

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ

DOKTORA TEZİ

Emre KURAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Doktora Programı

ŞUBAT 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ

DOKTORA TEZİ

Emre KURAL
(503062007)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Doktora Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bilin AKSUN GÜVENÇ

ŞUBAT 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503062007 numaralı Doktora öğrencisi, **Emre KURAL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ**” başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Bilin AKSUN GÜVENÇ**
 İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Erdinç ALTUĞ**
 İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd.Doç.Dr. Erkin DİNÇMEN**
 Işık Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Levent GÜVENÇ**
 Ohio Devlet Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Özgen AKALIN**
 İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Aralık 2014**

Savunma Tarihi : **27 Şubat 2015**

ÖNSÖZ

Enerji kaynaklarındaki kısıtlı çeşitlilik ve fosil yakıta olan bağımlılık, en önemli enerji tüketim alanlarından ulaştırma sektörü için, yeni ve alternatif teknolojilerin araştırılması adına itici güç olmaktadır. Tüm emisyon regülasyonları, CO₂ yayılım limitleri, artan petrol fiyatları ve tüketicilerin de bilinçli ve çevreyle uyumlu araç talepleri, bu yöndeki çalışmaları hızlandıran etkenlerdendir. Özellikle bu anlamda, güç aktarma organları üzerindeki elektrikleştirme eğilimleri ile Hibrid Elektrikli Araçların günümüzde kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. Hali hazırda, şebeke hattından şarj olabilen, Şarj Edilebilen Hibrid Elektrikli Araçlar da gün geçtikçe popülerliğini artırmaktadır. Her ne kadar mühendislik anlamında olgunlaştıkları görülsede, akademik anlamda bu araç teknolojileri halen bir araştırma konusudur.

Öte yandan hızla gelişen bir diğer alan da, iletişim sistemleri ve teknolojileridir. Artık birçok veri ve bilgi kaynağı araç üzerinde ulaşılabilir durumdadır. Araç teknolojileri açısından, bu bilgi havuzu araç ve güç aktarma organlarının öngörülmesi kontrolünü sağlar. Böylece araçlar, daha verimli sürüş stratejileri ile sürücülerden bağımsız olarak sürüş sağlayabilmektedir. Bu anlamda yol topografyalarını içeren dijital haritalar, GPS ve uydu sistemleri ya da trafik bilgi sistemleri gibi birçok bilgi kaynağının araç içerisinde kullanılması mümkündür. Kısa sürede, araç teknolojilerinin birçok alanında hem güvenlik hem de verimlilik adına, bu Bilgi ve Haberleşme Teknolojileri ile Akıllı Ulaşım Sistemlerinin hızla yaygınlaşması beklenmektedir.

Bu doktora tez çalışması, Hibrid Elektrikli Araç Enerji Yönetim Sistemleri'nin optimizasyonu ve bu Akıllı Ulaşım Sistemleri aracılığı ile bu bilgilerin daha verimli araç enerji yönetimi için kullanılmasını hedeflemektedir. Öte yandan bu çalışma iletişim teknolojilerinin araç sürüş destek sistemlerinde kullanılmasına yönelik çalışmalar da içermektedir. Yazara, bu tezi öneren, uzun yıllar birlikte çalıştığım ve çalıştığımız süre içerisinde her türlü olanağı sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Bilin AKSUN GÜVENÇ'e, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Şubat 2015

Emre Kural

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xix
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	3
1.1.1 Kural tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri.....	5
1.1.2 Optimizasyon tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri	8
1.1.3 Öngörülü kontrol ile HEA Enerji Yönetim Sistemleri.....	12
1.1.4 Sürücü Destek Sistemleri – Adaptif Seyir Sistemleri ve Trafik Işığı Destek Sistemleri	16
1.2 Tezin Kapsamı ve Literatüre Katkısı	17
2. HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇ İÇİN ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ VE ARAÇ MODELLEME METODOLOJİLERİ.....	21
2.1 Hibrid Araç Güç Aktarma Organları Topolojileri	24
2.1.1 Seri Hibrid Elektrikli Araç topolojisi.....	24
2.1.2 Paralel Hibrid Elektrikli Araç konfigürasyonu	25
2.1.3 Seri-paralel Hibrid Elektrikli Araç konfigürasyonu.....	26
2.2 Dışarıdan Şarj Edilebilen Hibrid Elektrikli Araç Konfigürasyonu	27
2.2.1 Hibrid Araç Enerji Yönetim Sistemleri	27
2.3 Hibrid Araç Enerji Yönetim Sistemleri Geliştirilmesine Yönelik Araç Modeli Tasarımları	28
2.3.1 Tam-dinamik araç modelleme yöntemi – sürücünden tekerleğe kuvvet iletimi – ileri yönde modelleme metodolojisi	30
2.3.2 Sanki-statik araç modelleme yöntemi – Tekerlekten komponente kuvvet iletimi – Geri yönde modelleme metodolojisi.....	31
2.4 Öngörülü Hibrid Araç Enerji Yönetim Sistemleri ve İletişim Teknolojileri ...	32
3. ARAÇ MODELLEMESİ	35
3.1 Hibrid Elektrikli Araç Güç Aktarma Organı Topolojisi	36
3.2 Test Koşulları	37
3.3 Araç Modelleri	38
3.3.1 Sanki-statik araç modelleme yöntemi – Tekerlekten komponente kuvvet iletimi – Geri Yönde Modelleme Metodolojisi.....	39
3.3.2 Gelişmiş araç modeli.....	49
4. HEA İÇİN OPTİMAL ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ.....	51
4.1 Dinamik Programlama	53

4.2 Dinamik Programlama Yönteminin HEA Enerji Yönetim Sistemi İçin Kullanımı.....	57
4.3 Optimal Kontrol Teorisi ile Enerji Tüketimi Optimizasyonu ve Adaptif Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Yöntemi	61
4.4 Dinamik Programlama ve EYTM İçin Karşılaştırmalı Sonuçlar	74
4.4.1 Durum 1: NEDC – HEA – dinamik programlama.....	76
4.4.2 Durum 2: NEDC – HEA – dinamik programlama.....	78
4.4.3 Durum 2: NEDC – HEA – EYTM.....	81
4.4.4 FTP çevrimi – HEA – dinamik programlama ve EYTM stratejisi	83
4.4.5 Batarya şarj dengeleme algoritmaları.....	83
4.4.6 Dinamik tam model karşılaştırmalı sonuçlar	84
4.4.7 Sonuçların irdelenmesi.....	87
5. ÖNGÖRÜLÜ HİBRİD ARAÇ ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ.....	93
5.1 Şarj Dengeleme Problemi ve Öngörülü Enerji Kontrol Yöntemi	93
5.2 Hibrid Elektrikli Araçlar İçin Öngörülü Enerji Yönetim Sistemi	96
5.2.1 Öngörülü eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu yöntemi	96
5.2.2 Model öngörülü kontrol yöntemi ile öngörülü enerji yönetimi.....	105
5.2.3 Model öngörülü kontrol yöntemi ile öngörülü enerji yönetimi için simülasyon senaryoları ve sonuçları	116
6. SÜRÜCÜ DESTEK SİSTEMLERİ.....	129
6.1 Adaptif Seyir Sistemi (ASS)	129
6.1.1 ASS problemi çözümü için model öngörülü kontrol	130
6.1.2 Adaptif seyir sistemi için model öngörülü kontrol yapısı	135
6.1.3 Lineer model simülasyonu için kontrol yapısı	139
6.1.4 Model öngörülü kontrolcünün lineer model üzerindeki simülasyon sonuçları	140
6.1.5 Model öngörülü kontrolcünün nonlinear model üzerindeki simülasyon sonuçları	147
6.1.6 Nonlinear model simülasyonu için kontrol yapısı	147
6.2 Trafik Işık Asistanı.....	151
6.2.1 Trafik ışıkları ile kontrol edilen optimal hız problemi.....	152
6.2.2 Trafik ışıkları ile kontrol edilen optimal hız probleminin model öngörülü kontrol yöntemi ile çözümü.....	154
6.2.3 TIA için simülasyon sonuçları	164
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	169
KAYNAKLAR.....	175
ÖZGEÇMİŞ.....	189

KISALTMALAR

İYM	: İçten Yanmalı Motor
EM	: Elektrik Motoru
HEA	: Hibrid Elektrikli Araç
ŞE-HEA	: Şarj Edilebilen Hibrid Elektrikli Araç
HEV	: Hybrid Electric Vehicle
P-HEV	: Plug-in Hybrid Electric Vehicle
SOC	: State of Charge
OÇÇ	: Optimum Çalışma Çizgisi
DP	: Dinamik Programlama
LP	: Lineer Programlama
EYTM	: Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu
MPC	: Model Predictive Control
NEDC	: New European Drive Cycle
FTP	: Federal Test Procedure
GPS	: Global Positioning System
HiL	: Hardware in the Loop
SiL	: Software in the Loop
HuiL	: Human in the Loop
İMA	: İnsan Makine Arayüzü

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 : HEA ve ŞE-HEA için test koşulları.	49
Çizelge 4.1: EYTM stratejisi için FTP ve NEDC çevrimleri eşdeğer yakıt tüketimi katsayıları.	71
Çizelge 4.2 : Hibrid elektrikli araç enerji yönetimlerinin incelendiği simülasyon senaryolarının özeti.	74
Çizelge 4.3 : Hibrid elektrikli araç çalışma modları.	75
Çizelge 4.4 : Farklı sürüş çevrimleri hibrid konfigürasyonları ve araç modelleri için kalibre edilmiş eşdeğer yakıt değerleri.	89
Çizelge 4.5 : NEDC sırasında HEA aracının farklı optimizasyon algoritmaları için yakıt tüketimi davranışları ve DP Durum 1 ve DP Durum 2 referanslarına göre ekstra tüketim yüzdeleri.	91
Çizelge 4.6 : FTP çevrimi sırasında HEA aracının farklı optimizasyon algoritmaları için yakıt tüketimi davranışları ve DP Durum1 ve DP Durum2 referanslarına göre ekstra tüketim yüzdeleri.	91
Çizelge 4.7 : Kombine çevrimleri sırasında şarj edilebilir HEA aracın farklı optimizasyon algoritmaları için yakıt tüketimi davranışları ve DP Durum 1 referansına göre ekstra tüketim yüzdeleri.	92
Çizelge 5.1 : Öngörülü EYTM için yol senaryoları ve yol bölümleri.	100
Çizelge 5.2 : Senaryo 1 ve Senaryo 2’de elde edilen yakıt tüketimleri ve tasarruf miktarları.	104
Çizelge 5.3 : Öngörülü lineer EYTM tabanlı algoritma test senaryoları.	117
Çizelge 5.4 : Öngörülü lineer EYTM tabanlı algoritma test senaryoları yakıt tüketim sonuçları.	127
Çizelge 6.1 : Simülasyonlarda kullanılan ASS aracı ve kontrolcüsü parametreleri.	140
Çizelge 6.2 : ASS simülasyon başlangıç koşulları.	141
Çizelge 6.3 : TLA için tüm senaryolarda elde edilen tüketim tasarrufları	168

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 : HEA ve ŞE-HEA için enerji yönetim sistemlerinin gruplandırması [2-3].	4
Şekil 1.2 : Optimum çalışma çizgisi ve motor verim haritası [14].	6
Şekil 2.1 : Seri HEA konfigürasyonu.	25
Şekil 2.2 : Paralel HEA konfigürasyonu.	26
Şekil 2.3 : Seri-Paralel HEA konfigürasyonu.	26
Şekil 2.4 : Şarj edilemeyen HEA için batarya şarj değişimi.	27
Şekil 2.5 : ŞE-HEA için batarya şarj değişimi.	28
Şekil 2.6 : Kompleks simülasyon ortamı: CarMaker - AVL CRUISE - MATLAB Simulink.	31
Şekil 3.1 : Simülasyonlarda kullanılan paralel HEA topolojisi.	37
Şekil 3.2 : Basit model, kompleks model ve tekrar kalibre edilmiş basit model için batarya şarj durumu karşılaştırması.	38
Şekil 3.3 : Basit model, kompleks model ve tekrar kalibre edilmiş basit model için batarya akımı karşılaştırması.	39
Şekil 3.4 : Geri yönde modelleme metodolojisi için sinyal akış yönü.	40
Şekil 3.5 : Paralel HEA için tekerlekten komponente enerji akış şeması.	40
Şekil 3.6 : Genelleştirilmiş durum için araca etkiyen kuvvetler.	41
Şekil 3.7 : EM verim haritası.	44
Şekil 3.8 : Batarya eşdeğer açık devre modeli.	45
Şekil 3.9 : Batarya gücünü batarya gerilimi ile değişimi.	47
Şekil 3.10 : Batarya modeli sinyal akış şeması.	48
Şekil 3.11 : İYM yakıt tüketim haritası.	48
Şekil 3.12 : Paralel HEA güç aktarma organları CRUISE modeli.	50
Şekil 3.13 : Gelişmiş eş-simülasyon ortamı ve simülasyon ortamları arası arayüzleri.	50
Şekil 4.1 : Bellman optimallik prensibi.	53
Şekil 4.2 : Optimal sistem yörüngesi.	54
Şekil 4.3 : Dinamik programlama hesaplama rutini.	56
Şekil 4.4 : Eşdeğer yakıt tüketimi deşarj anı.	67
Şekil 4.5 : Eşdeğer yakıt tüketimi şarj anı.	68
Şekil 4.6 : Eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu yöntemi ile enerji tüketim karakteristiği elde etme yöntemi.	69
Şekil 4.7 : NEDC için EYTM karakteristik belirleme, batarya şarj değişimleri – güç paylaşım modu.	70
Şekil 4.8 : NEDC için EYTM karakteristik belirleme, batarya şarj değişimleri – paralel şarj modu.	71
Şekil 4.9 : Yakıt tüketimi ve elektrik enerjisi tüketimi (paralel şarj modu ve güç paylaşım modları için).	72
Şekil 4.10 : Eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu algoritmasının araç modeline uygulanması.	72
Şekil 4.11 : NEDC Durum 1 – DP algoritma: hız profili ve batarya şarj profili.	76

Şekil 4.12 : NEDC Durum 1 – DP algoritma: hız profili ve batarya şarj profili ve seçilen sürüş modları.....	76
Şekil 4.13 : NEDC Durum 1 – DP algoritma: İYM ve EM çalışma noktaları.....	77
Şekil 4.14 : NEDC Durum 1 – DP algoritma: EM çalışma noktaları.....	77
Şekil 4.15 : NEDC Durum 1-DP algoritma: İYM ve EM tork seçilen vitesler.....	78
Şekil 4.16 : NEDC Durum 2 – DP algoritma: hız profili ve batarya şarj profili.....	78
Şekil 4.17 : NEDC Durum 2 – DP algoritma: hız profili ve batarya şarj profili ve seçilen sürüş modları.....	79
Şekil 4.18 : NEDC Durum 2 – DP algoritma: İYM ve EM çalışma noktaları.....	79
Şekil 4.19 : NEDC Durum 2 – DP algoritma: EM çalışma noktaları.....	80
Şekil 4.20 : NEDC Durum 2 – DP algoritma: İYM ve EM tork seçilen vitesler.....	80
Şekil 4.21 : NEDC Durum 2 – EYTM algoritma: hız profili ve batarya şarj profili ve seçilen sürüş modları.....	81
Şekil 4.22 : NEDC Durum 2 - EYTM algoritma: İYM ve EM çalışma noktaları.....	81
Şekil 4.23 : NEDC Durum 2 – EYTM algoritma: EM çalışma noktaları.....	82
Şekil 4.24 : NEDC çevrimi Durum 2 – DP ve EYTM algoritmaları karşılaştırma: batarya şarj profilleri, EM ve İYM torkları.....	82
Şekil 4.25 : FTP çevrimi Durum 2 – DP ve EYTM algoritmaları karşılaştırma: batarya şarj profilleri, EM ve İYM torkları.....	83
Şekil 4.26 : NEDC Durum 3 – DP, EYTM ve ETTM SOC kontrol algoritmaları karşılaştırma: batarya şarj profilleri, EM ve İYM torkları.....	83
Şekil 4.27 : NEDC Durum 3 – DP, EYTM ve EYTM SOC kontrol algoritmaları karşılaştırma: batarya şarj profilleri, EM ve İYM torkları.....	84
Şekil 4.28 : NEDC Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model batarya şarjı ve araç hızları.....	84
Şekil 4.29 : NEDC Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model davranış – EM tork, debriyaj pozisyonu ve İYM tork.....	85
Şekil 4.30 : NEDC Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model davranış – anlık ve toplam yakıt tüketimi.....	85
Şekil 4.31 : FTP çevrimi Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model batarya şarjı ve araç hızları.....	86
Şekil 4.32 : FTP çevrimi Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model davranış – EM tork, debriyaj pozisyonu ve İYM tork.....	86
Şekil 4.33 : FTP çevrimi Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model davranış – anlık ve toplam yakıt tüketimi.....	87
Şekil 4.34 : NEDC Durum 1 –DP algoritması – viteslere göre çalışma noktaları.....	88
Şekil 4.35 : FTP çevrimi Durum 1 –DP algoritması – viteslere göre çalışma noktaları.....	89
Şekil 5.1 : Klasik EYTM yönteminde öngörülemez yol şartlarından dolayı erken biten ve dolan şarj durumları.....	95
Şekil 5.2 : Klasik EYTM yönteminde öngörülemez yol şartlarından dolayı erken biten ve dolan şarj durumları.....	95
Şekil 5.3 : Klasik EYTM için batarya şarjının erken dolması ve öngörülü EYTM için erkendeşarj miktarı.....	97
Şekil 5.4 : Klasik EYTM için batarya şarjının erken dolması ve öngörülü EYTM için erkendeşarj miktarı.....	99
Şekil 5.5 : Senaryo 1 - Durum 1: $SOC(t_0) = \%58$, $V = 50 \text{ km/saat}$, klasik EYTM ve öngörülü-EYTM batarya şarj seviyesi ve batarya enerjisi.....	101
Şekil 5.6 : Senaryo 1 - Durum 1: $SOC(t_0) = \%58$, $V = 50 \text{ km/saat}$, klasik EYTM ve öngörülü-EYTM EM torku ve İYM torku karşılaştırması.....	101

Şekil 5.7 : Senaryo 1 - Durum 2: $SOC(t_0) = \%56$, $V = 60 \text{ km/saat}$, klasik EYTM ve öngörülü-EYTM karşılaştırması.	102
Şekil 5.8 : Senaryo 1 - Durum 2: $SOC(t_0) = \%56$, $V = 60 \text{ km/saat}$, klasik EYTM ve öngörülü-EYTM karşılaştırması.	103
Şekil 5.9 : Senaryo 2: yol bölümleri, batarya seviyesi, EM Torku ve batarya enerjisi.	104
Şekil 5.10 : Senaryo 2: klasik EYTM ve öngörülü-EYTM karşılaştırması anlık ve kümülatif yakıt tüketimleri.	105
Şekil 5.11 : Gerçek ve lineer model için batarya ve yakıt enerjilerinin paralel şarj ve güç aktarım oranları ile değişimi ve tahmin modeli hatası.	107
Şekil 5.12 : Lineer EYTM için parametre hesaplama rutini.	108
Şekil 5.13 : Lineer EYTM için batarya enerjisi ve yakıt enerjileri için K_x lineer katsayıları.	109
Şekil 5.14 : Lineer EYTM için batarya enerjisi ve yakıt enerjileri için K_y lineer katsayıları.	109
Şekil 5.15 : Lineerleştirilmiş EYTM ile tekrar oluşturulmuş eşdeğer yakıt minimizasyonu ve bedel fonksiyonu değerleri.	110
Şekil 5.16 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş eytm karşılaştırması için kullanılan NEDC, Motora İndirgenmiş Yol Yüğü, Motora İndirgenmiş Hız ve Örnek Çalışma Noktası – 1050. saniye.	110
Şekil 5.17 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş EYTM modellerinde örnek çalışma noktası için batarya enerjisinin kontrol girişleri ile değişimi.	111
Şekil 5.18 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş EYTM modellerinde örnek çalışma noktası için yakıt enerjisinin kontrol girişleri ile değişimi.	111
Şekil 5.19 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş EYTM modellerinde NEDC boyunca EM ve İYM tork değerleri.	112
Şekil 5.20 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş EYTM modellerinde NEDC boyunca batarya şarjı ve anlık yakıt tüketim değerleri.	112
Şekil 5.21 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş EYTM modellerinde NEDC boyunca batarya şarjı ve anlık yakıt tüketim değerleri.	116
Şekil 5.22 : Senaryo 1.1: Sabit hızla yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 50 km/saat.	118
Şekil 5.23 : Senaryo 1.2: Sabit hızla yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 60 km/saat.	119
Şekil 5.24 : Senaryo 1.3: Sabit hızla yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 70 km/saat.	120
Şekil 5.25 : Senaryo 2.1: Sabit hız-ivmelenme-sabit hız profili ile yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 40 km/saat→70km/saat.	121
Şekil 5.26 : Senaryo 2.2: Sabit hız-ivmelenme-sabit hız profili ile yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 40 km/saat→60km/saat.	122
Şekil 5.27 : Senaryo 2.3: Sabit hız-ivmelenme-sabit hız profili ile yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 40 km/saat→80km/saat.	123
Şekil 5.28 : Senaryo 3.1: Sabit hız-ivmelenme-sabit hız –yavaşlama sabit hız yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 50 km/saat→80 km/saat→60km/saat.	124
Şekil 5.29 : Senaryo 3.2: Sabit hız-ivmelenme-sabit hız –yavaşlama sabit hız yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 40 km/saat→70 km/saat→50km/saat.	125
Şekil 5.30 : Senaryo 4: Dinamik hız profili ile eğim bölümüne yaklaşım senaryosu.	126

Şekil 6.1 : ASS Boylamsal hız ve konum kontrol problemi.....	129
Şekil 6.2 : Lineer model simülasyonu için kontrol yapısı.	139
Şekil 6.3 : Sabit hızlı hedef araç durumunda takip senaryosu.	141
Şekil 6.4 : $a_{maks} = 0 \text{ m/s}^2$ için simülasyon sonucu.....	142
Şekil 6.5 : $v(0) = 30 \text{ m/s}$ sabit hedef araç hızı için simülasyon sonuçları.....	143
Şekil 6.6 : $v(0) = 30 \text{ m/s}$ sabit hedef araç hızı ve $a_{maks} = 0$ için simülasyon sonuçları.	143
Şekil 6.7 : $v(0) = 20 \text{ m/s}$ sabit hedef arac hızı ve $v_I(0) = 0$ için simülasyon sonuçları.	144
Şekil 6.8 : $v(0) = 20 \text{ m/s}$ sabit hedef araç hızı, $v_I(0) = 0$ ve $a_{maks} = 0$ için simülasyon sonuçları.	144
Şekil 6.9 : $v(0) = 30 \text{ m/s}$ için ve hedef aracın hızlanma profili izlediği durum simülasyonu.	145
Şekil 6.10 : $-v(0) = 20 \text{ m/s}$ için ve hedef aracın hızlanma ve yavaşlama profili izlediği durum simülasyonu.	145
Şekil 6.11 : $-v(0) = 20 \text{ m/s}$ ve $a_{maks} = 2 \text{ m/s}^2$ için ve hedef aracın hızlanma ve yavaşlama profili izlediği durum simülasyonu.	146
Şekil 6.12 : $-v(0) = 30 \text{ m/s}$ ve $a_{maks} = 2 \text{ m/s}^2$ için ve hedef aracın hızlanma ve yavaşlama profili izlediği durum simülasyonu.	146
Şekil 6.13 : Nonlinear araç modelinin kullanıldığı simülasyon ortamı yapısı.....	147
Şekil 6.14 : $v(0) = 20 \text{ m/s}$ ve $v_I(0) = 10 \text{ m/s}$ nonlinear model için simülasyon sonucu – araç hızları.	148
Şekil 6.15 : $v(0) = 20 \text{ m/s}$ ve $v_I(0) = 10 \text{ m/s}$ nonlinear model için simülasyon sonucu – araçlar arası mesafe.	149
Şekil 6.16 : $v(0) = 30 \text{ m/s}$ ve $v_I(0) = 20 \text{ m/s}$ - $v_I(60) = 24 \text{ m/s}$ başlangıç koşulları için nonlinear model simülasyon sonucu – araç hızları.	150
Şekil 6.17 : $v(0) = 30 \text{ m/s}$ ve $v_I(0) = 20 \text{ m/s}$ - $v_I(60) = 24 \text{ m/s}$ başlangıç koşulları için nonlinear model simülasyon sonucu – araçlar arası istenen ve gerçek mesafeler.	150
Şekil 6.18 : Trafik Işığı Asistanı simülasyon uygulaması animasyonu.	151
Şekil 6.19 : TIA simülasyon uygulaması animasyonu.	152
Şekil 6.20 : Araç elektrikli sürüş sırasında ivmelenme sınırları.	153
Şekil 6.21 : TIA için hız optimizasyon problemi.....	154
Şekil 6.22 : TIA için fonksiyonel blok diyagramı.	156
Şekil 6.23 : TIA için pozisyon ve zamana bağlı kısıtlar	157
Şekil 6.24 : TIA için hedef aracın yer aldığı senaryo gösterimi.	159
Şekil 6.25 : TIA için hedef araç göz önüne alınarak oluşturulan çözüm alanı	160
Şekil 6.26 : TIA için örnek yeşil dalga alternatifleri.	160
Şekil 6.27 : TIA algoritması için akış diyagramı.....	162
Şekil 6.28 : TIA algoritmasının çalıştığı sürücü arayüzü [123].....	163
Şekil 6.29 : TIA için geliştirilen simülatör sistem mimarisi [123].	163
Şekil 6.30 : TIA algoritmasının çalıştığı sürücü simülatörü ve sürücü arayüzü.....	164
Şekil 6.31 : TIA algoritmasının çalıştığı sürücü simülatörünün genel görünüşü. ...	164
Şekil 6.32 : 1.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngesi.	165
Şekil 6.33 : 1.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngeleri.	166
Şekil 6.34 : 2.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngeleri.	166

Şekil 6.35 : 2.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngeleri.	166
Şekil 6.36 : 3.Senaryo için kullanılan gerçek trafik ışık lokasyonları [124].	167
Şekil 6.37 : 2.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngeleri.	167
Şekil 6.38 : 3.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngeleri.	167

SEMBOL LİSTESİ

F_d	:Araç atalet kuvveti
F_a	:Araç aerodinamik direnç kuvveti
F_g	:Araç eğim direnç kuvveti
F_r	:Araç yuvarlanma direnci kuvveti
F_{net}	:Araç toplam direnç kuvveti
$m_{araç}$	:Araç kütlesi
θ	:Yol eğimi
g	:Yer çekimi ivmesi
a	:Araç ivmesi
ρ	:Hava yoğunluğu
A_f	:Araç ön alan kesiti
C_d	:Aracın aerodinamik katsayısı
$V_{araç}$	:Araç hızı
η_{ydf}	:Tekerlek yuvarlanma direnci katsayısı
R_{ef}	:Tekerlek efektif yarıçapı
$T_{net,aks}$	:Net aks torku
T_{IYM}	:İYM torku
T_{EM}	:EM torku
T_{fren}	:Toplam fren torku
$T_{mek.fren}$	:Mekanik fren torku
$T_{IYM,tahrik}$	:İYM torkunun tahrik miktarı
$T_{IYM,elektrik}$	:İYM torkunun tahrik miktarı
$T_{jen.,elektrik}$	:Jeneratör torku
$P_{mek.}$	:Mekanik güç
$P_{el.}$	:Elektrik gücü
$\eta_{EM,tahrik}$	:EM pozitif tork verimi
$\eta_{EM,jen.}$	:EM pozitif tork verimi
i_{tr}	:Transmisyon çevrim oranı
i_{dif}	:Diferansiyel çevrim oranı
η_{tr}	:Transmisyon verimi
η_{dif}	:Diferansiyel verimi
N	:Vites
u	:Hibrid güç aktarım oranı, kontrol girişi
ω_{aks}	:Tekerlek aksı dönme hızı
ω_{dif}	:Diferansiyel girişi dönme hızı
ω_{EM}	:EM dönme hızı
ω_{IYM}	:İYM dönme hızı
$U(t)$	:Batarya terminal gerilimi

U_{OC}	:Batarya eşdeğer açık devre gerilimi
$I_{deşarj}$	:Bataryadeşarj akımı
$I_{şarj}$	:Batarya şarj akımı
R_i	:Batarya iç direnci
$P_{elektrik}$	:Batarya gücü
P_{maks}	:Batarya maksimum gücü
SOC	:Batarya şarjı
$SOC_{min.}$	:Batarya minimum şarjı
$SOC_{maks.}$	:Batarya maksimum şarjı
Q	:Batarya şarj miktarı
Q_{maks}	:Batarya maksimum şarj miktarı
$\dot{m}_{yakıt}$	:Anlık yakıt tüketimi
J	:Bedel fonksiyonu
$x_{i,min}$	:Minimum sistem durum değeri
$x_{i,maks}$	:Maksimum sistem durum değeri
$u_{i,maks}$	:Minimum sistem giriş değeri
$u_{i,min}$	:Maksimum sistem giriş değeri
x^*	:Optimal sistem durum değeri
κ	:Sistem kompleksliği
Δt	:Zaman adımı
$\omega_{iYM,min.}$	:Minimum İYM hızı
$\omega_{iYM,maks.}$	:Maksimum İYM hızı
$\omega_{EM,min.}$	:Minimum EM hızı
$\omega_{EM,maks.}$	:Maksimum EM hızı
$T_{min.}$	:Minimum İYM torku
$T_{maks.}$	:Maksimum İYM torku
u_{iYM}	:İYM kontrol girişi
$\Delta SOC_{ŞE-HEA}$	:ŞE-HEA batarya şarj aralığı
ΔSOC_{HEA}	:HEA batarya şarj aralığı
Q_{LHV}	:Yakıt alt ısı değeri
φ_{SOC}	:Batarya şarj bandı aşım ceza fonksiyonu
$\varphi_{SOC,terminal}$	:Batarya şarj son değer aşım ceza fonksiyonu
H	:Hamilton fonksiyonu
λ^T	:Eş-durum değişkeni vektörü
s_0	:Eş değer yakıt tüketim katsayısı
$P_{yakıt}$	:Yakıt gücü
$P_{eşdeğer,yakıt}$	:Eş değer yakıt gücü
$\dot{m}_{eşdeğer}$	:Eş değer yakıt tüketimi
$\dot{m}_{el.}$	:Batarya eş değer yakıt tüketimi
$\dot{m}_{iYM}$	:İYM yakıt tüketimi
s_1	:Batarya kontrol eşdeğer yakıt tüketim katsayısı
$\bar{V}_{>eğim}$	:Eğim boyunca gidilen ortalama hız
d_f	:Eğimli yolun son noktası
$\lambda_{reküp}$	:Eğimli yol enerjisi batarya şarjı arasındaki ilişki katsayısı
$E_{reküp.}$	:Negatif eğimli yol üzerinde geri kazanılacak enerji
$E_{ek,deşarj}$	:Şarj dengesi için gereken ek öndeşarj miktarı

$E_{maks,f}$	:Eğim başında, normal EYTM'nin ulaşacağı şarj ile maksimum batarya şarjı arasındaki fark
$E_{max,0}$	:Öngörülü kontrol başladığında maksimum batarya şarjına kadar olan fark
$\dot{m}_{eşdeğer,reküp.}$	:Yoldan geri kazanılacak maksimum enerjinin eşdeğer yakıt değeri
$T_{\rightarrow d_0}$	:Eğim başlangıcına kalan zaman
$P_{ek,deşarj}$	:Şarj dengesi için gereken ek öndeşarj gücü
$K_{bx_P\dot{S}}$	:Lineerleştirilmiş EYTM'nin paralel şarj modundaki batarya enerjisi birinci terimi
$K_{by_P\dot{S}}$	:Lineerleştirilmiş EYTM'nin paralel şarj modundaki batarya enerjisi ikinci terimi
$K_{fx_P\dot{S}}$	:Lineerleştirilmiş EYTM'nin paralel şarj modundaki yakıt enerjisi birinci terimi
$K_{fy_P\dot{S}}$	:Lineerleştirilmiş EYTM'nin paralel şarj modundaki yakıt enerjisi ikinci terimi
$K_{bx_{GA}}$	:Lineerleştirilmiş EYTM'nin güç aktarımı modundaki batarya enerjisi birinci terimi
$K_{by_{GA}}$	:Lineerleştirilmiş EYTM'nin güç aktarımı modundaki batarya enerjisi ikinci terimi
$K_{fx_{GA}}$	:Lineerleştirilmiş EYTM'nin güç aktarımı modundaki yakıt enerjisi birinci terimi
$K_{fy_{GA}}$	:Lineerleştirilmiş EYTM'nin güç aktarımı modundaki yakıt enerjisi ikinci terimi
$u^*_{P\dot{S}}$	:Optimal paralel şarj öngörülü kontrol girişi
u^*_{GA}	:Optimal güç aktarımı öngörülü kontrol girişi
u^*	:Optimal öngörülü kontrol girişi

HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ

ÖZET

HEA'ların verimlilik artışını sağlayacak ve komponentlerin optimal şartlarda bir arada çalışmasını sağlayacak HEA Enerji Yönetim Sistemleri'nin geliştirilmesi araç tasarımının önemli bir parçasıdır. Öte yandan, HEA Enerji Yönetim Sistemleri birçok komponentin, zaman zaman birbirlerine ters düşen verim özelliklerini bir arada iyileştirmeyi amaçlaması açısından bu tez kapsamında da görüleceği üzere bir optimizasyon probleminin bir parçasıdır.

Bu tez öncelikle HEA ve ŞE-HEA Enerji Yönetim Sistem'lerinin bir optimizasyon problemi olarak tanımlamakta ve bu problemin çözümü için teorik ve pratik temelde farklı yöntemler uygulamaktadır. HEA için kat edilen sürüş manevrasında (Ör: Sürüş Çevrimi), sürüş başlangıç ve sonundaki şarj dengesi optimizasyon problemi için kullanılan kısıtlardan bir tanesidir. ŞE-HEA için problem daha farklı olup, yüksek batarya kapasitesi nedeni ile batarya şarj dengesi aranmaz. Dolayısı ile HEA ve ŞE-HEA arasında problem tanımı olarak bazı farklar yer almaktadır. Enerji Yönetim Sistem'inin amacı, bu tez kapsamında yakıt tüketiminin minimizasyonu olarak ele alınmıştır.

Bu iki farklı problem tanımının çözümüne yönelik farklı tipte yöntemler uygulanmıştır. Problemin teorik olarak optimum davranışını biliyor olmak, geliştirilecek diğer yöntemler için bir "Benchmark Çözüm" oluşturması açısından önemlidir. Öte yandan global optimum davranışı veren bu çözümün pratikte uygulanabilirliği mümkün değildir.

Bu tez kapsamında, Dinamik Programlama (DP) metodu ile HEA ve ŞE-HEA için global optimum davranış elde edilmiştir. DP çözümü problemi zaman ve durum değişkenleri açısından ayırık bir yapıya dönüştürmekle beraber, yukarıda bahsedilen sistem kısıt ve davranışlarını göz önüne alarak, problemi sondan başa doğru çözen iteratif bir algoritmadır. Öte yandan bu tezde irdelenen paralel hibrid topolojisinde yer alan vites geçiş davranışlarının yakıt tüketimine bir etkisi vardır. Bu etkiyi irdelemek adına DP çözüm kontrol girişi olarak vites seçiminin de serbestçe yapıldığı bir versiyon için de tekrarlanmıştır.

Gerek DP çözümün işlem ve hafıza yükünün çok yüksek olması gerekse de çözüm için tüm sürüş özelliklerinin önceden bilinmesi gerektiği gerçeği, DP çözümü teorik bir yapıdan öteye geçiremez. Dolayısıyla alternatif bir optimizasyon çözümü için Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu (EYTM) aynı hibrid araç tiplerine uygulanmıştır.

EYTM metodu, fiziksel ve optimal kontrol teorisi ile açıklanabilmekte olup, anlık optimizasyon yapıldığından işlem yükü DP'ye göre çok daha hafiftir. EYTM temel olarak, bataryaya giren ve çıkan elektrik enerjisinin eşdeğer yakıt tüketimi eşlenimini göz önüne alarak gerçek yakıt tüketimi ile beraber değerlendirildiği eşdeğer yakıt tüketimi değerine dayanmaktadır. Bu eşdeğer yakıt tüketimi değeri, aslında anlık

olarak minimize edilecek bir bedel fonksiyonudur. EYTM metoduna optimal kontrol yöntemi aracılığı ile de ulaşılabilir. Problem klasik optimizasyon yöntemleri aracılığı ile ifade edildiğinde oluşturulacak Hamilton fonksiyonun çözümü için, eşdeğer durum değişkeni ile ilgili diferansiyel denklemin analitik olarak çözülmesi gerekmektedir.

Gerçek uygulamada karşılaşılan bir problem özellikle HEA için yol topoğrafyasının şarj kontrolü üzerinde yarattığı bozucu etkidir. Özellikle, negatif eğimli yollardaki reküperatif şarj imkânından, bataryanın erken dolmasından dolayı kısıtlı olarak faydalanılabilir. Benzer bir durumda ise, pozitif eğimli bir yolda, bataryanın erken boşalmış olması, yol yükünün fazla olacağı kısımlarda İYM yükünün daha da artacağı, dolayısı ile tüketimin yüksek olacağı anlamına gelir. Bu problem, yol topoğrafyasının önceden bilinmesi sayesinde, öngörülü şarj ve deşarj stratejileri ile giderilebilir. Bu çerçevede, bu tez kapsamında HEA için iki farklı tipte şarj dengeleme kontrolcüsü geliştirilmiştir.

İlk yöntem, klasik EYTM formülasyonuna yapılan bir eklenti sayesinde, pozitif ya da negatif eğimden meydana gelen yol enerjisinin, eşdeğer yakıt karşılığını formülasyonda kullanılmasına dayanır. Böylece, yeni EYTM formülasyonu ile eğim öncesi duruma göre, ön şarj ya da ön deşarj yapılması sağlanır. İkinci yöntem, ilk formülasyonda bulunan parametrelerden bazılarının Model Öngörülü Kontrol – Model Predictive Control (MPC) formülasyonunda tekrar kullanılmasıyla elde edilmiştir. Buna göre, EYTM bedel fonksiyonu, kontrol girişine yani hibrid güç aktarma oranına bağlı olarak lineerleştirilir. Daha sonra birinci dereceden bir sistem dinamiği fonksiyonu toplam batarya enerjisi ve bataryadan öngörülü olarak çekilecek batarya gücü cinsinden oluşturulur. Problem, yüksek mertebeden bir parametre optimizasyonu problemi haline getirilerek anlık olarak çözülür.

Geliştirilen tüm kontrolcüler ve enerji yönetim sistemleri aslında iki farklı modelleme metodolojisine dayandırılarak test edilmiştir. İlki bir kontrol modeli niteliğindeki sanki statik araç ve güç aktarma organları modellemesi olup, ters modelleme metodolojisine sahiptir. Yani sürüş hızlarının gerçekleştiği kabulü ile buna karşılık gelecek yol yüklerinin hesaplanmasına dayanır. İkinci modelleme metodolojisi ise, sürüş çevriminin bir giriş değeri olup, sürücü modelinin aracın bu hızı takip etmesi için gereken kontrol sinyallerini ürettiği bir yapıdır. İkinci durum, gerçek araç yapısını daha iyi ifade ettiğinden ve tüm araç-aktarma organı dinamiklerini göz önüne aldığından, daha yüksek güvenilirlikte bir model yapısındadır.

Bu tez kapsamında, birinci tip modeller için MATLAB/Simulink ve MATLAB Komut Dosyası kullanılmış olup, ikinci tip model yapısı için AVL CRUISE ve IPG CarMaker paket programlarından faydalanılmıştır. Tezin modelleme ile ilgili kısmında her iki modele ait davranışlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tezin son bölümünde ise, araç ve sürücü destek sistemlerine örnek iki kontrolcü Model Öngörülü Kontrol yönteminde faydalanılarak geliştirilmiştir. Bunlardan ilki boylamsal bir hız ve konum kontrolcüsü olan Adaptif Seyir Sistemi ile yeni geliştirilmiş olan Trafik Işığı Asistanı sistemi tanıtılmıştır. Her iki boylamsal kontrol algoritması öncelikle basit model üzerinde test edildikten sonra kompleks nonlineer araç modellerine uygulanmıştır. Öte yandan Trafik Işığı Asistanı Sistemi aynı zamanda gerçek zamanlı bir platform çerçevesinde sürücü içeren simülasyon ortamında bir araç simülatörüne entegre edilmiştir. Bu entegrasyon aynı zamanda fonksiyonun sürücü ile iletişiminin sağlandığı sürücü arayüzüne ilişkin sinyallerin sağlanması ve ekrana aktarılmasını da içermektedir.

ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLES

SUMMARY

Stringent legislations regulate exhaust and particle emissions emitted as a result of fuel combustion in Motor Vehicles that use Internal Combustion Engines (ICEs). This encourages the manufacturers to investigate alternative propelling technologies, which paves the way of developing environmentally friendly vehicles. Vehicle Performance Emission standards recently sets also Greenhouse gas emissions particularly CO₂ which implies indirect limitations on fuel economy behaviour of vehicles. Hence, Hybrid Electric Vehicles (HEVs) increase their popularity to unlock these limitations by introducing electricity based driving.

Development of an Energy Management System that improves the total powertrain system efficiency as well as a harmonic and effective operation of various components under their optimal conditions is a very critical but equivalently challenging part of the overall vehicle and powertrain design. On the other hand, HEV Energy Management System development, as will be depicted along this thesis, is an optimisation problem aiming to improve regularly compromising efficiency behaviours of various powertrain components. This study targets to solve this problem, not only by utilizing the most appropriate modelling and simulation techniques but also by formulating it as an optimization problem and then solving it by numerical and optimal control techniques.

Plug-in Hybrid Electric Vehicles (P-HEV), become more popular with the recent development in battery technologies. On the other hand, they are considered as an interim technology towards a Zero Emission Vehicle Technology, Fully Electric Vehicles. In principle, these vehicles have an additional charging interface that allow to be charged through electrical means. This charging process is independent from any on-board energy conversion, therefore is kept usually out of the energy management problem. Consequently, depending on the power requirements and range characteristics, they have relatively larger battery capacity. This of course implies, less fuel consumption and exhaust emission over the same range. This thesis primarily defines the development of Energy Management System of HEV and P-HEV as an optimization problem, and investigates various methods in theoretical and practical basis.

Firstly, the optimization problem of Energy Management for HEV and P-HEV are depicted as two distinct problems. For a HEV, along a driving mission (e.g. Drive Cycle), the initial charge and final charge equivalence of the battery poses a constraint for the optimization problem definition. Additionally, limited capacity of the battery allows only limited usage of the state of the charge. This implies that the state if the charge is forced to remain inside a limited charge band. Finally, physical behaviours of the hybrid components such as speed and torque define further system constraints for the optimization problem. For P-HEV, the situation is slightly different: due to the

charging behaviour of the system over an external source, the charge balance is not mandatory.

Having the knowledge of theoretical optimal behaviour of the system is substantially important since it defines a “Benchmark Solution” which is used to compare other available local optimal solutions. However, theoretical solutions providing the global optimal behaviour are not feasible for real applications mainly due to their computational burden.

In this thesis, such a global optimal behaviour is obtained using Dynamic Programming (DP) for both HEV and P-HEV. DP formulates the energy optimization problem in discrete form for system states and time. Then by considering aforementioned system constraints, it produces the solution iteratively from the final time towards the start of the problem. The quasi-static vehicle and powertrain model developed for HEV and P-HEV is solved via this DP algorithm.

There is a clear influence of gear shifting schedule on fuel consumption. In order to analyse this correlation, a second DP solution is obtained, where the shifting rules are modelled as control inputs. Although this approach significantly improves the fuel consumption behaviour, there is no obvious optimal shifting characteristics, which can be captured for offline usage out of this global behaviour.

Computational and storage capacity requirements and the dependency of a-priori knowledge of the overall load of the overall cycle prevents the usage of DP solution to in real world conditions. Therefore, a casual alternative solution, namely Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS), has been applied to the aforementioned Hybrid Vehicle topology.

Both physical analogy and optimal control theory is capable to describe the ECMS. Due its instantaneous optimization characteristics, the computational load is relatively low with respect to DP solution. In principle, ECMS relies on calculation of an “equivalent fuel consumption value” based on the battery energy. This virtual consumption constitutes with the real consumed fuel, a “total equivalent fuel consumption”. In fact, this value establishes a cost function, which needs to be minimized instantaneously. The equivalence factor balances the fuel equivalence of the battery energy with respect to fuel chemical energy. Obtaining the value of such factor is possible through a calibration process. This equivalence factor actually is different for the two main hybrid modes.

Same solution is obtained by optimal control techniques as well. When the energy minimization problem is formulated via classical optimal control methods, the result of a differential equation formed by the co-state of the Hamiltonian function needs to be solved, according to Pontryagin Minimum Principle. On the other hand, a small assumption enables the solution of this differential equation. If we assume a constant behaviour of the battery charge vs. battery terminal voltage, then the Hamiltonian function becomes to an equivalent function previously formulated by ECMS. This assumption is reasonable especially for the limited charge behaviour of HEVs where the SOC dependency of the terminal voltage is inferior.

Local optimal solution of ECMS and global optimal solution of DP have very similar behaviours. The main drawback of ECMS is a good equivalence factor calibration for a complete charge sustaining over a drive cycle. Therefore, an additional factor for a

closed-loop control of battery state-of-charge is necessary. On the other hand, this additional term disturbs the original optimal behaviour of ECMS.

The instantaneous local optimization ability of the ECMS makes it a candidate for real-time application. However, there is an additional problem disturbance effect of road topology for the charge sustaining of HEVs. Especially, on negative-slopes, if the battery charge is relatively high, only part of free breaking energy can be recovered. Similarly, on the positive slopes due to early depletion of battery charge, the higher load of the road is only covered by engine, which results higher fuel consumption. This problem can be solved by anticipation of road topology and then applying pre-charge or pre-discharge strategies. In this sense, two different charge control strategies are developed for HEVs.

First method is based on the addition of a new term that correspond to the “equivalent fuel consumption energy” of the upcoming road section with positive or negative slope in classical ECMS formulation. Hence, thanks to this predictive behaviour, an accurate pre-charge and pre-discharge is done for the upcoming road section to exploit the free recuperation energy. This additional term is actually, fuel equivalent of the electrical energy consumed or recovered of the upcoming road. This value is a function of the upcoming slope value, the expected speed over the hill, the electrical energy required by the non-predictive strategy until the slope. The last one differs depending on the actual hybrid mode. Therefore, problem is analysed for two different hybrid modes, power split and parallel charging.

Second method uses some of the prediction values of the first method and implement in Model Predictive Control (MPC) formulation. For that, ECMS cost function is linearized for the control inputs-power split values. Then a first order dynamics represent the relation between battery power and battery energy. All system and control constraints are considered in the MPC formulation. Here, with an assumption of taking all control values for each step-time along the control horizon as unknown constant parameters, the complete problem are solved like a parameter optimization problem. Due to the linear nature of obtained equations, this problem can be solved instantaneously via Linear Programming.

All developed controllers and energy management strategies are actually tested based on two different simulation-modelling methodologies. First one is the quasi-static model of vehicle and powertrain and is based on backwards modelling methodologies. It relies on an assumption of perfect speed tracking and on calculation of road load, corresponding to this speed tracking behaviour. Second modelling methodology considers the drive cycle as a desired input speed to the driver model. Then the driver model acts as a speed tracking control that generates corresponding control inputs for the powertrain components through acceleration and brake pedals. Second modelling methodology considers all type of vehicle and powertrain dynamics and transient behaviour as well as the detailed lateral dynamics of the vehicle.

In the course of this thesis, for the first modelling methodology, MATLAB/Simulink and MATLAB Script environments are used. For the second modelling platform, AVL CRUISE and IPG CarMaker tools and models are co-simulated.

At the very last part of the thesis, two Driver Assistant System, Adaptive Cruise Control (ACC) and Traffic Light Assistant System are developed using Model Predictive Control approach. ACC works as a speed and position regulator to maintain a safe distance between the vehicles ahead. TLA is a similar semi-autonomous speed

controller developed regulates the vehicle speed based on the information obtained from Traffic Lights to assess an on-board green-wave. Traffic Light Assailant System is additionally implemented on a real-time platform for a driver in the loop System. This integration furthermore includes the interaction of the controller functionality with the programmable Human Machine Interface to inform and interact with the driver.

1. GİRİŞ

Kara taşıtlarında kullanılan İçten Yanmalı Motorların (İYM) yaydıkları emisyonlar çeşitli regülasyonlar ile sınırlanmakta ve bu yasal düzenlemeler gittikçe sıkılaştırılmaktadır. Bu durum, üreticileri, çevre ile uyumlu araç üretim sürecinde, alternatif teknolojilerin arayışına itmektedir. Öte yandan, CO₂ emisyon yayılımı da üreticilerin zamanla uymaları gereken bir sınırlama haline gelmektedir. Dolayısı ile üretilmekte olan araçların yakıt ekonomilerinde de sınırlamalara gidilmektedir.

Bu koşullar altında, bir yandan güvenlikten ödün vermeksizin daha hafif taşıtların üretilmesi amacı ile malzeme konusunda kaydedilen gelişmeler, diğer yandan araçların tahrik sistemleri üzerinde yapılan iyileştirmeler ve alternatif çözüm arayışları araştırmaların yoğunlaştığı noktalardır. Çalışmaların bir kısmı mevcut benzin ve dizel motorlar üzerinde iyileştirmeler yapılmasına yönelirken, emisyon, yakıt tüketimi ve performans açısından dizel ve benzin motorlar ile rekabet edebilecek yeni motor teknolojileri üzerinde çalışmalar sürmektedir. Ayrıca bio-dizel, bio-etanol, LPG, CNG, gibi alternatif yakıtlar ve çeşitli katkı maddeleri üzerine yakıt teknolojileri alanında yapılan araştırmalar ile alternatif yakıtların getireceği avantajlar ortaya koyulmaktadır. Yanma sonrasında egzoz sistemi üzerinde kullanılan aktif ve pasif filtre ve tutucu elemanlar da araçların emisyon oranını azaltmaya yönelik diğer çalışmalar arasındadır.

Bu çalışmaların paralelinde, ticari ürün haline dahi getirilmiş ve üzerine çalışmaların halen sürdürüldüğü bir diğer alternatif araç teknolojisi de hibrid araçlardır. HEA'lar, tanım olarak, güç aktarma organlarında tahrik amacı ile birden fazla tipte enerji tüketen alt-sistemlerin kullanıldığı araçları ifade eder. Yaygınlaşması kısa ve orta vadede daha muhtemel görünen Hibrid Elektrikli Araçların (HEA) yanı sıra, yakıt pilli ya da pnömatik motorların kullanıldığı araçlarda hibrid olarak tanımlanmaktadır. Bu tez çalışmasında, temel alınacak araç tipi hibrid elektrikli araçlardır.

HEA'larda, tahrik sistemini, İYM'nin yanı sıra, tahrik amacı ya da enerji üretimi amacı ile kullanılan Elektrik Motorları (EM) oluşturur. Öncelikle, tahrikin bu şekilde en az

iki farklı çekiş sistemi arasında uygun bir kontrol sistemi aracılığı ile paylaştırılmasının normal bir araca göre getirdiği bazı avantajlar bulunmaktadır. Bu avantajlar, bir yandan yakıt tüketimi veya emisyon anlamında olurken diğer yandan araç stabilitesi ya da çekiş üstünlükleri olarak ortaya çıkabilir. Bununla beraber, İYM'nin tamamen ya da kısmen yol yüklerinden bağımsız hale gelmesinden dolayı, normal bir sürüş sırasındaki çalışmasından daha verimli noktalarda çalışabilir. Ayrıca aracın frenleme sırasında mekanik frenleme yerine EM'ler aracılığı ile frenleme yapması, yani geri kazanılabilir frenleme özelliği, bu araçlar için verim avantajı getiren diğer bir husustur. Bu verim avantajı, amaca yönelik olarak, emisyon ve/veya yakıt ekonomisi anlamında olabilir.

Genellikle araçta kullanılan EM'ler ve İYM ötesinde, hibrid elektrikli bir araca özgü bir diğer komponent de bataryalardır. Kimyasal özellikleri bakımından farklı tipleri bulunan bataryalar, gerek geri kazanımlı frenleme sırasında tahrik motorlarının jeneratör olarak kullanılması ile, gerekse içten yanmalı motora akuple olmuş EM'nin jeneratör modunda çalıştırılması sureti ile şarj edilmektedir. Bataryaların şarj seviyelerinin kontrol edilerek, aşırı şarj veya deşarjının engellenmesi, kontrol sisteminin denetimi altındadır.

Araçlarda enerji depolamanın tek yöntemi, pil kullanmak değildir. Zaman zaman, pil ile birlikte, bir mekanik enerji depolama yöntemi olan, flywheel (volan) de kullanılabilir. Bununla birlikte, enerji depolama anlamında olmasa da ani güç isteklerine cevap verecek, ultra-kapasitör ve süper-kapasitörler de mevcut depolama üniteleri arasında sınıflandırılmaktadır. Bu ünitelerin, enerji yoğunluğundan çok güç yoğunluğu yüksektir ve bataryalar ile benzer prensip ile şarj edilebilmektedirler. Ayrıca, hibrid güç aktarma organlarındaki değişik tahrik unsurlarının ürettikleri enerjiyi kontrol edilebilen sürekli çevrim oranları ile tekerleklere aktarmak için sürekli değiştirilebilen transmisyon (CVT) kullanıldığı durumlar da söz konusudur. Benzer şekilde, otomatik transmisyon kullanılması, İYM ve EM'lerin farklı yapıda olan tork-hız karakteristiklerini, sürücünün vites seçiminden bağımsız olarak optimum şekilde birleştirilmesine olanak sağlar.

Bilindiği üzere, yakıt tüketimi ve emisyonlar çoğu zaman birbirleri ile çelişen özellikler göstermektedir. HEA'ların yukarıda da bahsi geçen özellikleri sayesinde ortaya koydukları potansiyel avantajı, yakıt tüketimi ya da emisyon azaltımına

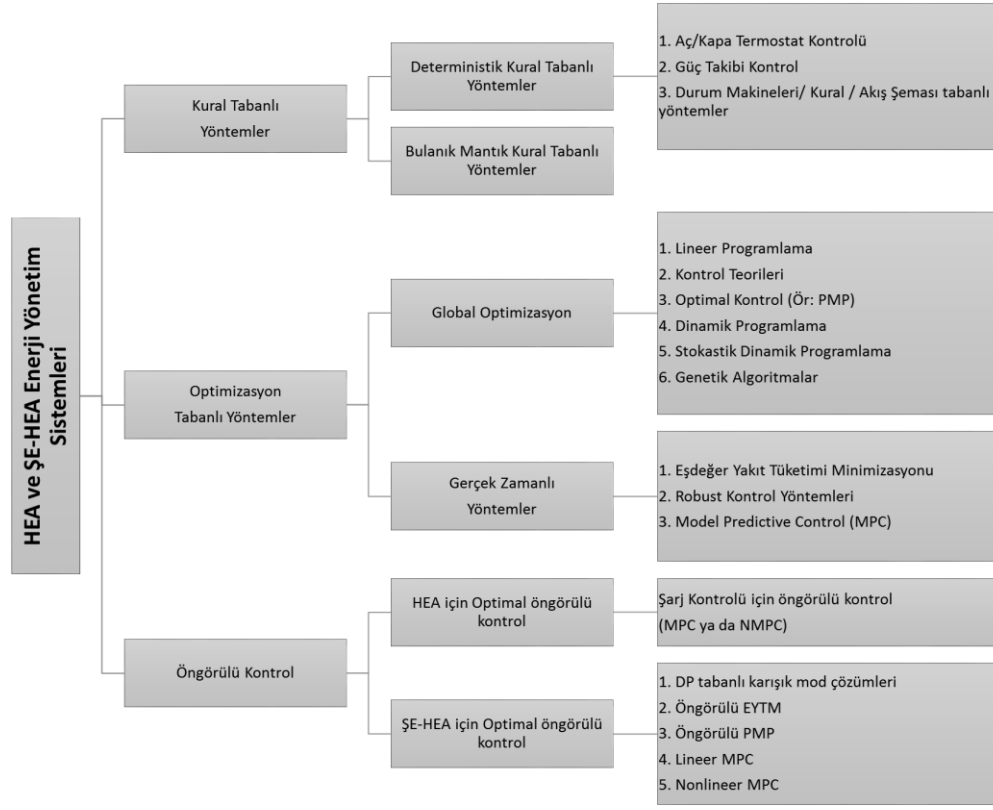
dönüştürecek unsur kontrol sistemidir. Mevcut HEA'lardaki kontrol sistemi sürücünün pedal hareketleri ve vites seçimlerini dikkate alarak, enerji dağılımını optimal bir şekilde tahrik unsurları arasında paylaştırmaktadır.

1.1 Literatür Araştırması

Bu tez çalışmasının kapsamını oluşturan Şarj Edilebilir Hibrid Elektrikli Araçlar (ŞE-HEA) ve HEA'lar için, özellikle tezin 4. Bölümü'nde de irdelenecek optimizasyon probleminin çözümü adına teorik ve pratik anlamda çeşitli çalışmalar literatürde çeşitli kriterlere göre gruplandırılmıştır [1-3]. En genel tanımı ile hibrid bir araç birden fazla enerji depolayabilen ve bu enerjiyi çekiş gücüne dönüştürebilen nitelikteki güç aktarma organlarına sahip bir araç yapısını tanımlamaktadır. Bu çerçevede birden fazla çeşit enerji deposuna sahip, pnömatik, hidrolik ya da mekanik enerjiyi depolayabilen araçlardan söz edilebilir [4]. Öte yandan bu araçların farklı enerji depoları arasında iki yönlü enerji akışından söz edilebilir. Bir başka deyişle, enerji uygun şartlarda daha sonra mekanik enerjiye dönüştürülebilmek adına depolanabilmektedir. Enerji tipleri arasındaki bu akışın belirli şekilde kontrol edilebilmesi de, bu tezin içeriğini meydana getiren optimizasyon problemini ortaya koyar. Özelde elektrik enerji depolama özelliğine sahip HEA'lar için enerji yönetimi yukarıda belirtildiği üzere çok çeşitli metotlar ve mühendislik uygulamaları ile gerçekleştirilmekle beraber bu çalışmaları genel olarak üç farklı çatı altında toplamak yanlış olmaz [3].

Şekil 1.1'de görüldüğü üzere bu tip bir kategorilendirme genel olarak araç içi yüksek seviyedeki enerji yönetim sistemlerini üç ana gruba indirgemıştır. Kural tabanlı algoritmalar, optimizasyon yöntemleri ve öngörülü kontrol şeklindeki bu üç ana grup, araç içindeki EM, İYM ya da batarya şarj seviyesi gibi durum değerlerini göz önünde bulundurarak en uygun kontrol girişlerini komponentlere uygulamakla sorumludur. Öte yandan bu kontrol girişlerinin ne şekilde gerçekleştirileceği daha alt seviyede kontrol ve denetleyiciler çerçevesinde sağlanmaktadır. Bir başka deyişle, Hibrid Enerji Yönetim Sistemleri, tüm aracın toplam enerji tüketim optimizasyonunu sağlamak ve komponentlere ait yüksek seviye kontrol girişlerini optimize etmekle yükümlüdür. Öte yandan, bu kontrol girişlerinin sağlanmasından sorumlu alt seviye kontrolcülerden söz edilebilir. Pratikte ve teoride bu alt seviye tip kontrolcülerin toplam enerji tüketimi

performansına dolaylı etkisi olmakla beraber, ilgili komponentin işleyişini ve performansını artırmak birincil kontrolcü hedefidir [4].



Şekil 1.1 : HEA ve ŞE-HEA için enerji yönetim sistemlerinin gruplandırması [2-3].

Üst seviye kontrol sistemleri için daha önce de belirtildiği üzere temel amaç, sürücü güç ihtiyacını karşılarken hibrid araç topolojisine bağlı olarak en uygun enerji akış kontrolünün sağlanması ve bu sırada minimum yakıt tüketimi ve göz önünde bulunduruluyor ise optimum gaz ve partikül emisyonu sağlayacak sürüş ve kontrol stratejisinin uygulanmasıdır. Bunu sağlayacak kontrol yöntemlerinin klasifiye edilmesinde kullanılan yöntemlerin çeşitliliğinin yanı sıra, uygulanan algoritmanın yapısal karmaşıklığı, işlemsel eforu, sağladığı optimalliğin ölçüsü (global ya da lokal) ya da söz konusu optimalliğin sistem parametrelerine olan hassasiyetinden söz edilebilir. Lokal bir optimallik, (Ör: minimum yakıt tüketimi) belirli çerçevedeki çalışma koşulları için (Ör: bir sürüş çevriminin belirli bir kısmında ya da en genel şekilde anlık olarak) optimal (Ör: minimum yakıt tüketimi) davranış sergilerken, global bir çözüm tüm zaman aralığında çözümün tüm şartlar altında minimum (ya da maksimum) davranışını tanımlar (Ör: tüm sürüş çevrimi için teorik minimum yakıt tüketimi). Öte yandan araç tipine ve topolojisine bağlı bazı operasyonel çalışma

kısıtlarından da söz edilmesi gerekir. Buna göre, HEA için Enerji Yönetim Sistemleri herhangi bir manevra başlangıcında ve sonunda belirli bir şarj dengesini sağlamak zorundadır. Böylelikle batarya üzerinde sürüş başında ve sonundaki şarj değeri aynı olduğundan, tüm sürüş enerjisi ne batarya içerisinde fazladan depo için harcanmış ne de bataryadaki enerji, sürüş sonunda fazladan kullanılmış olur. Böylelikle optimallik daha objektif şekilde değerlendirilecektir. Öte yandan, ŞE-HEA için durum farklıdır. Zira şarj enerjisi sürüş başında yakıt enerjisi aracılığı ile kullanılmadığından, sürüş başındaki ve sonundaki enerji miktarlarında denge aranmaz [5].

Ayrıca optimallik konusunda, gerek işlemsel yük ve işlemsel hafıza gerekse, matematiksel olarak yol ve sürüş şartlarının önceden bilinmesi gerekliliği gibi sonuçların pratikte uygulanabilirliğine etki eden unsurlar da göz önüne alınmalıdır.

1.1.1 Kural tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri

Yüksek seviyeli enerji yöntemi stratejileri için pratik yöntemlerden bir tanesi komponentlerin çalışma koşullarının limitlerini dikkate alarak oluşturulacak statik bir karakteristiğe sahip hristik kontrol kuralları tanımlamaktır [6]. Genelde mühendislik bilgisi ve tecrübeye dayalı olarak çalışma noktalarının ve kontrol limitlerinin çeşitli kalibrasyon süreçleri ile elde edildiği kontrol yöntemleridir [7-12]. Bu yöntemlerden bazıları ise hâlihazırda mevcut bazı optimizasyon yöntemlerine de dayanabilir. Örneğin, [10] optimal davranışın Dinamik Programlama yöntemi ile elde edilmesi ve buradan optimal davranışı ifade edecek kuralların ortaya çıkarılıp uygulanması ile ilgili bir çalışma olup seri/paralel bir araçta sonuçlar değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, [13]'de vitesle bağlı değişen kurallar ya da kalibrasyon haritaları hibrid optimal kontrol yöntemine ve Pontryagin Minimum prensibine dayanarak elde edilmiştir. Dolayısı ile kural tabanlı çözümlerler statik kurallara ve anlık kontrol girişlerine göre verilen gruplandırılmış karar mekanizmalarına dayanmaktadır. Bu kurallar bütünü gerek haritalar, gerek akış şemaları ya da durum makineleri¹ ile temsil edilmekte olup, bu ayrık durumlar bütünün tasarımları, yer yer analitik ya da nümerik optimizasyon yöntemleri yardımı ile gerçekleştirilebilmektedir [12].

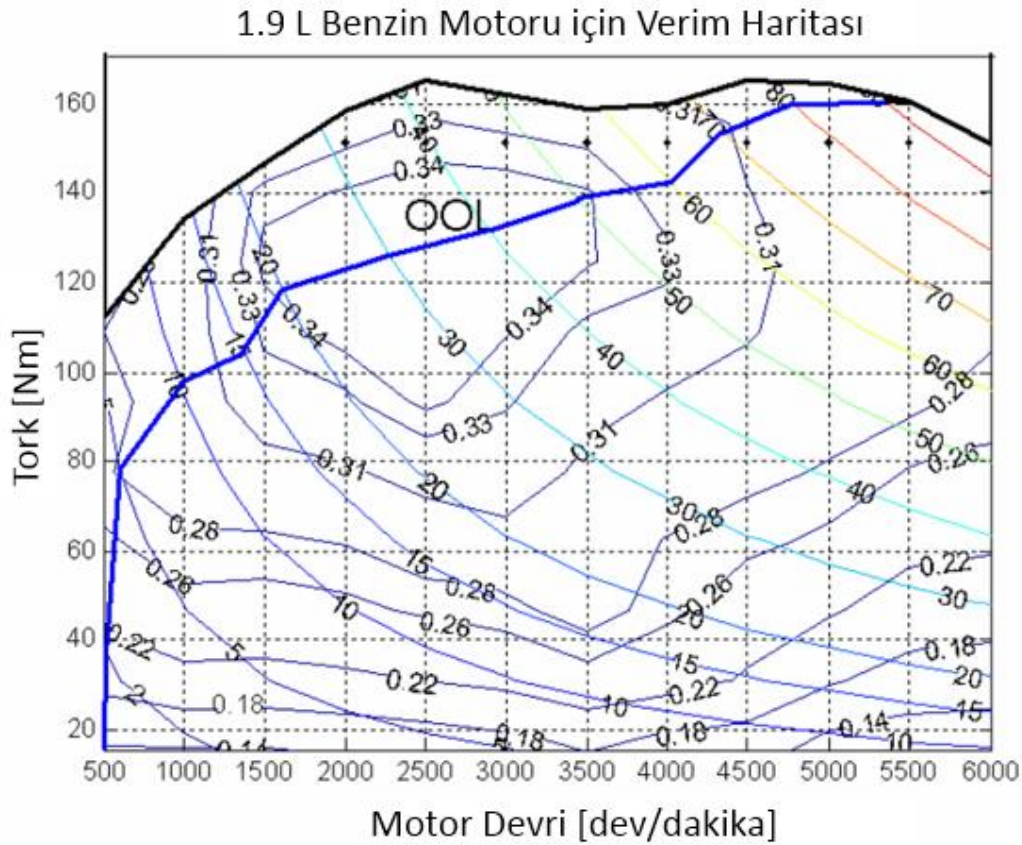
Öte yandan, özellikle İYM'nin tekerlek ve yol yüklerinden bağımsız olduğu seri hibrid araçlarda, tork ve motor devrine bağlı olan yakıt tüketimi, en optimal noktalarda

¹ İng. Çev. : State Machine

çalıştırılmaya zorlanabilir. Bu anlamda, her hız için en düşük yakıt tüketiminin elde edildiği bir Optimum Çalışma Çizgisi (OÇÇ)²'den söz edilebilir (bkz. Şekil 1.2) [14-16].

Örneğin [15]' de ise planet dişli sistemine sahip bir paralel hibrid topolojisinde, motor girişine ait güç aktarım oranı optimizasyonunda, optimizasyon alanını daraltmak adına, İYM çalışma alanları OÇÇ ile sınırlandırılmıştır.

[16]'da seri bir hibrid topolojide motor çalışması benzer şekilde OÇÇ ile sınırlandırılarak, yakıt tüketimi sadece jeneratör gücü cinsinden ifade edilmiş olup optimizasyonun ileriki kısımları için bir kısıtlamaya gidilmiştir.



Şekil 1.2 : Optimum çalışma çizgisi ve motor verim haritası [14].

Seri hibrid bir araç için motorun çalışma noktası aynı zamanda, sabit en iyi İYM çalışma noktasında da tutulabilir. Belirli kurallar çerçevesinde ki genelde batarya şarjı

² İng. Çev. : Optimum Operating Line (OOL).

belirleyici faktördür, İYM'nin açılıp kapatılarak batarya şarjının belirli aralıklarda salınması sağlanabilir [17], [18].

Öte yandan seri hibrid bir araçta enerji yönetimi için güç talebi izleme algoritmaları da literatürde mevcuttur [17], [19], [20]. Örneğin [17] ve [20] de seri hibrid bir otobüs için farklı batarya şarj ve güç talep değerlerine bağlı ayrıık çalışma alanları tanımlanmış ve şarjın yüksek olduğu değerlerde İYM kapatılırken, daha düşük şarjlarda motor belirli bir formülasyon çerçevesinde şarj dengesi sağlayacak bir güç profili izlemiştir. Çok yüksek güç ihtiyacı veya çok düşük şarj seviyelerinde İYM en yüksek optimal güç değerinde çalıştırılmıştır. Güç değerleri benzer şekilde OÇÇ üzerinde kalacak şekilde kısıtlandırılmıştır. Öte yandan İYM'nin sık açılıp kapanmasını önlemek adına açma kapama komutunun zaman cinsinden bir histerezise göre davranması sağlanmıştır. Benzer, güç takibi tabanlı algoritmalar paralel ve daha karmaşık hibrid topolojileri için de önerilmiştir [21]. Belirli araç hızları ve tork istekleri arasında araç sadece elektrikli modda sürüş sağlarken, ara çalışma koşullarında ise şarj durumuna bağlı olarak, ya şarjı artırıcı İYM ile paralel şarj, ya da şarj seviyesi düşürücü güç paylaşımı modları kullanılmaktadır. Ancak bu modlar ve geçiş kuralları daha önce de belirtildiği üzere optimalliği garanti etmemektedir. Öte yandan [17] ve [21]'de görüldüğü üzere güç takibi algoritmalarına yarı optimallik içerecek şekilde bazı değişiklikler uygulanmıştır. Örneğin [17]'de karar mekanizmasının bazı değerleri ve zaman histerezis değerleri Simpleks algoritması ile optimize edilmiştir.

Hibrid güç aktarma organları sisteminin çok-boyutlu³ olması, lineer olmayan ve zamanla değişen bir karakterde olması, kural tabanlı algoritmalar için bulanık mantık tabanlı çözümlemelerin iyi bir alternatif oluşturabileceği gerçeğini ortaya koyar [19]. Bilindiği üzere bulanık mantık, matematiksel gerçeklemeyi daha soyut ve dilsel ifadeler kullanarak oluşturur. Dolayısı ile ayrıık modlara sahip hibrid bir enerji yönetim sisteminin kodlanması için doğal olarak uygundur. Öte yandan kolay kodlanabilmesi ve belirli oranda robust olma özelliğinden de bahsedilebilir [2]. Örneğin, [22] güç aktarım özellikli ve planet dişli sistemi kullanan hibrid bir araç için batarya şarjı, araç hızı ve araç ivmesine bağlı bulanık mantık kuralları ortaya koyulmuş ve güç aktarım oranı bu kurallar çerçevesinde hesaplanmıştır. [23] ve [24]'de bulanık mantık kuralları, batarya şarjı ve tork girişi için araç yakıt tüketimi minimizasyonu ve emisyon düşürme

³ İng. Çev: Multi-domain

adına kullanılmakta olup İYM torku için OÇÇ kullanılmakta ve tork girişinden arta kalan pozitif ya da negatif tork EM tarafından karşılanarak şarj ya da deşarj gerçekleştirilmektedir. [25]’de batarya şarjı 5 farklı bölgede 5 farklı üyelik fonksiyonu aracılığı ile tanımlanarak bulanık mantık kontrolcüsü içinde kullanılmış ve kontrolcü yapısı daha sonra genetik algoritma aracılığı ile kalibre edilmiştir. Bir başka çalışmada ise şarj edilebilir HEA için aşırı şarjı önlemek adına batarya şarjı ve batarya terminal voltajına bağlı batarya durum değişkeni, batarya ömrünü de dikkate alan ve seri hibrid topolojisindeki motor güç oranı değerini hesaplayan bir yapıda ele alınmıştır [26]. [27]’de ise benzer bulanık mantık yapısı gene bir paralel hibrid araç için karesel programlama yardımı ile belirlenmiş bir bedel fonksiyonu minimize edilerek, optimal İYM torku hesaplanmaktadır.

1.1.2 Optimizasyon tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri

Optimizasyon ve optimal kontrol teknikleri, HEA için enerji yönetim ve kontrolcü geliştirme adına sıklıkla kullanılan yöntemler arasındadır. Genel tanımı ile hibrid komponentlerin (İYM, EM ya da Batarya) için optimal referans hız veya tork girişlerinin tüm sürüş çevrimi ve yol özellikleri göz önünde bulundurularak hesaplanmasına dayanan yöntemlerdir. Optimizasyon problemi tanımı tüm sistem ve kontrol girişi kısıtları göz önünde bulundurularak, yakıt tüketimi ve/veya emisyon minimizasyonunu hedefleyen bir bedel fonksiyonu oluşturulmak suretiyle formülize edilir. Bu optimizasyon problemi tüm koşulları ile bilinen bir sürüş çevrimi için global bir optimalliği verecek şekilde çözülebilir [28]. Özelde bu tip optimizasyon yöntemlerinin, yani sistemin potansiyel olarak erişebileceği teorik verim sınırlarını elde edebilen yöntemlerin uygulamada bazı sıkıntıları vardır. Örneğin kullanılan nümerik yöntemlerin işlem yoğunluğu ve hafıza gereksinimleri ile optimal kontrol yöntemlerindeki klasik tüm sistem çıkış yörüngesinin önceden bilinmesi gerekliliği bu tip yöntemlerin sadece referans çözüm üretmekte ve “Benchmark çözüm” olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu teorik çözümlerin tüm sürüşü kapsayacak optimal sonuçlar üretmesi mümkün değildir [29], [30].

[31]’de optimal kontrol teorisine dayanan global analitik bir çözüm paralel hibrid araç için elde edilmiştir. [32]’de optimal kontrol yöntemi ile elde edilen benzer çözümler farklı kontrol yöntemleri ile karşılıklı olarak sunulmuştur. [33]’de ise optimal kontrol yöntemi gerçek zamanlı uygulama için genişletilmiştir.

Problemin doğası ve türü itibari ile Lineer Programlama (LP), dinamik bir optimizasyon probleminin çözümü açısından uygun bir yöntem değildir. Ancak, [34] içerisinde güç aktarma organları dinamiği lineerleştirerek problem konveks bir hale getirilerek LP yöntemi ile çözülmektedir. Öte yandan [35]'de, LP ile En Kısa Yol Stokastik Dinamik Programlama⁴ (EKY SDP) ile formüle edilmiş optimizasyon problemi çözülmüştür. [36] ve [37]'de ise LP yöntemi ile ileride bahsedilecek Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu yöntemi çerçevesinde HEA ve ŞE-HEA'ya uygun öngörülü şarj referans sinyali elde edilmiştir.

Bu tip global optimal yöntemlerinin en popülerleri, bu tez çalışması çerçevesinde de kullanılmış olan Dinamik Programlama (DP) yöntemidir. Özellikle lineer olmayan zamanla değişen sistemlerin optimal kontrolü için kullanılan nümerik bir yöntem olan Dinamik Programlama, Bellman Optimallik Prensibine dayanmakta ve yörüngesi bilinen sistem için global optimal çözümü garanti etmektedir [38].

DP yöntemi işte yukarıda belirtilen bu amaç çerçevesinde çok farklı çalışmalarda ve bu tez kapsamında kullanılmış ve çok çeşitli hibrid topolojileri için çözümler elde edilmiştir [39–50]. Bölüm 3'de de daha detaylı formüle edilecek yöntem kısaca baştan bilinen sürüş şartları için herhangi bir hibrid araç topolojisinde araç çekiş komponentlerine uygun kontrol girişleri (EM ve İYM tork/hız, güç aktarma oranı ya da vites) sondan başa doğru geri yönde hesaplanarak elde edilir. Hesaplama sırasında her zaman adımı ve sistem durum değişkeni (Ör: Batarya Şarjı) ve kontrol girişi (Ör: Kontrol giriş değeri) için bedel fonksiyonu değeri hesaplanır ve optimallik prensibine dayanarak minimizasyon anlık olarak hesaplanır ve bir bedel matrisi elde edilir. Şarj dengesi ya da batarya şarj sınırları çeşitli ceza katsayıları aracılığı ile garanti edilir [28].

DP ile ilgili en önemli dezavantaj işlem yükünün fazla olması ve sürüş özelliklerinin hesaplama işlem başında bilinmesi gerekliliğidir. Bu nedenlerden dolayı gerçek zamanlı bir uygulama için uygun değildir. Öte yandan DP ile ilgili ayrıklaştırmadan dolayı bazı enterpolasyon ile ilgili nümerik yaklaşım hataları ve durum değişkenlerinin sınırlarında ceza fonksiyonlarının bedel fonksiyonu üzerindeki bozucu etkisinin tüm durum değişken alanına yayılma probleminden ötürü oluşan hatalar söz konusudur. Bu problemlerin önüne geçmek için ayrıklaştırma oranı artırılabilmeyle beraber bu durum

⁴ İng. Çev. : Shortest Path Stochastic Dynamic Programming

işlem yükünü daha da artıracaktır. Bu nedenle, [45]'de geliştirilen yöntem sayesinde hızlı genişleyen durum uzayı ile durum değişkenlerinin komşulukları, çok hızlı şekilde kontrol edilerek tanım dışı değerlere ulaşılması engellenmekte ve böylelikle ceza fonksiyonunun hızlı bir şekilde nümerik olarak tüm çalışma alanına yayılması engellenmektedir.

DP ile ilgili arama alanının daraltılması ile hızlı çözüm üreterek uygulamayı gerçek zamanlı kılacak çözümlere de gidilmiştir. Örneğin, [51]'de DP uygulaması araç elektrik tüketimi için özelleştirilerek, basitleştirilmiş dinamik ve enerji kısıtlarının dikkatlice göz önünde bulundurulması sayesinde optimizasyon süresi azaltılmıştır. [52], [53] içinde paralel HEA için Model Öngörülü Kontrol⁵ çerçevesinde formüle edilen problem, kısıtlandırılmış DP ile çözüme ulaştırılarak hesap yükü azaltılmıştır. Burada MPC ile formülasyon öncelikle zaman ayrıklı değil pozisyon üzerinden ayrıklaştırılmış ve tüm ufuk zamanı değil kısıtlı ufuk zamanı göz önünde bulundurulmuştur.

