

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN MODÜLER ENERJİ
YÖNETİM SİSTEMİ TASARLANMASI VE
GERÇEKLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

AKİF DEMİRÇALI

DENİZLİ, MAYIS - 2021

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN MODÜLER ENERJİ
YÖNETİM SİSTEMİ TASARLANMASI VE
GERÇEKLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

AKİF DEMİRÇALI

DENİZLİ, MAYIS - 2021

Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2019FEBE057 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.


AKİF DEMİRÇALI

ÖZET

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN MODÜLER ENERJİ YÖNETİM
SİSTEMİ TASARLANMASI VE GERÇEKLENMESİ**
DOKTORA TEZİ
AKİF DEMİRÇALI
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. SELİM KÖROĞLU)

DENİZLİ, MAYIS - 2021

Petrol fiyatları ve çevresel kaygılar gibi sebeplerle elektrikli araçların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Elektrikli araçlarda araç verimini en çok etkileyen enerji depolama birimleri ve bu birimlerin birlikte kullanımı konusu tüm açılardan incelenmektedir. Günümüzdeki enerji depolama birimlerinden batarya, ultrakapasitör (UC), yakıt hücresi, volan ve güneş paneli gibi birimlerin hiçbiri elektrikli aracın tüm koşullardaki ihtiyaçlarını karşılamak için yeterli değildir. Dolayısıyla bu birimlerden iki ya da daha fazlasının bir arada kullanımı kabul edilen ve yaygın bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Aracın ihtiyaç duyduğu yüksek enerji yoğunluğunun batarya ya da yakıt hücresinden ve yüksek güç yoğunluğunun da UC ya da volan gibi bileşenlerden sağlanması hedeflenmektedir. Böylelikle, tüm bu bileşenlerin zayıf yönlerinin kullanılan diğer bileşenin güçlü özellikleri ile giderilmesi sağlanmaktadır. Fakat iki enerji depolama biriminin bir arada kullanımı tüm detaylarıyla iyi bir tasarım yapılmasını gerektirmektedir.

Bu tez çalışması ile birlikte gerçek zamanlı uygulanabilen, enerji verimliliğini sağlayan ve modüler bir enerji yönetim sistemi (EYS) tasarlanmıştır. Tasarlanan EYS ile birlikte araçta yer alan batarya ve UC'den en yüksek düzeyde fayda sağlanması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen EYS sistemi Jaya optimizasyon yöntemine dayanan gerçek zamanlı olarak en uygun kararların verilmesini sağlayan bir sistemdir. Oluşturulan sistemde UC'nin istenilen anda istenilen şekilde davranabilmesini gerçekleştirmek için çift yönlü seri rezonans dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Böylelikle EYS'nin vereceği şarj ve deşarj kararlarının büyük bir verimle ve hızla uygulanması sağlanmıştır. Önerilen yöntemin test edilmesi için bir deney düzeneği hazırlanmış ve EYS'nin performansı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar kural tabanlı EYS ile karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin enerji kullanımında ortaya koyduğu fayda gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Elektrikli araç, Enerji yönetim sistemi, Batarya, Ultrakapasitör, Optimizasyon, Jaya Optimizasyon Yöntemi, DC-DC Dönüştürücü

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MODULAR ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES

PH.D THESIS

AKİF DEMİRÇALI

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. SELİM KÖROĞLU)

DENİZLİ, MAY 2021

The use of electric vehicles is increasing day by day due to reasons such as oil prices and environmental concerns. The issue of energy storage units, which most affect vehicle efficiency in electric vehicles, and the joint use of these units are examined from all angles. Among the energy storage units of today, none of the units such as batteries, ultracapacitors (UC), fuel cells, flywheels and solar panels are sufficient to meet the needs of the electric vehicle in all conditions. Therefore, the combination of two or more of these units emerges as an accepted and common solution. It is aimed to provide the high energy density required by the vehicle from the battery or fuel cell, and the high power density from components such as UC or flywheel. In this way, it is ensured that the weaknesses of all these components are overcome by the strengths of the other component used. However, the combination of two energy storage units requires a good design with all the details.

With this thesis, a modular energy management system (EMS) has been designed that can be applied in real time and provides energy efficiency. With the designed EMS, it is aimed to benefit from the battery and UC in the vehicle at the highest level. The implemented EMS system is a system that enables the most appropriate decisions to be made in real time, based on the Jaya optimization method. In the system created, a bidirectional serial resonance converter is designed in order to make the UC behave as desired at any time. In this way, the charge and discharge decisions of the EMS are implemented quickly and efficiently. An experimental setup is prepared to test the proposed method and the effect of EMS on the examined system. The results obtained were compared with the rule-based EMS and the benefit of the proposed method in energy use is shown.

KEYWORDS: Electric vehicle, Energy management system, Battery, Ultracapacitor, Optimization, Jaya optimization method, DC-DC converter

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	x
KISALTMALAR LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Bilgiler	1
1.2 Literatür Özeti	3
1.3 Tezin Amacı	9
1.4 Materyal ve Yöntem	10
1.5 Tezin Katkısı	11
2. ELEKTRİKLİ ARAÇ MODELLENMESİ	14
2.1 Elektrikli Araç Dinamik Modeli.....	14
2.2 Standart Sürüş Profilleri	17
2.3 Elektrikli Araç Güç ve Tork Talebi.....	20
2.4 Elektrikli Araç Topolojileri	21
2.5 Araç Bileşenleri Modellenmesi	25
2.5.1 Batarya Modeli	26
2.5.2 Ultrakapasitör Modeli	31
2.5.3 Motor Modeli.....	33
2.5.4 Motor Sürücüsü Modeli	35
2.5.5 DC-DC Dönüştürücü	36
3. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ	38
3.1 Kural Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri.....	40
3.2 Bulanık Mantık Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri.....	42
3.3 Global Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri.....	44
3.4 Gerçek Zamanlı Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri...	45
4. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ BENZETİM ÇALIŞMALARARI.....	48
4.1 Kural ve Bulanık Kural Tabanlı EYS Benzetimleri	50
4.1.1 Kural Tabanlı EYS Yapısı	54
4.1.2 Bulanık Kural Tabanlı EYS Yapısı	55
4.1.3 Kural ve Bulanık Kural Tabanlı EYS Benzetim Sonuçları	59
4.2 Dinamik Programlama ile EYS Benzetimi.....	61
4.2.1 Dinamik Programlamanın Temelleri	62
4.2.2 Dinamik Programlama Örneği.....	64
4.2.3 Elektrikli Araç için Dinamik Programlama Tabanlı EYS Benzetimi	68
4.2.4 Dinamik Programlama Tabanlı EYS Benzetim Sonuçları	70
4.3 Önerilen Jaya Optimizasyon Yöntemi ile EYS Benzetimi	73
4.3.1 Jaya Optimizasyon Yönteminin Temelleri	74
4.3.2 Elektrikli Araç için Jaya Optimizasyon Yöntemi Tabanlı EYS Benzetimi	75

4.3.3	Jaya Tabanlı EYS Benzetim Sonuçları.....	78
4.3.4	Arama Uzayının Dinamik Olarak Kısıtlanması.....	79
5.	ARAÇ BİLEŞENLERİ VE DENEY DÜZENEGİ	85
5.1	ALATAY Elektrikli Aracı Bileşenleri	86
5.1.1	Batarya Ünitesi	86
5.1.2	Ultrakapasitör Modülü.....	87
5.1.3	BLDC Motor.....	88
5.1.4	Motor Sürücüsü.....	88
5.2	Çift Yönlü CLLC Seri Rezonans Dönüştürücü.....	90
5.2.1	Matematiksel Model	92
5.2.2	Benzetim Çalışmaları.....	99
5.2.3	Tasarım Detayları	103
5.2.4	Kontrol Yöntemi	108
5.2.5	Dönüştürücünün İmalatı ve Test Edilmesi.....	110
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	116
6.1	EYS Test Düzenegi	116
6.2	Sadece Batarya Olması Durumu	119
6.3	Kural Tabanlı EYS Uygulaması.....	120
6.4	Jaya Tabanlı EYS Uygulaması.....	123
6.5	Yöntemlerin Karşılaştırması.....	124
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	128
8.	KAYNAKLAR.....	132
9.	EKLER.....	144
	EK A Bulanık Mantık Tabanlı EYS Kuralları	144
	EK B CLLC Dönüştürücü Tasarım Detayları	146
10.	ÖZGEÇMİŞ.....	149

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Tasarlanan EYS'nin prensip şeması.....	10
Şekil 2.1: Araç üzerine etkiyen temel kuvvetler.....	15
Şekil 2.2: ECE sürüş profili hız-zaman grafiği.....	19
Şekil 2.3: Standart sürüş profilleri, a) NEDC, b) UDDS, c) FTP-75, d) NYCC.....	19
Şekil 2.4: ECE sürüş profili araç güç talebi.....	21
Şekil 2.5: ECE sürüş profili araç tork talebi.....	21
Şekil 2.6: Pasif paralel bağlantı.....	22
Şekil 2.7: UC doğrudan, batarya dönüştürücü üzerinden bağlantı topolojisi.....	23
Şekil 2.8: Batarya doğrudan, UC dönüştürücü üzerinden bağlantı topolojisi.....	23
Şekil 2.9: Tam ayrılmış topoloji.....	24
Şekil 2.10: Seri iki DC-DC dönüştürücü.....	24
Şekil 2.11: Batarya – UC bağlantı topolojilerinin karşılaştırması.....	25
Şekil 2.12: Araç güç talebi.....	28
Şekil 2.13: Batarya hücre eşdeğer devresi.....	30
Şekil 2.14: Lityum iyon batarya için batarya açık devre gerilimi-batarya SOC ilişkisi.....	30
Şekil 2.15: Ultrakapasitör ve bazı önemli batarya türlerinin güç ve enerji yoğunlukları.....	31
Şekil 2.16: UC eşdeğer devresi.....	32
Şekil 2.17: Motorun hız ve torka bağlı verim haritası.....	35
Şekil 2.18: Motor sürücü hız ve torka bağlı verim haritası.....	36
Şekil 2.19: DC-DC dönüştürücü blok şeması.....	37
Şekil 3.1: Elektrikli araçlarda kullanılan enerji yönetim yöntemlerinin gruplandırılması.....	39
Şekil 3.2: Kural tabanlı EYS ana akış şeması (Golchoubian ve Azad 2017).....	41
Şekil 3.3: Bulanık mantık prensip şeması.....	42
Şekil 3.4: Literatürde yer alan bazı bulanık mantık EYS çalışmalarında kullanılan giriş-çıkışlar.....	43
Şekil 3.5: DP tabanlı EYS prensip şeması.....	45
Şekil 3.6: Model öngörülü kontrol prensip şeması.....	46
Şekil 3.7: Sezgisel optimizasyon yöntemleri prensip şeması.....	47
Şekil 4.1: Enerji yönetim sistemi genel prensip şeması.....	48
Şekil 4.2: Kural ve bulanık kural tabanlı EYS benzetimi modeli.....	51
Şekil 4.3: Aerodinamik araç modeli.....	52
Şekil 4.4: Araç güç talebinin depolama birimlerine iletilme modeli.....	53
Şekil 4.5: Çift taraflı DC-DC dönüştürücü bloğunun iç görünümü.....	53
Şekil 4.6: Kural tabanlı enerji yönetim sistemi bloğu.....	54
Şekil 4.7: Kural tabanlı EYS kuralları akış şeması.....	55
Şekil 4.8: Bulanık kural tabanlı EYS blok şeması.....	56
Şekil 4.9: EYS bulanık mantık sistemi tasarım arayüzü.....	56

Şekil 4.10: Bulanık mantık girişlerinin üyelik fonksiyonları. a) Batarya doluluk oranı, b) UC doluluk oranı, c) Güç talebi.	58
Şekil 4.11: Bulanık mantık çıkış üyelik fonksiyonları (P_{UC}).	58
Şekil 4.12: Talep gücü ve UC doluluk oranına bağlı UC çıkış gücünü belirleyen bulanık mantık kurallarının yüzey görünümü.	59
Şekil 4.13: Kural ve bulanık kural tabanlı EYS için ECE sürüş profiline göre batarya SOC miktarı değişimi.	60
Şekil 4.14: Kural ve bulanık kural tabanlı EYS için ECE sürüş profiline göre UC SOC miktarı değişimi.	60
Şekil 4.15: Kural tabanlı EYS ile oluşan güç dağılımı.	61
Şekil 4.16: Bulanık mantık EYS ile oluşan güç dağılımı.	61
Şekil 4.17: Dinamik programlama örneği.	65
Şekil 4.18: DP örneğinin ileri yinelemeli olarak çözümü.	66
Şekil 4.19: DP örneğinin ileri yinelemeli olarak çözümünden elde edilen en iyi rota.	66
Şekil 4.20: DP örneğinin geri yinelemeli olarak çözümü.	67
Şekil 4.21: DP örneğinin geri yinelemeli olarak çözümünden elde edilen en iyi rota.	68
Şekil 4.22: ΔSOC adım aralığının sonuçlara ve hesaplama süresine etkisi.	70
Şekil 4.23: Bataryanın sürüş profili boyunca uygun ve uygun olmayan çalışma alanları.	72
Şekil 4.24: DP tabanlı EYS ile elde edilen güç dağılımı.	72
Şekil 4.25: DP tabanlı EYS benzetiminde batarya ve UC SOC değişimleri.	73
Şekil 4.26: Jaya akış şeması.	75
Şekil 4.27: Jaya optimizasyon yöntemi tabanlı EYS akış şeması.	76
Şekil 4.28: ECE sürüş profiline göre Jaya Tabanlı EYS ile elde edilen güç dağılımları.	78
Şekil 4.29: ECE sürüş profilinde Jaya tabanlı EYS ile batarya ve UC SOC değişimleri.	79
Şekil 4.30: ECE sürüş profili için a) Hız-güç talebi, b) Güç talebinde meydana gelen değişim.	80
Şekil 4.31: UC gücünün arama sınırlarının güç ihtiyacındaki değişime bağlı olarak belirlenmesi.	81
Şekil 4.32: ECE sürüş profili için arama uzayının alt ve üst limitlerini belirleyen w değişkeninin farklı değerlerinde sürüş profilinde elde edilen toplam kayıp miktarı ve çeşitli akım değerlerinin gösterimi.	83
Şekil 4.33: UC gücünün arama sınırlarının güç ihtiyacındaki değişime bağlı olarak belirlenmesi, $w = 6$	84
Şekil 5.1: ALATAY elektrikli aracı.	85
Şekil 5.2: Batarya ünitesi.	86
Şekil 5.3: UC modülü ve koruma devreleri.	87
Şekil 5.4: BLDC motor görünümü.	88
Şekil 5.5: Kelly KBL96151 BLDC motor sürücü görünümü.	89
Şekil 5.6: Çift yönlü, çift taraflı aktif, tam köprü CLLC rezonans dönüştürücü prensip şeması.	90
Şekil 5.7: Rezonans dönüştürücünün, a) CLLC eşdeğer devresi, b) Eşdeğer devre birincil tarafa indirgenmiş FHA gösterimi.	93

Şekil 5.8: Farklı çalışma frekansları için transformatör dönüştürme oranı 1:1 olan bir rezonans dönüştürücünün farklı yük değerlerinde gerilim kazanç oranları.....	94
Şekil 5.9: LN ve Qe 'nin değişimiyle dönüştürücü kazancının değişimi, a) $LN = 5$, b) $LN = 10$, c) $LN = 15$	96
Şekil 5.10: CLLC dönüştürücü PSIM benzetim devresi.....	99
Şekil 5.11: 80 kHz anahtarlama frekansında elde edilen dönüştürücü dalga şekilleri.....	100
Şekil 5.12: 100 kHz anahtarlama frekansında (rezonans frekansı) elde edilen dönüştürücü dalga şekilleri.....	102
Şekil 5.13: 140 kHz anahtarlama frekansında elde edilen dönüştürücü dalga şekilleri.....	102
Şekil 5.14: Çift yönlü çift taraflı aktif tam köprü seri rezonans DC-DC dönüştürücü bölümleri.....	103
Şekil 5.15: Dönüştürücü bölümlerinin 3 boyutlu gösterimi, a) Ana kontrol kartı, b) Güç katı Mosfet sürme kartları.....	104
Şekil 5.16: Cosmo Ferrites Ltd. firmasının EE6527 kodlu E şeklindeki ferrit nüve fiziksel ölçüleri.....	107
Şekil 5.17: Transformatör sarım düzeni.....	108
Şekil 5.18: Dönüştürücü kontrol algoritması.....	109
Şekil 5.19: DC-DC dönüştürücü PID kontrol şeması.....	110
Şekil 5.20: İmal edilen dönüştürücü ve bölümleri.....	111
Şekil 5.21: Dönüştürücü test düzeneği.....	112
Şekil 5.22: Dönüştürücü ileri yön güç aktarımında elde edilen gerilim kazancı değerleri.....	113
Şekil 5.23: Dönüştürücü ileri yön güç aktarımında elde edilen çıkış gücü değerleri.....	113
Şekil 5.24: Dönüştürücü geri yön güç aktarımında elde edilen gerilim kazancı değerleri.....	114
Şekil 5.25: Dönüştürücü geri yön güç aktarımında elde edilen çıkış gücü değerleri.....	114
Şekil 5.26: Dönüştürücü bataryadan UC'ye güç aktarımında verilen referansı takip karakteristiği.....	115
Şekil 6.1: EYS test deney düzeneği.....	116
Şekil 6.2: HMI gözlem ve kayıt sayfası.....	117
Şekil 6.3: Deney düzeneği ile ECE sürüş profili için elde edilen referans hız - gerçek hız değerleri.....	118
Şekil 6.4: Deney düzeneği ile ECE sürüş profili için elde edilen referans tork ve ölçülen tork.....	119
Şekil 6.5: Motor sürücü girişinden ve motor milinden ölçülen güç karşılaştırılması.....	120
Şekil 6.6: Kural tabanlı EYS güç paylaşım grafiği.....	121
Şekil 6.7: Kural tabanlı EYS ile UC SOC değişimi.....	122
Şekil 6.8: Kural tabanlı EYS ile UC SOC değişimi (geniş eksen sınırları ile).....	122
Şekil 6.9: Jaya tabanlı EYS güç paylaşım grafiği.....	123
Şekil 6.10: Jaya tabanlı EYS ile UC SOC değişimi.....	124
Şekil 6.11: Batarya akımlarının karşılaştırması.....	126
Şekil 9.1: CLLC dönüştürücü ana kontrol kartı giriş çıkış pinleri.....	146

Şekil 9.2: CLLC dönüştürücü Mosfet sürme kartı izole gerilim elde edilmesi.	146
Şekil 9.3: CLLC dönüştürücü Mosfet sürme kartı optoizolatör devresi.....	147
Şekil 9.4: CLLC dönüştürücü Mosfet sürme kartı Mosfet sürme devresi.	147
Şekil 9.5: CLLC dönüştürücü güç kartı şematığı.	148

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Araca ilişkin benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler.....	17
Tablo 2.2: Benzetimde kullanılan standart sürüş profillerinin bazı teknik özellikleri.....	18
Tablo 2.3: Çeşitli batarya türleri ve bazı özellikleri.....	27
Tablo 2.4: ECE sürüş profiline göre batarya boyutlandırması.....	28
Tablo 2.5: Samsung 18650 batarya hücresinin bazı karakteristik özellik ve değerleri.....	29
Tablo 2.6: BCAP0650 UC hücresine ait bazı teknik özellikleri.....	32
Tablo 2.7: UC'nin kullanım kılavuzundan eşdeğer devre parametrelerini elde etmek için gerekli olan denklemler (Shi ve Crow 2008).....	33
Tablo 2.8: Hesaplanan motor güç ve torkunun değerleri.....	34
Tablo 4.1: Araca ilişkin benzetim çalışmalarında kullanılan parametre ve eşik değerler.....	50
Tablo 4.2: DP tabanlı EYS algoritması.....	71
Tablo 4.3: Jaya optimizasyon yöntemi tabanlı EYS algoritması.....	77
Tablo 4.4: Arama uzayının alt ve üst limitlerini belirleyen w değişkeninin farklı değerleri için ECE sürüş profilinde elde edilen toplam kayıp miktarı ve çeşitli akım değerleri.....	82
Tablo 5.1: BLDC motor etiket değerleri.....	88
Tablo 5.2: Kelly KBL96151 BLDC motor sürücü etiket değerleri.....	89
Tablo 5.3: Dönüştürücüye ait temel alınan değişken ve tasarım kriterleri.....	91
Tablo 5.4: Rezonans tankı parametreleri.....	99
Tablo 5.5: Transformator oranı 1,75 seçildiği durum için rezonans dönüştürücünün bataryadan UC'ye güç sağlaması için (İleri Yön) elde etmesi gereken kazanç değerleri.....	105
Tablo 5.6: Transformator oranı 1,75 seçildiği durum için rezonans dönüştürücünün UC'den bataryaya güç sağlaması için (Geri Yön) elde etmesi gereken kazanç değerleri.....	106
Tablo 5.7: Cosmo Ferrites Ltd. firmasının C139 tipi nüvesinin özellikleri.....	107
Tablo 5.8: Üretimi gerçekleştirilen dönüştürücünün ölçülen rezonans tankı parametreleri.....	110
Tablo 6.1: Kural tabanlı EYS güç tanımlamaları.....	121
Tablo 6.2: Farklı EYS yöntemleriyle ölçülen batarya akımlarının karşılaştırılması.....	125
Tablo 6.3: Farklı EYS yöntemleriyle ölçülen batarya akımlarının karşılaştırılması.....	126
Tablo 6.4: Farklı EYS yöntemleriyle ölçülen UC akımlarının karşılaştırılması.....	126

SEMBOL LİSTESİ

F_{TR}	:	Çekme kuvveti
F_{LA}	:	Doğrusal ivmelenme kuvveti
F_{AD}	:	Aerodinamik kuvvet
F_R	:	Yuvarlanma direnci kuvveti
F_G	:	Yer çekimi kuvveti
F_{Gx}	:	Eğim direnci kuvveti
V_x	:	Araç hızı
r	:	Araç tekerlek yarıçapı
α	:	Aracın yüzeyle yaptığı açı
m	:	Aracın kütlesi
a	:	Aracın ivmesi
C_d	:	Sürüklenme katsayısı
A	:	Aracın ön yüzey alanı
ρ	:	Havanın yoğunluğu
K_r	:	Yuvarlanma direnci katsayısı
g	:	Yer çekimi ivmesi
P	:	Güç
ΔP	:	Güç değişimi
T	:	Tork
V_{OC}	:	Açık devre gerilimi
R_{eq}	:	Batarya eşdeğer iç direnci
i_{Bat}	:	Batarya akımı
R_f	:	Hızlı terim dalı direnci
C_f	:	Hızlı terim dalı kapasitansı
τ_f	:	Hızlı terim dalı zaman sabiti
R_m	:	Orta terim dalı direnci
C_m	:	Orta terim dalı kapasitansı
τ_m	:	Orta terim dalı zaman sabiti
R_s	:	Kısa terim dalı direnci
C_s	:	Kısa terim dalı kapasitansı
τ_s	:	Kısa terim dalı zaman sabiti
$R_{kaçak}$:	Kaçak direnci
ESR	:	Ultrakapasitör seri eşdeğer direnci
C_0	:	Ultrakapasitör hücre sığası
SOC_{max}	:	Doluluk oranı maksimum değeri
SOC_{min}	:	Doluluk oranı minimum değeri
S	:	Durum sayısı
ΔSOC	:	Doluluk oranı değişimi adım aralığı
u_{Bat}	:	Batarya gerilimi
u_{UC}	:	Ultrakapasitör gerilimi
i_{UC}	:	Ultrakapasitör akımı
T_{em}	:	Elektrik motoru torku
u_{DC}	:	Bara gerilimi
i_{inv}	:	Motor sürücü akımı
Ω_{wh}	:	Motor açılmal hızı
F_{wh}	:	Tekere aktarılan kuvvet

v_{wh}	:	Teker dönüş hızı
$F_{sürüş}$:	Araç sürüş kuvveti
F_s	:	Anahtarlama frekansı
P_{Talep}	:	Talep gücü
P_{Bat}	:	Batarya gücü
P_{UC}	:	Ultrakapasitör gücü
$P_{Sürüş}$:	Sürüş profili gücü
$P_{Bat_Kayıp}$:	Batarya kayıp Gücü
$P_{UC_Kayıp}$:	Ultrakapasitör kayıp gücü
$P_{Motor_Kayıp}$:	Motor kayıp gücü
$P_{İnvertör_Kayıp}$:	Motor sürücü kayıp gücü
$P_{Bat,max}$:	Batarya maksimum gücü
$P_{Bat,min}$:	Batarya minimum gücü
$P_{UC,max}$:	Ultrakapasitör maksimum gücü
$P_{UC,min}$:	Ultrakapasitör minimum gücü
Bat_SOC	:	Batarya doluluk oranı
Bat_SOC_{max}	:	Batarya maksimum doluluk oranı
Bat_SOC_{min}	:	Batarya minimum doluluk oranı
UC_SOC	:	Ultrakapasitör doluluk oranı
UC_SOC_{max}	:	Ultrakapasitör maksimum doluluk oranı
UC_SOC_{min}	:	Ultrakapasitör minimum doluluk oranı
$P_{UC,min}$:	Ultrakapasitör minimum gücü
$P_{UC,min}$:	Ultrakapasitör minimum gücü
$P_{UC,min}$:	Ultrakapasitör minimum gücü
$S1 - S8$:	Mosfetler
L_m	:	Mıknatıslanma endüktansı
L_p	:	Birincil taraf rezonans endüktansı
C_p	:	Birincil taraf rezonans kapasitansı
L_s	:	İkincil taraf rezonans endüktansı
C_s	:	İkincil taraf rezonans kapasitansı
C_{in}	:	Giriş kapasitansı
C_o	:	Çıkış kapasitansı
R_L	:	Yük direnci
L_n	:	Dönüştürücü nominal endüktansı
Q_e	:	Kalite faktörü
t_{dead}	:	Ölü zaman
C_{oss}	:	Mosfet çıkış kapasitansı
L_m	:	Mıknatıslanma endüktansı

KISALTMALAR LİSTESİ

EYS	:	Enerji yönetim sistemi
UC	:	Ultrakapasitör
BYS	:	Batarya yönetim sistemi
DP	:	Dinamik programlama
ECMS	:	Eşdeğer yakıt tüketimini en aza indirme stratejisi
HEV	:	Hibrit elektrikli araç
PHEV	:	Fişli hibrit elektrikli araç
PSO	:	Parçacık sürüsü optimizasyonu
YSA	:	Yapay sinir ağları
ECE	:	Avrupa sürüş profili (The United Nations Economic Commission for Europe Elementary Urban Cycle)
NEDC	:	Yeni Avrupa sürüş profili (New European Drive Cycle)
EUDC	:	Avrupa kentsel sürüş profili (Extra-Urban Driving Cycle)
UDDS	:	Kentsel sürüş profili (Urban Dynamometer Driving Schedule)
FTP	:	Federal test prosedürü (The Federal Test Procedure)
NYCC	:	New York şehir sürüş profili (New York City Cycle)
DC	:	Doğru akım
PWM	:	Darbe genişlik modülasyonu
SOC	:	Doluluk oranı
SOH	:	Sağlık durumu
BLDC	:	Fırçasız doğru akım motoru
PMSM	:	Sabit mıknatıslı senkron motor
AKS	:	Araç kontrol sistemi
RPM	:	Dakikadaki tur sayısı
RMS	:	Karelerin ortalamasının karekökü
D	:	Düşük
O	:	Orta
Y	:	Yüksek
Z	:	Sıfıra yakın
NY	:	Negatif yüksek
ND	:	Negatif düşük
PD	:	Pozitif düşük
PY	:	Pozitif yüksek

ÖNSÖZ

Öncelikle hayatım boyunca beni her zaman maddi ve manevi anlamda destekleyen ve her koşulda yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim. Onların desteği olmadan bu çalışmayı tamamlamamın ve akademisyenlik anlamında bulunduğum yerde olmanın mümkün olmadığını bilmelerini isterim.

