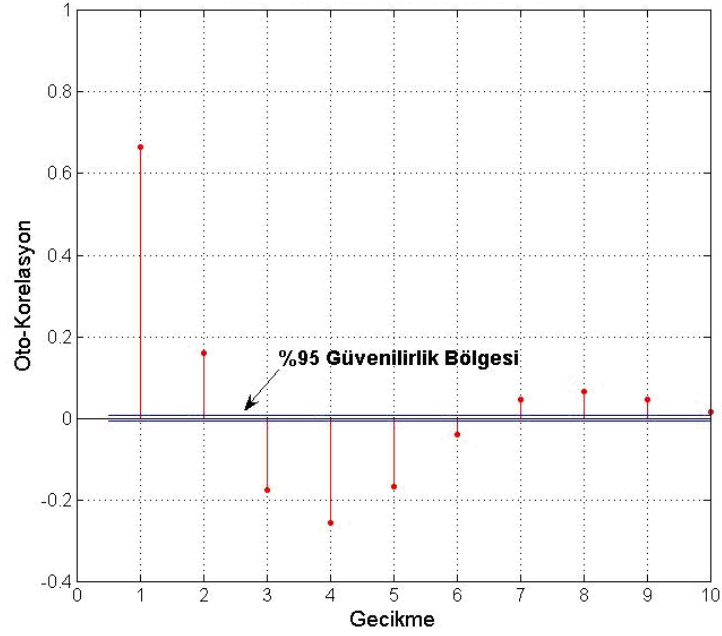
$$y(n) = e(n) + c_1 e(n-1) + c_q e(n-q) \quad (7.47)$$



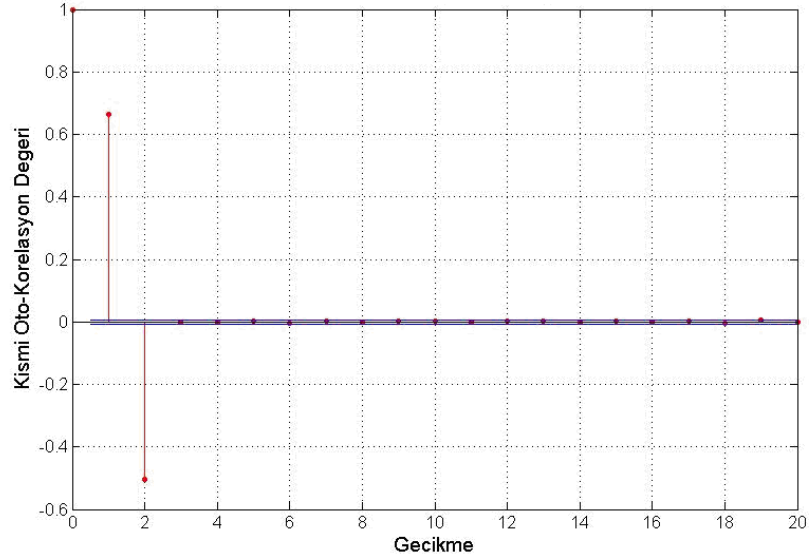
Şekil 7.20 : MA(3) Oto-Korelasyon fonksiyonu

Benzer şekilde  $AR(p)$  (7.48) modelindeki zaman serilerinde oto-korelasyon fonksiyonu ile model derecesi belirlenmemektedir (Şekil 7.21). AR modelinin derecesinin belirlenmesi için kısmi oto-korelasyona bakılmaktadır.

$$y(n) + a_1 y(n-1) + a_2 y(n-2) + \dots + a_p y(n-p) = e(n) \quad (7.48)$$



Şekil 7.21 : AR(p) Oto-Korelasyon fonksiyonu

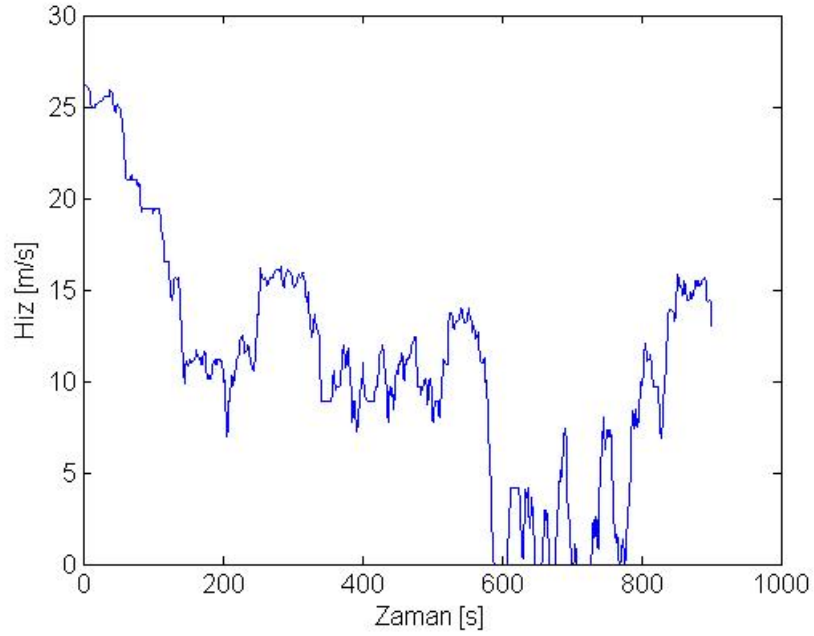


Şekil 7.22 : AR(3) Kısmi Oto-Korelasyon fonksiyonu

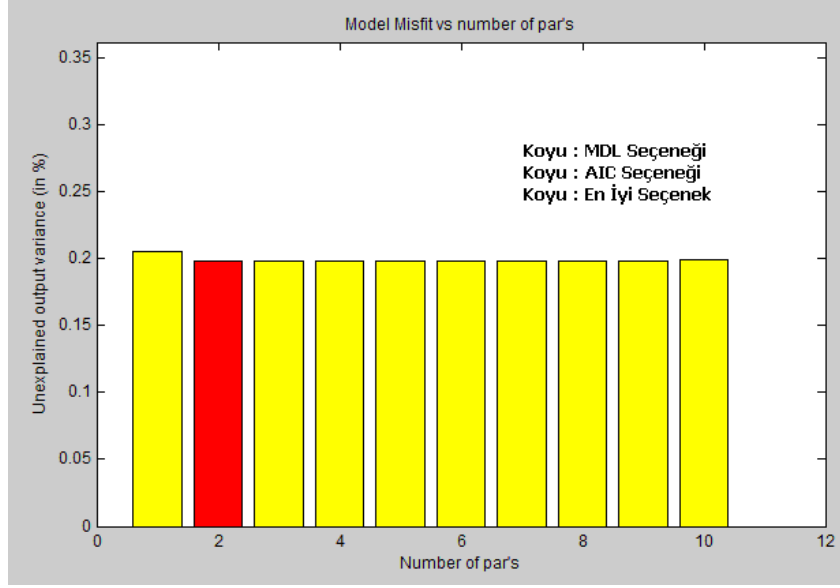
$AR-MA(p,q)$  modelinin oluşturulması için öncelikle sistemin yalnızca AR ya da yalnızca MA modeli olup olmadığına bakılarak AR-MA modeli derecelerine deneme yanılma ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması ile karar verilir. Bu işlemler, her

biri MATLAB System Identification Toolbox modülü içerisinde kolaylıkla belirlenebilmektedir.

Bir zaman serisinin model derecesinin tespit edilebilmesi için diğer bir yöntem ise “Akaike (AIC), ve Bayesian (BIC) Bilgi Kriteri” dir [41-43]. Alternatif model derecelerinin istatistiksel uygunluğu için kullanılmaktadır. MATLAB System Identification Toolbox yardımı ile AIC ve MDL (Minimum Description Length) bilgi kriterlerinin Markov Zinciri ile elde edilmiş bir hız çevrimi için (Şekil 7.23) önerdiği model derecesi Şekil 7.24’de verilmiştir.