DP çözümleri özellikle ŞE-HEA için uzun mesafeli ve yolculuk için özelleştirilmiş öngörülü Enerji Yönetim Sistemlerin global optimal çözümlerinde de sıklıkla kullanılmıştır. Örneğin, klasik ŞE-HEA enerji yöntemi olan ve sadece elektrikli şarj tüketme ve şarj dengeleme şeklinde iki farklı ana sürüş modundan meydana gelen klasik ŞE-HEA için, gidilecek mesafe ve yol topografisine bağlı olarak karma bir sürüş modu önerilebilir. Böylelikle hem yol üzerindeki eğimden dolayı potansiyel şarj noktaları göz önüne alınacak, hem de şarj dengeleme sırasındaki verimsiz İYM çalışma noktaları yerine tüm sürüşe yayılmış İYM katkısı toplamda daha verimli olacaktır. İşte bu tip bir enerji yönetimi ve optimizasyonunda, daha önce olduğu gibi DP global bir çözüm ve gerçek zamanlı uygulanabilir algoritmalar için kalibrasyon referansı oluşturacak bir çözüm üretmektedir [54]. Bu tip uygulamalar ve daha farklı alternatif çözümler özelindeki literatür çalışması ileriki bölümde sunulacaktır.

Şu ana kadar sunulan çalışmalar deterministik DP çözümleri ile ilgili olmakla beraber Stokastik DP (SDP) çözümleri de literatürde yer almaktadır. Temel olarak SDP durum değişkenleri ya da karar değişkenlerinin probabilistik fonksiyonları ile bilindiği ve değerlendirildiği optimizasyon çözümleridir. [55]'de örneğin sürücü

⁵ İng. Çev. : Model Predictive Control (MPC)

güç giriş değerleri rastgele Markov prosesleri ile modellenmiş ve daha iyi bir optimallik için sonsuz ufuklu SDP çözümü önerilmiştir. [35] için de EKY SDP ve SDP karşılaştırmalı olarak formüle edilmiş ve sonuç zamanla değişmeyen durum değişkeni geri bildirim kontrolcüsüne benzetilmiştir. Sonuçta EKY SDP, SDP'ye göre ayarlanabilecek parametre sayısı ve şarj kontrolü açısından daha iyi sonuç vermektedir.

Genetik Algoritma (GA) çözümlemeleri h ristik bir arama tabanlı bir yöntem olup, doğal seçilim yapısını taklit eden yapay zek  yöntemlerinden biridir. Global sonucun bulunmasında etkin olduğu bilinen ve lineer olmayan, konveks olmayan matematik ve mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmakla beraber robust ve hızlı c z mler sunmaktadır [2]. GA yönteminin hibrid araç enerji yönetimi için kullanıldığı c z mlemelere de sıkça rastlanır [56-60]. [56]'da yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinden oluşan bir bedel fonksiyonu için GA kullanılmıştır.[57]'de çoklu hedefe sahip bir optimizasyon problemi GA ile seri hibrid bir araç özelinde c z lm şt r.

Öte yandan, klasik kontrol teorilerinden de yer yer enerji optimizasyonu adına faydalanılmıştır. Örneğin [61]'ile Lineer Matris Eşitsizliklerine dayanan yöntem ile çıkış geri beslemeli bir kontrolcü lineer bir durum-uzay modeli üzerinden oluşturulmuş ve sonuçlar EYTM yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntem sonuç olarak batarya şarj dengesi ile ilgili bir sonuç vermemektedir. [62] robust bir kontrol yapısı ile model dinamiğindeki ve parametrelerindeki belirsizliklere karşı sadece tork kontrolü adına HEA için c z m üretmekle beraber diğer tork reg lat rlerine göre daha iyi sonuç vermektedir, ancak çalışma bir enerji optimizasyonundan çok sinyal takibi adına bir c z m  nerisi getirmektedir.

Anlık optimizasyon ve gerçek zamanlı uygulama yöntemleri uygulamada sık karşılaşılan yöntemler arasındadır. Örneğin [63]'de anlık bir eşdeğer yakıt tüketimi ve gerçek yakıt tüketimi için yazılan bedel fonksiyonu her an için minimize edilmiştir. Öte yandan yakıt tüketimi ifadesi emisyon parametreleri ile genişletilerek emisyon değerleri için de belirli kısıtlamalara gidecek toplam bir bedel fonksiyonu ifadesi yazılmıştır.

Bu tezin de içeriğinde yer alan EYTM yöntemi aslında fiziksel gerçek yakıt tüketimi ile hibrid bir aracın elektriksel tüketiminin eşdeğer yakıt tüketimi karşılığını birleştirerek tüm toplam yakıt tüketimini tek bir ifade de birleştiren ve bu sayede anlık

minimizasyon ile gerçek zamanlı bir optimizasyon yapılmasını sağlayan bir metottur. Yöntemin avantajı anlık minimizasyon ile global optimal sonuca yakın sonuçlar elde edilebilmekte iken, kalibrasyon için gereken efor ve şarj dengeleme için belirli bir kalibrasyon sürecinin gerekliliğidir. Literatürde de EYTM ile elde edilmiş birçok sonuç yer almakla beraber çok çeşitli HEA ve ŞE-HEA topolojilerine ve araç tiplerine uygulanmıştır [64-67]. Öte yandan EYTM ile ilgili en önemli problem şarj dengesini sağlayacak eşdeğer yakıt katsayılarının elde edilmesi için iteratif kalibrasyon süreçlerine ihtiyaç vardır. Bu da global optimal sonuçların elde edilmesi gibi tüm sürüş özelliklerin kısacası sürüş profilinin önceden bilinmesi anlamına gelmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için EYTM için Adaptif bir özellik kazandırılmış ve farklı çalışmalarda eşdeğerlik katsayısının araç cinsine, hibrid topolojisine ve optimizasyon amacına yönelik olarak değiştirilmesi yoluna gidilmiştir [68-72]. Örneğin [68]'de 3 farklı SOC geri beslemeli adaptif EYTM yöntemleri ele alınmış ve karşılaştırmalı olarak yakıt tüketimi performansları ele alınmıştır. [69], [70]'de ise seri ŞE-HEA için adaptif sonuçlar elde ederek jeneratöre ve İYM'nin çalışma noktalarını tablolar halinde saklamıştır. [72]'de ise gerçek zamanlı bir EYTM eşdeğer katsayısı minimizasyon yöntemi, batarya şarj tahmini profili üzerinden gerçekleştirilmiş ve MPC benzeri bir yapıyla her an için en uygun eşdeğerlik katsayısı elde edilerek kullanılmıştır. Bir başka deyişle her örnekleme zamanında, farklı eşdeğerlik katsayıları için batarya şarj profilleri oluşturularak en uygun profil ve minimum yakıt tüketimi veren katsayı EYTM için kullanılmıştır.

1.1.3 Öngörülü kontrol ile HEA Enerji Yönetim Sistemleri

Model öngörülü kontrol yapısı da HEA ve ŞE-HEA için kullanılan metotlar arasında bir diğeridir. MPC yapısı model tabanlı, kısıtlı zamanlı bir optimal kontrol çözümü sunan bir formülasyona sahiptir. Kısaca, lineer ya da lineer olmayan öngörülü bir modele sahip yapı, öncelikle sistem davranışının belirli bir ufuk boyunca nasıl davranacağını öngörmekte, daha sonra amaca yönelik bedel fonksiyonu bu öngörü ile ufuk boyunca genişletilerek, ekstremitize edilmek suretiyle optimal sistem girişleri elde edilir [73]. Hibrid araç kontrolü için MPC formülasyonu enerji optimizasyonu için kullanılmakla beraber başka amaçlara yönelik olarak da kedinin yer edinmiştir.[74]–[85]. Örneğin, [74] tümü ya da çoğu elektrikli araçlar için, birden fazla enerji deposu olan sistemlerde (Ör: Batarya ve süperkapasitör), batarya akım miktarını azaltmak

adına, bir MPC tabanlı bir bölge kontrolü ile sürüş çevrimi dolayısıyla meydana gelen bozucu etkiler azaltılmıştır.

[75]'de ise paralel hibrid bir araç için detaylı aktarma organları modellemesine dayanan ve hibrid modlar arasında yumuşak ve hızlı bir geçişi sağlayacak boylamsal kontrol tasarımına gidilmiştir.

[76]'da ise yine MPC tabanlı kontrolcü, planet dişli sistemi ile çalışan paralel güç aktarımlı HEA için, lineer zamanla değişmeyen⁶ model üzerinde çalışan bir kontrol yapısı gösterilmiştir. Planet dişli sistemi için kullanılan nonlinear model, anlık olarak LTV-MPC içerisinde lineerleştirilmekte ve belirlenen motor hızı (araç hızı eşdeğeri) ve batarya şarj referans sinyalleri takibi ile minimum yakıt tüketimi sağlayacak bir bedel fonksiyonu MPC formülasyonu çerçevesinde minimize edilmektedir. Sonuçlar iyi bir hız takibi ve yüksek İYM verimi ortaya koymakla beraber herhangi bir referansa göre gelişme ortaya koyulmamıştır.

[77], [80]'de ise, HEA için bu tezin ve özellikle Bölüm 4'ün de konusu olan yokuş profilleri nedeni ile bir şarj dengeleme problemine yönelik sonuçlar, planet dişli, güç aktarımlı paralel hibrid araç topolojisi üzerinden çözümlendirilmiştir. Çözüm için lineer olmayan MPC yöntemi ve C/GMRES yöntemi kullanılmıştır. C/GMRES yöntemi Genelleştirilmiş Minimum Residual⁷ yöntemine devam nitelikte olan ve lineer olmayan MPC problemlerinin çözümü için hızlı bir yakınsama yöntemi öneren bir çözümdür [86-88]. HEA için önerilen yöntem öngörülü olarak ön şarj ya dadeşarj yaparak reküperatif enerjiden faydalanmayı sağlasa da, gerek C/GMRES'in yakınsamayı garanti etmemesi gerekse şarj profili için referans bir yörünge ihtiyacı olması enerji kontrolü açısından formülasyonda bazı yetersizliklere neden olmaktadır.

[78]'de ise basitleştirilmiş bir polinom tabanlı paralel hibrid araç hız ve optimal tork takibi için lineer olmayan MPC çözümü önermektedir. Eşdeğer yakıt tüketimi katsayısı kullanılarak birleştirilmiş bedel fonksiyonu daha sonra batarya şarjı kontrolü için ek bir terimle genişletilmiştir. Sonuç olarak iyi bir hız takibi için 5 ila 15 saniyelik öngörü zamanlarının olduğu ortaya koyulmuştur.

⁶ İng. Çev. : Linear Time Varying Model Predictive Control (LTV-MPC)

⁷ İng. Çev. : Generalized minimal residual method (GMRES)

[79]’da ise paralel hibrid araç için bir tork girişini takip kontrolcüsü geliştirilmiştir. Bu kontrolcü EM ve İYM arasındaki tork dağılımını hibrid aracın farklı modları gözetilerek dağıtmak amacıyla olup enerji optimizasyonu ile ilgili değildir.

[81], [82]’da ise [76]’ya benzer şekilde aynı tip hibrid topolojisi için LTV-MPC ve lineer olmayan MPC çözümleri karşılıklı olarak sunulmuştur. Benzere bir çözüm seri hibrid ŞE-HEA için ortaya koyulmuştur [83].

[84]’da MPC formülasyonu DP algoritması ile çözümlenirken, adaptif bir yapı ile hız ve yol profilinin tahmini değerleri üzerinden öngörülü kontrol gerçekleştirilmiştir.

[85]’de EYTM ve MPC tabanlı bir optimizasyon yapısı yakıt pilli bir araç için kullanılmış ve burada eşdeğer yakıt katsayısı yakıt pili ve batarya enerjileri arasında tanımlanmıştır.

Klasik optimal kontrol yöntemleri arasında Pontryagin Minimum Prensipli (PMP) HEA ve ŞE-HEA enerji yöntemi açısından en çok uygulama alanı olan yöntem olup birçok çalışmanın da temelini oluşturmaktadır. Bölüm 4’de görüleceği üzere EYTM yönteminin temelini meydana getirmektedir [16], [89-91].

[89]’da ŞE-HEA için PMP formülasyonu ortaya koyulmuş ve Lagrange çarpanı olan eş-durum değişkeni için başlangıç değerinin sonuca olan etkisi ortaya koyulmuştur. Önemli bir bulgu da ŞE-HEA için kat edilen mesafe ya da araç menzili ile eş-durum değişkenine olan bağımlılık azalmaktadır. [90]’de ise EYTM ve PMP arasında karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiş ve iki yöntemin anlık optimizasyonu üzerinden çalışmasına rağmen PMP için tüm sürüş detaylarının bilinmesi gerektiği vurgulanmıştır.

[92-102] arasındaki çalışmalar özellikle ŞE-HEA için yol ve trafik durumu gözetilerek elde edilecek tahmini yol güç ve hız profilini kullanarak enerji yönetimini klasik yöntemle göre iyileştirmek ve optimize etmek adına yapılan uygulamaları kapsar. Uygulamaların ortak özelliği trafik, yol topoğrafyası ve benzeri bilgileri kullanılarak bir trafik modeli oluşturmak ve bu model çerçevesinde bir araç hız ve güç profili oluşturmak suretiyle öngörülü optimal enerji yönetim stratejisini tüm yol boyunca belirlemek olacaktır.

[92]’de kullanılan deterministik DP yöntemi ile yol ve seyahat ile ilgili navigasyon ve GPS sistemlerinden toplanan ortalama hız, trafik sinyalleri bilgisi, dur-kalk manevra

ihtimalleri gibi birçok bilgi, elektrikli bir aracın optimal enerji yöntemi için hesaplanmıştır. Elektrikli aracın enerji yönetimi için eksik olan serbestlik derecesi, optimal enerji yönetimi ve istenen noktaya mevcut batarya şarjı ile ulaşabilmek adına, sürücüye sağlanan optimal hız bilgileri ile giderilmiştir.

[93]'de ise trafik hava durumu ve yol gibi birçok etkenin aracın enerji tüketimine olan etkisi araştırılmıştır. İlk adım olarak araç çekiş gücü ve yukarıda belirtilen bu yol şartları arasındaki ilişki ortaya koyulmuş ardından da ŞE-HEA için tüm yol şartlarına uygun eşdeğer yakıt tüketimi katsayısı elde edilme yoluna simülasyon modelleri aracılığı ile gidilmeye çalışılmıştır.

[94-99] arasındaki çalışmalar aynı araştırma grubuna ait olup benzer metotlar çerçevesinde ŞE-HEA araçlar için öngörülü bir enerji yönetimi geliştirmek adına yapılan çalışmaları kapsamaktadır. [94]'da birçok trafik ve yol topoğrafya verisi birleştirilerek ve yapay bir hız profiline dayanan yol sürüş verileri, daha sonra konuma bağlı bir enerji profiline dönüştürülmekte ve daha sonra bu profil ŞE-HEA için optimal şarj bitirici strateji ile DP yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır.

[95] ve [97]'de ise benzer bir uygulama kademeli olarak artırılan yol bilgileri ile test edilmiştir. Öncelikle ilk kademede seyahat modeli sadece hız limitleri kullanılarak ve sabit ivmelenme ve yavaşlama eğrilerine bağlı basit bir model üzerinden kurulmuştur. İkinci seyahat modeli daha kapsamlı yol üzerindeki istatistiksel ortalama hız bilgileri ışığında oluşturulmuş ve son olarak da en kapsamlı seyahat modeli trafik ışık bilgileri kullanarak elde edilmiştir. Tüm modeller, ŞE-HEA bir araç için optimal öngörülü şarj bitirici strateji için test edilmiştir. Beklendiği üzere en kapsamlı seyahat modeline sahip çözüm en optimal davranışı sergilemiştir.

[96] ve [98]'de seyahat modeli daha da geliştirilmiş ve otoban üzerinde buluna hız detektörlerinden alınan bilgiler sayesinde bir gaz/kinetik makroskopik trafik akış modeli oluşturularak ŞE-HEA için belirlenen yol için optimal enerji yöntemi elde edilmiştir.

Son olarak da [99]'da sinir ağları tabanlı bir seyahat modeli kullanılarak daha önce kullanılmış gaz/kinetik modelle karşılaştırmalı olarak aynı amaç çerçevesinde kullanılmıştır.

[100]'de ŞE-HEA için EYTM stratejisini gerçek zamanlı ve yola bağlı DP kullanarak çözebilen bir yöntem kullanılmıştır. Bir başka deyişle, EYTM katsayısı, ya DP ile tüm sürüş için bir kere çalıştırılacak ve elde edilen sonuçtan eşdeğerlik katsayısı bulunacak, ya da EYTM algoritması ileriki yol sürüş bilgileri kullanılarak tersten başa doğru çalıştırılarak ilk ve son şarj değerlerini sağlayacak katsayı değeri elde edilecektir.

[101]'de ise güç aktarmalı ŞE-HEA için farklı seviyede yol ve trafik bilgisi sayesinde PMP metodu kullanarak enerji optimizasyonuna gidilmiştir. [102]'de ise PHEV için MPC tabanlı bir kontrol yapısı oluşturulmuş ve 4 farklı kademede kullanılan bilgiler ışığında güç aktarımlı ŞE-HEA için enerji yönetimi optimize edilmiştir.

1.1.4 Sürücü Destek Sistemleri – Adaptif Seyir Sistemleri ve Trafik Işığı Destek Sistemleri

Adaptif Seyir sistemleri uzun yıllardır araçlarda ve özellikle lüks segmentteki araçlarda yer alan bir sürücü destek sistemlerinden biridir. Öte yandan bu sistemlerin performansından ziyade günümüzde konfor ve sürüş hissiyatına yönelik özelliklerinin ön plana çıktığı çalışmalara literatürde rastlanmaktadır. Örneğin [104-105] bu tarz konfor unsurlarının ASS açısından ele alındığı çalışmalara örnektir. Keza [105-107] içinde ivmelenmenin yanı sıra, ivme türevi olan jerk de irdelenmiştir.

Öte yandan araçlar arası mesafe ve konum kontrolüne yönelik sayısız çalışmaya literatürde rastlamak mümkündür. Örneğin [108]'de hibrid bir kontrol yapısı ile istenen kontrol girişleri 3 farklı alt kontrolcü olan, sabit, yumuşak ivmelenme ya da lineer geri beslemeli kontrol yapısı arasında geçişleri sağlamaktadır. [109] adaptif sinir ağı yapısı ile probleme çözüm aramaktadır.

Öte yandan, ilgili bölümde de irdeleneceği üzere, araçlar arası mesafenin belirlenmesi ve kontrolü adına çeşitli uzaklık tanımları yapılmıştır. Örneğin [110] da sabit mesafe kontrolü uygulanırken, [111] sabit zaman aralığı uygulamasını temel almıştır.

Model Öngörülü Kontrol yöntemi de uygulamada ASS için kullanılmıştır. Mesela [112], bu kontrol yönteminin işlem yoğunluğunu farklı optimizasyon algoritmaları çerçevesinde değerlendirirken, ASS problemini göz önüne almıştır. yapısının [113] yol topografyasından faydalanan sabit bir hız kontrolcüsü ile ağır vasıtalar için yakı tasarrufuna gidilmiştir. [114]' te ASS ile beraber dur-kalk sistemine çözüm gene Model Öngörülü Kontrol yöntemi ile tartışılmıştır. [115]' te ise gerçek zamanlı bir

ASS kontrol uygulaması çeşitli senaryolar çerçevesinde bir araç simülatöründe test edilmiştir. [116]' çalışması bu tez kapsamında gerçekleştirilmiş ASS kontrolcüsünün, sürüş konforu açısından değerlendirmekte ve Öngörülü Kontrol yöntemini problemin çözümü için kullanmaktadır.

Her ne kadar Trafik Işık Asistan sistemi literatürde yaygın olarak bulunmasan da trafik ışıkları ile araç içerisinden iletişim ve bunun hız optimizasyonu için kullanılmasına yönelik bazı çalışmalara mevcuttur. Bunlardan en önemlisi, [117]' de de bahsedilen GLOSA sistemi olup konvansiyonel araçlar için sürücüye 'Yeşil Dalga' yakalamak adına sabit bit hız önerisinde bulunmaktadır. Öte yandan bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların özetlendiği [118-119] elektrikli bir araç açısından sistemin enerji optimizasyonu göz önünde bulundurularak yapılan bir çalışmadır.

1.2 Tezin Kapsamı ve Literatüre Katkısı

Bu doktora tezinin kapsamı Yukarıda incelenen HEA ve ŞE-HEA kontrol sistemlerinin optimal kontrolü için enerji yönetim sistemleri geliştirmek, daha sonra bu kontrolcülerin kapsamlı ve gerçekçi simülasyon modelleme metodolojileri ile elde edilen sonuçları ortaya koymaktır. Literatürde mevcut HEA ve ŞE-HEA kontrolcülerin birçoğu anlık bilgiler ışığında bu optimizasyonu gerçekleştirmektedir. Öte yandan bu tez kapsamında da gösterildiği üzere toplam global bir optimal sonuç ancak tüm yol ve sürüş şartları bilindiği takdirde elde edilebilmektedir. Günümüz akıllı ulaşım teknolojileri sayesinde tahmini sürüş özellikleri, seyahat modelleri kullanılarak, gelecek yol şartları hakkında belirli bilgiler elde edilmiştir. Literatür araştırmasının son bölümünde bu tip çalışmalara yer verilmiştir [92-102]. Bu çalışmaların hemen hemen hepsi ŞE-HEA için, klasik olarak önce Şarj Bitirici ve sonra Şarj Dengeleyici modların kullanılması aksine, bu modları etkin olarak tüm sürüş yayacak optimal çözümler aramaktadırlar. Bu tip bir karma mod hesaplaması ancak yol şartları, sürüş özellikleri, seyahat mesafesi ve benzeri seyahat özellikleri kullanılarak elde edilebilir. Bu seyahat ve sürüş detayları da, navigasyon, GPS, dijital haritalar, dinamik trafik bilgisi gibi bilgiler kullanılarak elde edilir.

Ancak literatürde fazla yer almayan bir husus yol topoğrafyasının ve özellikle reküperatif şarj sağlayacak negatif eğimli uzun yol durumların HEA için şarj dengeleme problemine yol açmasıdır. Bir başka deyişle, yol eğiminin başladığında üst

sınıra yakın batarya şarjı, eğimli yolda geri kazanılacak bedava şarj enerjisinin bir kısmını geri kazanabilir. Zira şarj yol eğimi başında zaten yüksek olduğundan hızlıca dolabilir. Ancak böyle bir yolun, önceden bilinmesi, önceden şarjın azaltılması suretiyle geri kazanılacak enerji miktarı artırılabilir. Benzer bir öngörülü kontrol pozitif eğimli yollarda, ön şarj ile yükün yüksek olduğu kısım daha elektrik ağırlıklı bir modda geçilebilir. Böylelikle düşük İYM yükü ile geçilen yokuş sonucunda daha düşük bir yakıt tüketimi sağlanmış olunur.

Aslında literatürde birçok şarj dengeleme kontrol yapısı, özellikle EYTM ve benzeri anlık optimizasyon yapan algoritmalar üzerine eklenmiştir. Örneğin [68] bu algoritmalarından bazılarını karşılaştırmalı olarak değerlendirir. Ancak öncelikle bu algoritmalar hem sürekli batarya şarjı kontrolünden dolayı EYTM formülasyonunda bir baskı oluşturarak optimalliği düşürmekte hem de yol bilgisinden faydalanmamaktadır. Yol eğiminin şarj dengeleme problemi açısından kullanıldığı literatürde bazı çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin [77]'de lineer olmayan MPC formülasyonu kullanılarak, güç aktarımlı bir HEA için yukarıda bahsedilen yol topoğrafyasına bağlı sonuç için bazı çalışmalar yapılmıştır. Ancak öncelikle bu çalışmada kullanılan metot, yani C/GMRES algoritması kullanılan MPC formülasyonunu optimize etmeyi her durumda garantilememektedir. Öte yandan uygulanan yöntem gerçek zamanlı çalışmayı garanti etse dahi, işlem yoğunluğu oldukça yüksek olan bir yöntemdir. Öte yandan şarj dengeleme için bir istenen şarj profili fonksiyonu kullanılmış ve bu fonksiyon yol konumuna göre ifade edilmiştir. Bir başka deyişle, MPC formülasyonu aslında verilen bir şarj profilini izlemekle yükümlüdür.

Oysa yol topoğrafyasının önceden bilinmesi, EYTM formülasyonunu sadece gerektiği anlarda, ön şarj ya dadeşarj yapacak şekilde değiştirecek, şarj dengeleme problemi olmadığında ise, orijinal optimal EYTM yapısını kullanmaya devam edecek bir formülasyon daha uygun olacaktır. Bu tezin 5. Bölümünde yer alan iki farklı uygulama bu problemin çözümünü aramaktadır. İlk çözüm önerisinde, klasik EYTM formülasyonuna yeni ve yoldan geri kazanılacak toplam enerjiyi ifade eden yeni bir terim kullanılmıştır. Bu terim negatif eğimli yol durumunda ileride zaten geri kazanılacak enerjiyi önceden bataryadan çekecek bir etki yaratmaktadır. Bu öndeşarj enerjisi miktarı yolun eğimli kısmı başlayana dek kademeli olarak azaltılmıştır. Pozitif

eğimli yol için gerekecek ön deşarj miktarları da benzer şekilde EYTM formülasyonuna eklenen bir terimle gerçekleştirilmiştir[103].

Benzer bir problemin çözümü için problem ikinci kez MPC formülasyonu çerçevesinde çözülmüştür. Öncelikle problem bir MPC formülasyonu ile değerlendirilmiş ve ardından ortaya koyulan bedel fonksiyonunu minimize etmek için Lineer Programlama (LP) yöntemi kullanılmıştır. Problemin LP ile çözümü için, EYTM formülasyonu önce lineerleştirilmiş ve EYTM davranışı sabit parametreler kullanarak yaklaştırma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, lineer model içindeki MPC formülüne ait kontrol ufku boyunca tüm kontrol değerleri sabit bir parametre şeklinde ifade edilmiştir. Sonuçta her hesap adımında MPC formülasyonu LP kullanarak minimize edilmiştir. İkinci yöntem aslında sürekli anlık optimizasyon yaptığından, bozucu etkilere ve parametre değişimlerine karşı daha dayanıklıdır. LP problemi MATLAB'in Simpleks algoritması kullanarak çözülmüştür.

Tez kapsamındaki tüm uygulama ve kontrolcüler iki adımda simüle edilmiştir. Öncelikle kontrolcülerin geliştirildiği, kontrol tabanlı simülasyon modelleri kullanılmıştır. Daha sonra bu modeller kapsamlı araç ve hibrid güç aktarma organlarının modellendiği CarMaker ve CRUISE eş-simülasyon ortamında daha kapsamlı olarak test edilmiştir. Kapsamlı modeller ile kontrol modeli arasındaki korelasyon, Bölüm 3'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Sonuç olarak tezin kapsamı şu şekildedir: Bölüm 2, HEA ve ŞE-HEA'lara genel bir giriş niteliğinde olup HEA ve ŞE-HEA enerji optimizasyon problemini açıklamaktadır. Bölüm 3 araç modelleri geliştirilmesi ve araç modellerinin matematiksel ifadelerini içermektedir. Bölüm 4'te Enerji Optimizasyonu için kullanılan yöntemler ifade edilmiştir. Sırası ile DP, EYTM ve Adaptif-EYTM yöntemleri HEA ve ŞE-HEA araçları için açıklanmış ve sonuçlar farklı sürüş çevrimleri için sunulmuştur. Öte yandan sonuçları elde edilmesinde her iki tip simülasyon modelleme metodolojisi de kullanılmıştır. Bölüm 5 öngörülü kontrol ile HEA ve ŞE-HEA enerji optimizasyonunu ve yol eğiminden dolayı meydana gelen şarj dengeleme problemine geliştirilen çözüm yöntemlerini içermektedir.

Bölüm 6' da ise sürücü destek sistemleri için geliştirilmiş iki farklı uygulama bulunmaktadır. Bunlardan ilki Adaptif Seyir Sistemleri ile ilgili ve Model Öngörülü Kontrol yöntemi kullanılarak araç sürüş konforunu dayalı bir kontrol sistemi

geliştirilmesidir. Öncelikle kontrol yapısı olarak ve sürücü konforunu göz önünde bulundurması açısından yenilik içeren bu sistem daha sonra detaylı araç modeline de uygulanmıştır.

Öte yandan 6. Bölümün ikinci kısmında yeni bir araç sürücü destek sistemi olan trafik Işığ1 Asistan Sistemi aynı kontrol yöntemine dayanarak elektrikli araçların enerji tüketimini artırmak adına geliştirilmiştir. Bu yöntem hem uygulama alanı hem de kontrol yöntemi olarak birçok yeniliğı içermekle beraber, aynı zamanda sürücü ile iletişiminin test edilmesi açısından gerçek zamanlı bir sürçü simülatöründe de denenmiştir. Son olarak Bölüm 7’de sonuçlar ve tartışma kısımları yer almaktadır.

2. HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇ İÇİN ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ VE ARAÇ MODELLEME METODOLOJİLERİ

Bir Hibrid Elektrikli Araç (HEA) için güç ve enerji tüketim özelliklerini niteleyen karakteristik özellik, elektriksel ve mekanik komponentlerin boyutları kadar, güç aktarma organlarının dizilişidir. Zira aracın, Batarya, İçten Yanmalı Motor (İYM), Elektrik Motoru (EM) gibi komponentlerinin bir arada hangi koşullar altında çalışacaklarını belirleyen Hibrid Araç Topolojisi, aynı zamanda, sürüş sırasında enerji akış yollarını da tanımlar.

Günümüzde HEA'lar için belli başlı komponent dizilişleri çeşitli standart konseptler çerçevesinde tanımlanmaktadır (Seri, paralel, seri-paralel vs. gibi). Araç tasarımı ve araçtan beklenen performans yakıt tüketimi hedefleri, maliyet, araç segmenti ya da kullanılacak komponentlerin özellikleri ve çalışma kısıtları gibi birçok faktör genel anlamda HEA tasarımındaki bu topoloji seçimini etkilemektedir. Öte yandan aracın çekiş sistemini meydana getiren tüm komponentlerin uyumlu çalışma koşullarını sağlaması gerekmektedir. Elektriksel ve mekanik tüm komponentlerin güç, enerji tork ve hız gibi birçok fiziksel, koşulu ortak sağlayacak nitelikte olması gerekmektedir. Bu da hem aracın çekiş sistemini meydana getiren tüm komponentlerin hem de şartlandırma gibi birçok yan sistemin tasarım özelliklerinin bir arada göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Böylesine karmaşık bir tasarım sürecinin başarıyla sağlanması ancak sistematik bir mühendislik metodolojisi ile mümkündür.

Öte yandan, HEA'ların tasarım aşamasının ardından, bu kompleks ve farklı enerji kaynaklarına sahip sistemin, bir arada uyumlu ve efektif çalışmasını sağlayacak yazılım ve kontrol yapısı da aynı zamanda sistemin kompleksliğine eşdeğerdir. Bu anlamda bu tip verimliliğe ve komponentlerin optimal şartlarda bir arada çalışmasını sağlayacak HEA Enerji Yönetim Sistemlerinin geliştirilmesi de araç tasarımının önemli bir parçasıdır. Bu ise, sistemin bütünü ve komponentlerin özelliklerinin iyi bir şekilde anlaşılmasına dayanmaktadır. Öte yandan, HEA Enerji Yönetim Sistemleri birçok komponentin, zaman zaman birbirlerine ters düşen verim yapılarını bir arada iyileştirmeyi amaçlaması açısından bu tez kapsamında da görüleceği üzere bir

optimizasyon problemidir. Bu çalışma bu problemi, uygun komponent, sistem ve araç modelleme yöntemlerinin yanı sıra, bir optimizasyon problemi haline getirip, klasik optimizasyon ve optimal kontrol yöntemleri ile çözüme ulaşmayı hedeflemektedir.

Şarj Edilebilir Hibrid Araçlar (ŞE-HEA)⁸ gerek son yıllardaki batarya teknolojisindeki gelişmelere uygun olarak, gerekse tamamen İYM'siz bir çözüm olan Tümü Elektrikli Araç (TEA)'a yönelik bir gelişim trendinde ortaya çıkmışlardır. Bu araçlar temel olarak batarya sistemlerinin standart şebekeden şarj edilebilir bir ara-yüze sahiptirler. Elbette ki bu şarj süreci aracın üzerindeki herhangi bir enerji dönüşümünden etkilenmez ve verim unsurlarından bağımsızdır. Sonuçta daha yüksek kapasiteli bataryaların, dolayısı ile daha küçük güçte İYM kullanılmasına olanak sağlar. Zira araç üstü sürüş sırasında İYM ile şarj dengeleme tasarım ve boyutlandırmanın ana unsuru değildir. Bu da daha az yakıt tüketimi ve daha az egzoz emisyonu demektir. Öte yandan bu araçların tasarımları, belirli aralıklarla şebeke şarjı göz önüne alınarak tasarlandıklarından, sürüşün önemli bir kısmı sadece elektrik enerjisine dayanmakta, prensip olarak İYM'ler aracın menzilini artıran bir ek kaynak olarak kabul edilmektedirler. Bu anlamda bu araçlara Tüm Elektrik Menzili⁹ artırdıklarından dolayı Menzil Artırıcılar¹⁰ da denilmektedir.

Öte yandan şarj edilemeyen HEA da hali hazırda teknolojik olarak hala ilgi çekiciliklerini korumaktadırlar. Gerek batarya ve elektrik motorlarının boyutlarının nispeten daha sınırlı olması neticesinde bu araçlar daha farklı araç konseptleri ve araç tasarım amaçları için değerlendirilmektedir. Bu tip araçlarda, batarya sistemleri, daha küçük menziller çerçevesinde daha çok geçici bir ara enerji depolama ünitesi olarak işlev görmektedir. Böylelikle İYM yol yükünden bağımsız olarak daha verimli çalışma noktalarında kullanılarak bir yakıt tasarrufu sağlanır.

Sonuç olarak her ne kadar Hibrid Elektrikli araçlar, konvansiyonel araçlara alternatif bir teknoloji olarak ortaya çıksalar da, güç aktarma organları tasarımları oldukça detaylı ve amaca yönelik olarak incelenmesi ve karar verilmesi gereken unsurlardır.

Hibrid elektrikli araç için enerji yönetim sistemleri de aslında araç güç aktarma organı topolojisi ve hibrid araç teknolojisi ile yakından alakalıdır. Sonuç olarak, sistemin yapısı, kısıtları ve diğer birçok parametre enerji yönetim sistem tasarımının

⁸ İng. Çev: Plug-in HEV

⁹ İng. Çev: All Electric Range

¹⁰ İng. Çev: Range Extender

özelliklerini belirlemektedir. Örneğin, şarj edilebilir bir hibrid aracın İYM yönetimi ile şarj edilmeyen bir aracınki tamamen birbirinden farklıdır.

Ancak, son yıllarda gerek ŞE-HEA'lar gerekse diğer HEA'ların enerji optimizasyonuna yönelik çalışmalarda görülmüştür ki, verimli bir enerji yönetiminin tek bağımlı olduğu unsur aracın özellikleri değildir. Sürüş özelliklerini, bir kenara bırakırsak ve ekonomik ve agresif sürücü arasındaki farkı göz önüne almaz isek, HEA Enerji Tüketimi aynı zamanda yol ve sürüş hızlarından tamamen bağımsız olamaz. Elbette ki anlık tork ve hız istekleri, anlık yol yüklerine ve hızlara bağlıdır. Bu da harcanacak enerji miktarının etkiler. Ancak gerekli anlık güç ihtiyacının karşılanması ve bunun hibrid komponentler arasında paylaştırılması, gelecekte karşılaşılabilecek yol ve hız durumlarından etkilenmektedir. Bir başka deyişle anlık olarak en iyi enerji yönetimi, ancak gelecek şartların bilinmesi ile mümkündür.

Günümüzdeki, HEA enerji yönetimi, gelecek hakkında bir bilgiye sahip olunmadığından ya anlık verim şartları değerlendirilerek sonuca ulaşmakta ya da tüm sürüş koşullarını ifade edecek ortalama bir çalışma koşulu kabulüne dayanmaktadır. Ancak, gelişen navigasyon ve iletişim sistemleri ile artık anlık olarak hem yol koşulları hakkında bilgiler alınabilmekte ve yolun detaylı verileri araç içinde kullanılabilmektedir. Hali hazırda bu tip veriler henüz, araç sürüş sistemleri için yaygın olarak kullanılmasa da sürücü bilgilendirme navigasyon vs. gibi amaçlarla kullanımı yaygınlaşmaktadır. Günümüzde bu tip verileri kullanan, bazı konfor amaçlı araç sürüş sistemleri mevcuttur. Örneğin, yol topolojisi verisi ile birleştirilmiş, Adaptif Seyir Sistemleri¹¹ buna bir örnektir. Araç içerisinde, bu tip bilgilerin yakıt tasarrufu, emisyon kontrolü ya da aktif güvenlik sistemlerinde kullanılması yakın gelecekte de beklenmektedir. Bu da, araç içinde bu veri sistemlerinin standartlaşması ve güvenilirliğinin artması konusunda aşama kaydedileceğinin göstergesidir. Konvansiyonel araçlar da dâhil olmak üzere, gelecekteki yol durumu ya da sürücünün muhtemel güç isteklerinin öngörülmesi, transmisyon kontrolünden, egzoz sonrası emisyon kontrol sistemleri ya da öngörülü ESP ya da ABS sistemlerinin kontrolüne kadar birçok alanda oldukça faydalı olacaktır. Zira bu verilerin günümüzde standartlaştırılması, veri güvenliğinin sağlanması ya da veri kalitesinin artırılmasına

¹¹ İng. Çev: Adaptive Cruise Control

yönelik gerek araştırma gerekse yasal düzenlemeler yönünde birçok çalışma bulunmaktadır.

Bu tez kapsamında, bu anlamda kullanılacak veriler, günümüzde hâli hazırda bulunan ya da geliştirilmekte olan iletişim ve veri kaynaklarına dayanmaktadır. Öte yandan, tez çalışmasının temel amacı, belirlenen HEA topolojileri için gerek anlık enerji yönetimi gerekse de öngörülü kontrol metodolojisinden faydalanılarak enerji yönetimi tasarımları gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu anlamda, bu tez çalışması çerçevesinde, mevcut teknolojiye dayanan iletişim teknolojileri ve verileri belirlenen HEA'ların öngörülü olarak enerji yönetimi amacıyla kullanılmaktadır.

Bölüm 4'de daha metodik ve daha detaylı olarak incelenecek olan Enerji Yönetim Sistemleri, temel olarak araç sürücünün anlık güç ihtiyaçlarını değerlendirerek bunu güç aktarma organı komponentleri arasında belirli bir strateji çerçevesinde paylaşmak görevinde olan kontrol sistemlerdir. Bir başka deyişle sürücünün anlık güç isteği, HEA'da, farklı enerji akışları ile sağlanabilir. (Ör: Sadece İYM, sadece EM ya da İYM + EM güç paylaşımı gibi). Bu çerçevede bu alternatif seçimlerden enerji açısından en uygununu seçmek Enerji Yönetim Sistemi'nin görevidir. Bu anlamda mevcut komponentlerin güç ve verim özellikleri, batarya şarj seviyesinin durumu ve daha birçok parametre göz önünde bulundurulur. Bir başka deyişle Enerji Yönetim Sistemleri'nin, güç aktarma organlarının kontrolü üzerinde yüksek seviyede bir denetleme özelliği bulunmaktadır. Bu detaylar daha geniş kapsamda Bölüm 5'de incelenecek; ayrıca, gelecek yol durumları ile bilgilerin enerji yönetimi açısından önemliliği, nasıl ve hangi ölçüde kullanılacağı bu bölümde daha detaylı olarak incelenecektir.

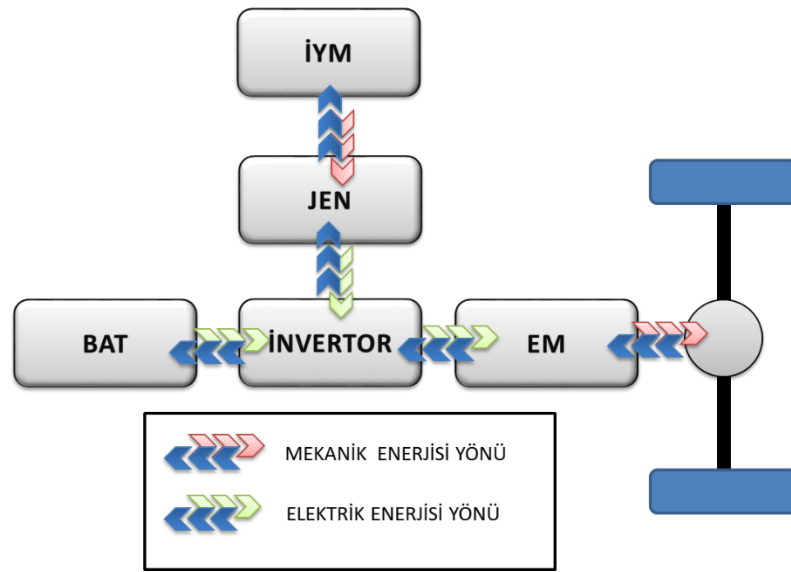
2.1 Hibrid Araç Güç Aktarma Organları Topolojileri

HEA'lar için, İYM ve EM'yi, farklı sayıda ve farklı dizilimde kullanarak, teorik olarak sınırsız sayıda konfigürasyon ortaya koymak mümkündür. Ancak, genel olarak kabul görmüş 3 farklı konfigürasyon ön plana çıkmaktadır. Bunlar, seri, paralel ve seri-paralel konfigürasyonlardır.

2.1.1 Seri Hibrid Elektrikli Araç topolojisi

Şekil 2.1'de görüldüğü üzere seri hibrid araç konfigürasyonunda içten yanmalı motor ile tekerlekler arasında mekanik bir bağlantı bulunmamaktadır. İYM sadece bataryayı

şarj etmek ve gerekli durumlarda tahrik elektrik motoruna direkt enerji sağlamak için kullanılmaktadır. Dolayısı ile sistem, tahrik için ön veya arka aksa bağlanmış bir elektrik motoru ile İYM'ye bağlı bir jeneratörden meydana gelmektedir. Tahrik için kullanılan elektrik motor sayısı artırılarak aracın çekiş özellikleri geliştirilebilir ve böylece araca 4x4 özelliği de kazandırılmış olunur. Ayrıca İYM, bataryanın şarj değerine göre, gerekli olmadığı durumlarda kapatılarak aracın sadece elektrikli sürüş modunda çalışması sağlanabilir. Öte yandan, jeneratör İYM'yi çalıştırmak için de Start-stop teknolojisi çerçevesinde de kullanılabilir. EM tekerleklere bağlı olduğundan, batarya şarjı için fren enerjisi geri kazanılmaktadır.

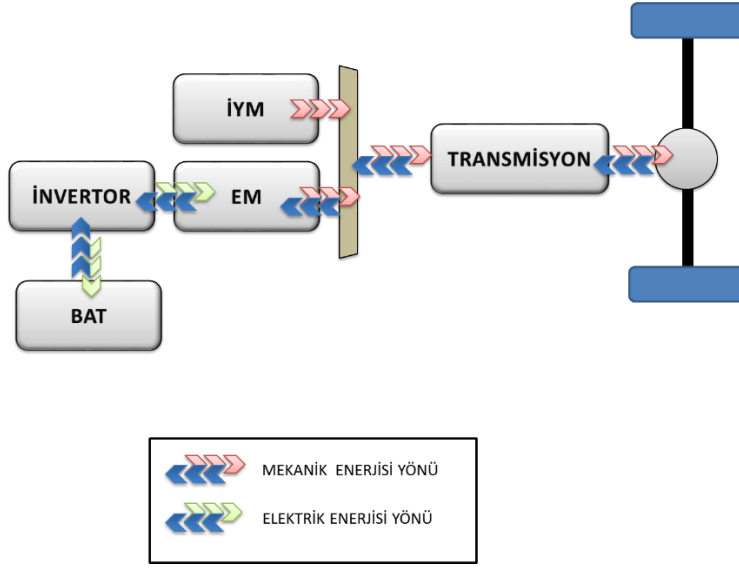


Şekil 2.1 : Seri HEA konfigürasyonu.

2.1.2 Paralel Hibrid Elektrikli Araç konfigürasyonu

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi paralel HEA konfigürasyonunda seri hibrid konfigürasyonunun aksine, İYM ile tekerlekler arası mekanik bağlantı bulunmaktadır. Böylelikle, aracın ivmelenmesi hem EM hem de İYM ile paylaşılabilir. Bu nedenle farklı kombinasyonlar ile çekiş sağlanabilir. (Sadece EM Modu, sadece İYM Modu, İYM ve EM Güç paylaşım Modu). Ayrıca Paralel Şarj modunda İYM, bir yandan EM'nin, jeneratör olarak çalıştırılması ile bataryaları şarj ederken, diğer yandan çekiş için tork sağlayabilir. Öte yandan sadece EM ve sadece İYM modlarında, sürtünme dirençlerini gidermek için İYM ve EM ile ana şaft arasına bir kavrama sistemi koymak enerji kayıplarını azaltacaktır. Ayrıca EM, geri kazanımlı frenleme için kullanılabilir. Bunun yanında alternatif paralel hibrid konfigürasyonları söz konusudur. Örneğin

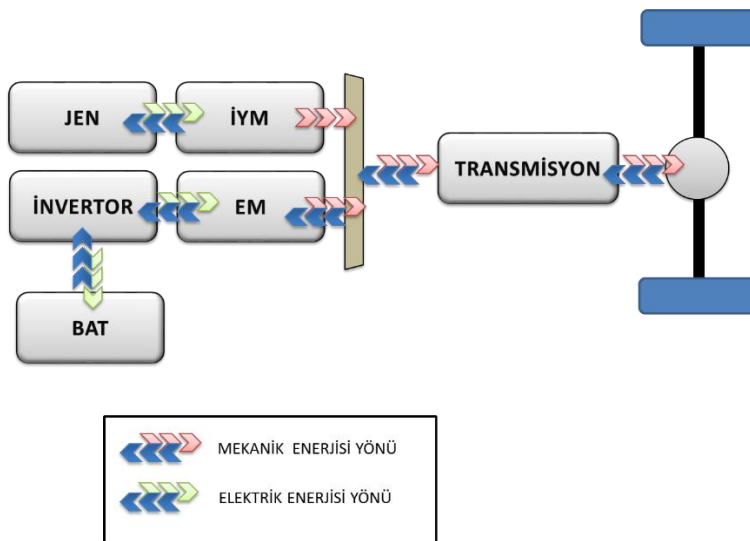
boşta olan aksa bir elektrik motor eklenerek hem araca 4x4 özelliği katılmış olunur hem de yol üzerinden paralel şarj yapma özelliği eklenir.



Şekil 2.2 : Paralel HEA konfigürasyonu.

2.1.3 Seri-paralel Hibrid Elektrikli Araç konfigürasyonu

Şekil 2.3'de görülen bu konfigürasyon ise, seri ve paralel hibrid konfigürasyonlarını ayrı ayrı içerdiğinden daha fazla sürüş modu içermektedir. Örneğin sistem hem Seri Mod şarjına izin verir hem de güç paylaşımı ile sürüş sağlar. Yani, İYM gerekli durumlarda mekanik enerji akışını tekerleklerden keser ve sadece elektrik enerjisi üretilmesi için jeneratöre bağlanabilir.



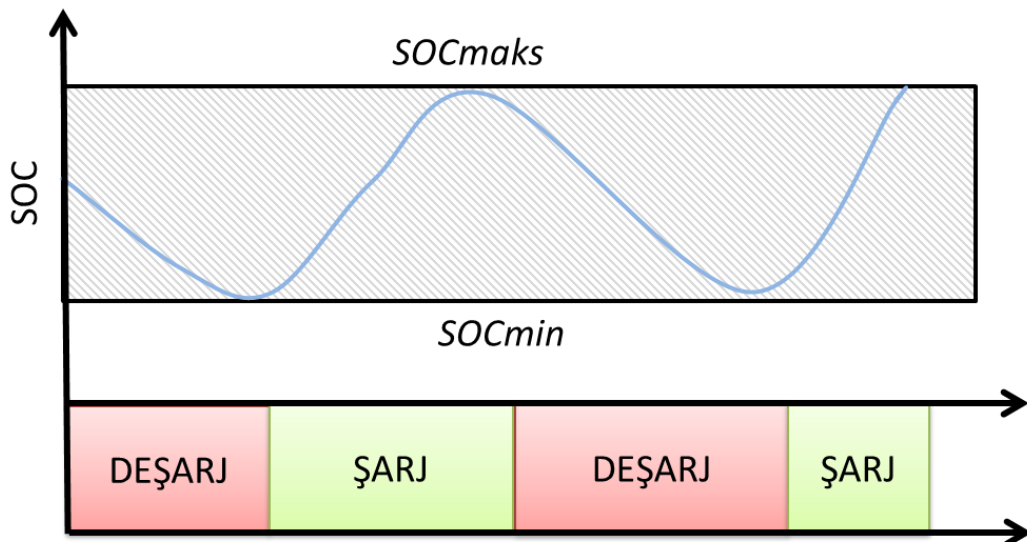
Şekil 2.3 : Seri-Paralel HEA konfigürasyonu.

2.2 Dışarıdan Şarj Edilebilen Hibrid Elektrikli Araç Konfigürasyonu

Bataryanın dışarıdan, yani şebeke aracılığı ile şarj edilebilir olması, gerek batarya karakteristiğini, gerekse Enerji Yönetim Sistemi'nin temel stratejisini değiştirmektedir. Şöyle ki, her ne kadar, kesin bağlayıcı bir tanım olmasa da, şarj edilebilir hibrid araçlarda, EM ve batarya sistemi enerji ve güç karakteristikleri olarak tüm sürüşü kapsayacak şekilde tasarlanır. İYM bir şarj dengeleme ünitesi, ya da daha geniş kabul edilen tabiri ile bir menzil artırıcı bir amaç için kullanılmaktadır. Hatta İYM'nin tekerlek yüklerinden tamamen bağımsız olduğu seri ŞE-HEA'lar bulunmaktadır.

2.2.1 Hibrid Araç Enerji Yönetim Sistemleri

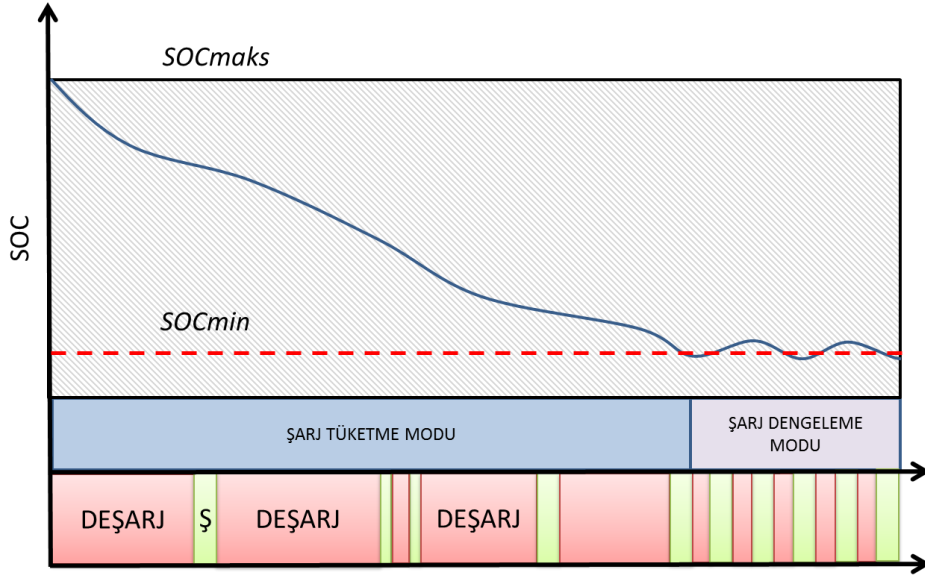
Temelde şarj edilemeyen bir hibrid araçta, limitli batarya kapasitesinin, gerek batarya ömür özellikleri gerekse sabit gerilim sağlaması açısından limitli bir şarj aralığında çalışmaktadır. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi batarya şarjı izin verilen maksimum ve minimum şarj dengeleri arasında salınmaktadır. Basit bir gösterimle, şarj dengesi minimum değere ulaştığında şarj ağırlıklı bir strateji, aksi halde maksimum şarj değerine ulaşıldığında daha EM ağırlıklı bir sürüş stratejisi seçilebilir. Kullanabilen bu şarj bandı, toplam batarya enerjisinin az bir kısmına tekabül eder. Bunun temel sebebi batarya ömrünü uzatmaktır.



Şekil 2.4 : Şarj edilemeyen HEA için batarya şarj değişimi.

ŞE-HEA'larda ise daha farklı bir strateji kullanılmaktadır. Aracın şarj edilmesi büyük ölçüde şebeke yardımı ile olduğundan, araç içi enerji dengesinde bu şarj için kullanılan

tüketim göz önünde bulundurulmaz. Bu açıdan, batarya enerjisinin tamamı sürüş boyunca kullanılır. Keza, İYM'nin gücü de çoğu konfigürasyonda bataryayı tamamen dolduracak büyüklükte değildir. Bu anlamda batarya enerjisi ve EM ağırlıklı sürüş genelde daha uzun menzilde kullanılır.



Şekil 2.5 : ŞE-HEA için batarya şarj değişimi.

Şekil 2.5 'de tipik bir şarj edilebilir HEA için batarya şarj profili ve kullanılan stratejiler görülmektedir. Şarjın belirli bir değere ulaştığı ana kadar, araç şarj tüketimine yönelik modda çalışırken, şarjın kritik bir noktaya gelmesi ile birlikte şarj dengeleme modu aktif olur. Bu durumda İYM daha sık aralıklarla çalışmaya başlarken, batarya şarjı belirli bir değerde salınır. Şarj tüketme modunda İYM sadece pik güç isteklerine cevap vermek için kullanılmaktadır. ŞE-HEA için genel de strateji ve konfigürasyonlar yukarıda izah edildiği şekilde olmakla beraber aksi uygulamalar da bulunmaktadır.

2.3 Hibrid Araç Enerji Yönetim Sistemleri Geliştirilmesine Yönelik Araç Modeli Tasarımları

Bu tez çalışmasının konusu olan optimal ve öngörülü hibrid araç Enerji Yönetim Sistemlerinin kontrol teorisine dayalı geliştirilmesi için gerekli adımlardan bir tanesi, çalışmanın hedefine uyumlu olarak oluşturulması ve kullanılması gereken araç modelleridir.

Bu anlamda tez çalışmasında model geliştirilmesinde metodolojik olarak 2 farklı amaca yönelik yöntemler izlenmiştir. Birinci amaç, tez çerçevesinde tasarlanan farklı enerji yönetim sistemlerinin deneneceği bir sanal test platformunun oluşturulmasıdır. Çalışma kapsamında geliştirilen kontrol ve Enerji Yönetim Sistemi yapısı için son derece gerçekçi bir test platformu oluşturmak gerekmektedir. Bu test platformu, tez çalışmasının bir parçası olan gelişmiş bir simülasyon ortamının oluşturulması ve bu ortamda amaca yönelik araç modelinin geliştirilmesi ile elde edilmiştir.

Öte yandan, ikinci önemli amaç, geliştirilen HEA Enerji Yönetim Sistemlerinin, temel olarak araç davranışlarının matematiksel bir modelini içermekte yani model tabanlı bir yapıya sahip olmaktadır. Özellikle, öngörülü Enerji Yönetimi sistemlerinde bu yapı çok önemlidir. Zira araç enerji tüketiminin tahmin edilmesi bu tip matematiksel modellere dayanmaktadır. Öte yandan, anlık bilgilere dayanan HEA Enerji Yönetim sistemlerinin de, optimal davranışlarının hesaplanmasında, bu tip modellerin işlevi vardır.

Bir başka deyişle, HEA için Enerji Yönetim Sistemi geliştirilmesi için, sadeleştirilmiş ve geçerliliği kompleks modele göre test edilmiş bir başka araç modeline ihtiyaç vardır.

Bu iki amaca yönelik kullanılan ve geliştirilen araç modellerinin yapıları farklılıklar göstermektedir. Test amaçlı kullanılan araç modeli bir bakıma gerçek bir sistemi temsil ettiğinden, daha kapsamlı bir simülasyon ortamı ve daha kapsamlı bir model yapısına sahip olması beklenmektedir. Tezin amacı çerçevesinde bu simülasyon modeli, kapsamlı bir güç aktarma organı modeli, detaylı bir araç dinamiği modeli, kapsamlı bir yol ve çevre modeli ile detaylı bir trafik modeli modüllerinden meydana gelen IPG CarMaker, AVL CRUISE, MATLAB Simulink eş-simülasyon¹² ortamıdır.

Öte yandan, kontrol sistemi içerisinde kullanılmakta olan model ise daha çok enerji tüketimi hesaplamalarına dayalı, daha düşük frekanslı dinamik özelliklere sahip, sanki-statik¹³ bir model yapısındadır. Bölüm 3’de bu model yapıları daha detaylı olarak incelenecektir.

¹² İng. Çev: Co-simulation

¹³ İng. Çev: Quasi-static

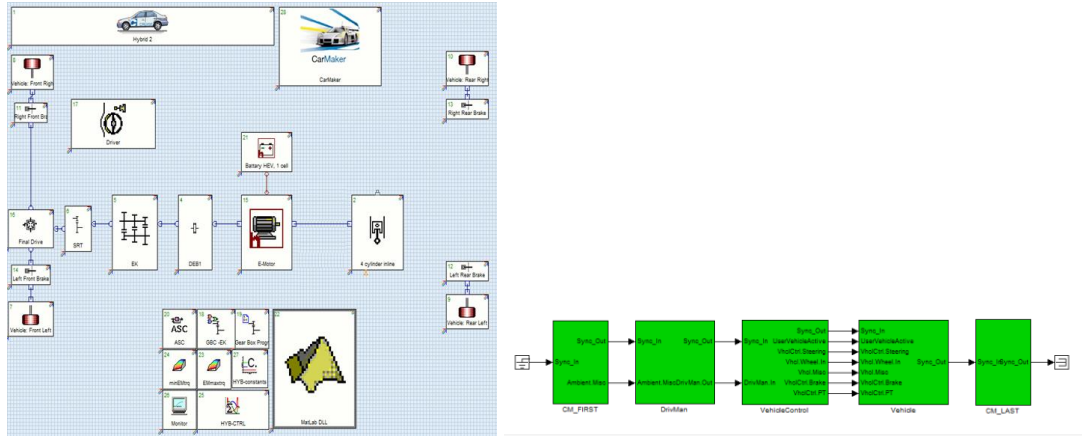
Elbette bu yukarıda izah edilen iki farklı modelleme tekniğinin birbirleri ile uyumlu ve benzer sonuçlar vermesi gerekmektedir. Bu nedenle bu iki araç modelinin davranışlarının karşılaştırılması gene Bölüm 3’de ele alınmıştır.

2.3.1 Tam-dinamik araç modelleme yöntemi – sürücüden tekerleğe kuvvet iletimi – ileri yönde modelleme metodolojisi

Dinamik araç modelleme metodolojisi, temel olarak gerçek fiziksel olay akışı ile uyumlu bir matematiksel hesaplama yöntemidir. Örneğin boylamsal bir araç modeli konseptinde, sürücü modelinin ürettiği boylamsal ya da yanal kontrol sinyalleri (vites, gaz, fren, debriyaj pedalı direksiyon gibi) daha sonra güç aktarma organlarının ilgili alt-modellerinde değerlendirilir. Komponentlerin ilgili atalet, verim, çevrim oranı vs. gibi büyüklükleri göz önünde bulundurulmakta ve tekerlek modeli çerçevesinde aracın boylamsal kuvvet ve hız dengesi hesaplanmaktadır. Bu aslında her bir komponente ait fiziksel modeli ifade eden birden fazla diferansiyel denklemin eş-zamanlı olarak çözülmesiyle hesaplanmaktadır. Dolayısı ile bu tip modellerde diferansiyel denklem çözen algoritmaların, çözüm adımının ya da hata toleransının çözüm doğruluğuna etkisi büyüktür. Örneğin, bu şekilde elde edilen araç hızı, araç hız kontrolü yaptığı kabul edilen araç modeli tarafından gözlemlenir ve bir sonraki hesaplama adımında hedefle olan farka göre kontrol sinyalleri tekrar değerlendirilerek hız takibi sağlanmış olur.

Öncelikle bu hesaplama metodolojisi komponentlerin birçok dinamik özelliğini ifade eden denklemler içerdiklerinden daha yüksek frekanslı dinamiklerin incelenmesine olanak verirler.

Bu hesaplama metodolojisi için bu tez çerçevesinde farklı simülasyon programları kullanılmıştır. Öte yandan bu programların eş zamanlı çalışmalarının sağlandığı bir paralel simülasyon yöntemi kullanılması gerekmektedir. Özetle, Şekil 2.6’da görüldüğü gibi araç güç organları sistemleri AVL CRUISE modelleme programı ile araç dinamiği, yol trafik ve diğer çevresel unsurlar IPG CarMaker programı ile ve kontrol sistemleri de MATLAB/Simulink programı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6 : Kompleks simülasyon ortamı: CarMaker - AVL CRUISE - MATLAB Simulink.

Öte yandan bu simülasyon programları bir arada çalıştırıldıklarında hesaplama ve çözücü algoritmalar da birbirlerine paralel ve eş zamanlı olarak çalışmaktadır. Simüle edilen tüm sistemler birbirleri ile ilişkili olduklarından, simülasyon ortamları arasında eş zamanlı veri alışverişinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu ise ilgili sinyallerin simülasyon programları arasında değiştirildiği ara yüzlerin oluşturulmasını gerektirir.

2.3.2 Sanki-statik araç modelleme yöntemi – Tekerlekten komponente kuvvet iletimi – Geri yönde modelleme metodolojisi

Sanki-statik simülasyon yöntemi ise olay akışının tersine çevrildiği yani istenen hız profilinin gerçekleştirildiği kabulü ve bu profile yönelik kuvvet ve hız dengesinin oluşturulduğu modellerdir. Bu kuvvet ve hız dengesi ise komponentlerdeki verimlerin hesaplanmasında kullanılarak güç aktarma organlarında gerçekleşen tüketim karakteristiğini oluşturmaktadır. Geri yönde ilerleyen olay akışında sürücü davranışının modellenmesine gerek yoktur. Öte yandan fiziksel büyüklüklerin sebep sonuç ilişkisi de tersine çevrildiğinden komponentlerin ve alt sistemlerin dinamik

özellikleri eğer enerji tüketimi açısından dominant değil ise alınmamakta ya da kısıtlı kabullerle modellenmektedir. Bu modelleme metodolojisine sanki-statik denilmesinin sebebi ise, bahsedilen sistem davranışının büyük ölçüde statik davranışlarla incelenmesi, ancak dinamik olarak mutlak incelenmesi gereken davranışların statik olanlarla birleştirilmesidir.

Örneğin bu tez kapsamında kullanılan sanki – statik modelin içeriğinde batarya davranışı tam bir dinamik sistem olarak incelenmiş ve sistem durumlarının davranışı dinamik olarak çözümlenmiştir. Bölüm 3’te bu davranış daha detaylı irdelenmiştir.

Bu tip bir modelleme yapısının iki önemli avantajı vardır. Birinci olarak enerji davranışının sistemin dinamik davranışından kısıtlı olarak etkilenmesinden ötürü, bu modelleme de yapılan hatalar göz ardı edilebilir. Bu da geliştirilen yöntemlerin hızlı bir şekilde incelenmesine olanak sağlar. Tasarım için kullanılan matematiksel yöntemler, bir başka deyişle optimizasyon algoritmalarının yapısı böyle bir modelleme yapısına ihtiyaç duymaktadır. Diğer bir avantaj ise kullanılan bazı enerji yönetimi algoritmaları model tabanlı olup sistem davranışının kestirilmesine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle kontrol sistemi içerisinde yer alacak modelin hızlı ve kolay sonuç verecek bir yapıda olması gerekmektedir.

2.4 Öngörülü Hibrid Araç Enerji Yönetim Sistemleri ve İletişim Teknolojileri

Akıllı Ulaşım Sistemlerinin¹⁴ yaygınlaşması, kullanılan verilerin güvenilirliğinin artması, birçok alanda kablosuz iletişimin mümkün olması, bu verilerin araçlar içinde nasıl kullanılacağına yönelik soruları akla getirmektedir. Günümüzde üreticiler, önceleri sadece bilgilendirme amaçlı kullanılan bu verileri, artık hem güvenlik hem de aktarma organlarının kontrolünde kullanma yollarını araştırmaktadırlar. Özellikle, sürücünün ekonomik olmayan sürüş karakteristiklerini bertaraf edecek ya da yol ile ilgili belirsizlikleri ortadan kaldıracak birçok veri günümüzde araca aktarılmaya müsait olmaya başlamaktadır. Otonom bir aracın tasarımında artık sadece otonomi misyonunu yerine getirmeye yönelik kontrollerden ziyade sürüşün verimliliğini artıracak aksiyonlarında gerçekleşmesi için çalışmalar hızla devam etmektedir.

Bu anlamda aracın pozisyon ve yol bilgisi en önemli verilerden biridir. Her ne kadar günümüz navigasyon sistemleri, aracın pozisyonlamasını sağlayacak GPS alıcısına ve

¹⁴ İng Çev: Intelligent Transportation Systems

aynı zamanda yol ile ilgili harita bilgisine sahipse de, bu verilerin kalitesi ve güvenilirliği, istenen kontrol yapısının geliştirilmesi için yeterli değildir. Bu anlamda, her türlü araç içi öngörülü yazılım için daha yüksek veri kalitesi, yol ile ilgili daha fazla ve doğru bilgi gerekmektedir. Bu amaçla viraj eğrilikleri, yol topoğrafyası, şerit sayısı vb. gibi birçok bilginin tekrar derlendiği ve belirli bir data yapısı içerisinde araca sunulduğu ADAS-RP protokolü geliştirilmiştir. Elektronik Ufuk (*e-ufuk*)¹⁵ olarak adlandırılan ve kontrol sisteminin ihtiyaç duyacağı birçok veri istenildiği takdirde araç içinde kullanılabilir. Bu veriler, anlık olarak gelişmiş ve detaylı yol ve harita bilgilerinden elde edilebilmektedir. Bu tez kapsamında kullanılacak öngörülü kontrol sistemlerinin değerlendireceği veriler bu protokole hazırda bulunan verilerin yapısıyla uyumlu olmuştur.

Öte yandan, HEA'nın öngörülü kontrol stratejisi için hangi verilerin kullanılacağı, başta bahsedildiği üzere şarj kontrol stratejisi ile yakından ilgilidir. Öyle ki, ŞE-HEA için öngörülü enerji yönetimi stratejisi tüm seyahat süresine yayılmalıdır. Zira batarya kontrolü ve düşük batarya seviyelerine ulaşmak uzun menziller gerektirmektedir. Bu noktada tüm yol ile ilgili detaylı verilerin ele alınması ve işlenmesi oldukça fazla bir işlem yükünü getirecektir.

Diğer taraftan, şarj edilemeyen HEA'da sınırlı batarya çalışma alanı bu kadar uzun menzilli stratejiler yapmayı gerektirmez. Zira çalışma şartlarına bağlı olarak şarj değişimi nispeten daha hızlıdır. Bu anlamda bu tip araçların şarj kontrolü için daha sık verilerin kullanılması gerekmektedir. Öte yandan yol üzerindeki eğim bilgisinin yanı sıra, viraj bilgileri, hız limitleri gibi araç hızını etkileyecek faktörler de araç hızının tahmin edilmesinde kullanılabilir. Böylece, ŞE – HEA'lara göre daha kısa mesafeli, ancak daha hassas bir e-ufuk bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır.

¹⁵ İng Çev: Electronic Horizon, e-horizon

3. ARAÇ MODELLEMESİ

Bölüm 2’ de özetlendiği üzere, bu tez kapsamında geliştirilen ve test edilen HEA enerji yönetimi stratejileri iki farklı model kullanılarak simüle edilmiştir. Bu yöntemlerden birincisi aracın sadece boylamsal dinamiğini belirli ölçüde temsil eden ve kısmi dinamik bir yapı içeren sanki-statik modelleme tekniği, diğeri ise güç aktarma organlarının temel dinamik yapısı ile araç dinamiği, yol tekerlek ilişkilerini detaylı bir şekilde inceleyen tam dinamik modelleme metodolojisidir.

Birinci yönteme Bölüm 4’te inceleneceği gibi hem Enerji Yönetim Sistemlerinin denenmesi amacı ile hem de özellikle bu tasarım aşamasının ihtiyaç duyduğu matematiksel optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasında ihtiyaç duyulmaktadır. İkinci yöntem ise, hem birinci modelleme metodolojisi ile varsayılan kabullerin gerçekte ne kadar geçerli olduğunun denenmesi, hem de uygulamanın kapsamlı bir araç modeli ile gerçek kullanım koşullarına benzer bir ortamda test edilmesi açısından gereklidir.

Bu tez kapsamında geliştirilen modellerden ilki tamamen matematiksel modellerin MATLAB Komut Dosyası¹⁶ ve MATLAB/Simulink ortamında uygulanmasına dayanır. Bu çerçevede enerji yönetimi tasarımlarının ve ilgili simülasyonların gerçekleştirilmesi de bu ortamlarda olmaktadır.

İkinci yönteme ait metodoloji ise daha çok mevcut matematiksel modellerin hali hazırda var olduğu paket programlar kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlara dayanmaktadır. Ancak bu programlarda simüle edilecek sistemin baştan modellenmesi, güç aktarma organı modeli için kullanılacak aktarma organı topolojisinin oluşturulması, araç aktarma organı ilişkisinin ve benzeri araç özelliklerinin modellerde hazırlanması, modellerde doğru parametrelerin kullanılması, araç, yol ve trafik özelliklerinin modellerde oluşturulması gerekmektedir. Öte yandan, farklı programlarda geliştirilen araç modeli (CarMaker), güç aktarma organı modeli (AVL CRUISE) ve kontrol sistemi (MATLAB Simulink) alt-sistem modellerinin

¹⁶ MATLAB script

eşzamanlı kullanılmasını sağlayacak simülasyon ara yüz yapısının da oluşturulması gerekmektedir.

Her ne kadar ikinci simülasyon metodolojisinde alt sistemlerin matematiksel ve fiziksel modellerinin oluşturulmasına ilişkin bir çalışma yapılmasa da, modellerin işlevsel hale gelmesi son derece uzun ve detaylı çalışmaya aynı zamanda programlarının kullanımı ve davranışına ilişkin belirli bir kullanıcı tecrübesi gerektirmektedir.

3.1 Hibrid Elektrikli Araç Güç Aktarma Organı Topolojisi

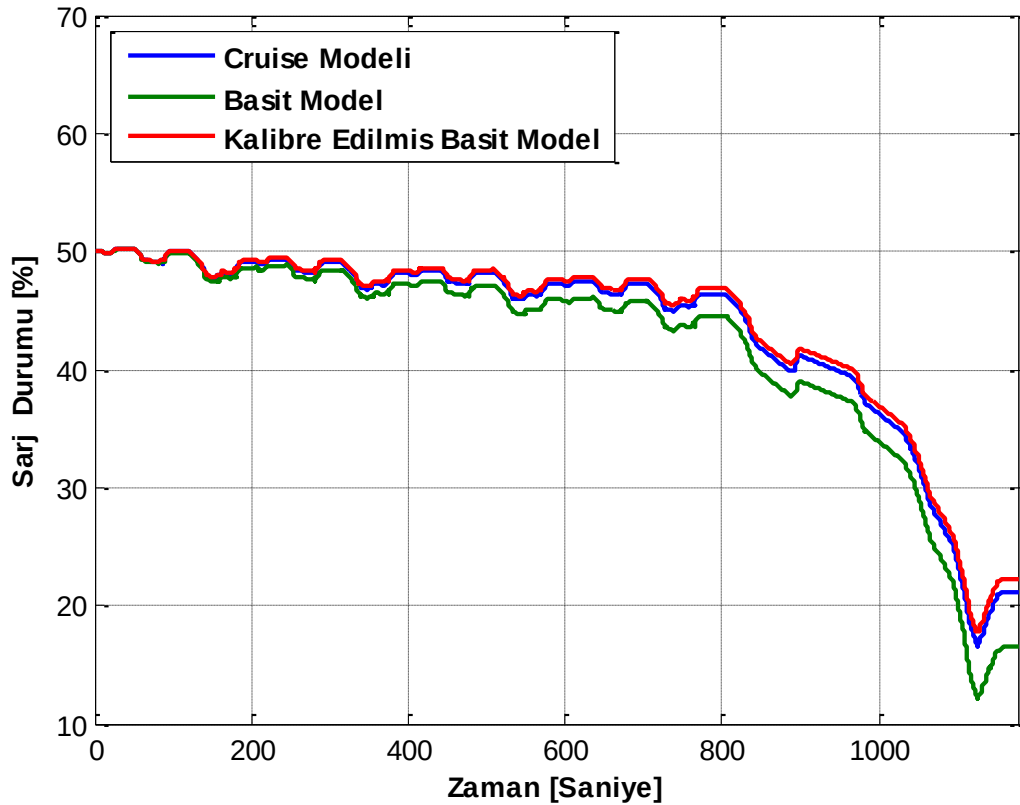
Daha önce de bahsedildiği üzere bu tez çalışmasının ana hedeflerinden biri de, mevcut literatürde kullanılan Enerji Yönetim Sistemlerinin detaylı ve karşılaştırmalı analizinin yapılması ve bu yöntemlerden elde edilecek tecrübe ile özgün bir Öngörülü Enerji Yönetim Sistemi tasarımı gerçekleştirilmesidir. Elbette ki, optimize edilmeye çalışılan araç enerji tüketim davranışı, araç, güç aktarma organları ve sürüş profilleri ile temelden bağıntılıdır. Bu anlamda yapılan her hangi bir optimal davranışın, başka bir topoloji ya da komponent varyasyonunda işlevsel olacağı garanti edilemez. Ancak, kullanılan yöntemler ve metotların, başka diğer HEA varyantlarına da uygulanabilmesi mümkündür.

Öte yandan, daha önce de vurgulandığı üzere, belirli bir güç aracın aktarma organı topolojisi kapsamında, kullanılan batarya ve şarj teknolojisine bağlı olarak normal bir HEA ya da ŞE-HEA olması farklılık optimal problemin tanımında farklılıklar getirmektedir. Bu iki Hibrid teknolojisi öncelikle başta batarya kapasitesi olmak üzere kullanılan komponent özellikleri açısından farklılık gösterdiği gibi, Bölüm 4’de detaylı olarak inceleneceği üzere şarj kontrol stratejisinin de farklılık göstermesi anlamına gelmektedir.

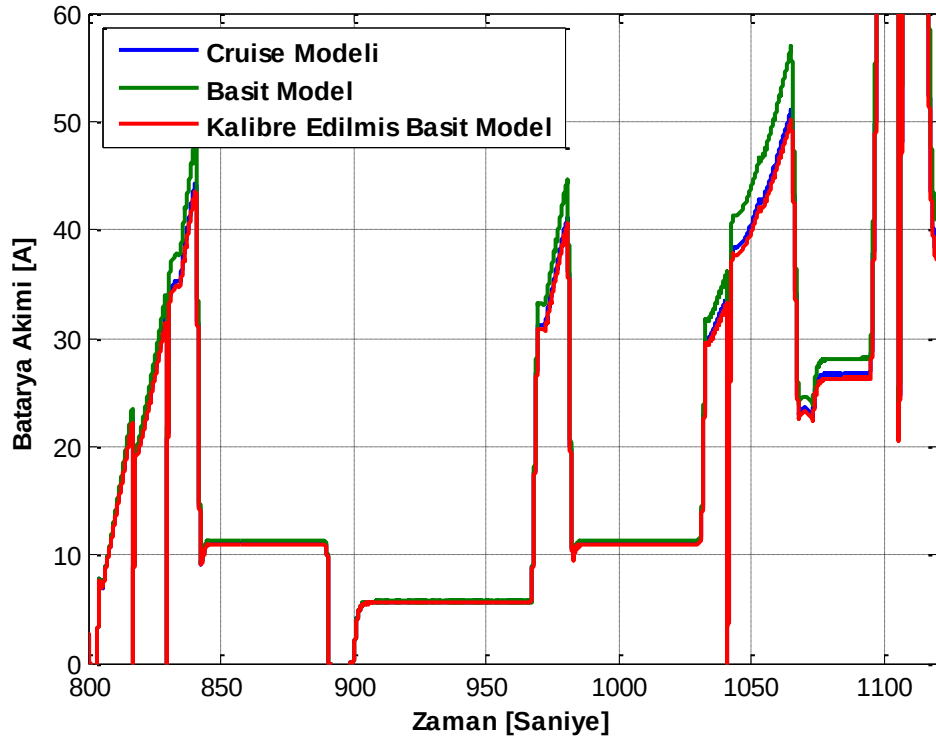
Bu bilgiler ışığında bu tez kapsamında, kendi içerisinde farklı sürüş modlarına sahip olması açısından, belirli ölçüde diğer topoloji özelliklerinin de özelliklerini içermesi, öngörülü kontrol sistemleri için gerekli olan alternatif sürüş modlarına sahip olması, ayrıca kontrol ve optimizasyon teorisi için anlamlı bir problem oluşturması açısından Paralel Hibrid Konfigürasyonu kullanılmıştır.