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, yanında çalışmaktan onur duyduğum, ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli hocam Doç. Dr. Selim KÖROĞLU'na saygı ve minnetimi sunarım.

Bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her zaman desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Sezai TOKAT'a ve Doç. Dr. Selami KESLER'e en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım. Tüm akademik hayatım boyunca birlikte çalıştığım, her konuda yardımlarından ve bilgilerinden istifade ettiğim Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TÜMBEK'e en içten duygularıyla teşekkür ederim. Tez çalışmamda tasarladığım DC-DC dönüştürücünün baskı devre tasarımında yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Arda Kılıç'a, deneysel çalışmalarımın uygulanacağı test düzeneğini beraber hazırladığımız Öğr. Gör. Ömer BOYACI'ya ve Jaya optimizasyon yöntemini kullanmama vesile olan Arş. Gör. Ali KIRKBAŞ'a desteklerinden dolayı minnetlerimi sunarım.

Ayrıca gerek derslerinden öğrendiğim bilgiler gerekse insani değerlerinden edindiğim tecrübelerden dolayı tüm bölüm öğretim üyelerine teşekkür ederim. Maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiğim, birlikte çalışmaktan gurur duyduğum tüm çalışma arkadaşlarıma en içten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak da tez çalışmamda karşılaştığım tüm zorluklarda beni destekleyen ve anlayışla karşılayan, kalan ömrümüzü birlikte geçireceğimiz için bahtiyar olduğum çok sevgili eşime sevgi, saygı, minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Son yıllarda petrol kaynaklarının tükenmesi, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi sebepler mevcut enerji kaynaklarının verimli kullanılması konusundaki ilgiyi arttırmıştır. Dünya genelindeki enerji kaynaklarının kullanım alanlarına bakıldığında ulaşım önemli bir yer tutmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansına göre 2018 yılında dünya genelinde üretilen petrolün % 49,3'ü ulaşım sektöründe kullanılmıştır (International Energy Agency 2020). Tüketimin yanında konvansiyonel araçların ortaya çıkardıkları çeşitli gazlar sebebiyle çevreye ve küresel ısınmaya olan olumsuz etkileri de bilinen bir gerçektir. Bu gerçeğe dayanarak birçok ülke benzin veya dizel yakıt kullanan araçların kullanımını yasaklayacağı tarihleri açıklamaya başlamıştır. Örneğin, Norveç ve Hollanda 2025'ten, Almaya ve Hindistan 2030'dan ve Fransa da 2040'dan itibaren benzinli ve dizel araçların kullanımını yasaklayacağını duyurmuş durumdadır (Jason Deign 2017). Amerikan Ulusal Enerji ofisinin paylaştığı verilere göre konvansiyonel araçlarda yakıtın yalnızca % 15'i aracın hareketi için kullanılmakta ve yaklaşık % 40'ı da ısı enerjisi olarak egzozdan atılmaktadır (Tie ve Tan 2013). Dolayısıyla, ulaşım konusunda getirilecek yenilikler bu sorunları azaltma noktasında önemli bir katkı sağlayacaktır.

Elektrikli araçlar, mevcut ulaşım araçlarından farklı olarak çevreye oldukça az zararlı, etkili bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrikli araçları genel olarak üç grup altında toplamak mümkündür (Geetha ve Subramani 2017). Birincisi, içten yanmalı motorlarla birlikte elektrik motorlarının birlikte kullanılmasıyla oluşturulan hibrit araçlardır. Bu hibrit araçlar içerisinde batarya barındırmakta ve bataryanın şarj edilmesi yine içten yanmalı motor tarafından tahrik edilen generatör sistemi ile sağlanmaktadır. İkinci grupta yer alan elektrikli araçlarda ise yine içten yanmalı motor ve elektrik motoru bulunmakta ve araçta bulunan batarya harici olarak elektrik şebekesinden şarj edilebilmektedir. Bunlara fişli hibrit elektrikli araçlar (PHEV) denmektedir. Üçüncü olarak ise tamamen elektrikli araçlardan söz etmek mümkündür.

Bu araçlarda içten yanmalı motor bulunmamakta, araç tamamen batarya sistemi tarafından beslenmektedir. Bu araçlarda farklı enerji depolama birimlerinin birlikte kullanılmasıyla hibrit yapı mümkün olmaktadır. Ancak buradaki yapıyı daha çok hibrit enerji depolama sistemi olarak tarif etmek daha doğru olur. Ana besleme kaynağı olarak bataryanın, yardımcı kaynak olarak da ultrakapasitörlerin (UC) bulunduğu araçlar bu grup için örnek verilebilir.

Elektrikli araçlarda kullanılan motorların yüksek verimleri ve araçların sıfır yakıt emisyonuna sahip olması sağladığı en büyük avantajlardandır (Xiong ve diğ. 2018). Güç dönüştürücülerindeki ve kontrol yöntemlerindeki gelişmeler her geçen gün bu araçların kullanılabilirliğini arttırmaktadır. Ancak, elektrikli araçların tam anlamıyla ulaşım sektörüne hâkim olabilmesi için çözülmesi gereken sorunları mevcuttur (Tie ve Tan 2013). Bunların başında enerji depolama birimleri ve bu birimleri yönetimi konusu gelmektedir (Kouchachvili ve diğ. 2018).

Elektrikli aracın tüm enerji ihtiyacını istenildiği anda istenildiği kadar hızlı ve tüm kullanım koşullarında sağlayabilecek bir enerji depolama birimi günümüzde bulunmamaktadır (Ju ve diğ. 2016; Trovao ve diğ. 2013). Dolayısıyla birden çok enerji depolama birimini bir arada kullanarak, bu birimlerin en olumlu yönlerini bir araya getirmek geçerli bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çözümle birlikte enerji depolama birimlerinin bir arada kullanımının en verimli şekilde nasıl olması gerektiğini belirleyen enerji yönetim sistemlerine (EYS) ihtiyaç doğmaktadır. Böylelikle, bir enerji depolama biriminin istenmeyen özelliği diğer enerji depolama biriminin sağladığı avantajla giderilmiş olur.

Batarya, yakıt hücresi, UC ve volan elektrikli araç enerji depolama birimi konusunda üzerinde en çok araştırma yapılan birimlerdenidir (Trovao ve Antunes 2015). Bataryalar elektrikli ve hibrit araçların ana enerjilendirme kaynağı olup bu birimin performansı araç performansını ciddi oranda etkilemektedir. Bu yüzden üreticiler hem batarya hem de batarya yönetim sistemleri (BYS) üzerindeki çalışmalarını devam ettirmektedir (Xing ve diğ. 2011). Elektrikli araçlarda kullanılan enerji depolama birimlerinin yüksek enerji ve yüksek güç yoğunluğuna, uzun kullanım ömrüne ve tüm kullanım şartlarında güvenli çalışma yapısına sahip olması istenmektedir (Wang ve diğ. 2016). Yakıt hücresi ve volanlar depolama kabiliyetleri, güvenlik ve kullanım özellikleri sebebiyle tüm bu ihtiyaçları sağlayabilecek nitelikte

değildirler (Trova ve Antunes 2015). Araçların günlük kullanımı sırasında meydana gelen ani yük değişimleri, basınç dalgalanmaları ve oksijen yetersizliği sebebiyle yakıt hücresi membranlarında strese ve ömürlerinde azalmalara sebep olmaktadır (Azib ve diğ. 2011).

Araçlarda kullanılacak bataryaların seçiminde; yüksek enerji ve güç yoğunluğunun ile yüksek şarj-deşarj verimliliği istenmektedir. Bunlara ek olarak mümkün olduğunca hızlı şarj, uzun ömür ve yüksek güvenlik de göz önünde bulundurulmaktadır. Ayrıca, araçların çok çeşitli çevre şartlarında kullanıldığı düşünüldüğünde, bataryaların geniş sıcaklık aralığında aynı performansta çalışması da istenmektedir (Affanni ve diğ. 2005). Bilindiği gibi elektrikli araçların maliyetlerinin büyük bölümünü batarya maliyeti oluşturmaktadır (Henze 2020). Bu sebeple, bataryaların düşük maliyetli ve geri dönüşüm proseslerine tabi tutulabilmesi gibi faktörler de batarya seçimini etkilemektedir.

Elektrikli araçlarda yardımcı depolama birimi olarak en çok kullanılan donanım da UC'lerdir. UC'lerin yüksek güç yoğunluğuna sahip olması bataryaların bu konudaki eksiğini kapatmakta ve bu birimleri yardımcı depolama birimi olarak öne çıkarmaktadır (Alobeidli ve Khadkikar 2018). Ayrıca, uzun kullanım ömürleri sayesinde batarya üzerindeki stresin azaltılması ve kullanım ömrünün arttırılmasına katkı sağlarlar (Rosario 2007; Wang ve diğ. 2017).

Elektrikli araçlarda birden çok depolama biriminin bir arada kullanılması için bu birimler arası enerji paylaşımını gerçekleştirecek bir EYS'ye ihtiyaç vardır. Batarya ve UC birimlerinin güçlü özelliklerinin en üst seviyede kullanılması tasarlanacak olan EYS'ye bağlıdır. EYS hem araç sürücüsünün taleplerine göre aracın hareketini sağlamalı hem de depolama birimlerini çalışma koşullarına göre en verimli şekilde kullanmalıdır.

1.2 Literatür Özeti

Elektrikli araçlarda genellikle birden çok enerji depolama birimi bulunmaktadır. Bu sebeple, bu birimler arası enerji yönetimi önemli bir konu haline gelmiş ve literatürde konuyla ilgili çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Enerji

yönetiminin performansı doğrudan araç performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Optimal bir enerji yönetimi stratejisi, yakıt tüketiminin minimize edilmesi, egzoz emisyonunun düşürülmesi, aracın hava kirliliğine etkisinin azaltılması ve araç sürüş performansının iyileştirilmesi gibi önemli avantajlar sağlayabilir.

İçten yanmalı motor ve elektrikli motor bulunduran hibrit elektrikli araçlarda (HEV), EYS talep edilen gücün bu iki motor arasında optimum paylaşılmasını hedefler. Bu araçlarda, EYS'nin temel amacı yakıt tüketimini optimize ederek emisyonları azaltmaktır. Elektrik ve petrol fiyatlarındaki sık dalgalanmaların EYS optimizasyonu üzerinde önemli etkileri vardır. Çin'de yapılan bir vaka çalışmasında HEV için elektrik ve petrol fiyatlarındaki dalgalanmaları dikkate alan bir EYS uygulaması çalışılmıştır (Chen ve diğ. 2021). Bu çalışmada, değişen fiyatların optimal kontrol politikası üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Sunulan kontrol stratejisi, tavlama benzetimi ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmasına göre optimize edilmiştir. Sunulan kontrol stratejisi, gerçek dünya sürüş koşulları altında fiyat değişikliklerinin etkisini dikkate almayan geleneksel bir EYS'den, daha iyi enerji ekonomisi sağlayabilir. Yapılan bu çalışmanın sonuçları enerji maliyetinin belirli sürüş koşullarında % 9,88'e kadar azaltılabileceğini göstermiştir.

HEV'de EYS konusunda sıklıkla kullanılan bir diğer yöntem de eşdeğer yakıt tüketimini en aza indirme stratejisidir (ECMS). ECMS, fosil yakıtlar ve batarya enerjisinin eşdeğer maliyeti kavramına dayalı olarak çalışan bir algoritmadır. ECMS yaklaşımında, optimum kontrol politikasını elde etmek için eşdeğer faktör adı verilen bir parametrenin belirlenmesi gerekmektedir. Yapılan bir çalışmada, HEV'lerin optimal kontrolü için geleneksel ECMS ile birleştirilmiş pekiştirmeli öğrenme yaklaşımına dayalı bir EYS stratejisi geliştirmiştir (Lee ve Cha 2021). Paralel bir HEV için gerçekleştirilen benzetim sonuçları, önerilen yöntemin % 96,7'lik bir yaklaşımla global optimum çözüm olan dinamik programlamaya (DP) yaklaştığı ve aynı zamanda literatürde var olan ECMS ile karşılaştırıldığında ise ortalama olarak % 4,3'lük bir performans artışı sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

HEV'den sonra en popüler tamamen elektrikli araç türlerinden biri de yakıt hücreli araçlardır. Yakıt hücrelerinin yüksek verimliliği ve hidrojeni yakıt olarak kullanabilme kabiliyetleri nedeniyle elektrikli araçlarda besleme kaynağı olarak kullanılması mümkündür. Ancak, yavaş tepkime karakteristikleri nedeniyle ani güç

taleplerini karşılamada zorlanmaktadırlar. Bu nedenle UC gibi hızlı dinamik karakteristiğe sahip yardımcı depolama kaynakları ile birlikte kullanılırlar. Yapılan bir çalışmada, yakıt hücresi-UC'nin birlikte kullanıldığı hibrit bir elektrikli araç sisteminin ayrıntılı dinamik modelini önerilmiş ve sistemin benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Slama ve diğ. 2017). Sistemin performansını iyileştirmek için bir EYS tasarlanmış ve bir yük profiline bağlı olarak sistem verimliliği incelenmiştir. Yakıt hücreli araçlara sadece UC değil, batarya ve UC'nin aynı zamanda eklendiği çalışmalara da literatürde rastlanmaktadır. Yapılan bir çalışmada, elektrikli hibrit araçta ana enerji kaynağı olarak bir yakıt hücresi ve ikincil enerji kaynağı olarak bir batarya ve bir UC'den oluşan depolama sistemi kullanılmıştır (Marzougui ve diğ. 2017). Böylelikle, ana kaynak elektrikli araca gerekli enerjiyi sağlamakta iken ikincil enerji kaynağı ise hızlanma anında ani güç taleplerini karşılamakta, fren işleminde fazla gücü geri kazanmaktadır. Yakıt hücreli araçlara ise UC ve bataryanın eklenmesi hidrojen tüketiminin önemli ölçüde azaltılmasını ve araç verimliliğinin iyileştirilmesini sağlar. Çalışmada, elektrikli araç uygulamaları için kullanılan bu hibrit güç kaynağındaki farklı ögeler arasındaki güç akışını yönetmek için bir algoritma sunulmuştur. Buradaki EYS algoritması, üç elektrik kaynağından sağlanan gücü doğru bir şekilde düzenlemek için dönüştürücülerin akımlarını belirlemektedir.

Sadece batarya beslemeli elektrikli araçlar son zamanlarda büyük ilgi görmeye başlamış ve aynı zamanda batarya teknolojilerinde de önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Ancak, halen batarya teknolojileri mevcut elektrikli araçlardaki güç ihtiyacına bağlı enerji talebini tam olarak karşılamamaktadır. En önemli sorunlarının başında aşırı şarj sebebiyle bataryanın elektrokimyasal yapılarındaki bozulma ve ani güç taleplerine karşı dinamik cevaplarının yavaş olması gösterilebilir. Bu gibi durumları ortadan kaldırmak için batarya - UC entegrasyonu ile oluşan bir EYS iyi çözümler sunmaktadır. Yapılan bir derleme çalışmasında, elektrikli araçlarda batarya - UC hibrit yapıdaki çalışmalar özetlenmiştir (Kouchachvili ve diğ. 2018). Çalışma, batarya - UC hibrit yapısının tasarımları, performansı, benzetimi ve EYS sistemlerindeki son gelişmelere ilişkin genel bir bakış ortaya koymaktadır. Yapılan bir diğer derleme çalışmasında ise, hibrit enerji depolama sistemli elektrikli araç topolojileri ve EYS sistemleri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir (Xiong ve diğ. 2018). Çalışma daha çok EYS araştırmalarına odaklanmış; kural tabanlı, optimizasyona dayalı ve akıllı kontrol algoritmaları ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Birkaç tipik

uygulama ayrıntıları ile verilerek bu yöntemlerin karşılaştırmalı bir değerlendirmesi yapılmıştır. Bu incelemede, topoloji ve EYS'lerin güçlü ve zayıf yönleri sistematik olarak analiz edilmiştir. Bünyesinde DC/DC dönüştürücü bulunan sistemlerde meydana gelen enerji kaybından dolayı, sistem verimliliği yalnızca batarya ile çalışan sistemden daha yüksek olamaz. Ancak, daha uygun bir kontrol stratejisi seçerek iyileştirme yapılabilir. Bunun yanında iyi bir EYS, bataryanın şarj/deşarj oranını uygun şekilde kontrol ederek, batarya servis ömrünü uzatmaya ve maliyetini azaltmaya yardımcı olabilir.

Elektrikli araçlarda batarya ömrü genellikle hızlı kullanım, termal etki ve kullanılan toplam enerji çıkışından etkilenir. Bu sebeple bataryanın daha uygun bir şekilde kullanılması için sisteme UC dahil edilebilir. Yapılan bir çalışmada, bataryanın ömrünü uzatmak için UC'nin şarj durumunu yöneten bir yaklaşım getirilmiştir (Alobeidli ve Khadkikar 2018). Önerilen yaklaşım, özellikle hızlanma sırasında UC'nin uzun süre kullanılabilirliğini sağlamak için gereken enerji miktarını düzenlemektir. UC'nin SOC kontrolü için iki aşamalı bir yapay sinir ağı (YSA) strateji kullanan kural tabanlı kontrol yöntemi geliştirilmiştir. İlk YSA, aracın hız artışına bağlı olarak UC'nindeşarj oranını kontrol ederken, ikinci YSA, bataryanın SOC seviyesini düzenlemektedir. Böylece, batarya enerji çıkışı ve çalışma sıcaklığı önemli ölçüde azaltılmıştır. Önerilen yaklaşımın sistemdeki toplam enerji kaybını yaklaşık %20 oranında azalttığı gösterilmektedir. Aynı zamanda batarya sıcaklığında da %8'lik düşüş gözlenmiştir. Buna bağlı olarak kayıpların azalması, sistemin genel verimliliğini artırmıştır.

Yapılan bir çalışmada batarya ve UC beslemeli elektrikli aracın gerçek zamanlı EYS'si için bir tasarımı gerçekleştirilmiştir (Shen 2016). Çalışmada çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılarak, batarya ömrünün uzatılması ve güç kayıplarının azaltılması için kaynaklar arasında optimum güç dağılımı sağlanmıştır. Önerilen çevrimiçi enerji yönetimi denetleyicisinin batarya ömrünü %60'ın üzerinde uzatabileceği tahmin edilmektedir. Yine başka bir çalışmada, batarya-UC destekli bir elektrikli araç EYS'si için çok amaçlı optimizasyona dayalı gerçek zamanlı bir kontrol stratejisi önerilmiştir (Lu ve diğ. 2019). Bu kontrol stratejisi, daha az güç kaybı, daha uzun batarya ömrü elde etmeyi ve UC'nin hızlı şarj/deşarj kabiliyetini kullanmayı amaçlamıştır. Bu strateji yüksek hesaplama yeteneğine sahip olup sürüş profili

bilgisini gerektirmemektedir. Bu açıdan gerçek zamanlı uygulamalar için kullanılma potansiyeline sahiptir.

Hibrit yapıli elektrikli araç uygulamasında batarya-UC arasında en uygun akım paylaşımı için Karush-Kuhn-Tucker ve yapay sinir ağı tabanlı iki gerçek zamanlı EYS stratejisi araştırılmıştır (Shen ve Khaligh 2016). Bu iki gerçek zamanlı stratejinin performansını değerlendirmek için, anlık batarya akımlarına bağılı sağıık durumuna (SOH) dayalı bir performans ölçütü geliştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada, sadece batarya beslemeli duruma göre kıyaslandığında, iki EYS stratejisi de batarya tepe akımını %31 ve %38 oranında düşürmüştür. Böylelikle uygun EYS ile batarya akımının tepe değerinin etkili bir şekilde azaltılabileceğı gösterilmiştir.

Hibrit enerji depolama sistemlerinde depolama birimi güç ve gerilim seviyelerin ayarlanmasında dönüştürücüler kullanılmaktadır. Bu amaçla literatürde, düşük bileşen sayısı, kontrol basitliğı ve kaynak enerjilerinin tam kontrolü gibi çeşitli avantajlar sunan çoklu giriş dönüştürücüler de bulunmaktadır. Yapılan bir araştırmada, batarya-UC içeren elektrikli araçlar için tasarlanan çift yönlü çoklu giriş dönüştürücü ile EYS sunulmuştur (Akar ve diğ. 2017). Bu dönüştürücüde önerilen EYS batarya-UC arasındaki enerji akışının serbest olması sayesinde UC'nin şarj durumunu düzenlemektedir. Aynı zamanda bulanık mantık denetleyicisi ve hız sınırlayıcı kullanılarak batarya güç profili de düzleştirilmektedir. Bu nedenle, daha uzun batarya ömrü elde edilmiş olur. Tasarlanan bu EYS ile batarya tepe akımlarının azaltarak çevrim ömrünün yaklaşık %55 oranında uzatılabileceğı gösterilmiştir.

Yapılan diğeri bir çalışmada batarya-UC enerji depolamalı bir elektrikli araç için uyarlanabilir bulanık mantık tabanlı EYS önerilmiştir (Yin ve diğ. 2016). Bu uyarlanabilir bulanık mantık denetleyicisi, sistem verimliliğini en üst düzeye çıkarmak, batarya akımı değıişimini en aza indirmek ve UC doluluk oranı (SOC) farkını en aza indirmeyi amaçlamış ve bu durumlar önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Önerilen EYS sisteminin performansı literatürde var olan üç farklı EYS ile karşılaştırılmış, hem sıkışık şehir içi sürüş hem de otoyol sürüş profili için test edilmiştir. Önerilen yöntemin, diğeri kıyaslanan EYS'lerden daha iyi kontrol performansı sağladığı ifade edilmiştir.

Literatürde elektrikli araç EYS'si için yeni yöntemler önerilmektedir. Yapılan bir çalışmada, HEV uygulamasında kayan mod denetleyicisi olarak adlandırılan yeni bir kontrolör kullanan bir EYS stratejisi önerilmiştir (Bayat ve diğ. 2018). Önerilen bu yöntemle, sistemin hem boyutunu hem de kayıplarını azaltmak ve aynı zamanda sistemin çıkış gerilimindeki dalgalanmanın düşürülmesi amaçlanmıştır. Teorik ve benzetim çalışmaları deneysel olarak doğrulanmıştır. Geleneksel bir kayan mod denetleyiciyle karşılaştırıldığında önerilen doğrusal olmayan kontrolörün üstün performans sağladığı rapor edilmiştir.

Yapılan diğer bir çalışmada, bir elektrikli araç için uyarlanabilir alçak geçiren filtreli PI şarj kontrollü bulanık mantık tabanlı bir EYS önerilmiş ve farklı sürüş profilleri için benzetimler yapılmıştır (Hussain ve diğ. 2019). Önerilen EYS, aracın hızlanma anında ihtiyaç duyulan gerekli gücü batarya-UC arasında optimum şekilde paylaşmakta, frenleme anındaki geri kazanılan enerjiyi doluluk durumuna göre UC'ye aktarmaktadır. Önerilen EYS ile batarya stresinin, sıcaklığının ve güç kayıplarının azalttığına dair bulgular elde edilmiştir. Benzer yöntemi kullanan diğer bir çalışmada, hibrit elektrikli araçta enerji depolamalı sistemi, UC'ye seri bağlı DC/DC dönüştürücü ve ona paralel batarya ile oluşturulmuştur. Batarya DC baraya doğrudan bağlı bulunmaktadır (Zhang ve diğ. 2021). Araçtaki optimum güç paylaşımının ayarlanması için bulanık uyarlanabilir filtre tabanlı bir EYS önerilmiştir. Öncelikle, optimum paylaşımı sağlayabilmek için UC'nin şarj durumu (SOC), aracın sürüş / frenleme moduna göre sınırlandırılmıştır. EYS'de yer alan filtre zaman sabitinin ayarlanması için bulanık mantık denetleyicisi kullanılmıştır. Önerilen bu EYS, batarya-UC'nin şarj durumlarını uygun bir şekilde optimize ederek, batarya akım genliğini etkile bir şekilde azaltmaktadır.

Normal şartlarda kural tabanlı EYS'ler gerçek zamanlı yönetimde temel bir stratejidir. Ancak, bu yöntemlerin dinamik yüke uyarlanabilirliği oldukça zayıftır. Yapılan bir çalışmada, hem enerji tasarrufu sağlamak hem de batarya ömrünü uzatmak için optimal performansa yakın pratik bir EYS stratejisi geliştirmek amaçlanmıştır (Liu ve diğ. 2019). Bu amaçla, batarya-UC hibrit enerji depolama sistemi kullanan elektrikli araçlar için DP optimizasyonu kullanan yüke uyarlanabilir gerçek zamanlı bir EYS önerilmiştir. İlk olarak sistemde en uygun çözüm bulmak amacıyla DP ile analiz yapılmış ve buradan üç aşamalı kontrol kuralları çıkarılmıştır. Güç paylaşım

parametreleri ile yük istatistikleri arasında işlevsel bir ilişki kurularak, yüke uyarlamalı kural tabanlı bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Sonuçlar, temel kural tabanlı EYS ile kıyaslanmıştır. Önerilen EYS stratejisinin, en optimum durumu temsil eden DP sonuçlarına oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Yapılan diğer bir çalışmada, UC destekli hibrit elektrikli sürüş sistemi için bileşik kontrollü bir denetleyici topolojisi önerilmiştir (Peng ve diğ. 2019). Bu topolojide, UC ve batarya akımı ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Burada depolama birimlerinin kontrolü doğrudan elektrikli tahrik sisteminin kontrolü ile bağlantılıdır. Önerilen bileşik kontrolün UC'nin akımında dalgalanma sağlayarak, batarya akımının düzgün ve sabit kalmasını sağlamaktadır. Deneysel sonuçlarla da önerilen kontrol yöntemin performansını doğrulanmıştır.