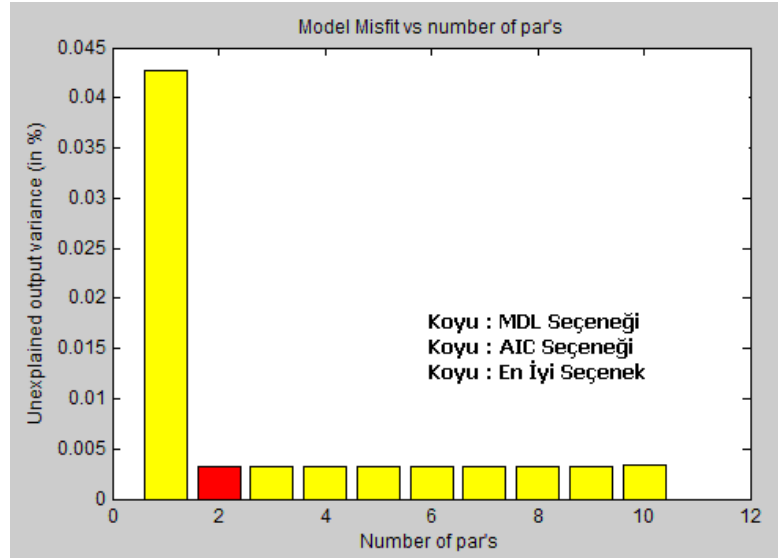


**Şekil 7.23** : Rastlantısal hız profili



**Şekil 7.24** : MATLAB aicbic komutu ile elde edilen en iyi model derecesi (AR)

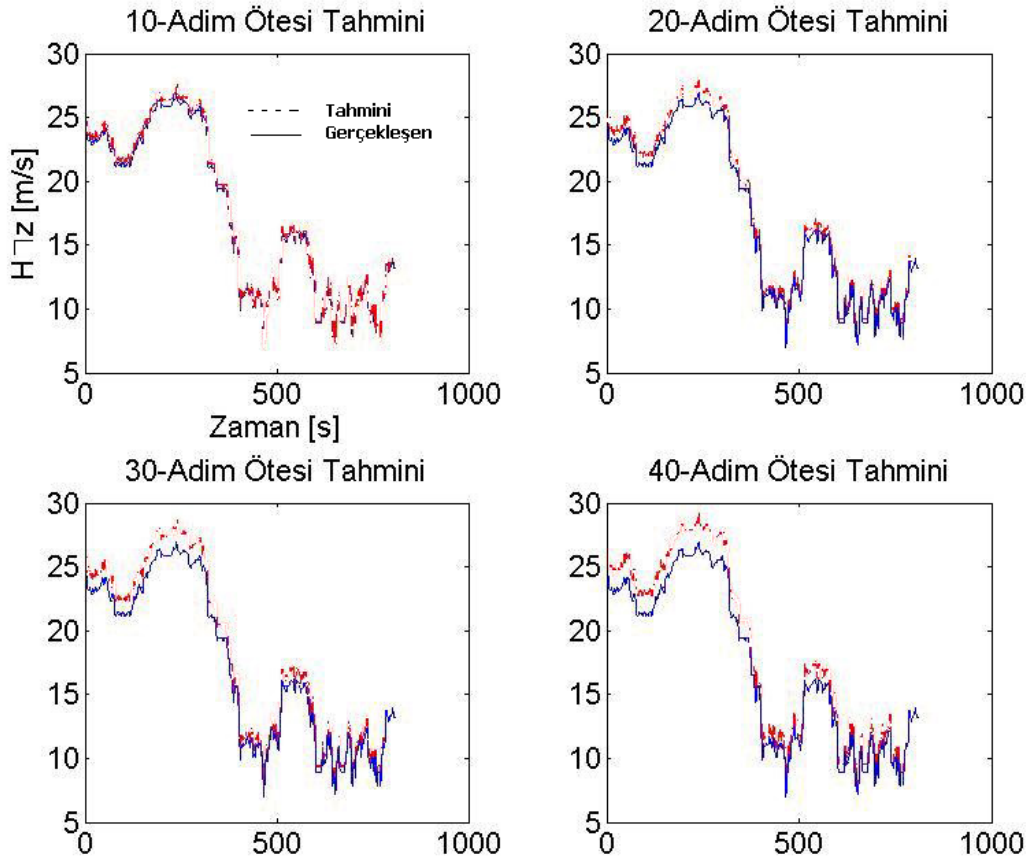
Avrupa’da kullanılan ECE, NEDC gibi hız çevrimleri ile diğer kıtalarda kullanılan hız çevrimleri genellikle AR(2) ya da AR(3) model dereceleri ile modellenebilmektedir (Şekil 7.25).



**Şekil 7.25** : ECE hız çevrimi model derecesi AR(2)

Bu nedenle bu çalışmada, hız çevrimi Markov Zincirleri kullanılarak

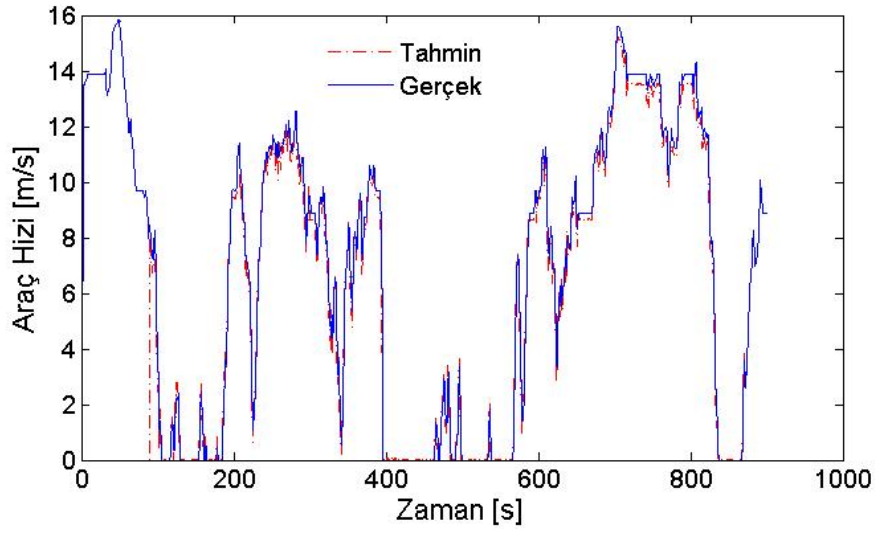
oluşturulduğundan AR-MA(2, 1) model derecesi kullanılarak geçmiş hız profilleri modellenmiş ve 30 saniye sonra gerçekleşmesi beklenen hız değeri bu model yardımı ile tahmin edilmiştir. Tahmin ufku ilerledikçe tahmin tutarlılığı düşmektedir (Şekil 7.26). Şekillerde 10, 20, 30 ve 40 saniyelik tahmin ufku için tahmin edilen ve gerçekleşen hız profilleri karşılaştırma amaçlı verilmiştir. Tahmin ufku genişledikçe tahmin edilen ve gerçekleşen hız profilleri arasındaki sapmalar da yerel olarak artmaktadır.