3.3 Araç Modelleri

Daha öncede belirtildiği üzere iki farklı yöntemeye dayanan araç simülasyon modelleri, HEA performanslarının değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Bu bölümde Geri Yönde Modelleme metoduna dayanan denklemler sunulmuştur. Öte yandan bu kısımda sunulan tüm davranış ve parametreler kompleks model yapısında da kullanılmıştır. Ancak olay akış yönündeki farklılıktan ötürü, davranışlarda bazı farklılıklar bulunmaktadır. Öte yandan kompleks model geliştirilirken kullanılan modelleme araçlarında komponentlerin dayandığı matematik modellere ulaşım çoğu zaman kısıtlıdır. Bu anlamda, kimi zaman, ilk modeldeki davranış ile ikinci model yapısındaki davranışı benzetebilmek adına, ilk model parametrelerinin bazılarının ikinci modele göre kalibre edilmesi gerekmektedir. Örneğin aynı kontrol girişlerine sahip kompleks model ve basit model arasında, batarya şarjı açısından farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu durumda batarya fiziksel parametreleri iki model davranışı örtüşene kadar belirli oranlarda kalibre edilmiştir.



Şekil 3.2 : Basit model, kompleks model ve tekrar kalibre edilmiş basit model için batarya şarj durumu karşılaştırması.



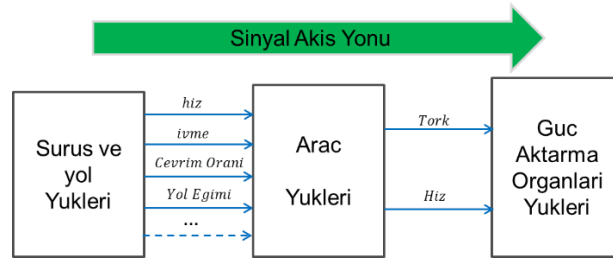
Şekil 3.3 : Basit model, kompleks model ve tekrar kalibre edilmiş basit model için batarya akımı karşılaştırması.

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de, NEDC kullanılarak simüle edilmiş, basit model ve kompleks modele ait batarya davranışları görülmektedir. Buna göre iki model arasında, belirli oranda farklı davranışlar söz konusudur. Bu farklılıkları gidermek adına, Basit Model parametreleri uygun şekilde kalibre edilmiş ve kompleks modele daha yakın bir davranış elde edilmiştir. Şekil 3.3’de aynı zamanda kalibre edilmiş bu davranış da görülmektedir.

3.3.1 Sanki-statik araç modelleme yöntemi – Tekerlekten komponente kuvvet iletimi – Geri Yönde Modelleme Metodolojisi

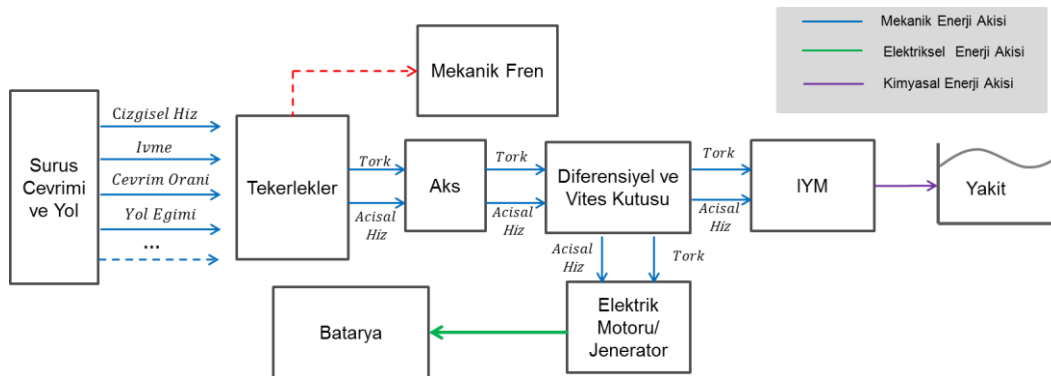
Sanki-statik araç modelinde fiziksel olarak enerji akış hesaplama yönü tersine yönde, yani tekerleklerden komponentlere doğrudur. Bu bakımdan en genel anlamda herhangi bir sürüş karakteristiği ya da en yaygın kullanımı ile bir hız-zaman ilişkisi simüle edildiğinde, ilgili bu profilin hatasız takip edildiği düşünülmektedir. Bu profilin araç komponentleri üzerine etkiyeceği yükler hesaplanmakta ve son olarak da bu yüklerin güç organları üzerinde hangi kuvvet ve hızları meydana getireceği elde edilmektedir. Bu noktada hız ve kuvvetlerin komponentler arasında en uygun şekilde nasıl dağılabileceği enerji yönetiminin görevidir.

Şekil 3.4’de bahsedilen sanki-statik modelin genel sinyal akış görülmektedir. Örneğin her hangi bir sürüş çevriminden elde edilecek ve sürüş çevrimini karakterize eden hız, ivme, çevrimi oranı, yol eğimi ya da daha farklı parametreler, araç üzerinde çeşitli yükler oluşturmaktadır. Bu yükleri karşılamak elbette ya tahrik elemanlarının ürettiği kuvvetle ya da aracın mekanik fren sırasında meydana gelen sürtünme kuvveti ile karşılanmaktadır. İşte güç aktarma organlarında meydana gelen bu kuvvet eşitliğinin sürüş profilinin her anında bir kuvvet ya da tork ile hız karşılığı bulunmaktadır. Bu tork ve hız sinyalleri, komponentlerin o anda hangi koşullarda ve hangi verimlerle çalıştığının hesaplanmasına yardımcı olur. Bu da belirtilen sürüş çevrimine dair enerjetik bileşenlerin bulunmasını sağlar (Ör: Mekanik Güç Profili, Elektrik Güç Profili, vs.).



Şekil 3.4 : Geri yönde modelleme metodolojisi için sinyal akış yönü.

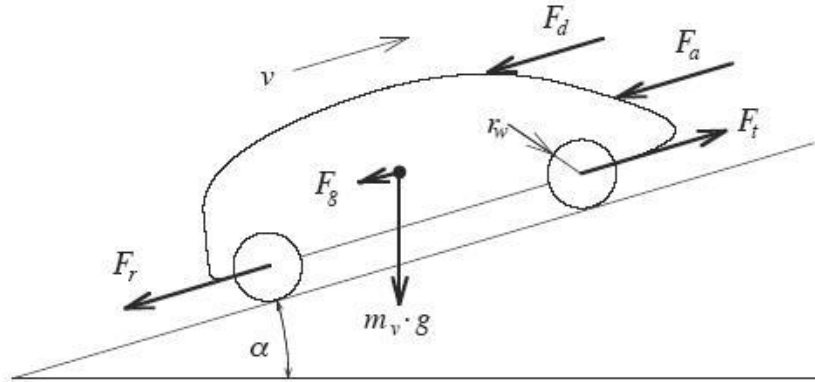
Şekil 3.5’de enerji akışı bu tez kapsamında incelenmekte olan paralel hibrid elektrikli araç topolojisi özelinde geri yönde modelleme metodolojisine uygun olarak görülmektedir. Görüldüğü üzere her komponent bir önceki komponentten gelen mekanik, elektrik ya da kimyasal sinyali koşulsuz kabul etmekte ve buna göre bir sonraki komponente iletilecek sinyalleri üretmektedir.



Şekil 3.5 : Paralel HEA için tekerlekten komponente enerji akış şeması.

Sürüş çevriminden gelen giriş sinyalleri, en basit hali ile hız-zaman profili, öncelikli olarak aracın özelliklerine uygun olarak net çekiş kuvvetine dönüştürülmektedir.

Şekil 3.6’de en genel şekli ile bir araca etki eden başlıca kuvvetler görülmektedir.



Şekil 3.6 : Genelleştirilmiş durum için araca etkiyen kuvvetler.

Buna göre F_d , aracın atalet kuvvetlerini, F_a , araca etki eden aerodinamik kuvvet bileşenini, F_r , tekerlekteki yuvarlanma direnç kuvvetini, F_g , yol eğiminden kaynaklanan eğim kuvvetini temsil etmektedir. Tüm bu direnç kuvvetleri etkisi altında araç sürücü güç ihtiyacını karşılayabilmek adına F_t , net çekiş kuvvetini oluşturmak zorundadır. Bu net kuvvet elbette aracın tahrik elemanları tarafından üretilmekte ya da fren sistemi ile karşılanmaktadır.

Öncelikle aracın üzerine etkimekte olan bu kuvvetler elbette yol eğimi, araç ağırlığı ve hız-ivme zaman ilişkisi ile ilgilidir. Buna göre:

$F_d(t)$, aracın atalet kuvvetinin zamana bağlı değişimi, $m_{araç}$ araç ağırlığı, $a(t)$ araç hızının zamanla değişimi olmak üzere

$$F_d(t) = m_{araç}a(t) \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir.

F_a , aracın aerodinamik direnç kuvvetinin zamana bağlı değişimi ρ , hava yoğunluğu, A_f efektif araç yüzeyi, C_d aerodinamik direnç katsayısı, $V_{araç}(t)$ araç hızı olmak üzere

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \rho A_f C_d V_{araç}^2(t) \quad (3.2)$$

şeklinde elde edilir.

F_g , aracın üzerindeki yol eğiminden kaynaklanan kuvvet olacak şekilde

$$F_g(t) = m_{araç}g \sin\theta(t) \quad (3.3)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Burada $\theta(t)$ yol eğimini göstermekte olup araç hız – zaman profili kullanılarak zamana bağlı bir değere çevrilmektedir.

Araca etkiyen bir başka direnç kuvveti de tekerlek direnç kuvveti olup

$$F_r(t) = m_{araç}g\eta_{ydf} \quad (3.4)$$

denklemleri ile elde edilmektedir. Burada η_{ydf} ile ifade edilen yuvarlanma direnci katsayısıdır. Araca etki eden tüm bu direnç kuvvetleri, tekerlek ve tekerlek aksı ile beraber aktarma organlarına etkir.

Buna göre, R_{ef} , efektif tekerlek yarıçapı olmak üzere,

$$F_{net}(t) = F_d(t) + F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) \quad (3.5)$$

$$F_{net}(t) = \frac{T_{net,aks}(t)}{R_{ef}} \quad (3.6)$$

şeklindeki basit ifade ile akstaki net tork elde edilir. Bu net tork, ya İYM ve EM tork toplamına eşit olmak durumundadır. Buna göre en genel ifade ile çekiş anında,

$$T_{net,aks}(t) = [T_{IYM}(t) \times u(t) + T_{EM}(t) \times (1 - u(t))] \times i_{tr}(N) \cdot i_{dif} \cdot \eta_{tr}(N) \cdot \eta_{dif} \quad (3.7)$$

İYM ve EM torku belirli oranlarda paylaştırılmakta ilgili vites ve diferansiyel oranları ile tekerleklere aktarılmakta sonuçta yukarıda bahsedilen net torku karşılamaktadır. Bu ifadede, $T_{IYM}(t)$, t anındaki İYM torku, $T_{EM}(t)$ t anındaki EM torku, $u(t)$ İYM/EM tork paylaşım oranı, i_{tr} transmisyon çevrim oranı, N seçili vites kademesi, η_{tr} transmisyon verimi ve η_{dif} diferansiyel verimini ifade etmektedirler.

Frenleme anında ise tüm yol yükü fren torku tarafından karşılanmaktadır. Dolayısı ile

$$T_{net,aks}(t) = T_{fren}(t) \quad (3.8)$$

şeklinde yazılabilir.

Hız değerleri için de benzer şekilde, her komponent için ilgili çevrim oranları ve tekerlek yarıçapı kullanılarak elde edilmektedir. Buna göre,

$$V_{araç}(t) = \omega_{aks}(t) \times R_{ef} \quad (3.9)$$

$$\omega_{aks}(t) = \omega_{dif}(t)/i_{dif} \quad (3.10)$$

$$\omega_{dif}(t) = \omega_{EM}(t)/i_{tr}(N) \quad (3.11)$$

$$\omega_{dif}(t) = \omega_{IYM}(t)/i_{tr}(N) \quad (3.12)$$

ifadeleri ilgili komponentlerin hızlarını elde etmek için yeterlidir.

Elektrik Motoru için mekanik ve elektriksel enerji tekerlekten motora ya da motordan tekerleğe doğru iletilebilmektedir. Bir başka deyişle, Elektrik Motoru hem tahrik amaçlı hem de, jeneratör modunda mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek amacı ile de görev yapmaktadır. Paralel HEA topolojisinde, EM'nin jeneratöre modunda çalıştığı iki durum vardır. Birincisi geri kazanımlı frenleme için,

$$T_{fren}(t) = T_{mek.fren}(t) + T_{el.fren}(t) \quad (3.13)$$

bağıntısı şeklindedir.

Öte yandan Paralel Şarj Modunda, İYM gücünün bir kısmı, tekerleklere iletilirken, bir kısmı EM üzerinden elektrik enerjisine çevrilerek bataryada depolanabilir. Özellikle, yol yüklerinin düşük olduğu durumlarda, İYM'nin daha verimli çalışma noktalarını kullanmak adına bu mod aktive olmaktadır. Bu anlamda,

$$T_{IYM}(t) = T_{IYM,tahrik}(t) + T_{IYM,elektrik}(t) \quad (3.14)$$

$$T_{IYM,elektrik}(t) = T_{jen.,elektrik}(t) \quad (3.15)$$

En genel hali ile EM üzerinden mekanik enerji ile elektrik enerji arasındaki enerji çevirimi doğal olarak belirli bir verim ile gerçekleşmektedir. Bu verim değerleri, pratikte EM motorunun rotor ve stator sıcaklıklarından, EM terminal voltajından etkilenmektedir. Ancak bu tez kapsamında ele alınan motor modelinde bu etkilerden bahsedilmemiştir. Bu anlamda EM verim değerleri sadece motor çalışma noktaları yani motor torku ve hızına göre değişiklik göstermektedir.

Bu anlamda EM tahrik modunda çalıştığında,

$$P_{mek.}(\omega_{EM}, T_{EM.mek.}) = P_{el.} \times \eta_{EM,tahrik}(\omega_{EM}, T_{EM.mek.}) \quad (3.16)$$

jeneratör modunda çalıştığında ise

$$P_{el.} = P_{mek.}(\omega_{EM}, T_{EM.mek.}) \times \eta_{EM,jen.}(\omega_{EM}, T_{EM.mek.}) \quad (3.17)$$

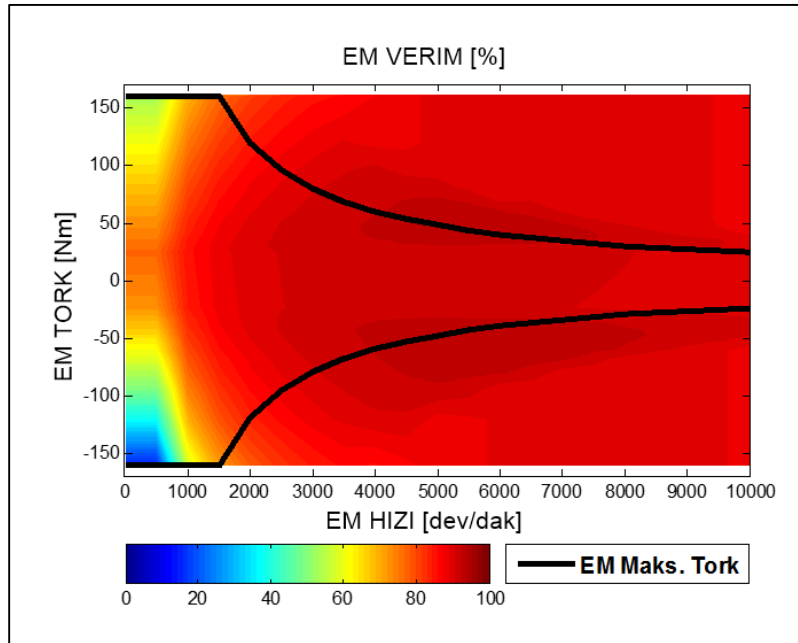
ifadeleri ile kullanılır. Bir başka deyişle

$$\eta_{EM,tahrik} = \frac{T_{EM.mek.}(t) \cdot \omega_{EM}(t)}{U(t) \cdot I_{deşarj}(t)} \quad (3.18)$$

$$\eta_{EM,jen.} = \frac{U(t) \cdot I_{şarj}(t)}{T_{EM.mek.}(t) \cdot \omega_{EM}(t)} \quad (3.19)$$

Aynı zamanda bu verim değerleri elektrik motoru içerisindeki, sıcaklık, manyetik ve sürtünme ile ilgili kayıplarla beraber, invertör içerisindeki akım anahtarlama ve ısı kayıpları da ifade etmektedir.

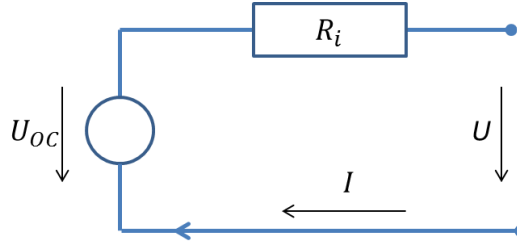
Bu tez kapsamında Şekil 3.7’de karakteristiği görülmekte olan Sabit Mıknatıslı DC bir Elektrik Motoru kullanılmıştır.



Şekil 3.7 : EM verim haritası.

Batarya sisteminin modeli, bataryanın Şekil 3.8’de şeması görülmekte olan eşdeğer devre modeline dayanmaktadır. Bu yaklaşımda devre, bir güç kaynağı ve pilin iç dirençlerini temsil eden iç dirençlerden meydana gelmektedir. Bu basitleştirilmiş model, belirli ölçüde batarya hücresinin davranışını temsil etmektedir. Öte yandan

pilin gerilim ve iç direnç değerleri sabit olmayıp pilin batarya şarj seviyesine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3.8 : Batarya eşdeğer açık devre modeli.

Bu bağlamda şekildeki devrenin açık uçları arasındaki gerilim $U(t)$

$$U_{OC}(t) - R_i \cdot I(t) = U(t) \quad (3.20)$$

ile ifade edilmektedir. Burada görüldüğü gibi devrenin açık çevrim gerilimi, bataryanın iç direnci oranında azalmaktadır. Gerçek bir batarya sisteminde, yukarıdaki basitleştirilmiş devre şeması, her hücre için yaklaşık olarak hücrenin gerilim davranışını ifade etmektedir. Tüm batarya paketi içerisinde bulunan paralel ve seri bağlanmış tüm bu hücre sistemi, benzer bir şekilde yaklaşık olarak bu modelle ifade edilebilir.

Yukarıdaki denklemin her iki tarafı $U(t)$ ile çarpılırsa

$$U_{OC}(t) \cdot U(t) - R_i \cdot I(t) \cdot U(t) = U^2(t) \quad (3.21)$$

şeklini alır. Bu denklemde ilgili kısma, elektriksel güç ifadesi

$$P_{elektrik}(t) = U(t) \cdot I(t) \quad (3.22)$$

olacak şekilde yerleştirilirse

$$U^2(t) - U_{OC}(t) \cdot U(t) + P_{el.}(t) \cdot R_i = 0 \quad (3.23)$$

elde edilir. Bu denklemin kökleri

$$U(t) = \frac{U_{OC}(t)}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{U_{OC}^2(t)}{4} - P_{el.}(t) \cdot R_i \right)} \quad (3.24)$$

şeklinde olup, batarya modelinin terminal voltajı, $U(t)$ 'yi verir. Batarya üzerindeki şarjdeşarj akımı, $I_{şarj/deşarj}(t)$ ise

$$U(t) = R_i \cdot (I_{şarj\simdeşarj}(t)) \quad (3.25)$$

elde edileceğinden, yukarıdaki devreden geçen akım değeri

$$I_{şarj\simdeşarj}(t) = \frac{U_{oc}(t) - \sqrt{\left((U_{oc}^2(t)) - P_{el.}(t) \cdot R_i \right)}}{2 \cdot R_i} \quad (3.26)$$

ifadesi ile elde edilir. Dolayısı ile batarya modeli üzerinde, bataryadan çekilen güç, eşdeğer batarya iç direnci ve bataryanın açık çevrim gerilimi bilinirse, batarya akımı elde edilir.

Daha önce de belirtildiği üzere, bataryadan çekilen güç, $P_{el.}(t)$, EM modeli ve verim değerleri ile kolayca hesaplanabilmektedir. Öte yandan, $U_{oc}(t)$, açık devre gerilimi ise, şarj vedeşarj durumları için, batarya şarj seviyesine bağlı değerlerdir ve şarj seviyesine bağlı olarak elde edilir. Şarj seviyesinin hesaplanmasından önce, yukarıdaki akım denkleminin bazı karakteristiklerine değinmekte fayda vardır.

$$U^2(t) - U_{oc}(t) \cdot U(t) + P_{el.}(t) \cdot R_i = 0 \quad (3.27)$$

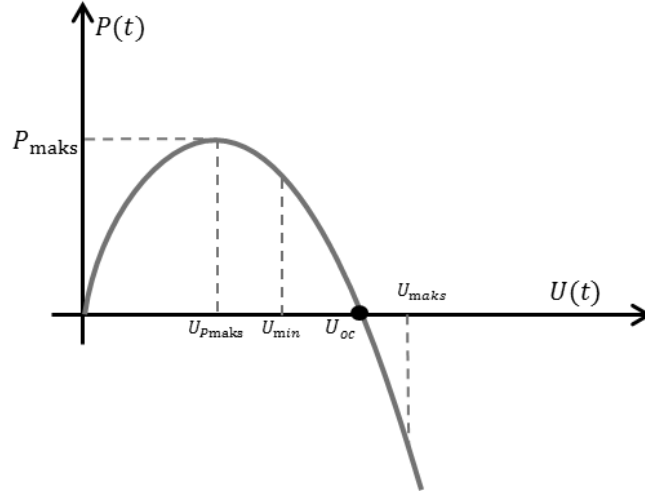
denklemini $P_{el.}(t)$ için yeniden düzenlenirse

$$P_{el.}(t) = \frac{-U^2(t) + U(t) \cdot U_{oc}(t)}{R_i} \quad (3.28)$$

şeklini alır. Bu ifadeye göre, $U(t) = 0$ ve $U(t) = U_{oc}(t)$ için $P_{el.}(t)=0$ değerini alır. Bu iki gerilim arasındaki gerilim değerleri arasında dolayısı ile batarya gücü pozitif olmakla beraber bir de maksimum değere ulaşır. Teorik olarak maksimum batarya gerilimi, Şekil 3.9'da görüldüğü üzere

$$P_{maks}(t) = \frac{-U_{oc}^2(t)}{4R_i} \quad (3.29)$$

Değerinde oluşmaktadır. Pratikte batarya gerilimi maksimum batarya gücünden genelde daha yüksek U_{min} ve U_{maks} değerleri arasında kullanılmaktadır. Bu anlamda batarya U_{min} ve U_{oc} arasındadeşarj olmaktadır.



Şekil 3.9 : Batarya gücünü batarya gerilimi ile değişimi.

Benzer şekilde teorik olarak bataryaya $U(t) > U_{oc}(t)$ olacak şekilde akım gönderilerek şarj edilebilir. Ancak, pratikte şarj gerilimi U_{maks} değerinde sınırlandırıldığından maksimum bataryayı şarj edebilecek akım ve güç de dolayısı ile sınırlandırılmış olur. Bu kısıttan dolayı, bataryayı şarj edecek güç zaman zaman, mekanik kısıtlardan ziyade batarya gerilimi sınırıdır.

Yukarıda ifade edilen denklemlerin tamamı, aslında basit fiziksel bağıntılardır. Sanki-statik araç modeline ait tek dinamik durum denklemi, batarya için kullanılmıştır.

Buna göre, bataryanın şarj dengesi - SOC (State of Charge), $SOC(t)$, bataryanın mevcut durumda kullanabildiği elektriksel şarj miktarı, $Q(t)$ 'nin, bataryanın maksimum şarj miktarı, Q_{maks} 'a oranını ifade eden boyutsuz bir büyüklüktür.

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{maks}} \quad (3.30)$$

Aynı zamanda,

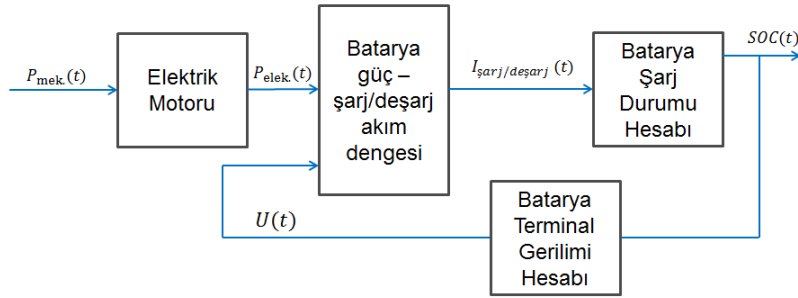
$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{maks}} = -\frac{1}{Q_{maks}} \int I(t) dt \quad (3.31)$$

şeklinde de ifade, bataryanın terminal akımına bağlı olarak da ifade edilebilir.

Bu denklem şu şekilde düzenlenirse,

$$\frac{dSOC}{dt} = -\frac{I(t)}{Q_{maks}} \quad (3.32)$$

elde edilir. Şekil 3.10'da batarya modeli sinyallerinin hangi akış sırası ile elde edildiği görülmektedir.

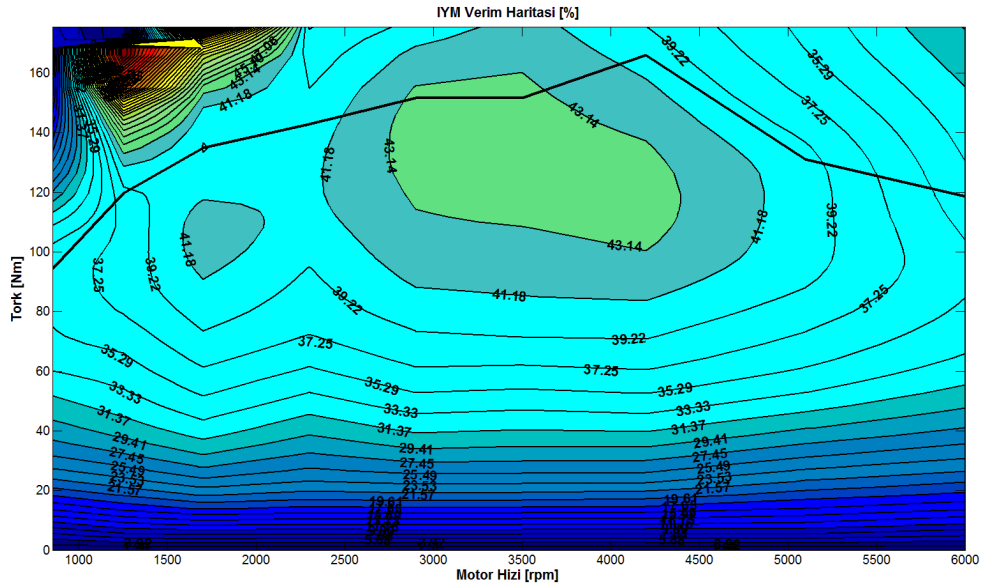


Şekil 3.10 : Batarya modeli sinyal akış şeması.

İYM temel olarak yakıt tüketim karakteristiği ile ifade edilmektedir. Bu model yapısında, İYM'nin ait gecikmeler göz önünde bulundurulmamıştır. Bu anlamda, İYM'nin yakıt tüketim karakteristiği, statik tablolar ile ifade edilmiştir. Buna göre İYM'nin yakıt tüketim özellikleri

$$\dot{m}_{yakıt}(t) = f(\omega_{IYM}, T_{IYM}) \quad (3.33)$$

şeklinde bir fonksiyonla en genel şekilde temsil edilebilir.



Şekil 3.11 : İYM yakıt tüketim haritası.

Çizelge 3.1'de göz önünde bulundurulmuş HEA ve ŞE-HEA araçlarının temel parametreleri özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 : HEA ve ŞE-HEA için test koşulları.

	HEA	ŞE-HEA
Batarya Maks. Kapasite [Ah]	6.2	41
Batarya Nominal Voltaj [V]		310
Ortalama Batarya İç Direnci [Ω]		0.5
EM Maks. Tork [Nm]		155
EM Güç [kW]		25
İYM Güç [kW]		75
Vites [-]	5 kademe Otomatik Şanzıman	
Araç Ağırlığı [kg]		1600

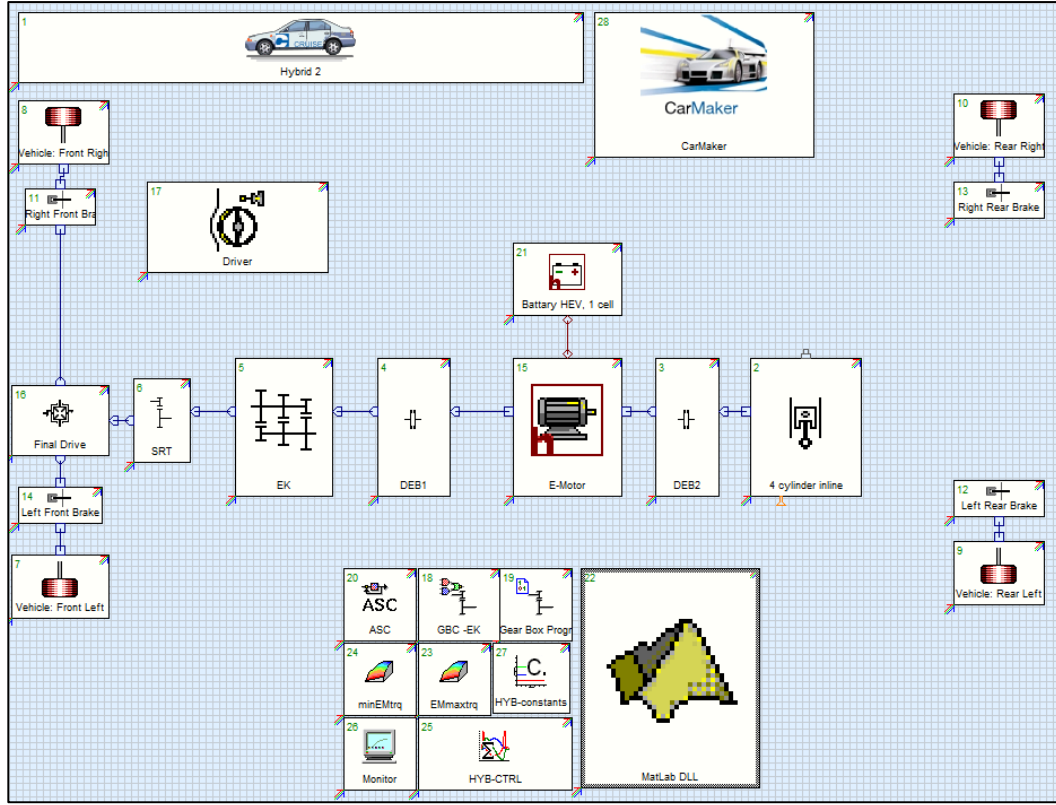
3.3.2 Gelişmiş araç modeli

Kompleks araç modeli daha önce de bahsedildiği üzere, birden fazla simülasyon programı kullanmakta 3 farklı simülasyon modeli aynı anda senkronize olarak simüle edilebilmektedir.

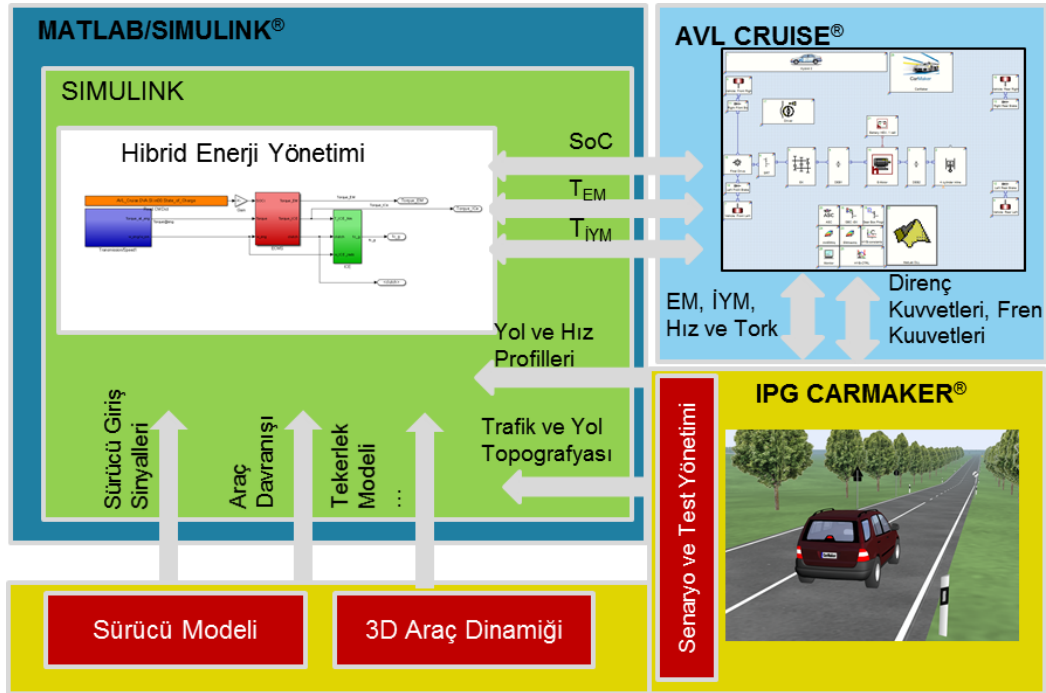
Bu çerçevede kullanılan,

- CarMaker yazılımında, 3D araç dinamiği, tekerlek modeli, sürücü modeli, 3D yol trafik modeli araç navigasyon sistemi ve benzeri sensör modellemesi simülasyonları;
- CRUISE modelinde tüm hibrid ve aktarma organları dinamikleri, batarya modellemesi, otomatik vites kontrolcüsü, yakıt tüketim hesaplamaları ve mekanik fren simülasyonları;
- Matlab/Simulink ortamında geliştirilen kontrol sistemlerinin modellemesi

gerçekleştirilmektedir. Tüm ortamların kendilerine ait diferansiyel denklem çözücülerini olmakla beraber, simülasyonlar gerçekleştirilen arayüz kanalları aracılığı ile sinyal değişiklikleri sağlanmaktadır.



Şekil 3.12 : Paralel HEA güç aktarma organları CRUISE modeli.



Şekil 3.13 : Gelişmiş eş-simülasyon ortamı ve simülasyon ortamları arası arayüzleri.

4. HEA İÇİN OPTİMAL ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ

Daha önceki bölümlerde de izah edildiği üzere, enerji yönetim sistemleri sürücünün isteğine karşılık gelecek güç talebini ilgili organlara aktarmakla sorumlu, ancak bunu yaparken enerji tüketimi, batarya durumları, hibrid araç komponentlerinin maksimum hız ve güç özellikleri ve benzeri çeşitli unsurları göz önünde bulunduran kontrol sistemleridir. Kısacası sürücü gaz pedalı, fren pedalı ya da vites gibi sürücü komutlarını, ilgili komponentler için geçerli giriş sinyallerine çevirmektedir.

Aslında temel olarak bakıldığında bu Enerji Yönetim Sisteminin çalışma prensibi tüm hibrid araç komponentlerine, optimal bir enerji tüketimi için, belirlenmiş çalışma koşullarında (Ör: Sürüş Çevrimi) en uygun sinyallerin gönderilmesidir. Bu problem, Bölüm 3'te modellenmesi gerçekleştirilen araç ve çekiş sistemi elemanlarının verim değerlerinden faydalanılarak çözülmektedir. Eğer tüm çalışma koşulları zamandan bağımsız birer verim ifadesi ile tanımlanabilse idi, bu problemin çözümü en kısa yolla, herhangi bir çalışma noktası için en optimal sonucu verecek girişlerle önceden kolayca hesaplanarak elde edilebilirdi.

Örneğin araçtaki tüm komponentlerin verim ifadeleri, x_i, u_i sırası ile sistem durumu ve sistem girişi şeklinde dinamik olmayan bir f fonksiyonuyla ifade ediliyor olursa,

$$\eta_i = f(x_i, u_i) \quad (4.1)$$

Sistemin tüm enerji tüketimini minimize edecek sistem girişleri,

$$u_1 \dots u_n = \underset{i=1}{\operatorname{argmin}} \prod^n f(x_i, u_i) \quad (4.2)$$

Şeklinde ifade kolayca elde edilebilir. Ancak bir optimizasyon problemi olarak HEA Enerji Yönetim sistemi, optimize edilen sistemin dinamik bir yapıda olmasından ötürü dinamik bir optimizasyon problemidir. En genel hali ile optimize edilmek istenen sistemin davranışı,

$$f(x_i, \dot{x}_i, u_i) = 0 \quad (4.3)$$

ifade edilebilir. Öte yandan sistem de optimize edilecek büyüklük bir bedel fonksiyonu ile

$$J = \int_0^{\tau} g(x_i, \dot{x}_i, u_i) dt + \phi(x(\tau)) \quad (4.4)$$

yazılabilir. Bu denklemde sistemin ekstremlere edilmek istenen büyüklük birinci terimle, sistemin sınır koşullarındaki değeri ise ikinci terimle ifade edilmiştir.

Görüldüğü gibi, optimize edilmek istenen değer, zamana ve sistem davranışına bağlı bir fonksiyoneldir. Değeri sistem davranışı ile bağıntılı olan bu bedel fonksiyonu optimize edilirken, öte yandan sistem davranışı, giriş değerleri ya da sınır değerleri ile ilgili bir kısım kısıt değerler de yazılabilir ve bu kısıtlar,

$$L(x_i, \dot{x}_i, u_i) = 0, \quad (4.5)$$

şeklinde bir fonksiyon ile genelleştirilerek ifade edilebilir.

Bu tür dinamik denklemle ifade edilen ve lineer olmayan bir yapıya sahip problemlerin çözümlenmesinde klasik optimal kontrol yöntemlerinin kullanılması belirli ölçülerde ve kabuller ile mümkündür. Üretilen çözümler, genellikle yapılan yaklaşımlar ve kabullerden ötürü, genel bir global optimal çözüme yakın bir sub-optimal çözümün elde edilmesine olanak verir. Bu yöntemlere ilişkin bir çözüm yöntemi 4. Bölümün ilerleyen bölümlerinde sunulacaktır. Pontryagin Minimum Prensipleri ile bu şekilde elde edilmiş çözüm önerisi bu anlamda, optimizasyon problemine yaklaşık bir çözüm önerisi getirmektedir.

Ancak, söz konusu lineer olmayan optimizasyon probleminin en genel global optimal çözümü için, nümerik yöntemlere dayanan bir çözüm yöntemi elde etmek mümkündür. Burada önerilecek çözüm yöntemi tezin diğer kısımlarında geliştirilecek yöntemlerin karşılaştırılması için bir kıyas noktası oluşturacak ve “Benchmark Çözüm” önerisi olarak tutulacaktır. Elbette kıyaslama çözümünün neden gerçek sistemde kullanılmadığı akla gelebilecek bir soru olabilir. Bu sorunun temel yanıtı ileride daha detaylı olarak izah edileceği üzere öncelikle çözümün işlem yoğunluğunun oldukça fazla olması, bu nedenle gerçek zamanlı çözüm için gerekli işlem gücünün yüksek olmasıdır. İşlem gücünün yanı sıra, nümerik çözüm yöntemlerinin önemli bir dezavantajı olan oldukça fazla veri kapasitesine ihtiyaç duyulmasıdır. Tüm bu durumlardan dolayı nümerik çözüm uygulamalarının gerçek zamanlı bir uygulamaya

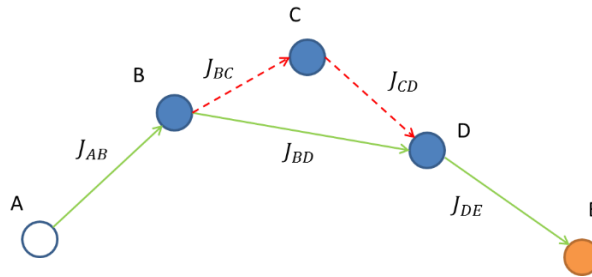
çevrilmesi günümüz işlem gücü sınırlarında pek mümkün görülmemektedir. Global optimum çözüm önerilerinin gerçek bir çözüm olarak kullanılamamasının bir diğer sebebi ise, çözüm önerisinin tüm durum değişkenlerinin gelecekteki değerlerinin bilinmesi gerektiğidir. Bu da çözüm önerisinin teorik bir yapıda kalmasına neden olur.

Öte yandan, yukarıda da bahsedildiği üzere, global-optimum çözümlerinin hem anlık hem de Öngörülü Enerji Yönetim Sistemlerinin Çözümlerinin karşılaştırılmasında oldukça faydalıdır, zira her koşulda en iyi çözümü veren referans durumu oluşturmakta bu da geliştirilen optimizasyon algoritmasının en iyi duruma ne kadar yaklaştığı hakkında bir fikir vermektedir.

Bu tez kapsamında kullanılan global çözüm yöntemi Dinamik Programlama Algoritmasıdır. Bellman prensibine ait yöntem, Bölüm 2’de bahsedilen sanki-statik model kullanılarak elde edilmiştir.

4.1 Dinamik Programlama

Bellman’ın Optimallik prensibine dayanan Dinamik Programlama, temel olarak, çok kademeli bir karar mekanizmasında, her hangi bir anda, şu andan önceki tüm karar değerleri ne olursa olsun, bundan sonraki tüm değerlerin optimal olması çözümün optimallığı için gerek şarttır. Örneğin Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, A noktasından E noktasına gitmek amacı olan bir sistem de, B noktasından D noktasına gitmek için gerekli olan bedelin ya J_{BD} ya da $J_{BCD} = J_{BC} + J_{CD}$ olduğu iki durum için, $J_{BCD} > J_{BD}$ ilişkisi mevcutsa elbette optimal çözüm $J_{AE}^* = J_{AB} + J_{BD} + J_{DE}$ şeklinde yazılır.



Şekil 4.1 : Bellman optimallik prensibi.

İşte “Bellman Optimallik teorisi” BD arasındaki en optimal yolun AB arasındaki yoldan etkilenmediğini göstermektedir.

Dinamik Programlama yönteminin dinamik i boyutlu bir sistemin optimal kontrol problemi çözümü için özelleştirirsek,

$$f(x_i(t), \dot{x}_i(t), u_i(t)) = 0, \quad (4.6)$$

$$x_{i,maks} > x_i(t) > x_{i,min} \quad (4.7)$$

$$u_{i,maks} > u_i(t) > u_{i,min} \quad (4.8)$$

Yukarıda belirtilen sistem modeli ve ilgili kısıt denklemleri, ayrıklaştırılarak tekrar yazılırsa,

$$f_a(x_i(k), x_i(k+1), u_i(k+1)) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.9)$$

$$x_{i,maks} > x_i(t) > x_{i,min} \quad (4.10)$$

$$u_{i,maks} > u_i(t) > u_{i,min} \quad (4.11)$$

Bu sistemin bedel fonksiyonu,

$$J(k) = \sum_{k=1}^{N-1} g(x_i(k), x_i(k+1), u_i(k)) + \phi(x_i(N)) \quad (4.12)$$

şeklinde ve sınır koşulları da

$$x_i = x_{i,final} \quad (4.13)$$

yazılabilir.

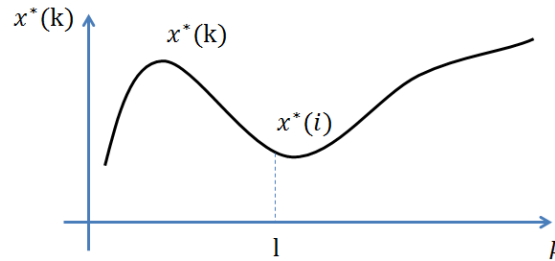
Buna göre, optimal sistem durum değişkenin zaman boyunca değişimi

$$J^*(k) = \min J(k) \quad (4.14)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bir boyutlu bir sistem için çizilmiş farazi bir optimal yörünge

$$x^*(k) = x^*(0), x^*(1) \dots x^*(i), \dots x^*(N) \quad (4.15)$$

serisi olsun ve Şekil 4.2'de görüldüğü gibi bir grafiğe sahip olsun.



Şekil 4.2 : Optimal sistem yörüngesi.

Bu yörünge'nin optimalliği nedeni ile aynı şekilde 1 noktasından başlayan ve $x(i)$ başlangıç değeri ile başlayan alt-problemin optimal sonucu

$$J(k) = \sum_{k=l}^{N-1} g(x_i(k), x_i(k+1), u_i(k)) + \phi(x_i(N)) \quad (4.16)$$

bedel fonksiyonu ile ifade edilip Optimallik prensibine göre,

$$J^*(k) = \min J(k) \quad (4.17)$$

minimum bedel fonksiyonunu sağlayan

$$x^*(k) = x^*(i), \dots x^*(N) \quad (4.18)$$

serisi olup problemin ilk çözümünün bir alt kümesidir. Bu farazi i noktası, son zaman değeri N noktasına sonsuz yaklaştırılır ve problem N ile N-1 arasında tekrarlanırsa, $x^*(N-1)$ optimal değeri elde edilir. Böylece Deterministik Dinamik Programlama Yöntemi, söz konusu problemi en son andan başa doğru ters yönde çözümlenmektedir. Genelleştirilmiş algoritma adımları şu şekildedir:

Adım 1 - Bedel fonksiyonu tüm durum değişkenlerinin $x_i(N-1)$ 'den son değer, $x_k(N)$ 'e ulaşırken aldığı değer hesaplanır,

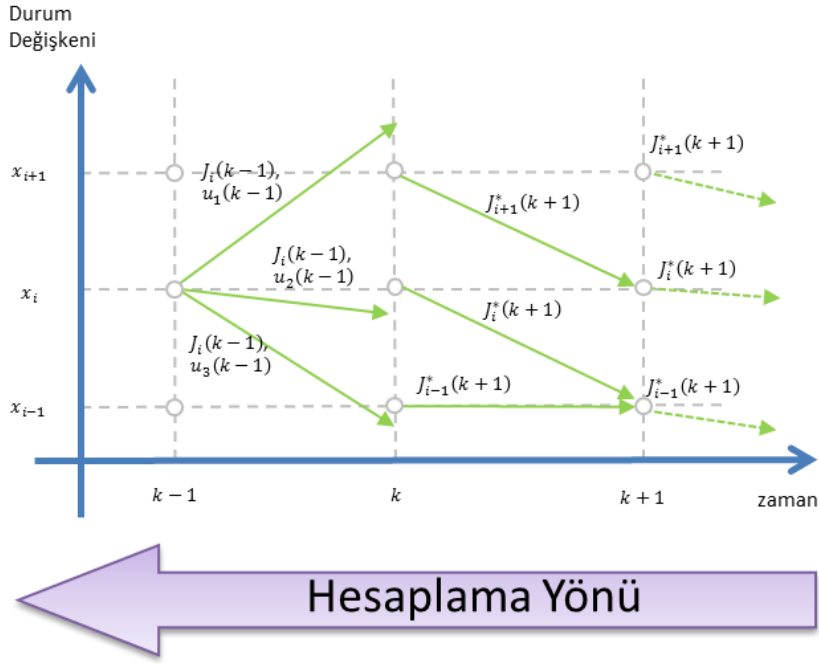
$$J_{N-1,N}(x_i(N)) = \phi(x_i(N)) \quad (4.19)$$

Adım 2 - Bedel fonksiyonun tüm durum değişkenlerinin $x_k(k-1)$, den başlayan ve N anına kadar giden bedel fonksiyonu, bir önceki adımın da en optimal bedel fonksiyonunu da içerecek şekilde hesaplanır.

$$J_{k,k+1}^*(x_i(k)) = \min\{ (g(x_i(k), x_i(k+1), u_i(k)) + J_k^*(x_i(k))) \} \quad (4.20)$$

$$u_i(x_i(k)) = \operatorname{argmin}\{ (g(x_i(k), x_i(k+1), u_i(k)) + J_k^*(x_i(k))) \} \quad (4.21)$$

Şekil 4.3'de bir durum değişkenli sistem için k-1, k ve k+1 adımlarında gerçekleştirilen hesaplamalar görülmektedir.



Şekil 4.3 : Dinamik programlama hesaplama rutini.

Buna göre, k anında tüm durum değişkenleri için hali hazırda k ve $k+1$ anları arasındaki en optimal yol bilinmektedir. Öte yandan $k+1$ anı için de $k+1$ ve $k+2$ arası optimallik bir önceki hesap adımında gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde sistemin k anından başlayan optimal sonucu bir başka deyişle tüm optimal bedel fonksiyonları ve bunu sağlayan optimal sistem girişleri son değer N 'e kadar bilinmektedir. $k-1$ anında tekrarlanan ise, tüm $u_i(k-1)$ girişleri için bedel fonksiyonları hesaplamaktır (Şekil 4.3'de 3 giriş için örnek olarak sunulmuştur). Hesaplanan bu değer ve ulaşılan durum değerinden son N değerine kadar olan toplam bedel fonksiyonunu $(J_i(k-1) + J_i^*(k \rightarrow N))$ minimize edecek giriş, $x_i(k-1)$ için optimal giriş adımı olmakta olup bu hesap adımı için kaydedilmektedir. Bu hesaplama rutini sondan başa doğru başlangıç anına kadar tekrar edilir ve tüm durum değerleri ve tüm kontrol girişleri için tekrar edilirse, sistemin herhangi bir anından, istenen son değere kadar olan tüm optimal karakteristiği her zaman adımı için elde edilmiş olur. Bu optimallik aslında, *Bedel Matrisi* içinde saklanmaktadır. Aynı zamanda, her adımdaki her durum değişkeni için optimalliği verecek girişler de *Optimal Matris* içerisinde kaydedilmektedir.

Sistemin optimal davranışı ise, bu *Bedel Matrisi*'nde ve *Optimal Matris*'inde depolanan değerleri kullanılarak elde edilir. Bir başka deyişle, sistem çalışırken ya da

gerçekten simüle edilirken, her hesap anında, sistemin ulaştığı durum değeri için önceden hesaplanmış bir optimal kontrol girişi Optimal Matrisin içinde yer almaktadır.

Şekil 4.3’de görüldüğü üzere Dinamik Programlama önceden eşit parçalara bölünmüş bir durum uzayı, zaman serisi ve benzer şekilde ayrıklaştırılmış bir giriş serisi gerektirmektedir. Ancak bu durum $k-1$ anında tasvir edildiği gibi herhangi bir durum değişkenine uygulanan ayrık giriş değerleri ile bir adım sonraki durum değişkenine tam olarak ulaşmayı garanti etmez. Bu durum, örneğin $x_i(k-1)$ den başlayan ve $x_i(k)$ ile $x_{i-1}(k)$ arasında bir değere ulaşan örnek 2. giriş değerinde olduğu gibi sonuçlanabilir. Bu durumda, bu iki değer $x_i(k)$ ile $x_{i-1}(k)$ değerlerine ait bedel fonksiyonları arasında enterpolasyon yapılarak ulaşılan durum değeri için yaklaşık bir bedel fonksiyonu hesaplanmasına olanak verir. Elbette ki yapılan bu işlem küçük bir yuvarlama hatasına sebep olmakta ve optimizasyon algoritmasının garanti ettiği global sonuçtan az da olsa sapılmasına neden olur. Ancak seçilen ayrıklık adımının küçüklüğü bu hatanın göz ardı edilebilir ölçüde kalmasına olanak verir.

Son olarak belirtilmelidir ki, Dinamik Programlama global davranışı hesaplanması adına gerekli bir yöntem olup birçok çalışmada geliştirilen yöntemlerin karşılaştırıldığı “Benchmark” sonucunu oluşturmaktadır. Yöntem görüldüğü üzere hesap yükü oldukça fazla olan bir yapıdadır. Özellikle dinamik sistemlerin hesaplanmasında, sistem durum uzay boyutu ile bu yük üstel olarak artmaktadır. Öte yandan kontrol ve sistem durumları için seçilen ayrıklaştırma adımı ve problem süresi N , de problemin karmaşıklığını lineer olarak etkilemektedir. Bir başka deyişle, p ve q sırasıyla ayrıklaştırılmış sistem durumlarının ve kontrol girişlerinin toplam sayısı, n durum değişkeni boyutu ve N problem uzunluğunu ifade ederse,

$$\kappa(N, p^n, q^n) \quad (4.22)$$

Sistem kompleksliğini ifade eder. Bu anlamda Dinamik Programlama düşük boyutlu sistemlerin çözümünde daha uygundur.

4.2 Dinamik Programlama Yönteminin HEA Enerji Yönetim Sistemi İçin Kullanımı

Bölüm 3’de açıklanan yarı-statik model Dinamik Programlama yöntemi ile optimal HEA Davranışının hesaplanması amacıyla kullanılmaktadır. Kompleks modelin bu

amaçla kullanılması, bir önceki bölümde de bahsedildiği üzere dinamik durum değişkeni sayısının fazlalığı, sistem modelinin ayrıklaştırılması ve her zaman adımında hesaplama yapılması gerektiğinden bu tip bir algorithmada kullanılması pek uygun değildir. Öte yandan Dinamik Programlama yöntemi ile elde edilen sonuçların geçerliliğinin test edilmesi adına sonuçlar kompleks model üzerinde de test edilecektir.

HEA modelinin Dinamik Programlamaya uygulanması için öncelikle ayrıklaştırma işlemi gerekmektedir. Sistemin tek sürekli zaman dinamik denklemi batarya şarj durumu için yazıldığından, bu değişkenin ayrık modelinin oluşturulması yeterlidir. Bu anlamda batarya şarj değişim denklemi,

$$SOC(k+1) = -\frac{1}{Q_{maks}} \cdot I(k+1) \cdot \Delta t \quad (4.23)$$

şeklinde ayrık zaman modeli olarak yazılabilir. Öte yandan izlenen sürüş profili boyunca EM ve İYM'nin karakteristikleri itibari ile belirli hız ve tork değerleri arasında kalmaları gerekmektedir. Bu sınır değerleri sırasıyla İYM için,

$$\omega_{İYM,min.} \leq \omega_{İYM}(k) \leq \omega_{İYM,maks.} \quad (4.24)$$

$$0 \leq T_{İYM}(k) \leq T_{maks.}(\omega_{İYM}(k)) \quad (4.25)$$

ve EM için,

$$\omega_{EM,min.} \leq \omega_{EM}(k) \leq \omega_{EM,maks.} \quad (4.26)$$

$$T_{min.}(\omega_{EM}(k)) \leq T_{EM}(k) \leq T_{maks.}(\omega_{EM}(k)) \quad (4.27)$$

şeklinde ifade edilebilir. Öte yandan,

$$T_{İYM}(k) = T_{maks.}(\omega_{İYM}(k)) \cdot u_{İYM}(k) \quad (4.28)$$

şeklinde belirlenmiş bir giriş ile hesaplanır. Bu durumda, söz konusu Hibrid Araç topolojisinden ötürü,

$$T_{EM}(k) = T_{İYM}(k) - T_{yük@İYM}(k) \quad T_{yük@İYM}(k) > 0 \quad (4.29)$$

$$T_{EM}(k) = T_{yük@İYM}(k) \quad T_{yük@İYM}(k) < 0 \quad (4.30)$$

olarak hesaplanır. Burada $T_{yük@İYM}$ İYM'ye indirgenmiş yol yüküdür, transmisyon, diferansiyel çerim oranları ve verimleri kullanılarak elde edilir.

$$T_{yük@İYM}(k) = \frac{T_{yük@tekerlek}(k)}{i_{tr}(u_{tr}(k)) \cdot i_{dif}(k) \cdot \eta_{tr}(i_{tr}(k)) \cdot \eta_{dif}} \quad (4.31)$$

Vites seçimi, ileriki kısımda da belirtileceği üzere, iki farklı çözüm çerçevesinde hem bir durum değişkeni olarak hem de önceden bir vites değiştirme mantığına göre değiştirilmiştir. İlk durum için vites seçimi de bir optimal sonuç oluştururken, ikinci durum için önceden belirlenen kurallara uygun olarak anlık olarak seçim yapılmaktadır.

Son olarak da batarya modeli ile ilgili bazı kısıtların göz önünde bulunması gerekmektedir. Buna göre, öncelikle bataryanın toplam gücünün belirli bir seviyede olması gerekmekte ve EM'nin tork istekleri bu çerçevede karşılanması gerekmektedir. Kısaca şarj ve deşarj durumları için,

$$|P_{batarya}(k)| \leq P_{maks} \quad (4.32)$$

yazılabilir. Son olarak da, tasarlanan iki farklı Hibrid Araç teknolojisi için aşağıdaki batarya kullanım alanlarına ilişkin kısıtlar yazılabilir. Şarj edilemeyen standart Hibrid Elektrikli Araç için kullanabilecek şarj miktarı ve bölgesi, daha önce de belirtilen sebeplerden ötürü, daha kısıtlıdır.

$$\Delta SOC_{ŞE-HEA} \gg \Delta SOC_{HEA} \quad (4.33)$$

Ancak her iki teknoloji için batarya çalışma bölgesi için aşağıdaki kısıt durumu yazılabilir.

$$SOC_{min.} \leq SOC(k) \leq SOC_{maks.} \quad (4.34)$$

Bu kısıtlarla beraber, her iki teknoloji için kullanılan farklı başlangıç değerleri ve hedef değerleri bulunmaktadır. Şarj edilen HEA için, genel kabul, sürüş başlangıcında bataryanın tamamen yakının önceden doldurulmuş olduğu ve sürüş sonunda hedeflenen tamamen sürüş sonunda hedeflenen dip şarj noktasına ulaşılacağıdır.

$$SOC(t_0) = SOC_{maks.} \quad (4.35)$$

$$SOC(t_f) = SOC_{min}. \quad (4.36)$$

Öte yandan şarj edilemeyen HEA için durum daha farklıdır. Yakıt tüketiminin gerçekçi bir şekilde karşılaştırılabilmesi için, sürüş profili sonunda şarj dengesinin sağlanması gerekmektedir.

$$SOC_{terminal} = SOC(t_0) = SOC(t_f) \quad (4.37)$$

Bu tez kapsamında, HEA optimizasyonu tanımı en az yakıt tüketimini sağlayacak çalışma bölgelerinin elde edilmesinin sağlanması ve yukarıda belirtilen kısıt ve hedeflere uygun çalışma koşullarının elde edilmesidir.

Bu anlamda DP'nin optimize etmesi gereken büyüklük, İYM'nin harcadığı yakıt enerjisi olup,

$$J(t) = \int_0^{t_f} \dot{m}_{IYM}(t) \cdot Q_{LHV} \cdot dt \quad (4.38)$$

olup, $\dot{m}$ İYM'nin anlık yakıt tüketimi, Q_{LHV} 'de yakıtın alt ısı değeri. Dolayısıyla sürüş boyunca harcanan yakıt enerjisi bedel fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Kullanılan modelin ayrık zamanlı olması itibarı ile yukarıdaki ifade,

$$J(k) = \sum_{k=0}^N \dot{m}_{IYM}(k) \cdot Q_{LHV} \quad (4.39)$$

şeklinde de ifade edilir. Sonuç olarak DP'nin çözmesi beklenen problem, yukarıdaki kısıtlar dâhilinde $J(k)$ 'yi minimize edecek $u^*_{IYM}(k)$ ve $u^*_{tr}(k)$ girişlerinin elde edilmesidir. Dolayısı ile problem en genel hali ile 2 durum değişkenine sahiptir. Ancak vites girişinin boyutu vites sayısına bağlı olduğundan, her hangi bir ayrıklaştırmaya gerek olmayıp çözümün boyutunu fazla değiştirmemektedir. Öte yandan, ileriki bölümlerde incelenecek diğer optimal kontrol yöntemleri için daha sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek adına, DP çözümü, sadece $u^*_{IYM}(k)$ girişi için de elde edilmiştir. $u_{tr}(k)$ 'nin değişimi bir otomatik vites değiştirme programına bağlı olarak önceden tasarlandığı varsayımı ile yapılmaktadır. İki çözüm arasındaki fark aynı zamanda vites çevrim kuralının optimal sonuca etkisini görmek için de önemlidir.

DP yöntemi paralel HEA enerji tüketim minimizasyon problemine uygulanırken, önceki kısımda bahsedilen komponentlerin hız, tork ya da güç gibi fiziksel kısıtları,

geri yönlü model yapısı sayesinde, tekerlek yük ve hızları, IYM ve EM'ye indirgenerek her çalışma adımında kontrol edilir. Öte yandan bataryanın güç sınırı da hesaplamalar sırasında sürekli kontrol edilerek, kısıt dışına çıkan değerleri sağlayan muhtemel kontrol girişleri göz önüne alınmaz. Ancak, batarya şarjı ile ilgili sınır kısıtları ve batarya şarj son değerinin sağlanması için yukarıda belirtilen bedel fonksiyonuna iki adet ceza fonksiyonu eklenmiştir. Bu belirtilen, şarj bölgesinin dışına çıkma ihtimali olan optimal sonuçları engellemek, hem de istenen son şarj değerinin elde edilmesinin sağlanması için gereklidir.

$$J(k) = \sum_{i=0}^N \dot{m}_{IYM}(k). Q_{LHV} + \varphi_{SOC}(k) + \varphi_{SOC,terminal}(N) \quad (4.40)$$

$$\varphi_{SOC}(k) = \begin{cases} 0 & SOC(k) \in [SOC_{min.}, SOC_{maks.}] \\ \infty & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$$\varphi_{SOC,terminal}(k) = \begin{cases} 0 & SOC(N) = SOC_{terminal} \\ \infty & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

Son olarak vurgulanmalıdır ki, DP optimal çözümü elde ederken, tüm yol bilgisinin (hız profili ve yol topoğrafyası) önceden tam anlamıyla bilindiği var sayılmaktadır. Bu da, yöntemin, işlem yükünden dolayı gerçek zamanlı uygulanamamasının yanı sıra bir diğer teorik kabuldür.

DP algoritması yukarıda belirtilen yöntem çerçevesinde önce *Bedel Matrisi* ve *Optimal Matrisi*'nin elde edildiği çözüm için optimizasyon algoritması elde edilecek şekilde, ters yönde sondan başa doğru hesap yöntemi ile çalıştırılır. Bu matrisler tüm koşullar için optimal sonucu taşıdığı için gerçek modele uygulanarak simülasyon modeli ikinci kez ileri yönde çalıştırılır ve sistemin optimal davranışı elde edilmiş olur.

DP yöntemine yönelik sonuçlar çeşitli senaryolar dâhilinde sonuç kısmında irdelenmiştir.

4.3 Optimal Kontrol Teorisi ile Enerji Tüketimi Optimizasyonu ve Adaptif Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Yöntemi

Bir önceki bölümde tarif edilen optimizasyon probleminin analitik çözümüne yönelik klasik optimal kontrol teorisinin geçerliliği bu bölümde tanımlanmıştır. Bu anlamda bu bölümde Hamilton fonksiyonun elde edilmesine dayanan ve Pontryagin Minimum Prensibine (PMP) dayanan optimal kontrol metodu formülize edilmiştir. Her ne kadar

optimal çözüm, klasik optimal yöntemlere dayandırılrsa da, söz konusu sistem modelinin yapısından ötürü, çözümün son aşamasında nümerik yöntemlerden faydalanmak gerekmektedir. Öte yandan, optimallik ancak gereklilik koşuluna kadar sağlanabildiğinden çözümün en iyi ihtimalle lokal optimum olduğu görülebilmektedir.

Bu tez kapsamında, DP'nin ardından kullanılan bir diğer çözüm önerisi PMP formülasyonunun belli bir ölçüde basitleştirilmesi ile elde edilen çözümdür. Öte yandan, bu çözüm önerisi bir başka şekilde sistemin davranışından ve komponentlerin davranış biçimlerinin incelenmesinden yola çıkarak da elde edilmektedir. Kısacası, Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu şeklinde adlandırılan yöntem, temelde batarya da depolanan enerjiyi eşdeğer bir yakıt enerjisine dönüştüren bir ifadeye dayanmaktadır. İşte bu toplam eşdeğer tüketim ifadesi PMP ile elde edilen Hamilton fonksiyonu eşdeğerdir.

PMP bir önceki bölümde ifade edilen optimizasyon problemini minimize eden optimal giriş $u^*(t)$ için aşağıdaki şartların sağlanmasını gerektirmektedir. Öncelikle, her zaman adımı bu optimal giriş $u^*(t)$, optimizasyon probleminin Hamilton fonksiyonunu minimize etmelidir:

$$H(x(t), u(t), \lambda(t), t) \geq H(x(t), u^*(t), \lambda(t), t) \quad (4.41)$$

Hamilton fonksiyonu ise şu şekilde ifade edilmektedir.

$$H(x(t), u(t), \lambda(t), t) = -\lambda^T(t) \cdot f(x(t), u(t)) + L(x(t), u(t), t) \quad (4.42)$$

Burada, $\lambda(t)$, sistem durum değişken vektörü ile aynı boyutta bir vektör olup, eşdeğer durum değişkenlerini (co-states) ifade etmektedir. $f(x(t), u(t))$ daha önceki bölümde ifade edilen sistemin dinamik modeli, $L(x(t), u(t), t)$ ise minimize edilmek istenen bedel fonksiyonudur.

Öte yandan minimizasyonun gereklilik koşulunu sağlanması için

$$\dot{\lambda}^T(t) = -\frac{\partial(H(x(t), u(t), \lambda(t), t))}{\partial(x)} \quad (4.43)$$

diferansiyel denkleminin çözülmesi gerekmektedir.

HEA enerji yönetimi optimizasyon problemi için Hamilton fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$H(SOC(t), u(t), \lambda(t), t) = \lambda(t) \cdot [\dot{SOC}(t)] + \dot{m}_{IYM}(t, u(t)) \cdot Q_{LHV} \quad (4.44)$$

Bölüm 3'ten hatırlanacağı üzere,

$$\dot{SOC}(t) = -\frac{I_{\text{şarj/desarj}}(t)}{Q_{maks}} \quad (4.45)$$

ve

$$I_{\text{şarj/desarj}}(t) = \frac{U_{oc}(SOC(t)) - \sqrt{\left((U_{oc}^2(SOC(t))) - P_{el.}(t) \cdot R_i \right)}}{2 \cdot R_i} \quad (4.46)$$

olduğundan, Hamilton fonksiyonu

$$\begin{aligned} H(SOC(t), u(t), \lambda(t), t) \\ &= -\lambda(t) \\ &\cdot \left[\frac{U_{oc}(SOC(t)) - \sqrt{\left((U_{oc}^2(SOC(t))) - P_{el.}(t) \cdot R_i \right)}}{2 \cdot R_i \cdot Q_{maks}} \right] \\ &+ \dot{m}_{IYM}(t, u(t)) \end{aligned} \quad (4.47)$$

şeklinde yazılabilir. Sonuç olarak optimal kontrol girişi $u^*(t)$

$$\begin{aligned} u^*(t) = \arg \min \left\{ -\lambda(t) \right. \\ \cdot \left[\frac{U_{oc}(SOC(t)) - \sqrt{\left((U_{oc}^2(SOC(t))) - P_{el.}(t) \cdot R_i \right)}}{2 \cdot R_i \cdot Q_{maks}} \right] \\ \left. + \dot{m}_{IYM}(t, u(t)) \cdot Q_{LHV} \right\} \end{aligned} \quad (4.48)$$

yazılabilir. Eşdeğer durum için dinamik denklem de sadece birinci terimin durum değişkenine bağlı olması nedeniyle,

$$\begin{aligned}
\dot{\lambda}^T(t) &= - \frac{\partial (H(SOC(t)))}{\partial (SOC(t))} \\
&= -\lambda(t) \\
&\quad \cdot \frac{\partial \left(\frac{U_{oc}(SOC(t)) - \sqrt{\left(U_{oc}^2(SOC(t)) - P_{el.}(t) \cdot R_i \right)}}{2 \cdot R_i \cdot Q_{maks}} \right)}{\partial (SOC)}
\end{aligned} \tag{4.49}$$

şeklinde yazılır. Yukarıdaki bu denklemin çözümü için nümerik yöntemler kullanılarak çözüm elde edilebilir. Bu denklem ve yukarıda belirtilen durum denklemi ile $\lambda(t)$ ve $SOC(t)$ değişkenleri için bir sınır değer problemini temsil eder. Örneğin şarj edilemeyen HEA probleminde

$$SOC(t_0) = SOC(t_f) = SOC_{istenen} \tag{4.50}$$

ve şarj edilebilen HEA problemi için

$$SOC(t_0) = SOC_{istenen \text{ başlangıç}} \tag{4.51}$$

$$SOC(t_f) = SOC_{istenen \text{ son}} \tag{4.52}$$

şeklinde iki sınır değeri, problemin yapısı gereği yazılır. $\lambda(t_0)$ için rastgele bir ilk değer belirleyerek, denklem bir sınır değer probleminde başlangıç değer problemine çevrilir. Bu bağlamda çözüm verilen denklemin nümerik olarak çözülmesi ve sınır değerlerin istenen değerle (son değerle) karşılaştırılması ile elde edilebilir. Seçilen $\lambda(t_0)$ ile elde edilen sınır son değeri elde edilemiyorsa $SOC(t_f) = SOC_{istenen \text{ son}}$ elde edilene kadar $\lambda(t_0)$ güncellenerek tekrarlanır.

Ancak bu noktada eş durum fonksiyonun önemli bir özelliğinden söz etmek gerekir. Eş-durum denklemi tekrar şu şekilde düzenlenirse

$$\begin{aligned}
\dot{\lambda}^T(t) &= -\lambda(t) \cdot \frac{1}{Q_{maks}} \cdot \frac{\partial (I(t))}{\partial (SOC(t))} \\
&= -\lambda(t) \cdot \frac{1}{Q_{maks}} \cdot \frac{\partial (I(t))}{\partial (U_{oc}(t))} \cdot \frac{d (U_{oc}(t))}{d (SOC(t))}
\end{aligned} \tag{4.53}$$

elde edilir. Burada

$$\frac{d(U_{oc}(t))}{d(SOC(t))} \approx 0 \quad (4.54)$$

kabulü yani batarya açık devre geriliminin batarya şarjı ile değişmeyeceği kabulü, belirli ölçülerde doğru bir kabuldür. Özellikle, şarj edilemeyen hibrid araçlarda, bataryanın çalıştığı sınırlı şarj bölgesinde, batarya geriliminin sabit kaldığı görülmektedir. Dolayısı ile bu şartlar altından eş-durum denklemi

$$\dot{\lambda}^T(t) = 0 \quad (4.55)$$

$$\lambda^T(t) = \lambda_0 \quad (4.56)$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda, minimize edilecek Hamilton fonksiyonu anlık bir şekilde optimize edilebilecek bir fonksiyona dönüşecektir. Bir başka deyişle,

$$H(SOC(t), u(t), \lambda(t), t) = -\lambda_0 \cdot \left[\frac{I(t)}{Q_{maks}} \right] + \dot{m}_{IYM}(t, u(t)) \cdot Q_{LHV} \quad (4.57)$$

bağıntısını her örnekleme anında minimize edecek bir u değeri kolayca bulunabilir. Bu fonksiyonda,

$$s_0 = -\frac{\lambda_0}{Q_{maks} \cdot U_{OC}(t)} \quad (4.58)$$

şeklinde ifade boyutsuz bir değişkenle değiştirilirse,

$$H(SOC(t), u(t), \lambda(t), t) = -s_0 \cdot [I(t) \cdot U_{oc}(t)] + \dot{m}_{IYM}(t, u(t)) \cdot Q_{LHV} \quad (4.59)$$

ya da $P_{yakıt}(t)$ yakıt kaynağından yani İYM ile elde edilen güç $P_{el}(t)$ ise, bataryadan elde edilen güç değeri kabul edilirse

$$H(SOC(t), u(t), \lambda(t), t) = -s_0 \cdot P_{el}(t, u(t)) + P_{yakıt}(t, u(t)) \quad (4.60)$$

yazılır. Bu durumda s_0 katsayısına fiziksel bir anlam yüklemek mümkün olur. Buna göre, bu katsayı, elektriksel enerjiyi yakıt enerjisi ile karşılaştırmak için kullanılan bir sanal katsayı halini almaktadır. Bu sayede herhangi bir çalışma anında toplam tüketimi en aza indirgeyecek giriş bu denklem sayesinde elde edilir. Öte yandan, her ne kadar batarya açık çevrim gerilimi-şarj durumu ilişkisi, göz ardı edilse de, seçilen c , değeri

bu ilişkiyi ortalama olarak ifade etmektedir. Ancak, $U_{oc}(t) - SOC(t)$, batarya karakteristiğinden ötürü ifade edildiği gibi şarj ve deşarj durumları için ayrı karakteristiktirler. Dolayısı ile s_0 değeri şarj ve deşarj durumları için farklı değerlerle ifade etmek optimal çözüme daha yakın bir davranış elde edilmesine olanak tanır.

$$s_0 = \begin{cases} s_{0,\text{şarj}} & P_{el.} > 0 \\ s_{0,\text{deşarj}} & P_{el.} < 0 \end{cases} \quad (4.61)$$

Görüldüğü bir s_0 katsayısı bir toplam eşdeğer enerji yakıt gücü büyüklüğünü ifade etmektedir. Dolayısı ile artık Hamilton fonksiyonu yerine artık

$$P_{\text{eşdeğer,yakıt}} = -s_0 \cdot P_{el.}(t, u(t)) + P_{\text{yakıt}}(t, u(t)) \quad (4.62)$$

bağıntısı yazılabilir.

Eşdeğer tüketim katsayısının davranışı ile ilgili bazı fiziksel modelin incelenmesi sonucu, bu katsayının fiziksel olarak alması gereken değer hakkında bir kanıya varılması mümkündür. Bu nedenle optimizasyon problemi tamamen fiziksel davranış yönünden incelenerek benzer bir bağıntıya ulaşılması mümkündür. Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu bu anlamda ortaya çıkmış bir yöntemdir.

Eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu stratejisi, gerçekte uygulanması mümkün olmayan global optimizasyon problemini, anlık optimizasyon problemine dönüştürmek adına yola çıkmış bir algoritmadır. Buna göre, batarya ki bu şarj edilemeyen hibrid araçlarda daha da öne çıkmıştır, genellikle bir sürüş çevrimi sırasında, ilk şarj noktası ile son ulaşılan şarj seviyesi arasında çok fazla farklılık olmayan bir anlamda, tam bir enerji kaynağından ziyade enerji akışı içerisinde bir geçici depo alanı olarak görev yapmaktadır. Bu anlamda, tüm ya da neredeyse tüm enerji kaynağı yakıt enerjisidir. Bu anlamda bir bataryayı enerji akışı tersine çevrilebilir sanal bir yakıt tankı olarak görmek yanlış bir yaklaşım olmaz.

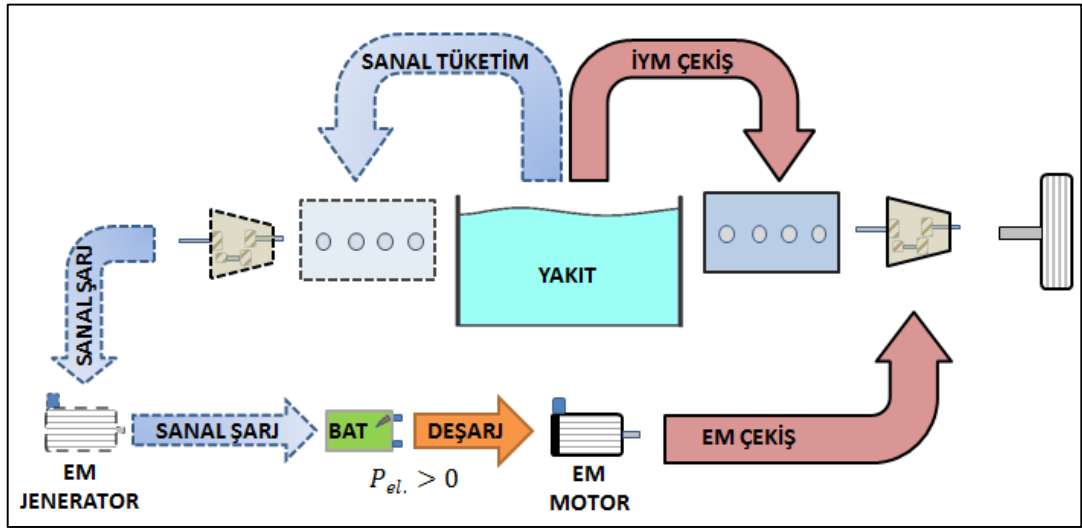
Bu anlamda batarya gücünün pozitif olduğu, yani bataryadan enerji çekildiği durumlar için, bu kullanılan elektrik enerjisinin ileride tekrar yerine koyulacağı düşüncesiyle yakıt tüketimini sanal olarak gerçek tüketimden daha fazla gösterecek bir eşdeğer tüketim ifadesi yazılabilir. Benzer şekilde, batarya gücünün negatif olduğu durumlarda, yani bataryaya enerji koyulduğu ve bunun ileride bir yakıt tasarrufunu

sağlamasından ötürü eşdeğer yakıt tüketiminin gerçek tüketimden daha az olduğu bir ifade de oluşturulabilir. Bu anlamda,

$$\dot{m}_{eşdeğer} = \dot{m}_{iYM} + \dot{m}_{el}. \quad (4.63)$$

$$= \dot{m}_{iYM}(t, \omega(t), T_{iYM}(t), u(t)) + s_o \cdot \frac{P_{el.}(t, u(t))}{Q_{LHV}}$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadede $\dot{m}_{el.}$ bataryanın eşdeğer tüketim değeri, s_o , da eşdeğerlik katsayısıdır. Bu ifadeye göre, batarya gücünün işaretine göre, gerçek tüketim eşdeğer tüketimden daha az ya da daha fazla olabilir.