1.3 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, günümüzde gelişimi ivme kazanan, gelecekte hayatımızın vazgeçilmez parçalarından biri olacak önemli teknolojilerinden elektrikli araçlar için bir enerji yönetim sistemi (EYS) tasarlanması ve test edilmesidir.

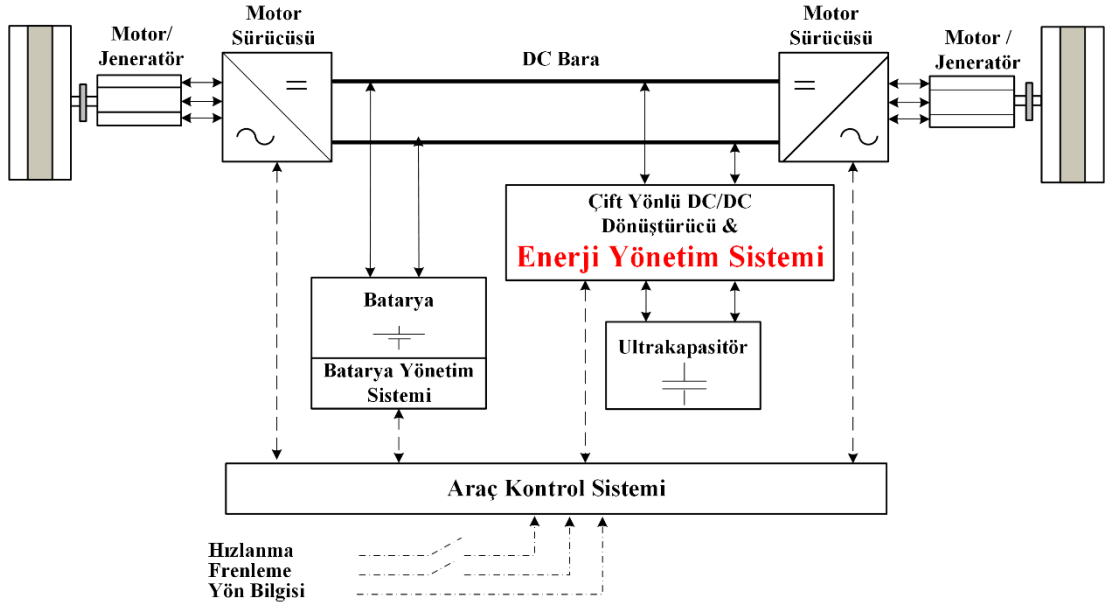
Tasarlanan EYS ile birden fazla enerji depolama biriminin bir arada mümkün olan en etkin şekilde kullanılması hedeflenmektedir. Geliştirilen EYS'nin yeniliklere açık, modüler, geliştirilebilir, esnek ve gerçek zamanlı uygulamada sorun oluşturmayacak yüksek güvenilirlikli bir yapıya sahip olması planlanmıştır.

Tasarlanan modüler EYS yönteminin sadece batarya bulunan araca bir modül olarak doğrudan entegre edilmesi hedeflenmiştir. Bunun için araca eklenecek olan UC'nin güç paylaşımını gerçekleştiren bir DC-DC dönüştürücü tasarlanmıştır. Tasarlanan dönüştürücü aynı zamanda EYS algoritmasını da barındırmaktadır. Böylelikle, modüler bir sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Eklenecek olan EYS sisteminin motor sürücü akımını ölçecek bir akım sensörü haricinde araçtan herhangi bir bilgi talebi bulunmamaktadır. Dolayısıyla, araçta başka herhangi bir değişiklik yapılmadan tasarlanan sistemin eklenmesiyle EYS içeren hibrit bir depolama sistemi oluşturulmuş olacaktır.

EYS'nin gerçek zamanlı olarak araç üzerinde çalışabilmesi de yine tezin amaçlarından biridir. Bu sebeple, sürüş profili bilgisinin önceden bilinmesini gerektiren yöntemler tercih edilmemiştir. Ayrıca, işlem yükü sebebiyle gerçek zamanlı uygulamadan uzak olan yöntemler kullanılmamıştır.

1.4 Materyal ve Yöntem

Önerilen EYS için gerekli tasarım ve benzetimlerin yapılabilmesi için öncelikle Şekil 1.1'de yer alan bütün araç bileşenlerinin modelleri oluşturulmuştur. Modeller oluşturulurken mümkün olduğunca gerçeğe yakın fakat aynı zamanda optimizasyon çalışmalarının hesap yükünü fazla arttırmayacak modeller tercih edilmiştir.



Şekil 1.1: Tasarlanan EYS'nin prensip şeması.

Araç bileşenlerinin modellerinin oluşturulmasından sonra literatürde yer alan elektrikli araç EYS yöntemleri incelenmiş ve kural tabanlı, bulanık mantık tabanlı, global ve gerçek zamanlı optimizasyon yöntemleri ile benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları içerisinde önerilen Jaya tabanlı EYS'nin deneysel doğrulamaları gerçekleştirilerek konu üzerinde detaylı çalışmalar yapılmıştır.

Batarya ve UC arası güç paylaşımını gerçekleştirmek için en önemli donanım olan DC-DC dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım EYS gerekliliklerine göre oluşturulmuş ve işlevsel olarak çalışması sağlanmıştır.

EYS'nin gerçek zamanlı olarak test edilmesi için gerekli olan tüm bileşenler bir araya getirilmiştir. Önerilen Jaya tabanlı EYS, tasarlanan DC-DC dönüştürücü ve diğer bileşenlerle birlikte bir deney düzeneği üzerinde denenmiştir. Deneme sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

1.5 Tezin Katkısı

Bu tez çalışmasında batarya ve UC kullanılan elektrikli araç için EYS tasarlanması ve gerçekleştirilmesi üzerinde durulmuştur. Araç üzerinde uygulanabilir bir EYS tasarlanması için kural, bulanık mantık, DP ve Jaya optimizasyon yöntemi tabanlı EYS benzetimleri gerçekleştirilmiş ve ayrıntılarıyla sunulmuştur. Gerçekleştirilen EYS tasarımlarının araç üzerinde uygulanabilmesi için UC ile DC bara arasına bağlanacak ve çift taraflı güç aktarımını sağlayacak bir DC-DC dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan dönüştürücü tam köprü seri rezonans CLLC türünde bir dönüştürücüdür. Dönüştürücüye ilişkin tüm tasarım ve test ayrıntıları detaylarıyla gösterilmiştir.

Tasarlanan EYS sisteminin performansının tam olarak ölçülebilmesi için araç davranışını sergileyecek bir deney düzeneği oluşturulmuştur. İstenilen aracın karakteristiğini yansıtabilen bu deney düzeneğinde her türlü standart ya da özel sürüş profiliyle denemeler yapmak mümkündür. Deney düzeneği sayesinde gerçekleşen akım, gerilim, güç ve tork değişimleri hassas şekilde ölçülebilmektedir.

Önerilen Jaya tabanlı EYS sisteminin performansını gösterebilmek için araçta kural tabanlı bir EYS bulunması durumuyla karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar, sisteme eklenen UC'nin getirdiği faydayı göstermek amacıyla araçta sadece batarya bulunması durumunda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bu tez kapsamında, batarya ve UC beslemeli elektrikli araç için modüler bir EYS tasarlanmıştır. Tez toplamda yedi bölümden oluşmaktadır ve içerikleri kısaca aşağıda özetlendiği gibidir.

Bölüm 1’de, elektrikli araçlar ve avantajları hakkında temel bilgiler verilmiştir. Elektrikli araçlarda kullanılan EYS yöntemleri hakkında literatür bilgisi paylaşılmıştır. Tezin amacı, bu amacı gerçekleştirmek için kullanılan materyal ve yöntemler ile sonuç olarak elde edilen tezin katkısı da yine bu bölümde sunulmuştur.

Bölüm 2’de, tez çalışmasında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında kullanılan elektrikli araç dinamik modeli ve araç bileşenleriyle ilgili genel bilgilerin yanı sıra bu bileşenlerin modelleri verilmiştir. Ayrıca, batarya ve UC’nin araçtaki bağlantısıyla ilgili bağlantı topolojiler incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Bölüm 3’te, elektrikli araç EYS yöntemleri detaylıca incelenmiş ve sınıflandırması yapılmıştır. Her yöntemin üstün yanları ve getirdiği olumsuzluklar sunulmuştur.

Bölüm 4’te, gerçekleştirilen kural, bulanık mantık, DP ve Jaya tabanlı EYS yöntemi temelleri ve benzetim çalışmaları verilmiştir. Yöntemlerle elde edilen sonuçlar paylaşılmış ve yorumlanmıştır. Jaya tabanlı EYS yöntemi konusunda arama uzayının dinamik olarak kısıtlanması için araç talep gücü değişimine bağlı bir yöntem önerilmiştir.

Bölüm 5’te, tasarlanan EYS yöntemlerinin uygulanacağı araçta yer alan bileşenler sunulmuş ve özellikleri verilmiştir. Tasarlanan EYS yöntemlerinin uygulanması için gerekli olan ve tez kapsamında tasarlanan çift yönlü seri rezonans DC-DC dönüştürücü tasarım, benzetim, kontrol ve test çalışmaları detaylı olarak verilmiştir.

Bölüm 6’da, tasarlanan EYS yöntemlerinin testi için tasarlanmış olan test düzeneği sunulmuş, kullanılan ekipmanlar ve ölçüm düzenekleri tanıtılmıştır. Test düzeneği üzerinde sadece batarya bulunması durumunda deneyler yapılmıştır. Daha sonra, aynı test düzeneğine tasarlanan DC-DC dönüştürücü ile birlikte UC eklenmiştir. Test düzeneğinde hem kural tabanlı hem de Jaya optimizasyon yöntemi tabanlı EYS test edilmiş ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Bölüm 7’de tez sonucunda elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve yorumlanmıştır. Tez konusu kapsamında daha sonra yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ MODELLENMESİ

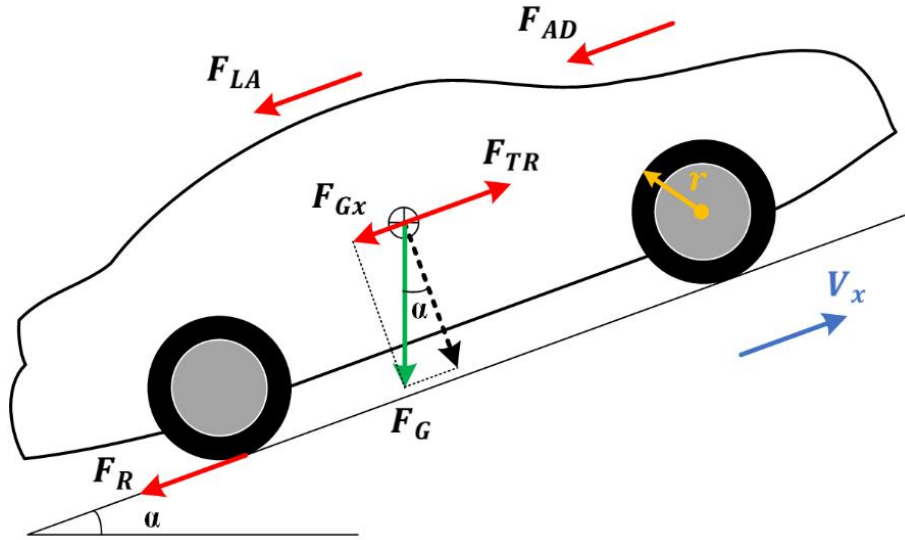
Elektrikli araçların dinamiklerinin belirlenmesi için aracın ve araç karakteristiğini etkileyen bütün donanımların modellenmesi gerekmektedir. Aracın hangi koşullarda nasıl davrandığının belirlenebilmesi, aracı oluşturan birimlerin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Aracın dinamik modellenmesinde; kütle, şekil, ön yüzey alanı, tekerlek yarıçapı vb. bilgiler kullanılmaktadır. Bunun yanında aracın elektriksel modelinin oluşturulmasında ise motor, motor sürücüsü, enerji depolama birimleri gibi bileşenler yer almaktadır. Böylelikle, aracı besleyen batarya gibi kaynaklardaki depolanmış halde bulunan mevcut enerjinin kullanımı, yönetimi ve araç menzilin hesaplanabilmesi gibi işlemler bu modeller kullanılarak yapılabilmektedir. Dolayısıyla, elektrikli araçlar için tasarlanan bir EYS çalışması için öncelikle araçta kullanılan donanımların mümkün olduğu kadar gerçeğe yakın bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bileşenlerin doğru bir şekilde modellenmesinin yanında birbirleriyle olan bağlantı şekilleri ve birbirlerine etkileri de oldukça önemlidir. Modellerin karmaşıklığının getirdiği fazla işlem yükü, optimizasyon ve kontrol çalışmaları için istenmeyen bir durumdur. Bu sebeple, araç bileşenlerinin modelleri oluşturulurken genellikle doğruluktan bir miktar ödün verilerek yaklaşık modellerin kullanılması zorunlu hale gelmektedir.

Bu bölümde, elektrikli araç EYS çalışmalarında kullanılan araç dinamik modeli, sürüş profilleri, bağlantı topolojileri ve bileşen modelleri hakkında temel bilgiler sunulmuştur. Literatürde sıklıkla kullanılan modeller ve tercih sebepleri açıklanmıştır.

2.1 Elektrikli Araç Dinamik Modeli

Bir aracın hareketi esnasında üzerine çeşitli kuvvetler etki etmektedir. Bu kuvvetler; aracın yapısı, içinde bulunduğu ortam ve yol koşullarına göre değişmektedir. Hareket halinde araca etki eden temel kuvvetler Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Araç üzerine etkiyen temel kuvvetler.

Şekil üzerindeki F_{TR} olarak gösterilen kuvvet, aracın tekerlekler vasıtasıyla yola aktardığı ve aracın hareketini sağlayan itme ya da çekme kuvvetini ifade etmektedir. Bu kuvvetin aracın hareketini sağlayabilmesi için araca etkiyen diğer kuvvetlerin üstesinden gelmesi gerekmektedir. Bu kuvvet Denklem (2.1)'de tanımlanmıştır.

$$F_{TR} = F_{LA} + F_{AD} + F_R + F_{Gx} \quad (2.1)$$

Burada; F_{LA} doğrusal ivmelenme kuvvetini, F_{AD} aerodinamik kuvveti, F_R yuvarlanma direnci kuvvetini ve F_{Gx} ise eğim direnci kuvvetini temsil etmektedir.

Doğrusal ivmelenme kuvveti (F_{LA}), Newton'un ikinci hareket kanunundan yola çıkarak bulunur ve Denklem (2.2)'deki gibi tanımlanır.

$$F_{LA} = m \cdot \frac{d}{dt} V_x = m \cdot a \quad (2.2)$$

Denklemden; V_x aracın çizgisel hızını, m ise kütesini göstermektedir. Hız birimi m/sn olup saniyede kat edilen mesafeyi ifade etmektedir. Denklemden m ise aracın kütesini kilogram cinsinde göstermektedir. Hızın zamana göre türevinden de aracın doğrusal ivmesi (a) bulunmaktadır.

Aracın aerodinamik kuvveti (F_{AD}) ise Denklem (2.3) ile bulunabilmektedir. Bu kuvvet, sürüklenme katsayısı, aracın ön yüzey alanı, havanın yoğunluğu ve araç hızının karesine bağlıdır.

$$F_{AD} = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A \cdot \rho \cdot V_x^2 \quad (2.3)$$

Denklemden yer alan C_d sürüklenme katsayısını ifade edip aracın geometrik şekline bağlıdır ve birimsizdir. A aracın ön yüzey alanını m^2 cinsinden göstermektedir. Havanın yoğunluğunu (ρ); sıcaklığa, neme ve rakıma bağlı olarak değişmektedir ve birimi kg/m^3 'tür.

Araca etki eden yuvarlanma direnci kuvveti (F_R) Denklem (2.4)'te tanımlanmıştır. Bu kuvvet yuvarlanma katsayısı, aracın ağırlığı ve yer çekimi ivmesine bağlıdır.

$$F_R = K_r \cdot m \cdot g \quad (2.4)$$

Burada K_r yuvarlanma direnci katsayısını ifade edip ortam sıcaklığına lastiğin ve yolun yapısına bağlı değişir ve birimsizdir.

Eğim direnci kuvveti (F_{Gx}), Denklem (2.5)'te ifade edilmiştir. Bu kuvvet aracın ağırlığı, yer çekimi ivmesi ve önemli ölçüde yolun eğimine bağlıdır.

$$F_{Gx} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (2.5)$$

Bu denklemde α yolun eğimidir. Eğim direnci kuvveti; araca etkiyen yer çekimi dolayısıyla oluşan kuvvetin (F_G)'nin aracın hareket yönü doğrultusunda olan bileşenidir ve eğim açısına bağlıdır. Haliyle, eğimsiz bir yolda hareket eden araç için bu kuvvet sıfır olmaktadır.

Tanımlanan tüm bu kuvvetler Denklem 2.1'de yerine yazılırsa denklem (2.6) elde edilir.

$$F_{TR} = m \cdot a + \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A \cdot \rho \cdot V_x^2 + K_r \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (2.6)$$

Böylelikle, aracın hareketini sağlayan F_{TR} kuvveti tüm değişkenlere bağlı olarak tanımlanmış olup bu ifade aracın dinamik modelini gösterir.

Bu tez çalışmasında ele alınan elektrikli araca ilişkin dinamik model parametreleri ve değerleri Tablo 2.1’de sunulmuştur. Bundan sonra yapılan tüm benzetim çalışmalarında araç modeline ilişkin tabloda yer alan bilgiler kullanılmıştır. Modellenen bu araç şehir içi kullanıma yönelik tasarlanmış küçük boyutlu elektrikli bir araçtır.

Tablo 2.1: Araca ilişkin benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler.

İsim	Değer	Birim
Ağırlık (m)	200	kg
Yerçekimi ivmesi (g)	9.81	m/s^2
Tekerlerdeki sürtünme katsayısı (Kr)	0.012	
Tırmanma açısı (θ)	0	Derece
Havanın kütle yoğunluğu (ρ)	1.2	kg/m^3
Havanın sürtünme katsayısı (C_d)	0.3	
Aracın ön yüzey alanı (A)	1.64	m^2

2.2 Standart Sürüş Profilleri

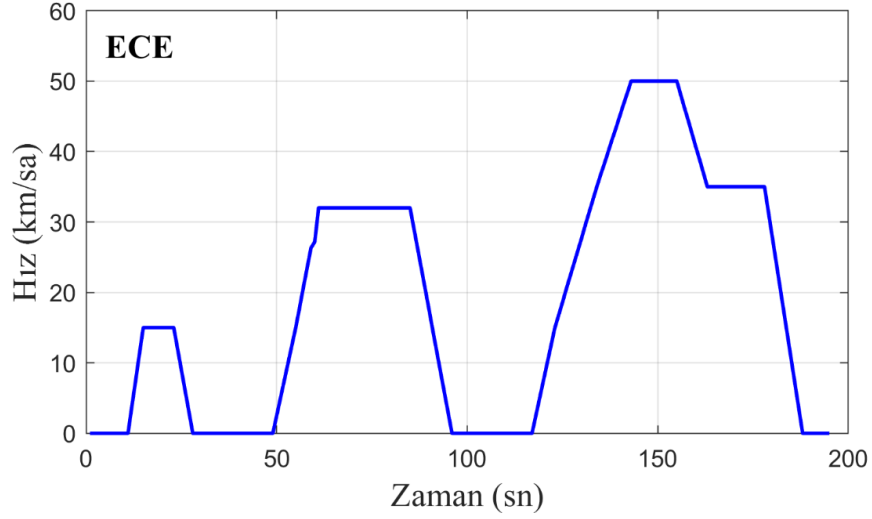
Oluşturulan araç modeline uygulanacak yöntem ve algoritmaların çalışma karakteristik ve performanslarını önceden gözlemleyebilmek için en iyi yollardan birisi sistemin benzetim çalışmaları yapmaktır. Böylelikle, gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ve tasarımların birbiriyle karşılaştırılabilme olanağı elde edilir. Araçların aynı koşullarda test edilmesi, elde edilen sonuçların birbirleriyle karşılaştırılması açısından önemlidir. Bu anlamda ulusal ve uluslararası birçok kuruluş kendi ülkesindeki trafik koşullarını temsil edecek bir takım sürüş profilleri oluşturmuşlardır. Bu sürüş profillerinin bazıları şehir içi araç sürüşünü yansıtırken, bazıları da şehirlerarası sürüş karakteristiğini yansıtacak şekilde oluşturulmuştur. Böylelikle günlük hayattaki trafik karakteristiklerini temsil eden bu sürüş profilleri, araçların benzetim çalışmalarının gerçeğe yakın yapılmasına ve daha doğru sonuçlar elde edilmesine olanak sağlar.

Genellikle sürüş profilleri zamana bağlı olarak aracın hızını vermektedir. Buna ek olarak bazılarında yol eğimi de sunulmaktadır. Dünyada en yaygın kullanılan temel 5 sürüş profili ve karakteristik değerleri Tablo 2.2’de verilmiştir (United States Environmental Protection Agency 2020). Tablodan açıkça görüleceği gibi her bir sürüş profili farklı karakteristiklere sahip olup profili oluşturan ülke ve gözlemlendikleri trafik şartlarını yansıtmaktadır.

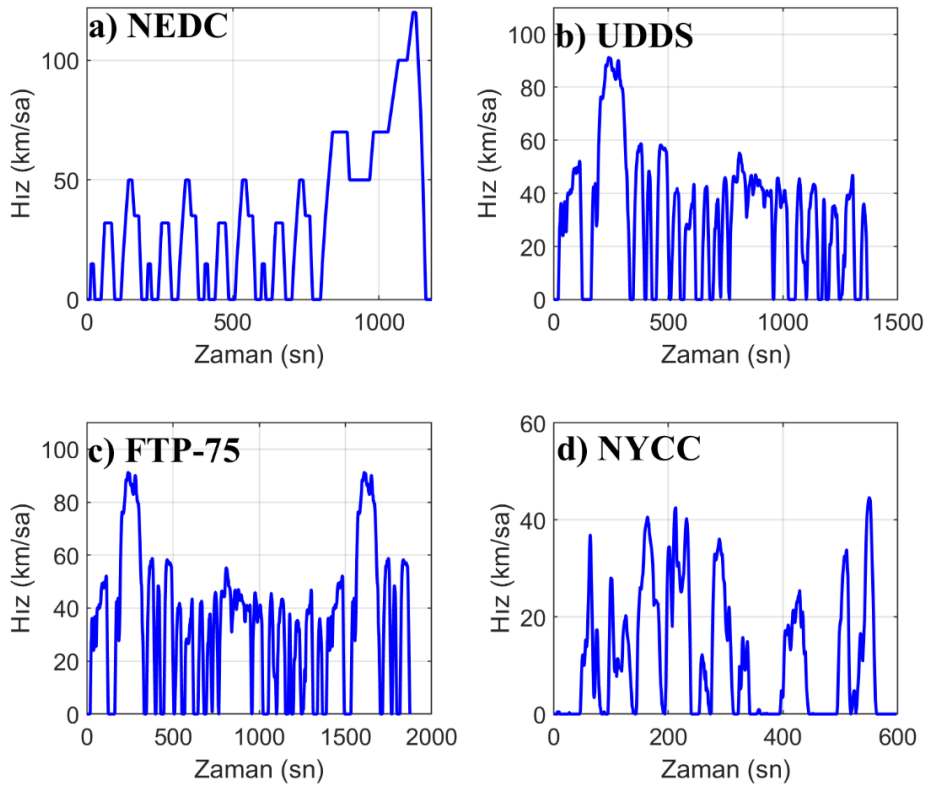
Tablo 2.2: Benzetimde kullanılan standart sürüş profillerinin bazı teknik özellikleri.

Özellik	ECE	NEDC	UDDS	FTP-75	NYCC
Süre (sn)	195	1184	1369	1874	598
Mesafe (km)	0,99	10,93	11,99	17,77	1,9
Maksimum Hız (km/sa)	50	120	91,25	91,25	44,58
Ortalama Hız (km/sa)	18,26	33,21	31,51	34,12	11,41
Maksimum Hızlanma (m/sn ²)	1,06	1,06	1,48	1,48	2,68
Maksimum Yavaşlama (m/sn ²)	-0,83	-1,39	-1,48	-1,48	-2,64
Ortalama Hızlanma (m/sn ²)	0,64	0,54	0,5	0,58	0,62
Ortalama Yavaşlama (m/sn ²)	-0,75	-0,79	-0,58	-0,68	-0,61
Duraklama Süresi (sn)	64	298	259	358	210
Duraklama Sayısı	3	13	17	22	18

Bu sürüş profillerinden ECE (The United Nations Economic Commission for Europe Elementary Urban Cycle), Avrupa şehir içi sürüşü yansıtan profildir. NEDC (New European Drive Cycle) yeni Avrupa sürüş profili olarak isimlendirilmekte ve ECE sürüş profiline EUDC (Extra-Urban Driving Cycle) olarak isimlendirilen şehirler arası sürüşü yansıtan profilin eklenmesiyle oluşturulmuştur. UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) sürüş profili EPA (United States Environmental Protection Agency) tarafından hafif yük araçlarının şehir içi sürüş profillerini yansıtmak üzere oluşturulmuş ve FTP-72/LA-4 olarak da isimlendirilmektedir. Ağır yük araçlarının şehir içi kullanımı için oluşturulan UDDS sürüş profili ile karıştırılmamalıdır. FTP-75 (The Federal Test Procedure) sürüş profili de FTP-72 yani UDDS sürüş profiline 505 saniyelik bir üçüncü fazın eklenmesiyle şehir içi binek araç ve kamyonetlerin testi amacıyla oluşturulmuştur. NYCC (New York City Cycle) sürüş profili ise düşük hızlı ve sık duruş kalkış içeren New York şehir içi sürüş profildir. Benzetim çalışmalarında kullanılan ECE sürüş profilinin zamana bağlı hız değişimi Şekil 2.2’de, diğer sürüş profilleri de Şekil 2.3’te gösterilmiştir.



Şekil 2.2: ECE sürüş profili hız-zaman grafiği.



Şekil 2.3: Standart sürüş profilleri, a) NEDC, b) UDDS, c) FTP-75, d) NYCC.