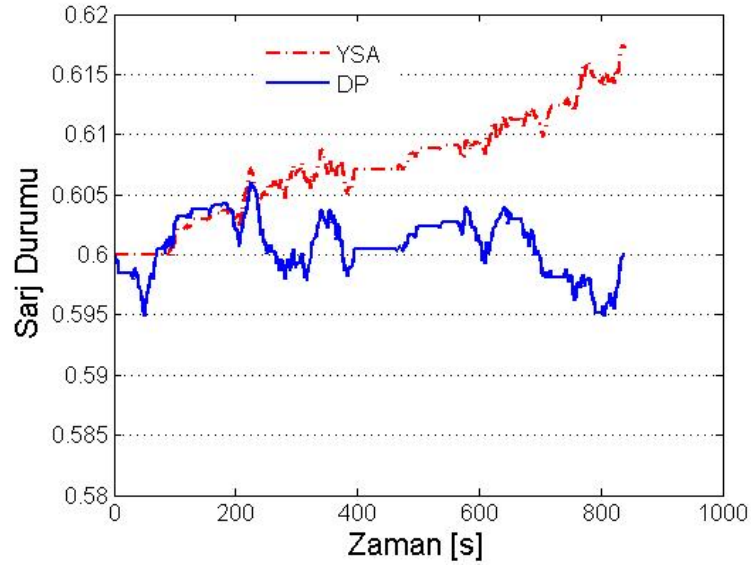
**Şekil 7.26 :** Tahmin ufku uzunluğuna göre gerçekleşen ve tahmin edilen hız profilleri

Yukarıdaki şekillerde, sabit tahmin ufku için, yeni bir hız değeri ölçüldüğünde sabit k-adım ötesi için hız profili tahmin edilmektedir. Tahmin güvenilirlik oranının artırılması için tahmin ufku içerisindeki hız değerlerinin her birinin, tahmin ufku süresi içerisinde güncellenebilme olanağı mevcuttur. Şekilde gösterildiği gibi, tahmin



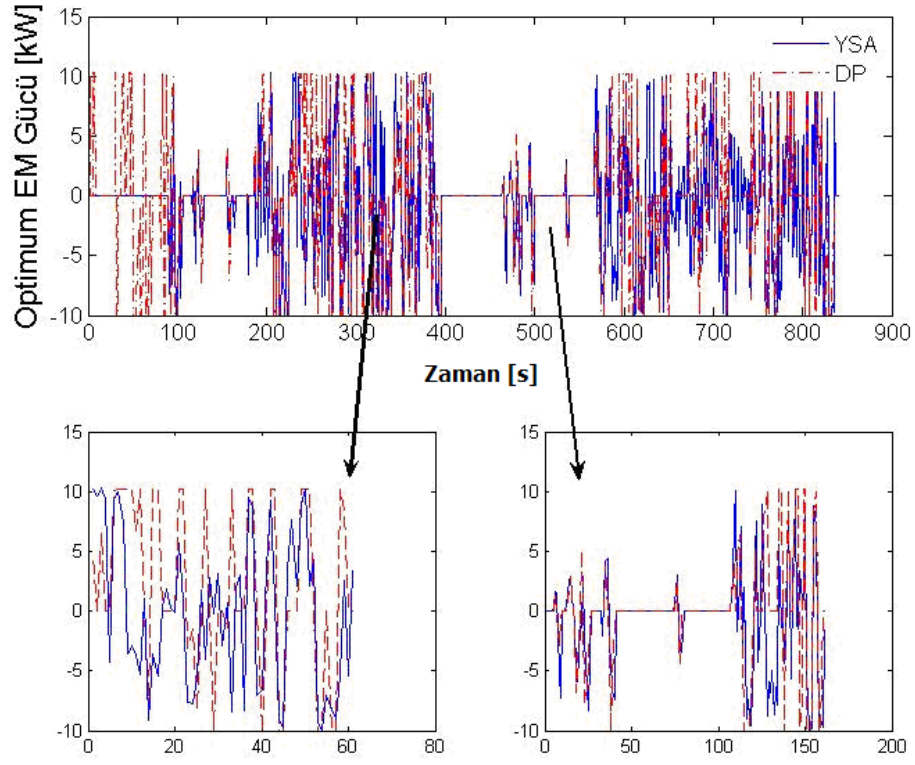


Şekil 7.28 : Rastlantısal bir hız profili için tahmin edilen ve gerçekleşen hız profilleri (1)



Şekil 7.29 : DP ve YSA çözümü sonucu gerçekleşen şarj profilleri (1)

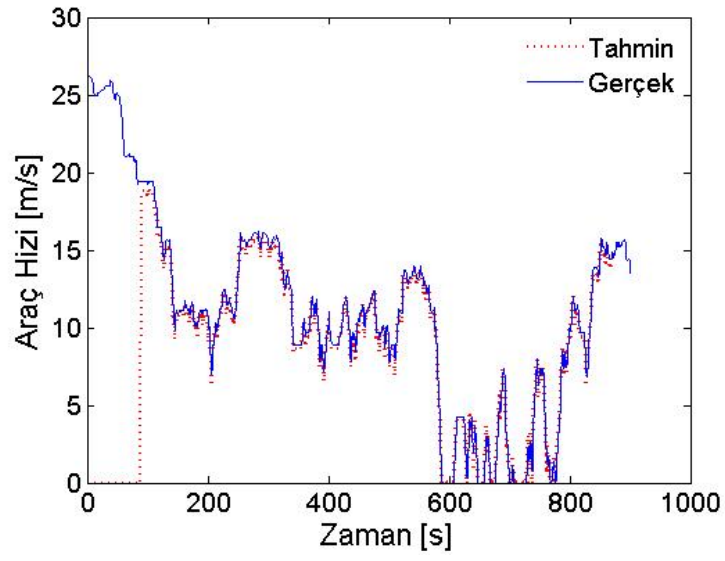




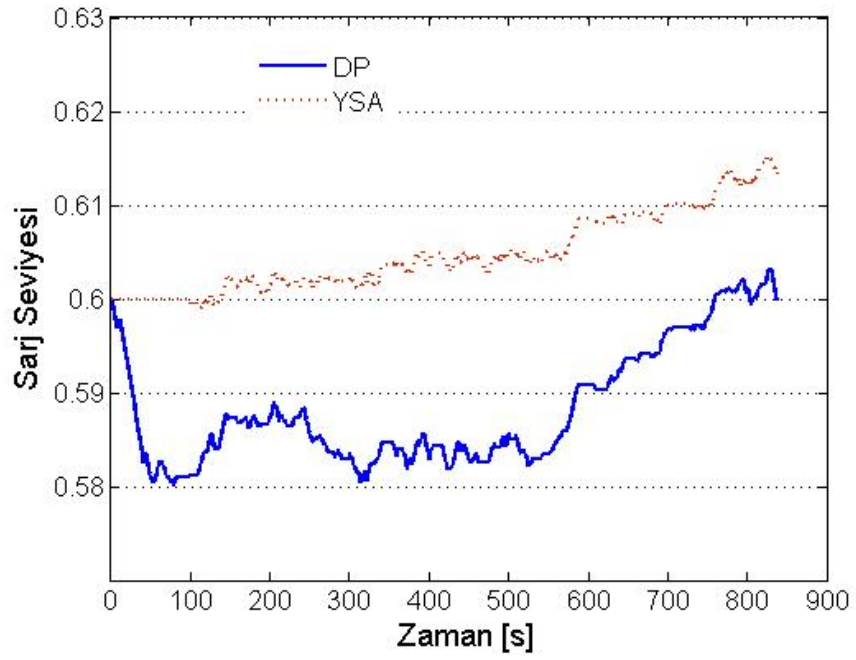
Şekil 7.30 : DP ve YSA çözümü, EM güç profilleri (1)

Tablo 7.2 : DP ve YSA çözümlerinin karşılaştırılması (1)