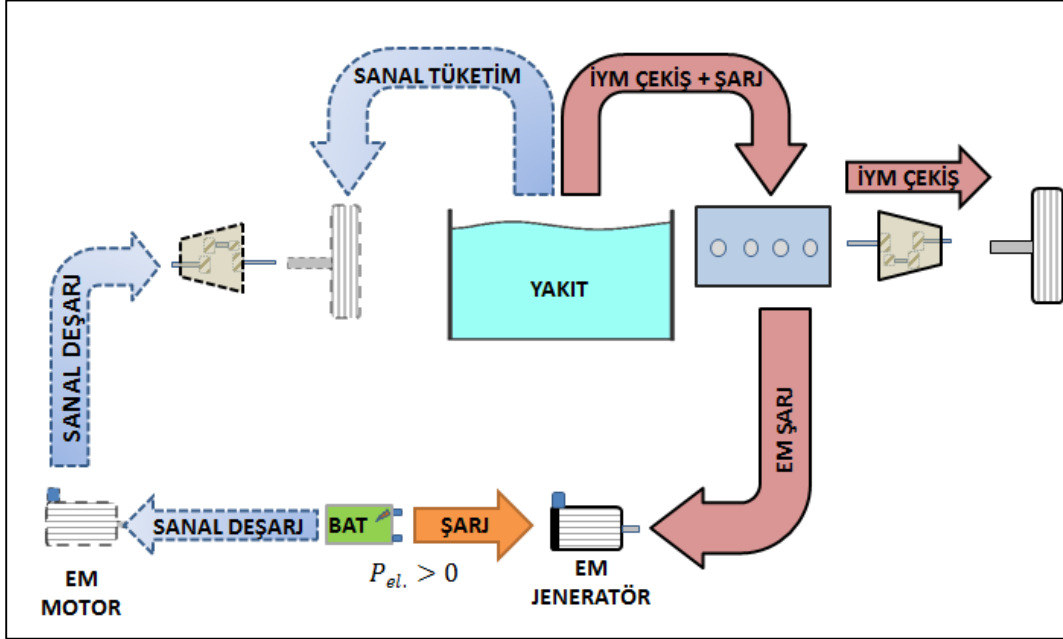


Şekil 4.4 : Eşdeğer yakıt tüketimi deşarj anı.

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi, çekiş anında yani $P_{el.}(t, u(t)) > 0$ olduğu batarya deşarj durumlarında, EM’nin jeneratör olarak çalışması ile harcanan enerjinin geri getirilmesi için İYM’nin belli bir oranda çalışması ve buna karşılık belirli bir tüketim olması gerekir. Bu tüketimin ifadesi yukarıda belirtilen eş değer yakıt tüketimi katsayısı yardımı ile elde edilir. Benzer şekilde, İYM’nin gücünün hem çekiş hem de batarya şarjı için kullanıldığı durumlarda ise, Şekil 4.5’de görüldüğü gibi depolanan EM enerjisi ile ileriki sürüş anlarında bir yakıt tasarrufu elde edilebilmektedir. Buna göre elde edilen bu tasarruf miktarı, benzer bir şekilde, eşdeğer yakıt katsayısı ile bulunmaktadır.

Görüldüğü gibi eşdeğer yakıt minimizasyonu ile Pontryagin Minimum Prensibi yöntemi ile elde edilen analitik çözümün eşdeğer olduğu görülmektedir. Öte yandan anlık optimal kontrol girişlerinin bulunmasını sağlayacak her iki yöntemin de şu ana kadar ihtiyaç duyduğu eşdeğerlilik katsayısının nasıl elde edildiğinin kolay bir çözümü

öngörülmemiştir. Bu çerçevede eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonun algoritma şemasını incelemekte fayda vardır.

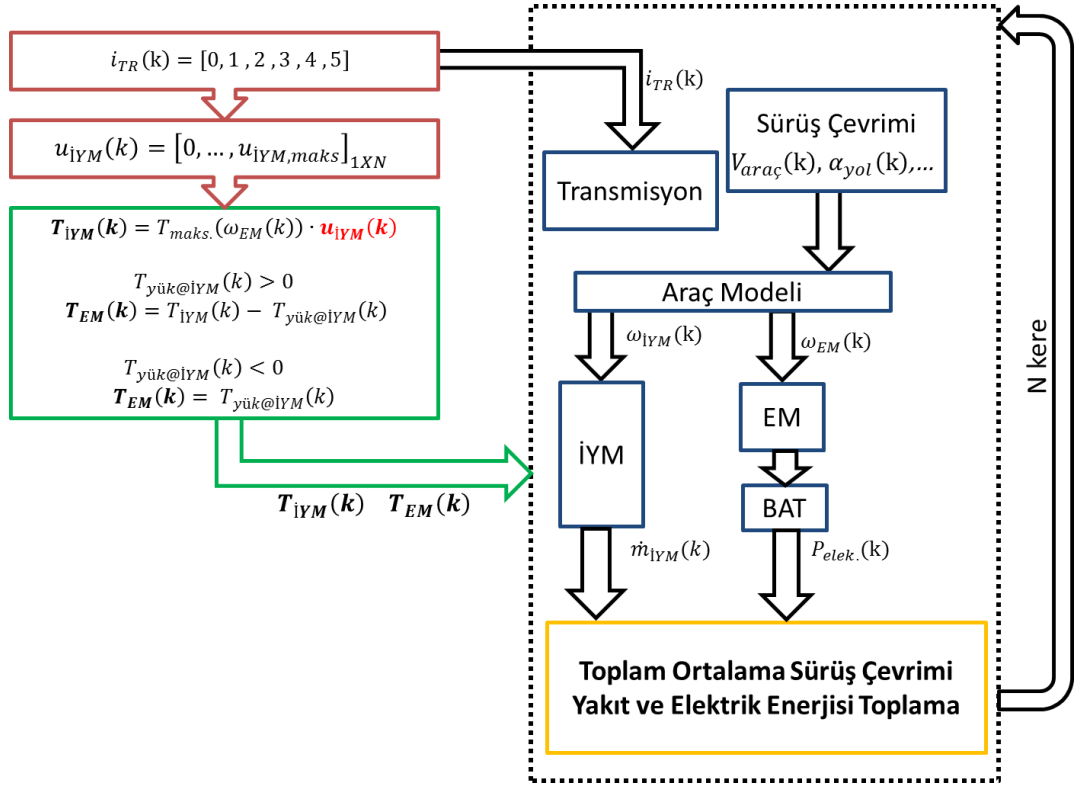


Şekil 4.5 : Eşdeğer yakıt tüketimi şarj anı.

Şekil 4.6’da Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Yönteminin ilk önemli adımı olan veri toplama işlemine yönelik işleyiş şeması görülmektedir.

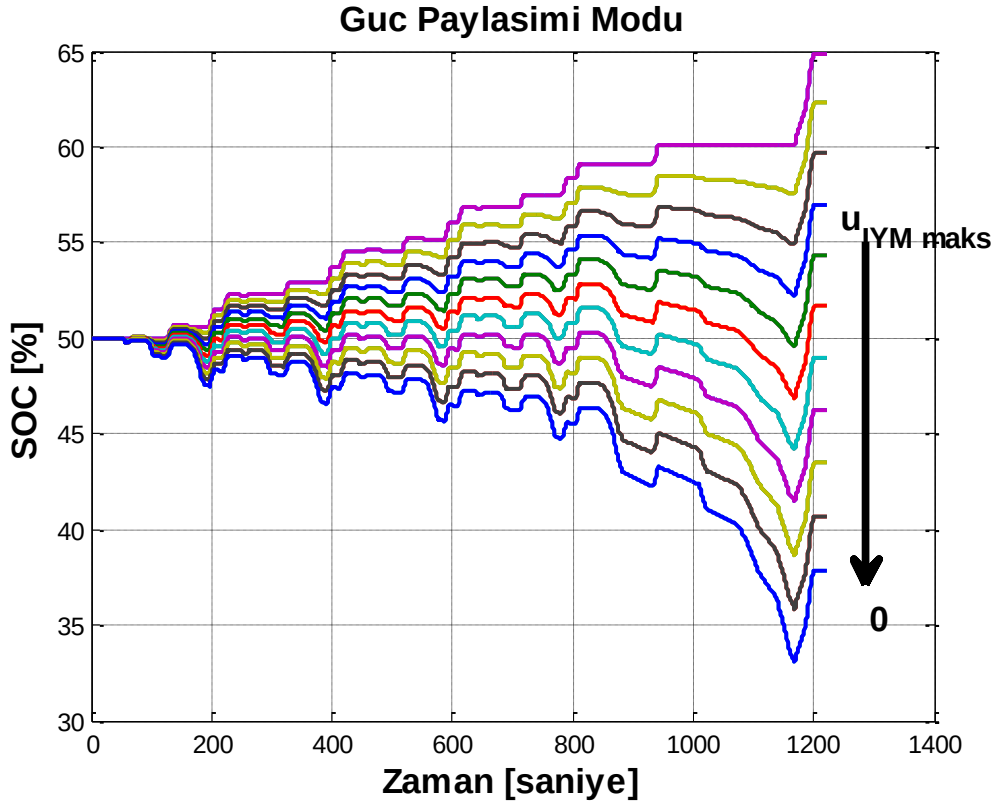
Buna göre Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu yönteminin ilk adımı, belirli bir sürüş çevrimi sabit bir kontrol girişi alıp, araç modelini bu çevrim için simüle etmektir. Burada kontrol girişinden kasıt, hem İYM torkunun maksimum İYM torkuna oranı, hem de vites girişleridir. Söz gelimi belirli bir sürüş çevrimi sabit bir viteste, sabit bir İYM yol yükü tork oranı ile koşturulur. Ebettteki kontrol girişlerinin belirli durumlarda yol yükünü tamamen karşılayabilmek adına gerekli değerlere değiştirilmesi gerekmektedir (Ör: Vites, komponent hızları gerektirdikçe yükseltilir ya da azaltılır). Öte yandan, İYM torku, kontrol girişi değerine göre yol yük denkleminden de anlaşılacağı üzere ya yol yükünü EM ile paylaşarak karşılamakta ya da EM’yi şarj etmektedir.

Bu şekilde her komponent ilgili sürüş çevrimi için, ilgili kontrol girişi değeri, EM ve İYM hızları ve Batarya, İYM ve EM verim karakteristikleri doğrultusunda belirli yakıt ve elektrik enerjisi tüketirler. Görüldüğü gibi bu noktada herhangi bir minimizasyon, şarj dengeleme ya da hedef son şarj değeri söz konusu değildir. Bu ilk adımın amacı yakıt ve elektrik enerjisinin, ilgili sürüş çevrimi için karakteristiklerini incelemektir.



Şekil 4.6 : Eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu yöntemi ile enerji tüketim karakteristiği elde etme yöntemi.

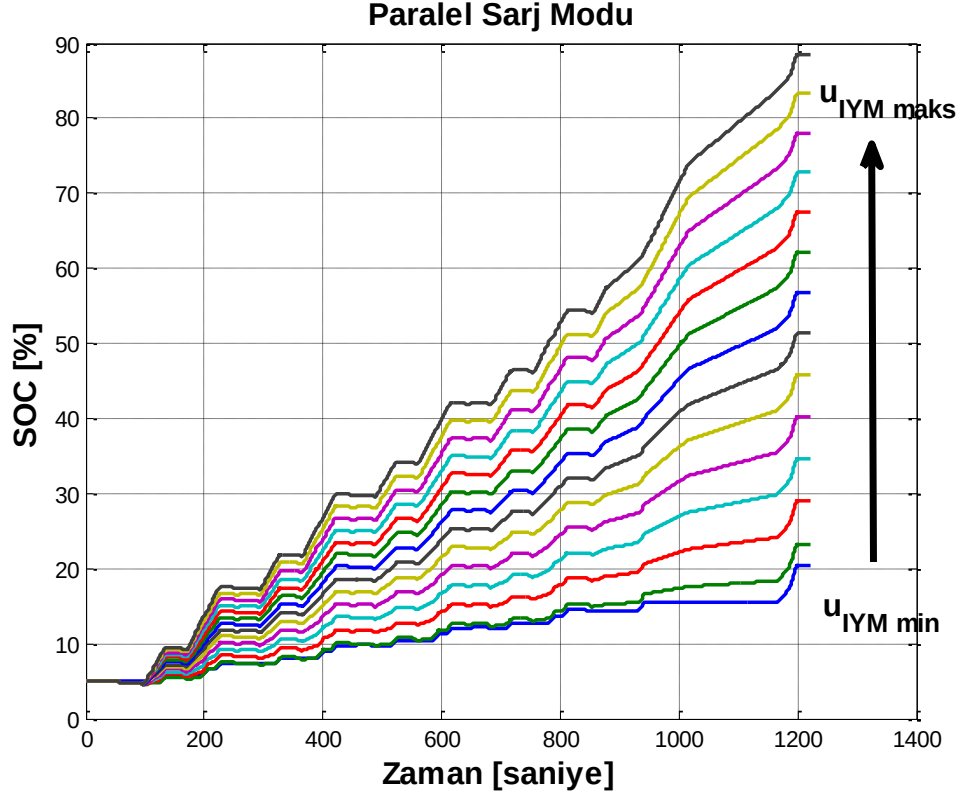
Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de bu NEDC ve basitleştirilmiş araç modeli kullanılarak elde edilmiş şarj profilleri görülmektedir. Seçilen her bir kontrol girişi ile farklı profiller izlenmekte, ancak Güç Paylaşım Modunda, maksimum kontrol girişi daha çok İYM kullanımına izin vermekte oysa değeri küçüldükçe EM kullanımı artarak, son şarj değerinin giderek azaldığı görülmektedir. Benzer şekilde Paralel Şarj Modunda kontrol değerinin artması, yol yüklerinin tamamen İYM tarafından karşılanması aynı zamanda artan tork ile de, batarya şarj edilmekte ve giderek artan bir şarj trendi görülmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, seçilen kontrol değerleri ancak, komponentlerin çalışma bölgeleri uygunsa (Ör: Maksimum İYM hızı) kullanılmakta aksi halde, komponentlerin izin verdiği fiziksel sınırlar kullanılmakta, geri kalan yol yükü için diğer komponent kullanılmakta ve o an için kontrol girişi değeri ihlal edilmektedir. Öte yandan, geri kazanımlı frenleme her durumda EM’nin maksimum tork değeri izin verdiği ölçüde gerçekleştirilmiştir. Son olarak da bu testler, diğer kontrol girişi olan vites için tekrarlanmıştır.



Şekil 4.7 : NEDC için EYTM karakteristik belirleme, batarya şarj değişimleri – güç paylaşım modu.

Şekil 4.9’da ise veri toplama sürecinde elde edilmiş toplam sürüş boyunca gerçekleşen yakıt ve elektrik enerjisi değerleri görülmektedir. Eğrideki her bir nokta bir sürüş çevrimi boyunca kullanılan ve Paralel Şarj Modu ve Güç Paylaşımı Modları için kullanılmış kontrol girişlerini ifade etmektedir. Buna göre bu iki mod için iki farklı karakteristik ortaya çıkar. Lineer bir yapı izleyen bu iki karakteristik, işte eşdeğer yakıt katsayısı için bir fikir vermektedir. Zira bu iki lineer eğrinin eğimi, şarj ve deşarj modlarındaki yakıt ve elektrik enerjisi için gerekli eşdeğerlik katsayısını ifade etmektedir.

Ayrıca dikkat edilmelidir ki, bu iki modun birleştiği nokta, EM girişlerinin hiç kullanılmadığı sadece yol yüklerini İYM’nin karşıladığı kontrol girişini ifade etmektedir. Ancak, grafikten görüldüğü üzere bu noktada belirli bir oranda elektrik enerjisi batarya da depolanmıştır. Bunun sebebi geri kazanılan reküperatif frenleme enerjisidir.



Şekil 4.8 : NEDC için EYTM karakteristik belirleme, batarya şarj değişimleri – paralel şarj modu.

Çizelge 4.1’de NEDC ve FTP çevrimleri için elde edilen eşdeğer katsayıları için elde edilmiş değerler görülmektedir. Bu katsayılar çözüm bölümünde görüleceği üzere gerek şarj dengeleme, gerekse EYTM stratejisini global davranışa daha fazla yaklaştırma adına ikincil bir kalibrasyona tabi tutulmuştur.

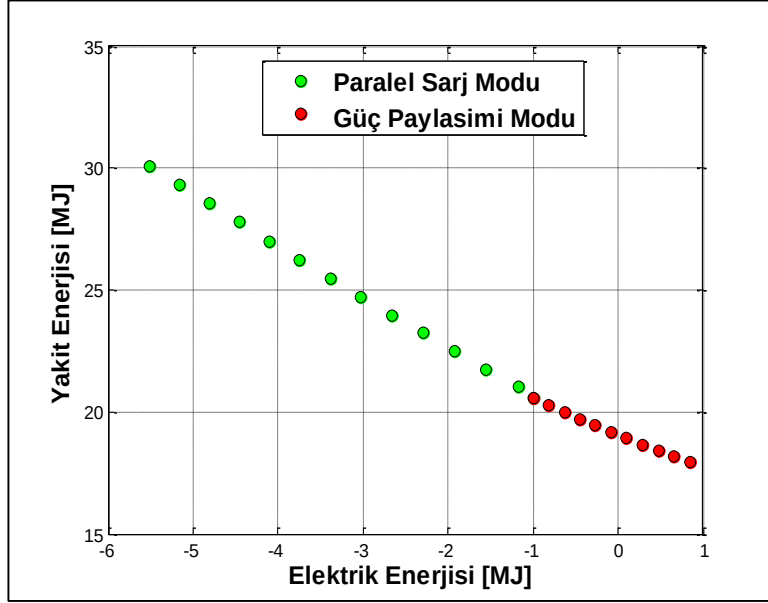
Çizelge 4.1: EYTM stratejisi için FTP ve NEDC çevrimleri eşdeğer yakıt tüketimi katsayıları.

s0	NEDC	FTP
s şarj	1.6	1.8
sdeşarj	1.5	1.5

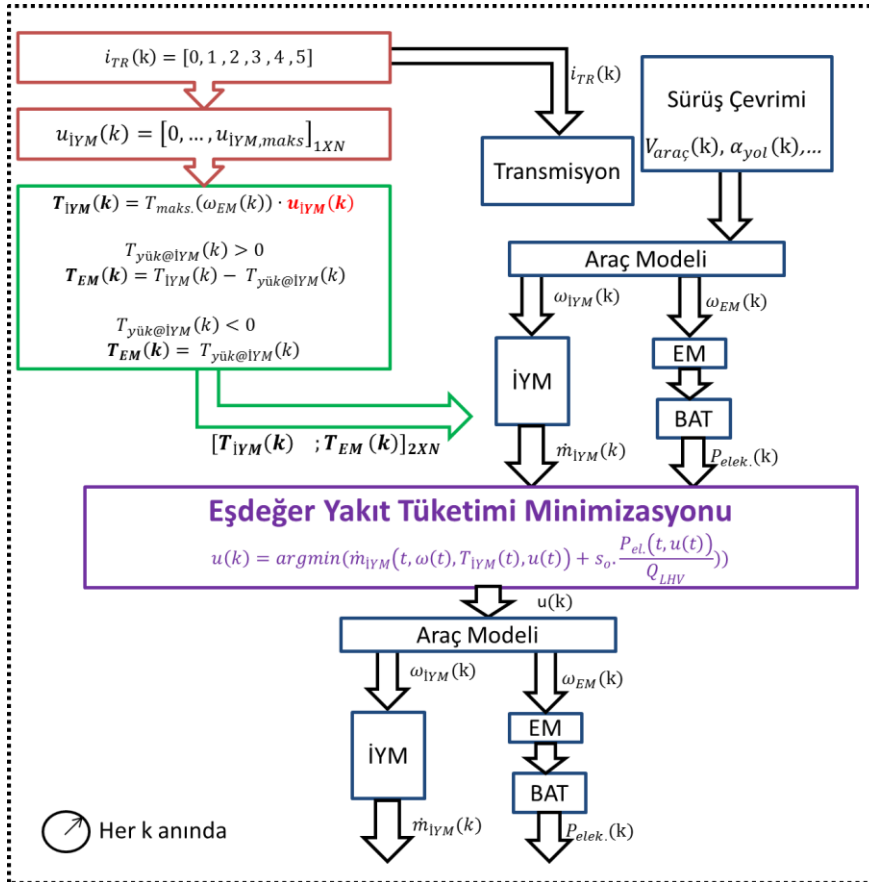
Daha önce de belirtildiği üzere, bu aşamaya kadar, herhangi bir sürüş çevrimi için elde edilmiş Hibrid Araç ve komponentlerin davranışlarından ötürü, bir eşdeğer yakıt kavramı oluşturulmuştur. Ancak, elde edilen bu davranışın anlık bir optimizasyon sistemi ile nasıl kullanılacağından bahsedilmemiştir. Buna göre, aşağıdaki Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyon Algoritma Şeması bu konuya açıklık getirmektedir.

Buna göre, her simülasyon adımında, yukarıda karakteristiği elde edilen eşdeğer yakıt tüketimi tüm kontrol girişleri kullanılarak hesaplanır. Anlık olarak toplam tüketim

ifadesini minimize edecek kontrol girişi elde edilir. Ve son olarak bu kontrol girişi için komponentlere istenen girişler dağıtılır.



Şekil 4.9 : Yakıt tüketimi ve elektrik enerjisi tüketimi (paralel şarj modu ve güç paylaşım modları için).



Şekil 4.10 : Eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu algoritmasının araç modeline uygulanması.

Yukarıda ifade edilen Eşdeğer Yakıt Minimizasyonu Yöntemi aslında şarj dengeleme ile ilgili bir terim içermemektedir. Pratikte, yukarıdaki yöntemle elde edilen eşdeğerlik faktörü kullanıldığında istenen şarj son değerinin elde edilmesi ancak parametrenin ilk seçilen değer etrafında kullanılan sürüş çevrimi için ayarlanması ile mümkün olmaktadır. Bu anlamda şarj dengesini sağlayabilmek adına, eşdeğer yakıt tüketimi ifadesine bir ceza fonksiyonu eklenmiştir. Öte yandan bu fonksiyon şarj edilemeyen Hibrid Araç Modeli için, batarya şarjının belirli bir bant içerisinde kalmasını sağlayacak düzeltme faktörünü de içermektedir.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{eşdeğer} &= \dot{m}_{iYM} + \dot{m}_{el.} \\ &= \dot{m}_{iYM}(t, \omega(t), T_{iYM}(t), u(t)) + s_o \cdot \frac{P_{el.}(t, u(t))}{Q_{LHV}} \cdot s_1(SOC) \end{aligned} \quad (4.64)$$

$$\begin{aligned} s_1(SOC) &= \begin{cases} \left(1 + \left(\frac{SOC_{terminal} - SOC(t)}{SOC_{terminal} - SOC_{min}} \right)^{2n+1} \right) & \text{eğer } SOC(t) < SOC_{terminal} \\ \left(1 - \left(\frac{SOC(t) - SOC_{terminal}}{SOC_{terminal} - SOC_{min}} \right)^{2n+1} \right) & \text{eğer } SOC(t) \geq SOC_{terminal} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.65)$$

Dinamik programlama yöntemi HEA için enerji yönetimi açısından global bir optimum sonucu oluşturmaktadır. Bu tez kapsamında incelenen iki farklı HEA teknolojisinin optimal çözümünün elde edilmesi açısından Dinamik Programlama yönteminden faydalanılmıştır. Bu şu ana kadar geliştirilen anlık optimal çözümlerinin iyileştirme oranlarının karşılaştırılmasında kullanılmaktadır. Optimal çözümler öte yandan, vites geçişlerinin de optimizasyon rutinine katıldığı ya da optimizasyon sürecinden bağımsız tutulduğu iki durum için de incelenmiştir. Bu anlamda aşağıdaki, Çizelge 4.2 bu bölümde incelenen durumları özetlemektedir. Öte yandan kullanılan optimizasyon yöntemlerinin denenmesinde farklı sürüş çevrimleri kullanılmıştır. Çizelge 4.2 aynı zamanda incelenen senaryoları da listelemektedir. Her ne kadar kullanılan sürüş çevrimlerinin çoğunda, tanım olarak hiçbir yol topolojisi kullanılmamaktadır. Öte yandan bu tez çalışmasının temel amacı, gerçek bir sürüş çevrimi için öngörülü HEA Enerji Yönetim Kontrolü olduğundan, yol eğimlerinin enerji yönetimi açısından çok önemlidir. Zira bu durumların da, şu noktada kullanılan HEA Enerji Yönetim Sistemler dâhilinde irdelenmesi gerekmektedir. Bu anlamda her bir sürüş çevriminin, jenerik bir yol topolojisi boyunca incelendiği varyantları da bu

bölümde incelenmiştir. Son olarak irdelenen senaryolar ile ilgili bir notta sürüş çevrimlerinin uzunluğu ile ilgilidir. Bu çevrimler genel olarak, şarj edilemeyen HEA teknolojisinin irdelenmesi için, kısıtlı batarya ve EM gücü göz önüne alındığında uygundur. Öte yandan, şarj edilebilen HEA açısından, şarj tüketme ve şarj dengeleme modlarının tamamının incelenmesi açısından her bir çevrimin uzunluğu kısadır. Bu anlamda, sürüş çevrimleri bu durum incelenirken ardışık olarak kullanılarak bir araya getirilmiş ve yeni birleşik çevrimler oluşturulmuştur.

4.4 Dinamik Programlama ve EYTM İçin Karşılaştırmalı Sonuçlar

Bu bölümde incelenen iki farklı enerji yöntemi stratejisi ile elde edilen sonuçlar paralel hibrid araç için sunulmuştur. Öncelikle dinamik programlama ile ilgili elde edilen global optimal davranış ve buna karşılık EYTM stratejisi ile elde edilmiş sub-optimal davranış karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Simülasyonlar normal hibrid araç için NEDC ve FTP sürüş çevrimleri için sunulurken şarj edilebilen hibrid araç için aracın menzilini daha doğru test edebilmek adına çevrimler ardışık olarak eklenerek daha uzun mesafeli sürüş çevrimleri oluşturulmuştur. Öte yandan Dinamik Programlama algoritmasının bir versiyonu da vites optimizasyonlu olarak geliştirildiğinden Dinamik Programlama gerçekleştirilen testler, vites geçişlerinin hızı göre belirlendiği bir versiyon ve geçişlerin optimizasyon algoritması tarafından anlık olarak seçildiği bir başka versiyon olmak üzere 2 farklı Durum için tekrarlanmıştır.

Sonuç olarak yapılan simülasyon senaryolarının tümü Çizelge 4.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2 : Hibrid elektrikli araç enerji yönetimlerinin incelendiği simülasyon senaryolarının özeti.

	NEDC	5xNEDC	FTP	5xFTP	2xFTP+3xNEDC
Durum 1	●		●		
Durum 2	●/○/★		●/○/★		
Durum 3		●/○		●/○	●/○

●: DP ○: EYTM ★: Şarj Kontrolü

Çizelgede görülmekte olan Durumların tanımları aşağıdaki gibidir.

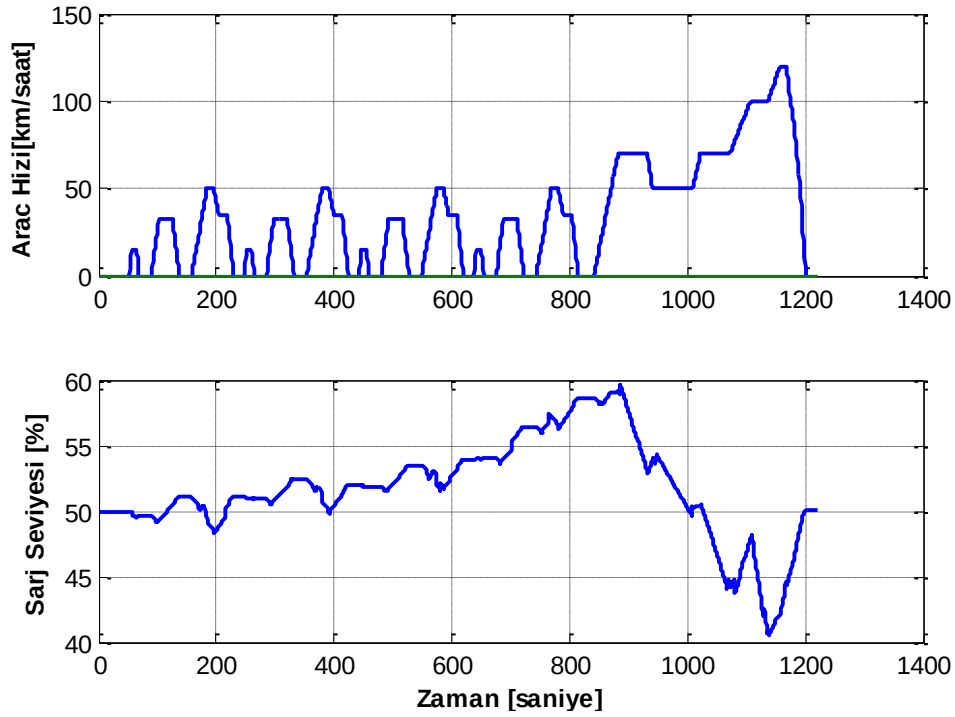
- **Durum 1** - Vites Optimizasyonu ve HEA Enerji Yönetimi – Şarj Edilemeyen HEA Araç İçin
- **Durum 2** - Sadece HEA Enerji Yönetimi – Şarj Edilemeyen HEA Araç İçin
- **Durum 3** - Sadece HEA Enerji Yönetimi – Şarj Edilebilen HEA Araç İçin

Son olarak da EYTM stratejisi için eşdeğer tüketim katsayısı belirtilen yöntemler çerçevesinde elde edilmiş olup, şarj dengesinin sürüş çevrimleri sonunda sağlanabilmesi için her çevrim için kalibre edilmiştir. Çözüm için verilmiş çalışma modlarının tanımları, Çizelge 4.3’ te görülmektedir.

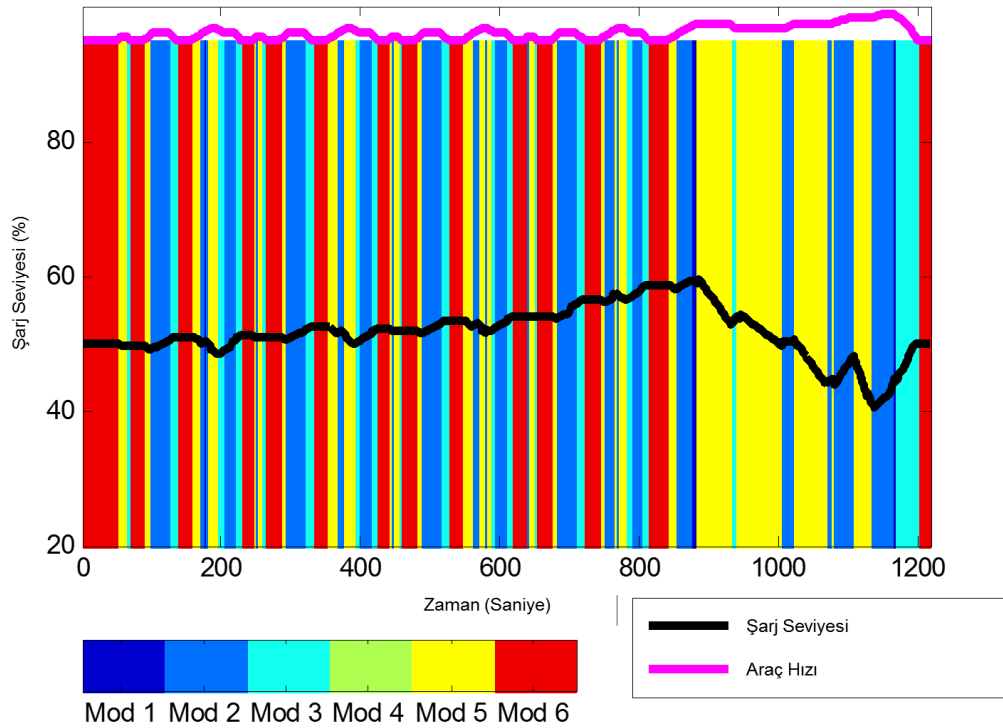
Çizelge 4.3 : Hibrid elektrikli araç çalışma modları.

Çalışma Modları	Tanım
Mod 1	Güç Paylaşım Modu
Mod 2	Paralel Şarj
Mod 3	Rekuperatif Frenleme
Mod 4	Sadece İYM
Mod 5	Sadece EM
Mod 6	Hareketsiz Durum

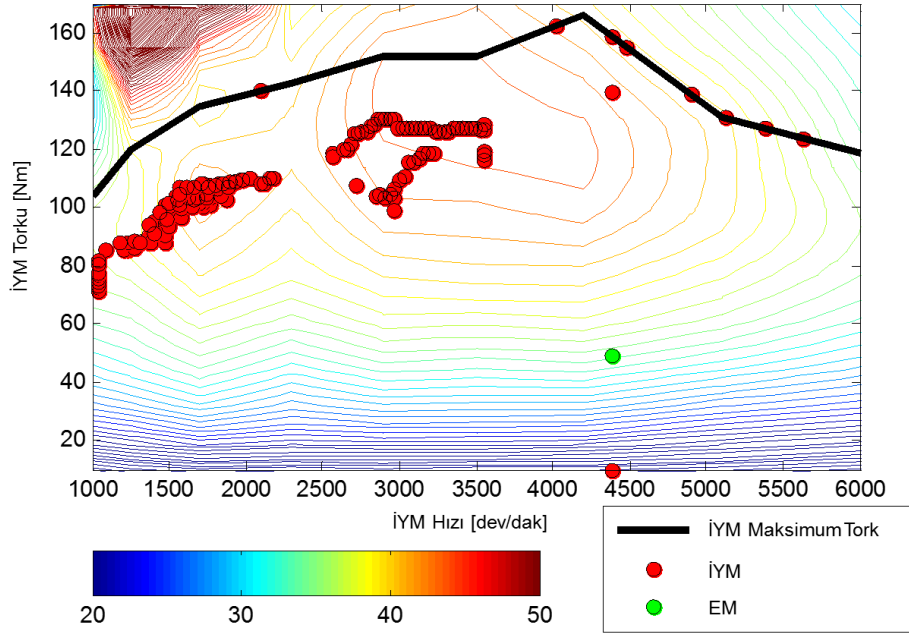
4.4.1 Durum 1: NEDC – HEA – dinamik programlama



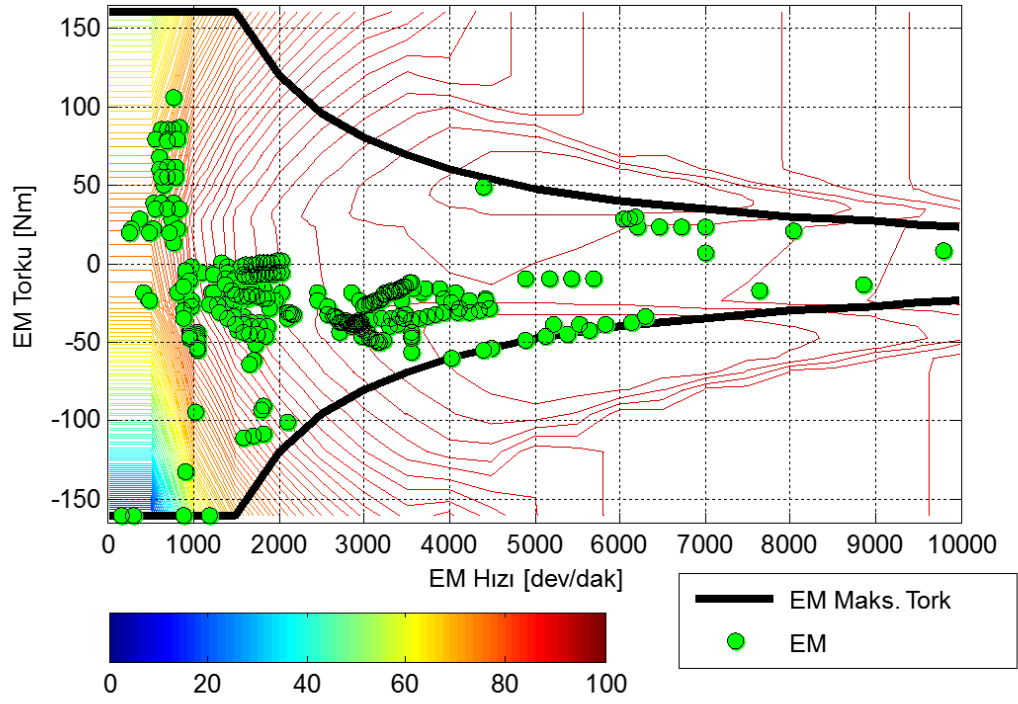
Şekil 4.11 : NEDC Durum 1 – DP algoritma: hız profili ve batarya şarj profili.



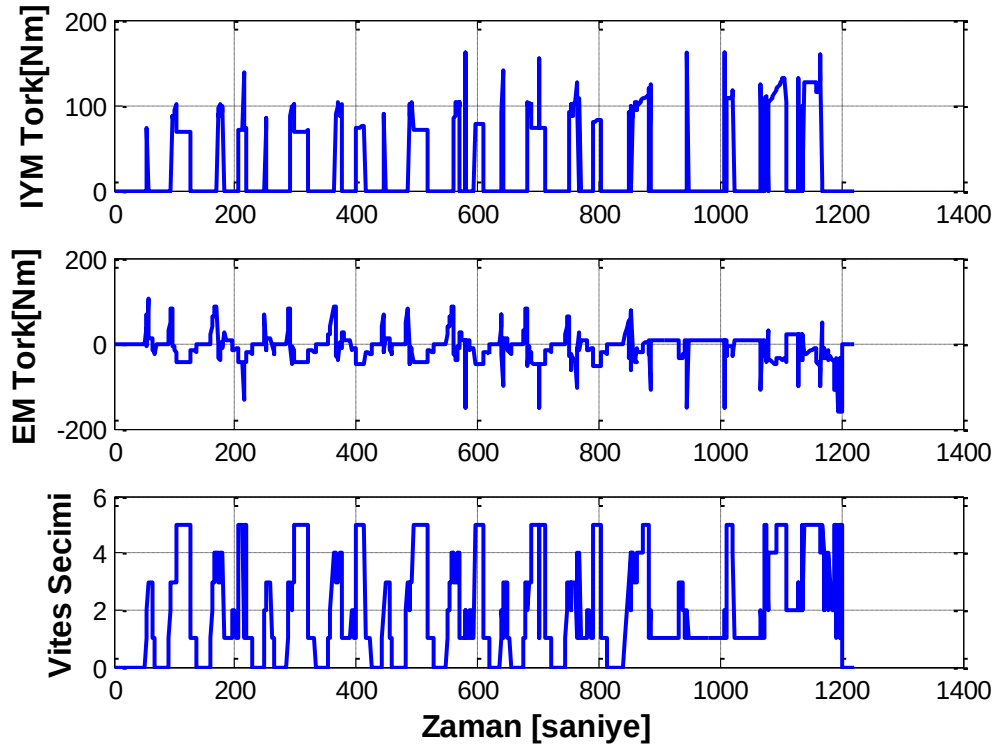
Şekil 4.12 : NEDC Durum 1 – DP algoritma: hız profili ve batarya şarj profili ve seçilen sürüş modları.



Şekil 4.13 : NEDC Durum 1 – DP algoritma: İYM ve EM çalışma noktaları.

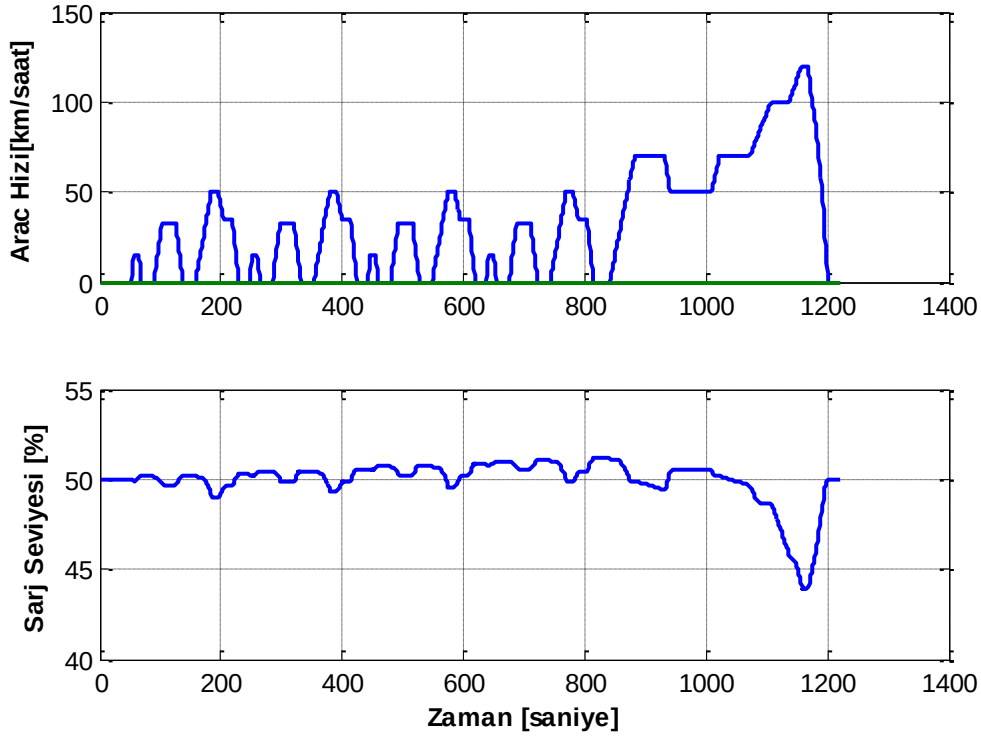


Şekil 4.14 : NEDC Durum 1 – DP algoritma: EM çalışma noktaları.

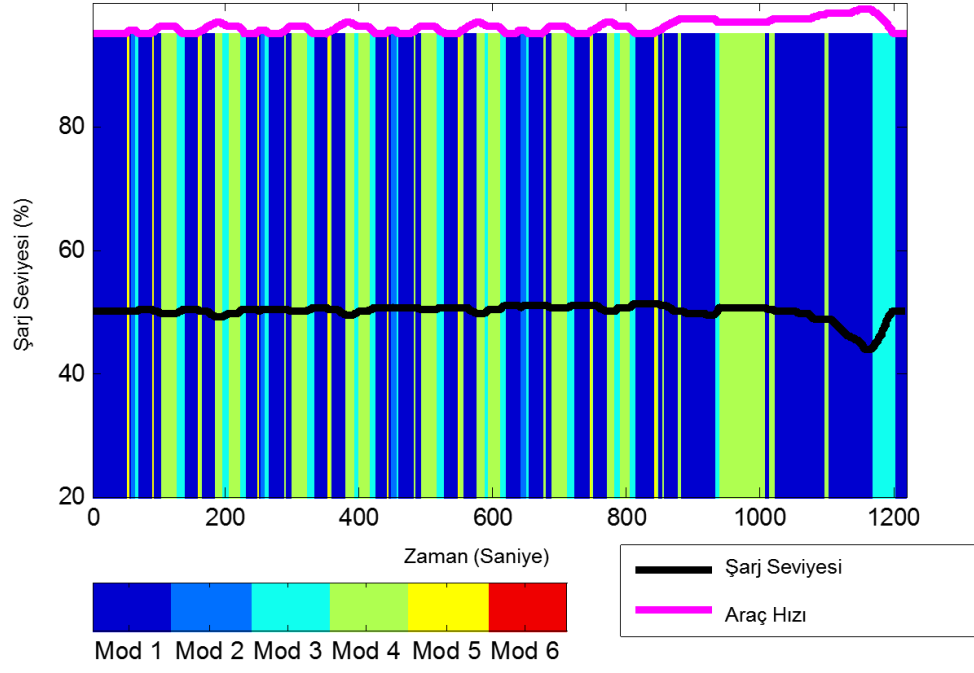


Şekil 4.15 : NEDC Durum 1-DP algoritma: İYM ve EM tork seçilen vitesler.

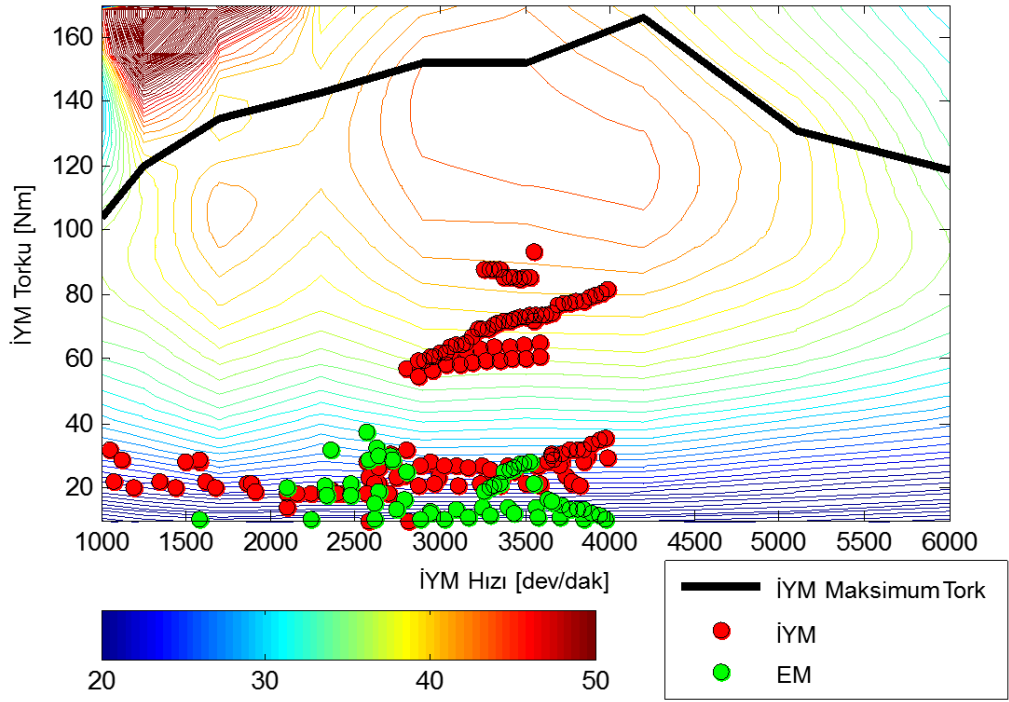
4.4.2 Durum 2: NEDC – HEA – dinamik programlama



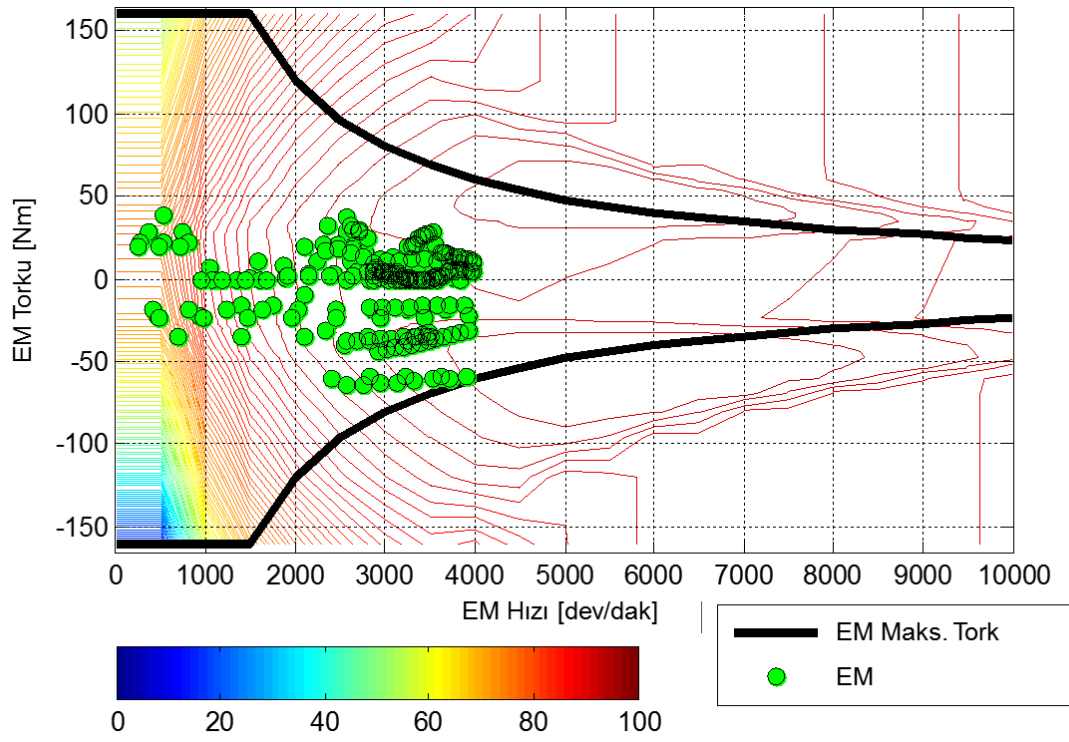
Şekil 4.16 : NEDC Durum 2 – DP algoritma: hız profili ve batarya şarj profili.



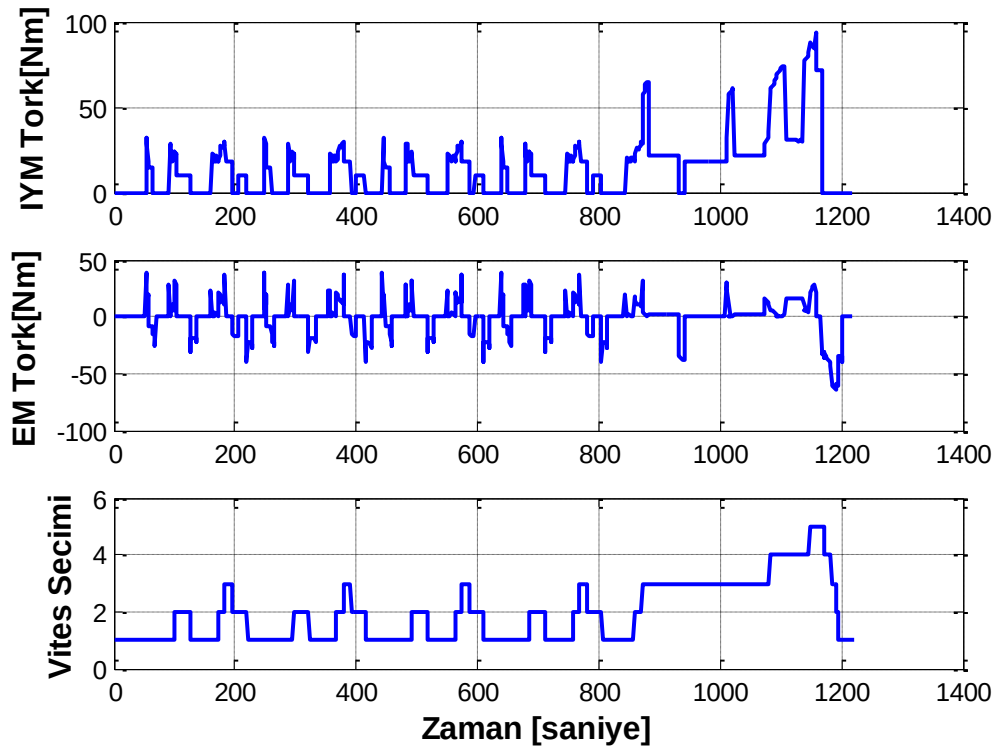
Şekil 4.17 : NEDC Durum 2 – DP algoritma: hız profili ve batarya şarj profili ve seçilen sürüş modları.



Şekil 4.18 : NEDC Durum 2 – DP algoritma: İYM ve EM çalışma noktaları

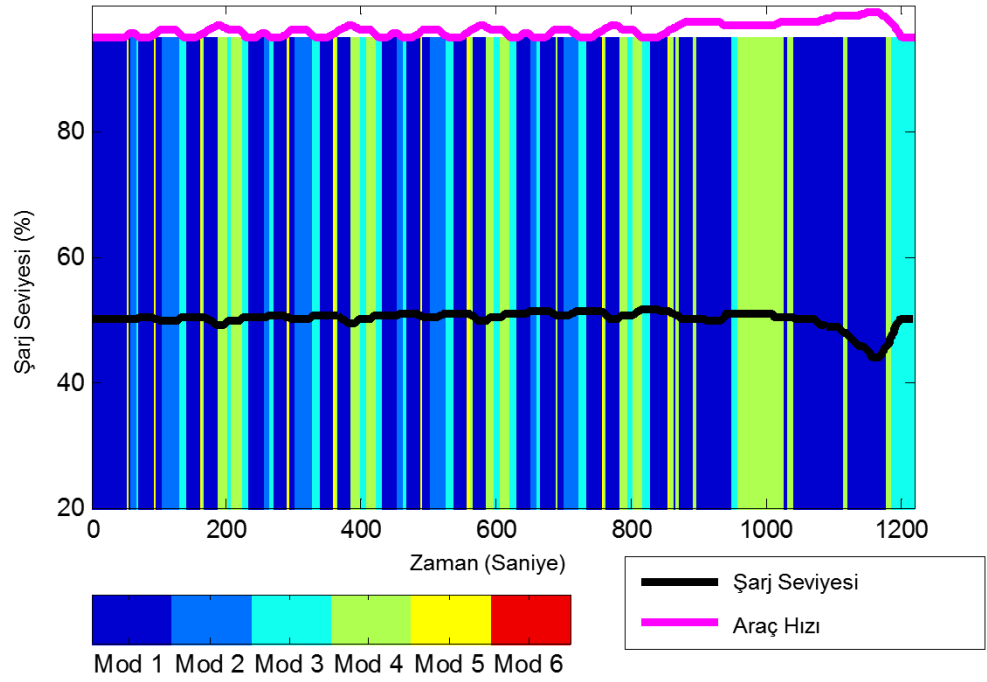


Şekil 4.19 : NEDC Durum 2 – DP algoritma: EM çalışma noktaları.

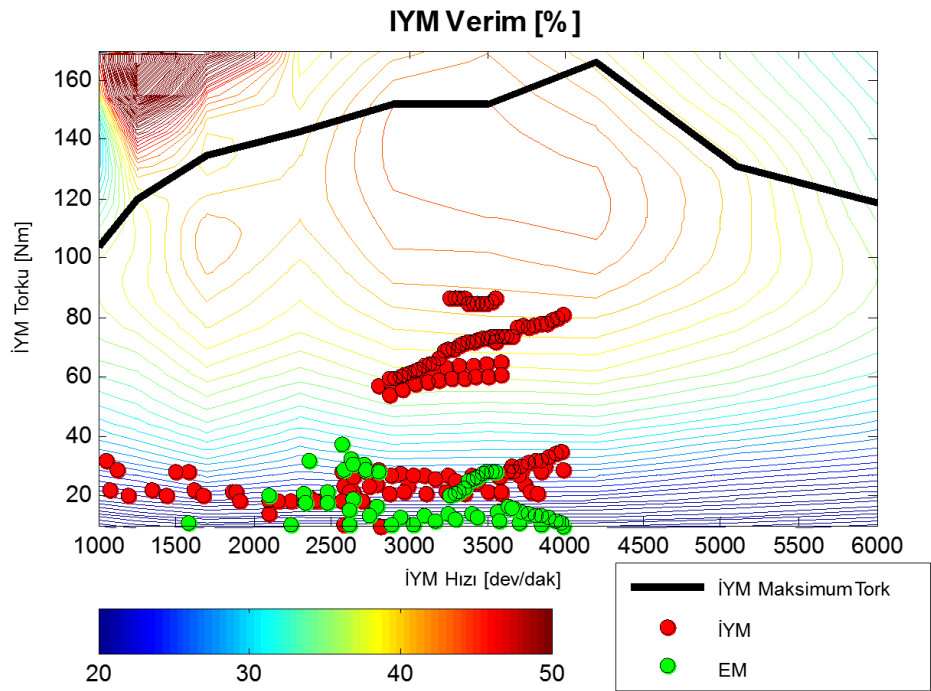


Şekil 4.20 : NEDC Durum 2 – DP algoritma: İYM ve EM tork seçilen vitesler.

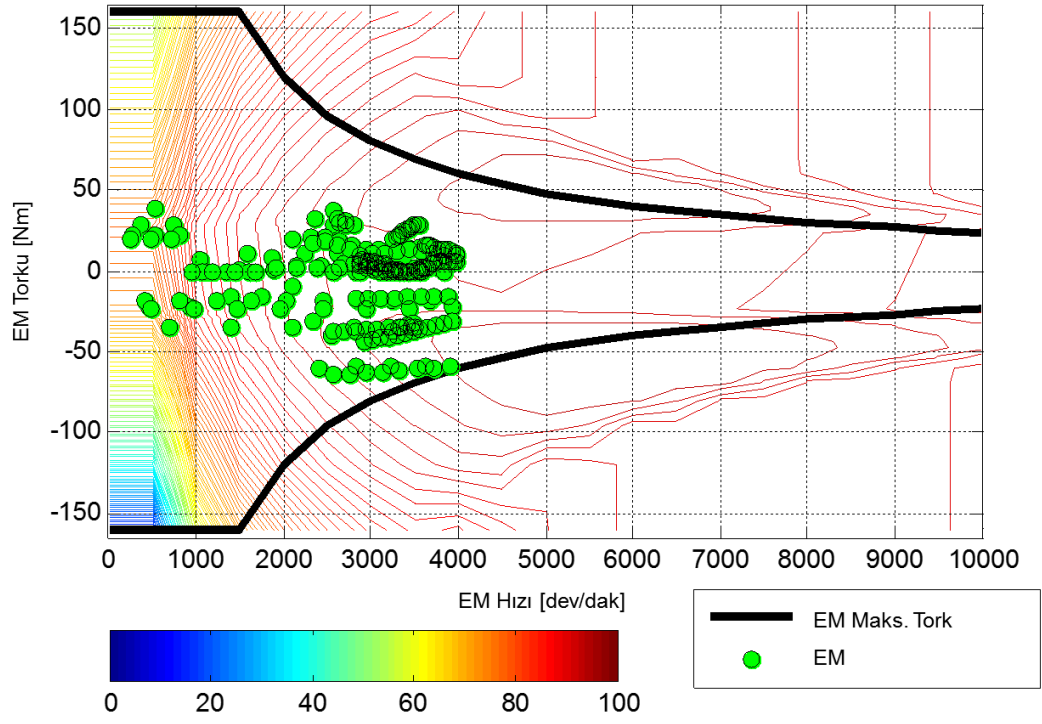
4.4.3 Durum 2: NEDC – HEA – EYTM



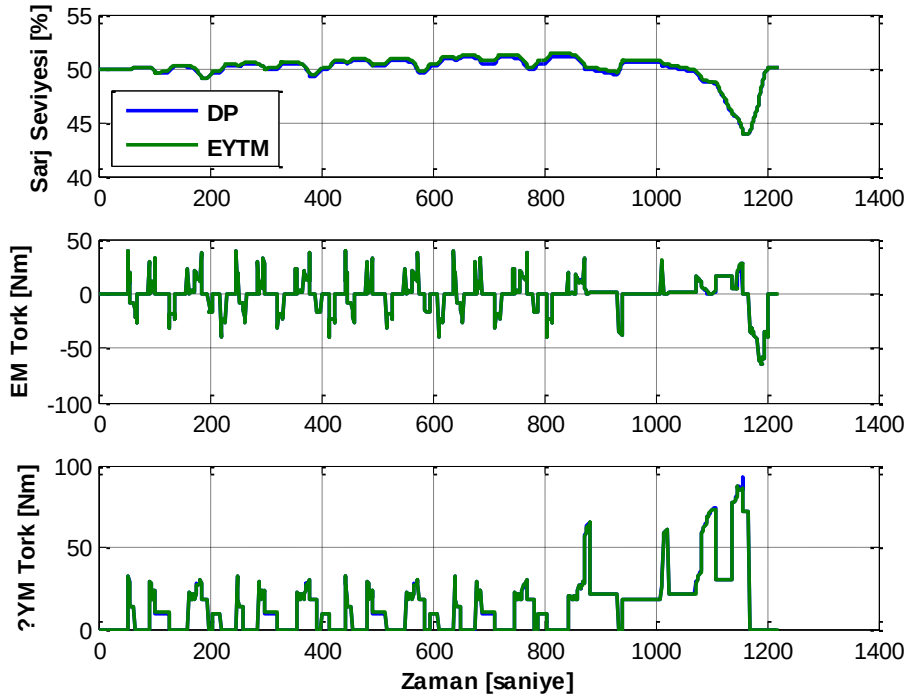
Şekil 4.21 : NEDC Durum 2 – EYTM algoritma: hız profili ve batarya şarj profili ve seçilen sürüş modları.



Şekil 4.22 : NEDC Durum 2 - EYTM algoritma: İYM ve EM çalışma noktaları.

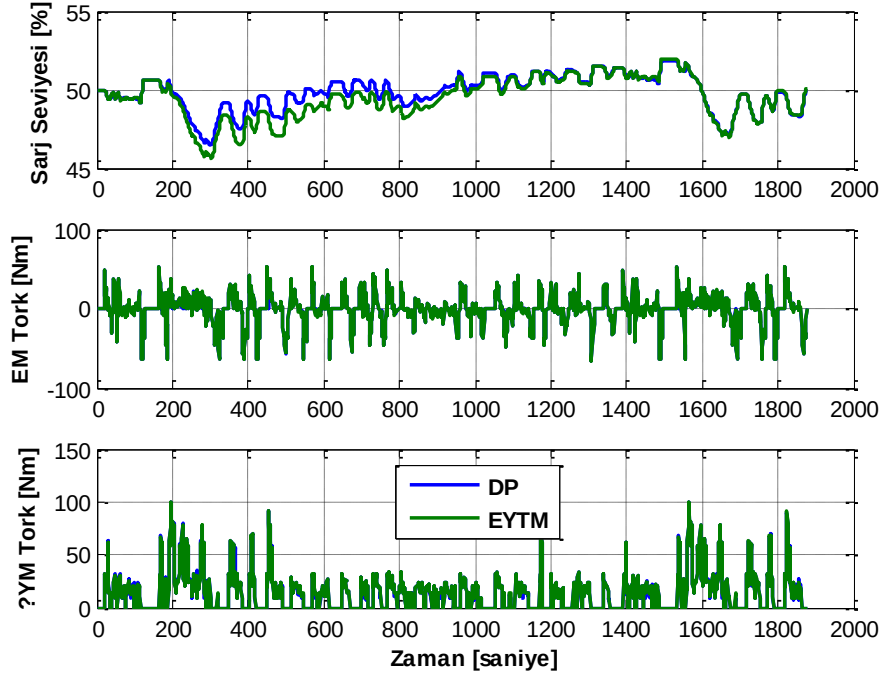


Şekil 4.23 : NEDC Durum 2 – EYTM algoritma: EM çalışma noktaları.



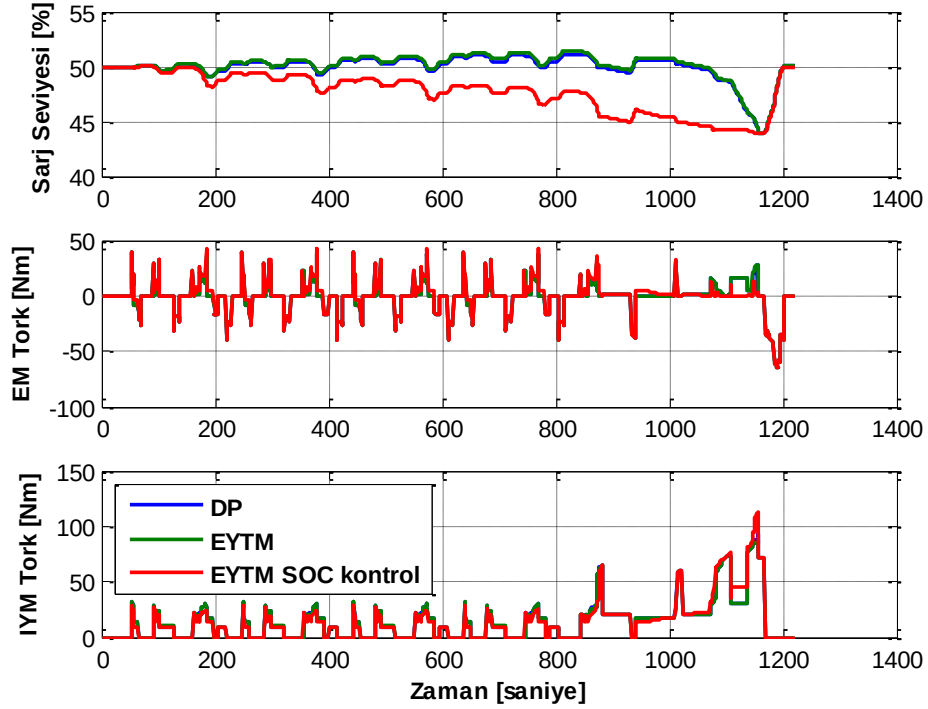
Şekil 4.24 : NEDC çevrimi Durum 2 – DP ve EYTM algoritmaları karşılaştırma: batarya şarj profilleri, EM ve İYM torkları.

4.4.4 FTP çevrimi – HEA – dinamik programlama ve EYTM stratejisi

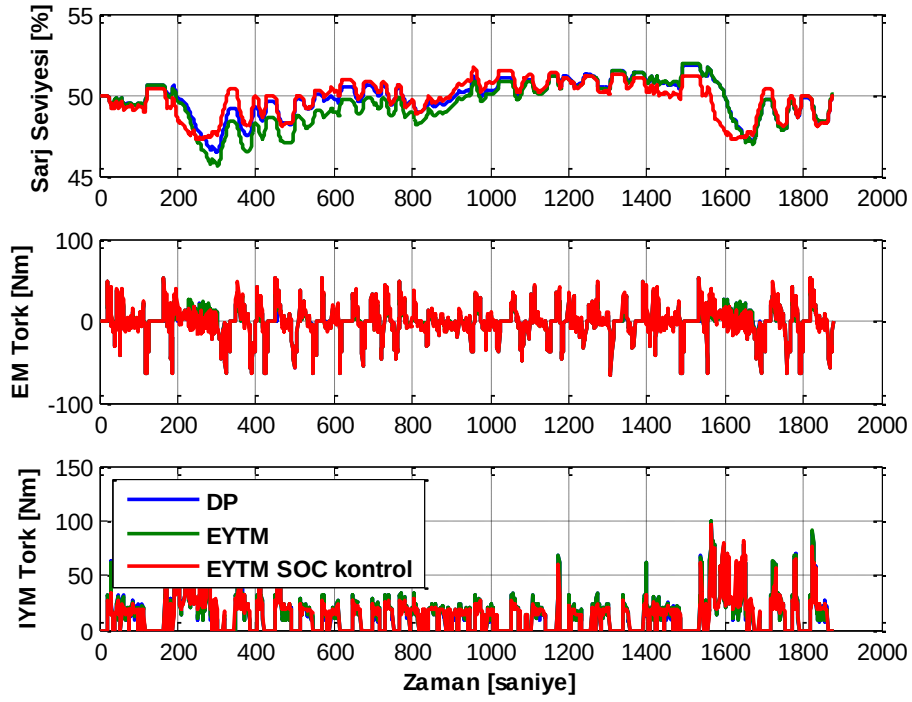


Şekil 4.25 : FTP çevrimi Durum 2 – DP ve EYTM algoritmaları karşılaştırma: batarya şarj profilleri, EM ve İYM torkları.

4.4.5 Batarya şarj dengeleme algoritmaları

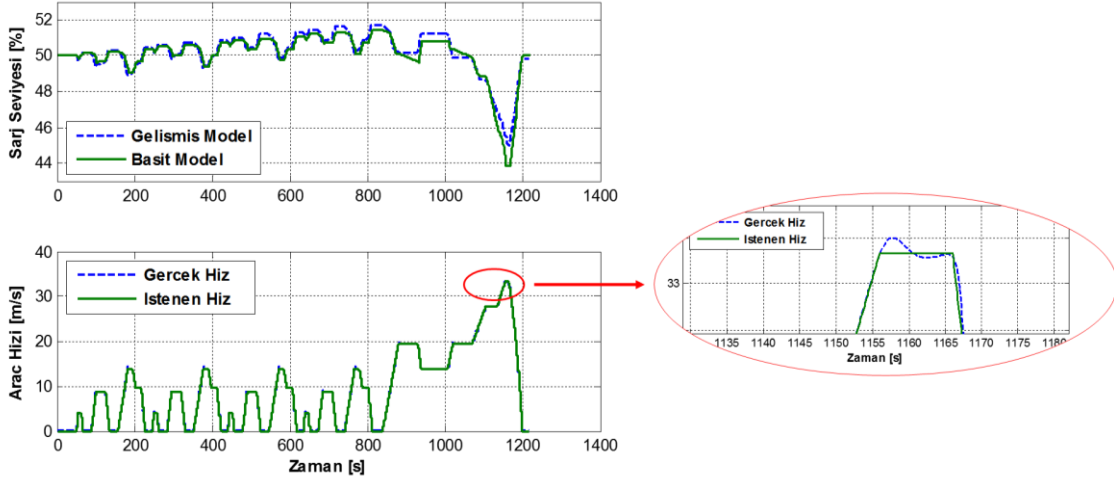


Şekil 4.26 : NEDC Durum 3 – DP, EYTM ve EYTM SOC kontrol algoritmaları karşılaştırma: batarya şarj profilleri, EM ve İYM torkları.

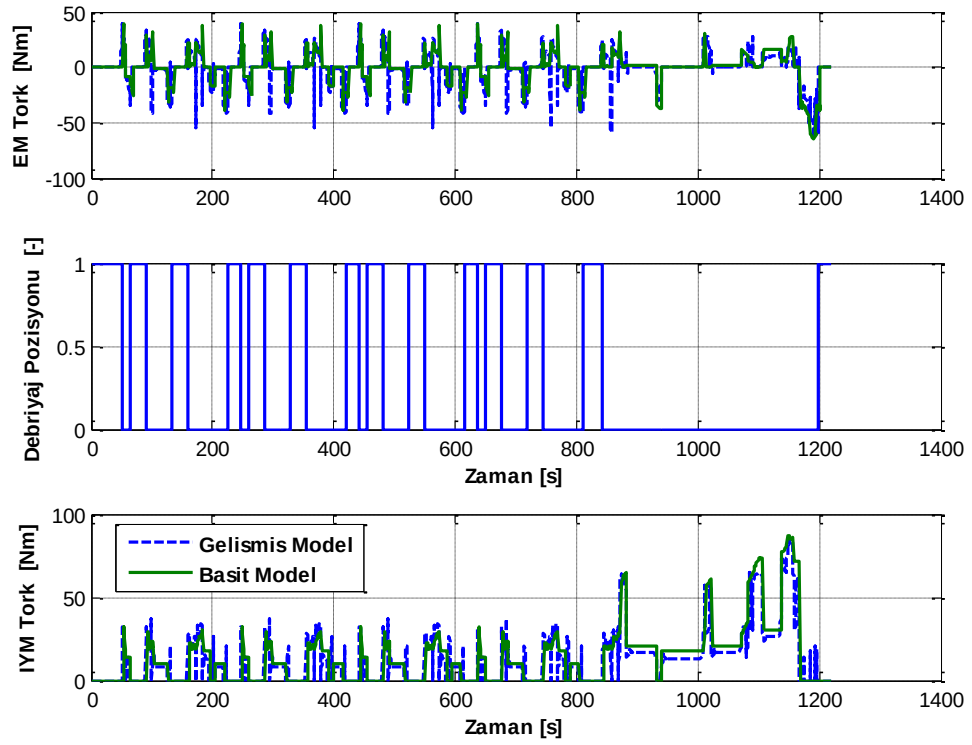


Şekil 4.27 : NEDC Durum 3 – DP, EYTM ve EYTM SOC kontrol algoritmaları karşılaştırma: batarya şarj profilleri, EM ve İYM torkları.

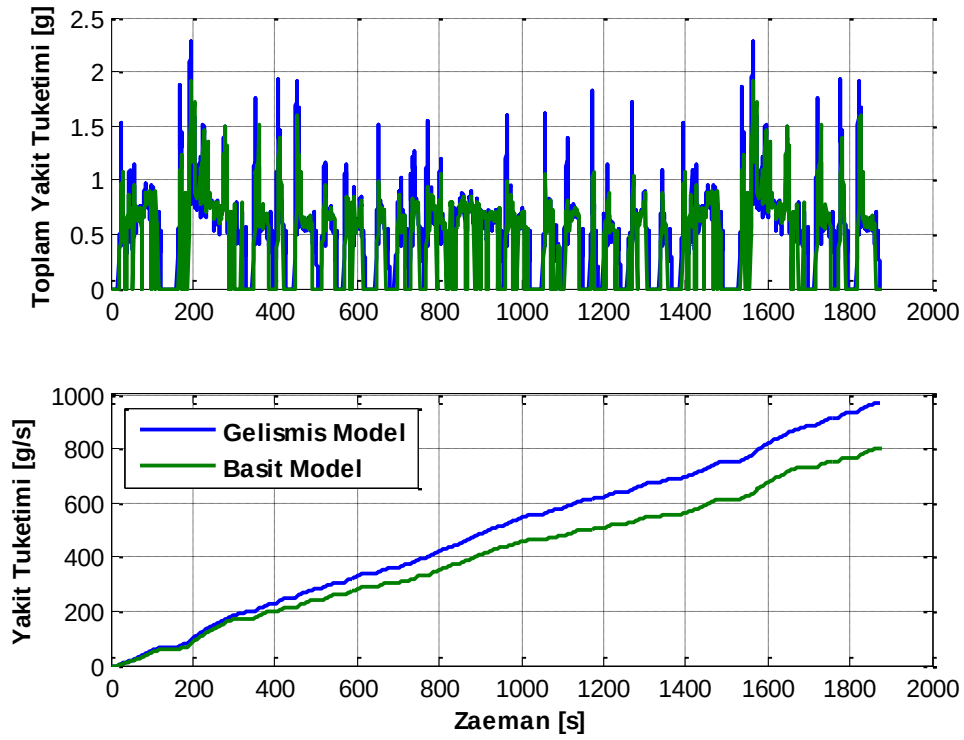
4.4.6 Dinamik tam model karşılaştırmalı sonuçlar



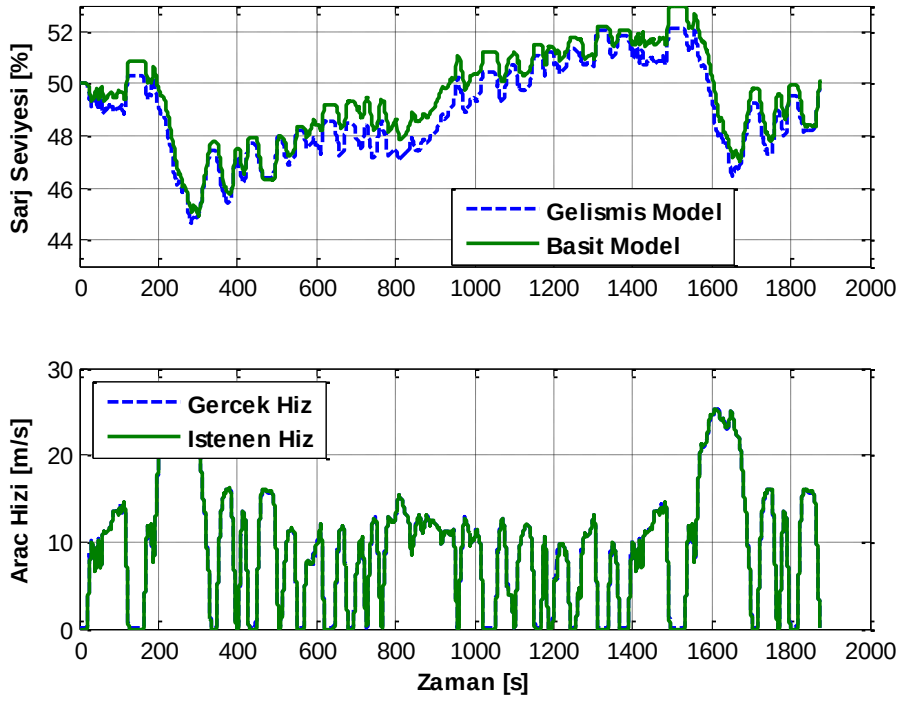
Şekil 4.28 : NEDC Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model batarya şarjı ve araç hızları.



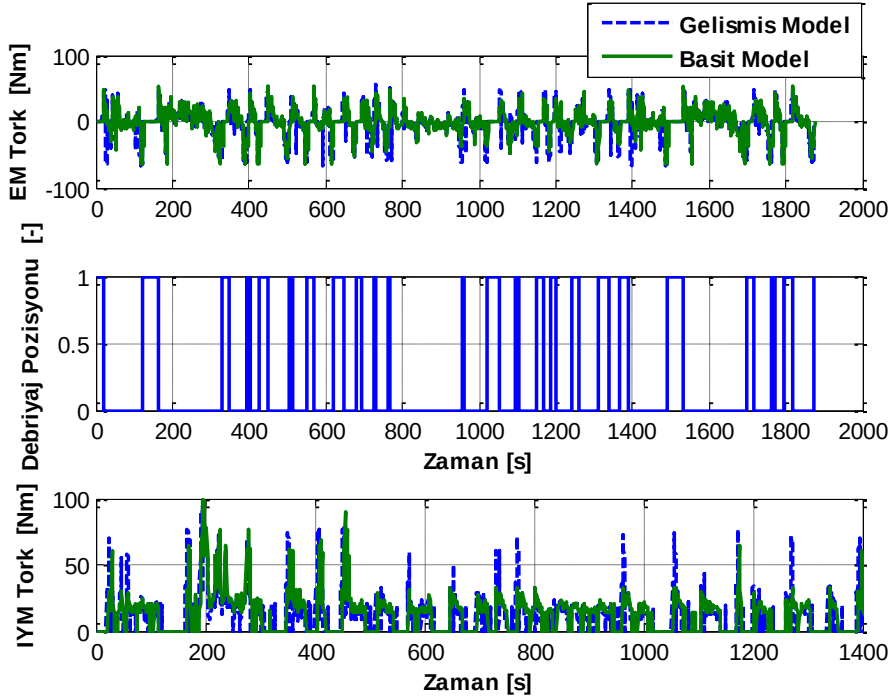
Şekil 4.29 : NEDC Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model davranış – EM tork, debriyaj pozisyonu ve İYM tork.