Bu sürüş profilleri elde edildikleri ülke ve araç trafiğinin temel karakteristiklerini yansıtmaktadır. Tablo 2.2’de de ifade edildiği üzere her bir sürüş

profilinin hızlanma, yavaşlama, duraklama, mesafe vb. karakteristiklerin farklılığı rahatlıkla Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'ten görülebilir.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen elektrikli araç şehir içi kullanım için tasarlandığından benzetim çalışmaları için en uygun profil olan ECE seçilmiştir. Bu profilin seçilmesinde temel kriter olarak aracın maksimum hızı, maksimum ivmelenmesi ve mesafe göz önünde bulundurulmuştur.

2.3 Elektrikli Araç Güç ve Tork Talebi

Bu tez çalışmasında elektrikli araç için güç ve tork talebinin hesaplanmasında ters durağan araç modeli prensibi kullanılmıştır (Miro-Padovani ve diğ. 2016). Bu modelde, araç hızı ve güç talebi sürüş profiline göre belirlenmektedir. Buradan, enerji depolama birimleri için akım, gerilim ve SOC gibi büyüklükler hesaplanmaktadır. Bu şekilde yapılan modelleme aracın kontrolü ve enerji yönetimi için daha kolay ve pratik bir yaklaşım sağlamaktadır.

Araç için gerekli olan güç Denklem (2.7)'deki gibi aracın hareketini sağlayan kuvvet ile bu kuvvet doğrultusundaki hızın çarpımından bulunur.

$$P = F_{TR} \cdot V_x \quad (2.7)$$

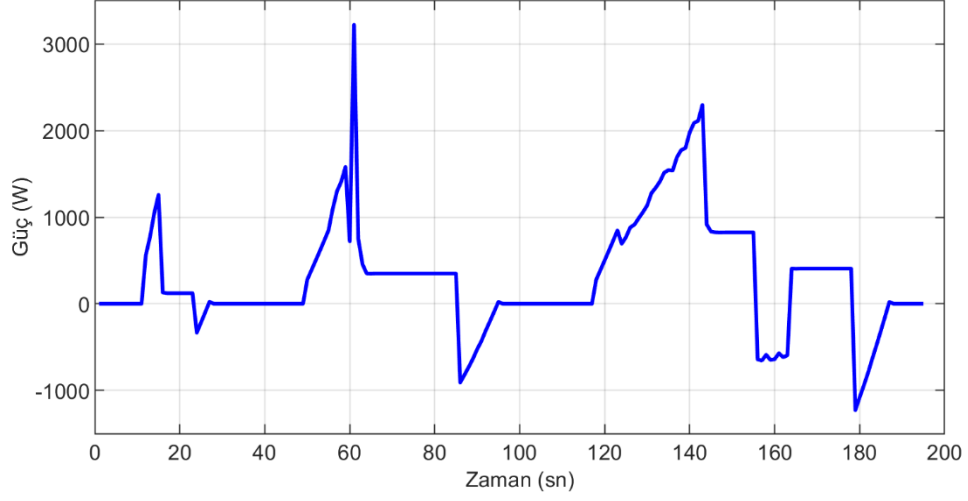
Bilindiği gibi tork, kuvvet ile kuvvet kolunun uzunluğunun çarpımı neticesinde bulunmaktadır. Buna göre, aracın belirtilen kuvveti sağlayabilmesi için gereken tork değeri Denklem (2.8)'den hesaplanır.

$$T = F_{TR} \cdot r \quad (2.8)$$

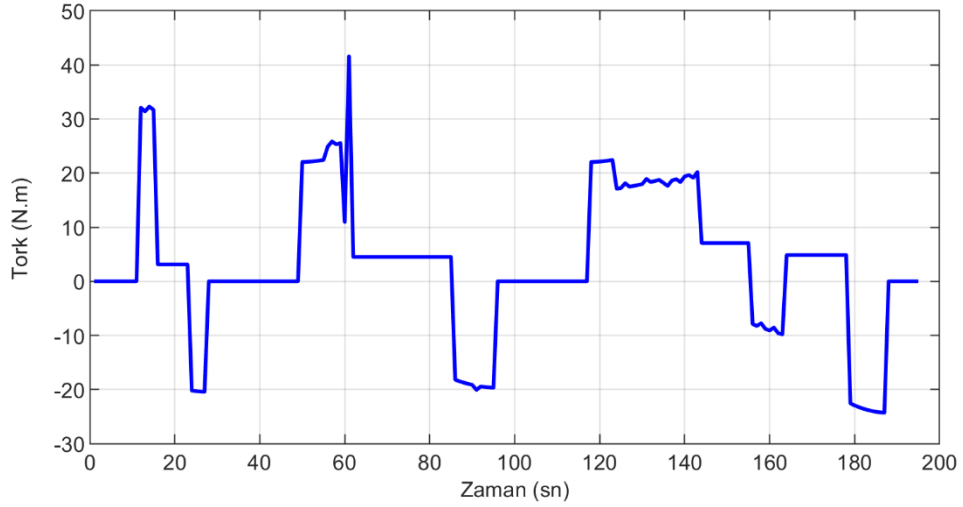
Denklemden belirtilen r araç tekerleğinin yarıçapıdır.

ECE sürüş profili için gerekli olan güç ve tork talebi Tablo 2.1'de tanımlanan araç modeline ilişkin parametrelere göre hesaplanmıştır. Burada hesaplanan güç talebi Şekil 2.4'te, tork talebi ise Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Şekil 2.4'ten görüleceği gibi güç talebinin pozitif olduğu durumlarda bu enerji depolama birimlerinden karşılanır. Güç

talebinin negatif olduğu durumlarda ise enerji depolama birimlerine depolanmaktadır. Benzer durum Şekil 2.5’den da görüldüğü gibi tork talebi için de geçerlidir.



Şekil 2.4: ECE sürüş profili araç güç talebi.



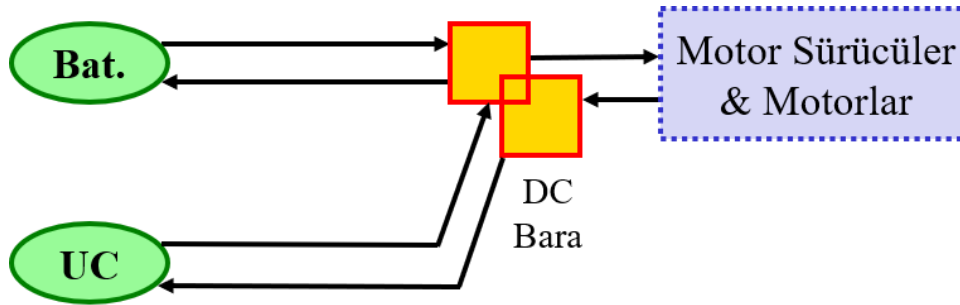
Şekil 2.5: ECE sürüş profili araç tork talebi.

2.4 Elektrikli Araç Topolojileri

Elektrikli araçlarda gerekli olan güç ihtiyacı bilindiği gibi bataryalar tarafından karşılanır. Ancak birçok uygulamada ana güç kaynağı batarya yanında UC gibi yardımcı güç kaynakları da kullanılmaktadır. Birden çok depolama birimi bulunan elektrikli araçlarda depolama birimlerinin yerleşimi ve birbirleriyle olan bağlantıları

oldukça önemlidir. Bu anlamda literatürde birçok bağlantı topolojisi önerilmiştir. Seçilecek topoloji; aracın çalışma karakteristiği, araç bileşenlerinin verimi, depolama birimlerinin kullanım ömrü vb. durumlar üzerinde etkili olmaktadır. Dolayısıyla, bu durum sistemin genel performansını etkilediği için EYS’de de göz ardı edilmemelidir. Bu sebeple, enerji depolama birimlerinin yerleşim topolojileri iyi incelenmeli ve ihtiyaca göre doğru topoloji seçilmelidir. Literatürde yapılan çalışmalarda birçok topoloji önerilmiş ve birbiriyle olan karşılaştırmaları yapılmıştır (Cao ve Emadi 2012; Geetha ve Subramani 2017; Kuperman ve Aharon 2011; Tie ve Tan 2013). Bu çalışmada literatürde en yaygın kullanılan beş farklı topoloji incelenmiş ve birbiriyle karşılaştırılması yapılmıştır.

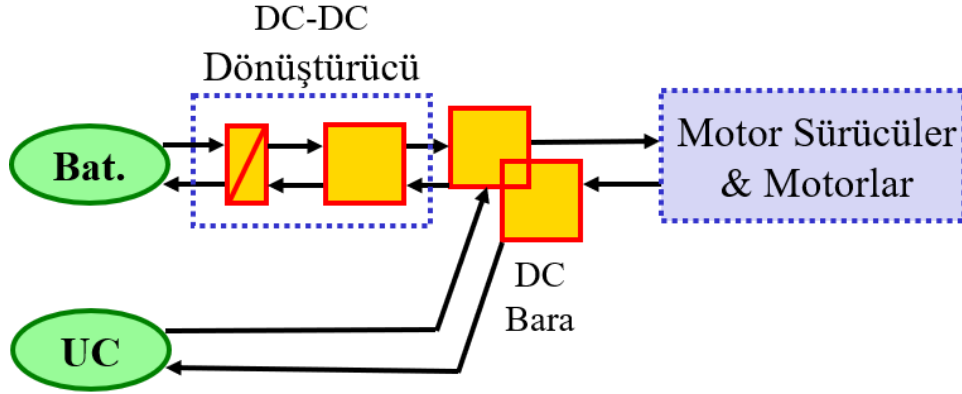
Literatürde önerilen topolojilerden birincisi pasif paralel bağlantıdır. Bu bağlantı modeli basit ve ek bir dönüştürücü elemanı gerektirmediğinden sıklıkla tercih edilmektedir. Pasif paralel bağlantı yapısı Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Ancak, bu bağlantı batarya ve UC’den istenildiği ölçüde yararlanılmasına imkan tanımamaktadır. UC’nin geriliminin batarya gerilimi ile sürekli aynı olması sebebiyle, UC’den alınabilecek ya da depolanabilecek enerji sınırlı olmaktadır. Ayrıca bu topolojide, batarya ve UC arası güç paylaşımının yönetilmesi gibi bir durum söz konusu değildir. Burada yardımcı kaynak UC, hızlı şarj/deşarj karakteristiğinden dolayı, yalnızca anlık akım ihtiyacı durumunda destek vermektedir.



Şekil 2.6: Pasif paralel bağlantı.

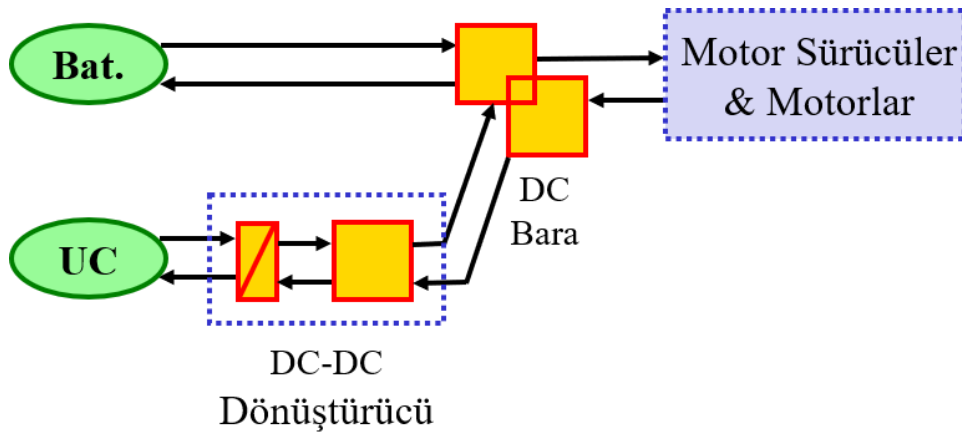
İkinci bağlantı topolojisinde batarya DC-DC dönüştürücü üzerinden, UC ise doğrudan DC baraya bağlı olup ilişkili topoloji Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu topolojide bara gerilimi UC’nin gerilimine bağlı olduğundan motor sürücülerinin verimi, sabit bara gerilimi olan duruma göre düşmektedir (Tie ve Tan 2013). Bu

sebeple, UC'den pasif paralel bağlantıya göre daha fazla faydalanılmasına rağmen, toplam sistem veriminde istenilen artış görülememektedir.



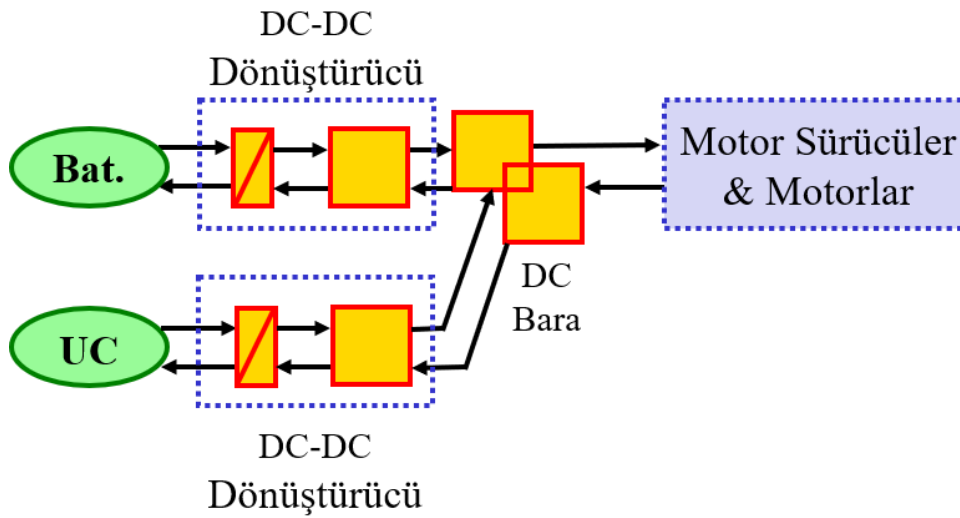
Şekil 2.7: UC doğrudan, batarya dönüştürücü üzerinden bağlantı topolojisi.

Üçüncü topolojide batarya DC baraya doğrudan, UC ise bir DC-DC dönüştürücü üzerinden bağlanmaktadır. Bağlantı topolojisi Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Bu topolojide, bara gerilimi batarya gerilimine bağlıdır ve neredeyse sabit kalmaktadır (Kuperman ve Aharon 2011). UC gerilimi DC-DC dönüştürücü tarafından arzu edildiği ölçüde ayarlanabileceği için UC'den yüksek düzeyde faydalanılabilir. Böylelikle, araç tarafından talep edilen anlık güçler UC tarafından karşılanabilir. Aynı zamanda generatör modunda üretilen fazla enerji yine dönüştürücü üzerinden UC'de depolanabilir. Böylelikle, doğru bir EYS stratejisi ile yukarıda belirtilen diğer topolojilere göre daha yüksek bir verim elde edilebilir.



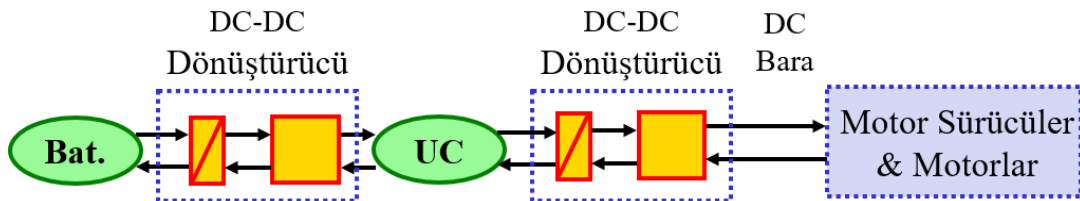
Şekil 2.8: Batarya doğrudan, UC dönüştürücü üzerinden bağlantı topolojisi.

Tam ayrıışmış topoloji olarak isimlendirilen dördüncü topoloji de Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Bu topolojide hem batarya hem de UC, DC baraya bir DC-DC dönüştürücü vasiyasıyla bağlanmaktadır. Böylelikle, her iki enerji depolama biriminden de en yüksek düzeyde faydalanılabilir. Bu sebeple yerleştirilecek olan depolama birimlerinin boyutları bir miktar küçültülebilir. Ancak, iki adet DC-DC dönüştürücü yer aldığı için araca getireceği ağırlık artışı daha fazla olmaktadır. Aynı zamanda, iki dönüştürücünün kontrolü ve koordinasyonu sistemin karmaşıklığını arttırmaktadır.



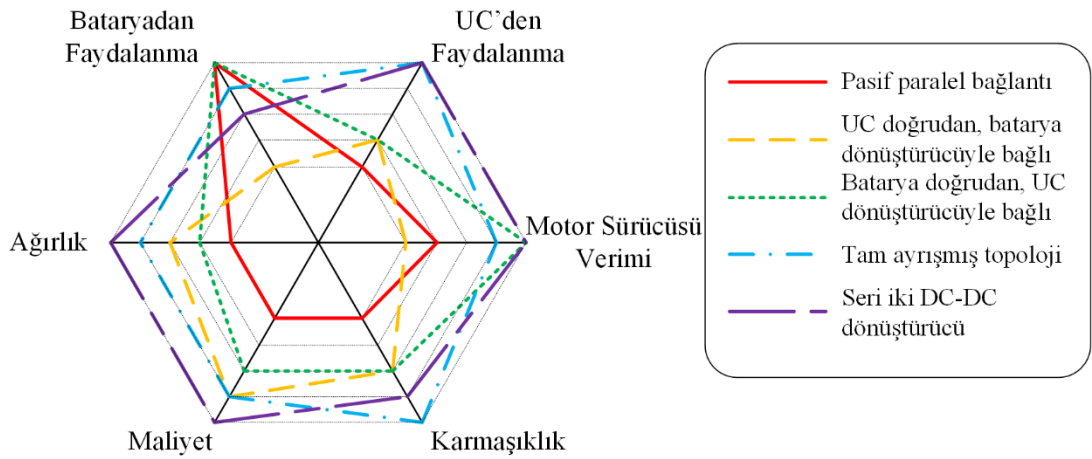
Şekil 2.9: Tam ayrıışmış topoloji.

Beşinci olarak seri bağlantılı topoloji Şekil 2.10’da gösterilmiştir. Burada, batarya bir DC-DC dnştrci üzerinden UC’ye, UC’de yine bir DC-DC dönüştürücüyle seri bir Şekilde DC baraya bağlanmaktadır. Böylelikle, Şekil 2.7’de yer alan ikinci topolojideki değişken bara geriliminin getirdiği olumsuzluk ortadan kaldırılmıştır. Dördüncü topolojiye benzer Şekilde burada da iki DC-DC dönüştürücünün getirdiği ağırlık ve karmaşıklık dezavantajı bulunmaktadır.



Şekil 2.10: Seri iki DC-DC dnştrci.

Belirtilen topolojileri ağırlık, maliyet, karmaşıklık, bataryadan faydalanma, UC'den faydalanma ve motor sürücüsü verimine etkisine göre değerlendirilirse, Şekil 2.11'deki gibi bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Ek bir donanım olarak DC-DC dönüştürücü sayısının artması ağırlık, maliyet ve karmaşıklığı arttırmaktadır. Buna karşılık, eklenen DC-DC dönüştürücüler vasıtasıyla enerji depolama birimlerinden daha iyi faydalanılabilmektedir. Ayrıca, DC-DC dönüştürücü eklenmesi ile ağırlık artışı meydana geleceği düşünülse de bazı durumlarda diğer birimler daha verimli kullanıldığı için batarya veya UC boyutunun küçültülmesiyle bu dezavantaj da ortadan kalkmaktadır (Xiong ve diğ. 2018). Şekilden de görülebildiği gibi her ne kadar bu kıyaslama göreceli de olsa bu tez çalışmasında kullanılan “Batarya doğrudan, UC dönüştürücü üzerinden” topolojisi diğer topolojilere göre avantajlı görünmektedir. Bu nedenle tez çalışmasında üçüncü topoloji olarak bahsedilen topoloji seçilmiştir.



Şekil 2.11: Batarya – UC bağlantı topolojilerinin karşılaştırması.

2.5 Araç Bileşenleri Modellenmesi

Bir elektrikli araçta bulunan temel elektriksel bileşenler; enerji depolama aygıtları, elektrik motoru, motor sürücüsü ve güç dönüştürücü birimleri olarak sıralanabilir. Enerji depolama birimi olarak batarya ile birlikte UC'nin bir arada kullanılması sağladığı avantajlar nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Sistemdeki güç akışının en uygun ve verimli bir şekilde yapılabilmesi amacıyla bağlantı

topolojisinde DC-DC dönüştürücü ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu temel donanımların genel özellikleri ve modellenmesi aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

2.5.1 Batarya Modeli

Elektrikli araçların büyük çoğunluğunda ana depolama birimi olarak genellikle bataryalar kullanılmaktadır. Çeşitli batarya türleri ve çalışmasını etkileyen bazı kriterler açısından karşılaştırılması Tablo 2.3'te verilmiştir. Kurşun asit bataryalar, belirtilen bataryalar içerisinde en yaygın ve en ucuz olan batarya türüdür. Fakat bu batarya türü çevreye zararlıdır ve diğer batarya türlerine göre daha ağırdır. Nikel tabanlı bataryalar, kurşun asit bataryaların aksine çevreyle uyumludur. Fakat kendi kendine deşarj oranları oldukça yüksektir ve ağırlık açısından kurşun asit bataryalara benzemektedir. Sodyum metal klorid bataryalar, yüksek sıcaklık değerleri arasındaki çalışma karakteristiği nedeniyle elektrikli araçlardaki kullanımı sınırlandırmaktadır. Lityum iyon bataryalar, diğer batarya türlerine göre nispeten daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahiptir. Aynı zamanda bu bataryaların iç dirençlerinin ve kendi kendine deşarj oranlarının çok düşük olması önemli özelliklerindedir. Alüminyum ve çinko hava bataryalar ise diğer bataryalar gibi şarj edilebilir değildir ancak elektrotun değiştirilmesiyle kullanıma devam edilebilmektedir. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan bu bataryaların ne yazık ki güç yoğunlukları oldukça düşüktür.

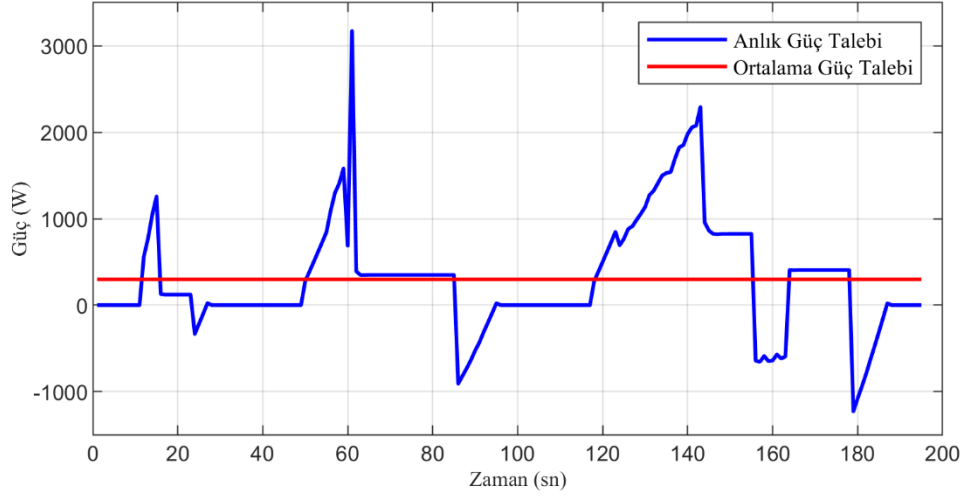
Tablo 2.3'ten de görülebileceği gibi elektrikli araçta kullanılmak için gereken özellikleri en yüksek oranda karşılayan batarya türü lityum tabanlı bataryalardır. Yüksek enerji, güç yoğunluğu, hafıza etkisinin olmaması, kendi kendine deşarj oranının çok düşük olması gibi özellikler bu bataryaları öne çıkarmaktadır. Günümüzde elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların çoğunluğu lityum temelli bataryalardır. En önemli dezavantajı güvenlik açısından koruma ve yönetim sistemlerine ihtiyaç duymalarıdır. Bu sebeple, lityum temelli bataryaların BYS ile birlikte kullanılmaları gerekmektedir.

Tablo 2.3: Çeşitli batarya türleri ve bazı özellikleri.

	Kurşun Asit	Nikel Metal Hibrit	Sodyum Metal Klorid	Lityum İyon	Alüminyum Hava	Çinko Hava
Spesifik Enerji (Wh/kg)	30-50	60-120	100	130-200	225	230
Spesifik Güç (W/kg)	~250	200	150	250-350	10	105
Nominal Hücre Gerilimi (V)	2	1.2	~2	3.5	1.4	1.2
Verim	~%80	>%80	>%80	>%80	N/A	N/A
İç Direnç	0.022 Ω /hücre	~0.06 Ω /hücre	Düşük SOC'ta yüksek	Çok düşük	Çok yüksek	Orta
Çalışma Sıcaklığı	Çevre sıcaklığı	Çevre sıcaklığı	300-350 °C	Çevre sıcaklığı	Çevre sıcaklığı	Çevre sıcaklığı
Kendi Kendine Deşarj Oranı	~%2 günlük	~% 5 günlük	~% 10 günlük	~% 10 aylık	>% 10 günlük	Yüksek
Çevrim Ömrü	800	~1000	>1000	>1000	>1000	>2000
Şarj Süresi	8 saat	1 saat hızlı şarj	2-3 saat	2-3 saat	10 dk (elektrot değiştirme)	10 dk (elektrot değiştirme)

Birincil depolama birimi olarak elektrikli araçlarda genellikle enerji yoğunluğu yüksek olan batarya ya da yakıt hücresi kullanılmaktadır. Bu birimin aracın ortalama güç ihtiyacını karşılayacak şekilde boyutlandırılması gerekmektedir. Benzetim çalışmalarında kullanılan aracın, ECE sürüş profilindeki güç talebi ve bu profil boyunca gerçekleşmiş olan güç taleplerinin ortalaması Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Bu talebe bakılarak araçta yer alacak batarya kapasitesinin boyutlandırması yapılabilir.

Modellenen araçta batarya kapasitesinin boyutlandırılması ECE sürüş profiline göre, ortalama ve en yüksek güç talebi dikkate alınarak yapılmasına ilişkin sonuçlar Tablo 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.12: Araç güç talebi.

Tablo 2.4: ECE sürüş profiline göre batarya boyutlandırması.