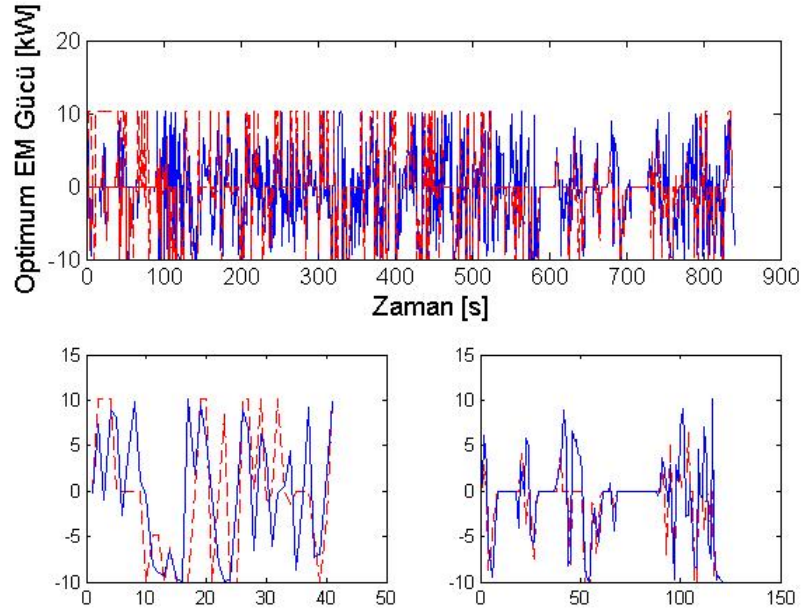
	Yakıt Tüketimi	İyileşme	$\Delta$ SOC
<b>Normal Araç</b>	10.99 l/100 km	-	-
<b>Hibrid DP Çözümü</b>	9.39 l/100 km	14.5 %	0%
<b>YSA Çözümü</b>	10.53 l/100 km	4.12 %	1.7%



Şekil 7.31 : Rastlantısal bir hız profili için tahmin edilen ve gerçekleşen hız profilleri (2)



Şekil 7.32 : DP ve YSA çözüm sonucu gerçekleşen şarj profilleri (2)



Şekil 7.33 : DP ve YSA çözümü, EM güç profilleri (2)

Tablo 7.3 : DP ve YSA çözümlerinin karşılaştırılması (2)

	Yakıt Tüketimi	İyileşme	$\Delta$ SOC
<b>Normal Araç</b>	9.24 l/100 km	-	-
<b>Hibrid DP Çözümü</b>	8.07 l/100 km	12.6 %	0 %
<b>YSA Çözümü</b>	8.84 l/100 km	4.35 %	1.14 %

Şekil 7.28 ve Şekil 7.31’de, araç seyahate başladıktan sonra, hız profili modelinin oluşturulması için ilk 90 saniye araç hızı kaydedilmektedir. Bu süreden sonra hız profili zaman serisi olarak kabul edilip belirli aralıklar ile model katsayıları yeniden oluşturulmaktadır. Böylelikle hızlanma, yavaşlama ya da sabit hız aralıklarında model tutarlılığı yüksek seviyede gerçekleşmektedir.

Avrupa şehir içi çevrim süresi 820 saniye uzunluğunda olduğundan, elde edilen her bir 820 saniye uzunluğundaki rastgele çevrimler, her bir 30 saniyelik aralıklar ile tahmin edilmiş ve bu aralıklarda, yapay sinir ağları ile elde edilen DP yaklaşım fonksiyonu ile en uygun elektrik motoru güç dağılımı hesaplanmıştır. YSA

eğitiminde, NEDC çevrimi için hazırlanmış 820 saniye uzunluğu için DP çözümü hesaplayan algoritma kullanıldığı ve bu algorithmada, fren enerjisinin regülasyonlar seviyesinde olabildiğince geri kazanılması hedeflendiğinde, yalnızca fren yapılan otuz saniyelik zaman dilimlerinden dolayı YSA çözümü ile elde edilen EM ve SOC (State of Charge – Batarya Şarjı) grafikleri farklı gerçekleşmektedir. Bu nedenle YSA çözümlerinde batarya şarjı çevrimin başındakinin üzerinde gerçekleşmektedir (Şekil 7.29, Şekil 7.32). Yapay sinir ağları ile elde edilen çözümlerde fazla şarj ile birlikte %4 üzerinde yakıt tüketiminde iyileşmeler sağlanmıştır.

DP ve YSA ile elde edilen optimum elektrik motoru güçleri Şekil 7.30ve Şekil 7.33’de verilmiştir. DP 820 saniye ve YSA 30 saniye için çözüm verdiği halde, yerel bölgelerde birbirlerine yakın elektrik motoru gücü hesaplamaktadır.

## 8. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu tezde, dizel motorlu hafif ticari bir aracın, rejeneratif fren yapabilen, elektrik motorunun gerektiğinde içten yanmalı motora destek olabildiği, gerektiği durumlarda yalnızca elektrik motoru ile sürülebilen hibrid elektrikli araca dönüştürülmesi ve prototip üretimi safhalarında yapılan hesaplamalar ile hibrid elektrikli araç kontrol yöntemleri, bileşen seçiminde kullanılan teknikler konu edilmiştir. Hibrid elektrikli araç dönüşümü için önden tahrikli bir Ford Transit Van modeli seçilmiştir. Araç, üzerinde çok büyük yapısal değişiklik yapılmadan, arka aksa bir elektrik motoru bağlanarak hibrid elektrikli araca dönüştürülmüş ve iki adet prototip geliştirilmiştir.

Pazarda bulunan birçok hibrid elektrikli araç modelinde, Toyota Prius'da olduğu gibi kural tabanlı kontrol yöntemleri uygulanmaktadır. Ortaya çıkan hafif ticari araç prototiplerinde de kural tabanlı kontrol uygulanmıştır.

Bir konvansiyonel aracın hibridleştirilmesinde, yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin azaltılmasından sonra, dikkate alınması gereken en önemli tasarım hedeflerinden biri de, dönüştürülmüş aracın sürülebilirliği ve ivmelenme performansının konvansiyonel araca göre kötüleşmemesidir. Hibrid elektrikli araca dönüştürülen araçlar üzerinde bulunan vites kutusu manüel olduğundan, hibrid elektrikli aracın yalnızca elektrik motoru ile çalıştırıldığı durumlarda da sürücünün alışık olduğu tarzda vites geçişleri olacaktır. Genel olarak bu tür durumlarda bir otomatik kavrama yardımı ile sürüş konforu gereksinimleri karşılanabilir. Dönüştürülen araçlarda bu tür bir kavrama kullanılmadığından, elektrik motorunun dinamik davranışları, düşük hızlarda içten yanmalı motor ve vites kutusu sisteminin çıkışındaki güç ve tork karakteristiklerine benzetilerek sürüş konforu ve ivmelenme performansı gereksinimleri karşılanmıştır. Bu yaklaşımla geliştirilen prototiplerde yapılan yol testlerinde, sürücüler hibrid aracı, konvansiyonel araç gibi sürebilmişler, sürüş ve ivmelenme performansı üzerine olumsuz görüş bildirmemişlerdir.

Hibrid elektrikli araç, konvansiyonel bir araçtan dönüştürülmek yerine eğer en baştan tasarlanacak ise, elektrik motoru, içten yanmalı motor ve batarya gibi güç

bileşenlerinin kapasitelerinin, performans kriterlerini sağlayacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında, bir içten yanmalı motor, iki elektrik motoru ve bir bataryaya sahip hibrid bir elektrikli araç bileşenlerinin, istenilen performans kriterlerine göre, eşdeğer yakıt tüketimi kontrol optimizasyon yöntemi ile boyutlandırılması da ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Hibrid elektrikli araçlarda, ana problem kontrol problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Aracın tüm seyahati boyunca, global optimum güç paylaşım değerlerinin hesaplanabilmesi için araç seyahatinin hız profilinin önceden bilinmesi gerekmektedir. Bu ancak, GPS (Global Konumlama Sistemi), yol eğimleri, aracın seyahat edeceği güzergâhtaki trafik sensörlerinden bilgi aktarımı gibi telematik sistemler ile gerçekleştirilebilir. Henüz bu tür bir altyapı tam olarak kurulmadığından, araç üzerinde yeteri kadar hızlı hesaplama yapabilecek ve global optimum değerlerine yaklaşabilecek güç paylaşımının hesaplanabilmesi için algoritmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Literatürde yaygın olarak, öğrenmeye ve kurallara dayalı kontrol algoritmaları üzerinde yoğun çalışmalara başlandığı görülmektedir. Hibrid araçlar, sürücü profili, aracın seyahat edeceği güzergâh üzerindeki trafik durumu ve seyahat esnasında oluşabilecek ani beklenmedik olaylar, öğrenmeye dayalı kontrol yöntemlerini gerektirmektedir.