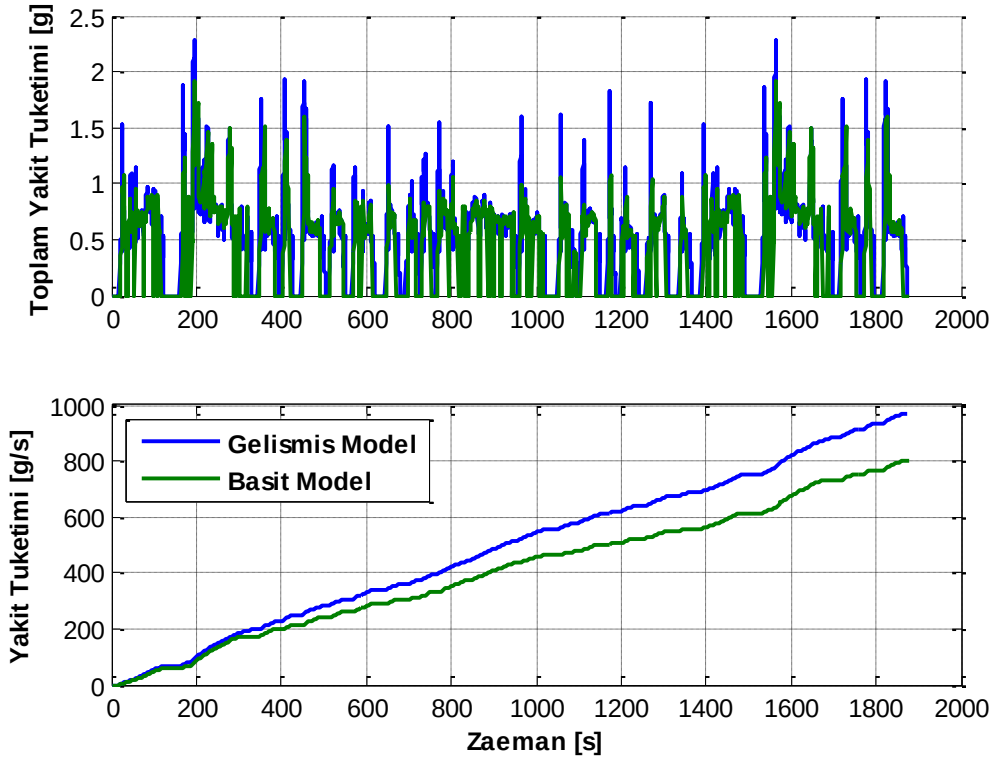
Şekil 4.30 : NEDC Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model davranış – anlık ve toplam yakıt tüketimi.



Şekil 4.31 : FTP çevrimi Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model batarya şarjı ve araç hızları.



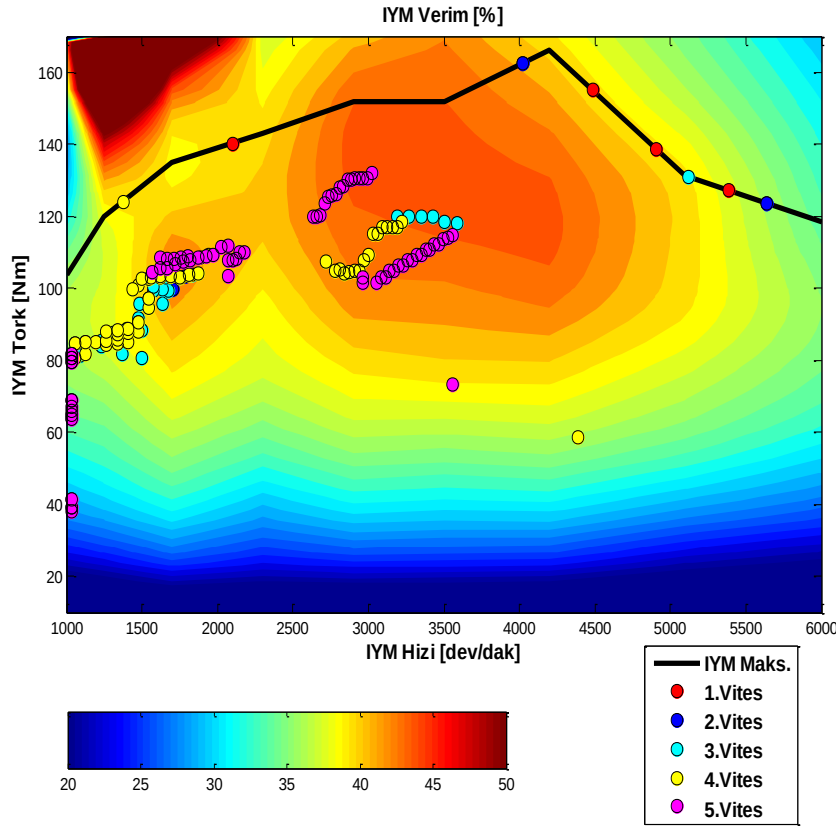
Şekil 4.32 : FTP çevrimi Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model davranış – EM tork, debriyaj pozisyonu ve İYM tork.



Şekil 4.33 : FTP çevrimi Durum 2 –EYTM algoritması – geri yönde model ve gelişmiş model davranış – anlık ve toplam yakıt tüketimi.

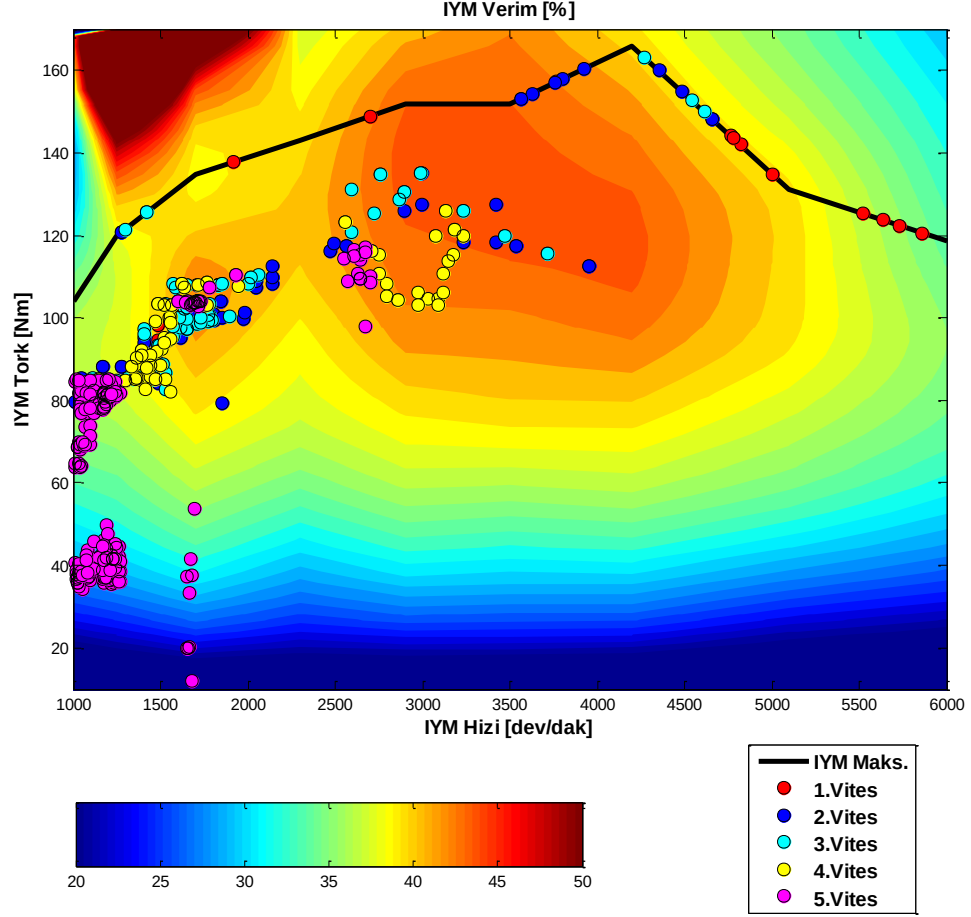
4.4.7 Sonuçların irdelenmesi

Görüldüğü gibi tüm DP ve EYTM algoritmaları ve varyantları ile şarj kontrollü EYTM algoritmalarında batarya şarjı istenen son değerlere ulaşmıştır. Öte yandan, HEA araç versiyonlar için batarya şarjı maksimum ve minimum şarj limitleri olan %40 ve %60 şarj değerleri arasında salınmaktadır. Tüm algoritmalarda optimizasyon kriterlerinde reküperatif şarj değerlendirme dışında bulundurulmuştur. Bir başka deyişle, şarj limitleri aşılmadığı sürece ve güç aktarma organlarının ve jeneratör hız ve tork sınırları aşılmadığı sürece tüm frenleme enerjisi batarya şarjı için kullanılmıştır. Şarj dengeleme dışında yakıt tüketimi minimizasyonunun da DP ve EYTM algoritmaları ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.34 : NEDC Durum 1 –DP algoritması – viteslere göre çalışma noktaları.

HEA simülasyonlarında vitesi çevrimlerinin de optimize edildiği Durum 1 varyantlarında yakıt tüketiminin en küçük değeri aldığı görülmektedir. Bunun sebebi, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’de İYM haritasındaki NEDC ve FTP sürüş çevrimleri için çalışma noktalarından da anlaşılacağı üzere daha verimli noktalarda viteslerin seçilmesine izin verilmemesidir. Dolayısı ile vites oranları ile artı bir serbestlik derecesi yaratılarak İYM hızı doğrultusunda çalışma noktaları daha verimli noktalara getirilebilmiştir. Öte yandan bu verimli ve optimal vites geçişleri belirli bir vites değiştirme algoritması oluşturacak şekilde bir düzene sahip değildir. Dolayısı ile bu algoritma daha ziyade teorik bir optimal davranış oluşturmaktadır. Öte yandan Durum 2 için incelenen DP algoritması vites çevrimlerinin hıza bağlı bir kurala bağlandığı durum için optimal davranışı ifade etmektedir.



Şekil 4.35 : FTP çevrimi Durum 1 –DP algoritması – viteslere göre çalışma noktaları.

Bununla beraber, EYTM davranışının daha hassas kalibrasyonu için de bu DP algoritmasının sonuçları kullanılmıştır. EYTM stratejisi ve özel olarak eşdeğer tüketim katsayıları, Şekil 4.6’da görülmekte olan yöntem ile elde edilmekle beraber, gerek şarj dengelemek gerekse EYTM stratejisinin optimal davranışa yaklaştırılması adına ikincil katsayı kalibrasyonu yapılmıştır. Bu işlemin sonunda EYTM davranışı global optimal davranışa oldukça yaklaşmıştır. Kullanılan nihai katsayılar, Çizelge 4.4’ de görülmektedir.

Çizelge 4.4 : Farklı sürüş çevrimleri hibrid konfigürasyonları ve araç modelleri için kalibre edilmiş eşdeğer yakıt değerleri.

s0	NEDC	FTP	NEDC İleri Araç Modeli	FTP İleri Araç Modeli	5 x NEDC	5 x FTP	2xFTP + 5xNEDC Karma
S _{şarj}	1.645	1.8	1.645	1.62	1.62	1.62	1.62
S _{deşarj}	1.55	1.556	1.562	1.53	1.5258	1.5355	1.5319

Yapılan iki farklı algoritma ve varyantları sanki-statik araç modeli ve kompleks araç modelleri ile simüle edilerek, aracın çeşitli sürüş çevrimlerindeki performansları değerlendirilmiştir. Daha önce de bahsedildiği üzere, DP sadece referans sonuçlar elde etmek adına global optimal davranışı ifade ederken, EYTM uygulanabilirliği olan bir yöntem olarak ortaya çıkar. Bu nedenle, EYTM kompleks araç modelinde de uygulanmıştır. Şarj dengeleme ve kalibrasyon problemleri EYTM yönteminin en önemli dezavantajıdır. İleri kalibrasyon ile DP davranışına ne kadar da yaklaşılsa, sürüş çevriminin önceden bilinmesi durumu bu dezavantajı ortadan kaldırmaz.

Bir sonraki bölümde HEA için öngörülü şarj kontrolü ile ilgili iki yöntem geliştirilmiştir. Bu sayede yol ve sürüş bilgileri sayesinde batarya şarj dengesi EYTM'ye göre daha avantajlı hale gelirken, şarj kontrollü EYTM'nin optimallliği bozucu etkisinden uzak kalınmış olunur.

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da NEDC ve FTP çevrimleri sırasında HEA aracının farklı optimizasyon algoritmaları için yakıt tüketimi davranışları ve DP Durum 1 ile DP Durum 2 referanslarına göre ekstra tüketim yüzdeleri görülmektedir.

Çizelge 4.5 : NEDC sırasında HEA aracının farklı optimizasyon algoritmaları için yakıt tüketimi davranışları ve DP Durum 1 ve DP Durum 2 referanslarına göre ekstra tüketim yüzdeleri.

Sürüş Çevrimleri	NEDC Durum 1 DP	NEDC Durum 2 DP	NEDC Durum 2 EYTM	NEDC Durum 2 EYTM Şarj Kontrol
Şarj (t0) [%]	50	50	50	50
Şarj (tf) [%]	50	50	50	50
Toplam Tüketim [g]	354.50	488.59	488.61	488.66
Ortalama Tüketim [kg/100 km]	3.24	4.47	4.47	4.47
Ortalama Tüketim [l/100 km]	4.32	5.96	5.96	5.96
Referans Durum 1	-	37.83%	37.83%	37.84%
Referans Durum 2	-	-	0.00%	0.01%

Çizelge 4.6 : FTP çevrimi sırasında HEA aracının farklı optimizasyon algoritmaları için yakıt tüketimi davranışları ve DP Durum1 ve DP Durum2 referanslarına göre ekstra tüketim yüzdeleri.

Sürüş Çevrimleri	FTP Durum 1 DP	FTP Durum 2 DP	FTP Durum 2 EYTM	FTP Durum 2 EYTM Şarj Kontrol
Şarj (t0) [%]	50	50	50	50
Şarj (tf) [%]	50	50	50	50
Toplam Tüketim [g]	354.50	798.41	798.61	801.14
Ortalama Tüketim [kg/100 km]	3.24	4.49	4.49	4.51
Ortalama Tüketim [l/100 km]	4.32	5.99	5.99	6.01
Referans Durum 1	-	38.57%	38.61%	39.04%
Referans Durum 2	-	-	0.03%	0.34%

Çizelge 4.7’ de kombine çevrimleri sırasında şarj edilebilir HEA aracın farklı optimizasyon algoritmaları için yakıt tüketimi davranışları ve DP Durum 1 referansına göre ekstra tüketim yüzdeleri görülmektedir.

Çizelge 4.7 : Kombine çevrimleri sırasında şarj edilebilir HEA aracın farklı optimizasyon algoritmaları için yakıt tüketimi davranışları ve DP Durum 1 referansına göre ekstra tüketim yüzdeleri.

Sürüş Çevrimleri	5 x NEDC Durum 3 DP	5x NEDC Durum 3 EYTM	5 x FTP Durum 3 DP	5 x FTP Durum 3 EYTM	2 x FTP + 5 x NEDC Durum 3 DP	2 x FTP + 5 x NEDC Durum 3 EYTM
Şarj (t0) [%]	80	80	80	80	80	80
Şarj (tf) [%]	20	20	20	20	20	20
Toplam Tüketim [g]	1629.53	2294.55	3088.38	3843.09	2202.58	2913.32
Ortalama Tüketim [kg/100 km]	2.98	4.20	3.48	4.33	3.22	4.26
Ortalama Tüketim [l/100 km]	3.98	5.60	4.64	5.77	4.30	5.68
Referans Durum 1		40.81%	-	24.44%	-	32.27%

5. ÖNGÖRÜLÜ HİBRİD ARAÇ ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ

Bir önceki bölümde incelenen yöntemler hibrid bir aracın paralel hibrid araç topolojisinde, optimal yakıt tüketimi verebilen kontrol yöntemleri incelenmişti. Bunun için önerilen iki ana yöntemden biri teorik olarak optimal sonucu veren ancak işlem yükü çok yüksek olan dinamik programlama diğeri ise optimale yakın çözüm verebilen ve anlık araç bilgilerine dayanan Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu yöntemleriydi. Ve son olarak da, EYTM yöntemi batarya şarj değeri kontrol yöntemleri ile genişletilmiştir.

Bu bölümde ise, optimal enerji yönetim sistemi için, ilerideki yol şartlarının ve hız bilgilerinden faydalanarak mevcut enerji yönetim sistemlerinin nasıl geliştirileceği konusundaki tez kapsamındaki çalışmalar aktarılacaktır. Öngörülü Enerji Yönetimi adı verilen bu uygulamalar çerçevesinde özellikle aracın yol alacağı yolun topoğrafyası ve tahmini hız profili göz önüne alınarak aracın ilerideki yol yüklerinin önceden tahmini ve buna karşılık anlık olarak seçilmesi gereken kontrol sinyallerinin hesaplanmasını sağlar.

Bu çerçevede üç farklı kontrol yöntemi Bölüm 4’de incelenmiş olan hibrid araç tipi için geliştirilmiştir. HEA’nın yol üzerindeki potansiyel mecburi şarj vedeşarj alanlarının öngörülememesinden dolayı meydana gelen verimsiz enerji yönetiminin önüne geçebilmek için geliştirilen iki farklı yöntem bu bölümde incelenmiştir.

Bu yöntemlerden ilki hibrid araçlar için şarj dengesini öngörülü olarak dengeleme ve reküperatif enerjiyi maksimize etmeye yönelik EYTM yöntemine ek olarak geliştirilmiş olan Öngörülü-EYTM yöntemi ve ikincisi ise aynı problemin öngörülü optimal kontrol yöntemi kullanarak lineer programlama metodu ile çözülmesini sağlayan Model Öngörülü Kontrol tabanlı çözümdür.

5.1 Şarj Dengeleme Problemi ve Öngörülü Enerji Kontrol Yöntemi

HEA batarya sisteminin şarj seviyesinin belirli limitler çerçevesinde çalışıyor olması optimal enerji yöntemi için bu kısıtların göz önüne alınması ile giderilebilir. Global

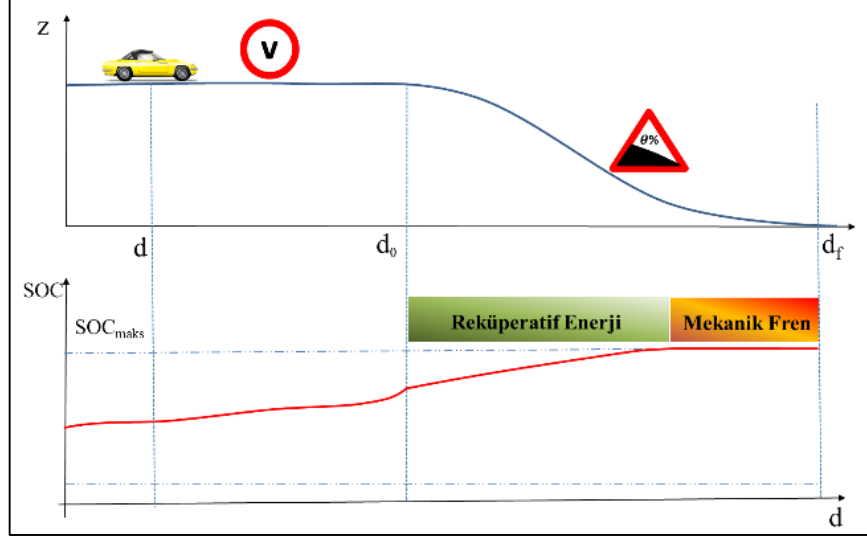
optimum çözümü elde edilirken bu durum bedel fonksiyonuna eklenen ceza parametreleri ile EYTM yönteminde ise eklenen şarj dengeleyici kontrol katsayısı ile sağlanmıştır. Ancak gerçek bir uygulamada, global optimal çözümün bir geçerliliği yoktur. Benzer şekilde şarj dengelem katsayısı ise sadece anlık şarj durumlarını değerlendirmekte ve gelecekte meydana gelecek yol, hız bir başka deyişle yük değerlerini göz önünde bulundurmamaktadır.

Özellikle iki durum için, yol yükünün önceden bilinmesi toplam bir optimal enerji yönetimi adına oldukça önemlidir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de grafiksel olarak özetlenen bu durumların önceden kestirilip yol topografisine uygun yeni enerji yönetimlerinin uygulanması bu bölümde incelenmiştir. Buna göre yol üzerindeki herhangi bir negatif ve/veya pozitif bir eğim profili, pilin tamamen şarj ya da duruma göre deşarj olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle şarj seviyesinin bu gibi durumlar önceden sezilerek belirli seviyeler arasında tutulması, enerji yönetimini optimize edecektir.

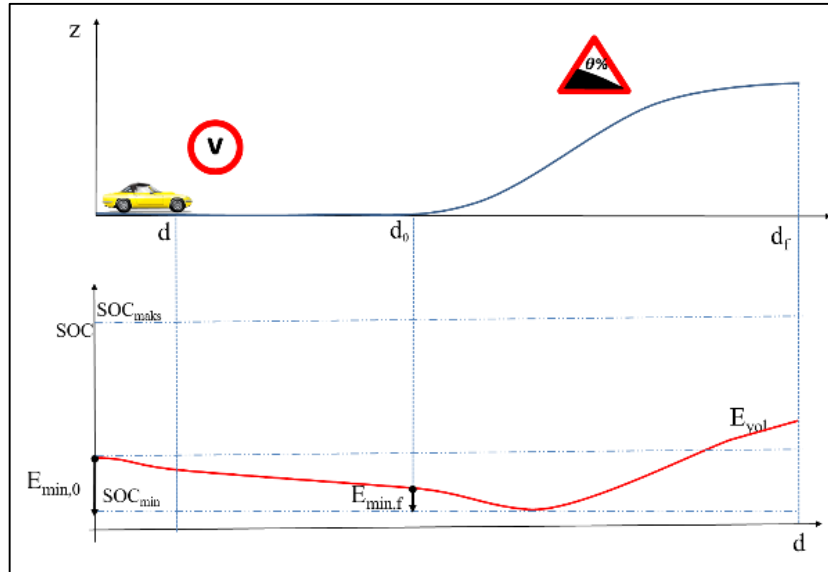
Bir başka deyişle Şekil 5.1’de görülen 2 durum için araç şarj profili öngörüsüz klasik bir enerji yönetimi için problem teşkil etmektedir. Öncelikle negatif eğimli bir yol bölümüne yaklaşılacak senaryo incelenirse, yolun eğimli kısmı boyunca elde edilecek geri kazanım enerjisi, şarjın erken üst limite ulaşması nedeni ile sınırlanır ve negatif yük geri kazanım yerine mekanik frenler ile soğurulur (bkz. Şekil 5.1). Sebebi ise, yolun eğimli kısmının başlangıcında şarj seviyesinin zaten yüksek bir değerde olması ve reküperatif enerji ile zaten elde edilecek şarj miktarının anlık olarak optimal gibi gözüken EYTM yöntemi ile İYM aracı ile önceden şarj edilmiş olmasıdır. Bir başka deyişle yoldan elde edilebilecek şarj enerjisi yakıt ile karşılanmıştır. Bunu engellemek için, bu yol profilinin önceden bilinmesi sayesinde, şarj seviyesi yolun eğimi başlamadan belirli bir süre önce uygun bir seviyeye getirilerek yol yükünün tamamı geri kazanılabilir hale gelebilir. Böylelikle hem reküperatif enerjinin tamamı şarj için kullanılmış olur hem de negatif yol eğimi öncesi elektrik enerjisi payı şarj seviyesini kasıtlı olarak düşürmek adına, artırılarak yakıt tüketimi bu kısımda da azaltılmış olur.

Diğer bir optimal olmayan durum ise, Şekil 5.2’de görüldüğü üzere, eğimin pozitif olduğu bir yol segmentinin önceden kestirilerek şarjın artırılmasına yöneliktir. Eğer şarj seviyesi, yol yükünün yüksek olduğu eğimli bir durumda minimum seviyeye görece erken bir zamanda inerse, İYM hem batarya şarj seviyesini yukarı çekmek hem de yüksek yol yükünü karşılamak amacı ile daha yüksek güç modunda çalışmak zorunda kalacaktır. Bu durumda yakıt tüketimi artacaktır. Buna karşılık şarj seviyesi

daha az yol yükü durumunda önceden kasıtlı olarak artırılır ise, pozitif eğimli yol sırasında İYM'nin yükü azaltılabilir. Bu durum da ekstra bir yakıt tüketimi avantajı getirecektir.



Şekil 5.1 : Klasik EYTM yönteminde öngörülemez yol şartlarından dolayı erken biten ve dolan şarj durumları.



Şekil 5.2 : Klasik EYTM yönteminde öngörülemez yol şartlarından dolayı erken biten ve dolan şarj durumları.

Bu çerçevede yol eğimi ve ortalama hız bilgisi şeklinde yolun ileriki bölümlerine ait bazı bilgilerin mevcut olması bu gibi stratejilerin kullanılabilmesi için gereklidir. Dijital harita bilgisi, yol durumu ve anlık trafik bilgileri sayesinde yola ait bir yük profili çıkarılması mümkündür. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, araç sürüşe başlamadan yol profili ve sürüş hakkındaki verilerin uygun şekilde elde edildiği

varsayılmaktadır. İleriki altbölümlerde var olan yol yükü ve hız profillerinin bu bilgilere dayanarak nasıl elde edildiğinin ve ardından bu yol profiline ilişkin bir stratejinin nasıl elde edileceğine ilişkin çalışmalar incelenecektir.

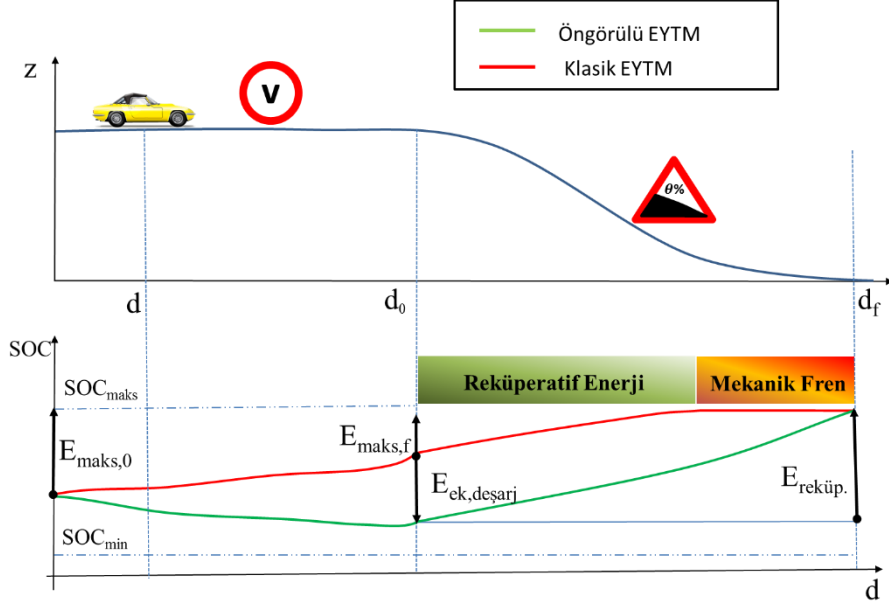
Bu tez kapsamında hibrid araç enerji yönetiminin öngörülü olarak optimal bir şekilde çözülmesine yönelik iki farklı yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan ilki EYTM yöntemine dayanmakta olup diğeri Model Öngörülü Kontrol yöntemi kullanarak çözümün elde edilmesidir.

5.2 Hibrid Elektrikli Araçlar İçin Öngörülü Enerji Yönetim Sistemi

Bir önceki kısımda izah edildiği üzere şarj edilebilen bir hibrid aracın yakıt tüketimini optimize etmek için sürüş mesafesinin tümü ile ilgili bilgi elde etmek gerekmektedir. Buna karşılık hibrid bir araç için bu durum biraz daha farklılık göstermektedir. Zira şarj seviyesi görece daha kısa sürelerde maksimum ve minimum seviyelere ulaşmaktadır. Böylelikle belirli mesafelerdeki negatif ve pozitif eğimli yollar şarj seviyesini minimum ve maksimum değerlerine olması gerekenden önce gelmesine neden olmaktadır. Dolayısı ile kalan mesafede araç daha az verimli şartlarda çalışarak yakıt tüketiminin artmasına sebep olmaktadır. Yol profilinin ve ortalama hız bilgisinin önceden bilinmesi sayesinde ise, bu problemin önüne geçilerek, şarj seviyesi olması gereken değere önceden getirilebilir.

5.2.1 Öngörülü eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu yöntemi

Bu bölümde öngörülü şarj kontrolü ile ilgili geliştirilen iki farklı yöntem sunulacaktır. Öncelikle ilk kısımda, EYTM yöntemine ek bir terim sayesinde Enerji Yönetim Sistemi önceden davranabilen bir yapı haline getirilmiştir. Öngörülü-EYTM yöntemi aracın yaklaşan bir topografi değişimi karşısında mevcut optimal davranışından vazgeçerek, ileride geri kazanılacak ya da harcanacak enerji miktarını önceden ödünç alacak şekilde davranmasına dayanır. Bu yöntem, genel olarak güç paylaşım modu ve paralel şarj modları için farklı olarak incelenecektir. Ayrıca yöntem yaklaşan negatif ve pozitif eğimli durumlar için küçük farklılıklar gösterdiğinden bu durumlar da ayrı şekilde incelenecektir.



Şekil 5.3 : Klasik EYTM için batarya şarjının erken dolması ve öngörülü EYTM için erken deşarj miktarı.

En genel hali ile problem, d_0 noktasında başlayan negatif profilin bir yolun d noktasında tespitinden sonra ne kadar enerjinin d_0 noktasına kadar pilden deşarj edilmesi gerektiğine dayanır. Bir başka deyişle, eğer eğim boyunca geri kazanılacak enerji $E_{reküp.}$ ve d_0 noktasında potansiyel olarak şarj edilebilecek kadar kalan enerji $E_{maks,f}$ ise

$$E_{ek,deşarj} = E_{reküp.} - E_{maks,f} \quad (5.1)$$

kadar batarya enerjinin mevcut stratejiye göre pilden deşarj edilerek azaltılması gerekmektedir. Burada yoldan elde edilecek geri kazanılacak enerji yol eğimi ve araca bağlı yol yükü denklemlerinden elde edilir:

$$E_{reküp.} = E_{yol} \cdot \lambda_{reküp.} = F_t(\bar{V}_{>eğim}, \theta) \cdot (d_f - d_0) \cdot \lambda_{reküp} \quad (5.2)$$

Burada $\lambda_{reküp.}$ ortalama güç aktarma organları verimini göstermekte olup negatif yol yükünün ne kadarının geri kazanılacağına dair bir katsayıdır. $E_{maks,f}$ değeri ise, mevcut strateji ile d_0 noktasında ne kadar batarya enerjisi olduğuna dair bir değerdir. $E_{maks,0}$ anlık olarak hesaplanan maksimum şarj değerine bağlı olarak

$$E_{maks,f}(t) = \kappa(SOC_{maks} - SOC(t)) + E_{maks,0} \quad (5.3)$$

elde edilir. Sonuç olarak anlık olarak kullanılan ve bir anlamda bir bedel fonksiyonu gören EYTM denklemi (bkz. Denklem 4.63)'ne bu $P_{ek,deşarj}$ terimi eklenerek bu enerjinin optimal davranış içerisinde değerlendirilmesi sağlanır. Bir başka deyişle, $P_{ek,deşarj}$ anlık olarak bataryadan çekilmesi gereken ekstra anlık güç miktarını ifade etmektedir. Sonuç olarak yeni EYTM denklemi,

$$\begin{aligned} \dot{m}_{eşdeğer} &= \dot{m}_{ICE} + \dot{m}_{el.} + \dot{m}_{eşdeğer,reküp.} \\ &= \dot{m}_{İYM} + s_o \cdot \left(\frac{P_{el.}(u(t))}{Q_{LHV}} + \frac{P_{ek,deşarj}}{Q_{LHV}} \right) \end{aligned} \quad (5.4)$$

şeklini alır.

Burada aslında öngörülü stratejinin etkin olduğu d ve d_0 arasındaki yol bölümünde bataryanın toplam olarak $E_{reküp.}$ kadar enerjiyi azaltması gerekir. Anlık olarak ise bu $P_{ek,deşarj}$ değeri ile sağlanır ve eğimin başlayacağı noktaya kalan süre yardımı ile ve (5.5) ve (5.6) denklemleri ile hesaplanır.

$$P_{ek,deşarj} = \frac{E_{ek,deşarj}}{T_{\rightarrow d_0}} \quad (5.5)$$

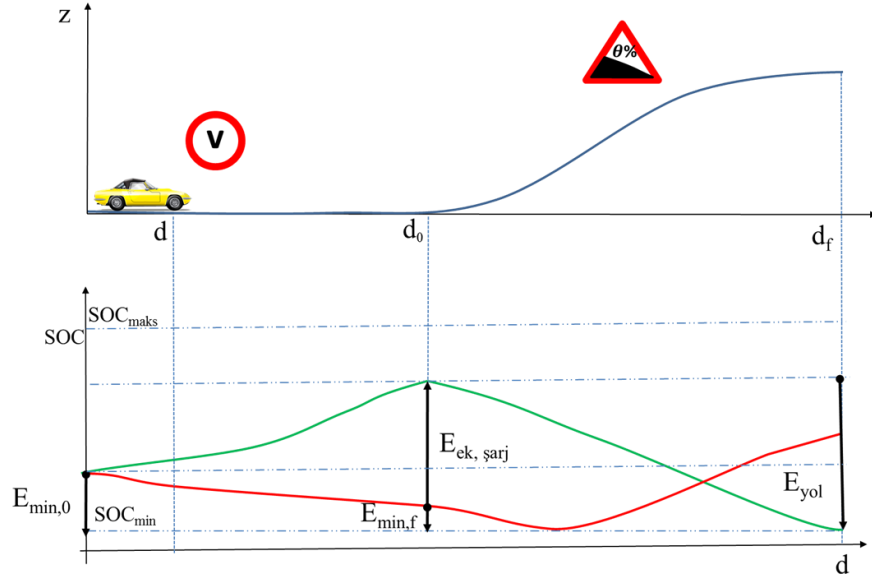
$$T_{\rightarrow d_0} = \frac{\bar{V}}{d - d_0} \quad (5.6)$$

Dolayısıyla (5.4) denkleminin minimum değerlerine karşılık gelecek kontrol sinyalinin kullanılması ile hem negatif yol yükünün başlayacağı d_0 noktasına kadar eşdeğer yakıt tüketimi minimize edilmiş hem de pil şarj seviyesi tüm reküperatif enerjiyi geri kazandıracak seviyeye getirilmiş olur.

Benzer bir senaryo daha önce de belirtildiği üzere yolun pozitif bir eğim aldığı durumlar için geçerlidir. Şekil 5.4'de görüldüğü üzere, d pozisyonunda yaklaşan bir pozitif eğimli bir yol bölümünü, elektrik ağırlıklı bir enerji ile ya da daha tamamen elektrik motoru desteği ile çıkmak için batarya şarj seviyesini daha önceden belirli bir orana getirmek gerekmektedir. Böylelikle yol yükünün görece olarak daha fazla olduğu noktalarda İYM'nin çekiş üzerinde oranı azaltılarak toplam yakıt tüketiminin azaltılması hedeflenmektedir.

Bu amaçla, böyle bir yol segmentinin daha önceden fark edildiği d noktasında bataryayı istenen şarj seviyesine getirecek enerji,

$$E_{ek,şarj} = E_{yol} - E_{min,f} \quad (5.7)$$



Şekil 5.4 : Klasik EYTM için batarya şarjının erken dolması ve öngörülü EYTM için erken deşarj miktarı.

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde E_{yol} , yolun pozitif eğimi için gereken batarya enerjisi ve $E_{min,f}$ mevcut strateji ile d_0 noktasında elde edilecek batarya enerji seviyesini ifade etmektedir. Burada yol yükü yukarıdaki duruma benzer şekilde, (5.2) denklemi ile hesaplanabilir. Mevcut şarj seviyesi ve minimum şarj seviyeleri arasındaki lineer bir bağıntı ile de

$$E_{min,f} = E_{min,0} - \kappa(SOC(t) - SOC_{min}) \quad (5.8)$$

$E_{min,f}$ elde edilir. Burada $E_{min,0}$ bataryanın d noktasındaki mevcut enerjisini gösterir.

Bu yol yükünün ve gerekli olan yeni net batarya enerjisine karşılık gelen eşdeğer ek yakıt tüketimi $\dot{m}_{eşdeğer,ek\ şarj}$ denkleminin EYTM denklemine eklenmesi ile

$$\begin{aligned} \dot{m}_{eşdeğer} &= \dot{m}_{ICE} + \dot{m}_{el.} + \dot{m}_{eşdeğer,ek\ şarj}. \\ &= \dot{m}_{iYM} + s_o \cdot \left(\frac{P_{el.}(u(t))}{Q_{LHV}} + \frac{P_{ek,şarj}}{Q_{LHV}} \right) \end{aligned} \quad (5.9)$$

şeklini alır. Bu denklemin anlık olarak minimizasyonu hem optimal yakıt tüketimini verirken hem de aracın d_0 noktasına geldiğinde istenen şarj seviyesine gelmesi sağlar.

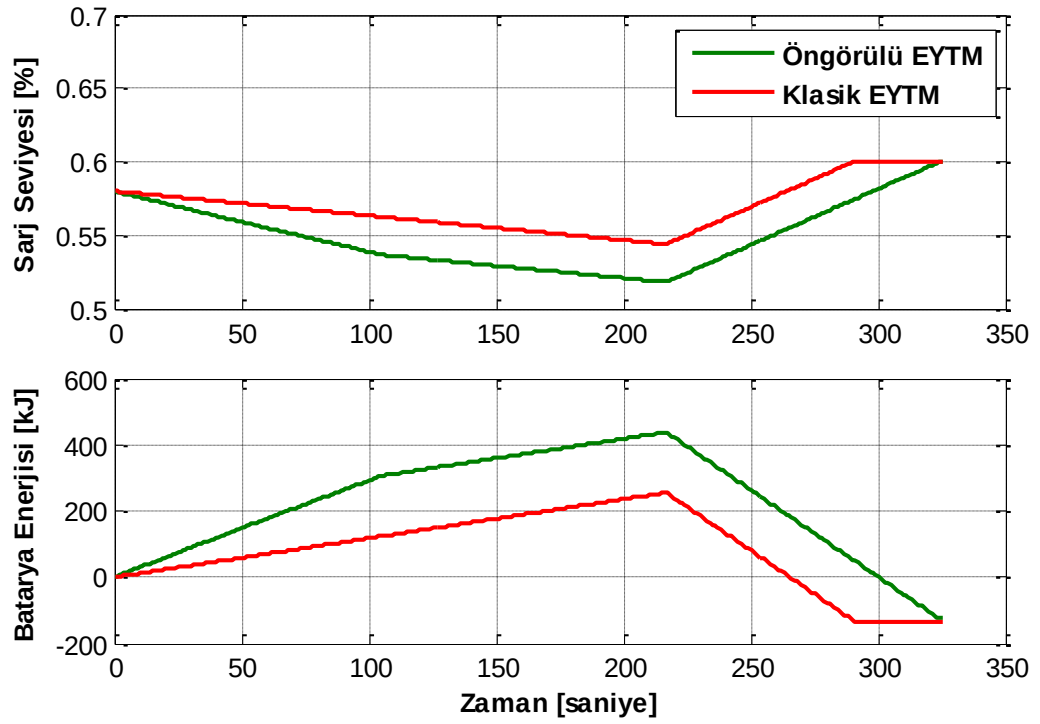
Öncelikle (5.4) denklemi ile elde edilen sonuçlar iki farklı senaryo ile incelenmiştir. Zira yukarıda bahsedilen durum, d noktasındaki mevcut hibrid stratejisine göre farklılık göstermektedir. Ardından hem (5.4) hem de (5.9) senaryolarını beraberce kapsayan ortak bir senaryo ile öngörülü EYTM tabanlı enerji yönetim sistemi beraberce incelenmiştir.

Çizelge 5.1’de simüle edilen yolların özellikleri ve araç hızları görülmektedir.

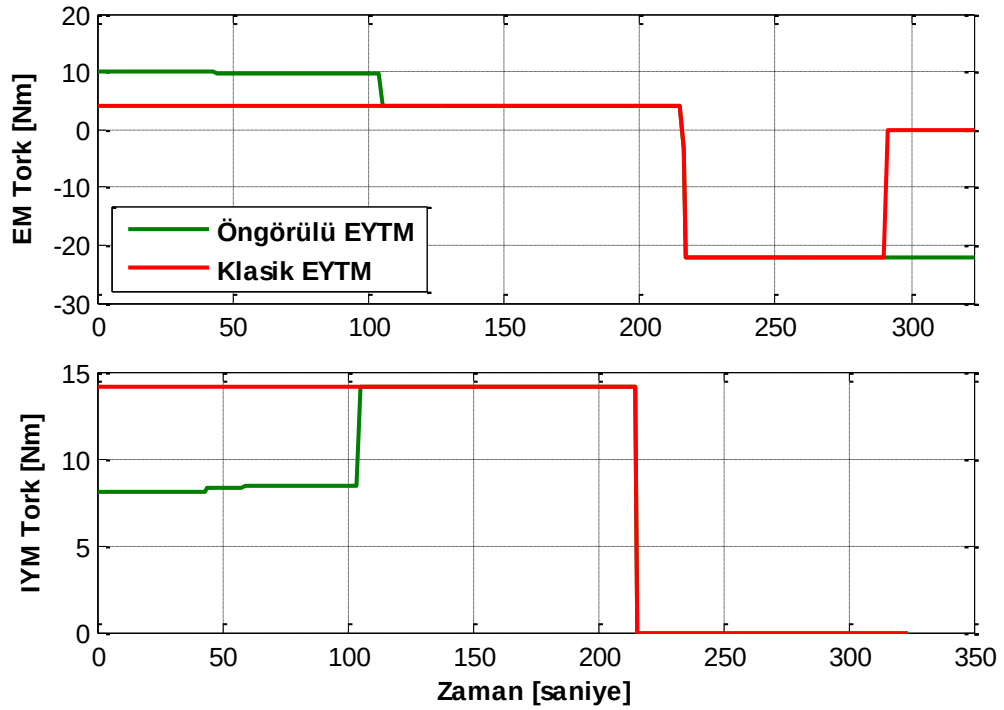
Çizelge 5.1 : Öngörülü EYTM için yol senaryoları ve yol bölümleri.

Senaryo	Özellik	Bölüm1	Bölüm2	Bölüm3	Bölüm4	Bölüm5
Senaryo 1 (Durum1)	Hız [km/saat]	50	50	-	-	-
	Uzunluk [km]	3	1.5	-	-	-
	Eğim. [%]	0	-5	-	-	-
Senaryo 1 (Durum 2)	Hız [km/saat]	60	60	-	-	-
	Mesafe[km]	3	1.5	-	-	-
	Eğim [%]	0	-5	-	-	-
Senaryo 2	Hız [km/saat]	50	60	60	60	50
	Mesafe[km]	1	1.5	6.5	3.8	2.8
	Eğim[%]	0	5	0	-5	0

Senaryo 1’de araç hızı 50 km/saat sabit hızla %-5 ‘lik eğime sahip bir yola yaklaşmakta ve batarya şarj seviyesi simülasyon başında %56 seviyesindedir. Normal EYTM algoritması çerçevesinde bu şartlarda araç güç paylaşım modunda çalışmaktadır. Ancak eğim sonunda aracın batarya seviyesi daha erken bir sürede maksimuma ulaştığından, tüm yol yükü enerjisi mekanik frenleme ile soğurulmuştur. Oysa öngörülü EYTM şarjı daha erken bir zamanda uygun miktarda azaltarak aracın tüm potansiyel reküperatif enerji miktarından faydalanmasını sağlamıştır. Şarj seviyelerinin durumu Şekil 5.5’de görülmektedir.



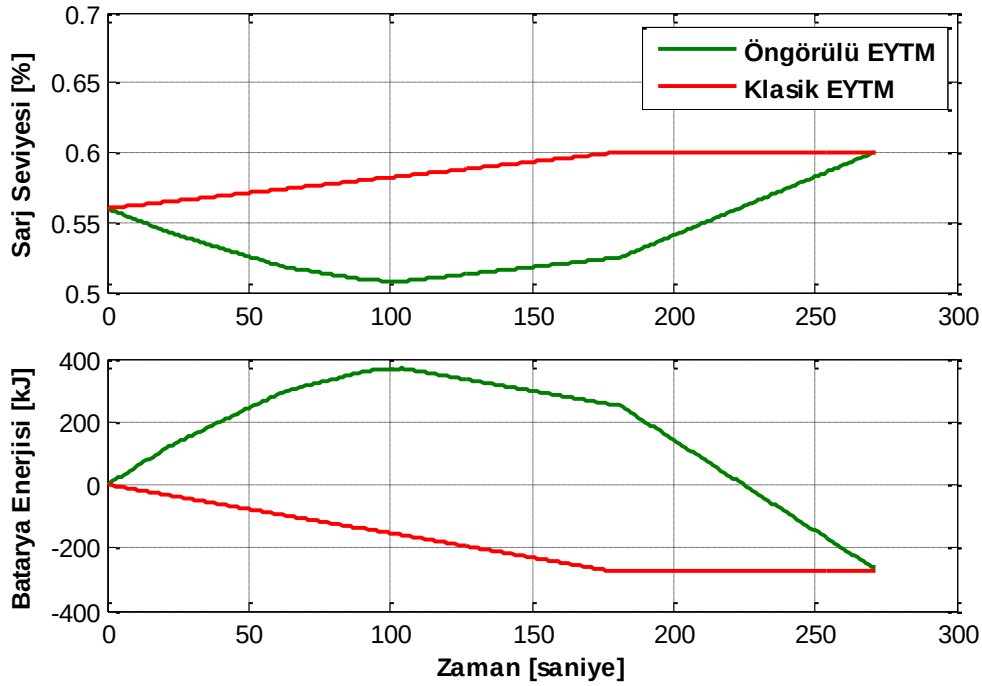
Şekil 5.5 : Senaryo 1 - Durum 1: $SOC(t_o) = \%58$, $V = 50 \text{ km/saat}$, klasik EYTM ve öngörülü-EYTM batarya şarj seviyesi ve batarya enerjisi.



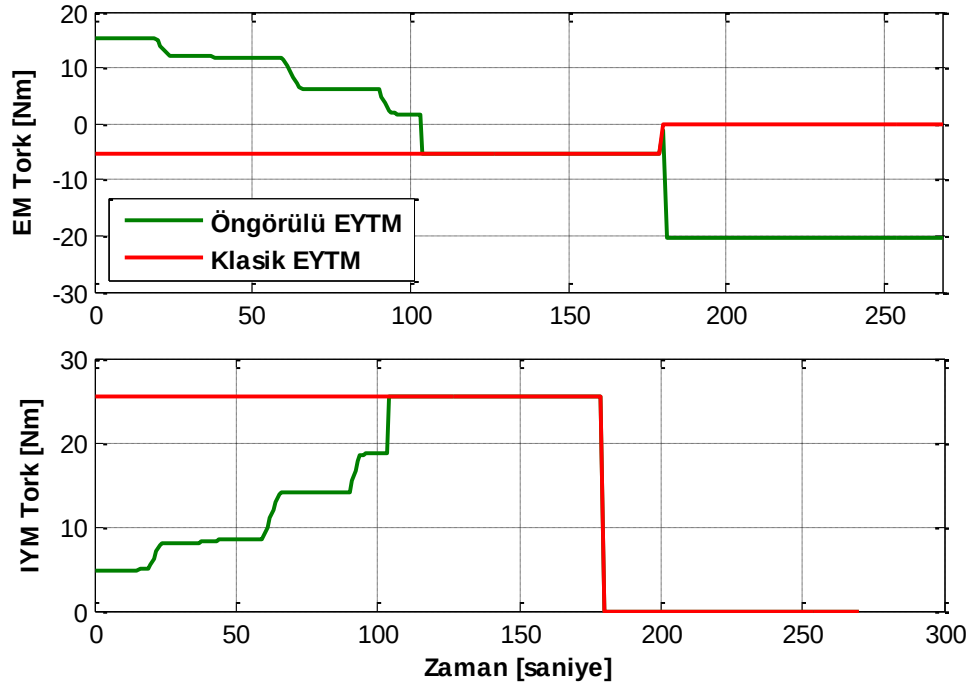
Şekil 5.6 : Senaryo 1 - Durum 1: $SOC(t_o) = \%58$, $V = 50 \text{ km/saat}$, klasik EYTM ve öngörülü-EYTM EM torku ve İYM torku karşılaştırması.

Senaryo 1 çerçevesinde aynı yol şartları bu kez başka bir ilk araç hızı için simüle edilmiş böylelikle aracın ilk an için hâlihazırdaki hibrid modunun değiştirilmesi sağlanmıştır. Şekil 5.7’de görülmekte olan bu durum için, tahmin edileceği üzere klasik EYTM daha erken bir zamanda maksimum şarj ulaşmış buna karşılık öngörülü EYTM ise daha önceden şarj seviyesini uygun miktarda aşağıya çekerek eğim sonundan tüm frenleme enerjisi ile şarj yapabilmiş ve maksimum şarj seviyesine yol sonunda ulaşabilmiştir.

Her iki durum için EYTM ve Öngörülü EYTM için şarj seviyelerinin aynı olması iki durumun da yakıt tüketimlerinin objektif bir şekilde karşılaştırılabilmesini sağlar. İki durumda da elde edilen yakıt tüketimi tasarrufunun sebebi yolun eğimsiz kısmındaki kullanılan hibrid modlardır. Her iki durumda da klasik EYTM’ye göre elektrik enerjisi daha fazla kullanıldığından belirli miktarda bir yakıt tüketimi tasarruf edilmiştir. 2. Durumda klasik EYTM paralel şarj modunda çalıştığından elde edilen yakıt tasarrufu daha fazladır.

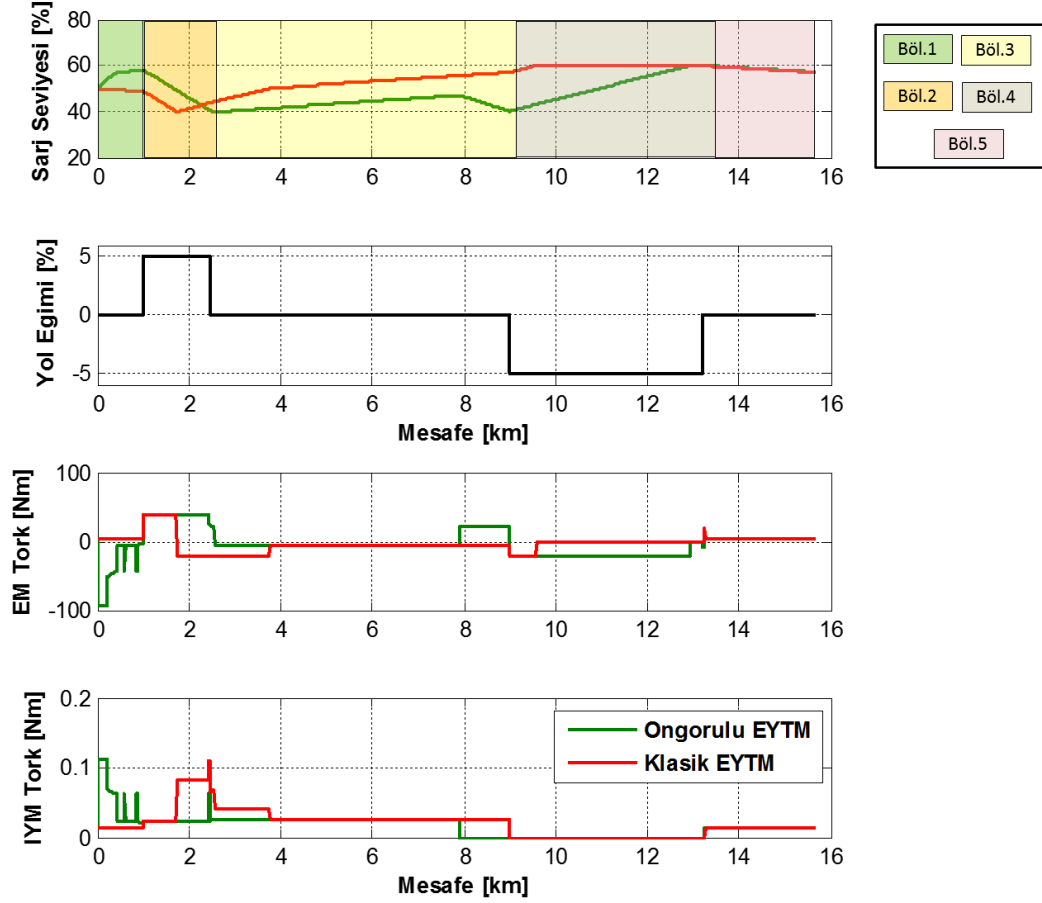


Şekil 5.7 : Senaryo 1 - Durum 2: $SOC(t_0) = \%56$, $V = 60 \text{ km/saat}$, klasik EYTM ve öngörülü-EYTM karşılaştırması.



Şekil 5.8 : Senaryo 1 - Durum 2: $SOC(t_0) = \%56$, $V = 60 \text{ km/saat}$, klasik EYTM ve öngörülü-EYTM karşılaştırması.

Senaryo 2 çerçevesinde ise 5 kısımdan meydana gelen karma bir yol simüle edilmektedir. Yolun ilk kısmında $\%5$ 'lik pozitif bir eğim son kısmında ise $\%-5$ 'lik bir başka eğim yer almaktadır. Bu yol hem klasik EYTM hem de öngörülü EYTM ile simüle edilmiştir. Yolun ilk kısmında görüldüğü gibi öngörülü EYTM algoritması şarj miktarını önceden artırarak yolun eğimli kısmını elektrik enerjisi ağırlıklı bir modda kat etmiştir. Öte yandan klasik EYTM algoritması, içinde bulunduğu yolun ilk kısmında batarya şarjını yolun düz kısmında azaltmış ve dolayısı ile yokuş sırasında İYM hem batarya şarjı hem de yol yükünü karşılamak için güç üretir. Bu da yakıt tüketiminin görece daha fazla olmasına sebep olmuştur. Senaryo 2'nin ikinci kısmı Senaryo 1 – Durum 1 ile aynı özelliktedir. Senaryo 2, eğimin ardından gelen düz yol kısmı ile her iki durum için aynı batarya seviyesi ile sonlanmıştır. Şekil 5.10'de ise Senaryo 2 için her iki algoritma çerçevesinde anlık ve kümülatif olarak harcanan yakıt görülmektedir.

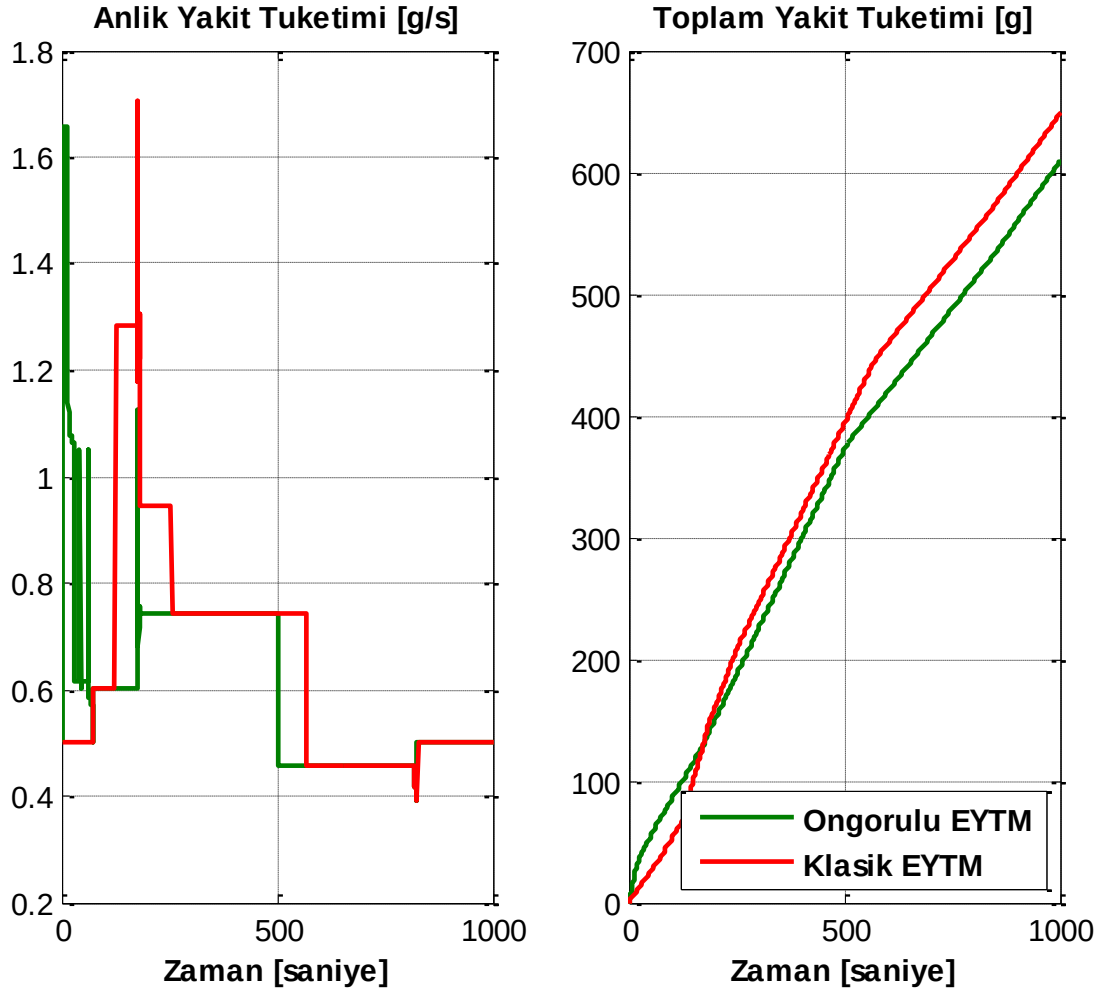


Şekil 5.9 : Senaryo 2: yol bölümleri, batarya seviyesi, EM Torku ve batarya enerjisi.

Çizelge 5.2’de Senaryo 1 için elde edilen tasarruf miktarları görülmektedir.

Çizelge 5.2 : Senaryo 1 ve Senaryo 2’de elde edilen yakıt tüketimleri ve tasarruf miktarları.

Senaryolar	Klasik EYTM - Toplam Tüketimi [g]	Öngörülü EYTM - Toplam Tüketimi [g]	Yakıt Tasarrufu [%]
Senaryo 1 Durum 1	102.7	108	%4.9
Senaryo 1 Durum 2	134.5	112.6	%16.24
Senaryo 2	532.1	492.6	%7.4



Şekil 5.10 : Senaryo 2: klasik EYTM ve öngörülü-EYTM karşılaştırması anlık ve kümülatif yakıt tüketimleri.

5.2.2 Model öngörülü kontrol yöntemi ile öngörülü enerji yönetimi

Bir önceki bölümde EYMT formülasyonu modifiye edilerek ulaşılan öngörülü şarj denetimi yöntemi bu bölümde MPC formülasyonu ile gerçekleştirilmiştir. MPC temel olarak kısıtlı bir ufuk mesafesi için formüle edilen optimal kontrol probleminin her örneklem zamanında anlık olarak çözülmesi ve çözümün içeriğinden faydalanılarak öngörü modelinin bir sonraki adım çözümü için güncellenmesini gerektirir. Bir başka deyişle MPC formülasyonu,

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) \quad (5.10)$$

sisteminin sınırlı ufuk optimizasyonu için

$$\min_u \Psi(x_{k+N}) + \sum_{l=0}^{N-1} l(x_{k+l}, u_{k+l}) \quad (5.11)$$

öyle ki,

$$x_{k+i+1} = f(x_{k+i}, u_{k+i})$$

$$x_{k+i} \in X$$

$$u_{k+i} \in U$$

$$x_{k+N} \in T$$

optimal probleminin çözülmesini hedeflemektedir. Problem daha önce de belirtildiği üzere her örnekleme anında optimize edilmekle beraber, $(u_k: u_{k+N-1}) = [u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N-1}]$ çözüm vektörünün sadece ilk değeri olan u_k anlık olarak kontrol girişi olarak uygulanmaktadır.

Model Öngörülü Kontrol yapısının HEA için topoğrafyaya bağlı şarj kontrolü için uygulanması için bir önceki bölümde ifade edilmiş bazı tanımlar problemin aynı yapıda olması nedeni ile bu bölümde de kullanılacaktır. Örneğin (5.1) ve (5.7) denklemleri ile ifade edilen ek şarj ve deşarj enerjileri ile (5.2) denklemi ile ifade edilen tahmini reküperatif enerji miktarı Model Öngörülü Kontrol yapısı içerisinde de kullanılmıştır.

Formülasyonun gerektirdiği bir diğer eklenti ise batarya enerjisi ile yakıt enerjisi ile ilgili hibrid mod için kontrol girişleri olan paralel şarj ve güç aktarım oranlarıdır. Bir başka deyişle,

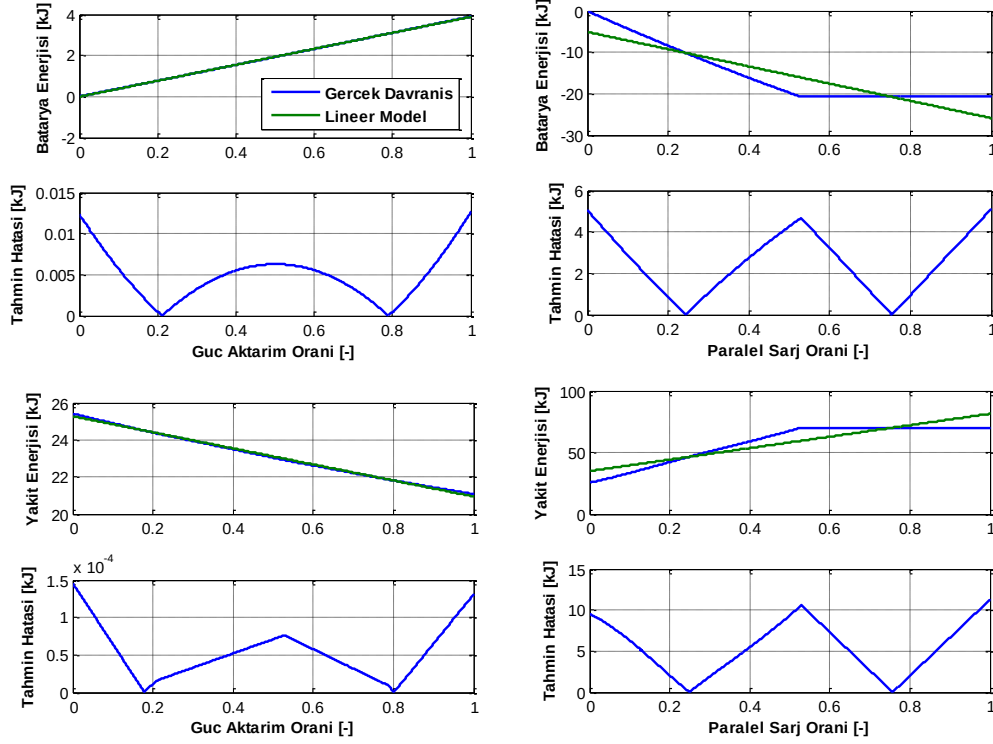
$$E_{bat} \cong K_{bx_PŞ} \cdot u_{PŞ} + K_{by_PŞ} \quad (5.12)$$

$$E_{yakıt} \cong K_{fx_PŞ} \cdot u_{PŞ} + K_{fy_PŞ} \quad (5.13)$$

$$E_{bat} \cong K_{bx_GA} \cdot u_{GA} + K_{by_GA} \quad (5.14)$$

$$E_{yakıt} \cong K_{fx_GA} \cdot u_{GA} + K_{fy_GA} \quad (5.15)$$

şeklinde lineerleştirerek yaklaşık olarak hesaplanabilir. Şekil 5.11'de görüldüğü gibi $V=50$ km/saat sabit hız için farklı paralel şarj ve güç aktarım oranları için



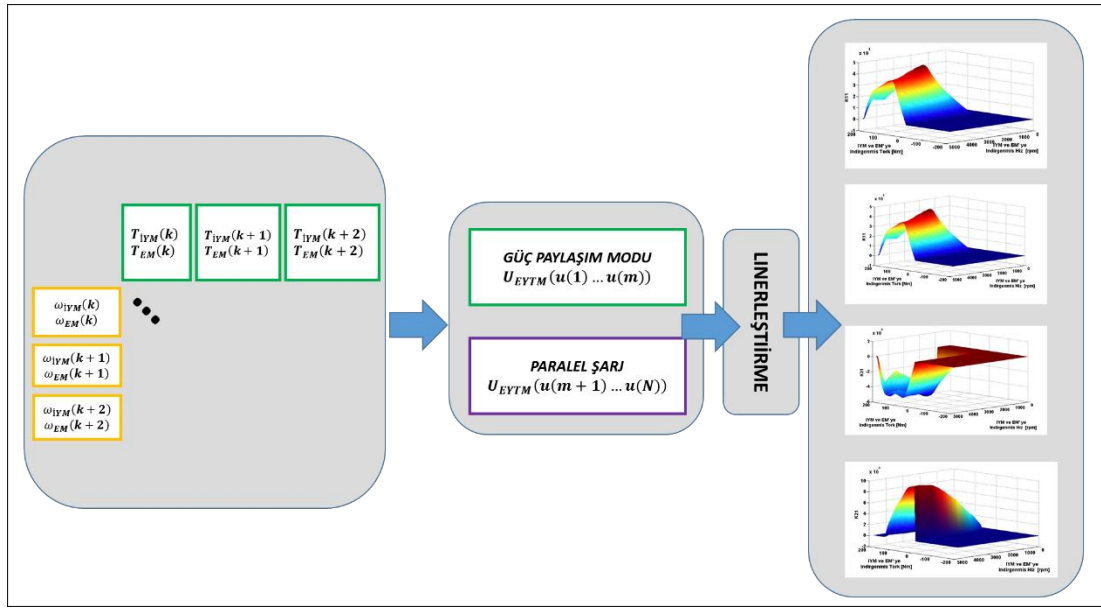
Şekil 5.11 : Gerçek ve lineer model için batarya ve yakıt enerjilerinin paralel şarj ve güç aktarım oranları ile değişimi ve tahmin modeli hatası.

Bu çerçevede (5.12)-(5.15) arasındaki lineer denklemler kullanılarak EYTM modeli anlık durum için şu şekilde tekrar yazılabilir:

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{eşdeğer} &= \dot{m}_{iYM} + \dot{m}_{el.} = \frac{P_{yakıt}(t, u(t))}{Q_{LHV}} + s_0 \cdot \frac{P_{el.}(t, u(t))}{Q_{LHV}} \\
 \dot{m}_{eşdeğer}[u_{PŞ} : u_{GA}] &= \frac{K_{fxPŞ} \cdot u_{PŞ} + K_{fyPŞ}}{Q_{LHV}} + \frac{K_{fxGA} \cdot u_{GA} + K_{fyGA}}{Q_{LHV}} + \\
 & s_{0,şarj} \cdot \frac{K_{bxPŞ} \cdot u_{PŞ} + K_{byPŞ}}{Q_{LHV}} + s_{0,deşarj} \cdot \frac{K_{bxGA} \cdot u_{GA} + K_{byGA}}{Q_{LHV}}
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

Yukarıda bahsi geçen ve nonlinear EYTM algoritmasının operasyon bölgesinde lineer denklemlerle ifade edilmesine dayanan yöntem aslında tüm çalışma alanları taranmak suretiyle genişletilebilir. Bu amaçla, optimal davranışa benzerlik gösteren EYTM uygulanmış sanki-statik araç modeli tüm çalışma bölgeleri için çalıştırılmak suretiyle İYM ve EM'nin tüm çalışma bölgelerini ifade edecek daha genel bir Lineer EYTM modeli ve parametreleri elde edilir. Bu işlemi yapmanın bir yöntemi farklı sabit hızlar ve yol eğimlerine denk gelecek çalışma koşulları ile lineerleştirilmiş EYTTM algoritmasının parametrelerini toplamaktır. Ancak bu durumda farklı araç hızlarındaki

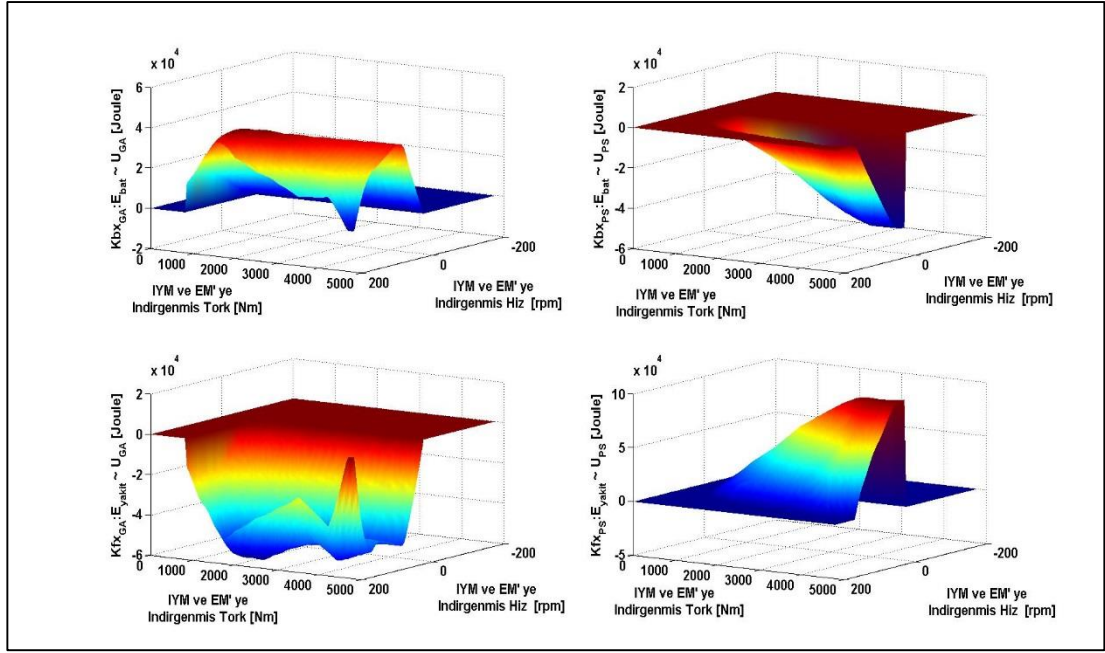
değişen transmisyon çevrim oranları nedeni ile İYM ve EM hızlarının tam olarak tüm çalışma bölgelerinde ifade edilememesinden dolayı, bu işlem farklı transmisyon giriş hızları ve torkları için gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.12’ de Lineer EYTM için hesaplama sırası görülmektedir. İlk adımda görülen İYM ve EM hız ve torkları belirli hassasiyetlerde ayrıştırılmış olup her çalışma adımı için Güç Paylaşım Modundaki kontrol girişleri ile Batarya Enerjisi ve Yakıt Enerjisi; ve Paralel Şarj Modundaki kontrol girişleri ile yine bu enerji değerleri arasındaki ilişki lineer denklemlerle ifade edilir. İleride görülecek simülasyon örneklerinde kullanılan Lineer EYTM haritaları 5 Nm ve 5 dev/dak. adımlarla haritalandırılmıştır.



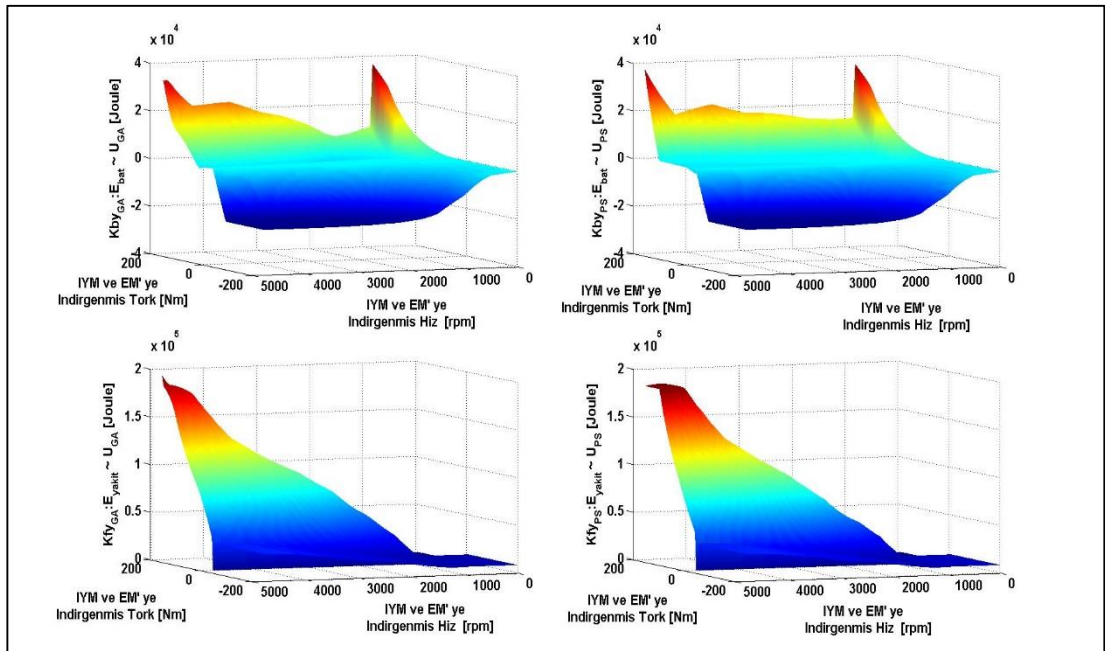
Şekil 5.12 : Lineer EYTM için parametre hesaplama rutini.

Tüm çalışma noktaları için toplanan katsayılar 3 Boyutlu haritalarda toplanmıştır. Böylelikle herhangi bir eğim ve hız değeri için standart EYTM davranışı yaklaşık olarak oluşturulabilir. Şekil 5.15’ de Lineer Katsayılar kullanılarak Lineer EYTM algoritmasının, yaklaşık eşdeğer yakıt tüketimine dayanan bedel fonksiyonunu elde edişi ve anlık olarak kontrol katsayılarının kullanılabilmesi için minimize edilmesi ifade edilmiştir.

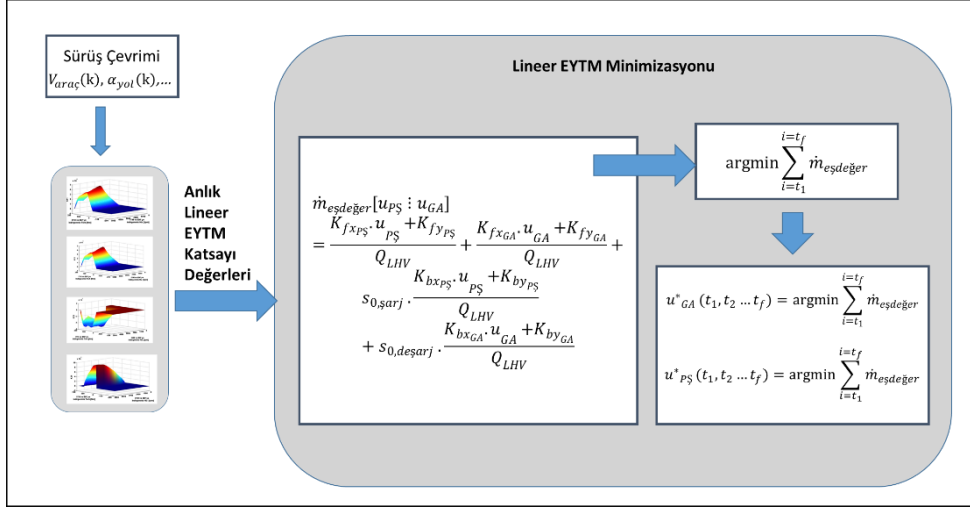
Öncelikle bu lineer EYTM yapısının elde edilmesindeki temel neden, öngörülü bir optimal kontrol yöntemi için standart EYTM davranışının önceden kestirilerek, Model Öngörülü Kontrol yapısı içiresinde, EYTM davranışına ön şarj ve ön deşarj karakteristikleri kazandırmaktır. Bu noktaya değinmeden önce, oluşturulan bu lineer EYTM yapısının dinamik sürüş çevrimleri altında nasıl davrandığı ve standart EYTM ile Lineerleştirilmiş EYTM arasında nasıl bir yaklaşım olduğu incelenmiştir.



Şekil 5.13 : Lineer EYTM için batarya enerjisi ve yakıt enerjileri için K_x lineer katsayıları.



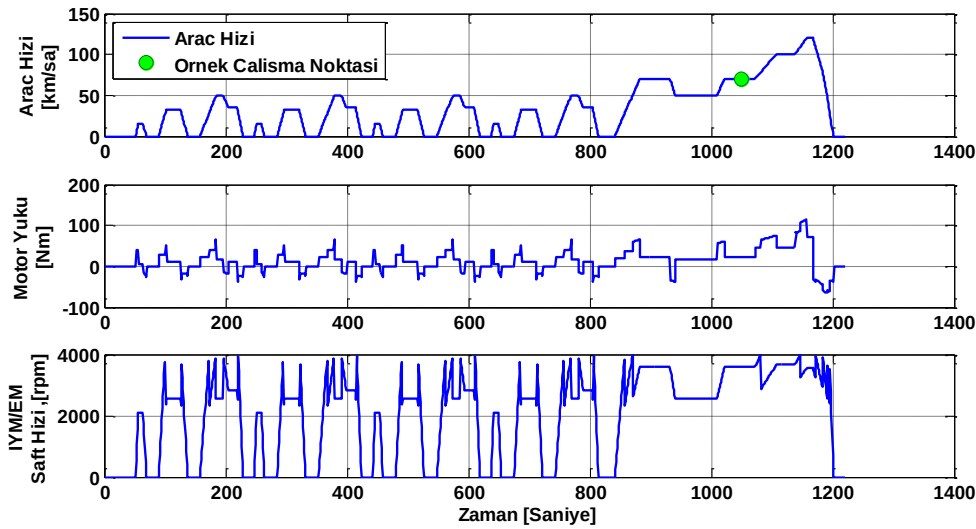
Şekil 5.14 : Lineer EYTM için batarya enerjisi ve yakıt enerjileri için K_y lineer katsayıları.