Tanımlamalar	Ortalamaya göre boyutlandırma	En yüksek talebe göre boyutlandırma
Güç Talebi (W)	298,32	3172,1
Batarya Gerilimi (V)	100,8	100,8
Batarya Akımı (A)	2,95	32,29
Gerekli Kapasite (Ah) (1C deşarj durumu için)	3	33
Piyasada Bulunan Kapasite (Ah) (1C deşarj durumu için)	3	35
Toplam Ağırlık (kg)	1,5	16,8
Maliyet (\$)	215	1300

Araçta sadece batarya bulunması durumunda en yüksek güç talebine göre boyutlandırma yapılması gerektiği açıktır. Bu durumda, tablodan da görülebildiği gibi ağırlık ve maliyet önemli ölçüde artmaktadır. Dolayısıyla böyle bir artışla karşılaşmamak için ya güç yoğunluğu yüksek bataryalar tercih edilmeli ya da bataryalar anlık güç taleplerini karşılayacak başka enerji depolama birimleriyle birlikte kullanılmalıdır. Araçta yeterli boyutta bir UC kullanılmasıyla bataryanın sadece ortalama güç talebini karşılayacak şekilde boyutlandırılması mümkün hale gelmektedir. Örneğin ortalama güce göre yapılan boyutlandırmada güç talebi 298,32 W olup batarya maliyeti 215 \$'dır. Buna karşı boyutlandırma en yüksek güç talebine

göre yapıldığında güç talebi 3172,1 W ve batarya maliyeti 1300 \$'a kadar yükselmektedir.

Bataryaların enerji depolama kapasitesi, tasarlanan aracın menziline belirleyen en önemli faktörlerdendir. Fakat, bu birimin enerji kapasitesini yükseltmek aracın menziline doğru orantılı olarak arttırmak anlamına gelmemektedir. Enerji kapasitesindeki artışın araca ek bir ağırlık getireceği ve bu durumun güç tüketimini arttıracığı unutulmamalıdır. Yapılan bir çalışmada enerji kapasitesinin %100 arttırılmasının HEV için sadece batarya ile gidilebilecek menzili ancak %15 arttırılabileceği gösterilmiştir (Khaligh ve Li 2010).

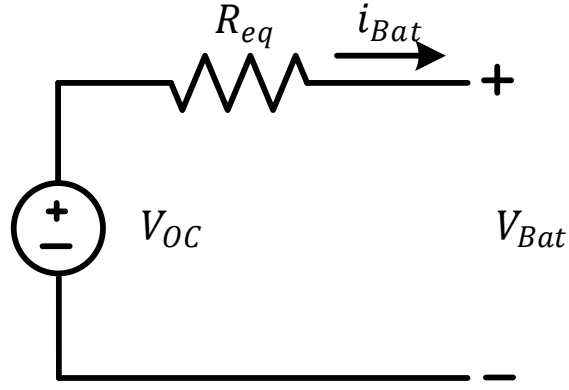
Özellikle lityum temelli batarya hücrelerinin sağlıklı bir şekilde kullanılabilmesi için bir BYS ile birlikte kullanılması gerekmektedir. BYS batarya hücrelerinin yüksek akıma, yüksek gerilime ve yüksek sıcaklığa karşı korunmasını sağlamalıdır. Ayrıca şarj ve deşarj anında hücreler arası dengesizliği önlemek ve kapasiteyi en üst düzeyde kullanmak amacıyla dengeleme işlemi yapılmalıdır.

Araçta yer alan bataryada kullanılan Samsung firmasının 18650 lityum iyon batarya hücresinin teknik özellikleri Tablo 2.5'da verilmiştir (Voltaflex 2012).

Tablo 2.5: Samsung 18650 batarya hücresinin bazı karakteristik özellik ve değerleri.

Tanımlama	Değer
Nominal gerilim	3,6 V
Nominal kapasite	2850 mAh
Maksimum hücre gerilimi	4,15 V
Minimum hücre gerilimi	2,8 V
Operasyon gerilim aralığı	3,2 – 4,1 V
İç direnci	<5 mΩ
Çevrim ömrü	>2000

Kullanılan batarya eşdeğer devresi Şekil 2.13'de gösterilmiştir.

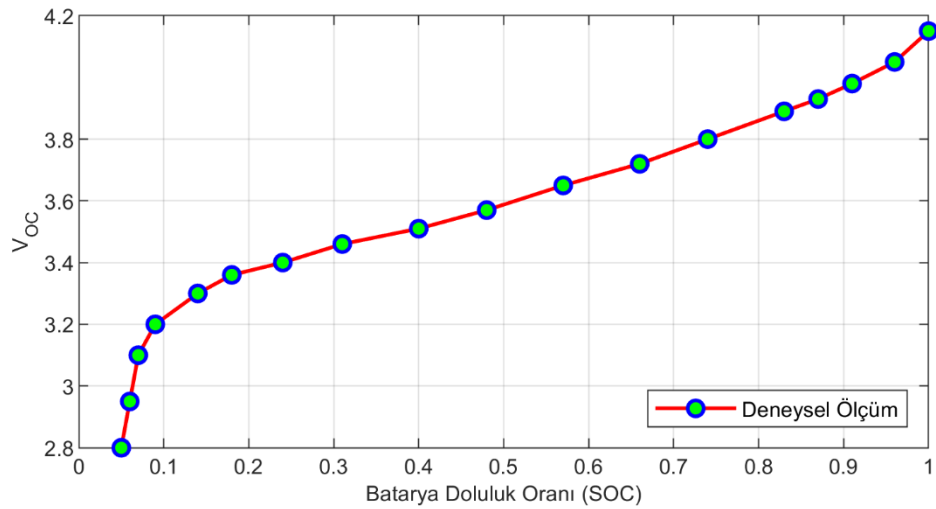


Şekil 2.13: Batarya hücre eşdeğer devresi.

İç direnç eşdeğer devresi kullanılarak oluşturulan bu eşdeğer devre için batarya gerilimi ifadesi denklem (2.9)'da gösterilmiştir.

$$V_{bat} = V_{OC} - i_{bat} * R_{eq} \quad (2.9)$$

Denklemden V_{OC} batarya açık devre gerilimini, R_{eq} batarya eşdeğer iç empedansıdır. Batarya açık devre gerilimi, bataryanın SOC'una son derece bağımlı olduğundan bu gerilimin belirlenmesi deneysel verilere bağlı elde edilmiş denklem veya tablolar kullanılarak yapılır. Bu çalışmada, batarya açık devre geriliminin SOC'a bağlı olarak belirlenmesi, bataryanın kullanım kılavuzunda verilen V_{OC} grafiği kullanılarak yapılmıştır. Grafikte verilmeyen ara değerler ise interpolasyon yapılarak hesaplanmıştır. Batarya karakteristiğine ilişkin deneysel olarak ölçülen değerler ve V_{OC} -SOC ilişkisi Şekil 2.14'te gösterilmiştir.

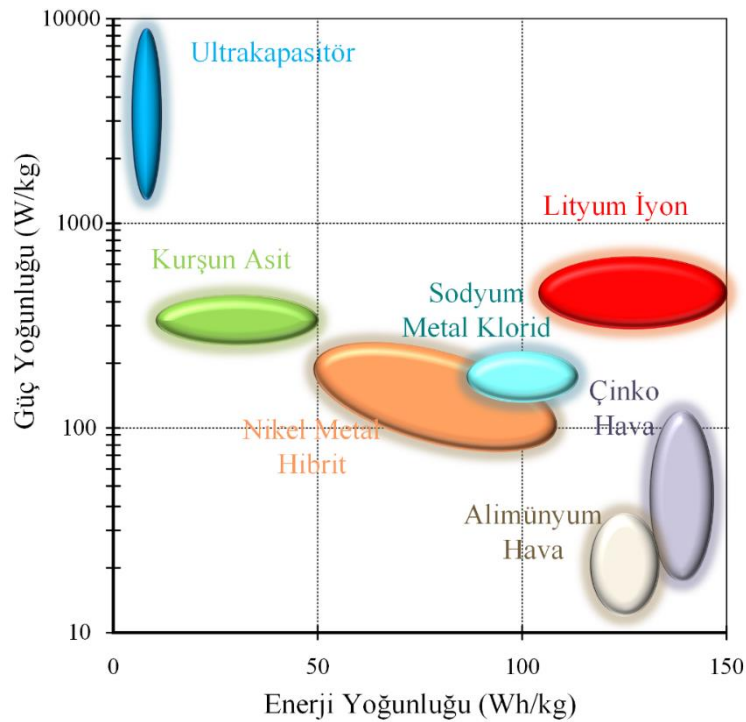


Şekil 2.14: Lityum iyon batarya için batarya açık devre gerilimi-batarya SOC ilişkisi.

2.5.2 Ultrakapasitör Modeli

Ultrakapasitörler elektrikli araçlarda genellikle ikinci bir enerji depolama ünitesi olarak kullanılmaktadır. UC'nin enerji yoğunluğu bataryalara göre oldukça düşük olması sebebiyle tek başına araçta genellikle kullanılmamaktadır. Bazı batarya türleri ve UC'nin güç-enerji yoğunluklarının karşılaştırması Şekil 2.15'te verilmiştir (Ju ve diğ. 2016; Thounthong ve diğ. 2008; Wang ve diğ. 2007). Şekilden de görüldüğü gibi UC'nin güç yoğunluğu çok yüksek olmasına karşın enerji yoğunluğu düşüktür. Ayrıca UC'ye en yakın güç yoğunluğuna sahip batarya türü lityum iyon bataryalardır.

UC'nin boyutlandırılması, aracın maksimum güç ihtiyacından ortalama güç ihtiyacının çıkarılmasıyla veya maksimum rejeneratif gücün geri kazanılması için gerekli olan enerjiyi karşılayacak kadar yapılmaktadır. UC'nin karşılayacağı güç değeri Tablo 2.4'te yer alan maksimum 3172,1 W'lık güçten ortalama güç olan 298,32 W'ın çıkarılmasıyla 2873,8 W olarak hesaplanır. Ya da Şekil 2.12'de verilen araç güç talebi eğrisi maksimum rejeneratif gücü olan 1200 W olarak seçilebilir.



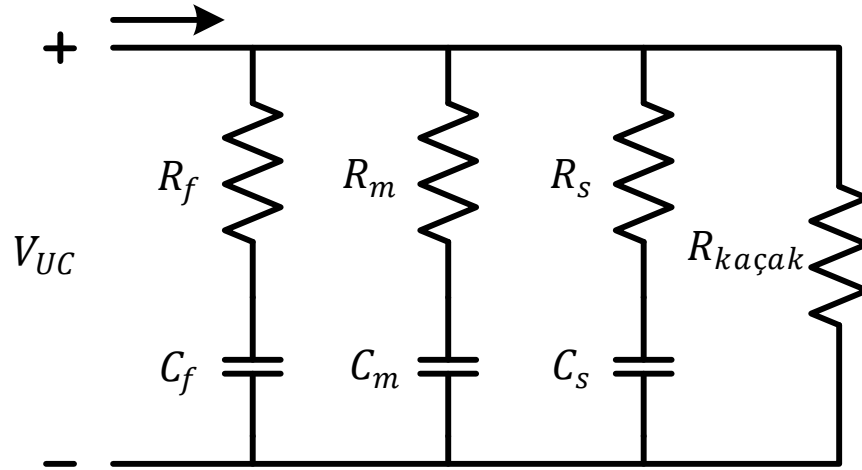
Şekil 2.15: Ultrakapasitör ve bazı önemli batarya türlerinin güç ve enerji yoğunlukları.

UC modülünün oluşturulmasında Maxwell firmasının BCAP0650 P270 K049 tip UC hücreleri kullanılmıştır. Hücrelerin teknik özellikleri Tablo 2.6’de verilmiştir (Maxwell 2014).

Tablo 2.6: BCAP0650 UC hücresine ait bazı teknik özellikleri.

Özellik	Değer
Nominal kapasite	650 F
Nominal hücre gerilim	2,7 V
Maksimum hücre gerilimi	2,85 V
İç direnci	0,8 mΩ
Maksimum akım	680 A
Çalışma sıcaklık değerleri (En düşük, En yüksek)	-40 C ⁰ , 70 C ⁰
Çevrim ömrü	>10.000

Kullanılan UC'lere ilişkin benzetim modeli referans (Shi ve Crow 2008; Vural ve diğ. 2009; Zubieta ve Bonert 2000) ve UC'nin kullanım kılavuzları (Maxwell 2014) kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan modele ilişkin eşdeğer devre Şekil 2.16’da gösterilmiştir.



Şekil 2.16: UC eşdeğer devresi.

Eşdeğer devredeki model parametrelerinin hesaplanmasında Tablo 2.7’de verilen denklemler kullanılmaktadır (Shi ve Crow 2008). Kullanılan eşdeğer devredeki R_f ve C_f elemanlarından oluşan ilk dal “hızlı-terim dalı” olarak adlandırılır. Bu dal UC’nin birkaç saniyelik kısa zaman aralıklarındaki şarj ve deşarj davranışlarını temsil eder. İkinci dal ise R_m ve C_m elemanlarından oluşur ve “orta-terim dalı” olarak

adlandırılır. Benzer şekilde, bu dal da UC'nin birkaç dakikalık sürelerdeki karakteristiğine karşılık gelir. R_s ve C_s elemanlarından oluşan son dala ise "kısa-terim dalı" adı verilir. Bu dal da 10 dakikadan daha uzun sürelerdeki UC'nin uzun dönem karakteristiklerini temsil eder. Dallara paralel olan son eleman $R_{kaçak}$ ise kaçak direnci olarak isimlendirilir. Bu terim, UC'nin uzun zaman aralıklarında meydana gelen kaçaklarını modele dahil eder.

Tablo 2.7: UC'nin kullanım kılavuzundan eşdeğer devre parametrelerini elde etmek için gerekli olan denklemler (Shi ve Crow 2008).

$R_f = \frac{2}{3} ESR$	$R_m = \frac{2}{3} \varphi^{-(2k-1)} ESR$	$R_s = \frac{2}{3} \varphi^{-(2k+1)} ESR$
$C_f = 1.05 C_0$	$C_m = 1.05 \varphi^{+(2j+1)} C_0$	$C_s = 1.05 \varphi^{+(2j-1)} C_0$
$\tau_f = \frac{2.1}{3} C_0 ESR$	$\tau_m = \frac{2.1}{3} \varphi^{+2(1+j-k)} C_0 ESR$	$\tau_s = \frac{2.1}{3} \varphi^{+2(-1+j-k)} C_0 ESR$
$R_{kaçak} = \frac{V_{UC}}{I_{kaçak}}$ $\varphi = 0.5\sqrt{5} - 1$ $j = 2, k = 8$		

Tablo 2.7'deki denklemlerde yer alan eşdeğer devre parametreleri hesaplanırken hücre sığası (C_0) ve seri eşdeğer direnç (ESR) değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değerler kullanılan UC'nin kullanım kılavuzundan bulunabilir (Maxwell 2014).

2.5.3 Motor Modeli

Elektrikli araçlarda kullanılan motorlarda; yüksek kalkış torku, düşük ağırlık, yüksek verim vb. özelliklerin olması istenmektedir. Günümüzde bu özelliklere en yakın motor türleri içerisinde sabit mıknatıslı senkron motor (PMSM) ve fırçasız doğru akım motorları (BLDC) bulunmaktadır. Her iki motorun yapıları birbirine oldukça benzemekte olup sadece stator sargılarının sarımı dolayısıyla bazı farklılıkları bulunmaktadır (Nory ve Akyun 2020).

Kullanılacak motorların güç ve tork değeri aracın ağırlığına ve istenilen ivmelenmeye (hızlanma ve yavaşlama) göre belirlenmektedir. Tasarlanan elektrikli

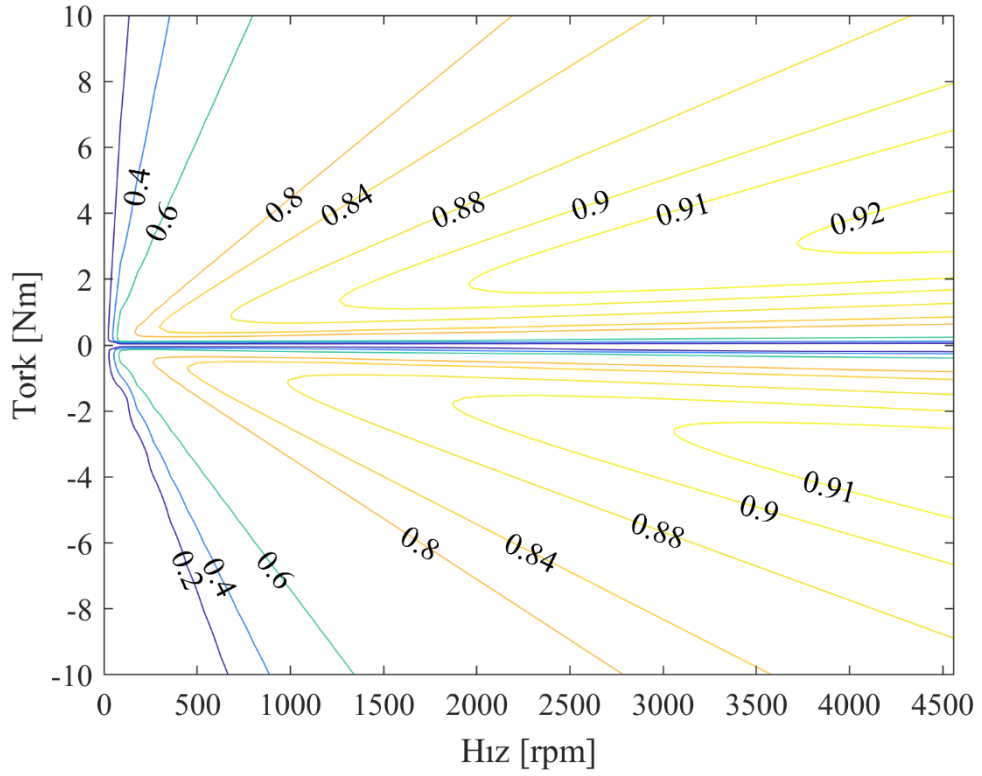
araç modeli için düz bir yolda 0'dan 50 km/sa hıza 15 sn. içinde çıkması için gerekli olan motor güç değeri 3278 W, tork değeri de 65,62 Nm olarak hesaplanmıştır. Araç parametrelerine göre hesaplanan güç ve tork değerleri Tablo 2.8'de sunulmuştur. Bu güç, toplam gücü ifade etmektedir. İki adet motor kullanılması durumunda her bir motorun gücü hesaplanan değerin yarısına karşılık gelir.

Tablo 2.8: Hesaplanan motor güç ve torkunun değerleri.

Tanımlamalar	Değer
Araç Ağırlığı	200 kg
Maksimum Hız	50 km/sa = 13.89 m/sn
0'dan maksimum hıza çıkış süresi	15 sn
Gerekli kuvvet	236,05 N
Gerekli güç	3278 W
Gerekli tork	65,62 Nm

EYS açısından motorların sahip olması gereken donanımsal herhangi bir özellik yoktur. Motor sürücüsü vasıtasıyla dönüş hızları ve gerek duydukları akımın bilinmesi yeterlidir. Dönüş hızının doğru bir şekilde belirlenebilmesi için motora dahili sensörler yerleştirilmektedir. Motor sürücüleri genellikle bu sensörlere göre motoru sürme işlemini gerçekleştirmektedir. Dolayısıyla EYS açısından motor hakkında gerekli olan bilgiler motor sürücülerinden elde edilebilir.

Benzetim çalışmalarında kullanılan motor modeli referansta (Demircalı ve diğ. 2018) detaylarıyla verilmiştir. Matematiksel hesaplamalardan elde edilen, motora ait verim haritası Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Bu verim haritasından motorun her tork ve hız değeri için verimi bulunabilmektedir.

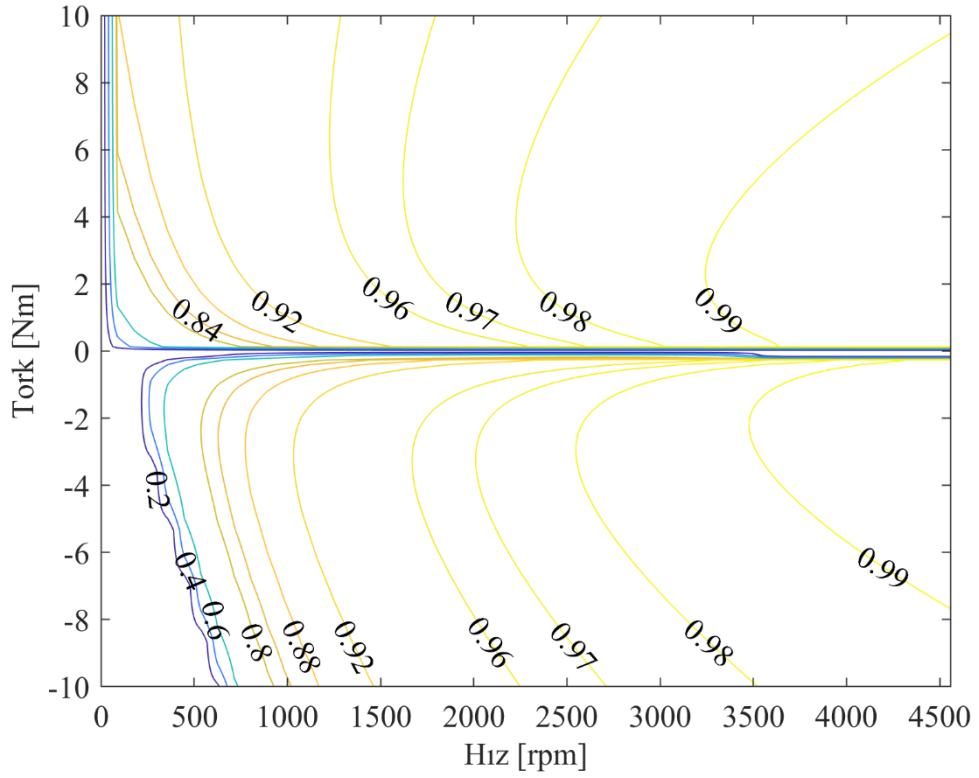


Şekil 2.17: Motorun hız ve torka bağlı verim haritası.

2.5.4 Motor Sürücüsü Modeli

Motor sürücüleri, araç sürücüsü tarafından verilen referans komutlarına göre motorların sürülmesini sağlayan donanımlardır. Aracın verilen referans hıza ulaşması için gerekli olan sürme işlemi, aracın bulunduğu koşullara bağlı değişiklik göstermektedir. Bu farklılığa sebep olabilecek durumlara aracın ağırlığı, eğim ve hızlanma-yavaşlama zamanlarındaki değişiklikler örnek verilebilir. Dolayısıyla motor sürücülerinin verilen komutları tam olarak yerine getirmesi ve istenilen referans değerlere ulaşabilmesi için kapalı çevrim bir kontrol sistemi ile donatılması gerekmektedir.

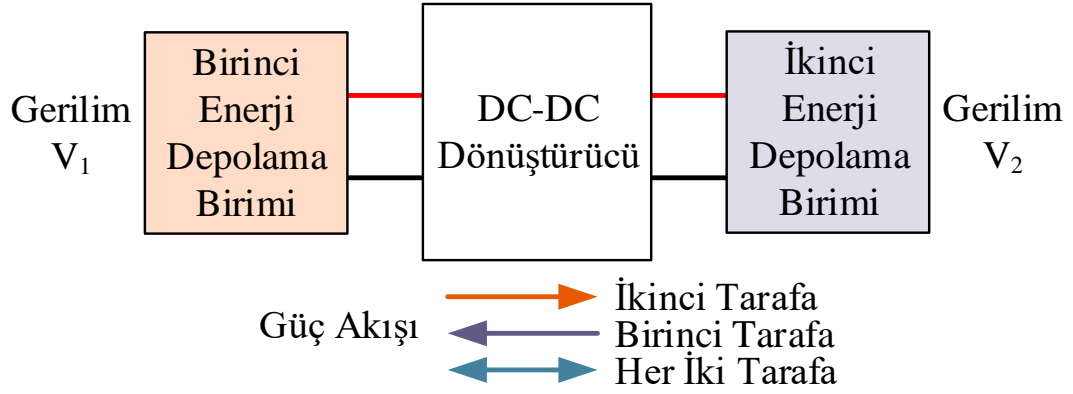
Benzetim çalışmalarında kullanılan motor sürücü modeli referansta (Demircalı ve diğ. 2018) detaylarıyla verilmiştir. Matematiksel hesaplamalardan elde edilen, sürücüye ait verim haritası Şekil 2.18'de gösterilmiştir. Bu verim haritasından sürücünün her tork ve hız değeri için verimi bulunabilmektedir.



Şekil 2.18: Motor sürücü hız ve torka bağlı verim haritası.

2.5.5 DC-DC Dönüştürücü

Batarya ve UC'den beslenen bu elektrikli araçta, DC baraya batarya doğrudan UC ise bir dönüştürücü üzerinden bağlantılı topoloji seçilmiştir. Bu yüzden, EYS için UC ile DC bara arasındaki güç akışının düzenlenmesinde DC-DC dönüştürücüye ihtiyaç duyulmaktadır. DC-DC dönüştürücü girişindeki DC gerilimi çıkışında farklı bir gerilim seviyesine dönüştüren güç elektroniği donanımlarıdır. Literatürde çok sayıda DC-DC dönüştürücü topolojisi bulunmaktadır. Şekil 2.19'da blok şeması gösterilen DC-DC dönüştürücü, gerilimi dönüştürme biçimine göre alçaltan ($V_2 < V_1$), yükselten ($V_2 > V_1$) ve alçaltan-yükselten olarak isimlendirilebilir. Bu işlevleri yerine getirmek için de yine yarım köprü, tam köprü, flyback, CUK, SEPIC gibi DC-DC dönüştürücü devre türleri bulunmaktadır.



Şekil 2.19: DC-DC dönüştürücü blok şeması.