Bununla birlikte, hibrid elektrikli araç üzerinde çok sayıda bileşen olması, bileşenlerin analitik olarak modellenmesinin güç olması, sistemdeki belirsizlikler ve sistemin çalışmasında ayırık durumlar olması nedeniyle optimum hesaplamaları günler ile ifade edilen sürelerde yapılabilmektedir. Bu nedenler ile günümüzde, hibrid elektrikli araç tasarımında yalnızca belirli bir çevrim için optimum güç dağılımları hesaplanılabilmekte ve farklı hız çevrimlerinde optimum değerler seyahat halinde iken elde edilememektedir. Çevrimden bağımsız olarak, öngörülü kontrol, sürüş profili tanımlama gibi yöntemler ile global optimuma yaklaşacak öğrenmeye dayalı yöntemler geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Tezin son bölümünde, öngörülü kontrol ve yapay sinir ağları kullanılarak optimum

güç dağıtımını problemine bir çözüm önerisi getirilmiştir. Yapay sinir ağlarının eğitiminde, Markov zincirleri ile elde edilen çok sayıda hız vektörü ile bu hız vektörleri için dinamik programlama yardımı ile hesaplanan optimum güç dağılımları kullanılmıştır. Uygulanan bu yönteme, neuro-dinamik programlama adı verilmiştir. Önerilen yöntemde, araç seyahat halinde iken, geçmiş hız profilleri kullanılarak elde edilen model ile belirli uzunlukta bir gelecek hız profili tahmin edilmekte ve bu hız profili için yapay sinir ağının verdiği alt-optimum güç dağılımı hesaplanmaktadır.

Tüm hesaplamalar ve yapay sinir ağı eğitimi, 2 GB hafızalı, 2.21 GHz işlemci hızına sahip AMD Athlon işlemcisinin olduğu bir masa üstü ile gerçekleştirilmiştir. Bu yapılanma ile yapılan dinamik programı çözümleri ile yapay sinir ağı eğitimleri gün ölçeğinde hesaplama süreleri getirmektedir. Bu nedenle hem dinamik programlama hem de yapay sinir ağı eğitimi için basitleştirilmiş modeller ve yöntemler kullanılmıştır.

Yapılan son çalışmada, basitleştirilmiş modeller ve bir masa üstü bilgisayar ile gerçek zamanlı olarak yaklaşık optimum güç dağılımı sonucu verebilecek bir fonksiyonun elde edilebileceği gösterilmiştir. Standart bir masaüstü bilgisayarı ile daha ayrıntılı ve daha gelişmiş model ve yöntemlerin kullanılması mümkün değildir. Ancak, bu tür hesaplamalar için yüksek başarılı hesaplama merkezlerinde bulunan süper bilgisayarlar kullanılabilir. Diğer bir çözüm ise çok sayıda bilgisayarı aynı anda tek bir problemin çözümü için kullanmaktır. Paralel ve dağıtımli hesap algoritmaları yardımı ile tek bir bilgisayar için ağır olabilecek bir problem bilgisayar kümeleri ile çok daha kısa sürelerde çözülebilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Alley R., Berntsen T., Bindoff N. L., Chen Z., Chidthaisong A., Friedlingstein P., Gregory J., Hegerl G., Heimann M., Hewitson B., Hoskins B., Joos F., Jouzel J., Kattsov V., Lohmann U., Manning M., Matsuno T., Molina M., Nicholls N., Overpeck J., Qin D., Raga G., Ramaswamy V., Ren J., Rusticucci M., Solomon S., Somerville R., Stocker T. F., Stott P., Stouffer R. J., Whetton P., Wood R. A., Wratt D., 2007.** *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change*, Paris, 29 January -1 February 2007.
- [2] **U.S. Environmental Protection Agency, 2005.** Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2005, <http://www.epa.gov>.
- [3] **Toyota Motor Corporation, 2003.** Toyota's Global Strategy, <http://www.toyota.co.jp>.
- [4] **Guzella L., Sciarreta A., 2005.** *Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization*, Springer Verlag, Berlin.
- [5] **Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, National Research Council, National Academy of Engineering. 2004.** *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs*, National Academies Press, USA.
- [6] **Plotkin S., Santini D., Vyas A., Anderson A., Wang M., He J., Bharathan D., 2001.** *Hybrid Electric Vehicle Technology Assessment: Methodology, Analytical Issues, and Interim Results*, *Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory*, USA.



- [7] **Kessels T.B.A**, 2007, Energy Management for Automotive Power Nets, *PhD Thesis*, Eindhoven Technical University, Eindhoven.
- [8] **Koot M.W.T.**, 2006. Energy Management for Vehicular Electric Power Systems, *PhD Thesis*, Eindhoven Technical University, Eindhoven.
- [9] **Boyalı A., Acarman T., Güvenç L., Kıray B. Özatay E.**, 2006, Modeling and Control of a Four Wheel Drive Parallel Hybrid Electric Vehicle, *IEEE Conference on Control Applications*, Munich, Germany, October 4-6.
- [10] **SAE J2452**, 1999. Stepwise Coast down Methodology for Measuring Tire Rolling Resistance, *SAE*, USA.
- [11] **Boyalı A., Demirci M., Acarman T., Güvenç L., Kıray B., Yıldırım M.**, 2006. A Simulation Program for a Four Wheel Drive Parallel Hybrid Electric Vehicle and its Use in Rule Based Controller Development and Implementation, *Workshop on Hybrid and Solar Vehicles*, Salerno, Italy November 5-6, 2006.
- [12] **QSS Toolbox for Matlab**, ETH Zurich, [www.imrt.ethz.ch/research/qss](http://www.imrt.ethz.ch/research/qss)
- [13] **Ehsani M.**, “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design,” ISBN: 0849331544, CRC Press, December 20, 2004, pp. 102-108.
- [14] **Baalen J.V.**, 2006. Optimal Energy Management Strategy for Honda Civic IMA, *Master’s Thesis*, Eindhoven Technical University, Eindhoven.
- [15] **Soruşbay C.**, 1989. İçten Yanmalı Motorlarda Egsoz Emisyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [16] **Lin C. C., Peng H., Grizzle J.W., and Kang J.M.**, 2003. Power Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck, *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, **11-6**, 839-849.

- [17] **Schouten N. J., Salman V., Kheir N.A.**, “Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 10, No. 3, May 2002.
- [18] **Kleimaier A., Schröder D.**, 2000. Optimization Strategy Design and Control for A Hybrid Vehicle, *IEEE Proceedings of 6th International Workshop on Advanced Motion Control*, Nogaya, Japan, 30 March- 01 April 2000, 459-464.
- [19] **Delprat S., Guerra T.M., Rimaux J.**, 2003. Control Strategies for Hybrid Vehicles: Synthesis & Evaluation, *IEEE 58th Vehicular Technology Conference*, Orlando, USA, 6-9 October, 5, 3946-3950.
- [20] **Sciarretta A., Back M., and Guzzella L.**, 2004. Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **12-3**, 352-363.
- [21] **Paganelli G., Ercole G., Brahma A., Guezennec Y., Rizzoni G.**, 2001. General Supervisory Control Policy for the Energy Optimization of Charge-Sustaining Hybrid Electric Vehicles, *JSAE Review*, **22**, 511–518
- [22] **Paganelli G., Delprat S., Guerra T.M., Rimaux J., Santin J.J.**, 2001. Equivalent Consumption Minimization Strategy for Parallel Hybrid Powertrains, *Proceedings of Conference sponsored by Vehicular Transportation Systems (VTS) and IEEE*, Arlington, VA, USA, **6**, 5064-5069.
- [23] **Johnson V. H., Wipke K.B., Rausen D.J.**, 2000. HEV Control Strategy for Real-Time Optimization of Fuel Economy and Emissions, *Future Car Congress*, SAE 2000-01-1543, April 2-6, 2000.