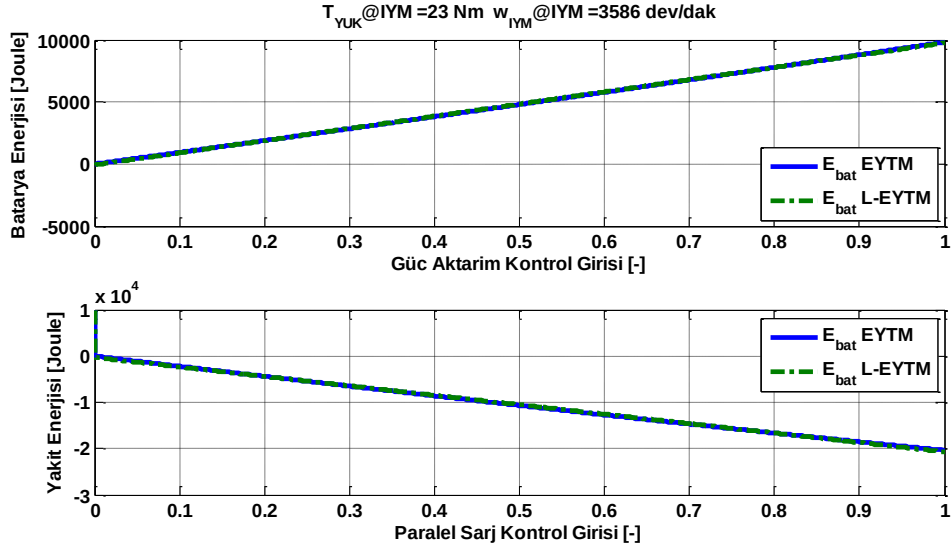
Şekil 5.15 : Lineerleştirilmiş EYTM ile tekrar oluşturulmuş eşdeğer yakıt minimizasyonu ve bedel fonksiyonu değerleri.

Bu çerçevede, hem standart EYTM hem de lineerleştirilmiş EYTM için NEDC için test edilmiş olup iki yönteme ait eşdeğer yakıt tüketimini minimize edecek çalışma noktaları da karşılaştırılmıştır.

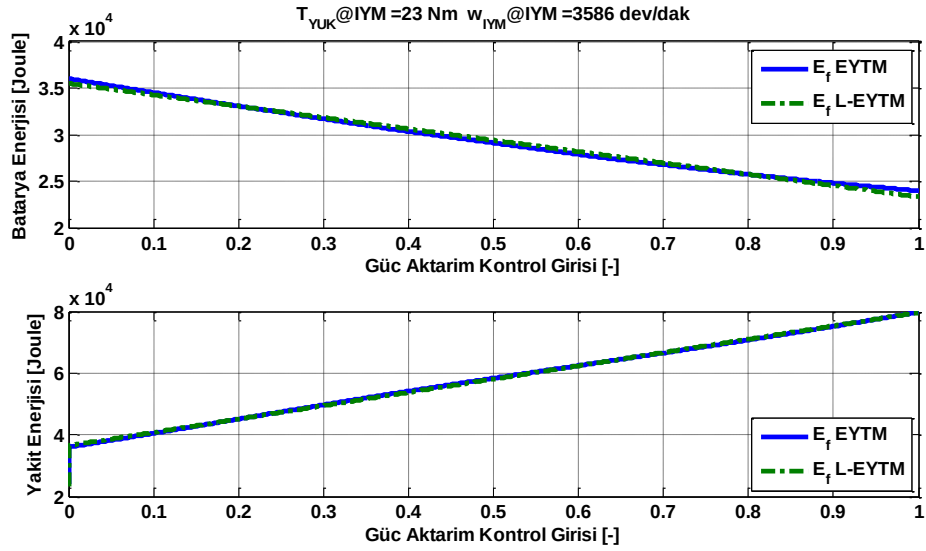
Buna göre NEDC üzerindeki herhangi bir örnek çalışma noktası için Batarya Enerjisi ve Yakıt Enerjilerinin, Lineer ve Standart model ile elde edilmiş değerleri, sırası ile Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’ de görülmektedir. Görüldüğü gibi anlık olarak Lineer Model EYTM yapısını iyi bir şekilde temsil etmektedir. Dolayısı ile Lineer model ile elde edilmekte olan, bedel fonksiyonun her adımdaki minimum değeri gerçek minimum değerine oldukça yakındır.



Şekil 5.16 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş eytm karşılaştırması için kullanılan NEDC, Motora İndirgenmiş Yol Yüğü, Motora İndirgenmiş Hız ve Örnek Çalışma Noktası – 1050. saniye

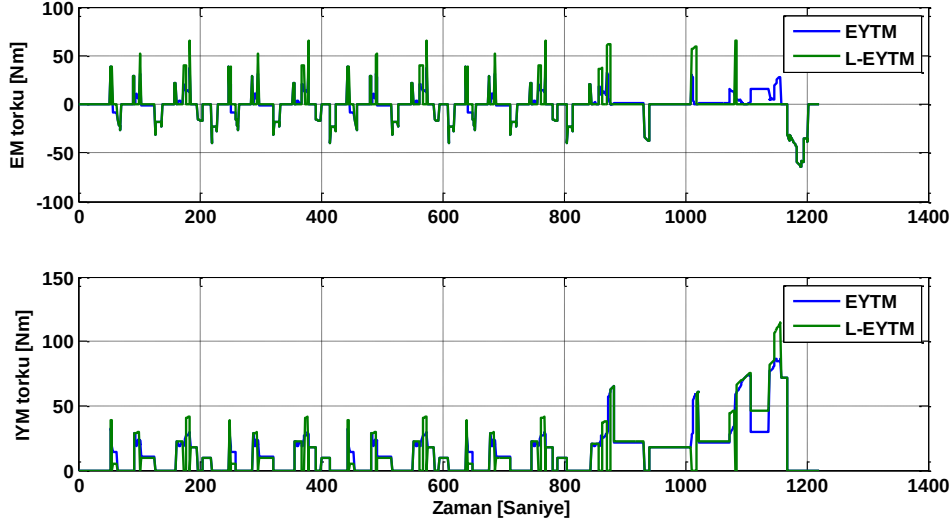


Şekil 5.17 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş EYTM modellerinde örnek çalışma noktası için batarya enerjisinin kontrol girişleri ile değişimi.

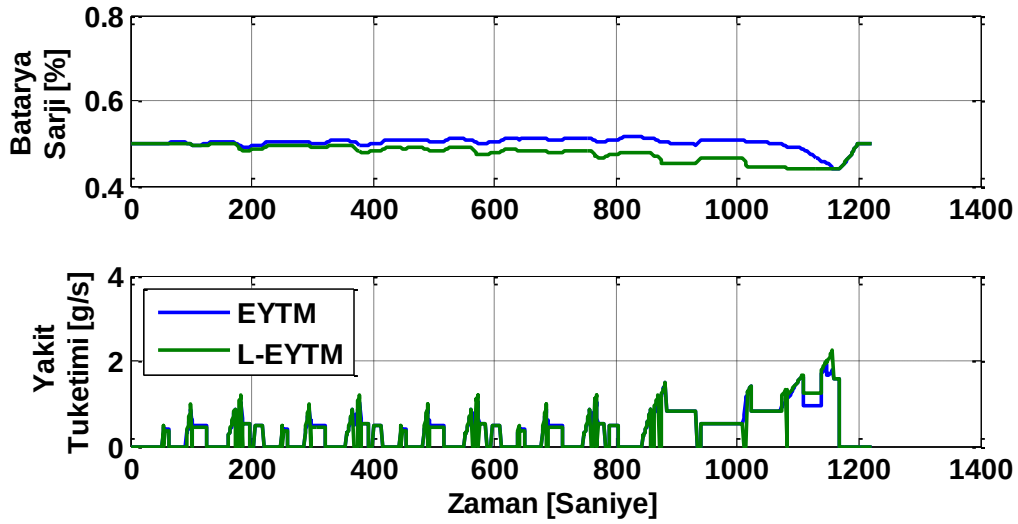


Şekil 5.18 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş EYTM modellerinde örnek çalışma noktası için yakıt enerjisinin kontrol girişleri ile değişimi.

Öte yandan, Şekil 5.19’ da görüldüğü üzere minimizasyonun bir sonucu olarak, EM ve İYM tork değerleri EYTM ile elde edilmiş olan minimum değerlere yakınlık göstermektedir. Son olarak da Şekil 5.20’ de görüldüğü üzere batarya şarjı ve anlık yakıt tüketimi değerleri de lineer model ve Standart EYTM modeli için oldukça yakın değerler vermektedir.



Şekil 5.19 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş EYTM modellerinde NEDC boyunca EM ve İYM tork değerleri.



Şekil 5.20 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş EYTM modellerinde NEDC boyunca batarya şarjı ve anlık yakıt tüketim değerleri.

Daha önce de belirtildiği üzere lineerleştirilmiş EYTM'nin asıl amacı, bir önceki bölümde de irdelenmiş eğimli yolların meydana getirdiği şarj dengeleme problemi için öngörülü bir kontrol yapısı elde edebilmektedir. Öncelikle yeni bedel fonksiyonun lineer yapısı hem bir kestirim amacı için kullanılmakta hem de Model Öngörülü Kontrol yapısı çerçevesinde optimal bir çözüm elde etmek adına değerlendirilmektedir.

Öncelikle (5.16) denkleminin bir önceki bölümde ifade edilen negatif eğim öncesi ön deşarj senaryosu için (Senaryo 1 - Durum 1 ve 2) sadece güç aktarım ile ilgili kısımları, pozitif eğimi öncesi ön şarj için paralel şarj ile ilgili kısımları dikkate alınacaktır. Öte yandan her iki durumda da (5.16) denklemi Model Öngörülü Kontrol için bedel fonksiyonu çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Öte yandan ön deşarj yapılması gereken durum için öngörülü kontrol yönteminin seçeceği yeni modun, şarjı azaltmak adına güç aktarımı olduğu bir önceki bölümde elde edilen sonuçlardan da anlaşılmaktadır. Bu durum başlangıç koşulu paralel şarj ya da güç aktarımı olsa da değişiklik göstermemektedir.

Bu anlamda kontrol problemi için bedel fonksiyonu tekrar yazılırsa

$$J = \int_0^{t_f} \dot{m}_{eşdeğer} dt = \frac{1}{Q_{LHV}} \int_0^{t_f} \{ (s_{0,deşarj} \cdot K_{bx_{GA}} + K_{fx_{GA}}) \cdot u_{GA} + (s_{0,deşarj} \cdot K_{by_{GA}} + K_{fy_{GA}}) \} dt \quad (5.17)$$

elde edilir. Öte yandan optimal kontrol yöntemi için sistem dinamiği olarak batarya enerjisi $E_{bat}(u_{GA})$ ve batarya gücü, $P_{bat}(u_{GA})$ kullanılmıştır. Bir başka deyişle,

$$\dot{E}_{bat} = P_{bat} \quad (5.18)$$

şeklinde ifade edilebilir. Sonuç olarak, batarya seviyesini istenen değerlere getirecek optimal kontrol giriş serisi ayrık sistem modeli için,

$$u^*_{GA}(t_1, t_2 \dots t_f) = \operatorname{argmin} \sum_{i=t_1}^{i=t_f} \dot{m}_{eşdeğer} \quad (5.19)$$

Benzer şekilde ek şarj gerektiren senaryo için (5.20) denklemi

$$u^*_{PŞ}(t_1, t_2 \dots t_f) = \operatorname{argmin} \sum_{i=t_1}^{i=t_f} \dot{m}_{eşdeğer} \quad (5.20)$$

şeklinde ilgili kısıtları ile beraber yazılır.

Burada (5.17) denklemi ile ifade edilen bedel fonksiyonu lineer programlama yöntemi ile çözülmektedir. Bu yöntem aslında lineer cebirsel denklemlerin parametre optimizasyonu için kullanılsa da, ilgili problem parametrik bir optimizasyon problemine benzetilebilir.

Öyle ki, ufuk zamanı boyunca optimize edilecek kontrol girişleri

$$u^*(t_1, t_2 \dots t_f) := \{u_1, u_2, u_3 \dots u_{tf}\} \quad (5.21)$$

şeklinde sabit parametreler olarak kabul edilmiştir. Öte yandan (5.17) denkleminin ikinci kısmında bulunan kontrol girişinden bağımsız kalan sabit değerler ise sanal bir kontrol girişi ile çarpılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$J = \int_0^{t_f} \dot{m}_{eşdeğer} dt = \quad (5.22)$$

$$= \frac{1}{Q_{LHV}} \int_0^{t_f} \{ (s_{0,deşarj} \cdot K_{bxGA} + K_{eşdeğer} \cdot u_{GA} + (s_{0,deşarj} \cdot K_{bxGA} + K_{eşdeğer} \cdot u_{GA}) \cdot u_2 \} dt$$

$$u_2^*(t_1, t_2 \dots t_f) := \{u_{2_1}, u_{2_2}, u_{2_3} \dots u_{2_{tf}}\} \quad (5.23)$$

Böylelikle bedel fonksiyonu

$$\min_u f^T \cdot u \begin{cases} A_{es} u = b_{es} \\ l_b \leq u \leq u_b \end{cases} \quad (5.24)$$

formuna sokularak lineer programlama yöntemi ile minimize edilebilecek hale getirilir. Burada yukarıda belirtildiği üzere eşitlik kısıtları manevra sonunda batarya şarjını istenen değere getirebilmek için bataryadan çekilen ya da eklenen ek şarj ya da ekdeşarj enerjisinin

$$\sum_{i=0}^{i=t_f} P_{bat} = E_{ek,deşarj} \quad (5.25)$$

$$\sum_{i=0}^{i=t_f} P_{bat} = E_{ek,şarj} \quad (5.26)$$

ifadeleridir. Öte yandan yukarıda bahsedildiği üzere bedel fonksiyonun uygun forma sokabilmek adına kullanılan sanal kontrol girişleri de kısıt fonksiyonları ile sabit tutulmuştur. Böylelikle bu sanal kontrol girişlerinin optimizasyon sonunda sadece sabit bir değerde kalması sağlanmış olunur.

$$u_{2_i} = 1 \quad (5.27)$$

Son olarak da ilgili kontrol girişlerini tanımlanan aralıkta tutulmasını sağlayacak eşitsizlik kısıtları ise ilgili probleme göre

$$0 \leq u_{Pş}^* \leq 1 \quad (5.28)$$

$$0 \leq u_{GA}^* \leq 1 \quad (5.29)$$

ile ifade edilmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere bu optimizasyon yöntemi her örnekleme anı için çözülmekte, tüm kontrol ufku ve sistem durum değişkeni değerleri ufuk boyunca hesaplanmaktadır. Sisteme ise anlık olarak hesaplanan kontrol ufkunun ilk değeri girilir.

Lineer Programlama yönteminin çözümü anlık olarak Simpleks algoritması ile çözülmektedir. Yöntemi Simulink Embedded Function bloğu ile modele eklenmiştir. Doğası gereği, Simpleks algoritması için aday başlangıç değeri algoritma tarafından otomatik olarak atandığından yakınsama performansına bir etkisi yoktur.

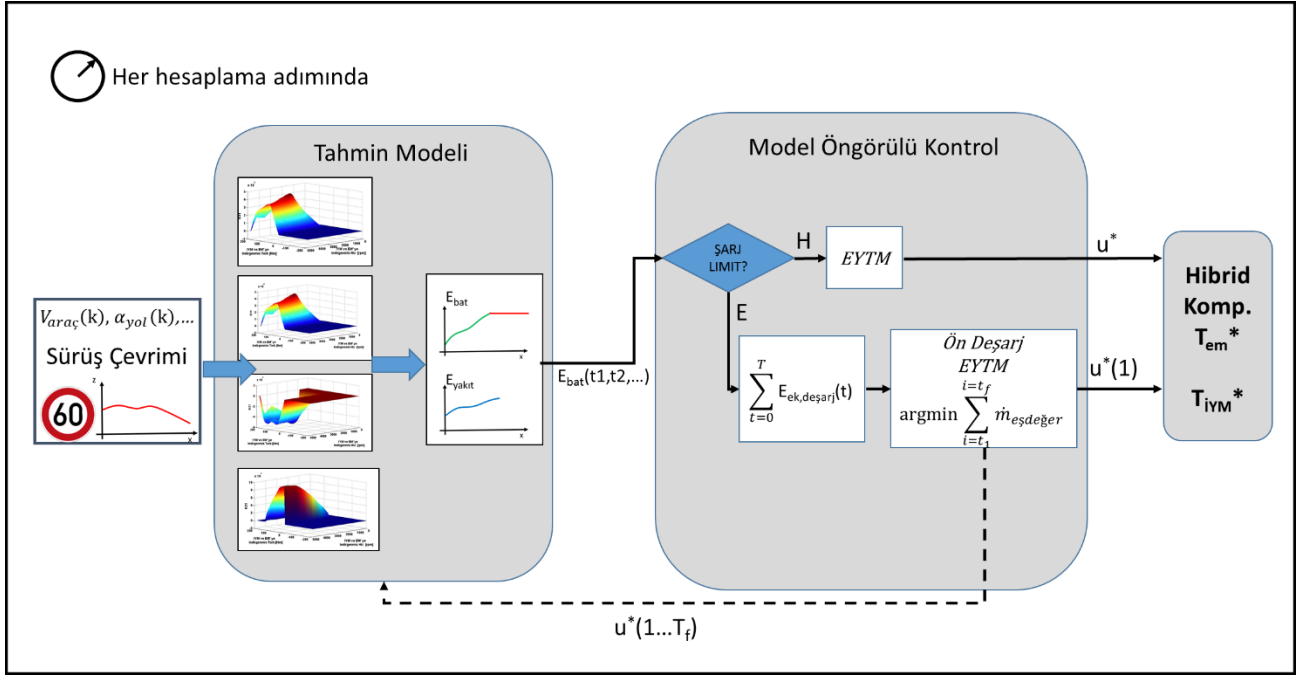
Lineer EYTM modeli kullanılarak elde edilen çözümün, daha önce bahsedilen öngörülü EYTM yönteminden temel farkı, daha doğru ve detaylı bir kestirim modelinin oluşturulması bu sayede de gerçekçi hız ve yol profilleri için sonuç elde edilebilmesinin sağlanmasıdır. Bu amaçla, önceden hız profilinin ve yol profilinin bilindiği durum için EYTM'nin yaklaşık davranışı, dolayısı ile de bataryadan yolun ileriki kesimlerinden çekilecek ya da şarj edilecek enerji tahmin edilebilir. Benzer şekilde eğimli kısımda geri kazanılacak enerji miktarı da yol eğiminden tahmin edilebilir.

Şekil 5.3'de görüldüğü üzere eğimli alana gelene kadar fazladan bataryadan çekilecek $E_{ek,deşarj}(t)$ batarya enerjisi Lineer EYTM modeli üzerinden her an için tahmin edilebilir. Öte yandan, anlık olarak maksimum şarj seviyesine kadar gerekli batarya enerjisi $E_{maks,0}(t)$ de her hesaplama adımında elde edilir. Bu şekilde, yoldan geri beslenecek $E_{reküp..}(t)$ reküperatif enerji batarya şarjının erken dolmasına neden olursa Lineer Programlama tabanlı optimizasyon algoritması çalıştırılır. Aksi halde, standart EYTM algoritması kullanılmaya devam edilir.

Hesaplama algoritması Şekil 5.21' de özetlenmiştir. Görüldüğü gibi her hesaplama adımında, uygun şartlar sağlanırsa tüm yol profili boyunca uygun kontrol sinyali elde edilir. Sisteme bu kontrol sinyal değerlerinin ilki uygulanırken, diğer kısımlar anlık ve gelecek kontrol sinyalleri çerçevesinde yeni batarya enerjisi hesaplaması adına tahmin modeline geri beslenir. Böylelikle bir sonraki hesap adımında yeni batarya şarj profili elde edilir ve optimizasyon algoritmasında kullanılır.

Bu bölümde, yol için eğim ve hız profillerinin tahmini olarak bilindiği varsayılmaktadır. Öngörülü kontrol algoritmasının temel amacı eğim sonunda

maksimum şarj değerini elde etmektir. İleriki kısımlarda elde edilmiş simülasyonlar hem standart EYTM hem de öngörülü Enerji Yönetim Sistemi için hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.21 : Standard EYTM ve lineerleştirilmiş EYTM modellerinde NEDC boyunca batarya şarjı ve anlık yakıt tüketim değerleri.

5.2.3 Model öngörülü kontrol yöntemi ile öngörülü enerji yönetimi için simülasyon senaryoları ve sonuçları

Yapılan simülasyonlar 3 farklı senaryo için gerçekleştirilmiştir. Öncelikle sabit hızla eğimli yol bölümüne yaklaşma ile ilgili senaryo, 3 farklı durum için simüle edilmiştir. Öte yandan, 2. Senaryo kapsamında, sabit bir ivmelenme profili ile 4 farklı başlangıç koşulu incelenmiştir. Senaryo 3'te ise, 3 farklı hız için bir ivmelenme ve bir yavaşlama profili 2 durum için irdelenmiştir. Son olarak da Senaryo 4 kapsamında, dinamik bir hız profili ile algoritma test edilmiştir. Dinamik algoritma, gerçek bir sürüş çevrimini temsil eden FTP75 sürüş çevriminin herhangi bir bölümü kullanılarak elde edilmiştir.

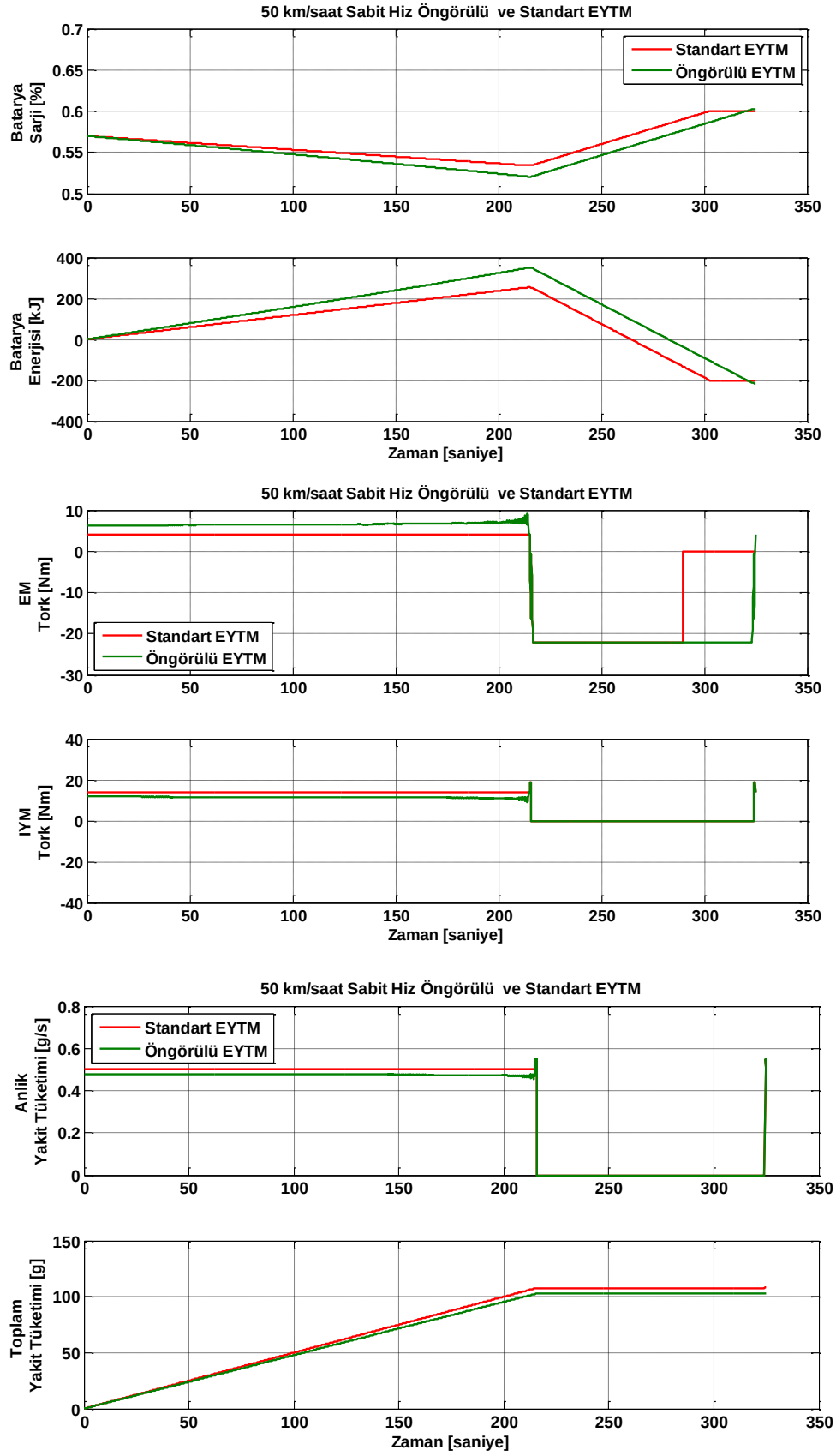
Çizelge 5.3' de Simüle edilen Senaryolar ve başlangıç koşullarına ait bazı değerler verilmiştir. Tüm senaryolar, %58 Batarya Şarjı seviyesinden başlatılmış olup yol şartları Bölüm 5.1'de irdelenen yol modelinin aynısı kullanılmıştır.

Çizelge 5.3 : Öngörülü lineer EYTM tabanlı algoritma test senaryoları.

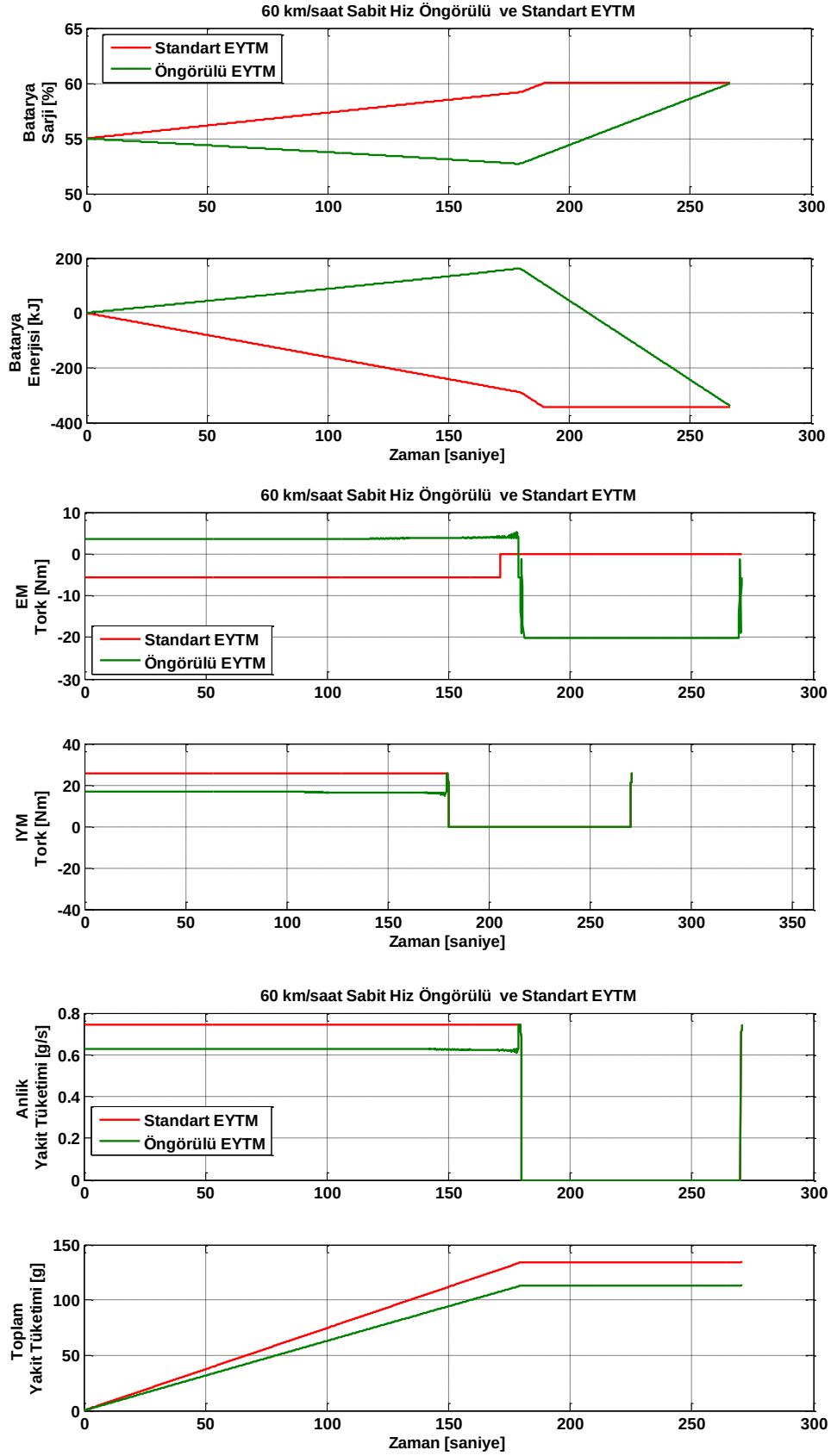
Senaryolar	Maks. Hız [km/saat]	Minimum Hız [km/saat]	Başlangıç Batarya Şarjı [%]	Başlangıç Anında Standard EYTM Hibrid Kontrol Modu GP: Güç Paylaşımı PŞ: Paralel Şarj	Test Edilen Algoritmalar
Senaryo 1.1	50	50	58	GP	Std. EYTM & L- EYTM
Senaryo 1.2	60	60	56	PŞ	
Senaryo 1.3	70	70	58	GP	
Senaryo 2.1	40	70	58	PŞ	
Senaryo 2.2	40	60	58	PŞ	
Senaryo 2.3	40	80	58	PŞ	
Senaryo 3.1	50	80→60	58	Sadece İYM	
Senaryo 3.2	40	70→50	58	PŞ	
Senaryo 4	31	47	58	GP	Std. EYTM & Std. EYTM ve Şarj Kontrolü L- EYTM

Sonuçlardan görüldüğü üzere L-EYTM şarj dengelem konusunda, istenen performansı göstermektedir. Senaryo 1.1 ve Senaryo 1.3 için standart EYTM davranışı Güç Paylaşımı modunda olduğundan batarya şarjı eğim başlangıcında Senaryo1.2'ye göre daha düşük seviyede olmaktadır. Bu durumda standart EYMT bu iki Senaryo 1.1 ve Senaryo 1.3' te Senaryo 1.2'ye göre daha geç tam şarj değerine ulaşmaktadır. Dolayısı ile yakıt tüketimi açısından bu senaryo öngörülü sistem açısından daha yüksek bir yakıt avantajı sağlamaktadır.

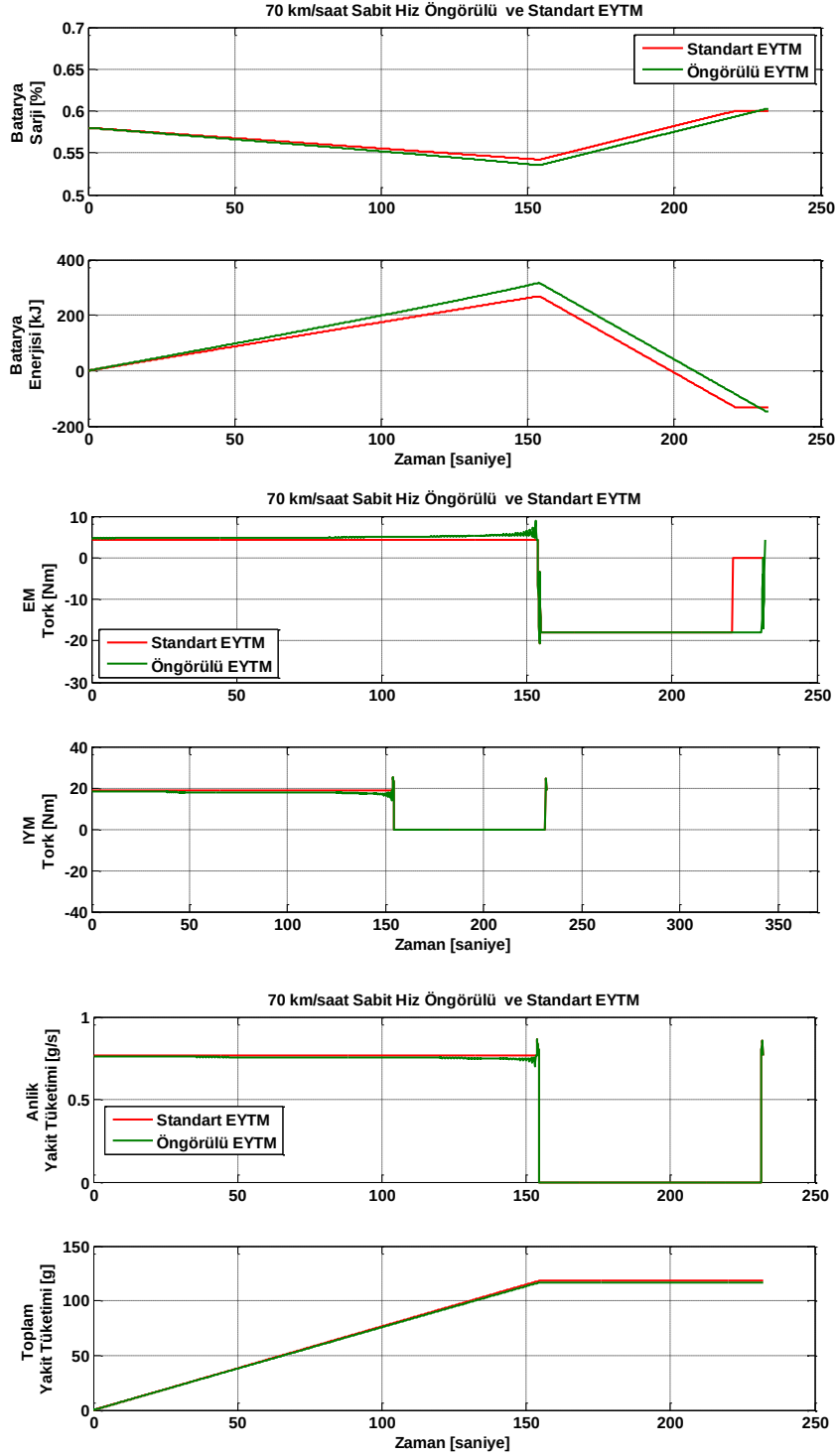
Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24' de Senaryo 1' ile ilgili sonuçlar Batarya Şarjı Batarya Enerjisi, EM Torku, İYM Torku ve İYM anlık ve toplam yakıt tüketiminin zamana göre değişimi olarak verilmiştir.



Şekil 5.5.22 : Senaryo 1.1: Sabit hızla yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 50 km/saat.

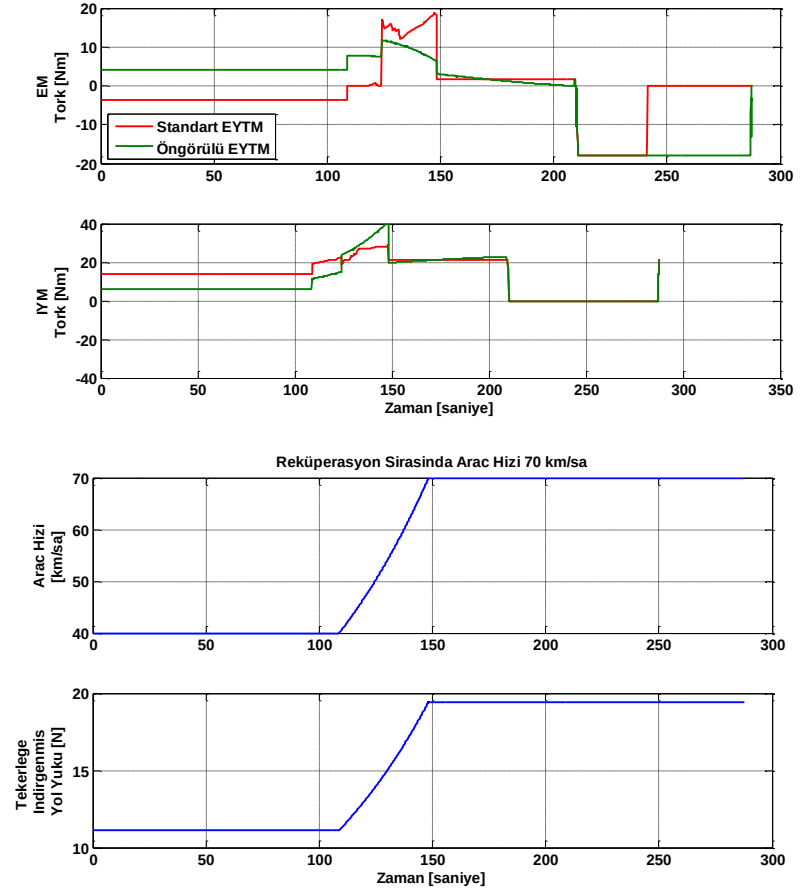
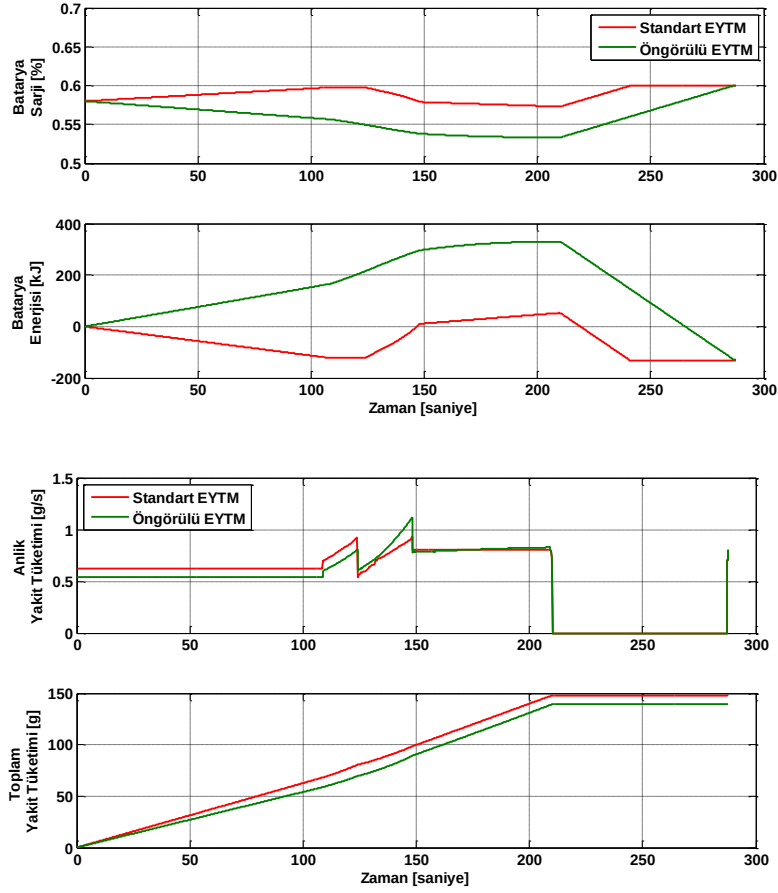


Şekil 5.23 : Senaryo 1.2: Sabit hızla yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 60 km/saat.

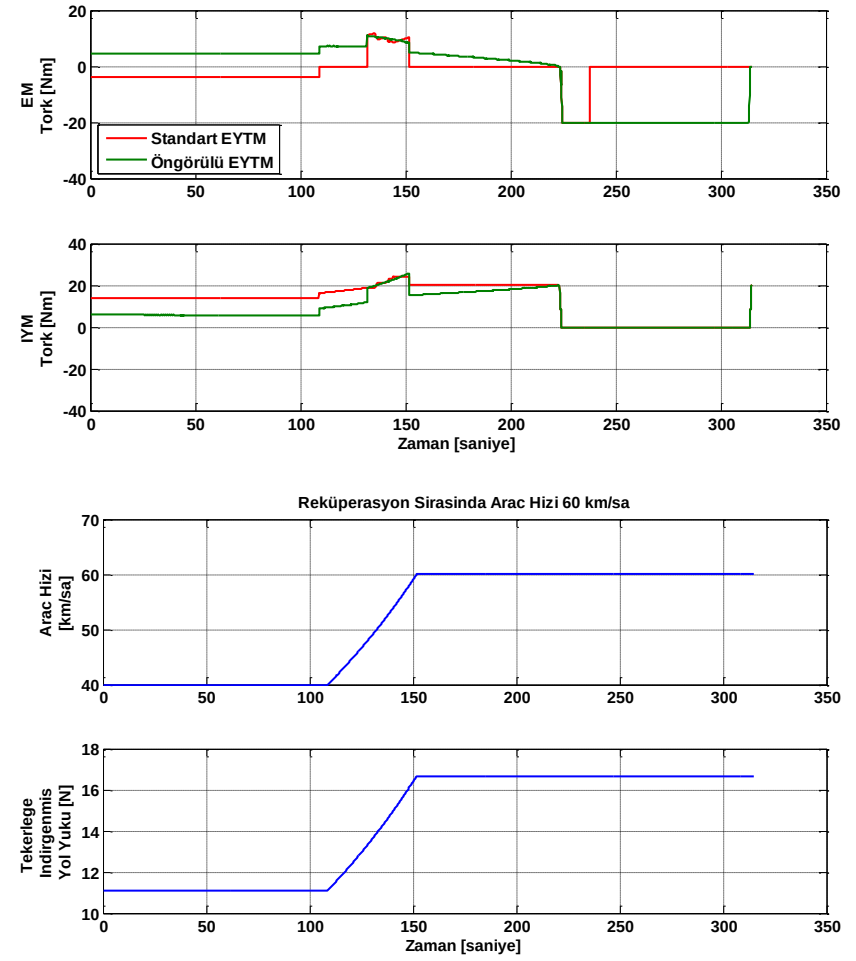
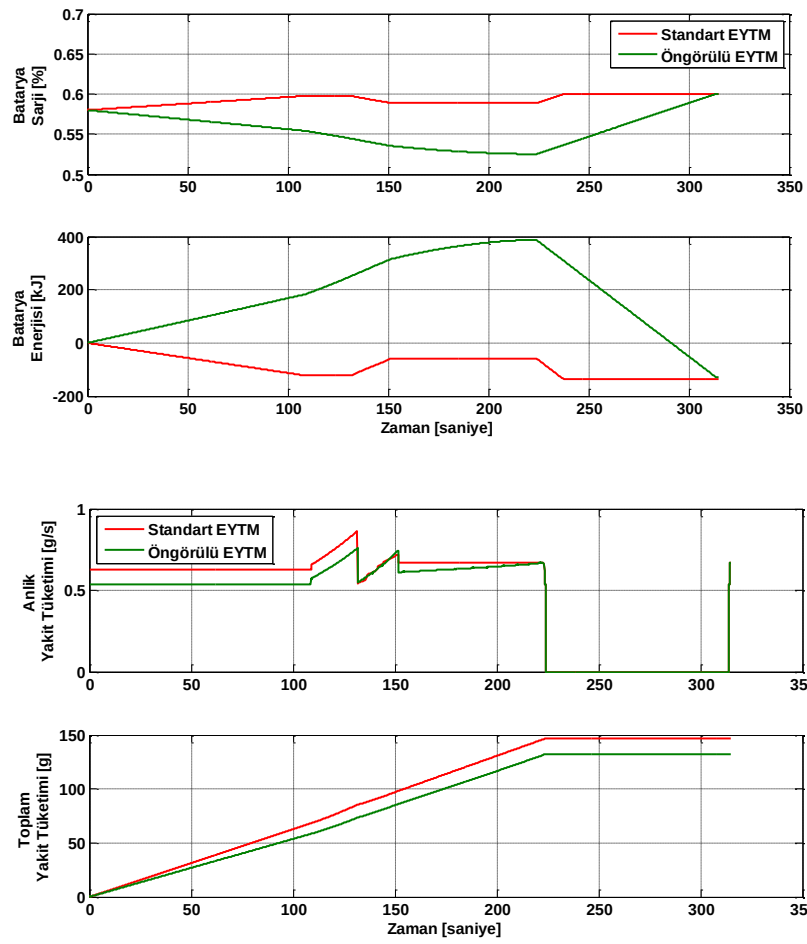


Şekil 5.24 : Senaryo 1.3: Sabit hızla yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 70 km/saat.

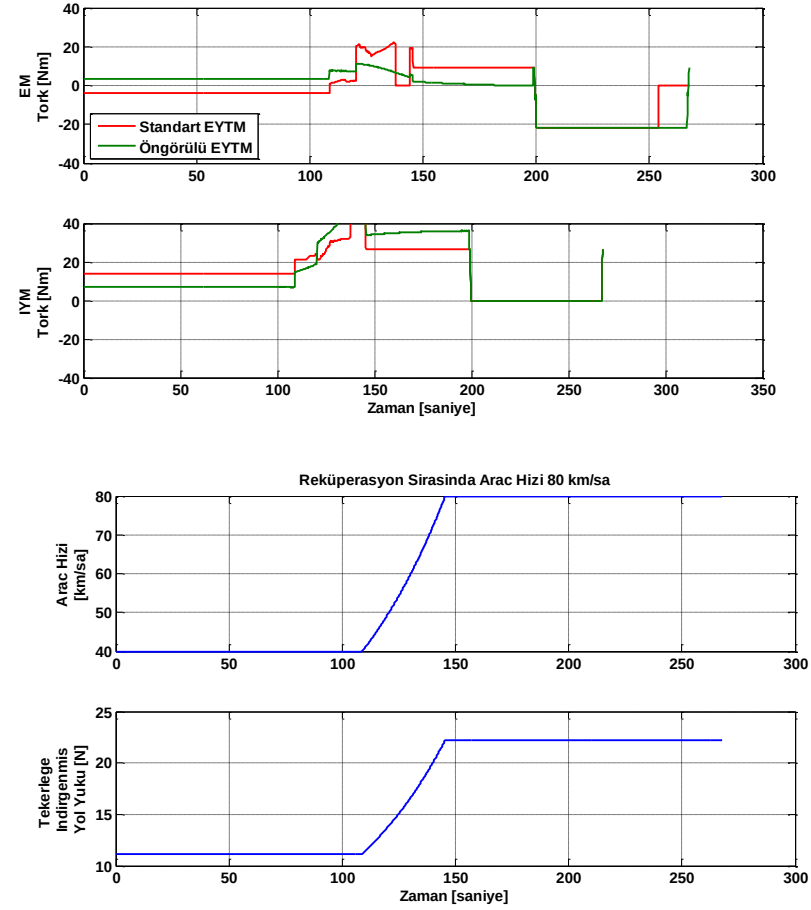
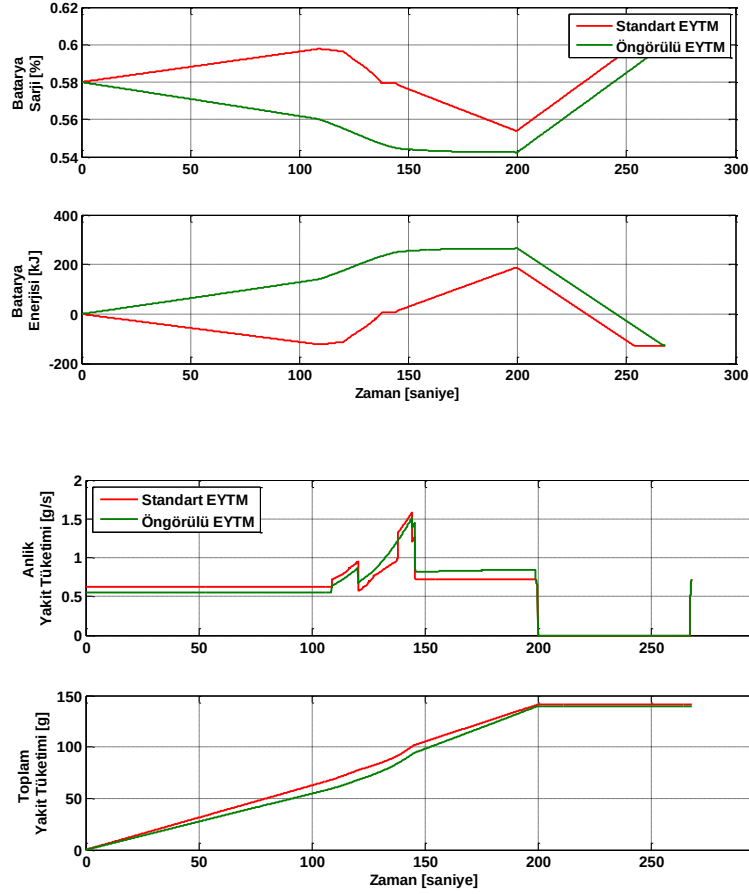
Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’ de Senaryo 2’ ile ilgili sonuçlar Batarya Şarjı Batarya Enerjisi, EM Torku, İYM Torku ve İYM anlık ve toplam yakıt tüketiminin zamana göre değişimi olarak verilmiştir. Ayrıca araç hızı ve buna ilişkin tekerlek yükleri de ifade edilmiştir.



Şekil 5.25 : Senaryo 2.1: Sabit hız-ivmelenme-sabit hız profili ile yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 40 km/saat→70km/saat.

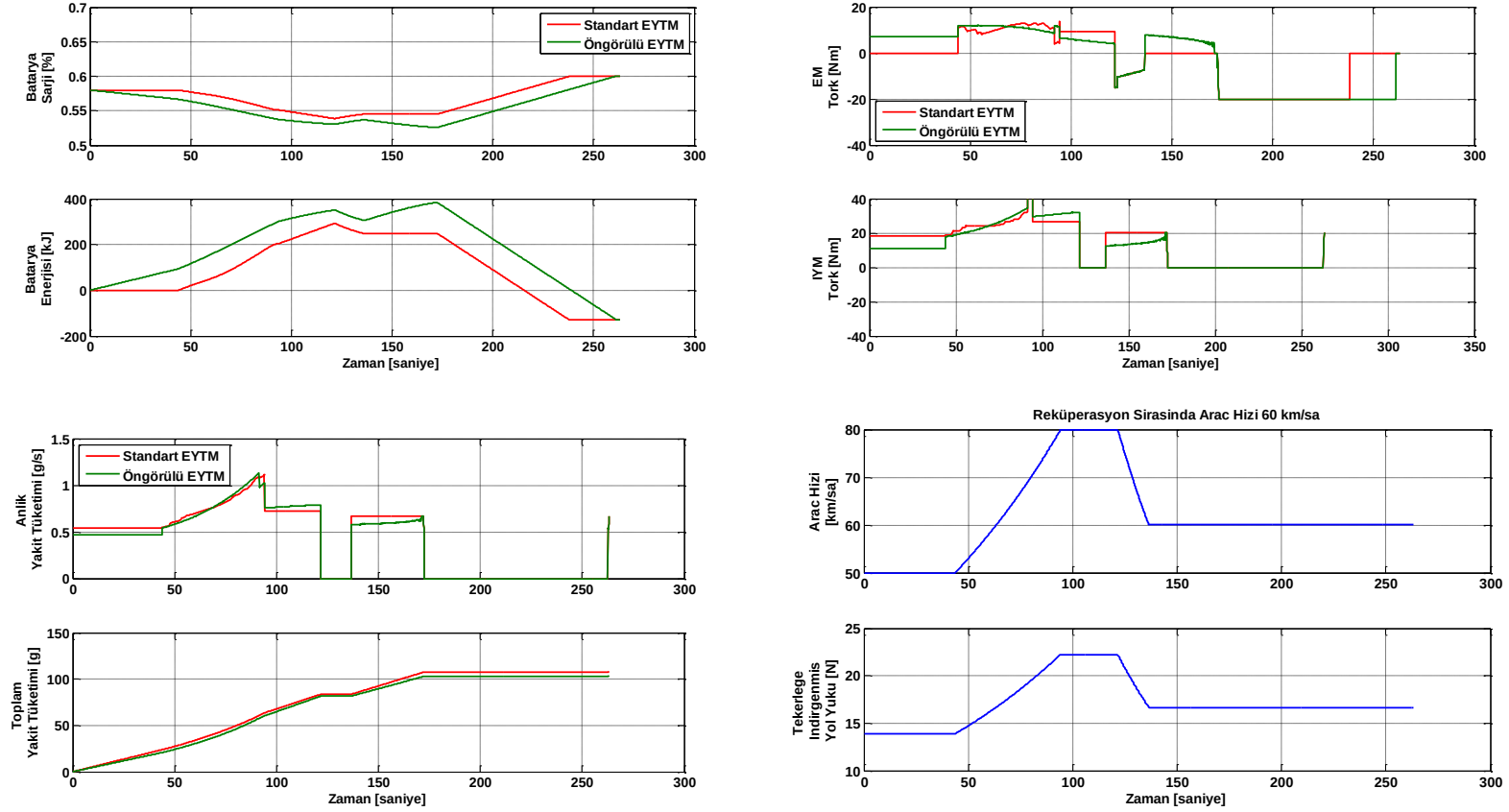


Şekil 5.26 : Senaryo 2.2: Sabit hız-ivmelenme-sabit hız profili ile yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 40 km/saat→60km/saat.

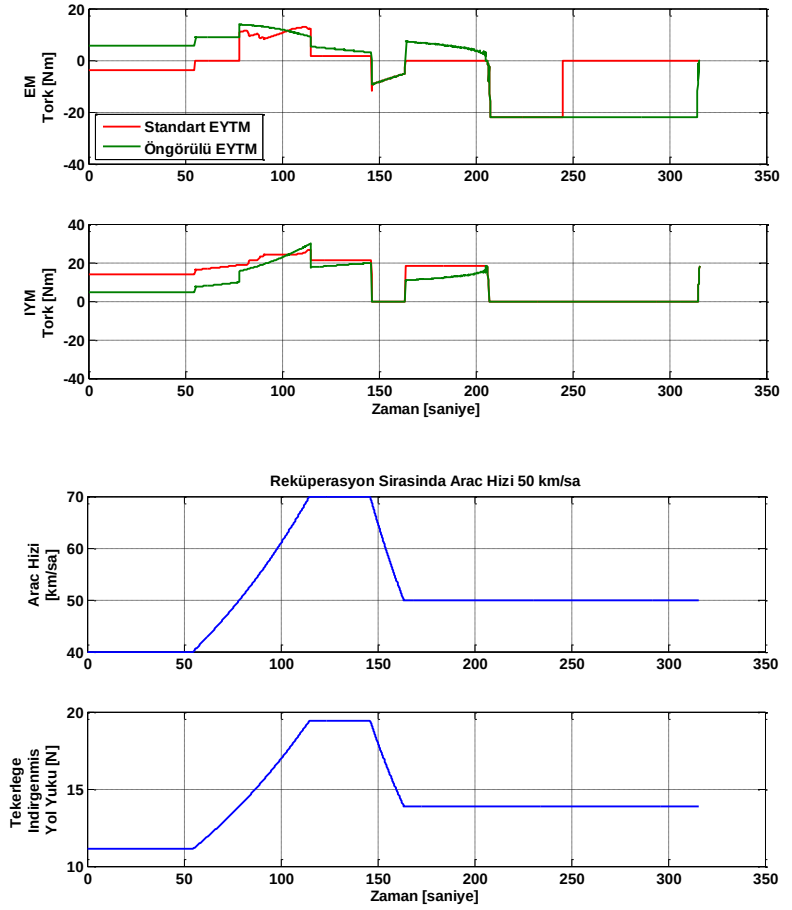
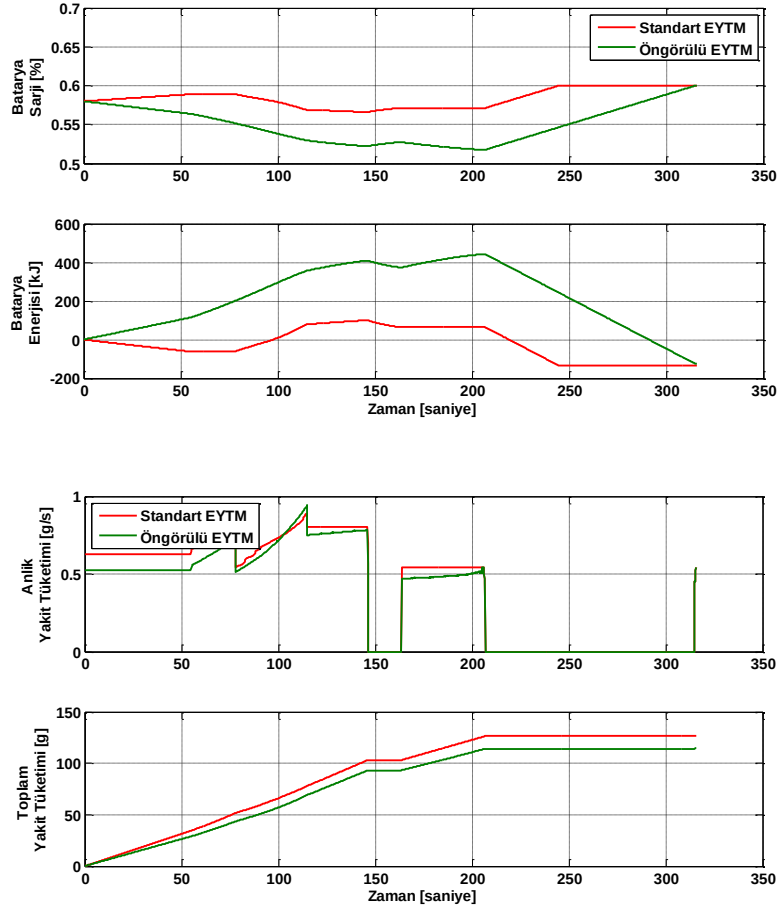


Şekil 5.27 : Senaryo 2.3: Sabit hız-ivmelenme-sabit hız profili ile yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 40 km/saat→80km/saat.

ekil 5.28 ve Şekil 5.29’ da Senaryo 3’ ile ilgili sonuçlar Batarya Şarjı Batarya Enerjisi, EM Torku, İYM Torku ve İYM anlık ve toplam yakıt tüketiminin zamana göre değişimi olarak verilmiştir. Ayrıca araç hızı ve buna ilişkin tekerlek yükleri de ifade edilmiştir.

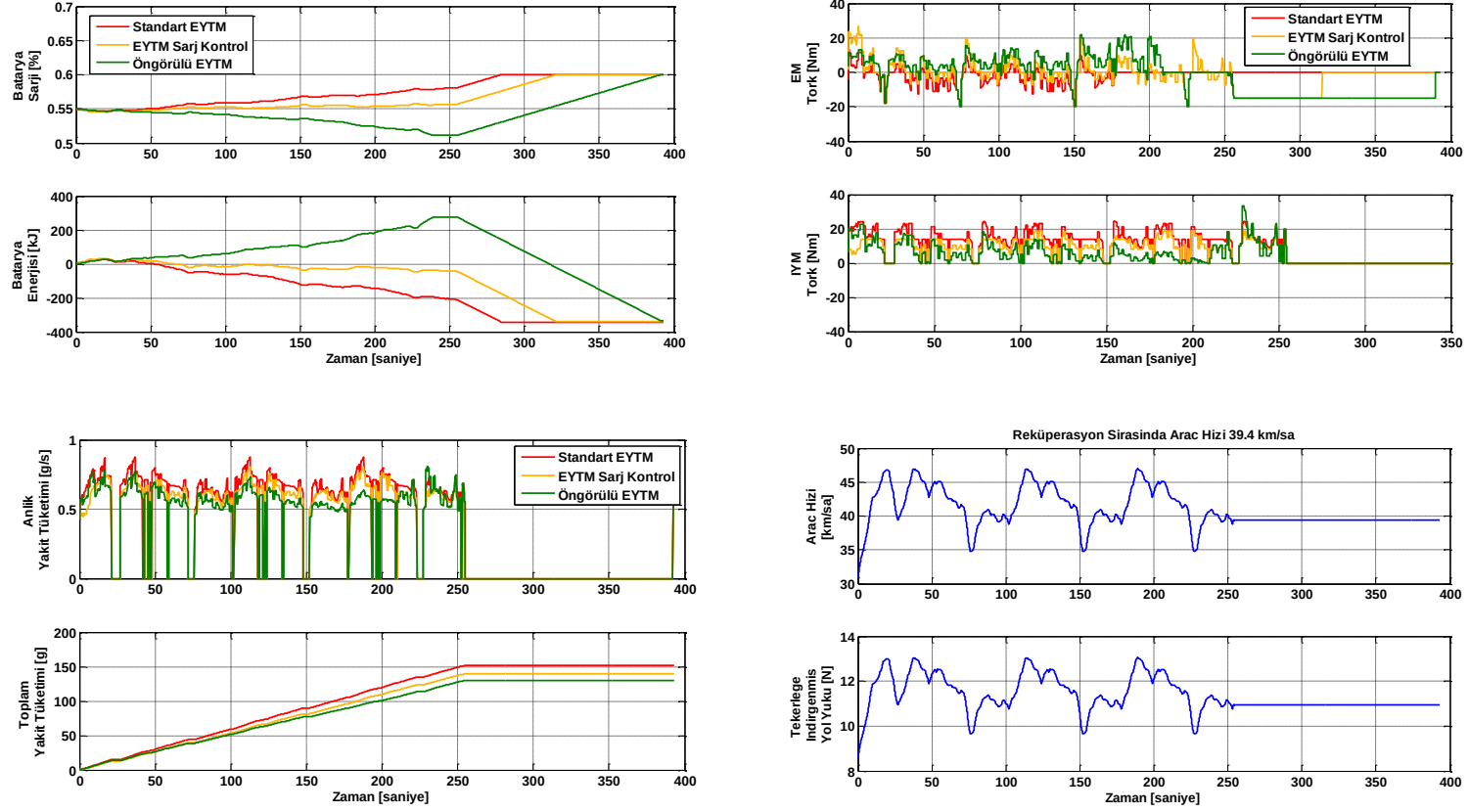


Şekil 5.28 : Senaryo 3.1: Sabit hız-ivmelenme-sabit hız –yavaşlama sabit hız yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 50 km/saat→80 km/saat→60km/saat.



Şekil 5.29 : Senaryo 3.2: Sabit hız-ivmelenme-sabit hız –yavaşlama sabit hız yolun eğim bölümüne yaklaşım senaryosu: 40 km/saat→70 km/saat→50km/saat.

Şekil 5.30 da Senaryo 4' ile ilgili sonuçlar Batarya Şarjı Batarya Enerjisi, EM Torku, İYM Torku ve İYM anlık ve toplam yakıt tüketiminin zamana göre değişimi olarak verilmiştir. Ayrıca araç hızı ve buna ilişkin tekerlek yükleri de ifade edilmiştir.



Şekil 5.30 : Senaryo 4: Dinamik hız profili ile eğim bölümüne yaklaşım senaryosu.

Çizelge 5.4' te tüm bu Senaryolar çerçevesinde elde edilen ortalama yakıt tüketimi iyileştirilmesi görülmektedir.

Çizelge 5.4 : Öngörülü lineer EYTM tabanlı algoritma test senaryoları yakıt tüketim sonuçları.

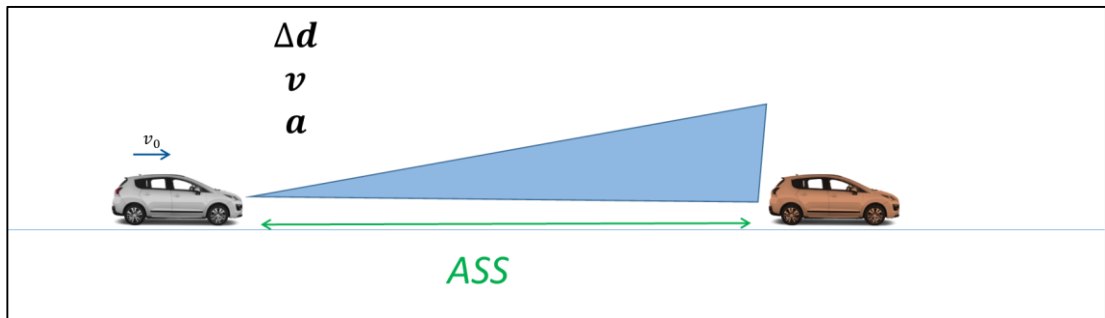
Senaryolar	EYTM Toplam Yakıt Tüketimi [g]	L-EYTM Toplam Yakıt Tüketimi [g]	Yakıt Tüketimi İndirimi [%]
Senaryo 1.1	108.3	103.2	%4.7
Senaryo 1.2	134.5	113.5	%15.7
Senaryo 1.3	118.6	117.0	%1.3
Senaryo 2.1	148.4	139.7	%5.9
Senaryo 2.2	147.0	132.5	%9.9
Senaryo 2.3	141.4	139.8	%1.1
Senaryo 3.1	103.5	108.0	%2.1
Senaryo 3.2	126.6	114.4	%9.6
Senaryo 4	151.8 (ŞK: 139.6)	130.2	%9.63

6. SÜRÜCÜ DESTEK SİSTEMLERİ

Bu bölümde tez kapsamında geliştirilen 2 farklı boylamsal yönde sürücü destek sistemleri tanıtılacaktır. Bunlardan ilki, sürücü konforunun ön plana geçirmek adına Model Öngörülü Kontrol yöntemi uygulanarak çözüme ulaşılan Adaptif Seyir Sistemi Kontrolcüsü geliştirilmesidir. Diğer ise elektrikli bir aracın enerji tüketimini azaltacak boylamsal hız optimizasyonu ile ilgili olarak Trafik Işığı Asistan sistemi geliştirilmesidir. İlk kontrol sistemi önce basit bir model üzerinde geliştirildikten sonra, kompleks araç modeline uygulanarak sonuçların geçerliliği pekiştirilmiştir. Trafik Işığı Asistanı ise, benzer bir şekilde Model Öngörülü Kontrol yöntemi ile geliştirildikten sonra kompleks modelde denenmiş ve daha sonra gerçek zamanlı bir uygulama olarak sürücü içeren simülasyonlar yapmak adına bir araç simülatörü üzerinde test edilmiştir.

6.1 Adaptif Seyir Sistemi (ASS)

ASS boylamsal olarak aracın önündeki bir başka araçla belirli bir mesafe ve rölatif hız çerçevesinde sürücüdenden bağımsız olarak sürüşünü sürdürmesini sağlayan bir kontrol sistemidir. Şekil 6.1’de de görüldüğü üzere problem daha geniş anlamı ile aslında boylamsal bir hız ve konum kontrol problemidir.



Şekil 6.1 : ASS Boylamsal hız ve konum kontrol problemi.

Geliştirilen kontrol sistemi, Adaptif Seyir Sistemine (ASS) sahip, konvansiyonel bir aracın, çeşitli takip senaryolarında, istenilen performans hedeflerine ulaşmasına imkân tanımaktadır. Kontrol sisteminin temelinde, model öngörülü kontrol sistemi

kullanılmıştır. Böylelikle, kontrol yapısının hibrid elektrikli bir aracın enerji yönetim sistemine entegrasyonunun gerçekleştirilmesi sağlanacaktır. Öncelikle kontrol problemi, sadece konvansiyonel bir aracın ASS probleminin çözülmesinde kullanılacak, daha sonra performans hedefleri, yakıt ekonomisi ve/veya benzeri hedefler ile genişletilecek ardından da, uygulama hibrid araç çerçevesinde tekrar değerlendirilecektir.

6.1.1 ASS problemi çözümü için model öngörülü kontrol

Yukarıda bahsedildiği üzere, ASS sistemi kontrol probleminin çözümü için, Model Öngörülü Kontrol Sistemi kullanılacaktır. Öncelikle bu bölümde, durum-uzay modeli için bu kontrol sisteminin çözüm metodu ifade edilecektir. $-n$ boyutlu bir dinamik sistemin durum uzay ayrık modeli şu şekilde ifade edilebilir.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Gw(k) \quad (6.1)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (6.2)$$

Denklemden, $w(k)$ bozucu etkenleri ifade etmektedir. Bu denklemler çerçevesinde $x(k+2)$ ve $y(k+1)$ yazılırsa,

$$x(k+2) = Ax(k+1) + Bu(k+1) + Gw(k+1) \quad (6.3)$$

$$x(k+2) = A[Ax(k) + Bu(k) + Gw(k)] + Bu(k+1) + Gw(k+1) \quad (6.4)$$

$$x(k+2) = A^2x(k) + ABu(k) + AGw(k) + Bu(k+1) + Gw(k+1) \quad (6.5)$$

ve benzer şekilde;

$$y(k+1) = Cx(k+1) \quad (6.6)$$

$$y(k+1) = C[Ax(k) + Bu(k) + Gw(k)] \quad (6.7)$$

$$y(k+1) = CAx(k) + CBu(k) + CGw(k) \quad (6.8)$$

elde edilir.

Dolayısı ile $-p$, tahmin ufku (prediction horizon) ve $m \leq p$ şartı ile $-m$ kontrol ufku (control horizon) olmak üzere, denklemlerin genelleştirilmiş hali şu şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
x(k+p) = & A^p x(k) + \left[A^{p-1} Bu(k) + A^{p-2} Bu(k+1) + \dots + A^{p-m} Bu(k+m-1) \right] \\
& + \left[A^{p-1} Gw(k) + A^{p-2} Gw(k+1) + \dots + Gw(k+p-1) \right]
\end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned}
y(k+p) = & CA^{p-1} x(k) + \left[CA^{p-1} Bu(k) + CA^{p-2} Bu(k+1) + \dots + CA^{p-m} Bu(k+m-1) \right] \\
& + \left[CA^{p-1} Gw(k) + CA^{p-2} Gw(k+1) + \dots + CA^{p-m} Gw(k+m-1) \right]
\end{aligned} \quad (6.10)$$

(6.9) ve (6.10) denklemleri, -p uzunluğundaki bir ufukta, o anki yapılan ölçümlere dayanılarak durum ve çıkış denklemlerinin hesaplanmasını sağlar. Denklemlerde, ölçülen o anki durum değişkenleri $x(k)$ 'nin dışında, kontrol ufku boyunca elde edilmiş kontrol girişleri, $u(k), u(k+1), \dots, u(k+m-1)$ ve aynı şekilde kontrol ufku boyunca tahmin edilen bozucu etken değişkeni, $w(k), w(k+1), \dots, w(k+m-1)$ da yer almaktadır. Kontrol sinyalleri, her adımda problemin sonucu olarak hesaplanan değerler olduğundan, ilgili hesap adımında yukarıdaki denklemlerde yerlerine koyulmaktadır. Bozucu etken değişkeni ise, ileride de ifade edileceği üzere bir tahmin algoritması üzerinden o an için hesaplanmaktadır.

(6.9) ve (6.10) denklemlerine, yapılan ölçümler sonunda elde edilen gerçek değerlerle karşılaştırılıp bir düzeltme bileşeni de eklenebilir:

$$e_x(k) = x(k) - \hat{x}(k|k-1) \quad (6.11)$$

$$e_y(k) = y(k) - \hat{y}(k|k-1) \quad (6.12)$$

İfadeleri, k anında ölçülen durum değişkeni $x(k)$ 'yi ve sistem çıkışı $y(k)$ 'yi göstermektedir. $\hat{x}(k|k-1)$ ve $\hat{y}(k|k-1)$ ise sırası ile bir önceki andaki (k-1) tahmin denkleminde gelen tahmini durum değişkeni ve sistem çıkışlarını ifade eder. Bu değerlerde bir önceki tahmin denkleminde yapılan hatayı, k anındaki tahmin denkleminde düzelterek bir ifade denklemlere eklenebilir.

Böylelikle (6.9) ve (6.10) denklemleri, matris vektör formunda yazılırsa,

$$\hat{X}_p(k+p|k) = \bar{A}x(k) + \bar{B}U(k+m) + \bar{G}W(k+p) + \bar{H}e_x(k), \quad (6.13)$$

$$\hat{Y}_p(k+p|k) = \bar{C}x(k) + \bar{D}U(k+m) + \bar{E}W(k+p) + \bar{F}e_y(k), \quad (6.14)$$

$$\hat{X}_p(k+p|k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_p(k+1|k) \\ \hat{x}_p(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{x}_p(k+p|k) \end{bmatrix}, \quad \hat{Y}_p(k+p|k) = \begin{bmatrix} \hat{y}_p(k+1|k) \\ \hat{y}_p(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{y}_p(k+p|k) \end{bmatrix}, \quad U(k+m) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+m-1) \end{bmatrix},$$

$$W(k+m) = \begin{bmatrix} w(k) \\ w(k+1) \\ \vdots \\ w(k+m-1) \end{bmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ \vdots \\ A^p \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & 0 \\ AB & B & \dots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ A^{p-1}B & A^{p-2}B & \dots & A^{p-m}B \end{bmatrix},$$

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} G & 0 & \dots & 0 \\ AG & G & \dots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ A^{p-1}G & A^{p-2}G & \dots & G \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{p-1} \end{bmatrix}, \quad \bar{D} = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ CA^{p-1}B & CA^{p-2}B & \dots & CA^{p-m}B \end{bmatrix},$$

$$\bar{E} = \begin{bmatrix} CG & 0 & \dots & 0 \\ CAG & CG & \dots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ CA^{p-1}G & CA^{p-2}G & \dots & CG \end{bmatrix}, \quad \bar{H} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_p \end{bmatrix}, \quad \bar{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_p \end{bmatrix}$$

Bu denklemlerin ardından, optimize edilecek, kuadratik bedel fonksiyonu yazılabilir:

$$J = \sum_{i=1}^p [\hat{y}_p(k+i|k) - y_r(k+i)]^T Q [\hat{y}_p(k+i|k) - y_r(k+i)] + \sum_{i=0}^{m-1} [u(k+i)^T R u(k+i)] \quad (6.15)$$

Bedel fonksiyonunda, Q matrisi ile tahmini çıkış değerleri ile referans girişleri arasındaki farka, yani hataya, R matrisinde ise kontrol sinyaline dair ağırlık değerleri bulunmaktadır. (6.15) denklemini, (6.14) denklemini kullanarak tekrar yazarsak,

$$J = \left[\bar{C}x(k) + \bar{D}U(k+m) + \bar{E}W(k+p) + \bar{F}e_y(k) - Y_r \right]^T \bar{Q} \left[\bar{C}x(k) + \bar{D}U(k+m) + \bar{E}W(k+p) + \bar{F}e_y(k) - Y_r \right] \quad (6.16)$$

bulunur. Bu denklemde,

$$Y_r = \bar{\Phi} C x(k) \quad (6.17)$$

olacak şekilde referans yörüngesini ifade eder. $\bar{\Phi}$, p ufku boyunca olan referans değerlerini, $\bar{Q}$, Q matrislerini, $\bar{R}$ ise R matrislerini içermektedir:

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} Q & \dots & 0 \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ 0 & \dots & Q \end{bmatrix}, \quad \bar{R} = \begin{bmatrix} R & \dots & 0 \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ 0 & \dots & R \end{bmatrix}, \quad \bar{\Phi} = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Psi_p \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

Bu vektördeki, Ψ_p değerleri ise, -p ufkuna ait her bir durum değişkenine dair referans değerini içermektedir. -n boyutlu bir sistem için,

$$\Psi_i = \begin{bmatrix} \rho_1^1 & & & \\ & \rho_2^2 & & \\ & & \cdot & \\ & & & \cdot \\ & & & & \rho_n^n \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

(6.16) ifadesini açıp, sadece U içeren terimleri göz önünde bulundurarak tekrar yazarsak aşağıdaki sonuç elde edilir. Sadece U içeren terimlerin alınmasının sebebi J

bedel fonksiyonunun U'ya göre türevi alınırken U içermeyen terimlerin 0 olmasıdır [120-121].

$$J = U(k+m)^T (\bar{R} + \bar{D}^T \bar{Q} \bar{D}) U(k+m) + 2 \left\{ x(k)^T [\bar{C}^T - \bar{C}^T \Phi^T] \bar{Q} \bar{D} + W(k+p)^T \bar{E}^T \bar{Q} \bar{D} + e_y(k)^T \bar{F}^T \bar{Q} \bar{D} \right\} U(k+m) \quad (6.20)$$

Yukarıdaki sistemin optimal sonucunu bazı kısıtlar çerçevesinde de çözmek mümkündür. Bu kısıtlar, gerek sistem değişkenleri, gerekse kontrol sinyali üzerinde olabilir. Buna göre $-n$ boyutlu bir sistemin bazı durumları üzerindeki kısıtları ifade etmek için aşağıdaki denklem setleri yazılabilir:

$$M = \begin{bmatrix} x_{1,\min} \\ x_{2,\min} \\ \vdots \\ x_{a,\min} \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} x_{1,\max} \\ x_{2,\max} \\ \vdots \\ x_{a,\max} \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & 1 & & & & & 0 \\ \cdot & & 0 & & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & & & \cdot \\ 0 & & & & \cdot & & \cdot \\ 0 & & & & & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \bar{L} = \begin{bmatrix} L & & & & & & \\ & L & & & & & \\ & & \cdot & & & & \\ & & & \cdot & & & \\ & & & & \cdot & & \\ & & & & & L & \end{bmatrix}, \quad \bar{M} = \begin{bmatrix} M \\ M \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ M \end{bmatrix}$$

$$\bar{N} = \begin{bmatrix} N \\ N \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ N \end{bmatrix}, \quad U_{\max} = \begin{bmatrix} u_{\max} \\ u_{\max} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_{\max} \end{bmatrix}, \quad U_{\min} = \begin{bmatrix} u_{\min} \\ u_{\min} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_{\min} \end{bmatrix}$$

olmak üzere

$$\begin{cases} \bar{M} \leq \bar{L} \hat{X}_p(k+p) \leq \bar{N} \\ U(k+m) \leq U_{\max} \\ -U(k+m) \leq U_{\min} \end{cases} \quad (6.21)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitsizlikler matris formunda yazılırsa,

$$\Omega U(k+m) \leq T \quad (6.22)$$

$$\Omega = [\bar{L} \bar{B} \quad -\bar{L} \bar{B} \quad I \quad -I]^T \quad (6.23)$$

$$T = \begin{bmatrix} \bar{N} - \bar{L}\bar{G}W(k+p) - \bar{L}\bar{A}x(k) - \bar{L}\bar{H}e_x(k) \\ \bar{M} + \bar{L}\bar{G}W(k+p) + \bar{L}\bar{A}x(k) + \bar{L}\bar{H}e_x(k) \\ U_{maks} \\ -U_{min} \end{bmatrix}^T \quad (6.24)$$

elde edilir.