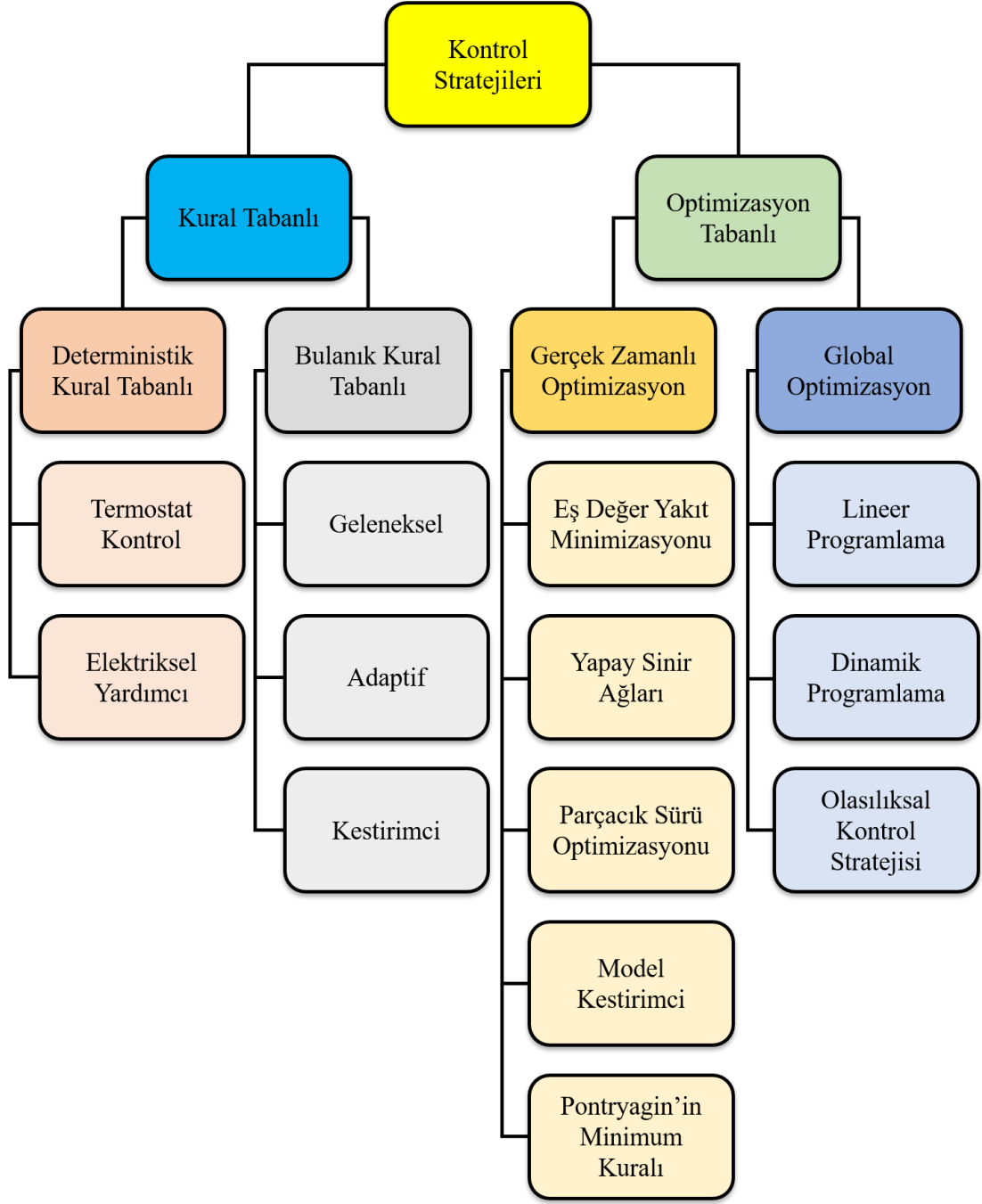
Elektrikli araçta EYS işlevini yerine getirirken kullanılacak DC-DC dönüştürücünün hem birinci taraftan ikinci tarafa hem de ikinci taraftan birinci tarafa, güç aktarımı yapabilmesi gerekmektedir. Dönüştürücünün, kullanılan enerji depolama birimlerinin gerilim aralıklarına göre, her iki yönde de gerilimi azaltma ve arttırma işlemini yapabilmesi büyük avantaj olmaktadır. Ayrıca batarya ve UC'nin güvenlik açısından izole olması gerekmektedir. Dolayısıyla elektrikli araçlarda genellikle transformatörle galvanik olarak izole edilmiş DC-DC dönüştürücüler tercih edilir.

Bu donanım EYS uygulaması için kritik öneme sahip olup diğer araç bileşenleri de dikkate alınarak çalışmaya özgü tasarlanmıştır. Tasarlanan dönüştürücünün detayları Bölüm 5.2'de verilmiştir.

3. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ

Literatürde elektrikli araçlar için EYS konusunda çok sayıda nitelikli çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların, büyük çoğunluğunda enerji yönetiminin amacı araç bileşenlerinden elde edilen verimi en üst seviyeye çıkarmaktır. Bunun yanında bazı çalışmalarda ise önerilen EYS yöntemlerinin gerçek zamanlı uygulanabilir olmasına odaklanılmıştır. Gerçek zamanlı yöntemlerin uygulanabilir olması, önemli ölçüde her koşulda tutarlı sonuçlar üretmesi ve ölçüm hatalarından az etkilenmesine bağlıdır. Literatürdeki çalışmaların genelinde kontrolü ve yönetimi daha zor olan hibrit (İçten yanmalı motor – elektrikli) araçların EYS konusu ele alınmıştır (Zhang ve diğ. 2015). Bunun yanı sıra birden çok enerji depolama biriminin bulunduğu elektrikli araçlarda EYS'leri konu alan birçok çalışma mevcuttur (Rosario 2007; Wang ve diğ. 2016). Bu çalışmalarda kural tabanlı ve optimizasyon tabanlı yönetim sistemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemlerle, herhangi bir kontrol stratejisi bulunmayan duruma göre ciddi iyileştirmeler kaydedilmiştir. Ayrıca, araç için bir EYS'nin bulunması, araçtaki enerji depolama birimleri üzerinde bulunan stresi azaltarak uzun ömürlü kullanılmasına imkan tanır. EYS'nin gerçekleştirilmesi için kullanılan yöntemler genel olarak Şekil 3.1'deki gibi gruplandırılabilir (Castaings ve diğ. 2016; Geetha ve Subramani 2017; Panday ve Bansal 2014).

Maksimum verim ile EYS'yi gerçekleştirmeyi amaçlayan kural tabanlı yöntemler, genellikle belirli bir sürüş çevrimi üzerinde uzman görüşüne ya da matematiksel veya sezgisel bilgi birikimine dayalı kontrol yöntemleridir. Deterministik ve bulanık kural tabanlı olarak iki alt gruba ayrılabilir. Deterministik kontrol yönteminde belirli sürüş profilleri için önceden bazı senaryolar belirlenir. Aracın o anki durumuna göre önceden belirlenmiş güç paylaşımı gerçekleştirilir. Bu yöntemde optimum bir kontrol söz konusu değildir. Bulanık kural tabanlı EYS'lerde, aracın o anki kontrolünde belirleyici etken araç dinamiklerinin çeşitli üyelik fonksiyonları ile bir araya getirilmesidir. Bulanık mantık tabanlı bu yaklaşımın sağladığı en büyük avantaj hatalı ölçüm verilerine toleranslı ve kararlı bir güç akışının gerçekleştirilmiş olmasıdır. Ayrıca bulanık mantığın yapısı gereği lineer olmayan araç dinamiklerinin kontrol yöntemine dahil edilmesi daha kolaydır ve tasarımda esneklik sağlar.



Şekil 3.1: Elektrikli araçlarda kullanılan enerji yönetim yöntemlerinin gruplandırılması.

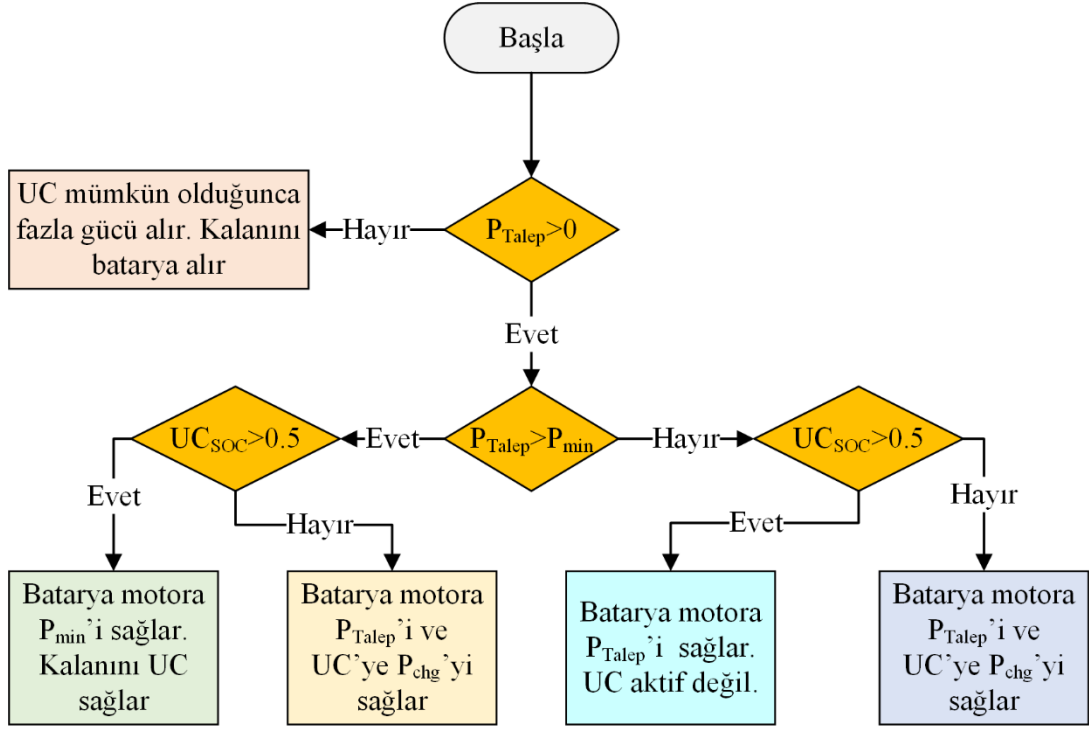
Optimizasyon tabanlı EYS'lerde ise kontrol algoritması sistemin belirlenen maliyet fonksiyonuna göre optimize edilir. Bu sayede enerji yönetimi en uygun şekilde gerçekleştirilmiş olur. Fakat, optimizasyon tabanlı kontrol yöntemleri gürültüye ve parametre değişimlerine karşı çok hassastır. Bu yüzden, tasarım aşamasında sistemin bileşenlerinin bütün statik ve dinamik davranışları göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun yanı sıra, bütün detayları model içinde barındırmak çok fazla bir işlem yükü getireceği için bazı varsayımlar ve sadeleştirmeler yapmak gerekebilir. Global

optimizasyon tabanlı EYS'ler işlem fazlalığı ve nedensel olmamaları dolayısıyla gerçek zamanlı uygulanamazlar. Bu yöntemler, yalnızca tasarım aşamasında enerji yönetiminin en ideal hangi noktalarda çalıştığını görmek ve gerçek zamanlı uygulamalarda bu sonuçlara mümkün olduğunca ne kadar yaklaşılabileceğini tahmin etmek için kullanılırlar.

3.1 Kural Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri

Kural tabanlı EYS yöntemleri genellikle pratik ve endüstriyel uygulamalarda tasarlanan araçları mümkün olduğunca basit, hatadan uzak ve gerçek zamanlı kontrol edecek şekilde kullanılmaktadırlar. Bu yöntemler genellikle enerji depolama birimlerinin sahip oldukları özelliklere göre önceden belirlenmiş kesin kurallara göre çalışmaktadır. Literatürde bulunan uygulamalarda kuralların karmaşıklığı ve sistemin performansı farklılıklar göstermektedir (Golchoubian ve Azad 2017; Kouchachvili ve diğ. 2018; Song ve diğ. 2018). Kuralların en uygun şekilde belirlenmesi uzman bilgisi gerektirmektedir ve oldukça zaman alabilmektedir.

Kural tabanlı kontrol yöntemleri, genellikle önerilen diğer EYS yöntemlerini karşılaştırmak için kullanılmaktadır. Literatürde bulunan çoğu optimizasyon tabanlı yöntem, genellikle bir kural tabanlı EYS ile karşılaştırılmaktadır. Kural tabanlı EYS için kuralların belirlenmesi tasarımcı ve problemin tanımına bağlı olarak çalışmalar arasında farklılıklar göstermektedir. Örnek olarak Şekil 3.2'de batarya ve UC beslemeli bir elektrikli araç için kural tabanlı bir EYS akış şeması gösterilmiştir (Golchoubian ve Azad 2017). Burada kurallar talep gücüne ve UC'nin doluluk miktarına göre belirlenmiştir. Aracın o anki durumu kurallara göre hangi şarta uyuyorsa, ilgili çıkış değerleri elde edilmiş olur. Durumun değişmesiyle çıkış değerleri keskin şekilde değişebilmektedir.



Şekil 3.2: Kural tabanlı EYS ana akış şeması (Golchoubian ve Azad 2017).

Literatürde ayrıca araç hızına bağlı UC doluluk oranını ayarlamaya çalışarak enerji yönetimi yapan kural tabanlı yöntemler de önerilmiştir (Bauman ve Kazerani 2008). UC'lerin aracın hızlanması anında deşarj olması ve yavaşlama anında şarj olması gerekliliğine dayanan bu yöntemde, aracın kinetik enerjisi ile UC'nin sahip olduğu enerjinin toplamının Denklem (3.1)'deki gibi sürekli sabit olması gerektiği belirtilmiştir.

$$W \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} C V^2 = N \quad (3.1)$$

Denklemden W katsayı ve N sabittir. Bu yöntem, UC'nin başka bir amaçla kullanılmadığı varsayımıyla oldukça etkilidir. Fakat, denklemde aracın konumu dolayısıyla kazandığı ve kaybettiği potansiyel enerji dahil edilmemiştir. Bu durum, uygulamada bazı sorunlara yol açabilmektedir. Denklemin aracın potansiyel enerjisini de dikkate alarak yeniden düzenlenmesi gerekmektedir.

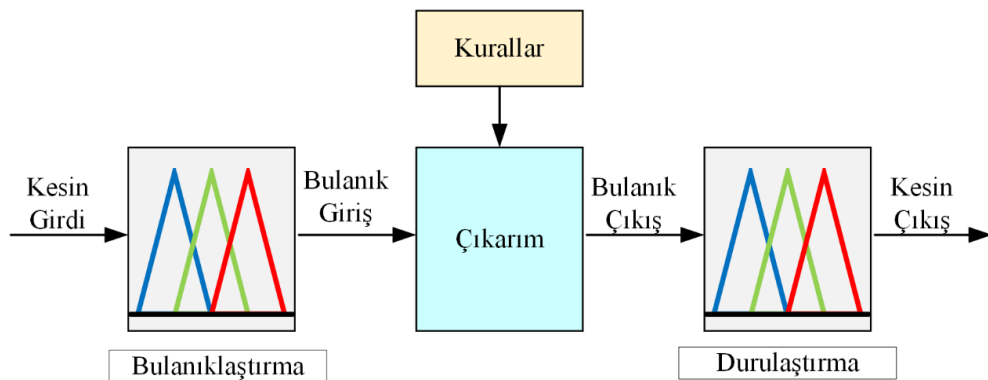
Kural tabanlı yöntemlerde, kuralları istenilen sayıda arttırmak mümkündür. Ancak eklenen her kural yeni bir işlem yükü getirmektedir. Dolayısıyla, kural tabanlı yöntemin en önemli özelliği olan gerçek zamanlı uygulanabilir olması tehlikeye

girmektedir. Ayrıca, kuralların belirlenmesi araca ve rotaya özel olmaktadır. Bu sebeple; araçta ve rotada meydana gelen her değişiklikte kuralların revize edilmesi gerekmektedir. Revizyon için gereken uzman bilgisinin yanı sıra, yenilenen kuralların denenmesi ve etkinliğinin kontrol edilmesi de hayli zaman alabilmektedir. Dolayısıyla, kural tabanlı yöntemlerde en optimum kuralları elde etmekten ziyade, araç bileşenlerini koruyacak sınırlar belirlenir. Buna göre sınırlar içerisinde güç paylaşımı yapılması sağlanır.

3.2 Bulanık Mantık Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri

Bulanık mantık tabanlı EYS'lerde, temelleri Lotfi Zadeh tarafından önerilen bulanık mantık prensiplerinden yararlanılır (Zadeh 1965). Bulanık mantık kontrolde deterministik kural tabanlı kontrolün aksine kesin kurallar ve sınırlar yoktur. Kontrol sisteminin giriş ve çıkışları çeşitli üyelik fonksiyonlarıyla ve sözel ifadelerle sisteme dahil edilmektedir. Örneğin aracın talep gücü için 1000 W'ın "Çok Yüksek" üyelik fonksiyonuna belli bir miktarda dahil olabildiği gibi "Yüksek" üyelik fonksiyonuna da başka miktarda dahil olabilmektedir. Dolayısıyla tasarıma bağlı olarak keskin sınırlar ve kesikli çıkış değerleri oluşmamaktadır. Bu özelliği nedeniyle deterministik kural tabanlı EYS'lere göre daha esnek ve yanlış ölçümlere toleranslıdır.

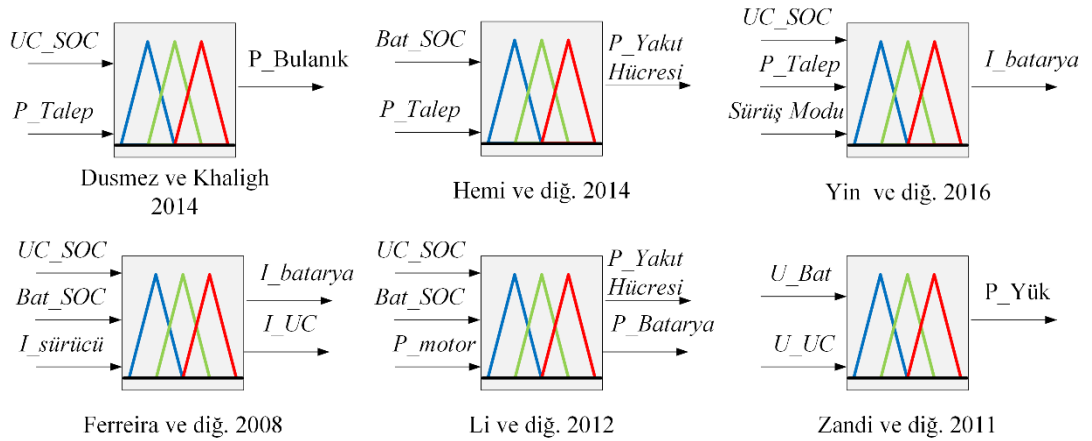
Bulanık mantık sisteminin temel prensip şeması Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Burada giriş değerleri çeşitli üyelik fonksiyonlarıyla önce bulanıklaştırılır. Daha sonra giriş değerleri belirlenen kurallara göre işlenir. En son olarak da durulaştırma işlemi ile çıkış elde edilmiş olur.



Şekil 3.3: Bulanık mantık prensip şeması.

Üyelik fonksiyonu olarak; üçgen, trapezoid, sigmoid vb. olmak üzere çeşitli fonksiyonlar kullanılabilir. Gerçek zamanlı uygulamalarda, üçgen ve trapezoid gibi doğrusal üyelik fonksiyonları işlem kolaylığı sağlaması sebebiyle daha sık tercih edilmektedir. Kurallar işlenirken klasik mantıktaki VE, VEYA, DEĞİL gibi operatörlerin yerine minimum, maksimum, (1-Değer) gibi işlemler kullanılır. Bulanık mantıkta kurallar da klasik mantıktan farklı olarak sözel ifadelerle oluşturulur. Örneğin; “Eğer UC az dolu ve talep gücü fazla ise, batarya çıkış gücü yüksek” gibi ifadelerle giriş ve çıkışlar arasındaki ilişkiler tanımlanır. En son olarak da işlenen kurallara göre elde edilen çıkış değeri durulaştırılır. Durulaştırma için alanların merkezi, maksimumların ilki, maksimumların ortalaması gibi çok çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Van Leekwijck ve Kerre 1999).

Bulanık kural tabanlı EYS literatürde farklı yapıdaki birçok aracın enerji yönetimi için kullanılmıştır (Dusmez ve Khaligh 2014; Ferreira ve diğ. 2008; Hemi ve diğ. 2014; Li ve diğ. 2012; Yin ve diğ. 2016; Zandi ve diğ. 2011). Bu çalışmalarda Şekil 3.4’ten görüldüğü gibi bulanık kural tabanlı EYS için literatürde önerilmiş farklı giriş-çıkış fonksiyonları bulunmaktadır. Şekilden görülebildiği gibi giriş olarak güç talebi ve enerji depolama birimlerinin SOC’u genellikle doğrudan kullanılmıştır. Çıkış olarak da genellikle kontrol edilmek istenen depolama birimi için güç referansı elde edilmektedir.



Şekil 3.4: Literatürde yer alan bazı bulanık mantık EYS çalışmalarında kullanılan giriş-çıkışlar.

Ayrıca, bulanık mantık tabanlı EYS olarak, giriş gücünün bataryanın sağlayabileceği maksimum güce oranını kullanan çalışma da bulunmaktadır (Trova ve diğ. 2017).

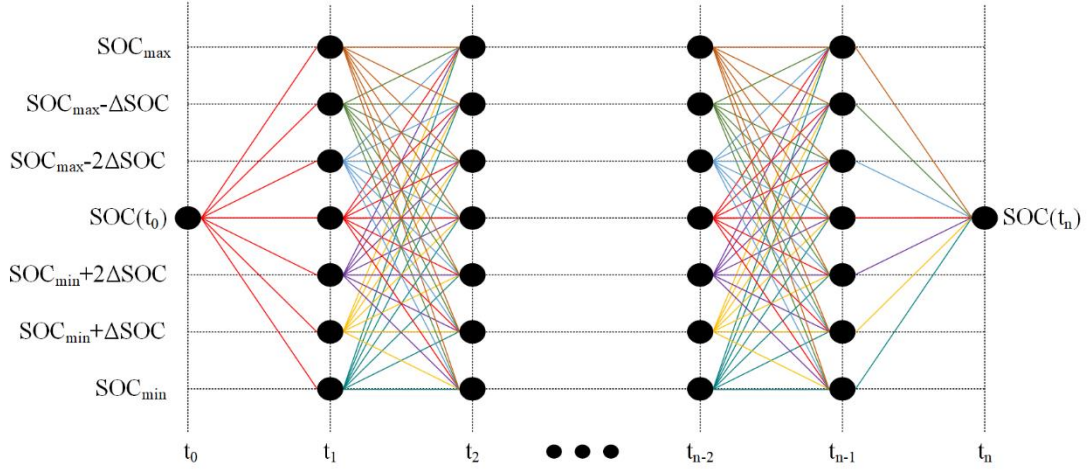
3.3 Global Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri

Global optimizasyon tabanlı EYS'ler belirli bir araç ve rota için elde edilebilecek en yüksek verimle EYS gerçekleştirmeyi sağlayan yöntemlerdir. Bu yöntemlerle, rota sonuna en az kayıpla ulaşılması için uygulanması gereken kurallar bulunabilir. Global optimizasyon yöntemi olarak lineer programlama (Fares ve diğ. 2014; Slama ve diğ. 2017), DP (Lee ve diğ. 2017; Pan ve diğ. 2019) ve olasılıksal DP (Moura ve diğ. 2011; Payri ve diğ. 2014) gibi yöntemler sayılabilir (Panday ve Bansal 2014; Tie ve Tan 2013). Bu yöntemlerde, olası bütün koşullar hesap edildiği için yerel minimumlara takılmadan kesin en uygun sonuç elde edilmiş olur.

Global optimizasyon tabanlı EYS yöntemleri, işlem fazlalığı ve nedensel olmamaları dolayısıyla gerçek zamanlı uygulanamazlar. Bu yöntemler, yalnızca tasarım aşamasında enerji yönetiminin en ideal hangi noktalarda çalıştığını görmek için kullanılır. Ayrıca, gerçek zamanlı uygulamalarda bu sonuçlara ne kadar yaklaşılabileceğini tahmin etmeyi sağlar.

Araç sürücüsü, araç ve trafik koşullarının tam anlamıyla her biri birer değişkendir. Bu sebeple, günlük hayatta, sürüş profilinin tamamının tüm detaylarıyla bilinmesi söz konusu değildir. Global optimizasyon yöntemi ile elde edilen kurallara göre bir enerji yönetimi yapılmaya çalışılması durumunda, belirtilen değişkenlerden birinde meydana gelen değişiklikte algoritmanın yeniden hesap yapması gerekmektedir. Aksi takdirde, bulunan kontrol komutları değişen koşullar için optimum olmayacaktır.

Global optimizasyon yöntemlerinden DP, elektrikli araç EYS'lerinde en çok kullanılan yöntemdir (Zhang ve diğ. 2015). Gerçek zamanlı uygulanmasının mümkün olmamasına rağmen DP'nin EYS'de kullanılması literatürde oldukça çok çalışılmış bir konudur. Bunun temel olarak iki sebebi vardır. Birincisi; belli bir araç yapısıyla belli bir sürüş profilinde ulaşılacak en optimum noktanın belirlenmesi ve önerilen EYS yönteminin bu noktaya göre kıyaslanmasıdır. İkincisi de; DP'den elde edilen sonuçlara göre uygulanacak olan kural tabanlı EYS yönteminin kurallarının ve parametrelerinin ayarlanmasıdır. DP'nin EYS'de uygulanması için oluşturulan temel yapı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: DP tabanlı EYS prensip şeması.

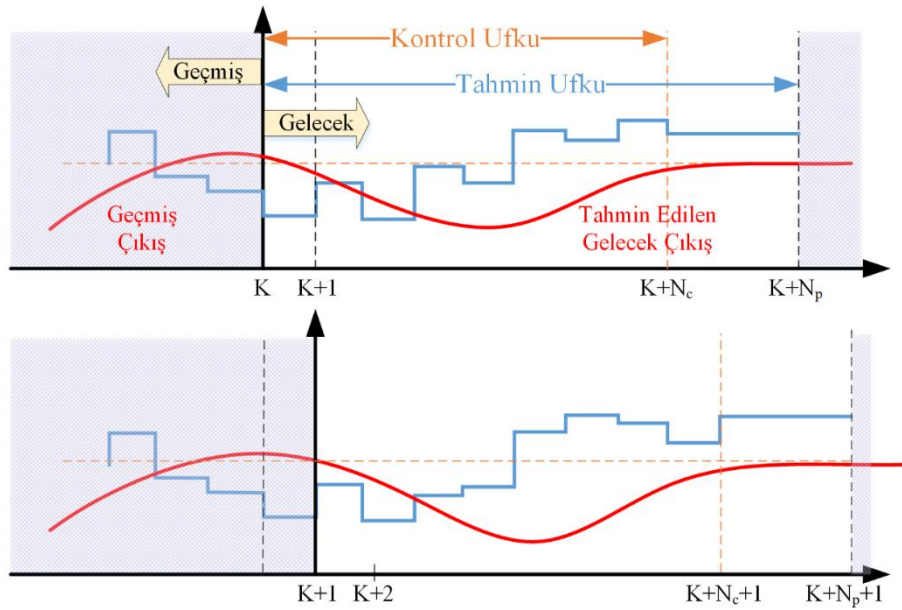
Şekil 3.5'ten de görüldüğü gibi genellikle enerji depolama birimlerinden herhangi birinin doluluk oranı durum değişkeni olarak seçilir. Bu durum değişkeni, en üst ve en alt limit arasında ΔSOC adım aralığında sonlu sayıda parçaya bölünür. Her bir zaman diliminde, tüm bu durum değişkenleri arasında geçişler için maliyetler hesaplanır. Maliyetlerin bilinmesiyle, sürüş profili sonunda en düşük maliyetin elde edildiği durum bulunabilir. İlgili durum bulunduktan sonra da hangi adımlar izlenerek bu duruma ulaşıldığı tespit edilir. Böylelikle, her bir adımdaki durum değişkenlerine ulaşmak için uygulanması gereken kontrol değişkenleri elde edilmiş olur.