- [24] **Jeon S., Jo S., Park Y.**, 2002, Multi-Mode Driving Control of a Parallel Hybrid Electric Vehicle Using Driving Pattern Recognition, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, ASME*, **124**, 141-149.
- [25] **Jeon S., Kim K.B., Jo S.T., Lee J.M.**, 2001. Driving Simulation of a Parallel Hybrid Electric Vehicle Using Receding Horizon Control, *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Korea, June 12-16, **2**, 1180-1185.
- [26] **Göktan A.G, Ergeneman M., Arslan E., Akalın Ö, Atabay O.**, 2005. Hibrid Ticari Araç Geliştirme Proje Raporu - I, İstanbul.
- [27] **Boyalı A., Acarman T., Güvenç L.**, 2007. Component Sizing in Hybrid Electric Vehicle Design using Optimization and Design of Experiments Techniques, *Workshop on Hybrid Electric Vehicle Modeling and Control in connection with IEEE 2007 Intelligent Vehicle Symposium*, Istanbul Turkey, June 13-15.
- [28] **Musardo C., Staccia B.**, 2003. Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles, *Master's Thesis*, Politecnico Di Milano, Milano.
- [29] **Bertsekas D. P., Tsitsiklis J. N.**, 1996, Neuro-Dynamic Programming, Athena Scientific, Belmont.
- [30] **Haykin S.**, 1999. Neural Networks, A Comprehensive Foundation, Second Edition, Pearson Printice Hall, India.
- [31] **Downs T., Boden M.**, 2007. Machine Learning Lecture Notes, COMPS4702/7704, [www.itee.uq.edu.au/~comp4702](http://www.itee.uq.edu.au/~comp4702), Queensland University.
- [32] **Moudgalya K.**, 2006. Digital Control, pp 216-320, Wiley Publishers of Canada, Canada,

- [33] **Bryson A. E., Ho Y.C.**, 1975. Applied Optimal Control, Optimization, Estimation and Control, Taylor & Francis, U.S.A.
- [34] **MSC Software Corporation**, 2002, Using Adams Tire / Tire Models
- [35] **Pacejka H. B.**, 2002, Tyre and Vehicle Dynamics, Butterworth – Heinemann, U.K.
- [36] **Bellman R. E., Dreyfus S.**, 1962, Applied Dynamic Programming, Princeton University Press, New Jersey.
- [37] **Gaafar L. K., Choeiki M.H.**, 2000, A Neural Network Model for Solving the Lot-Sizing Problem, *The International Journal of Management Size, Omega* **28**, 175-184.
- [38] **Tesauro G., Sejnowski T.J.**, 1989, A Parallel Network that learns to play Backgammon, *Artificial Intelligence*, **39**, 357-390.
- [39] **Zhang W., Dietterich T. G.**, 1996, High Performance Job-Job Scheduling with a Time-Delay TD( $\lambda$ ) Network, *Advances in Neural Information Processing Systems*, MIT Press, Cambridge, **8**, 1024-1030
- [40] **Rabunal J. R., Durado J.**, 2006, Artificial Neural Networks in Real Life Applications, Idea Group Publishing, U.S.A.
- [41] **Akaike H.**, 1974, A New Look at Statistical Model Identification, *IEEE Transaction of Automatic Control*, **AU-19**, 716-722
- [42] **Schwarz G.**, 1978, Estimating The Dimension of a Model, *The Annals of Statistics*, 6, 2, 461-464.
- [43] **Faraway J., Chatfield C.**, 1998, Time Series Forecasting with Neural Networks: a Comparative Study Using Airline Data, *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, **47, 2**, 231-250
- [44] UQM User and Installation Manuel for EV53
- [45] Cobasys Application Manuel

- [46] **Bertsekas D. P.**, 2007, Dynamic Programming and Optimal Control Vol I,  
Athena Scientific, Belmont.
- [47] Matlab R12 Yardım Dosyaları

## **EKLER**

**EK A:** Eşdeğer yakıt tüketimi optimizasyonu yöntemi ile bileşen boyutlandırması için MATLAB kodları.

**EK B:** Dinamik programlama ile optimum güç dağıtımı MATLAB kodları

**EK C:** Markov Zincirleri yöntemi ile rastgele olasılık dağılım matrisinin oluşturulması ve rastgele hız profilleri oluşturmak için kullanılan MATLAB kodları

**EK D:** Markov özelliği ile rastgele hız profillerinin oluşturulması MATLAB kodları

## EK A

```
% Eşdeğer Yakıt Tüketimi Optimizasyonu Yöntemi ile Bileşen
Boyutlandırması için MATLAB Kodları

% Hafızadaki parametrelerin temizlenmesi
clc
clear sc_f
tt=1;
save tz tt
p=1;

for sc_f=0.5:0.5:4           % Ön EM ölçeklendirme katsayısı

save sc sc_f p
load sc                     % Eşdeğer tüketim katsayıları
adp{p}=num2str(sc_f*10);
sdata_v2                   % Araç parametreleri
load tz
load treq_g
load tmax

    HV=42.5*1e3;           % J/g
    soc_min=0.698;        % Şarj alt limiti
    soc_max=0.702;        % Şarj üst limiti
    treq_c=t_reqc;        % Yol yükleri için gerekli tekerlek momenti
    treq_s=t_reqs;
    tdsoc=0;
    ssoc=0.7;             % Başlangıç şarjı

    dsoc_f=0;             % Bir çevrimdeki şarj değişimi
    mu=0.0002;           % İntegral katsayısı
    uf=1;

    txsoc=0;
    fc0=0.096;           % Rölanti yakıt tüketimi
    fc=fc0;

z=1;
for sc_fd=0.5:0.5:4

adz{z}=num2str(sc_fd*10);

    for i=1:825 % Çevrim süresi
        ti=i;
        tf=i+1;
        j=1;

% Fren, ivmelenme ve durma işareti
```

```

        if (treq_c(i)==0)
            cs=0;
        else if (treq_c(i)<0)
            cs=-1;
        else
            cs=1;
        end
    end
end

switch cs

    case 0                % Araç hareketsiz

        jt=fc0;
        u=0;
        uf=0;
        feq_f=0;
        us=0;
        ufsim_f=0;
        pxsoc_f=0;
        dsoc_f=0;

    case -1                % Frenleme durumlarında eşdeğer yakıt tüketimi

        u=0;
        uf=0;
        feq_f=0;
        us=0;
        ufsim_f=0;

        sim('secms_s1',[ti tf]);

        gamma=(1+sign(p_em))/2;
        m_bd=(gamma*s_dcgh*p_bat/HV)+(1-gamma)*s_cgh*p_bat/HV;

        ssoc=ssoc+dsoc;
        dsoc_f=dsoc;

        Xsoc=(ssoc-((soc_max+soc_min)/2))/(((soc_max-soc_min)/2));

        pxsoc_f=Xsoc;
        ssoc=ssoc-dsoc;

    case 1                % İvmelenme durumlarında eşdeğer yakıt tüketimi

        ad_varm=strcat('cd_m',adp{p},adz{z});
        eval(['load ',ad_varm, ';' ]);