Buna göre (6.3) ve (6.4) denklemleri ile ifade edilen sistemi, model öngörülü kontrol problemi çerçevesinde

$$\min \{U(k+m)^T KU(k+m) + 2SU(k+m)\} \quad (6.25)$$

bedel fonksiyonunun

$$\Omega U(k+m) \leq T \quad (6.26)$$

kısıtları altında çözülmesi ile elde edilecektir. Bedel fonksiyonunun optimize edilmesinde kuadratik programlama kullanılacaktır.

6.1.2 Adaptif seyir sistemi için model öngörülü kontrol yapısı

Yukarıda bahsedilen kontrol çözümü, Adaptif Seyir Sistemi problemi için özelleştirilerek sonuçlar elde edilecektir. Bu çözümleme sırasında, öncelikle kontrol sistemi tahmin modeline benzer lineer bir model üzerinde sınanacak, ardından geliştirilen model, ileriki bölümde bahsedilen nonlinear model için tekrar dizayn edilecektir.

Burada lineer model ile ifade edilen, ASS aracındaki sensör sistemi ile direk ölçülebilen ya da ölçülen değerlerden türetilen değişkenlerden meydana gelen araçlar arası mesafe-hız değerlerini verecek sistemdir.

ASS yapısında, araçlar arası mesafenin, bir başka deyişle istenen mesafe ASS aracının hızı ve araçlar arası istenen zaman farkı cinsinden ifade edilmektedir. Sabit takip zaman aralığı (Constant Time Headway) denen bu ifade aşağıdaki şekilde gösterilebilir [116]:

$$\Delta s_{des}(k) = d_0 + t_h v(k) \quad (6.27)$$

Bu ifadede, d_0 güvenli durma mesafesi, yani hızların sıfır olması durumunda araçlar arası mesafe, t_h araçlar arası zaman farkı, $v(k)$ ASS aracının k anındaki hızı ve $\Delta s_{des}(k)$ k anındaki istenen araçlar arası mesafeyi ifade etmektedir. Ayrıca takip mesafesi hatası ve bağıl hız değerleri de,

$$\delta(k) = \Delta s - \Delta s_{des}(k) \quad (6.28)$$

ve

$$v_e(k) = v_1(k) - v(k) \quad (6.29)$$

şeklinde bulunur. Burada, $\Delta s(k)$ k anında araçlar arası mesafe, $v_1(k)$ k anındaki takip edilen aracın hızı ve $v_e(k)$ k anındaki bağıl hızı ifade etmektedir.

Jerk ivmenin türevi olup, boylamsal araç dinamiğinde konfor unsurunun önemli bir parametresidir. Sistemde ASS aracına ait jerk değeri,

$$j(k) = \frac{a(k) - a(k-1)}{T_s} \quad (6.30)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadede $a(k)$ ASS aracının k anındaki ivmesini, T_s ayrık zaman örnekleme zamanını, $j(k)$ ise ASS aracının k anındaki jerk değerini vermektedir.

Son olarak, araç ivmesi ile kontrol girişi arasında birinci dereceden bir dinamik denklem kurulmuştur. Bu ifadede, giriş sinyali ile aracın ivme olarak cevabı arasındaki ilişki bir zaman sabiti ile elde edilir:

$$\tau \frac{d\ddot{s}}{dt} + \ddot{s}(t) = u(t) \quad (6.31)$$

Bu denklemde, s ASS aracının aldığı mesafe, $\dot{s}$, ASS aracının hızını ve $\ddot{s}$ ise ASS aracının hızını ifade etmektedir. (82) denkleminin ayrık zaman modeli şu şekilde yazılabilir:

$$a(k+1) = (1 - \frac{T_s}{\tau})a(k) + \frac{T_s}{\tau}u(k) \quad (6.32)$$

Burada τ yukarıda bahsi geçen zaman sabitidir. Sistemin durum vektörü,

$$x(k) = [\Delta s(k), v(k), v_e(k), a(k), j(k)]^T \quad (6.33)$$

'dür.

$$\Delta s(k+1) = \Delta s(k) + T_s v(k) + \frac{1}{2} T_s^2 (a_1(k) - a(k)) \quad (6.34)$$

Burada $a_1(k)$, ön araç ivmesini ifade eder. Bu değer ölçülebilen bir büyüklük olmadığından, sistemde bozucu etken olarak değerlendirilecek ve tahmini bir model üzerinden elde edilecektir. Diğer durumlara ilişkin denklemlerde basit dinamik ifadeler ile aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$v(k+1) = v(k) + T_s a(k) \quad (6.35)$$

$$v_e(k+1) = v_e(k) - T_s a(k) + T_s a_1(k) \quad (6.36)$$

$$a(k+1) = \left(1 - \frac{T_s}{\tau}\right) a(k) + \frac{T_s}{\tau} u(k) \quad (6.37)$$

$$j(k+1) = -\frac{1}{\tau} a(k) + \frac{1}{\tau} u \quad (6.38)$$

Çıkış vektörü ise, $y(k) = [\delta(k), v_e(k), a(k), j(k)]^T$ olduğundan sistemin ayrık durum uzay modeli,

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Gw(k) \quad (6.39)$$

$$y(k) = Cx(k) - Z \quad (6.40)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_s & -\frac{1}{2}T_s^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -T_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T_s}{\tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{T_s}{\tau} \\ \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T_s^2 \\ 0 \\ T_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & -t_h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Z = \begin{bmatrix} d_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Yukarıda da belirtildiği üzere, takip edilen aracın ivmesi sistemde bozucu etken olarak tanımlanmıştır.

$$\hat{w}(k-1|k) = \frac{v_e(k) - v_e(k-1)}{T_s} + a(k-1) \quad (6.41)$$

$$w(k) = \hat{w}(k-1|k) \quad (6.42)$$

Bu denklemlere göre, k anında, $k-1$ anına ait ivme, rölatif hızlar ve ASS aracı ivmesi aracılığı ile hesaplanmaktadır. $k-1$ anına ait ivme değeri, basit bir kabul ile, k anında da aynı değere sahiptir. Bununla beraber, hesaplanan bu değer, tahmin ufku boyunca da sabit olduğu kabul edilmektedir.

$$w(k+i) = w(k), \quad i = 12, \dots, p-1 \quad (6.43)$$

Sistem bedel fonksiyonu oluşturmadan önce, sistem hedeflerini belirlenmelidir. Sistemin iki hedefi, araçlar arası istenen mesafe ile gerçek mesafe arası hatanın ve bağıl hızın sıfır olmasıdır. Yani,

$$k \rightarrow \infty \text{ iken } \delta(k) \rightarrow 0, v_e(k) \rightarrow 0$$

Bunun dışında sistem ait bazı kısıt denklemleri de bulunmaktadır. Bu kısıtlar, gerek yakıt tüketimini azaltıcak ve konfor koşullarını oluşturacak, hız, ivme ve jerk değerlerinin belirli değerler arasında kalmasıdır. Ayrıca, kontrol sinyalinin de belirli değerler arasında kalması beklenmektedir. Son olarak da, araçlar arası mesafenin de güvenli durma mesafesinden büyük olması beklenmektedir.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta s(k) \geq d_s \\ v_{\min} \leq v(k) \leq v_{\max} \\ a_{\min} \leq a(k) \leq a_{\max} \\ j_{\min} \leq j(k) \leq j_{\max} \\ u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \end{array} \right. \quad (6.44)$$

Bedel fonksiyonu yeni sistem dahilinde tekrar şu şekilde ifade edilmektedir. Burada, çıkış fonksiyonunda yer alan Z terimi, bedel fonksiyonunda yerini almaktadır.

$$\begin{aligned} J = & U(k+m)^T (\bar{R} + \bar{D}^T \bar{Q} \bar{D}) U(k+m) \\ & + 2 \{ \chi(k)^T [\bar{C}^T - \bar{C}^T \bar{\Phi}^T] \bar{Q} \bar{D} + W(k+p)^T \bar{E}^T \bar{Q} \bar{D} - (\bar{Z}^T - \bar{Z}^T \bar{\Phi}^T) \bar{Q} \bar{D} + e_y(k)^T \bar{F}^T \bar{Q} \bar{D} \} U(k+m) \end{aligned} \quad (6.45)$$

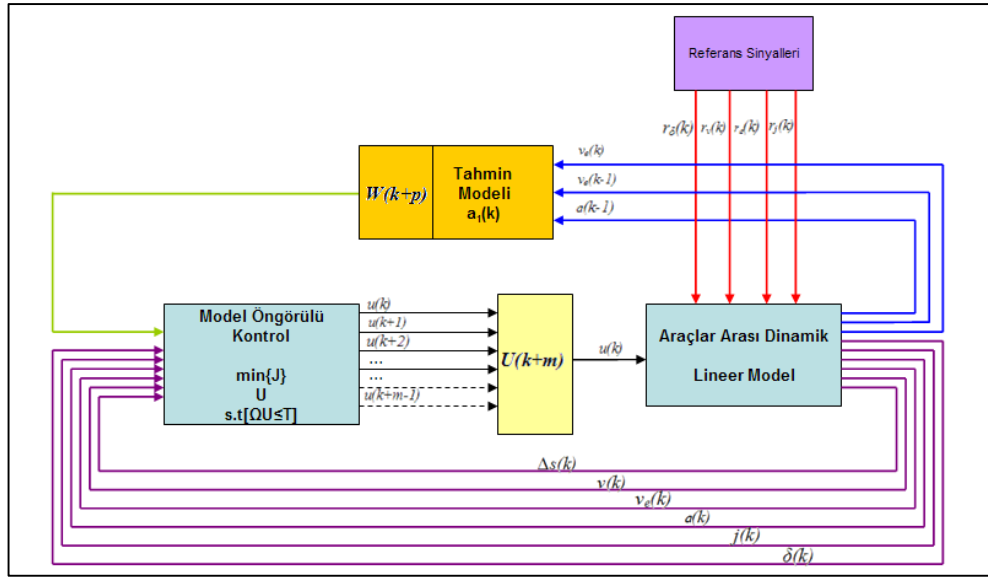
Yukarıdaki bedel fonksiyonu daha sonra kuadratik programlama optimize edilmektedir. Optimizasyon işleminin sonucunda, (97) ifadesi ile de gösterilmekte olan, kontrol ufku süresince ($-m$ boyutlu vektör) uygulanması gereken kontrol sinyali elde edilir. Bu ifadedeki, k anına ilişkin kontrol sinyali, $u(k)$, sisteme uygulanır. Daha

sonra $k+1$ anına geçilerek optimizasyon işlemi tekrarlanarak, yeni optimal kontrol sinyalleri serisi oluşturulur.

$$U(k+m) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+m-1) \end{bmatrix} \quad (6.46)$$

6.1.3 Lineer model simülasyonu için kontrol yapısı

Lineer model şeklinde sözü geçen sistem, yukarıda ifade edilen kontrolcünün tahmin için kullandığı modelin aynısı olup, çeşitli simülasyonlar dahilinde, referans ve başlangıç değerleri, yani takip edilen araca ait değerler değiştirilerek çeşitli simülasyon sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 6.2 : Lineer model simülasyonu için kontrol yapısı.

Şekil 6.2’de kontrol sisteminin genel yapısı görülmektedir. Model Öngörülü Kontrol sistemi, her k anında kuadratik programlama ile optimizasyon yapan kontrolcüye, lineer modelden sistem durumları ve sistem çıkışları geri beslenmektedir. Kontrolcünün ihtiyaç duyduğu bir diğer sinyalde ön aracın ivme değeri olup, bu sinyal kontrolcüye bozucu etken olarak, tahmin modeli üzerinden beslenmektedir. Kontrol sisteminin her hesap adımında, elde ettiği kontrol ufku boyutundaki kontrol sinyalleri serisinden sadece k anına ait kontrol sinyali sisteme etkimektedir.

6.1.4 Model öngörülü kontrolcünün lineer model üzerindeki simülasyon sonuçları

İlk simülasyon, öndeki aracın sabit hızla gittiği, arkadaki aracın belirli bir mesafeden hedef araca yaklaşıp, istenen takip mesafesi ve istenen takip hızını elde ettiği durumu göstermektedir. Simülasyonlarda ortak olarak kullanılan nümerik değerler Çizelge 6.1’de görülmektedir.

Çizelge 6.1 : Simülasyonlarda kullanılan ASS aracı ve kontrolcüsü parametreleri.

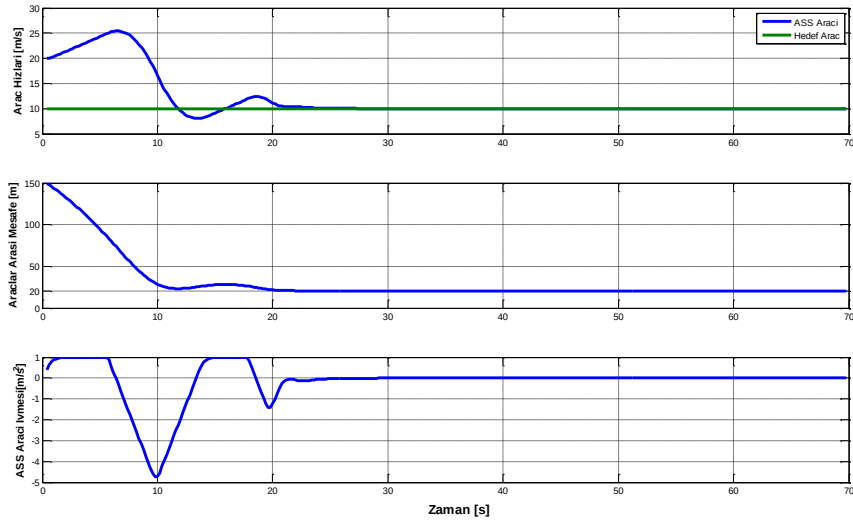
Parametre	Gösterim	Nüm. Değer	Parametre	Gösterim	Nüm. Değer
Simülasyon Adımı	T_s	0.2 s	Maks. kontrol sinyali	u_{maks}	1 m/s ²
Takip Zamanı	t_h	1.5 s	Min. jerk	j_{min}	-2 m/s ³
Dinamik Model Zaman Sabiti	τ	0.5 s	Maks. jerk	j_{maks}	2 m/s ³
Güvenli Durma Mesafesi	d_0	5 m	Kontrol Ufku Boyutu	m	20
Maks . hız	v_{min}	0 m/s	Tahmin Ufku Boyutu	p	10
Maks . hız	v_{maks}	100 m/s	Hata Geri Besleme Matrisi (durum vektörü için)	H	0.01 x I _{5x5}
Min. ivme	a_{min}	-5 m/s ²	Hata Geri Besleme Matrisi (çıkış vektörü için)	F	0.01 x I _{4x4}
Maks. ivme	a_{maks}	1 m/s ²	Bedel Fonk. Ağırlık Matrisi (referans takibi için)	Q	$Q = \begin{bmatrix} 5 & & & \\ & 10 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix}$
Min. kontrol sinyali	u_{min}	-5 m/s ²	Bedel Fonk. Ağırlık Matrisi (kontrol sinyali için)	R	1

Çizelge 6.2’de ise ilk simülasyondaki başlangıç koşulları verilmektedir.

Çizelge 6.2 : ASS simülasyon başlangıç koşulları.

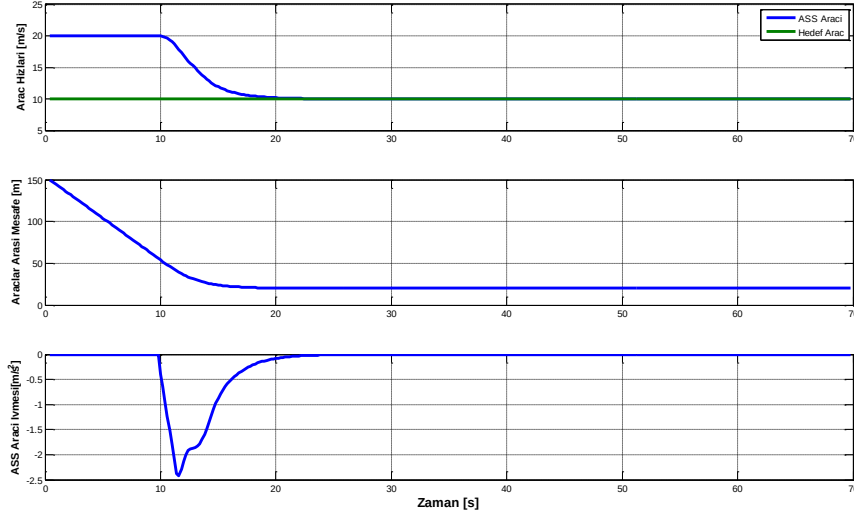
Parametre	Gösterim	Nüm. Değer	Parametre	Gösterim	Nüm. Değer
Araçlar Arası Başlangıç Mesafesi	$\Delta_s(0)$	150 m	ASS aracı için Başlangıç hızı	$v(0)$	20 m/s
Hedef araç için Başlangıç hızı	$v_I(0)$	10 m/s	ASS aracı için Başlangıç ivmesi	$a(0)$	0 m/s ²
ASS aracı için Başlangıç jerki	$j(0)$	0 m/s ³	Simülasyon Zamanı	T	70 s

Şekil 6.3’ de Tablo 4’de görülmekte olan simülasyon sonuçları görülmektedir.



Şekil 6.3 : Sabit hızlı hedef araç durumunda takip senaryosu.

Sonuçlara göre, 20 m/s ile simülasyona başlayan araç, 20. saniye civarında öndeki araç ile aynı hıza gelmekte ve araçlar arası mesafe $\Delta s = t_h \times v_I + d_0 = 1.5 \times 10 + 5 = 20 \text{ m}$ ’ ye gelmektedir. ASS aracının ivmesi, limitler dahilinde kalmıştır. Aracın ilk anlarda mesafeyi kapatmak için yaptığı hızlanma manevrası, aracın ilk hızının aşılmasına sebep olmuştur. Bu durumun önüne geçmek için, maksimum ivme limiti, a_{maks} sıfır değerine getirilebilir. Bu durumdaki simülasyon sonucu Şekil 6.4’de görülmektedir.



Şekil 6.4 : $a_{maks} = 0 \text{ m/s}^2$ için simülasyon sonucu.

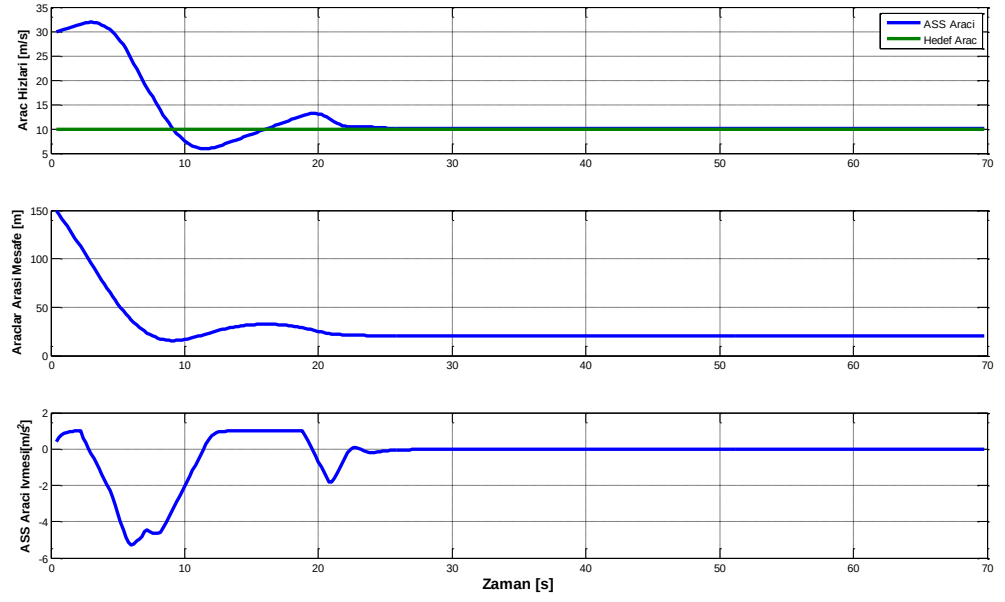
Bu durumda elde edilen ASS aracı hızı daha yumuşak bir yörünge izlemekte ve performans hedefleri de yerini bulmaktadır. İlk simülasyonda olduğu gibi kontrol sinyali istenen limitler dahilinde kalmıştır. Bu şekilde elde edilen yörünge daha kapsamlı bir çalışma için yakıt tüketimi anlamında daha olumlu bir sonuç vermesi beklenebilir.

Bir başka simülasyonda daha agresif başlangıç koşulu ile ASS aracının ilk hızı artırılarak $v(0) = 30 \text{ m/s}$ kullanılmıştır. Burada tekrar ivme limitleri ilk simülasyonda kullanılan limitlere getirilmiştir. Simülasyon sonucu Şekil 6.5’de görülmektedir.

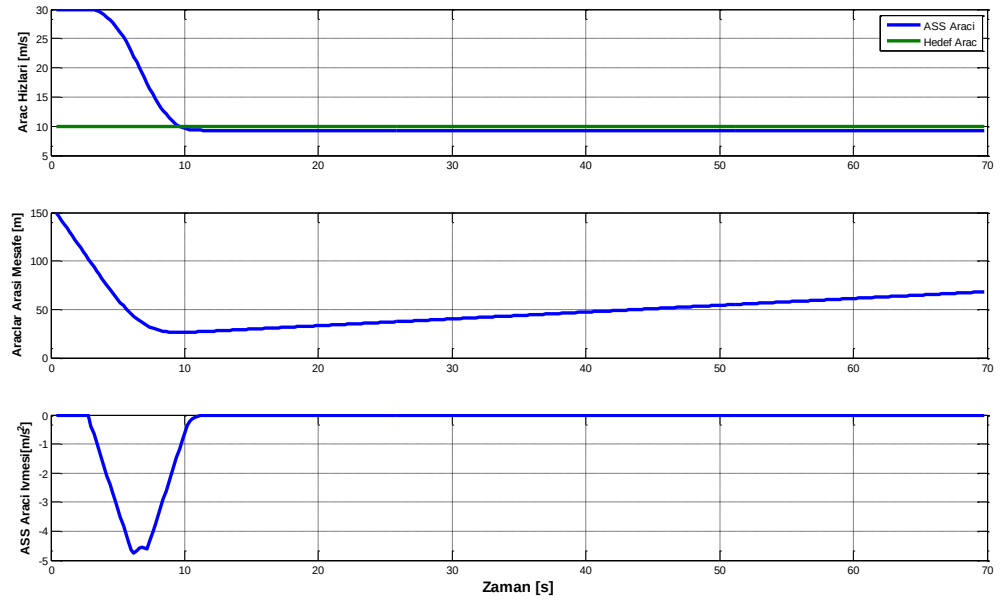
Bu durumda da, performans hedefleri gerçekleştirilmiş ve ASS aracı istenen hıza, istenen takip mesafesinde gelmiştir. Kontrol sinyali, başlangıç anındaki bağıl hız büyüklüğü nedeni ile, ilk simülasyon sonucuna göre daha agresif değerler oluşturmuştur.

Başlangıç anında ASS aracının aşımını engellemek için, yukarıdaki gibi ASS aracı maksimum ivme değeri, $a_{maks} = 0$, olarak alındığında elde edilen simülasyon sonucu Şekil 6.6’de görülmektedir.

Bu durumda, ASS aracını her ne kadar düzgün ve yumuşak bir yavaşlama profili izlese de, ilk anda hedef aracı hızını yakalayamayıp, küçük bir bağıl hız farkı oluşmasına neden olduğundan, bu fark kalıcı rejim hatası olarak devam etmektedir. Zira, bu hatanın kapanmasını sağlayacak pozitif bir kontrol sinyali oluşturulması mümkün değildir. Bu nedenle araçlar arası mesafe, istenenin aksine, zamanla artmaktadır.

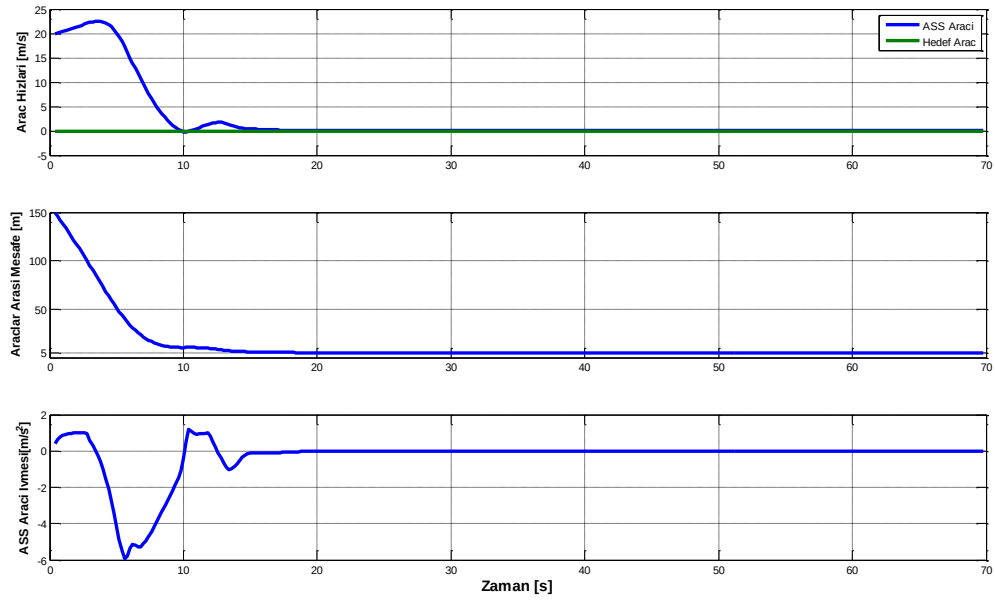


Şekil 6.5 : $v(0) = 30$ m/s sabit hedef araç hızı için simülasyon sonuçları.



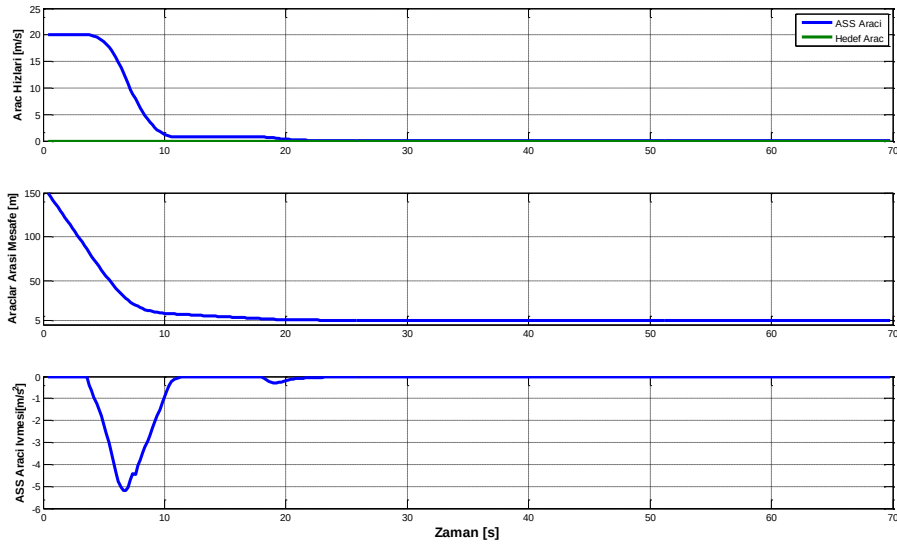
Şekil 6.6 : $v(0) = 30$ m/s sabit hedef araç hızı ve $a_{maks} = 0$ için simülasyon sonuçları.

Bir başka simülasyon hedef araç hızının başlangıç anında $v_I(0) = 0$ m/s, olması durumudur. Öndeki aracın durma anını ifade eden bu durum için simülasyon sonucu Şekil 6.7’ de görülmektedir.



Şekil 6.7 : $v(0) = 20$ m/s sabit hedef arac hızı ve $v_I(0) = 0$ için simülasyon sonuçları.

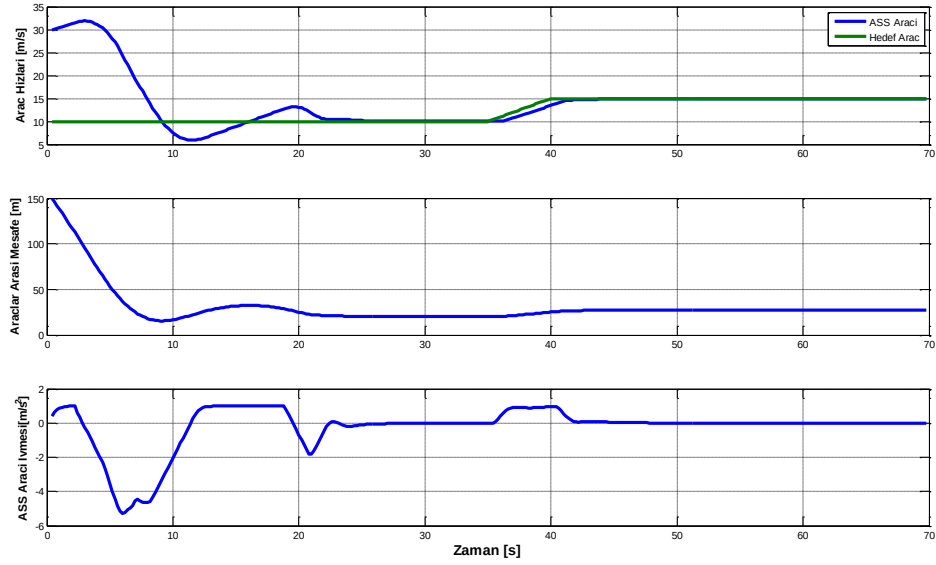
Bu simülasyondaki durumda, araç güvenli durma mesafesi olan $\Delta s = t_h \times v_I + d_0 = 1.5 \times 0 + 5 = 5$ m’de durmayı başarmıştır. Aynı simülasyon maksimum ivme limiti sıfırlanarak tekrarlandığında Şekil 6.8’deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6.8 : $v(0) = 20$ m/s sabit hedef araç hızı, $v_I(0) = 0$ ve $a_{maks} = 0$ için simülasyon sonuçları.

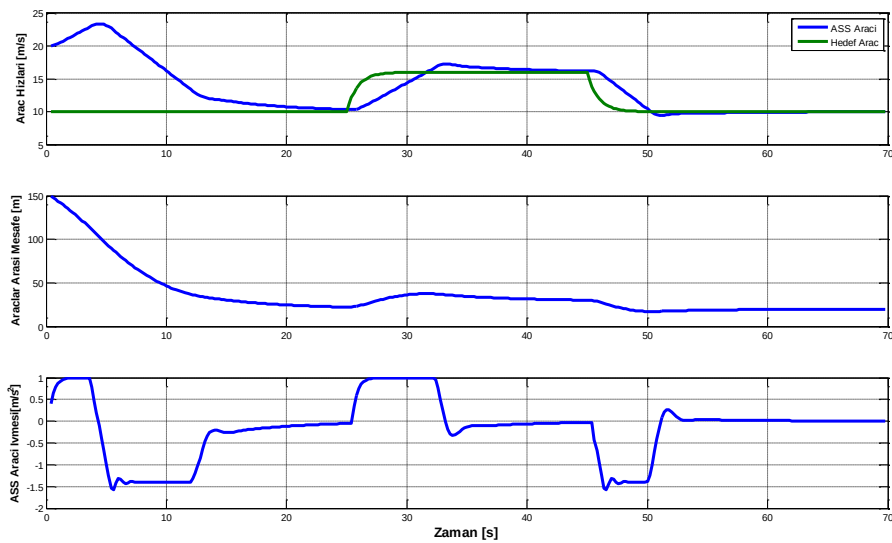
Bu simülasyonda da istenen mesafede ASS aracı istenen performans hedeflerini gerçekleştirmiştir. Şekil 6.9’ de ise hedef araç takip sırasında hızlanarak, değişken bir

hız profili izlemektedir. Hedef araç yukarıdakine benzer bir şekilde sabit hızla seyredirken 35.s’de hızlanarak, hızını 15 m/s’ye çıkarmaktadır.



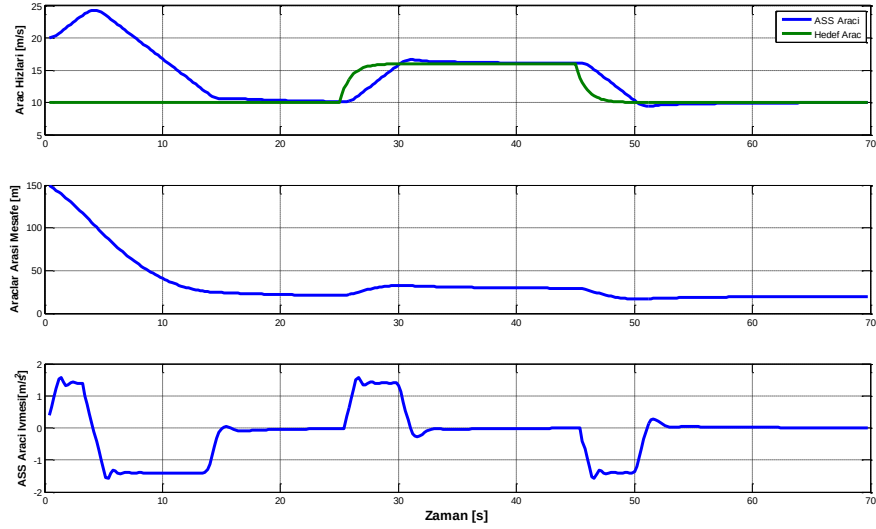
Şekil 6.9 : $v(0) = 30$ m/s için ve hedef aracın hızlanma profili izlediği durum simülasyonu.

ASS aracı istenen performans hedefini hızlanma durumunda da gerçekleştirilmiştir. Takip mesafesi, hedef aracın hızlanması ile artmıştır. Son olarak da hedef aracın hızı, sabit, ivmelenme ve yavaşlama şeklinde üç farklı bölüm oluşturacak şekilde simüle edilmiştir. Bu duruma ait simülasyon sonucu Şekil 6.10’da görülmektedir. ASS aracı performans hedeflerini yerine getirirken, kontrol sinyali belirtilen limitler içerisinde kalmıştır.



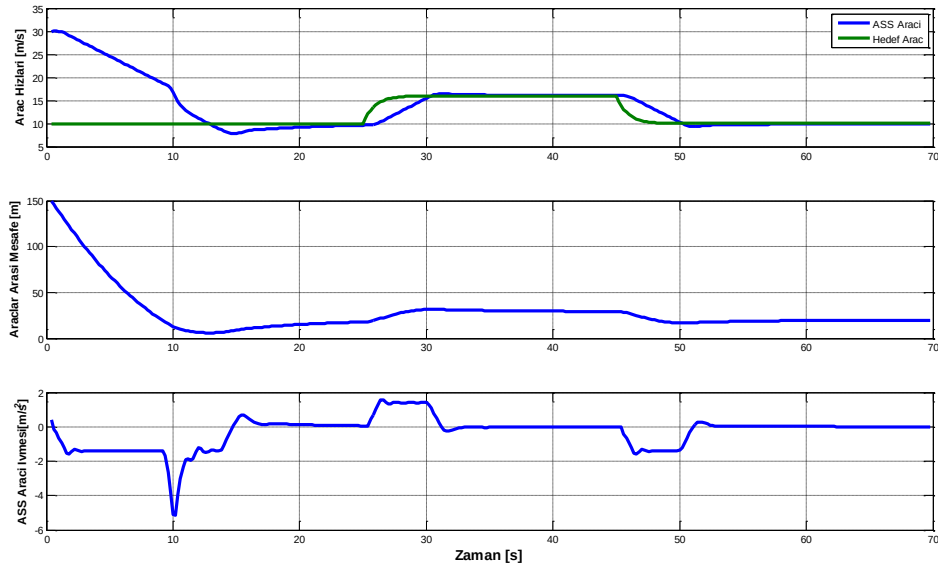
Şekil 6.10 : $v(0) = 20$ m/s için ve hedef aracın hızlanma ve yavaşlama profili izlediği durum simülasyonu.

Bu simülasyonda hedef aracın hızlanma ivmesi, ASS aracı ivme limitlerinden fazla olduğundan, hızlanma durumlarında takip yeterince uyumlu olmamıştır. Bu nedenle ASS aracı ivme limiti $a_{maks} = 2 \text{ m/s}^2$ 'ye getirilerek simülasyon tekrarlanmış ve Şekil 6.11'deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6.11 : – $v(0) = 20 \text{ m/s}$ ve $a_{maks} = 2 \text{ m/s}^2$ için ve hedef aracın hızlanma ve yavaşlama profili izlediği durum simülasyonu.

Başlangıç ASS aracı hızı $v(0) = 30 \text{ m/s}$ için de simülasyon tekrarlanırsa, performans hedeflerinin elde edildiği görülür. Sonuçlar Şekil 6.12’de sunulmuştur.



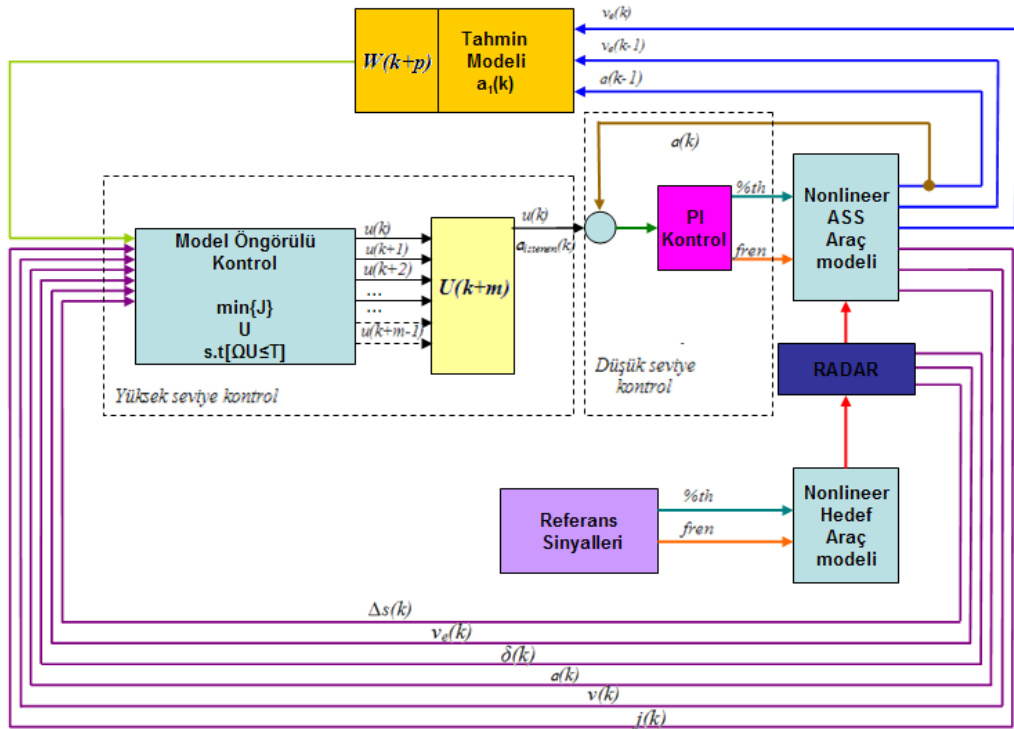
Şekil 6.12 : – $v(0) = 30 \text{ m/s}$ ve $a_{maks} = 2 \text{ m/s}^2$ için ve hedef aracın hızlanma ve yavaşlama profili izlediği durum simülasyonu.

6.1.5 Model öngörülü kontrolcünün nonlinear model üzerindeki simülasyon sonuçları

Lineer model üzerinde uygulanan kontrol yapısının, nonlinear model üzerinde test edilmesi kontrol yapısında bazı değişikliklerin yapılmasını gerektirmektedir. Bu değişikliklerin temelinde, Model Öngörülü Kontrolcünün ürettiği kontrol sinyalin, bir ivme değeri olmasıdır. Oysa, nonlinear model girişleri boylamsal dinamikte, gaz pedalı veya fren pedalı konumu ile yanal dinamikte direksiyon açısıdır. Bu nedenle, kontrol sistemi nonlinear modele, ASS problemi çerçevesinde uygulanırken, kontrol yapısında bazı değişiklikler uygulamak gerekmektedir.

6.1.6 Nonlinear model simülasyonu için kontrol yapısı

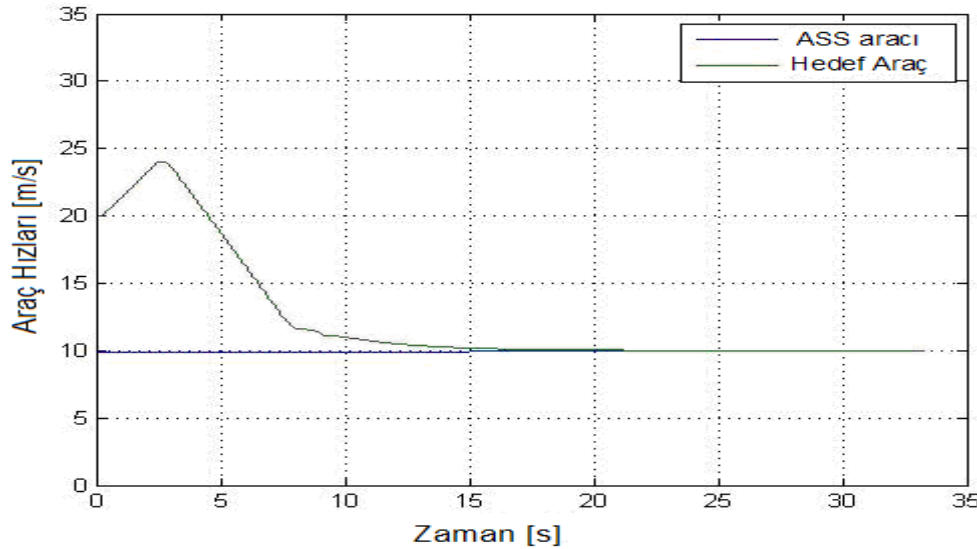
Şekil 6.13’ de kontrol sistemi yapısı görülmektedir. Yukarıda bahsedilen lineer model, araçlar arası dinamiği içeren ve kontrol çıkışı olan $a(k)$ ’nın sisteme direk olarak uygulanabilmesinin mümkün olduğu bir yapıdır. Nonlinear modelde ise araçlar arası dinamik model, bağımsız iki araç modelinin davranışları çerçevesinde doğal olarak kendiliğinden ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, ASS aracının girişleri, boylamsal dinamikte, gaz pedalı ve fren sinyalleridir.



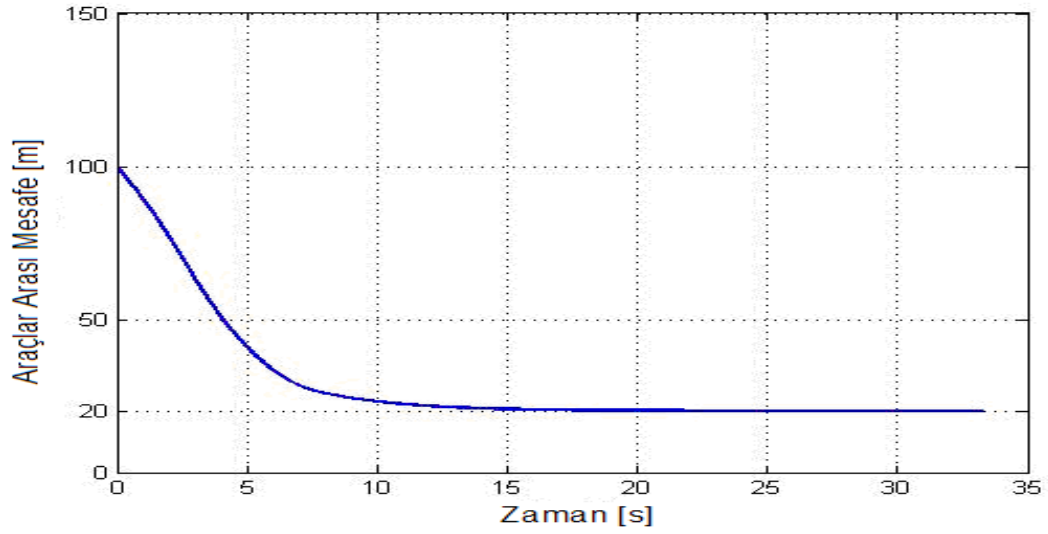
Şekil 6.13 : Nonlinear araç modelinin kullanıldığı simülasyon ortamı yapısı.

Bu nedenle, kontrol yapısı hiyerarşik bir yapı içerisinde yüksek ve düşük seviye kontrol olarak ikiye ayrılmıştır. Yüksek seviyede, araçlar arası dinamikten durum bilgileri alan Model Öngörülü Kontrol yapısı yer alır. Bu durumlardan bir kısmı ASS aracına ait bilgiler olduğundan modelin kendisinden gelmektedir. Bir diğer kısmı ise, araçlar arası mesafe ve bağıl hız ölçümün gerçekleştiren radar üzerinden kontrolcüye geri beslenmektedir. Lineer modelli simülasyonlarda olduğu üzere, hedef araç ivmesi de bir tahmin modeli üzerinden kontrolcüye gönderilmektedir. Kontrolcünün çıkışı, ASS aracının ilgili manevrayı yapabilmek için gerekli ivmedir. Bu ivme değeri, ASS aracında istenen ivme $a_{istenen}(k)$ olarak değerlendirilmektedir. Alt seviye kontrolcüsü ise bu değerini ASS aracı tarafından sağlanmasını garantiler. Bu çerçevede ASS aracının gerçek ivmesi ve istenen ivme kullanılarak bir PI kontrol yapısı ile gaz pedalı açıklığı ya da pedal sinyali olarak modele iletilir.

Şekil 6.14'te $v(0) = 20$ m/s ve $v_I(0) = 10$ m/s başlangıç koşulları için simülasyon sonuçları görülmektedir. Simülasyon boyunca, hedef araç sabit $v_I(0) = 10$ m/s hızla devam ederken, ASS aracı, öncelikle araçlar arası mesafeyi kapatmak için hızlanmakta daha sonra da, hedef araç hızını yakalayabilmek için yavaşlamaktadır. Şekil 6.15' de, araçlar arası mesafenin değişimi görülmektedir. İstenen araçlar arası mesafe simülasyon sonunda elde edilmiştir.



Şekil 6.14 : $v(0) = 20$ m/s ve $v_I(0) = 10$ m/s nonlinear model için simülasyon sonucu – araç hızları.

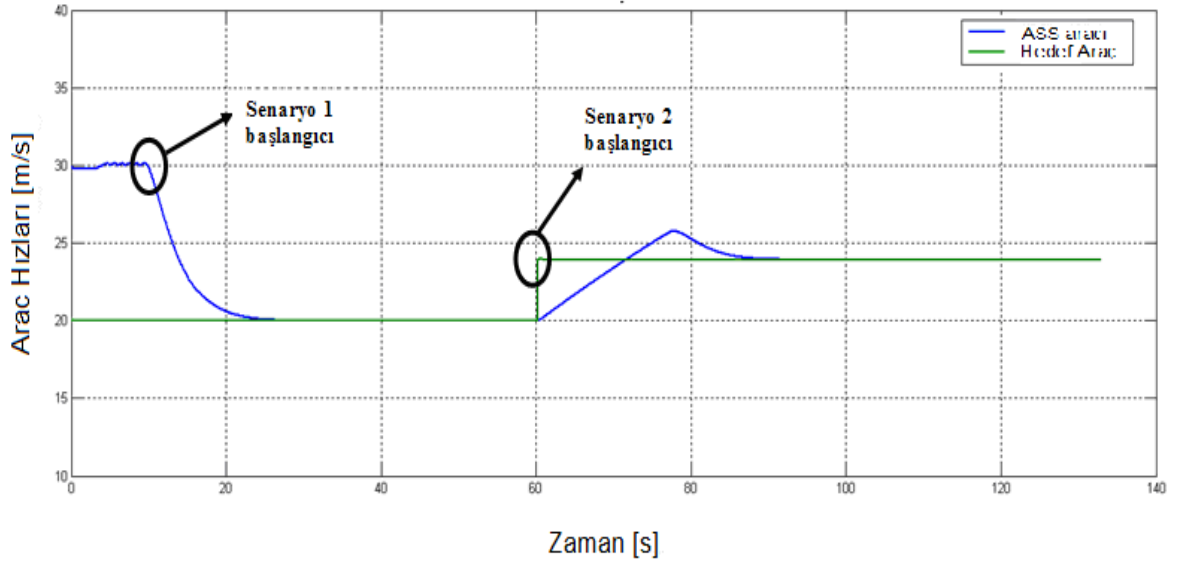


Şekil 6.15 : $v(0) = 20$ m/s ve $v_I(0) = 10$ m/s nonlinear model için simülasyon sonucu – araçlar arası mesafe.

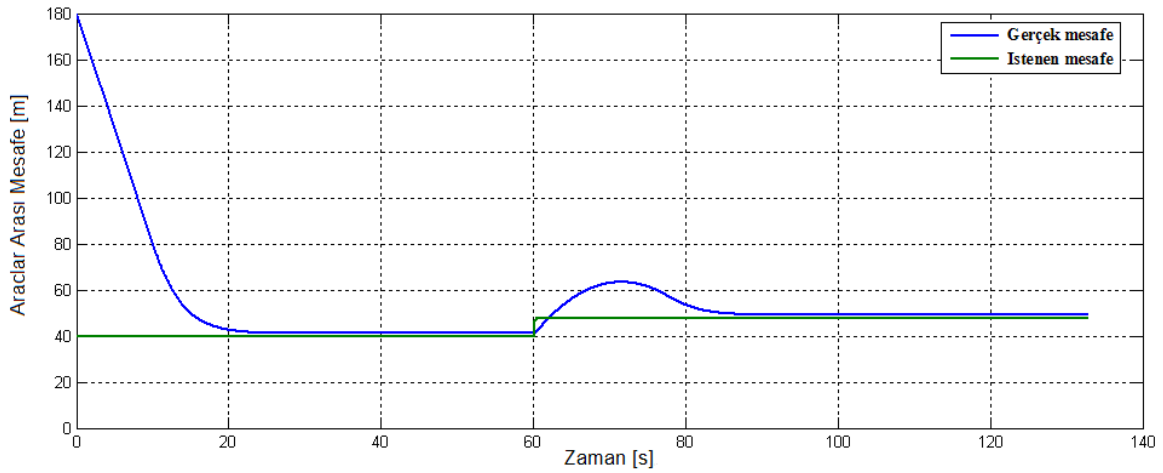
Simülasyon sonuçlarından görüldüğü üzere, ASS aracının manevrası yaklaşık 18 saniye sürmüştür.

İstenen ivme ve gerçek ivme değerlerinden, görüldüğü üzere, alt seviye kontrol, üst seviye tarafından üretilen kontrol sinyalinin başarı ile takip edilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte, ivme değerleri istenen değerler arasında kaldığı da görülmektedir.

ASS aracının simülasyonun başında gerçekleştirdiği hızlanma hareketinin engellenmesi için, nonlinear modelde model öngörülü kontrol ivme limitlerinin değiştirilmesi yerine, bir mantık algoritması yerleştirilmiştir. Buna göre, herhangi bir takip senaryosunda, eğer ilk hızının üstüne çıkmak ister ise, üst seviye kontrol sinyalini göz ardı edecek bir mantık bloğu modele eklenmiştir. Buna göre, takip sırasında, aracın, hedef aracı tespit ettiği andaki hızının üstüne çıkaracak pozitif bir ivme sinyali yok sayılmaktadır. Şekil 6.16’ da bu şekilde gerçekleştirilmiş simülasyon sonucu görülmektedir. Aynı zamanda bu senaryoda hedef araç 60.saniyede anında $v_I(60+T) = 24$ m/s’ ye olacak şekilde hızlandırılmıştır. Senaryo 1 $v_I = 20$ m/s olan bölümü, Senaryo 2’de $v_I = 24$ m/s olan bölümü ifade etmektedir. Şekil 34’de ise araçlar arası mesafenin değişimi hızlara göre belirlenen istenen mesafe ile birlikte görülmektedir.



Şekil 6.16 : $v(0) = 30$ m/s ve $v_I(0) = 20$ m/s - $v_I(60) = 24$ m/s başlangıç koşulları için nonlinear model simülasyon sonucu – araç hızları.



Şekil 6.17 : $v(0) = 30$ m/s ve $v_I(0) = 20$ m/s - $v_I(60) = 24$ m/s başlangıç koşulları için nonlinear model simülasyon sonucu – araçlar arası istenen ve gerçek mesafeler.

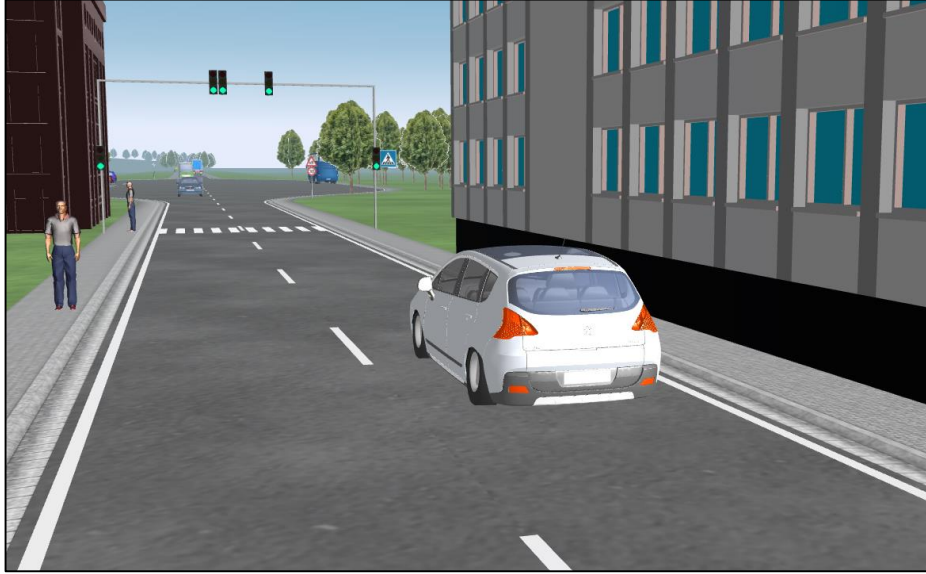
Şekil 6.16 ve Şekil 6.17' de görüldüğü gibi, ASS aracı belirlenen senaryoları başarı ile gerçekleştirmiştir.

Model öngörülü kontrol sisteminin, ASS için bir uygulamasının özetlemiştir. Model öngörülü kontrol sistemi, yapısı itibari ile bu problemin çözümüne uygun yapıda olup, birçok senaryonun çözümünde başarılı sonuç vermiştir. Lineer model ile yapılan çözümlerde, gerek hesaplama süresi olarak daha kısa simülasyon süreleri elde edilmiş, gerekse daha çeşitli senaryoların olumlu sonuç verdiği görülmüştür. Nonlinear model içeren simülasyonlarda ise, simülasyon süreleri oldukça uzun sürmüştür. Bunun yanında, farklı senaryoların denenmesinin önüne geçen çeşitli Simulink hataları ile de

karşılaşmıştır. Bu anlamda, nonlinear modelin yapısının daha basitleştirilmesi, sadece ilgili probleme ilişkin boylamsal dinamiğin göz önünde bulundurulması ve tekerlek modellerinin daha basit modeller ile değiştirilmesi gerekliliği ön görülmektedir.

6.2 Trafik Işık Asistanı

Bu bölümde bir başka araç hız optimizasyon yöntemi olan ve aracın yol üzerinde bulunan çeşitli trafik ışıkları konum, zaman ve durum (yeşil, kırmızı vs.) bilgisi ile aracın anlık ve gelecek enerji durumları göz önünde bulundurularak yapılan Trafik Işığı Asistanı (TIA) - (TLA: Traffic Light Assistant) kontrolcüsü, algoritması, simülasyon ve simülatör uygulamaları ile ilgili çalışmalar aktarılacaktır. Bu bölümde yapılan çalışmalar Avrupa Birliği Komisyonu 7. Çerçeve Programı'nda gerçekleştirilmiş ve 2014 yılında tamamlanmış olan OpEneR: "Optimal Energy consumption and Recovery based on a system network" projesi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir¹⁷. Geliştirilen kontrol algoritmaları proje kapsamında geliştirilen elektrikli bir araç ve güç aktarma organı topolojileri için uygulanmıştır [122].



Şekil 6.18 : Trafik Işığı Asistanı simülasyon uygulaması animasyonu.

Şekil 6.18' de görüldüğü üzere, kapsamlı bir trafik ve yol modeline dayanan TIA, öncelikle simülasyon ortamında geliştirilmiş ardından sırası ile, döngüde yazılım (SiL - Software in the Loop) ve çevrimde sürücü (Hu-iLHuman in the Loop) uygulamaları ve gerçek zamanlı uygulamalar ile de gerçekçi bir ortamda test edilmiştir. Son iki uygulamada yapılan kontrolcüler İnsan Makine Arayüzü (İMA) - (HMI - Human

¹⁷ OpEneR projesi: Grant Agreement no: 285526, EC Seventh Framework Programme FP7-2011-ICT-GC.

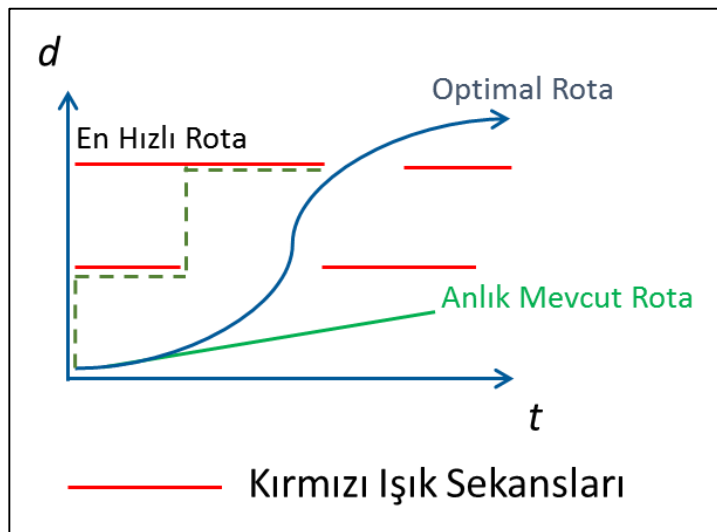
Machine Interface) ile entegre edilerek sürücünün ihtiyaç duyacağı bilgi ve yardım sinyallerinin oluşturulması sağlanmıştır.

TIA, öncelikle aracın elektrik enerji sarfiyatını maksimize etmeye yönelik bir araç hızı optimizasyonuna dayanmaktadır. Gerek aracın kinematik davranışı, gerekse güç aktarma organların hız-tork davranışları göz önüne alınarak yapılan bu optimizasyonunda nihayetinde, trafik ışıklarında gelen zaman-konum-durum bilgileri de yeni kısıtlar olarak değerlendirilmektedir. Böylelikle aracın en hızlı ve enerji optimal şekilde, yol üzerinde bulunan seri trafik ışıklarından oluşan bir seri kavşak üzerinde ilerlemesi sağlanmaktadır. Öte yandan, TIA, optimal davranışı rahatsız eden diğer araç davranışlarını da göz önünde bulundurmakta böylelikle kapsadığı senaryo sayısı da genişletilmektedir.

Kontrol ve optimizasyon yöntemi ASS için de kullanılan Model Öngörülü Kontrol yöntemine dayanmakla beraber problem formülasyonunda farklılıklar bulunmaktadır. Öte yandan iki farklı MÖK algoritması kaskad bir şekilde çalıştırılırken öncelikle yüksek seviyede uygun manevra yolu seçilmekte, alçak seviyede ise, anlık olarak optimizasyon yapılarak optimal yol hız profili uygulanmaktadır.

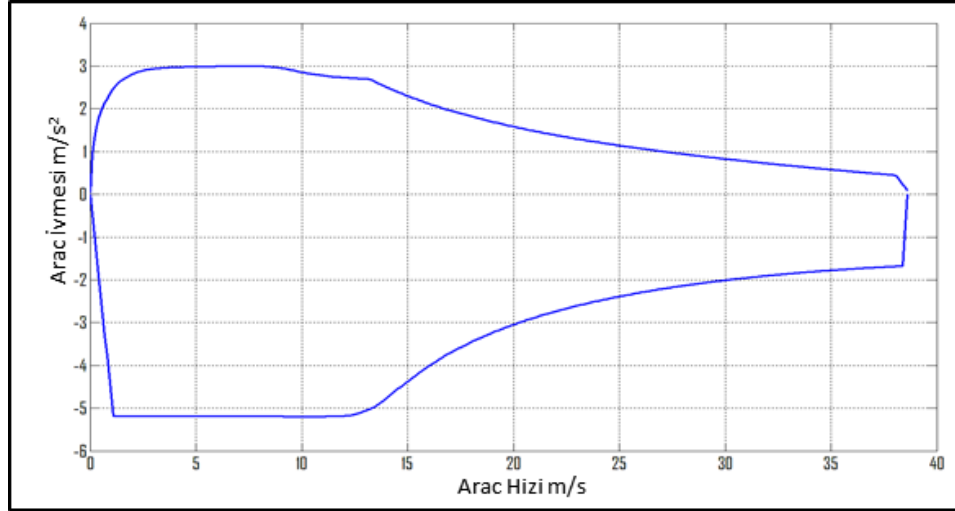
6.2.1 Trafik ışıkları ile kontrol edilen optimal hız problemi

Problemin genel yapısını ifade etmesi açısından Şekil 6.19' de ifade edilen grafik önemlidir. Herhangi bir anda optimalliği test edilmiş bir rota ele alındığında, araç konum-zaman grafiği şeklindeki gibi elde edilecektir. Burada kırmızı ışık sekansları ile belirlenen zaman aralıklarının yanı sıra, aracın yapabileceği en hızlı ve anlık hızının uzantısı da şekilde görülmektedir. Bu bilgiler, ilerideki kısımlarda ifade edilecek MÖK yapısı için kullanılacak kısıtlardan bir kısmını oluşturmaktadır.



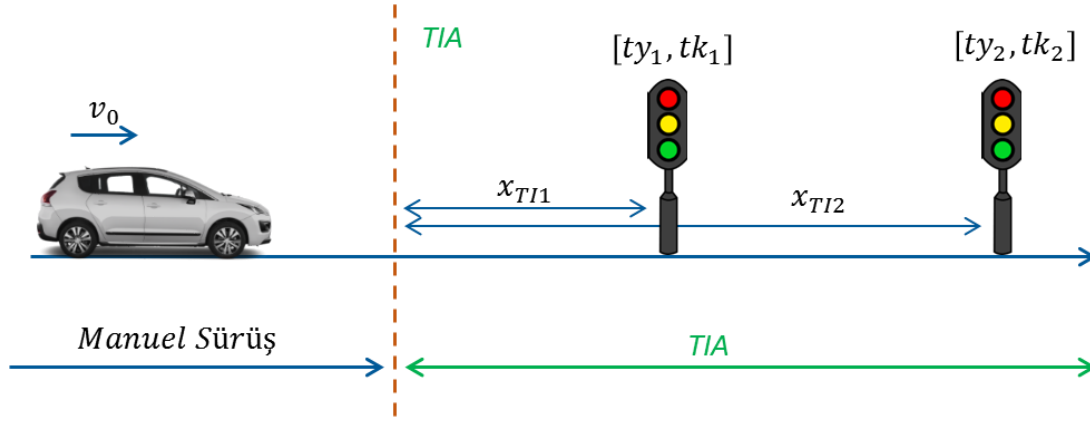
Şekil 6.19 : TIA simülasyon uygulaması animasyonu.

Öte yandan aracın davranışı belirli çerçevelerde aracın kinematik modelinin bir sonucudur. Bu model MÖK kısımda ele alınacaktır. Araç ile ilgili bir başka kısıt ise aracın reküperatif frenleme özelliğidir. Buna göre, aracın tüm manevra boyunca frenleme manevraları için reküperatif ivmelenme sınırlarında kalması suretiyle enerji olarak en verimli manevranın yapılacağı kabul edilmiştir. Kompleks araç modeli ile yapılan simülasyonlar sonucunda, sadece Elektrik Motoru ile aracın maksimum ve minimum ivmelenme kısıtlarının Şekil 6.20’ de olduğu gibi görülmektedir.



Şekil 6.20 : Araç elektrikli sürüş sırasında ivmelenme sınırları.

Şekil 6.21’ de görüldüğü üzere herhangi bir v_0 hızı bir seri trafik ışına yaklaşan sürücü kontrolündeki araç belirli bir mesafede trafik ışıklarından pozisyon bilgisi ve ışık sekanslarının zaman bilgisi alabilmektedir. Bu bilginin Araç Altyapı arasındaki veri aktarımı sayesinde yapıldığı öngörülmektedir (V2V communication). Buna göre, araç üzerinde ilerideki ışıkların pozisyon bilgisi (x_{Tli}) ile yeşil ve kırmızı zaman bilgileri $[ty_1, tk_1]$ gelmektedir. Buna göre, araç en optimal hız profilini hesaplayarak ya sürücüye uygulaması gereken hız bilgisi olarak ya da yarı-boylamsal otonom modda otomatik olarak hesaplanan bu hız bilgisini uygulamaktadır. Daha öncede belirtildiği üzere manevra hesaplaması, öncelikle en uygun Yeşil Dalga hesabı için yüksek seviyeli, uzun ufuklu ve düşük örnekleme zamanlı bir MÖK çalıştırılarak kararlaştırılırken, detaylı hız profili hesabı ve diğer araçlarla ilgili kısıtların değerlendirildiği bir başka MÖK yapısı da algoritmada yer almaktadır.



Şekil 6.21 : TIA için hız optimizasyon problemi.

6.2.2 Trafik ışıkları ile kontrol edilen optimal hız probleminin model öngörülü kontrol yöntemi ile çözümü

Aracın boylamsal dinamik davranışı boylamsal lineer bir denklem ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$v = \frac{dp}{dt} \quad (6.47)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (6.48)$$

p araç boylamsal pozisyonu, v araç boylamsal hızı ve a araç boylamsal ivmesini ifade etmektedir. Öte yandan aracın boylamsal yöndeki tüm ataletini ifade eden bir zaman sabitinden bahsetmek mümkündür. Bu boylamsal dinamik zaman sabiti aslında araca iletilecek bir ivme isteğiyle bu isteğin cevabının alınması arasındaki zaman farkını ifade etmektedir. Öyle ki,

$$a = \frac{K_f}{T_f \cdot s + 1} * a_{des} \quad (6.49)$$

şeklinde birinci dereceden bir denklem ile bu durum ifade edilebilir. Burada bahsi geçen T_f zaman sabitini K_f sistem kazancını ifade etmektedir.

Yukarıdaki sürekli zaman denklemleri durum-uzay formatında yazılırsa,

$$x = [p, v, a] \quad (6.50)$$

durum değişkenleri için,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_f} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_f}{T_f} \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (6.51)$$

olacak şekilde

$$\dot{x} = A.x + B.u \quad (6.52)$$

$$y = C.x \quad (6.53)$$

yazılabilir.

(6.52) ve (6.53) denklemleri ayrıklaştırılırsa,

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d U(k) \quad (6.54)$$

$$y(k) = C_d x(k) \quad (6.55)$$

elde edilebilir. Burada A_d , B_d , ve C_d denklemleri sürekli zaman modelimin ayrık zaman eşleniklerini ifade etmektedir. (6.54) denklemi bir örneklem adımı ötelenir ve bir önceki adıma it ifade yerine yazılırsa,

$$x(k+2) = A_d x(k+1) + B_d U(k+1) \quad (6.56)$$

$$\begin{aligned} x(k+2) &= A_d (A_d x(k) + B_d U(k)) + B_d U(k+1) \\ &= (A_d^2 x(k) + A_d B_d U(k)) + B_d U(k+1) \end{aligned} \quad (6.57)$$

elde edilir. Genelleştirilmiş halleri ile bu denklemler N_t ve N_k uzunluğundaki bir tahmin ve kontrol ufku boyunca,

$$x_{tahmin} = Mx(k) + Nu^* \quad (6.58)$$

$$y^*_{tahmin} = Cx_{tahmin} = Ex(k) + Fu^* \quad (6.59)$$

yazılır. Bu denklemlerde M, N, E ve F matris ve vektörleri ile x_{tahmin} ve y^*_{tahmin} değerleri (6.60-6.65) ifadeleri ile elde edilir. Böylelikle aracın boylamsal davranışı tahmin ufku boyunca elde edilmiş olunur. Ardından bu ifadeler ileriki kısımda görülecek kısıtlar çerçevesinde ve uygulanacak bir bedel fonksiyonu çerçevesinde araca uygulanarak istenen manevranın gerçekleştirilmesi sağlanmış olunur. Şekil 6.22'de optimizasyon algoritmasının fonksiyonel blok diyagramı görülmektedir. Yukarıdaki denklemlerle ifade edilen tahmin modülü ve bir önceki hesap adımında kontrol ufku boyunca, elde edilen optimal giriş optimizasyon algoritmasında kullanılır. Bunun için sistem dinamiği ve trafik ışıklarının ortaya koyduğu kısıtlar göz önünde bulundurularak bedel fonksiyonu minimize edilir. Minimizasyon sonucu elde edilen kontrol girişinin o zaman adımına ilişkin değeri sisteme girilirken, tüm kontrol ufku boyunca olan adımları da bir sonraki adımda durum değişkenleri ve çıkışların tahmin modeli ile kullanılması için tahmin modeline girilir.

$$x^*_{tahmin} = \begin{bmatrix} x(k_i + 1) \\ x(k_i + 2) \\ \dots \\ x(k_i + N_t) \end{bmatrix} \quad (6.60)$$

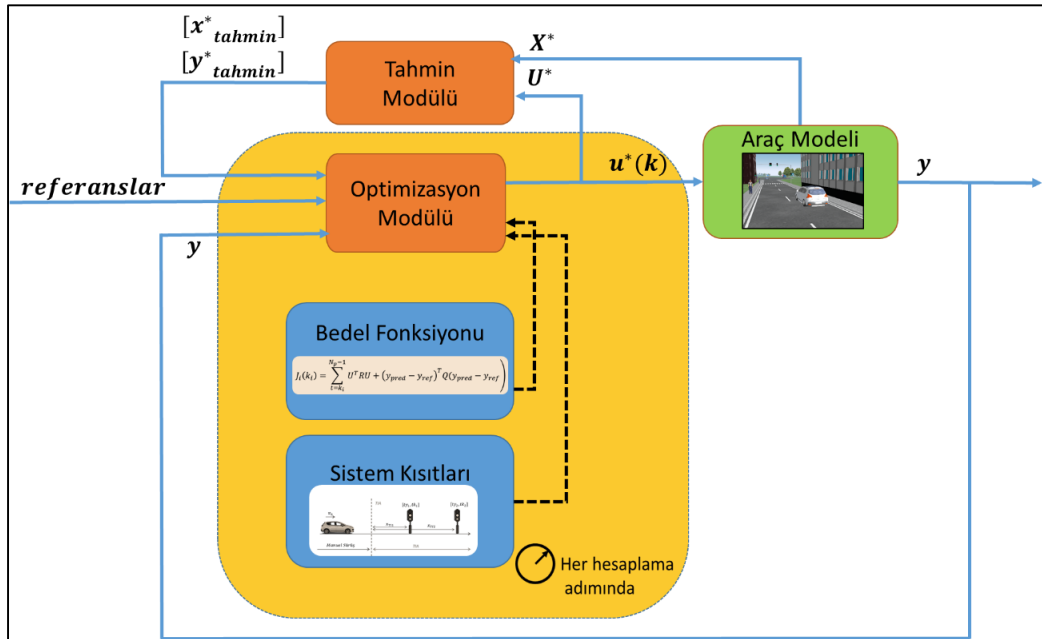
$$u_{opt,prev} = \begin{bmatrix} u(k_i + 1) \\ u(k_i + 2) \\ \dots \\ u(k_i + N_k) \end{bmatrix} \quad (6.61)$$

$$M = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ \dots \\ A^{N_t} \end{bmatrix} \quad (6.62)$$

$$N = \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & 0 \\ AB & B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N_t-1}B & A^{N_t-2}B & \dots & A^{N_t-N_k}B \end{bmatrix} \quad (6.63)$$

$$E = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{N_t} \end{bmatrix} \quad (6.64)$$

$$F = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_t-1}B & CA^{N_t-2}B & \dots & CA^{N_t-N_k}B \end{bmatrix} \quad (6.65)$$



Şekil 6.22 : TIA için fonksiyonel blok diyagramı.

Öncelikle sistemin enerjisini minimize edecek ve istenen referans değerlerine cevabın ulaşılmasını sağlayacak bir bedel fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$J_i(k_i) = \sum_{t=k_i}^{N_t-1} U^T R U + (y_{tahmin} - y_{ref})^T Q (y_{tahmin} - y_{ref}) \quad (6.66)$$

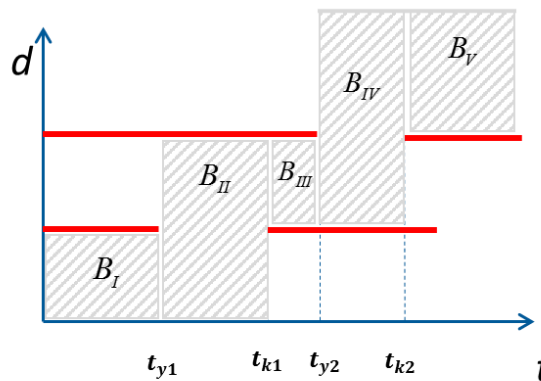
Burada R ve Q sırası ile $N_k \times N_k$ ve $N_t \times N_t$ boyutlu yarı pozitif tanımlı matrisler olup, bedel fonksiyonunda kontrol girişi ile referans takibi arasında ağırlıklandırma için kullanılmaktadır. i indisi optimizasyonun yapıldığı örnekleme zamanını ifade etmektedir.

(6.66) denkleminde sırası ile (6.59) ve (6.58) denklemleri yerleştirilirse

$$J_i(k_i) = \sum_{t=k_i}^{N_t-1} U^T (F^T Q F + R) U + 2(E \cdot x_{tahmin} Q F - y_{ref} \cdot Q F) U + ct. \quad (6.67)$$

şeklini alır. Burada en sondaki sabit terimler optimizasyon işleminin sonucunu değiştirmedikinden göz önünde bulundurulmaz ise, (6.66) denklemi kuadratik bir ifade haline gelir. Bu bağlamda bu ifade anlık olarak kuadratik programlama algoritması ile çözülür ve daha önce de belirtildiği üzere, optimal kontrol sinyalinin ilk değeri sisteme uygulanır.

Optimizasyon işlemi sırasında çeşitli kısıt denklemleri de göz önüne alınır. Bunlardan ilki trafik ışıklarından meydana gelen konum ve hıza ilişkin kısıtlardır. Şekil Şekil 6.23'de 2 ışıklı durum özelinde araç pozisyonun bulunabileceği teorik değerler yer almaktadır.



Şekil 6.23 : TIA için pozisyon ve zamana bağlı kısıtlar

Dolayısı ile bu bölgeler zamana bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
p(k) &\in B_I \quad \text{eğer } 0 < t < t_{y1} \\
p(k) &\in B_{II} \quad \text{eğer } t_{y1} < t < t_{k1} \\
p(k) &\in B_{III} \quad \text{eğer } t_{y1} < t < t_{y2} \\
p(k) &\in B_{IV} \quad \text{eğer } t_{y2} < t < t_{k2} \\
&\dots
\end{aligned} \tag{6.68}$$

Öte yandan araç hızının tüm manevra boyunca pozitif olması,

$$v(k) > 0 \tag{6.69}$$

ve son olarak da, aracın boylamsal ivmelenme kapasitesine ya da konfora bağlı olarak ivmelenme sınırları sisteme etkilmiştir. Sonuç olarak tüm bu sistem kısıtları

$$[x_{min}] = \begin{bmatrix} p_{min}(k_i + 1) \\ v_{min}(k_i + 1) \\ a_{min}(k_i + 1) \\ \vdots \\ p_{min}(N_p) \\ v_{min}(N_p) \\ a_{min}(N_p) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} p_{tahmin}(k_i + 1) \\ v_{tahmin}(k_i + 1) \\ a_{tahmin}(k_i + 1) \\ \vdots \\ p_{tahmin}(N_p) \\ v_{tahmin}(N_p) \\ a_{tahmin}(N_p) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} p_{maks.}(k_i + 1) \\ v_{maks.}(k_i + 1) \\ a_{maks.}(k_i + 1) \\ \vdots \\ p_{maks.}(N_p) \\ v_{maks.}(N_p) \\ a_{maks.}(N_p) \end{bmatrix} = [x_{maks.}] \tag{6.70}$$

olmak üzere,

$$\begin{bmatrix} N \\ -N \end{bmatrix} U \leq \begin{bmatrix} [x_{maks.}] - Mx(k_i) \\ -[x_{min}] + Mx(k_i) \end{bmatrix} \tag{6.71}$$

şeklinde yazılabilir. Öte yandan kontrol girişi araç hızına bağlı olarak maksimum EM tork eğrisine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bir başka deyişle,

$$U_{min}(v) \leq U \leq U_{maks.}(v) \tag{6.72}$$

şeklinde tüm kontrol sinyalleri sınırlandırılabilir. Kontrol ya da tahmin ufku boyunca bir önceki hesap adımından elde edilen hız değerleri kullanılarak kontrol giriş kısıtları güncellenir. (6.72) denklemi de uygun formda yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} I \\ -I \end{bmatrix} U \leq \begin{bmatrix} U_{maks.} \\ -U_{min} \end{bmatrix} \tag{6.73}$$

şeklinde gösterilir. Tüm kısıtlar ve bedel fonksiyonu bir arada yazılırsa,

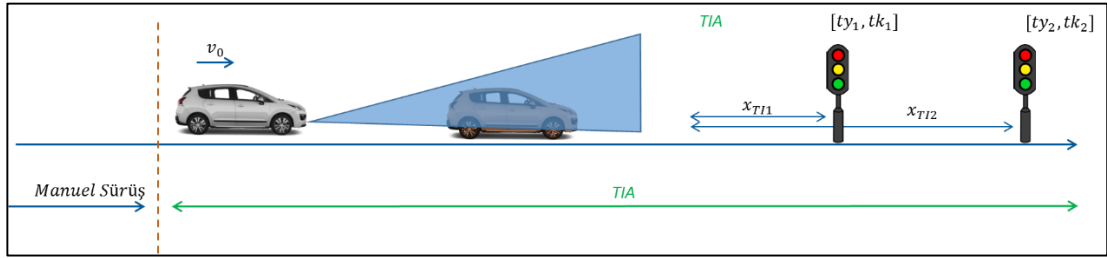
$$J_i(k_i) = \sum_{t=1}^{N_t-1} U^T (F^T Q F + R) U + 2(E \cdot x_{tahmin} Q F - y_{ref} \cdot Q F) U \tag{6.74}$$

öyle ki,

$$\begin{bmatrix} I \\ -I \\ N \\ -N \end{bmatrix} * U \leq \begin{bmatrix} U_{max} \\ -U_{min} \\ [x_{max}] - M * x(k_i) \\ -[x_{min}] + M * x(k_i) \end{bmatrix} \quad (6.75)$$

Temel olarak yukarıdaki optimizasyon problemi kuadratik programlama algoritması yardımı ile her işlem adımında çözülmekte ve simülasyon modeline kontrol değeri etkitilmektedir. TIA araç modeli ve ileriki aşamalarda da sürüş simülatörüne uygulanmadan önce, diğer araçların hesaplanan optimal hız algoritmasına olan etkisini göz önünde bulundurmak gerekir. Bir başka deyişle, eğer birden fazla ışıktan meydana gelen bir kavşakta hesaplanan optimal hız algoritmasını engelleyecek ya da rahatsız edecek bir başka aracın olması durumunun da ayrıca irdelenmesi gerekmektedir.