3.4 Gerçek Zamanlı Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri

Gerçek zamanlı optimizasyon tabanlı EYS'lerde, araç modeli ya da araç bileşenlerinden alınan verilere göre, anlık zaman dilimleri için en uygun güç paylaşımı belirlenmeye çalışır. Bu işlem sırasında, koşullar sürekli değiştiği için mümkün olan en kısa sürede sonuç üretmeye odaklanılır. Dolayısıyla, doğruluktan bir miktar ödün verilmiş olur. Ayrıca, tüm sürüş profili için meydana gelecek durumlar önceden bilinmediği için, elde edilen sonuç anlık olarak optimum dahi olsa, sürüş profili sonunda en uygun EYS gerçekleştirilmiş olmayabilir. Gerçek zamanlı optimizasyon tabanlı EYS olarak literatürde birçok yöntem önerilmiştir. Eşdeğer yakıt minimizasyonu (Jiang ve diğ. 2017; Musardo ve diğ. 2005), model öngörülü kontrol (Borhan ve diğ. 2012; Gomozov ve diğ. 2017), parçacık sürü optimizasyonu (Chen ve

diğ. 2015; Chen ve diğ. 2016), genetik algoritma (Koroglu ve diğ. 2017; Piccolo ve diğ. 2001), yapay sinir ağları (Moreno ve diğ. 2006) vb. yöntemler bu kategoride yer alan önemli yöntemlerdendir. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı model öngörülü kontrol ve sezgisel optimizasyon tabanlı yöntemlerdir (Zhang ve diğ. 2015).

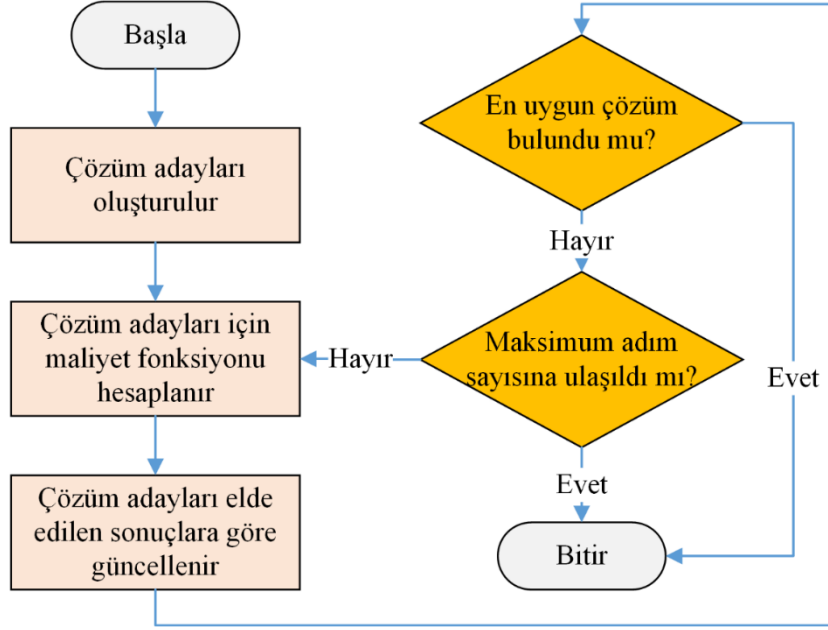
Model öngörülü kontrol EYS’de, sürüş esnasındaki geçmiş güç taleplerine ve sistemin modeline göre ileride oluşacak güç talebi tahmin edilir. Bu tahmine göre en az maliyetli güç paylaşımını gerçekleştirecek kontrol değişkenleri bulunur (Santucci ve diğ. 2014; West ve diğ. 2003). Model öngörülü kontrol yönteminde, Şekil 3.6’da gösterildiği gibi bir tahmin ufku bir de kontrol ufku belirlenir. Tahmin ufku boyunca oluşacak güç talebi tahmin edilir. Aynı zamanda, kontrol ufku süresi içerisinde sistemin modeli kullanılarak belirlenen hedef fonksiyon minimize edilmeye çalışılır. Tahmin ve kontrol ufkunun iyi belirlenmesi halinde, bu yöntemin gerçek zamanlı olarak uygulanabilir (Golchoubian ve Azad 2017).



Şekil 3.6: Model öngörülü kontrol prensip şeması.

Enerji yönetimini gerçek zamanlı olarak optimize edebilmek için son yıllarda sezgisel optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı çalışmaların arttığı görülmektedir. Bunların arasında genetik algoritma, tavlama benzetimi, yapay sinir ağları ve PSO vb. yöntemleri saymamız mümkündür. Bu yöntemlerde, genel işleyişte her bir adım aralığında yeni güç paylaşımı için bir çözüm kümesi oluşturulmaktadır. Daha sonra, bu çözümlerin yönteme bağlı belli kurallara göre işlenerek adım aralığı

tamamlanmadan en uygun çözüm elde edilir. Sezgisel optimizasyon yöntemleri için bir genel akış şeması Şekil 3.7’deki gibi ifade edilebilir.



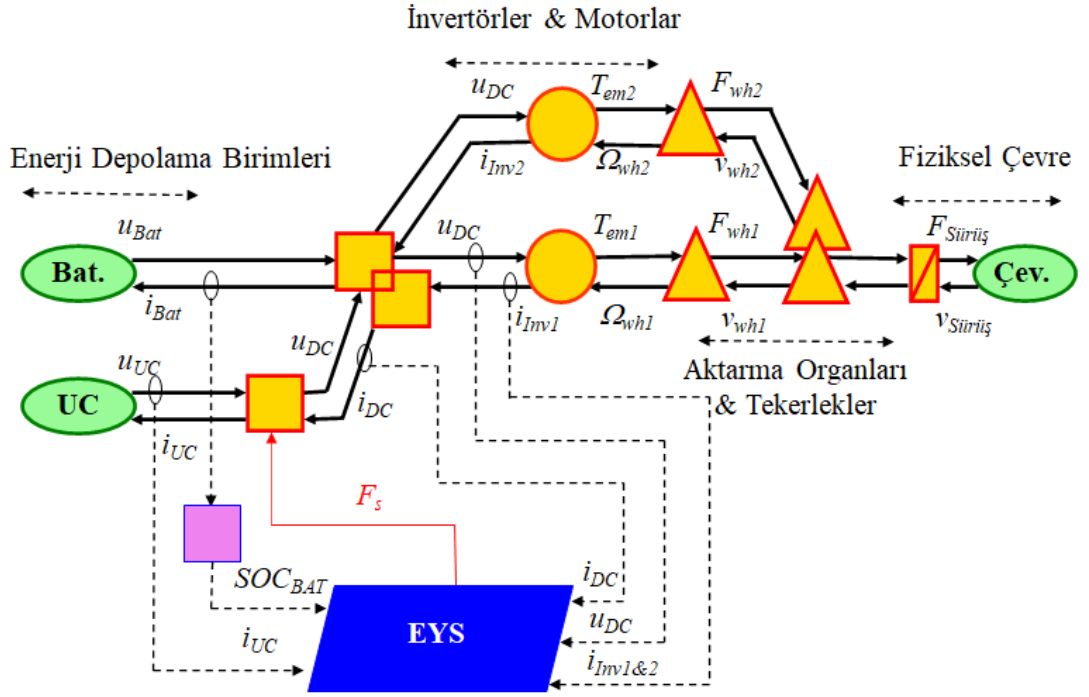
Şekil 3.7: Sezgisel optimizasyon yöntemleri prensip şeması.

Sezgisel optimizasyon yöntemlerinin hepsinde ilk olarak bir aday çözüm kümesi oluşturulur. Çözüm kümesinde yer alan adayların hepsi için maliyet fonksiyonu hesaplanır. Daha sonra elde edilen maliyetlere göre, çözüm adayları üzerinde değişiklikler yapılır. Elde edilen yeni değerlerin maliyetlerine göre çözüm adayları güncellenir. En uygun değere ya da belirli bir tekrarlama sayısına ulaşılan kadar aynı işlemlere devam edilir. Yönteme özgü değişiklik genellikle çözüm adaylarının güncellenmesi aşamasında olur. Burada güncelleme işlemi; en iyi ya da en kötü çözüm adayına, belirli bir seçim, çaprazlama ve mutasyon katsayısına göre yapılabilir.

Sezgisel optimizasyon yöntemlerinin gerçek zamanlı uygulanabilmesi için işlem süresi mümkün olduğunca azaltılmalıdır. Bu amaçla, çözüm adayı ve tekrarlama sayısı gibi bazı değerlerin az tutulması gerekebilir. Bu durumda yöntemin ulaşacağı doğru sonuçtan bir miktar ödün verilmiş olur. Bu sebeple, sezgisel optimizasyon yöntemlerinin her zaman global optimuma ulaşması mümkün olmayabilir.

4. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan EYS, batarya ve UC'den beslenen, şehir içi kullanımlar için tasarlanmış prototip bir elektrikli araçta uygulanmak üzere gerçekleştirilmiştir. Araç için belirlenen EYS genel prensip şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi sistemdeki temel elektriksel bileşenler batarya, UC, DC-DC dönüştürücü, iki adet motor, iki adet de motor sürücüsü ve AKS sisteminden oluşmaktadır. Batarya DC baraya doğrudan, UC ise bir çift yönlü DC-DC dönüştürücü üzerinden bağlanmaktadır. EYS araç sürücüsünden aldığı komutlara ve çevre birimlerinden gelen ölçümlere göre batarya ve UC arası güç paylaşımını gerçekleştirmektedir. Bu amaçla, belirlenen komutlar DC-DC dönüştürücüye iletmektedir.



Şekil 4.1: Enerji yönetim sistemi genel prensip şeması.

EYS'nin temel görevi, sürüş profili boyunca enerji depolama birimleri arası güç paylaşımına, belirlenen kurallar çerçevesinde karar vermektir. Talep edilen güç, sürüş profilinin gerektirdiği güç ile motorlar ve motor sürücülerinde meydana gelen

kayıpların toplanmasıyla Denklem (4.1)'deki gibi bulunabilir. Gereken bu güç, Denklem (4.2)'de tanımlandığı gibi batarya ve UC tarafından karşılanmaktadır.

$$P_{Talep}(t) = P_{Sürüş_Profil}(t) + P_{Motor_Kayıp}(t) + P_{Invertör_Kayıp}(t) + P_{Bat_Kayıp}(k) + P_{UC_Kayıp}(k) \quad \forall t \quad (4.1)$$

$$P_{Talep}(t) = P_{Bat}(t) + P_{UC}(t) \quad \forall t \quad (4.2)$$

İhtiyaç duyulan talep gücü belli olduğuna göre EYS batarya veya UC gücünün birinin belirlenmesi durumunda diğer kaynağın gücü de rahatlıkla hesaplanabilir.

Önerilen EYS tasarımının yapısı gereği, batarya ana baraya sürekli bağlı olduğu için EYS'nin batarya gücünü belirlenmesi doğru olmayacaktır. Dolayısıyla, EYS'nin asıl görevi, herhangi bir zaman diliminde, UC'nin ne kadar katkı sağlaması gerektiğini belirlemektir. UC'nin sağlaması gereken güç belirlendikten sonra bataryanın sağlayacağı miktar denklem (4.3)'deki gibi talep edilen güçten UC'nin sağladığı gücü çıkararak bulunabilir.

$$P_{Bat}(t) = P_{Talep}(t) - P_{UC}(t) \quad \forall t \quad (4.3)$$

Enerji kaynakları için belirlenen güçler bazı kısıtlara sahiptir. Batarya ve UC için belirlenen kısıtlar birimlerin minimum ve maksimum şarj-deşarj güçleri ile ilgilidir. Bu kısıtlar sırasıyla Denklem (4.4) ve Denklem (4.5)'te tanımlanmıştır.

$$P_{Bat,min} \leq P_{Bat}(t) \leq P_{Bat,max} \quad \forall t \quad (4.4)$$

$$P_{UC,min} \leq P_{UC}(t) \leq P_{UC,max} \quad \forall t \quad (4.5)$$

Burada $P_{Bat,min}$ ve $P_{UC,min}$ depolama birimlerinin şarj limitini, $P_{Bat,max}$ ve $P_{UC,max}$ isedeşarj limitini ifade etmektedir.

Aynı zamanda batarya ve UC'nin SOC değerleri de tüm sürüş profili boyunca belirli sınırlar arasında kalmalıdır. Bu limitler sırasıyla Denklem (4.6) ve Denklem (4.7)'de tanımlanmıştır.

$$Bat_SOC_{min} \leq Bat_SOC(t) \leq Bat_SOC_{max} \quad \forall t \quad (4.6)$$

$$UC_SOC_{min} \leq UC_SOC(t) \leq UC_SOC_{max} \quad \forall t \quad (4.7)$$

Burada bataryanın emniyetli sınırlar içerisinde çalışmasının sağlanması amacıyla belirlenen maksimum ve minimum SOC aralığında çalışmasına izin verilir. UC için benzer kısıtlar uygulanabilir ancak doğası gereği daha bir SOC aralığında çalışabilmektedir. Örneğin bu bileşen için SOC'un minimum değerinin 0'a kadar düşmesi önemli bir sorun teşkil etmemektedir.

EYS'nin benzetim çalışmalarında kullanılan batarya ve UC'ye ait bazı parametre ve sınır değerler Tablo 4.1'de verilmiştir.

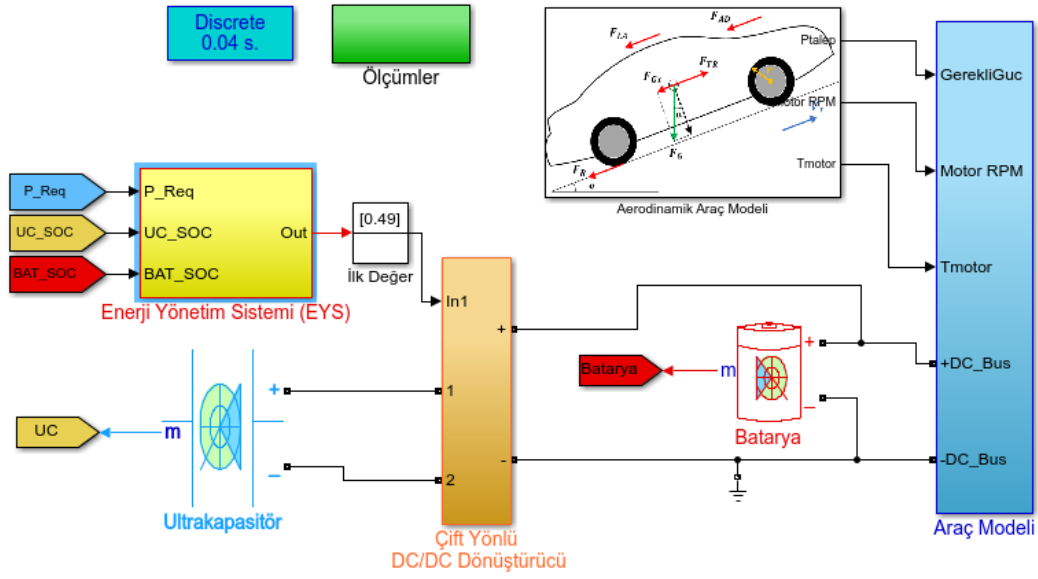
Tablo 4.1: Araca ilişkin benzetim çalışmalarında kullanılan parametre ve eşik değerler.

Tanımlama	Değer	Birim
Batarya nominal deşarj akımı	10,8	A
Batarya SOC aralığı	55-95	%
Ultrakapasitör SOC aralığı	30-95	%
Batarya SOC başlangıç	80	%
Ultrakapasitör SOC başlangıç	80	%

Bu çalışmada, literatürde var olan kural ve bulanık mantıklı, DP tabanlı EYS benzetimleri tasarlanan araç modeli için gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerin eksik kaldığı durumların üstesinden gelebilmek için Jaya optimizasyon tabanlı EYS önerilmiştir. Tüm bu yöntemlerin benzetim adım ve sonuçları aşağıdaki alt başlıklarda detaylarıyla verilmiştir.

4.1 Kural ve Bulanık Kural Tabanlı EYS Benzetimleri

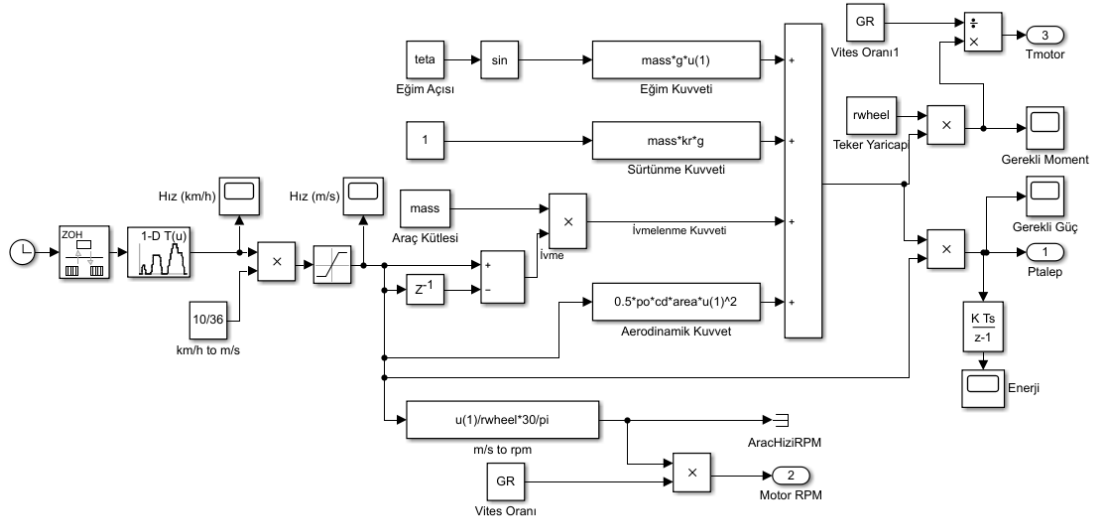
Kural ve bulanık kural tabanlı EYS benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla benzetim çalışması için kontrol odaklı ters durağan araç modeli oluşturulmuştur. Enerji depolama birimlerinden talep edilen güç, standart sürüş profiline göre aerodinamik araç modelinden belirlenmektedir. Bu modelde, motor ve motor sürücüsü verimleri (Demircalı ve diğ. 2018) çalışmasındaki gibi oluşturulmuş olan verim haritaları ile tork ve hıza göre sisteme dahil edilmiştir. Ancak, DC-DC dönüştürücünün dinamik davranışları ve meydana getirecekleri kayıplar ihmal edilmiştir.



Şekil 4.2: Kural ve bulanık kural tabanlı EYS benzetimi modeli.

Benzetim çalışmasında batarya, ultrakapasitör, DC-DC dönüştürücü, aerodinamik araç modeli, enerji yönetim sistemi ve ölçüm blokları bulunmaktadır. Kural ve bulanık kural tabanlı EYS benzetim modeli Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Oluşturulan bu model yardımıyla hem kural hem de bulanık kural tabanlı benzetim çalışmaları yapılabilmektedir. Bu işlem benzetimde yer alan EYS bloğunun yöntemine uygun olarak farklı şekilde oluşturulmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla EYS bloğu kural tabanlı ve bulanık kural tabanlı EYS için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Her iki yöntemin birbiriyle karşılaştırması yapılmıştır.

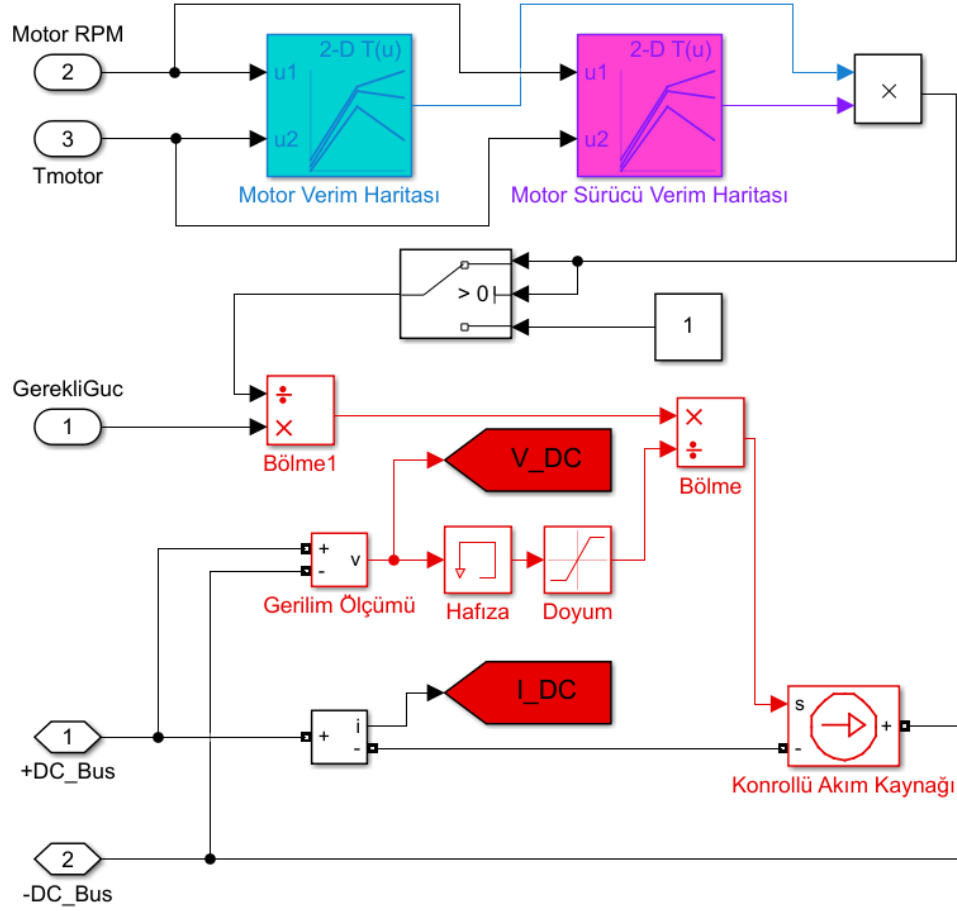
Benzetim çalışmasında yer alan aerodinamik araç modeli, araç dinamik denklemlerinden hesaplanmaktadır. Araç modeli iç yapısı Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Şekilden de görülebildiği gibi aracın talep ettiği güç, tork ve hız bilgileri hesaplanması için gerekli bilgiler ECE sürüş profilinden alınmaktadır. Bu amaç için sürüş profili hız-zaman bilgilerini içeren bir boyutlu Lookup tablo oluşturulmuştur.



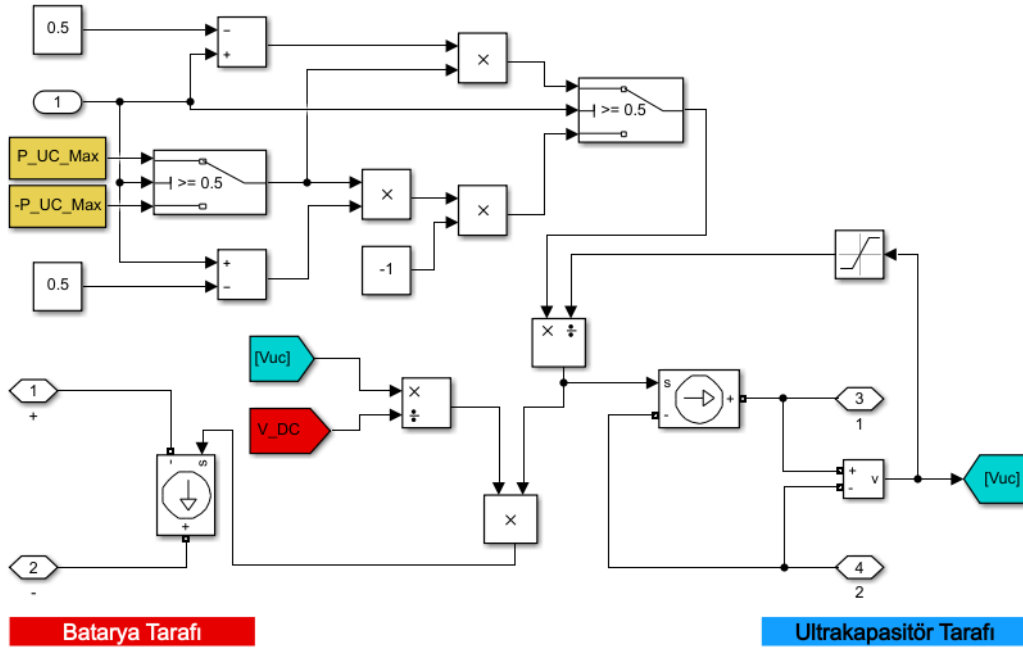
Şekil 4.3: Aerodinamik araç modeli.

Araç modelinin talep ettiği elektriksel gücü ifade edilmesinde kullanılan güç ihtiyacının iletme modeli Şekil 4.4'te verilmiştir. Bu modelde sürüş profilinden gelen güç miktarı motor ve motor sürücüsü verimlerinin çarpımına bölünmektedir. Böylelikle, sürüş profili ve kayıpların tamamını karşılayacak güç ihtiyacı bulunmaktadır. Daha sonra, gerekli güç miktarı ve DC baranın gerilimine göre DC baradan geçmesi gereken akım hesap edilmektedir. Bu durum kontrollü akım kaynağı ile modellenmiştir. Böylelikle gerekli güç miktarı enerji depolama birimlerine iletilmektedir.

DC-DC dönüştürücünün iç yapısı da anahtarlama elemanları olmadan sadece aktarılan güç miktarını ayarlayabilecek şekilde Şekil 4.5'deki gibi oluşturulmuştur. Burada giriş işareti 0 ile 1 arasında değer almakta ve 0.5'in üzerindeki değerler UC'nin devreye güç sağlamasını yani deşarj olmasını, 0.5'in altındaki değerler ise UC'nin şarj olmasını belirlemektedir.



Şekil 4.4: Araç güç talebinin depolama birimlerine iletilme modeli.