```



```

%-----
%i anındaki vites, hız ve tork hesapları

gp_sim=G_z(i);

switch gp_sim
case 1
    gr_sim=ig(1);
case 2
    gr_sim=ig(2);
case 3
    gr_sim=ig(3);
case 4
    gr_sim=ig(4);
case 5
    gr_sim=ig(5);
case 0
    gr_sim=0;
end

w_emfz=(V_z(i)/0.34)*diff_ratio_f*gr_sim;
w_emfdz=(V_z(i)/0.34)*diff_ratio_f;

t_emf_n=interp1(w_EM_max,T_EM_max*sc_f,w_emfz);
t_emfd_n=interp1(w_EM_max,T_EM_max*sc_fd,w_emfdz);

%-----

for dt=(-tice_max(i)+treq_c(i)):10:treq_c(i)) %İYM, EMs
aralarındaki güç bölüşümü
    k=1;
    u=dt/treq_c(i);

    for uf=0:0.2:1 % EM aralarında güç bölüşümü

        ufs(k)=uf;
        temfz=dt*uf*u;
        temrz=dt*(1-
...uf)*u*(0.92*0.92*0.92)*gr_sim*diff_ratio_f/diff_ratio_r;

        if (abs(temrz)<t_emr_n)&(abs(temfz)<t_emf_n)

            u=dt/treq_c(i);
            urs(k)=u;

            sim('secms_s1',[ti tf]); %Modeli koştur
            ssoc=ssoc+dsoc;
            s_dcgh=interp1(uf_v,sdc_v,uf);
            s_cgh=interp1(uf_v,sc_v,uf);

            gamma=(1+sign(p_em))/2;

```

```

gamma)*s_cggh*p_bat/HV;          m_bd=(gamma*s_dcgh*p_bat/HV)+(1-...
gamma)*s_cggh*p_bat/HV;

                                Xsoc=(ssoc-
...((soc_max+soc_min)/2))/(((soc_max-soc_min)/2)); % Penalti
katsayısı

                                txsoc=txsoc+Xsoc;

                                Cs=(1-Xsoc+mu*txsoc);
                                dsoc_c(k)=dsoc;

                                f_eqf(k)=fc+m_bd*Cs;
                                xxsoc(k)=Xsoc;

                                ssoc=ssoc-dsoc;
                                txsoc=txsoc-Xsoc;

                                k=k+1;

                                else

                                f_eqf(k)=100;
                                xxsoc(k)=0;
                                dsoc_c(k)=0;
                                ufs(k)=1;
                                urs(k)=0;
                                k=k+1;

                                end
                                end

                                A_eqm=[f_eqf' ufs' xxsoc' dsoc_c' urs'];

                                clear f_eqf
                                clear ufs
                                clear xxsoc
                                clear dsoc_c
                                clear urs

                                A_eqm=sortrows(A_eqm);
                                f_eqf=A_eqm(1,1);
                                ufsim=A_eqm(1,2);
                                pxsoc=A_eqm(1,3);
                                dsoc_c=A_eqm(1,4);
                                us(j)=A_eqm(1,5);
                                clear A_eqm;

                                feq_f(j)=f_eqf;
                                ufsim_f(j)=ufsim;
                                pxsoc_f(j)=pxsoc;

```

```

    dsoc_f(j)=dsoc_c;
    j=j+1;

    end

end

A_eqm=[feq_f' us' ufsim_f' pxsoc_f' dsoc_f' ];
A_eqm=sortrows(A_eqm);

clear feq_f
clear pxsoc_f
clear us
clear ufsim_f
clear dsoc_f

pxsoc_c(i)=A_eqm(1,4);
txsoc=sum(pxsoc_c);
uc(i)=A_eqm(1,2);
uf_s(i)=A_eqm(1,3);

ssoc=ssoc+A_eqm(1,5);

end

uf=uf_s;
ad_var=strcat('zr',adp{p},adz{z});
eval(['save ',ad_var, ';']);
tt=tt+1;
save tz tt

end
end

```

## EK B

```
% Dinamik programlama ile optimum güç dağıtımı MATLAB kodları

clc
clear
initialize_dp           % Arac parametreleri ve yol yükleri
load en_map_vit2       % IYM pedal haritaları

% Ayırıklaştırma

t=T_z;                 % Zaman vektörü
n_t=length(T_z);
dt=t(2)-t(1);         % Zaman adımı
HV=42.518; % MJ/kg     % Dizel yakıtı alt ısıl değeri

Ecap=3*8.5*3600*288*0.9; % Batarya enerji kapasitesi
Emin=0.58*Ecap;        % Üst batarya şarj sınırı
Emax=0.62*Ecap;       % Alt batarya şarj sınırı
E0=0.6*Ecap;          % Batarya başlangıç şarj seviyesi
dPa=2000;              % Kontrol gücü adımı [Watt]
dEa=dPa*dt;
n_x=ceil((Emax-Emin)/dEa); % Batarya durum sayısı
E=linspace(Emin,Emax,n_x);

P10=[-10 10]*1000;    % EM term. kontrol değişkeni [Watt]

P_s = P10.*[0.9419 1.0524]; % Batarya gücü
Pmax = P_s(end);        % Maks. Batarya iç gücü
Pmin = P_s(1);         % Min. Batarya iç gücü
umax = ceil(Pmax/dPa); % Maks. kontrol adımı
umin = floor(Pmin/dPa); % Min. kontrol adımı
u = umin:umax;         % Kontrol vektörü
n_u = length(u);
P_s_grid = u.*dPa;

P10s=interp1(P10,P_s,P_s_grid,'linear','extrap');

% Durum sınırları

x0 = 1 + ceil((E0-Emin)/dEa);

x0mi=x0;
x0ma=x0;

for i=1:n_t
    if P_r_wh(i)==0
```

```

        u_max(i)=0;
        u_min(i)=0;

elseif P_r_wh(i)>0

        u_max(i)=max(u);
        u_min(i)=min(u);

else
        u_max(i)=0;
        u_min(i)=(P_r_wh(i)-mod(P_r_wh(i),mm))/mm;
end
xmin(i)=x0mi-u_max(i);
xmax(i)=x0ma-u_min(i);
x0mi=xmin(i);
x0ma=xmax(i);
end

ind=find(xmin<1);
xmin(ind)=1;

ind=find(xmax>n_x);
xmax(ind)=n_x;

x_max=xmax;
x_min=xmin;

plot(x_max)
hold on
plot(x_min, 'r')

% Verilen çevrimde EM ve İYM güç ve hız hesabı

W_em= (V_avg/r_eff)*i_dr;
W_ice=83.7758*ones(n_u,n_t);
W_conv=83.7758*ones(1,n_t);
P_ice=zeros(n_u,n_t);
T_ice=ones(n_u,n_t);
P_em=zeros(n_u,n_t);
T_em=zeros(n_u,n_t);

for i=1:T_z(end)
    if P_r_wh(i)>0
        aa=interp2(T_EM_col,w_EM_row,eta_EM_map,T_EM_col,W_em(i));

%EM verimleri

```

```

        bb=T_EM_col*W_em(i);

% EM mil çıkışındaki güç - y

        bb=bb';
        cc=(bb).*aa;

% EM batarya terminalindeki güç - x

% Verilen EM terminal gücü için EM milindeki güç hesabı

        dd=interp1(cc,bb,P_s_grid,'linear','extrap');
        P_em(:,i)=dd;
        clear aa
        clear cc
        clear bb
        clear dd

        else

                P_em(:,i)=P_r_wh(i)*0.92;           % Power at EM shaft
        end
end

ind=find(P_s_grid==0);
ind2=find(P_r_wh>0);
P_em(ind,ind2)=0;

% EM & İYM Hızı ve Tork

ind=find(G_z==0);
G_z(ind)=1;

for i=1:T_z(end)

        rtr(i)=interp1([1:5],i_d*i_g,G_z(i),'nearest');
        W_ice(:,i)=(V_avg(i)/r_eff)*rtr(i);
        W_conv(i)=(V_avg(i)/r_eff)*rtr(i);

        if W_em(i)~=0

                T_em(:,i)=P_em(:,i)/W_em(i);

        end

end

ind=find(W_ice<83.7758);