Şekil 6.24’ de görüldüğü üzere seri trafik ışıklarına yaklaşma senaryosunda, asıl araç ile yaklaşan aracın arasında ilk yapılan manevrayı engellemektedir. Dolayısı ile bu aracın varlığından dolayı bir başka optimal hız profili hesaplamak gerekmektedir.



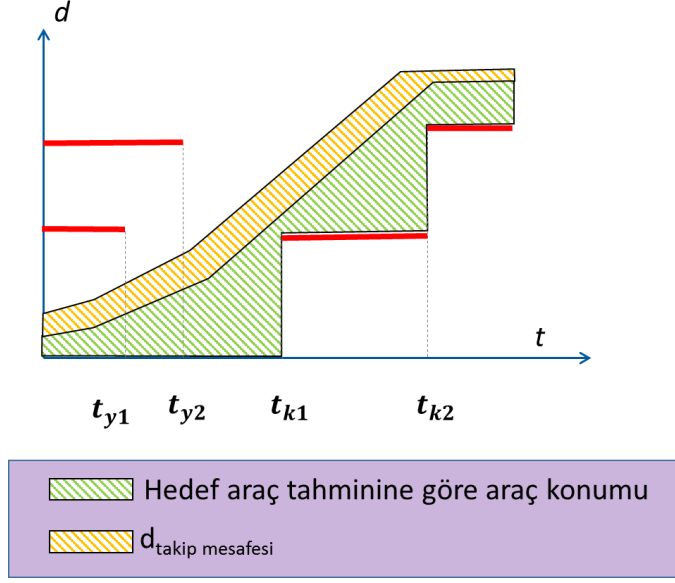
Şekil 6.24 : TIA için hedef aracın yer aldığı senaryo gösterimi.

Böyle bir durumun olduğu hedef araçlı senaryolar için hedef aracın hız ve konum bilgisinin de kestirilip, kısıt denklemlerine eklenmesi gerekmektedir. Bu çerçevede, yapılan bir kabul ile öndeki aracın hızının belirli bir ivmelenmenin ardından sabit kalacağı kabul edilmekte ve nihayetinde ışık bilgisinden de faydalanılarak rotasının yaklaşık olarak kestirilebilmektedir. Bu amaçla öndeki aracın hız ve ivme bilgisine, TIA’ lı araç üzerinde bulunan radar sensörü ile sahip olduğu kabul edilmektedir. Bir başka deyişle, öndeki aracın pozisyon değerlerinin kontrol ufkı boyunca,

$$p_{hedef\ araç}(t) = p_{p0} + v_0 t + \frac{1}{2} * a_{p0} t^2 \quad (6.76)$$

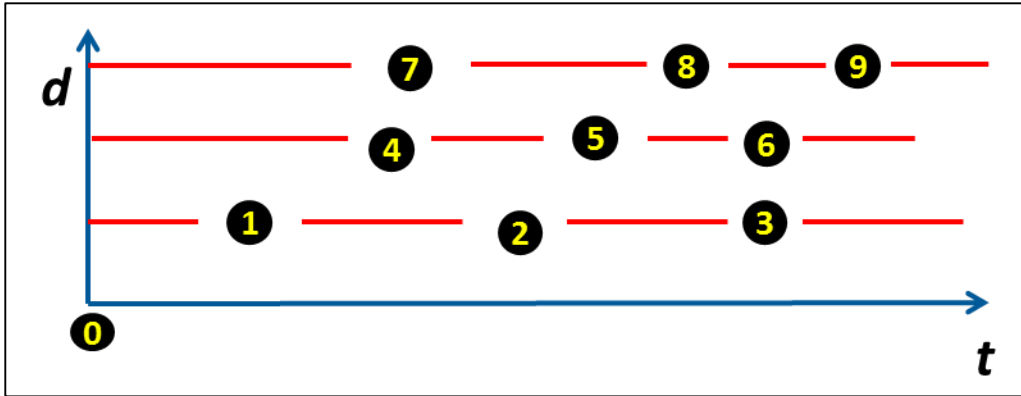
olacağı kabul edilmektedir. Öte yandan bu kestirim bilgisi TIA kullanan aracın pozisyona dair değerlerine eklenmektedir. Yani TIA aracının pozisyon kısıtları, hedef aracın güvenli bir $d_{takip\ mesafesi}$ kadar gerisinde kalacak şekilde güncellenmektedir.

$$p_{pred,ego} \leq p_{pred,prec} - d_{safe} \quad (6.77)$$



Şekil 6.25 : TIA için hedef araç göz önüne alınarak oluşturulan çözüm alanı

Aslında TIA sadece belirli bir yeşil ışık aralığında çalışmadan önce tüm alternatif yeşil ışık boşluklarının değerlendirilmiştir. Bu işlem yukarıda bahsedilen ve MÖK yapısındaki problemin hem alt seviye hem de yüksek seviyeli kontrol için de kullanılmasıyla sağlanır. Bir başka deyişle, Şekil 6.26'de görüldüğü gibi **0** noktasında **0→1→4→7** ya da **0→1→5→8** veya **0→2→5→8** şeklideki alternatif yeşil dalga manevraları arasında enerji tüketimi açısından karar vermek adına, hızlı, yüksek örnekleme zamanı olan (Ör. $T_s = 1\text{sn.}$) ve tüm alternatif manevraları kapsayan bir MÖK tüm alternatif yollar için çalıştırılır ve bu alternatiflerden en enerji optimum olan, hedef yeşil dalga olarak seçilir. Bunun ardından, seçilen rota için hız optimizasyonu adına, düşük seviyeli MÖK, hız optimizasyonuna ilişkin mevcut sınır koşullarını hesaplayarak optimal kontrol uygulamasını gerçekleştirmektedir.



Şekil 6.26 : TIA için örnek yeşil dalga alternatifleri.

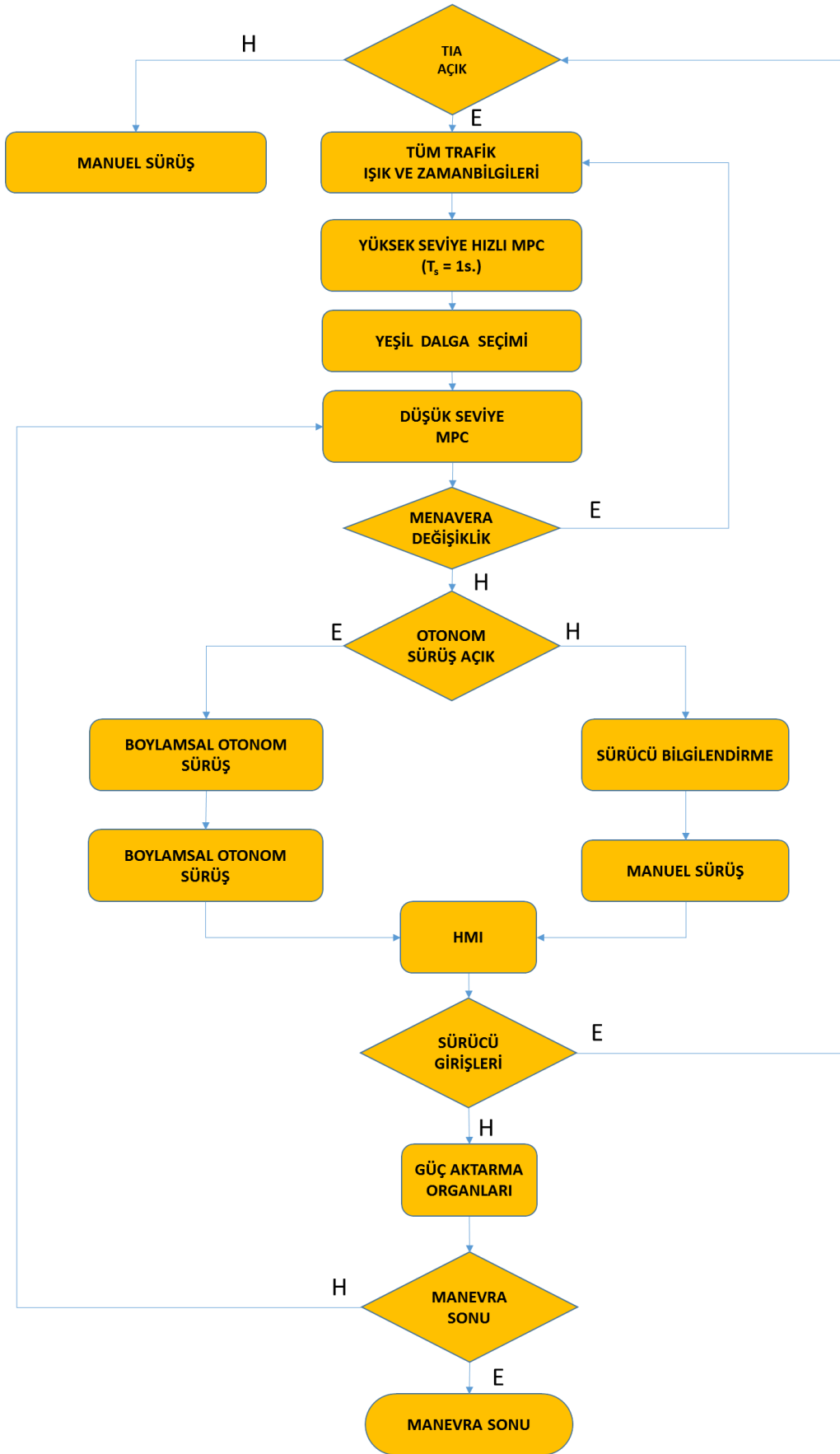
TIA araç uygulamasında iki farklı şekilde kullanılabilmektedir. Öncelikle hızın sürücüyeye önerilen bir değer olarak verildiği durum için sürücünün istenen hızı takip etmesi istenir. Diğer bir yöntem ise sürücünün tüm hız kontrol işini sisteme devredip

aracın boylamsal yarı otonom modda sürüş yapıp, ardından manevra sonunca kontrolü sürücüye devretmesidir. Uygulamanın detaylı akış diyagramı Şekil 6.27’de görülmektedir.

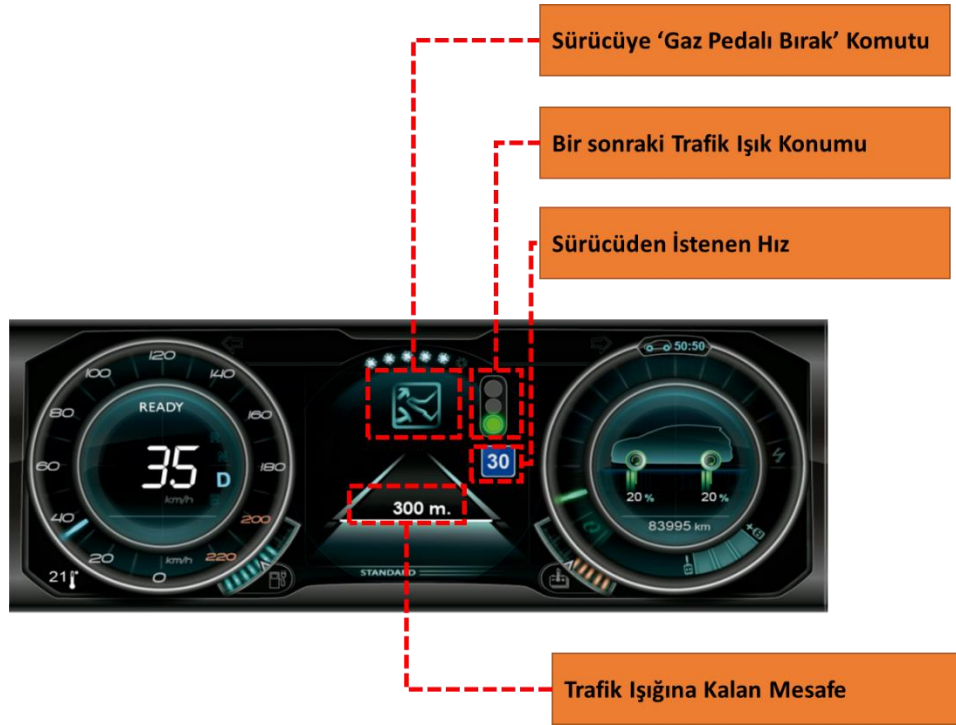
Diyagramda görüldüğü gibi TIA ile entegre hesaplanan hız değerlerinin sürücüye bildirildiği, ya da TIA ile ilgili bazı başka uyarı bildirimlerinin kullanıldığı bir sürücü ara yüzü bulunmaktadır. OpEneR projesi çerçevesinde, prototip araçlar için geliştirilen ve programlanabilir bu sürücü arayüzü (HMI) TIA için özelleştirilmiş ve TIA için gerekli sinyallerin ekran üzerinde gösterilmesi sağlanılmıştır. Programlanabilir sürücü arayüzünün geliştirilmesi ve yapılan adaptasyonlar bu çalışma kapsamının dışındadır. Öte yandan, sürücü simülatörü üzerinde de kullanılan bu arayüz için uygun formatta sinyallerin üretilmesi ve donanımsal olarak entegrasyonun yapılması (Ör. CAN sinyallerinin ekrana gönderilmesi) bu çalışma çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.28’ programlanabilir ekranın genel fonksiyonları görülmektedir.

Son olarak da, geliştirilen kontrolcü gerçek zamanlı bir çalışma ortamında bir araç simülatörüne yerleştirilmiştir. Araç simülatörü, OpEneR projesi çerçevesinde bir statik HMI demonstratörü ve maket (static mock-up) olarak geliştirilmiştir. Bu çalışma çerçevesinde statik ve simülasyondan bağımsız maket önce pedal ve direksiyon girişlerinin simülasyon ortamıyla birleştirildiği, ayrıca HMI ile simülasyon ve kontrolcü arayüzlerinin birleştirildiği bir dinamik bir sürüş simülatörü haline gelmiştir. Öte yandan sürücüye görsel uyarının yanı sıra pedal ile de titreşim aracılığı ile geri bildirim verilmektedir. Son olarak da belirtilmelidir ki, tüm simülasyon ortamı gerçek zamanlı çalışan bir donanım için modifiye edilmiştir. Öncelikle araç dinamiği, trafik ve çevresel durumların simüle edildiği CarMaker gerçek zamanlı versiyonu ile değiştirilmiştir. Benzer şekilde güç aktarma organlarının çalıştığı AVL CRUISE modeli de gerçek zamanlı çalışacak ortama aktarılmıştır. Bu iki aktarım işlem için modellerde bir değişiklik yapılmaması gerekmekle beraber, simülasyon programlarının yapısı değiştirilmiş modeller aynı şekilde yeni ortama aktarılmıştır. Öte yandan kontrolcünün çalıştığı Matlab Simulink modellerinin tümünün gerçek zamanlı çalışma adına Matlab/Real Time Workshop aracılığı ile kullanılan donanıma uygun koda çevrilmesi gerekmektedir. Bu çerçevede otomatik kod üretimi ve derleme işlemleri ile geliştirilen kontrolcüler gerçek zamanlı ortama aktarılmıştır.

Kullanılan gerçek zamanlı donanım, Pentium® M 760, 2 GHz işlemci ve 2 GB DDR2 DRAM’ e sahip bir single board PC olup, çeşitli arayüz kartları ile bir HiL sistem haline getirilmiştir. Bu arayüz kartları, pedal ve direksiyon sinyallerini okumak ve gaz pedalına ve sürücü arayüzüne sinyal göndermek adına kullanılmış olup CAN, Analog ve Dijital I/O kartlarından meydana gelmektedir.

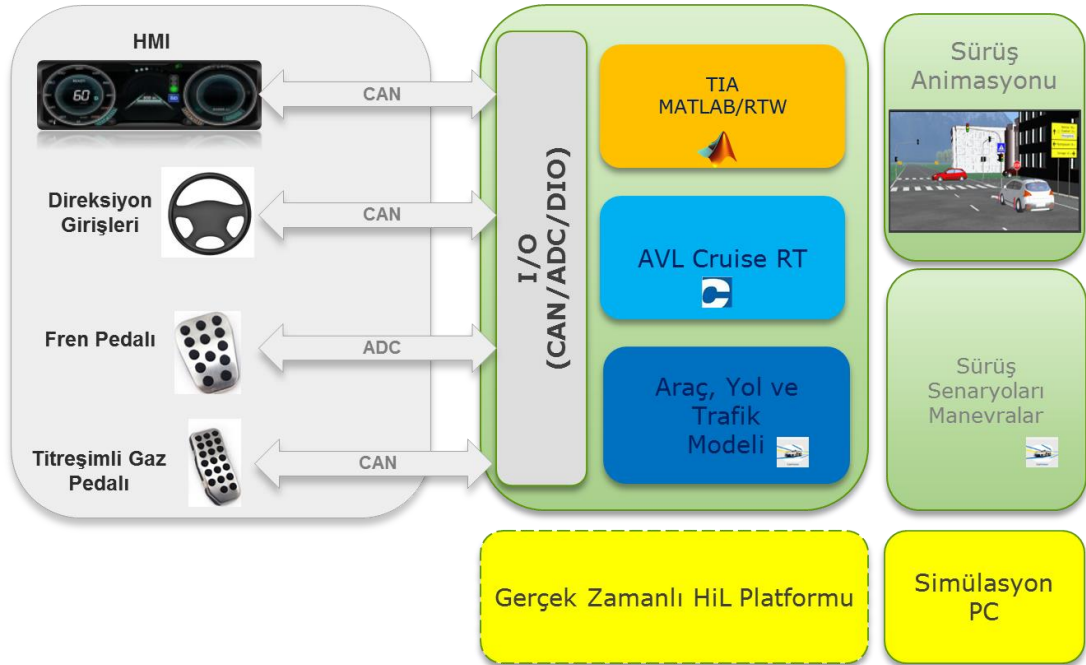


Şekil 6.27 : TIA algoritması için akış diyagramı



Şekil 6.28 : TIA algoritmasının çalıştığı sürücü arayüzü [123].

Şekil 6.29’ da simülâtörün yazılım ve donanım mimarisinin genel yapısı görülmektedir. Ayrıca, simülâtörün genel görünüşü Şekil 6.30 ve Şekil 6.31’ de görülmektedir.



Şekil 6.29 : TIA için geliştirilen simülâtör sistem mimarisi [123].



Şekil 6.30 : TIA algoritmasının çalıştığı sürücü simülatörü ve sürücü arayüzü.



Şekil 6.31 : TIA algoritmasının çalıştığı sürücü simülatörünün genel görünüşü.

6.2.3 TIA için simülasyon sonuçları

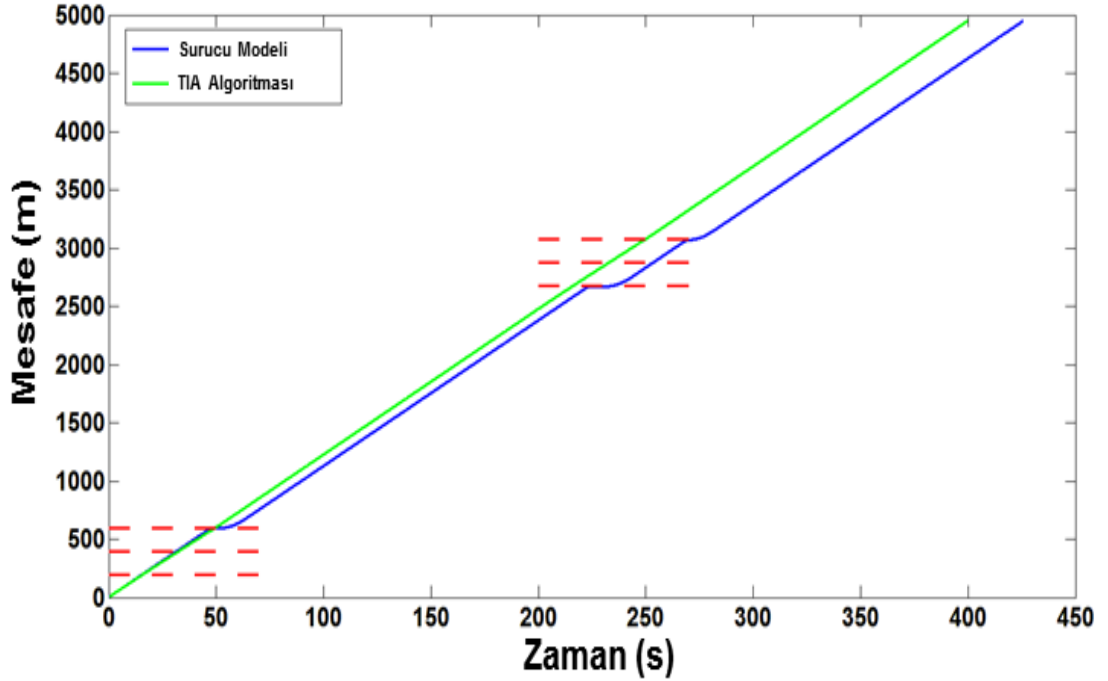
Bu bölümde TIA için elde edilen simülasyon sonuçları sunulacaktır. Simülasyonlar gerçek zamanlı olmayan ofis simülasyon ortamında sürücü modeli yardımı ve kompleks araç modeli ile elde edilmiştir. Öncelikle Şekil 6.32 ve Şekil 6.33'te ilk senaryo çerçevesinde jenerik bir sinyalizasyon zamanlaması için her biri üç ayrı ışıktan oluşan iki farklı seri trafik ışığı serisi için sürücü modeli ve kontrolcü cevapları görülmektedir. Şekil 6.32'den görüldüğü üzere, sürücü modeli ilk grupta bir kere ve ikinci grupta iki kez kırmızı ışıktaki durmak zorunda kalırken, TIA sistemine ait araç tüm ışıklar için en uygun hızda ve minimum ivmelenme sonucunda manevrasını

tamamlamıştır. Sürücü ile hareket eden simülasyon modelinde aracın durma ve kalkmasına bağlı olarak batarya şarjında bazı şarj ve deşarj hareketleri görülmekle beraber, TIA'lı sistemin manevra sonunda daha yüksek bir şarj seviyesinde kaldığı görülmektedir. Öte yandan dur ve kalk manevraları olmaksızın sonuçlanan TIA manevrası, sürücü modelli manevraya göre daha kısa sürede sonuçlanmıştır.

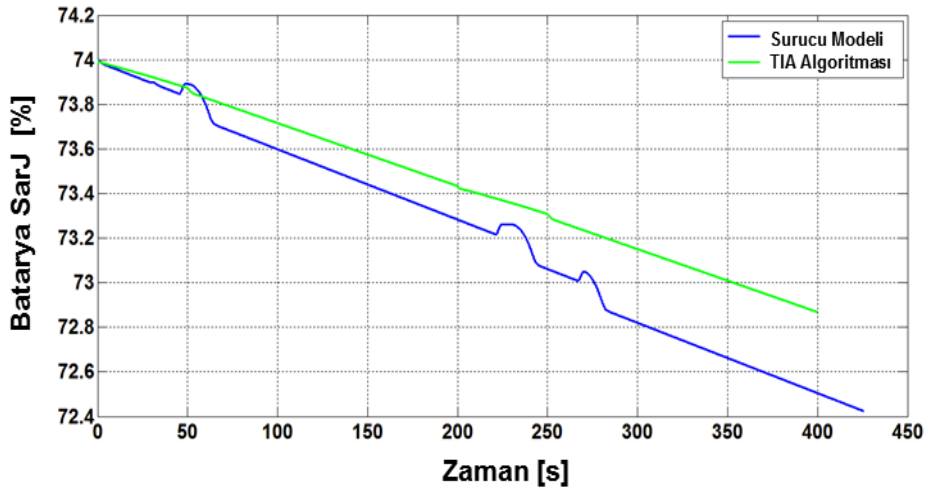
İkinci olarak hedef bir aracın olduğu Senaryo 2 simülasyon sonuçları Şekil 6.34 ve Şekil 6.35' te görülmektedir. Sonuçlarda hedef aracın trafik ışıkları arasındaki manevrasına yer verilmiştir. Bu senaryo boyunca hedef araç arkasında hem sürücü modelinin hem de TIA sisteminin davranışı sunulmuştur. Hedef araç, 2.Trafik Işıktaki yeşil ışığın son anında geçip sürücü modeli olan sistemin kırmızı ışıkta beklemesine yol açmıştır. Oysa TIA öngörülü olarak bu duruma karşı hızını azaltıp bir sonraki yeşil ışık aralığını hedef olarak belirlemiş ve manevrasını buna göre adapte etmiştir.

Son olarak 3. Senaryo için gerçek trafik ışığı ve yol verilerinden faydalanılarak bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Buna göre "Open Street Map" harita veri-tabanı üzerinden alınan 4.2 km'lik bir yol verisi modele adapte edilmiştir [124]. Dijital harita verisinde, ışıkların konumları ve yaklaşık olarak gerçekçi bir ışık zamanlaması da kullanılmış olup simülasyon ortamında modellenmiştir. Şekil 6.36 kullanılan trafik ışık sekanslarının konumları harita üzerinde görülmektedir.

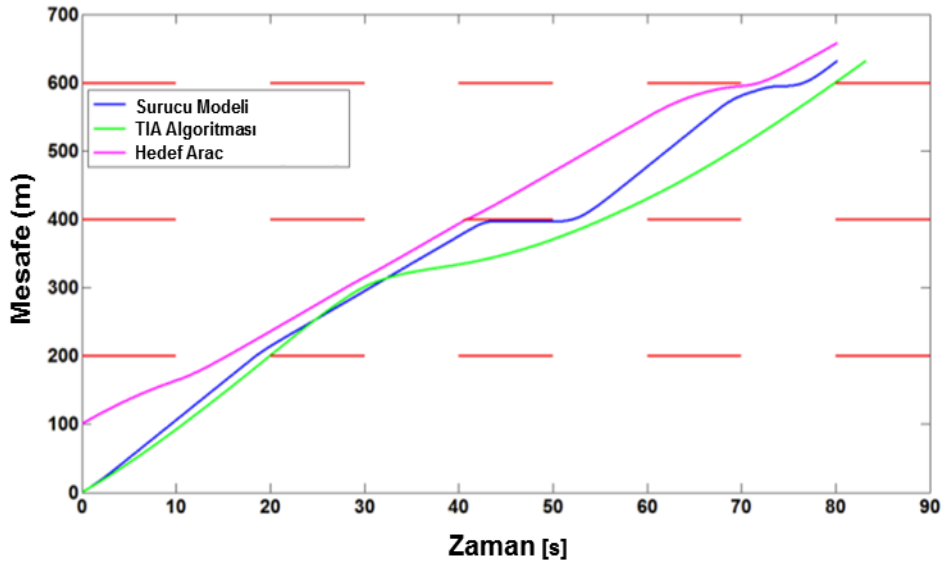
Şekil 6.37 ve Şekil 6.38' de ise bu uygulamaya ait simülasyon sonuçları araç yörüngesi ve batarya şarjı olarak görülmektedir.



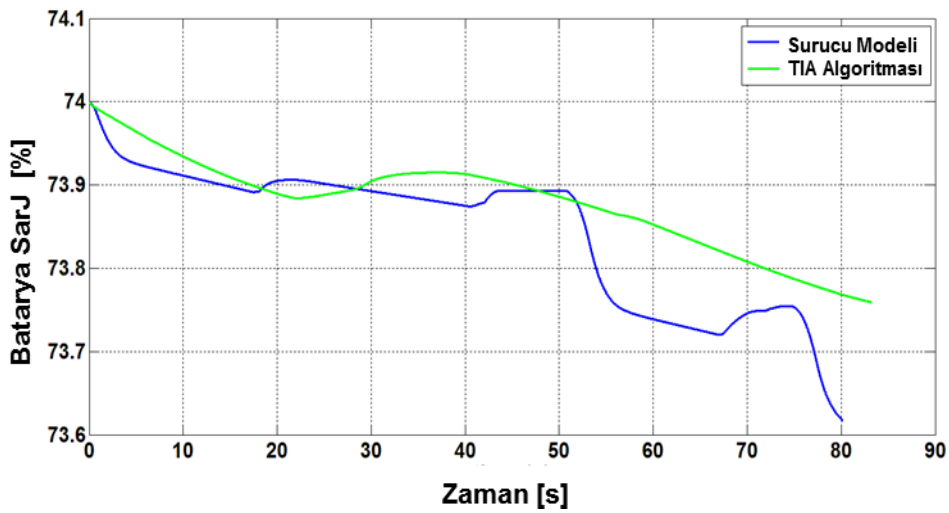
Şekil 6.32 : 1.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngesi.



Şekil 6.33 : 1.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngeleri.



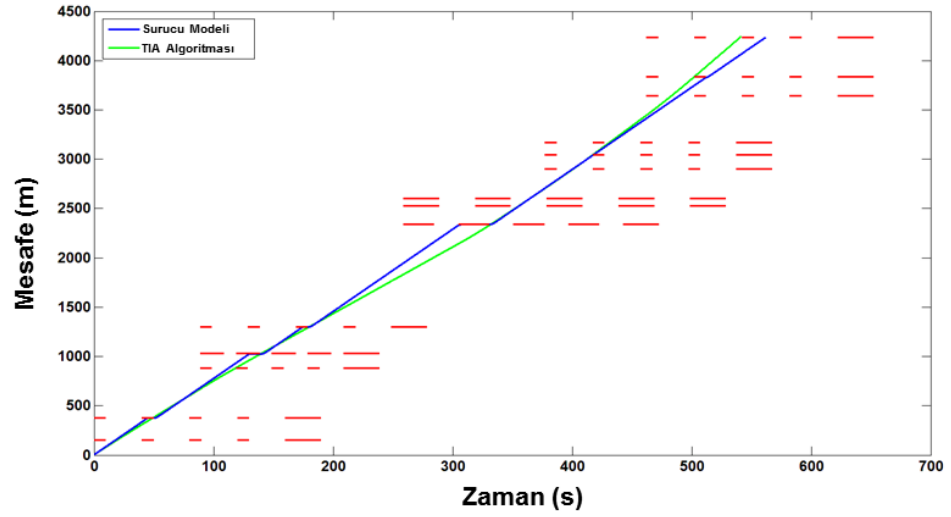
Şekil 6.34 : 2.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngeleri.



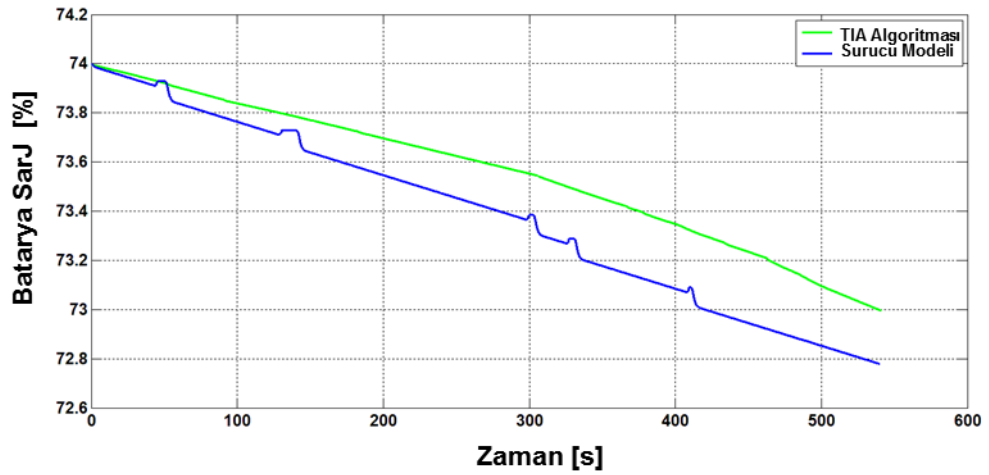
Şekil 6.35 : 2.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngeleri.



Şekil 6.36 : 3.Senaryo için kullanılan gerçek trafik ışık lokasyonları [124].



Şekil 6.37 : 2.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngeleri.



Şekil 6.38 : 3.Senaryo için sürücü modeli ve TIA algoritması için araç yörüngeleri.

Çizelge 6.3’ de TIA ile tüm senaryolarda elde edilen tüketim tasarrufları görülmektedir.

Çizelge 6.3 : TIA için tüm senaryolarda elde edilen tüketim tasarrufları

Senaryolar	Maks. Hız [km/saat]	Başlangıç Batarya Şarjı [%]	Sürücü Modeline Göre Enerji Tasarrufu [%]	Sürücü Modeline Göre Manevra Zaman Tasarrufu [%]
Senaryo 1	32	74	28.5	6
Senaryo 2	32	74	36,8	-3.8
Senaryo 3	70	74	17	+3.8

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu tez çalışması, paralel bir hibrid güç aktarma organı topolojisine sahip HEA ve ŞE-HEA için çeşitli enerji yönetim sistemleri geliştirmiştir. Bu enerji yönetim sistemlerinin temel amacı belirli bir sürüş çevrimi için en düşük yakıt tüketimini temin edecek İYM ve EM torklarının hesaplanmasını sağlamaktır. Bunu yaparken, sürüş çevriminin araç üzerinde oluşturduğu direnç kuvvetleri, batarya şarj durumu ve batarya son şarj değeri dikkate alınmıştır. Batarya enerji kapasiteleri ve şarj edilme yöntemlerinden ötürü HEA ve ŞE-HEA için şarj başlangıç ve son değerleri arasında farklılık vardır. Zira HEA için, objektif bir yakıt tüketimi performansından bahsetmek adına, sürüş baş ve sonunda bir şarj dengesinden söz etmek gerekir ki, ne İYM bataryayı ekstra şarj etmek için sürüşün gerektirmediği bir yakıt harcasın, ne de bataryada başlangıç anında depolanmış enerji fazladan kullanılmış olsun. ŞE-HEA'lar için durum daha farklıdır, çünkü batarya şarjı dış bir kaynaktan yapıldığından batarya şarjını bitirmek ve minimum seviyede yakıtle sürüşü gerçekleştirmek ana hedeftir.

Öncelikle tez kapsamında oluşturulmuş iki farklı tip modelleme aracından bahsetmekte fayda vardır. Bunlardan ilki denklemlerin komponent, araç ve diğer denklemlerin direk modellendiği ancak tekerleklerden komponente doğru hesaplanan geri modelleme metoduna dayanan yöntemdir. Bir kontrol modeli olarak da ifade edilebilecek bu modelleme yöntemi ile paralel HEA ve ŞE-HEA modelleri MATLAB ve MATLAB/Simulink ortamlarında oluşturulmuş ve ilk sonuçlar bu modellerle elde edilmiştir. Bu modeller sanki statik modeller olup, sadece batarya şarjının davranışı için dinamik bir denklem barındırır. Öte yandan HEA ve ŞE-HEA için gerekli olan genel enerji hesaplamalarının yapılmasında yeterlidirler.

İkinci modeller ise daha iki farklı program kullanılarak AVL CRUISE ve IPG CarMaker modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu modellerde, komponentlerin ve diğer simülasyon altyapılarının tüm matematiksel ifadeleri programlarda hali hazırda olup uygun komponent ve araç parametrelerinin kullanılması gereklidir. Ayrıca güç aktarma organlarının topolojisi de grafiksel ara birimde oluşturulmuş ve modellenmiştir. Son olarak da eş-simülasyon için gerekli olan iki programın ihtiyaç

duyacağı arayüz birimleri oluşturulmuştur. Bu tip bir modelleme yöntemi ilk yöntemden farklılıklar içerir. Öyle ki burada bir sürücü modeli, sürüş çevrimini bir kontrol girişi olarak değerlendirir ve gaz/fren pedal girişlerini uygular. Vites seçimleri otomatik vites seçim kuralları çerçevesinde araç hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu pedal girişleri daha sonra bu tez kapsamı çerçevesinde geliştirilmiş Hibrid enerji yönetimi üst kontrolcüsü çerçevesinde, İYM ve EM komponentlerine direk kontrol girişi, bataryaya ise endirekt giriş olarak etkir.

Tez kapsamında enerji yönetimi ya da yakıt tüketimi minimizasyonu problemi bir optimizasyon problemi olarak tanımlanmış ve çözümüne yönelik çeşitli tipte nümerik ve analitik yöntemler geliştirilmiştir.

Öncelikle, Bellman optimallik prensibine dayanan Dinamik Programlama yöntemi sayesinde, sistemin teorik global optimal davranışı elde edilir. Nümerik olarak, tersten başa doğru iteratif olarak çözülen yöntem, zaman ve durum uzayı boyutunda problemi ayırıklaştırarak çözerken, sistem ve kontrol kısıtları bedel fonksiyonuna eklenen ceza fonksiyonları aracılığı ile tanımlanmıştır. DP ile elde edilen teorik global optimal davranış hem vites davranışlarının önceden tanımlandığı durum hem de vites seçiminin de kontrol girişi olarak kabul edildiği ikinci durum için elde edilmiştir.

DP'nin uygulanabilirliği olmamakla beraber, gerçekleştirilebilir yöntemler için bir referans niteliğindedir. Bu çerçevede Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu yöntemi, gerek fiziksel bir analogik yaklaşımla elde edilsin gerekse klasik optimal kontrol yönteminden faydalanılarak elde edilsin, çok daha hızlı çözüm verebilen ancak lokal bir optimizasyon sağlayan bir yöntem olarak ortaya çıkar.

Gerek HEA gerekse ŞE-HEA için farklı sürüş çevrimleri dâhilinde yapılan simülasyon çalışmaları EYTM yönteminin DP ile elde edilen yönteme oldukça yakınsadığını ortaya koyar. Ancak EYTM için önemli bir problem, şarj dengesini tam olarak sağlayacak eşdeğerlik katsayısının sürüş çevrimi sayesinde kalibre edilmesi gerekliliğidir. Bu bir nevi, sürüş özelliklerinin önceden bilinmesi anlamına gelmektedir. Bu da yöntemin pratikte uygulanırken performansını düşürecek etkenlerden biridir. Öte yandan bu durumun ötesine geçecek bir başka yöntem, klasik EYTM ifadesine eklenen bir batarya şarjı kontrol değeridir. Bu bir nevi batarya şarjı üzerinden bir geri besleme sağlayarak, batarya şarj dengesinin sağlanmasını sağlar. Ancak bu durum, orijinal EYTM ifadesindeki optimalliği kısıtlamaktadır.

Aslında pratikte, EYTM ya da benzeri bir optimal kontrol stratejisinin önündeki en önemli problem, sürücünün anlık güç ihtiyaçlarının optimal yakıt tüketimi ile karşılanmasının yanı sıra, yol topoğrafyasından meydana gelecek bozucu etkilerdir. Zira gerek negatif eğim gerekse pozitif eğim dolayısıyla şarj dengesinin bozulmasına neden olan bu ani yük değişiklikleri, öngörülü kontrol ile giderilebilir. Bu tez çalışmasında, iki farklı öngörülü kontrol algoritması ile yol durumunun önceden bilinmesi sayesinde, ön şarj ve öndeşarj stratejileri sayesinde şarj durumu yolun eğimine göre önceden ayarlanabilmiştir. Böylelikle, önce yokuş aşağı bir durum için erken dolan batarya şarjı ve frenleme enerjisinin tamamen mekanik frenler ile soğurulmasına karşın öndeşarj sayesinde batarya şarjı eğimin başında uygun değere, uygun zamanda getirilebilir. Böylelikle hem eğim öncesi, kısımdadeşarj sırasında daha elektrik yoğun bir sürüş ve dolayısı ile daha az yakıt tüketimi sağlanır, hem de eğim sırasındaki enerji büyük ölçüde reküperatif enerji ile geri kazanılabilir.

Benzer bir durum pozitif eğimli bir yolun başında da geçerlidir. Eğim öncesi şarj durumu uygun bir noktaya çekilerek, yokuş üzerindeki muhtemel bir şarj yapma durumu engellenmiş olur. Çünkü İYM yokuş üzerinde hem şarj hem de çekiş sağlar ise, fazla yükten dolayı yakıt tüketimi oldukça yüksek olur.

Bu çerçevede tez kapsamında iki farklı kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Bunlardan ilki, klasik EYTM yöntemine eklenen yola bağlı ve yolun eşdeğer yakıt tüketimin veren bir ifade ile sağlanır. Bu ifade sanki yolun enerjisi önceden zaten mevcutmuş gibi EYTM ifadesinin böyle bir durumdadeşarj moduna geçmesine neden olur. Ancak burada eklenen terim, sadece yoldan kazanılacak ek enerji ya da yokuş durumunda yola harcanacak enerji değildir. EYTM ifadesi hala kullanıldığından orijinal davranıştan ne kadar enerji sapılması gerektiğidir. Buna göre, eğimin başladığı noktaya kadar EYTM'nin nasıl davranılacağını da kestirilmesi gerekir. Bu da yol boyunca aracın beklenen hız profili ve yolun eğimli kısmının eğim değerlerinin bilinmesini gerektirir.

Geliştirilen yöntem farklı yol profillerinde ve değişik hız değerleri için test edilmiş ve simüle edilmiştir. Yapılan simülasyonlarda, yolun durumu ve o anki hibrid moda bağlı olmakla beraber, klasik EYTM'ye göre ortalama %6'lık bir yakıt tüketimi avantajı sağlandığı görülmüştür.

Geliştirilen ikinci yöntem ise, birinci yöntemde yapılan çalışmaların bir kısmını kullanarak problemi MPC formülasyonu ile ifade eder. EYTM yapısı kontrol girişi olan hibrid güç ayırma oranı için lineerleştirilir. Böylelikle eşdeğer yakıt tüketimi

ifadesi, kontrol girişinin bir fonksiyonu haline gelir. Daha sonra bu fonksiyon, güç enerji bağıntısı bir sistem denklemi gibi düşünülerek, kontrol girişleri birer eşitsizlik ve hedeflenen ek batarya enerjisi bir eşitlik kısıtı olarak ifade edilerek MPC formülasyonu oluşturulur. Kontrol ufku boyunca tüm kontrol girişlerinin birer sabit parametre olacağı kabulü ile model aslında dinamik optimizasyon probleminden bir parametre optimizasyonu problemi haline getirilir. Son olarak Lineer Programlama yöntemi ve Simpleks metodu ile problem tüm kontrol ufku boyunca çalıştırılır.

Son olarak tezde sürücü destek sistemleri ile ilgili ve Model Öngörülü Kontrol yapısına dayanan iki farklı sistem geliştirilmiştir. Bunlardan ilki ASS sistemi olup sürücü konfor unsurlarını da jerk değerleri ile kontrol eden bir kontrol yöntemidir. Bu yöntem kuadratik programlama metoduna dayanarak her örneklem anında çözüm ve optimizasyon yapılması sonucunda araçlar arası mesafe ve istenen hız belirlenen sistem kısıtları çerçevesinde kontrol edebilmektedir.

İkinci sistem iste trafik ışıkları ile iletişim kurabilen V2V teknolojisi sayesinde ileriki yol üzerindeki tüm trafik ışığı bilgilerini değerlendirip araç açısından en optimal hız profilini hesaplayabilen bir kontrol yapısına sahiptir. Bu kontrol yapısı da ASS ‘ de olduğu gibi kuadratik formda modellenerek anlık olarak çözüm üretmemektedir. Öte yandan farklı ışık kombinasyonlarını değerlendirebilmek adına, iki MKÖ yapısı birbirlerine kaskad şekilde çalıştırılmaktadır. Ayrıca sistem, aracın önündeki diğer araçla aradaki mesafe ve konumun ölçülmesi suretiyle hem bir ASS gibi davranırken hem de gerektiği durumlarda enerji optimal olarak ışık kombinasyonlarına göre hız profilini değiştirmektedir. Geliştirilen bu kontrolcü daha sonra hem bir araç sürücü arayüzü ve gerçek zamanlı bir platformda araç simülatörü üzerinde test edilmiştir. TIA için, normal sürücülü bir araca göre çeşitli senaryolar çerçevesinde, trafik ışıklı manevralarda %36.5’ e kadar varan enerji tasarrufu, sağlamaktadır. Kontrol yöntemi aynı zamanda dur-kalk manevrasını da mümkün olduğunca engellediğinden kimi zaman manevra zamanlarında da %4’lere kadar bir avantaj getirebilmektedir.

Tez kapsamında elde edilen sonuçlar ve çalışma sırasında karşılaşılan bazı problemler, ileride benzer alanda yapılacak çalışmalar için kaynak olabilir. HEA Enerji Yönetimi açısından, HEA enerji optimizasyonu için Global Optimal çözüm yöntemi, pratikteki sıklıkla kullanılan kural tabanlı hibrid araç yazılımlarının kalibrasyonları için kullanılabilir. Benzer şekilde HEA için DP çözümlemeleri ile vites değiştirme algoritmaları daha optimal şekilde geliştirilebilir. Öngörülü HEA Enerji Yönetimi

açısından ise, öngörölü HEA'nın içeriği farklı yol ve trafik bilgilerinden faydalanılarak daha kapsamlı hale getirilebilir. Öte yandan birden fazla aracın beraber hareket ettiği durumlarda (Ör: Araç Konvoyları) toplam Konvoy Enerji Yönetimi düşünülebilir.

Sürücü destek sistemleri için sadece reküperatif enerjiyi değil aynı zamanda yakıt enerjisini de optimize edecek hız profilleri ve sürüş stratejileri düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Sciarretta, A., & Guzzella, L.** (2007). Control of Hybrid Electric Vehicles Optimal Energy-Management Strategies. *IEEE Control System Magazine*, 27(2), 60–70.
- [2] **Panday, A., & Bansal, H.** (2014). A Review of Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicle. *International Journal of Vehicular Technology*, 2014(2014), 1–19. Retrieved from <http://www.hindawi.com/journals/ijvt/2014/160510/abs/>
- [3] **Tie, S., & Tan, C.** (2013). A Review of Energy Sources and Energy Management System in Electric Vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20(2013), 82–102. doi:10.1016/j.rser.2012.11.077
- [4] **Guzzella, L., & Sciarretta, A.** (2013). *Vehicle Propulsion Systems* (2nd ed.). Heidelberg: Springer New York. doi:10.1007/978-3-642-35913-2
- [5] **Hofman, T., Steinbuch, M., Druten, R. van, & Serrarens, A.** (2007). Rule-based Energy Management Strategies for Hybrid Vehicles. *Int. Journal Electric and Hybrid Vehicles*, 1(1), 71–93.
- [6] **Williamson, S. S.** (2013). Williamson, S. S. (2013). *Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. New York, NY: Springer New York. doi:10.1007/978-1-4614-7711-2
- [7] **Sorrentino, M., Rizzo, G., & Arsie, I.** (2009). Analysis of a Rule-Based Control Strategy for On-Board Energy Management of Hybrid Solar Vehicles. In *IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling* (pp. 103–108). Rueil-Malmaison, France.
- [8] **Banvait, H., Anwar, S., & Chen, Y.** (2009). A Rule-Based Energy Management Strategy for Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV). In *American Control Conference* (pp. 3938–3943). Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA: IEEE. doi:10.1109/ACC.2009.5160242
- [9] **Trovão, J. P., Pereirinha, P. G., Jorge, H. M., & Antunes, C. H.** (2013). A Multi-Level Energy Management System for Multi-Source Electric Vehicles - An Integrated Rule-Based Meta-Heuristic Approach. *Applied Energy*, 105(2013), 304–318.
- [10] **Bianchi, D., Rolando, L., Serrao, L., Onori, S., Rizzoni, G., Nazar, A.-K., ... Kang, P.** (2010). A Rule-Based Strategy for a Series/Parallel Hybrid Electric Vehicle: An Approach Based on Dynamic Programming. In

ASME Dynamic Systems and Control Conference (pp. 1–8). Cambridge, Massachusetts, USA.

- [11] **Jalil, N., Kheir, N. A., & Salman, M.** (1997). A Rule-Based Energy Management Strategy for a Series Hybrid Vehicle. In *American Control Conference* (Vol. 1, pp. 689–693). Albuquerque, New Mexico, USA. doi:10.1109/ACC.1997.611889
- [12] **Biasini, R., Onori, S., & Rizzoni, G.** (2013). A Near-optimal Rule-Based Energy Management Strategy for Medium Duty Hybrid Truck. *International Journal of Powertrains*, 2(2/3), 232–261. doi:10.1504/IJPT.2013.054151
- [13] **Boehme, T. J., Schori, M., Rabba, H., & Schultalbers, M.** (2014). Application of an Optimal Control Problem to a Trip-Based Energy Management for Electric Vehicles. In *SAE World Congress & Exhibition* (pp. 115–126). doi:10.4271/2013-01-1465
- [14] **Wei, X.** (2004). *Modeling and Control of a Hybrid Electric Drivetrain For Optimum Fuel Economy, Performance and Driveability*. . (Doktora tezi). The Ohio State University.
- [15] **Serrao, L., Onori, S., & Rizzoni, G.** (2011). A Comparative Analysis of Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 133(3), 031012. doi:10.1115/1.4003267
- [16] **Kim, N., Cha, S., & Peng, H.** (2010). Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19(5), 1279–1287. doi:10.1109/TCST.2010.2061232
- [17] **Kim, M., Jung, D., & Min, K.** (2014). Hybrid Thermostat Strategy for Enhancing Fuel Economy of Series Hybrid Intracity Bus. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(8), 3569–3579. doi:10.1109/TVT.2013.2290700
- [18] **Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E., & Emadi, A.** (2004). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press. doi:10.1201/9781420037739
- [19] **Salmasi, F. R.** (2007). Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(5), 2393–2404. doi:10.1109/TVT.2007.899933
- [20] **Gao, J., Sun, F., He, H., Zhu, G. G., & Strangas, E. G.** (2009). A Comparative Study of Supervisory Control Strategies for a Series Hybrid Electric Vehicle. In *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* (pp. 1–7). Ieee. <http://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918038>

- [21] **Johnson, V. H., Wipke, K. B., & Rausen, D. J.** (2000). HEV Control Strategy for Real-Time Optimization of Fuel Economy and Emissions. In *SAE Future Car Congress* (pp. 1–14). Arlington, Virginia, USA.
- [22] **Chen, Z., & Mi, C. C.** (2009). An Adaptive Online Energy Management Controller for Power-Split HEV Based On Dynamic Programming and Fuzzy Logic. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 335–339). Ieee. <http://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289831>
- [23] **Khoucha, F., Benbouzid, M., & Kheloui, A.** (2010). An Optimal Fuzzy Logic Power Sharing Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 1–5). Lille, France.
- [24] **Kahrobaeian, A., Asaei, B., & Amiri, R.** (2009). Comparative Investigation of Charge-Sustaining and Fuzzy Logic Control Strategies in Parallel Hybrid Electric Vehicles. *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1632–1636. <http://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289643>
- [25] **Wang, A., & Yang, W.** (2006). Design of Energy Management Strategy in Hybrid Vehicles by Evolutionary Fuzzy System Part I: Fuzzy Logic Controller Development. In *6th IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation* (pp. 8324–8328). Dalian, China: IEEE. <http://doi.org/10.1109/WCICA.2006.1713599>
- [26] **Li, S. G., Sharkh, S. M., Walsh, F. C., & Zhang, C. N.** (2011). Energy and Battery Management of a Plug-In Series Hybrid Electric Vehicle Using Fuzzy Logic. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(8), 3571–3585. <http://doi.org/10.1109/TVT.2011.2165571>
- [27] **Zhu, Y., Zhao, Z., Yu, Z., & Yin, M.** (2009). Optimal Torque Based Fuzzy Logic Control Strategy of Parallel Hybrid Electric Vehicle. In *IEEE International Workshop on Intelligent Systems and Applications* (pp. 1–5). Wuhan, China: IEEE. <http://doi.org/10.1109/IWISA.2009.5072990>
- [28] **Sciarretta, A., Guzzella, L., & Onder, C. H.** (2003). On the Power Split Control of Parallel Hybrid Vehicles: From Global Optimization towards Real-time Control. *At-Automatisierungstechnik*, 51(3), 195–203.
- [29] **Borrelli, F.** (2003). *Constrained Optimal Control Of Linear and Hybrid Systems*. (M. Thoma & M. Morari, Eds.). Springer. Retrieved from <http://www.citeulike.org/group/1692/article/576809>
- [30] **Kirk, D. E.** (2004). *Optimal Control Theory An Introduction*. New York, NY: Dover Publications, Inc. <http://doi.org/10.1017/CBO9780511611032.002>
- [31] **Delprat, S., Guerra, T. M., Gino, P., Jimmy, L., & Michel, D.** (2001). Control Strategy Optimization for an Hybrid Parallel Powertrain. In *American Control Conference* (pp. 1315–1320). Arlington, Virginia, USA.

- [32] **Delprat, S., Guerra, T. M., & Rimaux, J.** (2003). Control Strategies for Hybrid Vehicles: Synthesis and Evaluation. In *IEEE 58th Vehicular Technology Conference* (Vol. 5, pp. 3246–3250). Orlando, FL, USA: IEEE. <http://doi.org/10.1109/VETECF.2003.1286250>
- [33] **Delprat, S., Guerra, T. M., & Rimaux, J.** (2002). Optimal Control of A Parallel Powertrain: From Global Optimization to Real Time Control Strategy. In *Vehicular Technology Conference* (pp. 2082–2088). Birmingham, AL, USA: IEEE.
- [34] **Tate, E. D., & Boyd, S. P.** (2000). Finding Ultimate Limits of Performance for Hybrid Electric Vehicles. *SAE Journal of Passenger Car – Mechanical Systems*, 109(6).
- [35] **Dean, E. T. J., Grizzle, J. W., & Peng, H.** (2008). Shortest Path Stochastic Control for Hybrid Electric Vehicles. *International Journal of Robust And Nonlinear Control*, 18(14), 1409–1429. <http://doi.org/10.1002/rnc>
- [36] **Jönsson, M., & Kourtev, M.** (2010). *Predictive Energy Management for A Mild Hybrid Long Haul Truck*. Chalmers University of Technology.
- [37] **Ambühl, D., Guzzella, L., & Member, S.** (2009). Predictive Reference Signal Generator for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(9), 4730–4740.
- [38] **Geering, H. P.** (2007). *Optimal Control with Engineering Applications*. Leipzig: Springer. Retrieved from <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-540-69438-0.pdf>
- [39] **Larsson, V., Johannesson, L., & Egardt, B.** (2014). Analytic Solutions to the Dynamic Programming Sub-problem in Hybrid Vehicle Energy Management. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(4), 1–10. <http://doi.org/10.1109/TVT.2014.2329864>
- [40] **Kar, Y. L., & Kar, N. C.** (2011). Advanced Design Approach of Power Split Device of Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using Dynamic Programming. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 1–6). Chicago, IL, USA.
- [41] **Mansour, C., & Clodic, D.** (2011). Dynamic Modeling of the Electro-mechanical Configuration of the Toyota Hybrid System Series/Parallel Powertrain. *International Journal of Automotive Technology*, 13(1), 143–166. <http://doi.org/10.1007/s12239-012-0013-8>
- [42] **Pognant-Gros, P., Wasselin, T., & Badin, F.** (2010). Power-Split Hybrid Transmission Energetic and Dynamic Evaluation Program. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 1–8). Lille, France: IEEE. <http://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729172>

- [43] **Mansour, C., & Clodic, D.** (2012). Optimized Energy Management Control for the Toyota Hybrid System Using Dynamic Programming on a Predicted Route with Short Computation Time. *International Journal of Automotive Technology*, 13(2), 309–324. <http://doi.org/10.1007/s12239-012-0029-0>
- [44] **Pei, D., & Leamy, M. J.** (2013). Dynamic Programming-Informed Equivalent Cost Minimization Control Strategies for Hybrid-Electric Vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 135(5), 051013. <http://doi.org/10.1115/1.4024788>
- [45] **Elbert, P., Ebbesen, S., & Guzzella, L.** (2012). Implementation of Dynamic Programming for n-Dimensional Optimal Control Problems With Final State Constraints. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21(13), 924–931.
- [46] **Sundström, O., Ambühl, D., & Guzzella, L.** (2009). On Implementation of Dynamic Programming for Optimal Control Problems with Final State Constraints. *Oil & Gas Science and Technology – Revue de l’Institut Français Du Pétrole*, 65(1), 91–102. <http://doi.org/10.2516/ogst/2009020>
- [47] **Bin, Y., Reama, A., Cela, A., Natowicz, R., Abderrahmane, H., & Li, Y.** (2009). On Fast Dynamic Programming for Power Splitting Control of Plug-In Hybrid Electric Vehicles. In *ASME Dynamic Systems and Control Conference* (pp. 229–236). Hollywood, California, USA: ASME. <http://doi.org/10.1115/DSCC2009-2716>
- [48] **Gong, Q., Li, Y., & Peng, Z.-R.** (2007b). Trip Based Power Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicle with Two-Scale Dynamic Programming. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 12–19). Arlington, TX, USA: IEEE. <http://doi.org/10.1109/VPPC.2007.4544089>
- [49] **Wang, R., & Lukic, S. M.** (2012). Dynamic Programming Technique in Hybrid Electric Vehicle Optimization. In *IEEE International Electric Vehicle Conference* (pp. 1–8). Greenville, SC, USA: IEEE. <http://doi.org/10.1109/IEVC.2012.6183284>
- [50] **Sundström, O., Guzzella, L., & Soltic, P.** (2008). Optimal Hybridization in Two Parallel Hybrid Electric Vehicles Using Dynamic Programming. In *17th IFAC World Congress The International Federation of Automatic Control* (pp. 4642–4647). Seoul, Korea.
- [51] **Koot, M., Kessels, J. T. B. A., Jager, B. de, Heemels, W. P. M. H., Bosch, P. P. J. van den, & Maarten Steinbuch.** (2005). Energy Management Strategies for Vehicular Electric Power Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(3), 771–782.

- [52] **Back, D. M.** (2005). *Prädiktive Antriebsregelung zum Energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen*. Universität Karlsruhe.
- [53] **Back, M., Simons, M., Kirschaum, F., & Krebs, V.** (2002). Predictive Control of Drivetrains. In *15th IFAC Triennial World Congress* (pp. 1506–1506). Barcelona, Spain.
- [54] **O’Keefe, M. P., & Markel, T.** (2006). Dynamic Programming Applied to Investigate Energy Management Strategies for a Plug-in HEV. In *22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition* (pp. 1–12). Yokohama, Japan.
- [55] **Lin, C.-C., Pengl, H., & Grizzle, J. W.** (2004). A Stochastic Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles. In *American Control Conference* (pp. 4710–4715). Boston, MA, USA: IEEE.
- [56] **Piccolo, A., Ippolito, L., Galdi, V., & Vaccaro, A.** (2001). Optimisation of energy flow management in hybrid electric vehicles via genetic algorithms. In ... , *2001. Proceedings. 2001 ...* (pp. 434–439). Como, Italy. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=936493
- [57] **Huang, B., Wang, Z., & Xu, Y.** (2006). Multi-Objective Genetic Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Parameter Optimization. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 5177–5182). Beijing, China: Ieee. <http://doi.org/10.1109/IROS.2006.281654>
- [58] **Gao, W., & Porandla, S. K.** (2005). Design Optimization of a Parallel Hybrid Electric Powertrain. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 530–535). Chicago, IL, USA.
- [59] **Song, P., Guan, E., Zhao, L., & Liu, S.** (2006). Hybrid Electric Vehicles with Multilevel Cascaded Converter using Genetic Algorithm. In *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* (pp. 1–6). Singapore: Ieee. <http://doi.org/10.1109/ICIEA.2006.257211>
- [60] **Zhang, B., Chen, Z., Mi, C., Murphey, Y. L., & Max, M.** (2009). Multi-objective Parameter Optimization of a Series Hybrid Electric Vehicle Using Evolutionary Algorithms. In *Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 921–925). Dearborn, MI, USA.
- [61] **Pisu, P., Slani, E., Rizzoni, G., & Sergio M. Savaresi.** (2003). A LMI-based Supervisory Robust Control for Hybrid Vehicles. In *American Control Conference*, (pp. 4681–4686). Denver, Colorado, USA.
- [62] **Fekri, S., & Assadian, F.** (2012). The Role and Use of Robust Multivariable Control in Hybrid Electric Vehicle Energy Management - Part I: An Overview. In *IEEE International Conference on Control Applications* (pp. 303–309). Dubrovnik, Croatia.

- [63] **Paganelli, G., & Tateno, M.** (2001). Control development for a hybrid-electric sport-utility vehicle: strategy, implementation and field test results. In *Proceedings of the ...* (pp. 5064–5069). Arlington, VA, USA. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=945787
- [64] **Wang, J., Wang, Q., Wang, P., & Zeng, X.** (2014). **Wang, J., Wang, Q., Wang, P., & Zeng, X.** (2014). The Development and Verification of a Novel ECMS of Hybrid Electric Bus. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014(2014), 1–14. <http://doi.org/10.1155/2014/981845>
- [65] **Škugor, B., Pavkovi, D., Deur, J., & Member, S.** (2012). A Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle Control Strategy Including Instantaneous Optimization of Equivalent Fuel Consumption. In *International Conference on Control Applications* (pp. 310–316). Dubrovnik, Croatia.
- [66] **Kessels, J. T. B. A., Koot, M. W. T., Bosch, P. P. J. van den, & Kok, D. B.** (2008). Online Energy Management for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(6), 3428–3440.
- [67] **Chasse, A., & Sciarretta, A.** (2011). Supervisory control of hybrid powertrains: an experimental benchmark of offline optimization and online energy management. In *Control engineering practice* (pp. 109–117). Rueil-Malmaison, France. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066111000748>
- [68] **Onori, S., & Serrao, L.** (2011). **Onori, S., & Serrao, L.** (2011). On Adaptive-ECMS strategies for hybrid electric vehicles. In *Int. Scient. Conf. on hybrid and electric vehicles – RHEVE 2011* (pp. 1–7). Rueil-Malmaison, France. Retrieved from http://myweb.clemson.edu/~sonori/Publications/01_Onori_RHEVE2011.pdf
- [69] **Martin, S.** (2012). Adaptive Control Using Map-Based ECMS for a PHEV. In T. Paolino (Ed.), *IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling* (pp. 357–362). Rueil-Malmaison, France. <http://doi.org/10.3182/20121023-3-FR-4025.00074>
- [70] **Sivertsson, M., & Sundstr, C.** (2011). Adaptive Control of a Hybrid Powertrain with Map-based ECMS. In *18th IFAC World Congress* (pp. 2949–2954). Milano, Italy.
- [71] **Musardo, C., Rizzoni, G., Guezennec, Y., & Staccia, B.** (2005). A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management. *European Journal of Control*, 11(4-5), 509–524. <http://doi.org/10.3166/ejc.11.509-524>
- [72] **Fu, L., Ozguner, U., Tulpule, P., & Marano, V.** (2011). Real-Time Energy Management and Sensitivity Study for Hybrid Electric Vehicles.

American Control Conference, (pp. 2113–2118). San Fransisco, CA, USA. doi:10.1109/ACC.2011.5991374

- [73] **Maciejowski, J. M.** (2000). *Predictive control: with constraints* (p. 331). Prentice Hall.
- [74] **West, M. J., Bingham, C. M., & Schofield, N.** (2003). Predictive control for energy management in all/more electric vehicles with multiple energy storage units. In *Electric Machines and ...* (pp. 222–228). Madison, Wisconsin USA: IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1211267
- [75] **Beck, R., Saenger, S., Richert, F., Bollig, A., Neiß, K., Scholt, T., ... Abel, D.** (2005). Model Predictive Control of a Parallel Hybrid Vehicle Drivetrain. In *44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference* (pp. 2670–2675). Seville, Spain: IEEE.
- [76] **Lu, Z., Song, J., Yuan, H., & Shen, L.** (2013). MPC-based torque distribution strategy for energy management of power-split hybrid electric vehicles. *32nd Chinese Control Conference*, (pp. 7650–7655). Xi'an, China: IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6640787
- [77] **Yu, K., Mukai, M., & Kawabe, T.** (2013). Model Predictive Control of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle System with Slope Information. In *IEEE SICE Annual Conference*. Nagoya, Japan: IEEE.
- [78] **Kim, T. S., Manzie, C., & Sharma, R.** (2014). Model Predictive Control of Velocity and Torque Split in a Parallel Hybrid Vehicle. In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (pp. 2014–2019). San Antonio, TX, USA: IEEE.
- [79] **He, L., Shen, T., Yu, L., Feng, N., & Song, J.** (2013). A Model-Predictive-Control-Based Torque Demand Control Approach for Parallel Hybrid Powertrains. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(3), 1041–1052.
- [80] **Yu, K., Mukai, M., & Kawabe, T.** (2012). Model Predictive Control of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle System. *Artificial Life and Robotics*, 17(2), 221–226. <http://doi.org/10.1007/s10015-012-0046-0>
- [81] **Borhan, H., Member, S., Vahidi, A., Phillips, A. M., Kuang, M. L., Kolmanovsky, I. V., & Cairano, S. Di.** (2012). MPC-Based Energy Management of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20(3), 593–603.
- [82] **Borhan, H. A., & Vahidi, A.** (2010). Model Predictive Control of a Power-split Hybrid Electric Vehicle with Combined Battery and Ultracapacitor Energy Storage. In *American Control Conference* (pp. 5031–5036).

- [83] **Engman, J.** (2011). *Model Predictive Control for Series-Parallel Plug-In Hybrid Electrical Vehicle*. Linköpings Universitet.
- [84] **Caihao, W., Xiaowu, Z., & Jing, S. U. N.** (2013). Adaptive Model Predictive Control for Hybrid Electric Vehicles Power Management. In *32nd Chinese Control Conference* (pp. 7756–7761). Xi'an, China.
- [85] **Bordons, C., Ridao, M. A., Perez, A., Arce, A., & David Marcos.** (2010). Model Predictive Control for Power Management in Hybrid Fuel Cell Vehicles. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 1–6). Lille, France: IEEE. <http://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729119>
- [86] **Nanao, M., & Ohtsuka, T.** (2010). Nonlinear Model Predictive Control for Vehicle Collision Avoidance Using C/GMRES Algorithm. In *IEEE International Conference on Control Applications* (pp. 1630–1635). Yokohoma, Japan: IEEE. <http://doi.org/10.1109/CCA.2010.5611112>
- [87] **Ohtsuka, T.** (2004). A continuation/GMRES method for fast computation of nonlinear receding horizon control. *Automatica*, 40(4), 563–574. <http://doi.org/10.1016/j.automatica.2003.11.005>
- [88] **Ohtsuka, T.** (2000). Continuation/GMRES Method for Fast Algorithm of Nonlinear Receding Horizon Control. In *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference* (pp. 766–771). Sydney, Australia.
- [89] **Sharma, O. P., & Onori, S.** (2012). Analysis of Pontryagin's Minimum Principle-Based Energy Management Strategy for PHEV Applications. In *Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 11th Motion and Vibration Conference* (pp. 1–6). Florida, USA: ASME.
- [90] **Serrao, L., Onori, S., & Rizzoni, G.** (2009). Equivalent Consumption Minimization Strategy as a Realization of Pontryagin's Minimum Principle for HEV Control. In *American Control Conference* (pp. 3964–3969). St. Louis, MO, USA.
- [91] **Guardiola, C., Pla, B., Onori, S., & Rizzoni, G.** (2014). Insight Into the HEV/PHEV Optimal Control Solution Based on a New Tuning Method. *Control Engineering Practice*, 29(2014), 247–256. <http://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.01.022>
- [92] **Boehme, T. J., Held, F., Rollinger, C., Rabba, H., Schultalbers, M., & Lampe, B.** (2013). Application of an Optimal Control Problem to a Trip-Based Energy Management for Electric Vehicles. *SAE International Journal of Alternative Power*, 2(1), 115–126. <http://doi.org/10.4271/2013-01-1465>

- [93] **Tulpule, P., Marano, V., & Rizzoni, G.** (2011). Effect of Traffic, Road and Weather Information on PHEV Energy Management. In *10th International Conference on Engines & Vehicles*. Napoli, Italy. <http://doi.org/10.4271/2011-24-0162>
- [94] **Bin, Y., Li, Y., Gong, Q., & Peng, Z.-R.** (2009). Multiple Traffic Information Based Trip Model and Optimal Power Management for Plug-In Hybrid Electric Vehicles. In *American Control Conference* (pp. 4607–4612). St. Louis, MO, USA.
- [95] **Gong, Q., Li, Y., & Peng, Z.-R.** (2007a). Optimal Power Management of Plug-In Hybrid Electric Vehicles With Trip Modeling. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (pp. 53–62). Seattle, Washington, USA: Asme. <http://doi.org/10.1115/IMECE2007-41638>
- [96] **Gong, Q., Li, Y., & Peng, Z.** (2009). Trip Based Optimal Power Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicle with Advanced Traffic Modeling. *SAE Int. J. Engines*, 1(1), 861–872. <http://doi.org/10.1109/ACC.2008.4586989>
- [97] **Gong, Q., Member, S., Li, Y., & Peng, Z.** (2008). Trip-Based Optimal Power Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(6), 3393–3401.
- [98] **Gong, Q., Li, Y., & Peng, Z.-R.** (2008). Trip Based Optimal Power Management of Plug-In Hybrid Electric Vehicles Using Gas-Kinetic Traffic Flow Model. In *American Control Conference* (Vol. 1, pp. 3225–3230). Seattle, Washington, USA.
- [99] **Gong, Q., & Li, Y.** (2009). Power Management of Plug-In Hybrid Electric Vehicles Enhanced with Neural Network Based Freeway Trip Modeling. In *American Control Conference* (pp. 4601–4606). St. Louis, MO, USA.
- [100] **Zhang, C., & Vahidi, A.** (2010). Real-Time Optimal Control of Plug-in Hybrid Vehicles with Trip Preview. In *American Control Conference* (pp. 6917–6922). Baltimore, MD, USA.
- [101] **Yu, H., Kuang, M., & McGee, R.** (2011). Trip-Oriented Energy Management Control Strategy for Plug-In Hybrid Electric Vehicles. In *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference* (pp. 5805–5812). Orlando, FL, USA: Ieee. <http://doi.org/10.1109/CDC.2011.6160609>
- [102] **Taghavipour, A., Vajedi, M., Azad, N. L., & McPhee, J.** (2012). Predictive Power Management Strategy for a PHEV Based on Different Levels of Trip. In *IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling* (pp. 326–333). Reuil-Malmaison, France.

- [103] **Kural, E., & Güvenç, B. A.** (2014). Predictive-Equivalent Consumption Minimization Strategy for Energy Management of a Parallel Hybrid Vehicle for Optimal Recuperation. *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 18(3).
- [104] **Martinez, J., & Canudas-de-wit, C.** (2005). A Safe Longitudinal Control for Adaptive Cruise Control and Stop-and-Go Scenarios. *IEEE Transaction On Control System Technology*, 15(2), 1–13.
- [105] **Luo, L., Liu, H., Li, P., & Wang, H.** (2010). Model predictive control for adaptive cruise control with multi-objectives: comfort, fuel-economy, safety and car-following. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 11(3), 191–201. <http://doi.org/10.1631/jzus.A0900374>
- [106] **Naus, G., Ploeg, J., Van De Molengraft, R., & Steinbuch, M.** (2008). Explicit MPC design and performance-based tuning of an Adaptive Cruise Control Stop-&-Go. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings* (pp. 434–439). Eindhoven, The Netherlands. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4621248
- [107] **Hiraoka, T., Kunitatsu, T., Nishihara, O., & Kumamoto, H.** (2009). Modeling of driver following behavior based on minimum-jerk theory. In *Intelligent Transportation Society of America - 12th World Congress on Intelligent Transport Systems 2005* (pp. 1989–2000). San Fransisco, CA, USA. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84878504891&partnerID=40&md5=51c02825a586892837048668a7573565>
- [108] **Ioannou, P., Xu, Z., Eckert, S., Clemons, D., & Sieja, T.** (1993). Intelligent cruise control: theory and experiment. In *Proceedings of 32nd IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 1885–1890). San Antonio, TX, USA: IEEE. <http://doi.org/10.1109/CDC.1993.325521>
- [109] **Kitazono, S., & Ohmori, H.** (2006). Semi-Autonomous Adaptive Cruise Control in Mixed Traffic. In *SICE-ICASE, 2006. International Joint ...* (pp. 3240–3245). Busan, Korea. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4108316
- [110] **Hedrick, J. K., Cho, S., & Hedrick, S. C. J. K.** (1995). Vehicle Longitudinal Control Using an Observer. In *American Control Conference* (pp. 31–35). Seattle, Washington, USA.
- [111] **Shrivastava, A., & Li, P. Y. P.** (2002). Traffic flow stability induced by constant time headway policy for adaptive cruise control vehicles. In *Proceedings of the 2000 American Control Conference* (Vol. 3, pp. 1503–1508). Chicago, IL, USA. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=879450

- [112] **Corona, D., & De Schutter, B.** (2008). Adaptive Cruise Control for a SMART Car: A Comparison Benchmark for MPC-PWA Control Methods. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(2), 365–372. <http://doi.org/10.1109/TCST.2007.908212>
- [113] **Hellström, E., Ivarsson, M., Åslund, J., Nielsen, L., & Aslund, J.** (2007). Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption. *Control Engineering Practice*, 17(2), 245–254.
- [114] **Bageshwar, V. L., Garrard, W. L., & Rajamani, R.** (2004). Model Predictive Control of Transitional Maneuvers for Adaptive Cruise Control Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 53(5), 1573–1585. <http://doi.org/10.1109/TVT.2004.833625>
- [115] **Güvenç, B. A. B. A., & Kural, E.** (2006). Adaptive cruise control simulator: A low-cost, multiple-driver-in-the-loop simulator. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(3), 42–55.
- [116] **Kural, E., & Güvenç, B.** (2010). Model predictive adaptive cruise control. In *2010 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)* (pp. 1455–1461). Istanbul, Türkiye. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5642478
- [117] **Zweck, M., & Schuch, M.** (2013). Traffic light assistant: Applying cooperative ITS in European cities and vehicles. In *International Conference on Connected Vehicles and Expo* (pp. 509–513). Las Vegas, Nevada, USA. <http://doi.org/10.1109/ICCVE.2013.184>
- [118] **Kural, E., Jones, S., Parrilla, A. F., & Grauers, A.** (2014). Traffic Light Assistant System for Optimized Energy Consumption in an Electric Vehicle. In *The 3rd International Conference on Connected Vehicles & Expo (ICCVE 2014)*. Vienna, Austria.
- [119] **Parrilla, A. F.** (2014). *Development of energy-optimal control strategies for a fully electric vehicle*.
- [120] **Wang, L.** (2009). *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB. Engineering* (p. 403). Springer. <http://doi.org/10.1007/978-1-84882-331-0>
- [121] **Camacho, E., & Alba, C.** (2013). *Model predictive control* (p. 294). Publisher: Springer-Verlag,.
- [122] OpEneR project webpage <http://www.fp7-opener.eu>. (n.d.). Retrieved from <http://www.fp7-opener.eu>.
- [123] **Sixto, V., Lopez, P., Sanchez, F., Jones, S., Kural, E., Parrilla, A. F., & LeRhun, F.** (2014). Advanced co-simulation HMI environment for fully Electric Vehicles. In *2014 IEEE International Electric Vehicle*

Conference (IEVC) (pp. 1–7). Florence, Italy: Ieee.
<http://doi.org/10.1109/IEVC.2014.7056201>

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Emre KURAL

Doğum Tarihi ve Yeri: 15.05.1980 İstanbul

E-posta : emrekural@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2004, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2006, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi Anabilim Dalı, Sistem Dinamiği ve Kontrol

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2005–2007 İstanbul Teknik Üniversitesi Mekanik Araştırmalar Laboratuvarı (MEKAR) - Araştırmacı
- 2007–2011 yılları arasında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü - Araştırmacı
- 2011 - Avusturya merkezli AVL GmbH (Otomotiv - Mühendislik Danışmalığı Firması) - Hibrid ve Elektrikli Araçlar Simülasyon Mühendisi
- 2012 AVL Powertrain Engineering Innovation Award – 2nd Place
- 2014 IEEE The 3rd International Conference on Connected Vehicles/Best Paper Award Finalist

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kural E.** and Güvenç B. A., 2010. Model Predictive Adaptive Cruise Control, in IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, 2010, İstanbul, Turkey.
- **Kural, E.** and Güvenç, B. A. 2014. Predictive-Equivalent Consumption Minimization Strategy for Energy Management of a Parallel Hybrid Vehicle for Optimal Recuperation, *Gazi Üniversitesi Politeknik Derg.*, 2014.