```

```

W_ice(ind)=83.7758;
ind=find(W_conv<83.7758);
W_conv(ind)=83.7758;

Ttot=zeros(n_u,n_t);

%% P_ice hesabı

for j=1:n_t
    for i=1:n_u

        P_ice(i,j)=(P_r_wh(j)-
        P_em(i,j)*(0.92^sign(P_em(i,j))))/0.92/0.92;
        T_ice(i,j)=(T_r_wh(j)-
        i_dr*T_em(i,j)*(0.92^sign(P_em(i,j))))/0.92/0.92/rtr(j);
        Ttot(i,j)=T_ice(i,j)*rtr(j)*0.92*0.92+i_dr*T_em(i,j)*0.92^sign
        (P_em(i,j));

    end
end

%% Güç Sınırları

ind=find(P_r_wh<=0);
P_ice(:,ind)=0;
T_ice(:,ind)=0;
W_ice(:,ind)=83.7758;

ind=find(P_ice<0);
P_ice(ind)=NaN;
T_ice(ind)=NaN;
W_ice(ind)=83.7758;

ind=find(T_ice==0);
W_ice(ind)=83.7758;

%% Tork Sınırları

for i=1:n_t
    for j=1:n_u
        Tem_c=interp1(w_EM_row,T_EM_max,W_em(i));

        if abs(T_em(j,i))>abs(Tem_c)
            T_em(j,i)=NaN;
            P_em(j,i)=NaN;
            T_ice(j,i)=NaN;
            P_ice(j,i)=NaN;

        end
    end
end

```

```

Tice_c=interp1(w_ICE_row,T_ICE_max,W_ice(j,i),'cubic','extrap');

    if abs(T_ice(j,i))>abs(Tice_c)
        T_em(j,i)=NaN;
        P_em(j,i)=NaN;
        T_ice(j,i)=NaN;
        P_ice(j,i)=NaN;

    end
end
end

%% Değer Matrisi

Cost=zeros(n_u,n_t);
Costf=zeros(n_u,n_t);

for i=1:n_u
    for j=1:n_t
        if isnan(P_ice(i,j))|isnan(T_ice(i,j))
            Cost(i,j)=Inf;
            Costf(i,j)=Inf;
        else

%% Cost(i,j)=interp2(fc_map_spd,fc_map_trq,fc_map_p,W_ice(i,j),T_ice(i
,j));

Costf(i,j)=interp2(fc_map_spd,fc_map_trq,fc_fuel_map,W_ice(i,j),T_ice
e(i,j));

        end
    end
end

%%

ind=find(P_r_wh<0);
ind=find(isnan(Cost));
Costf(ind)=Inf;
ind=find(isnan(Costf));
Cost(ind)=Inf;

ind=find(isnan(P_ice));
Cost(ind)=Inf;
Costf(ind)=Inf;

%%

```



```

L=Inf*ones(n_x,n_t);
L(x0,1)=0;
N=zeros(n_x,n_t);
NN=zeros(n_x,n_t);
N(x0,1)=x0;

for i=1:n_t-1

    xmi=x_min(i);
    xma=x_max(i);
    if P_r_wh(i)>0

        n_uu=n_u;
        uu=u;
        P0s=P_s_grid;

        teta=1;

    elseif P_r_wh(i)<0

        ug=(P_em(1,i)-mod(P_em(1,i),mm))/mm;

        uu=ug:1:1;
        %uu=ug;
        n_uu=length(uu);
        %n_uu=1;

        if length(uu)>length(u)
            n_uu=n_u;
        else

            n_uu=length(uu);

        end

        P0s=P_em(1,i);
        gamma=(1+sign(P0s))/2;
        teta=1;

    else

        step_u=0;
        n_uu=1;
        uu=0;
        P0s=0;
        teta=0;
        gamma=0;

    end

end

```

```

for pos=xmi:xma
    for j=1:n_uu
        step_u=uu(j);
        from_pos=pos;
        to_pos=pos-step_u;
        %gamma=(1+sign(P_em(j,i)))/2;

        if
            (to_pos<=x_max(i+1)) & (to_pos>=x_min(i+1)) & (Cost(j,i)~=Inf)

                cost_t=Costf(j,i);
                costs=L(from_pos,i)+cost_t;

                if costs<L(to_pos,i+1)

                    L(to_pos,i+1)=costs;
                    N(to_pos,i+1)=from_pos;
                    NN(to_pos,i)=j;

                end

            end
        end
    end
end
end
end

```

## EK C

% Markov Zincirleri yöntemi ile rastgele olasılık dağılım matrisinin oluşturulması ve rastgele hız profilleri oluşturmak için kullanılan MATLAB kodları

```
clc
clear
load birlesik_hiz_profili

V_z2=10*V_z1;           % tek onalıklı hız değerleri

V_z2=round(V_z2);

up_lmt=max(V_z2);
V_z2(end+1)=Inf;

mark_p=zeros(up_lmt+1, up_lmt+1);
mark_ptmp=zeros(up_lmt+1, up_lmt+1);

% Birbirlerini takip eden hız değerlerinin sayısı

for i=up_lmt+1:-1:1

    for j=up_lmt+1:-1:1

        ind1=find(V_z2==i-1);
        ind2=find(V_z2(ind1+1)==j-1);
        mc=length(ind2);
        mark_ptmp(i,j)=mc;

    end

    kt=sum(mark_ptmp(i,:));
    mark_ptmp2(i,:)=mark_ptmp(i,:)/kt;   % Hız değerleri arasındaki
geçiş olasılıklarının hesaplanması

end

ind=find(isnan(mark_ptmp2)==1);
mark_ptmp2(ind)=0;
```

## EK D

```
% Markov özelliği ile rastgele hız profillerinin oluşturulması
MATLAB kodları

clc
clear

load markovs % Olasılık matrisi

xk=1; % İlk hız değeri
v_temp=[0:up_lmt];
vz(1)=1;
vmax=up_lmt;

for i=1:300000 % Rastgele hız değeri adeti

    mu=mark_ptmp2(xk,:);
    z=0;
    k=zeros(vmax,1);

    for j=1:vmax

        pr_t=mu(j);
        z=z+pr_t;
        k(j)=z;

    end

    rn=rand; % Rastgele olasılık değeri
    ind=find(rn<k);

    if isempty(ind) % Olasılığa karşılık gelen hız değeri
        xk=1;
    else

        xk=min(ind);
    end

    v_rpr2(i)=v_temp(xk);

end
```

## ÖZGEÇMİŞ

<b>Adayın adı soyadı</b>	Ali BOYALI
<b>Doğum yeri ve tarihi</b>	Sivas, 1975
<b>Daimi adresi</b>	Fatih Sultan Cd. Cilesiz Sk. No:2 Hasköy / İST.
<b>Eğitim</b>	Lisans - İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği (1998) Y. Lisans - İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği, Otomotiv Programı (2002)

## Yayınlar

- **Boyalı A.**, Öztürk S., Yiğit T., Aksun Güvenç B., Güvenç L., Use of Computer Aided Methods for Optimisation in Vehicle Suspension Design and for Designing Active Suspension, *Proceedings of ESDA 2002, 6<sup>th</sup> Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis* Istanbul, July 8-11, 2002, Turkey.
- **Boyalı A.**, Acarman T., Güvenç L., Kıray B. Özatay E., 2006, Modeling and Control of a Four Wheel Drive Parallel Hybrid Electric Vehicle, *IEEE Conference on Control Applications*, October 4-6, Munich, Germany.
- **Boyalı A.**, Demirci M., Acarman T., Güvenç L., Kıray B., Yıldırım M., 2006. A Simulation Program for a Four Wheel Drive Parallel Hybrid Electric Vehicle and its Use in Rule Based Controller Development and Implementation, *Workshop on Hybrid and Solar Vehicles*, November 5-6, 2006, Salerno, Italy.
- **Boyalı A.**, Acarman T., Güvenç L., 2007. Component Sizing in Hybrid Electric Vehicle Design using Optimization and Design of Experiments Techniques, *Workshop on Hybrid Electric Vehicle Modeling and Control in connection with IEEE 2007 Intelligent Vehicle Symposium*, June 13-15, Istanbul Turkey.