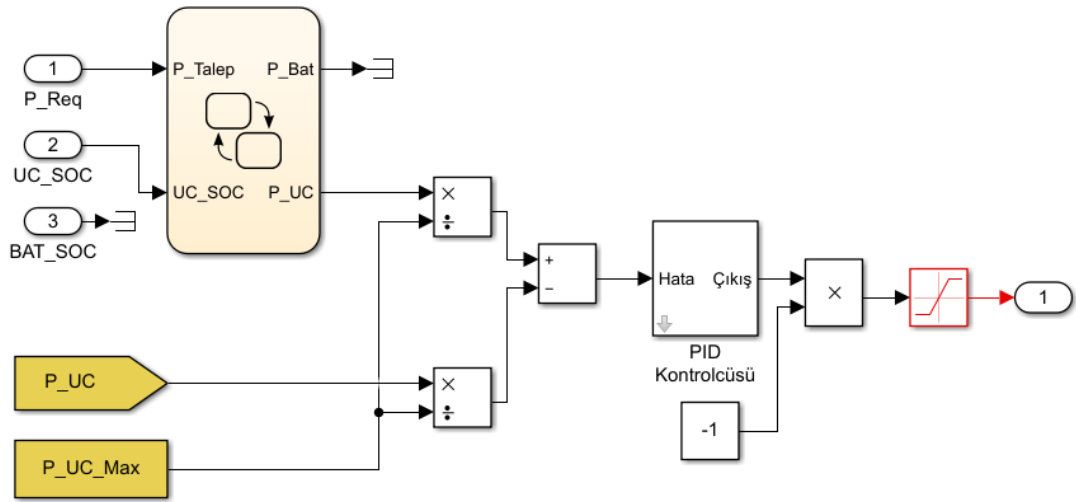


Şekil 4.5: Çift taraflı DC-DC dönüştürücü bloğunun iç görünümü.

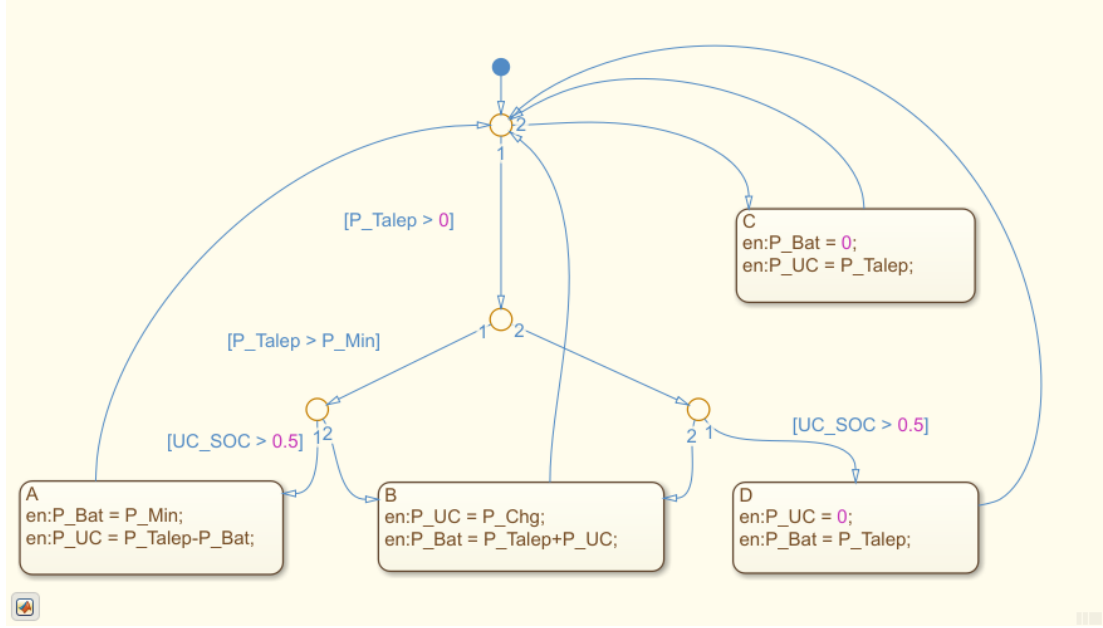
EYS bloğu içerisinde; güç talebi ve enerji depolama birimlerinin anlık durumlarına bağlı olarak UC'nin ne kadar güç sağlaması gerektiği belirlenmektedir. EYS bloğunun iç yapısı ise kural tabanlı ve bulanık kural tabanlı yönetim sistemine göre ayrı ayrı oluşturulmuştur. Diğer bloklar ise iki yönetim sistemi için de aynı kullanılmıştır.

4.1.1 Kural Tabanlı EYS Yapısı

Kural tabanlı EYS bloğu Şekil 4.6'da gösterilmiştir. UC'nin sağlaması ya da depolaması gereken güç, talep gücü ve UC'nin doluluk miktarına göre hesaplanır. Bu hesaplamadaki kurallar (Golchoubian ve Azad 2017) çalışmasına göre oluşturulmuştur (Şekil 3.2). Bu işlem için MATLAB/Simulink/Stateflow kütüphanesinden Mealy türü bir sonlu durum makinası kullanılmış, iç yapısı da Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Belirlenen UC güç referansı ve UC'nin o anda sağlamakta olduğu güç, UC'nin sağlayabileceği maksimum güce göre normalize edilerek PID kontrolcüsüne girmektedir. Buradan da DC-DC dönüştürücü için 0-1 aralığında bir işaret elde edilmektedir.



Şekil 4.6: Kural tabanlı enerji yönetim sistemi bloğu.

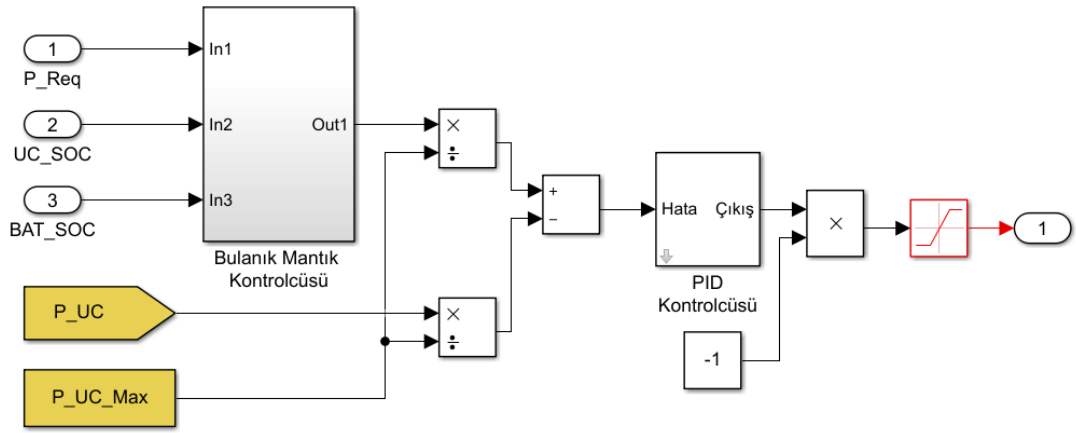


Şekil 4.7: Kural tabanlı EYS kuralları akış şeması.

Şekil 4.7’de yer alan P_Talep (P_{Talep}) talep edilen gücü, P_Bat (P_{Bat}) bataryanın gücünü ve P_UC (P_{UC}) ultrakapasitörün gücünü ifade etmektedir. P_Min , talep gücünün sadece batarya tarafından sağlanması durumundaki maksimum gücü ifade etmektedir. Benzetim çalışmasında bu güç 500 W olarak belirlenmiştir. UC’nin doluluk miktarı %50’nin altına düştüğünde, UC’nin batarya tarafından şarj edilmesi için gerekli olan güç P_Chg olarak tanımlanmıştır. Benzetimde bu şarj gücü -200 W olarak belirlenmiştir.

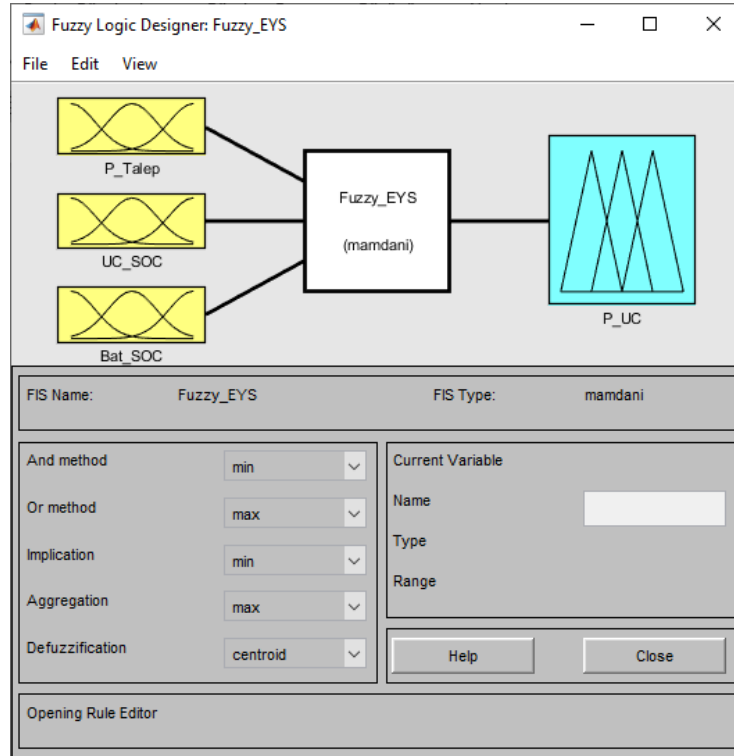
4.1.2 Bulanık Kural Tabanlı EYS Yapısı

Bulanık kural tabanlı EYS’de talep gücü, UC’nin doluluk miktarı ve bataryanın doluluk miktarına göre UC’nin sağlaması ya da depolaması gereken güç miktarı belirlenmektedir. Bulanık kural tabanlı EYS blok şeması Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Normalizasyon ve PID kontrol bölümü kural tabanlı EYS ile aynıdır. Bu yöntemde, kural tabanlı yöntemden farklı olarak giriş değerleri bulanıklaştırılır, belirlenen sözel kurallara göre hesaplama yapılır ve durulaştırma işlemiyle çıkış elde edilir.



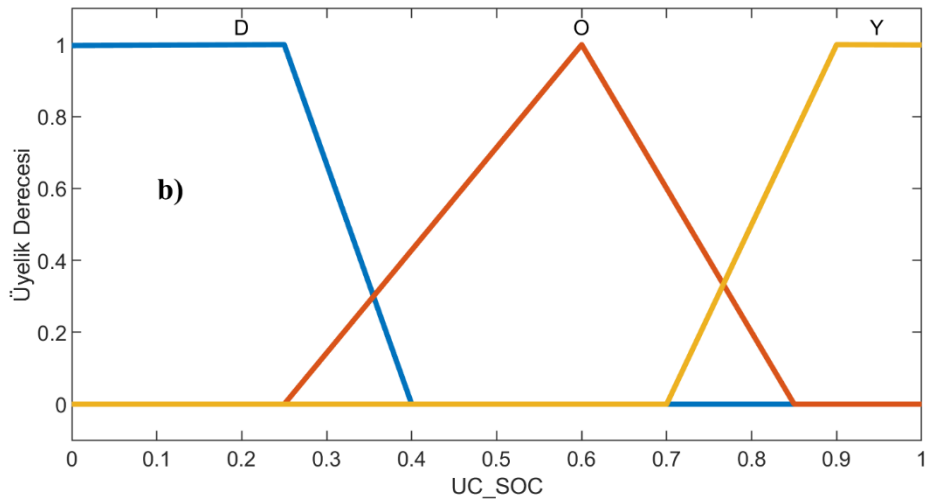
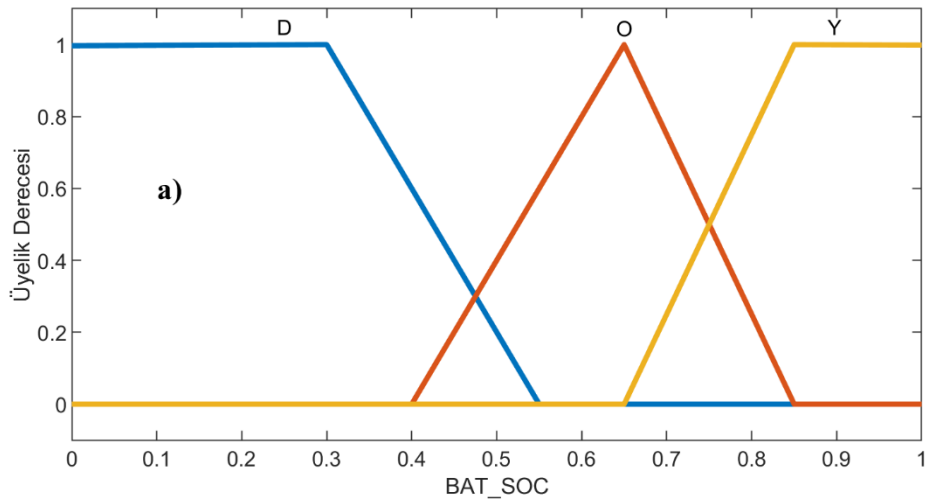
Şekil 4.8: Bulanık kural tabanlı EYS blok şeması.

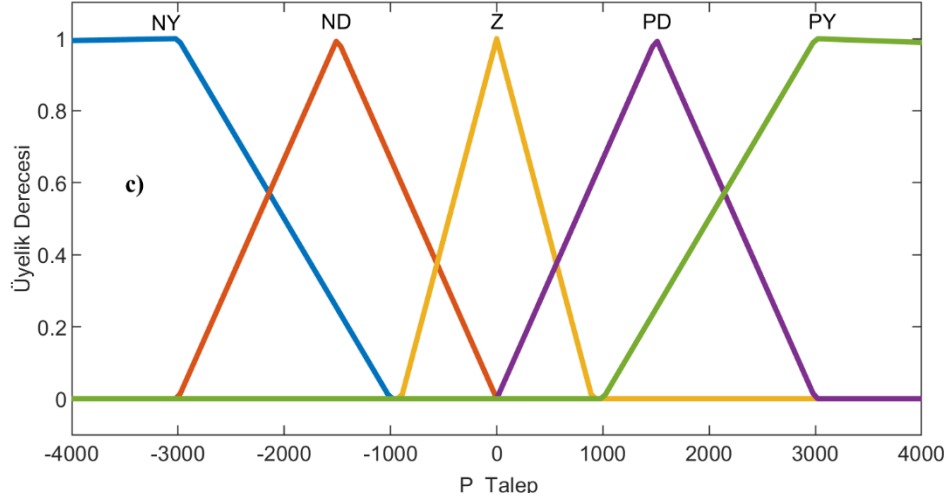
EYS’de kullanılan bulanık mantık yapısı MATLAB/Fuzzy Logic Designer uygulaması kullanılarak hazırlanmıştır. EYS yapısında; talep gücü, UC ve batarya SOC değeri olmak üzere 3 giriş bulunmaktadır. Buna karşılık çıkış UC gücünü vermekte olup tek çıkışlı bir sistemdir. Giriş ve çıkışların tanımlanmasında kullanılan bulanık mantık arayüzü Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Program kütüphanesinde yer alan bu arayüz üzerinden gerekli hesap ve durulaştırma ayarları yapılabilmektedir.



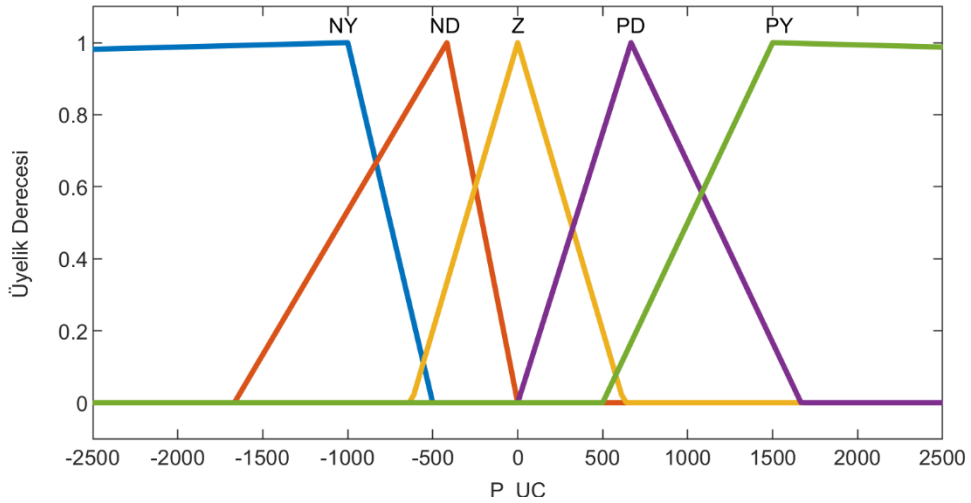
Şekil 4.9: EYS bulanık mantık sistemi tasarım arayüzü.

Sistemin girişlerinden; batarya ve UC giriş değerleri için 3'er adet, talep gücü için ise 5 adet üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Çıkış değeri olan UC gücü için de yine 5 adet üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Oluşturulan bu üyelik fonksiyonları, giriş ve çıkışı oluşturan ilgili birimlerin kendi karakteristiklerine göre belirlenmiştir. Giriş üyelik fonksiyonları Şekil 4.10'da, çıkış üyelik fonksiyonu ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Üyelik fonksiyonlarının tanımlanmasında geçen harfler, ilgili değerlerin göreceli durumunu ifade etmektedir. Burada kullanılan D, O, Y, Z, NY, ND, PD, PY kısaltmaları sırasıyla Düşük, Orta, Yüksek, Sıfıra Yakın, Negatif Yüksek, Negatif Düşük, Pozitif Düşük ve Pozitif Yüksek sözel ifadelerine karşılık gelmektedir.



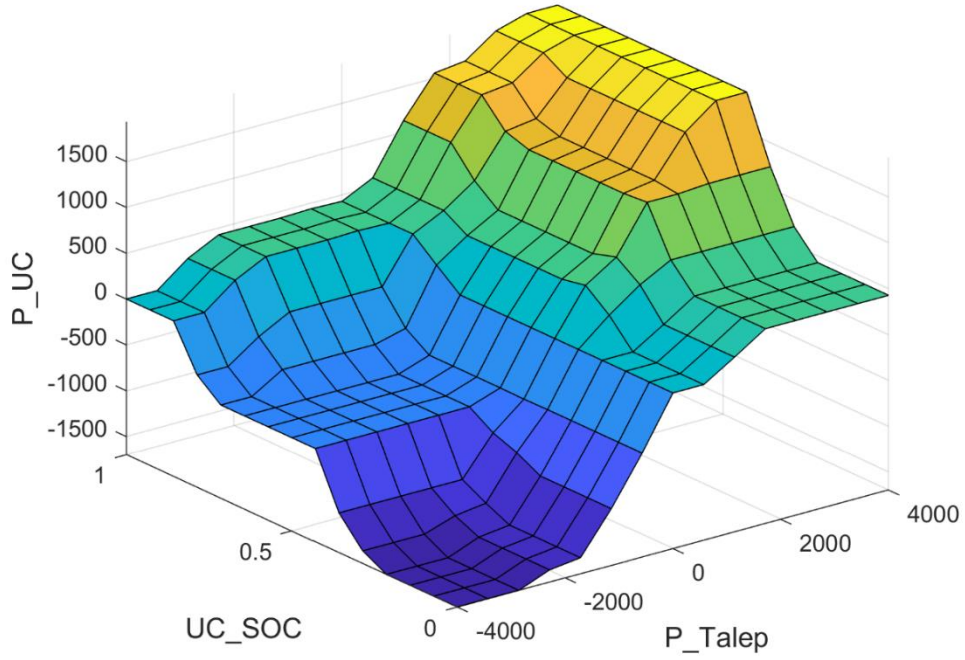


Şekil 4.10: Bulanık mantık girişlerinin üyelik fonksiyonları. a) Batarya doluluk oranı, b) UC doluluk oranı, c) Güç talebi.



Şekil 4.11: Bulanık mantık çıkış üyelik fonksiyonları (P_{UC}).

Giriş değerlerinin alabileceği durum değişkenlerine göre toplamda $3 \times 3 \times 5 = 45$ adet kural oluşturulmuştur. Her bir durum çıkış değeriyle ilişkilendirilmiştir. Oluşturulan kurallar çerçevesinde, sistem girişlerinden UC'nin doluluk miktarı ile talep gücünün değişimine bağlı UC'nin gücünü nasıl değiştiğini gösteren yüzey görünümü Şekil 4.12'de verilmiştir. Sistemde kuralların belirlenmesi görecelik esasına dayanmaktadır. Örneğin, Şekil 4.12'den de görülebileceği gibi talep gücü ve UC doluluk oranı yüksekse UC'nin katkısı fazla olmaktadır. Buna karşılık UC doluluk oranının düşük olduğu durumlarda nispeten UC'nin katkısı daha az olacak şekilde belirlenmektedir. Belirlenen bütün kurallar EK A'da sunulmuştur.

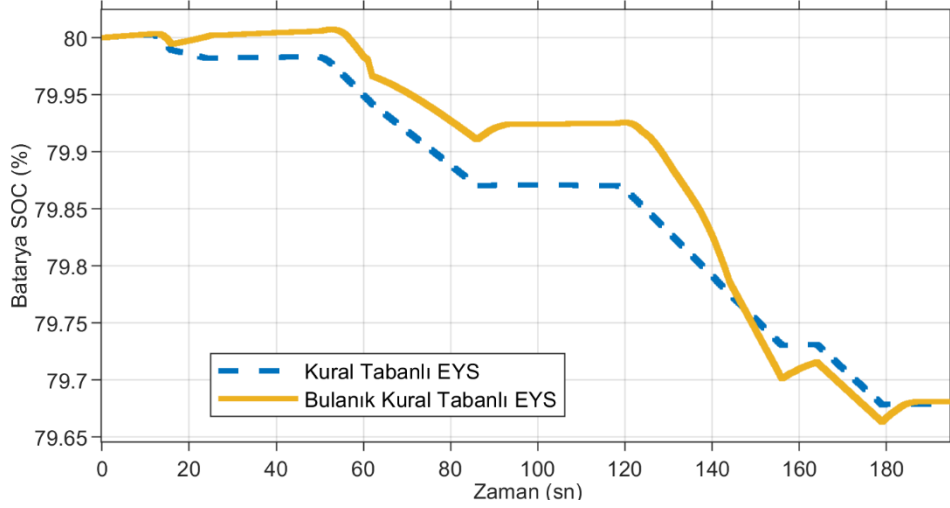


Şekil 4.12: Talep gücü ve UC doluluk oranına bağlı UC çıkış gücünü belirleyen bulanık mantık kurallarının yüzey görünümü.

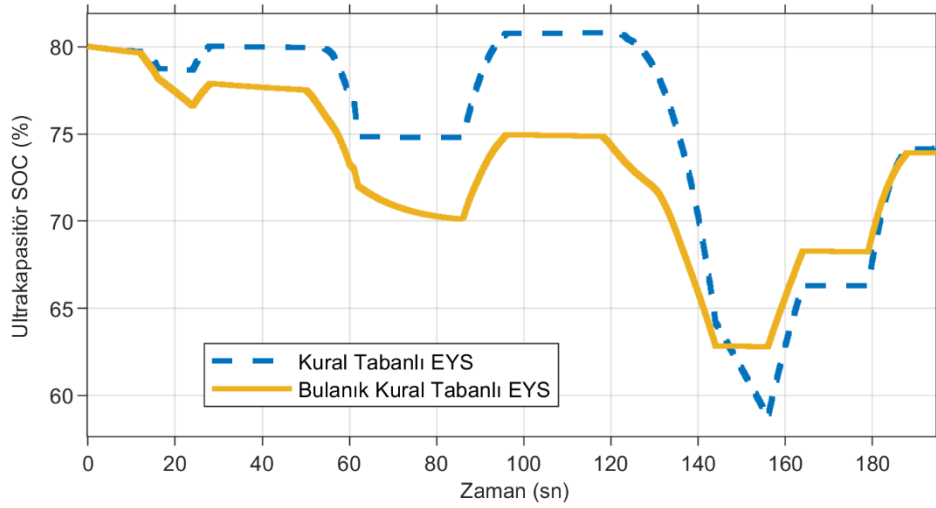
4.1.3 Kural ve Bulanık Kural Tabanlı EYS Benzetim Sonuçları

Oluşturulan benzetim modeli üzerinde kural ve bulanık kural tabanlı EYS'ler aynı koşullarda, ayrı ayrı olarak test edilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları ve yöntemleri karşılaştırmaları yapılmıştır.

Her iki EYS yönteminin uygulanması durumunda, sürüş profili boyunca batarya doluluk oranı değişimi Şekil 4.13'te, UC doluluk oranı değişimi ise Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Sürüş profili boyunca batarya doluluk oranı bulanık kural tabanlı EYS'de %80'den %79,82'ye inerken, bu oran kural tabanlı EYS için %79,71'e düşmüştür. Bu sonuç bulanık kural tabanlı EYS'de batarya doluluk oranını daha az değiştiğini göstermektedir. Açıkça Şekil 4.14'ten görüldüğü gibi sürüş profili boyunca UC'nin doluluk oranı kural tabanlı EYS'de daha az değişmektedir. Bu sonuçlara bağlı olarak bulanık kural tabanlı EYS'de UC'nin daha etkin kullanıldığı sonucuna ulaşılabilir. Böylelikle, batarya üzerinde fazla kullanımdan dolayı oluşacak stres azaltılmış ve kullanım ömrü arttırılmış olur.

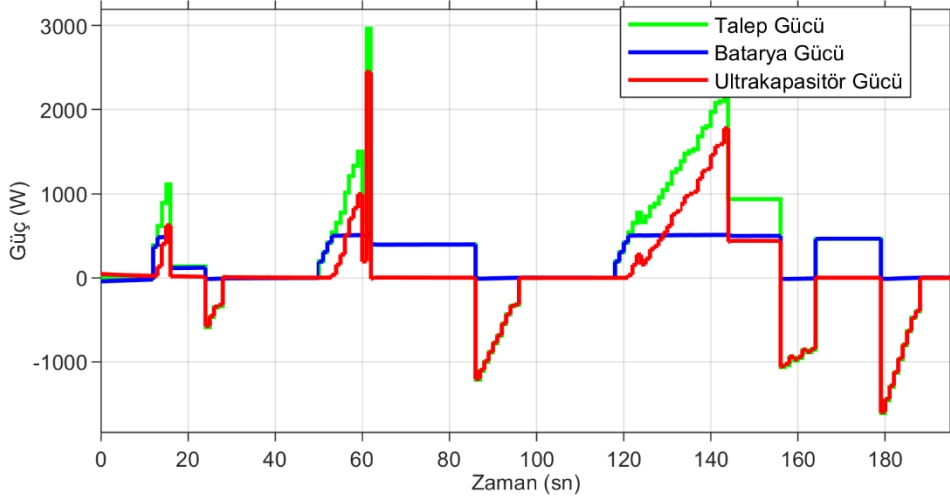


Şekil 4.13: Kural ve bulanık kural tabanlı EYS için ECE sürüş profiline göre batarya SOC miktarı değişimi.



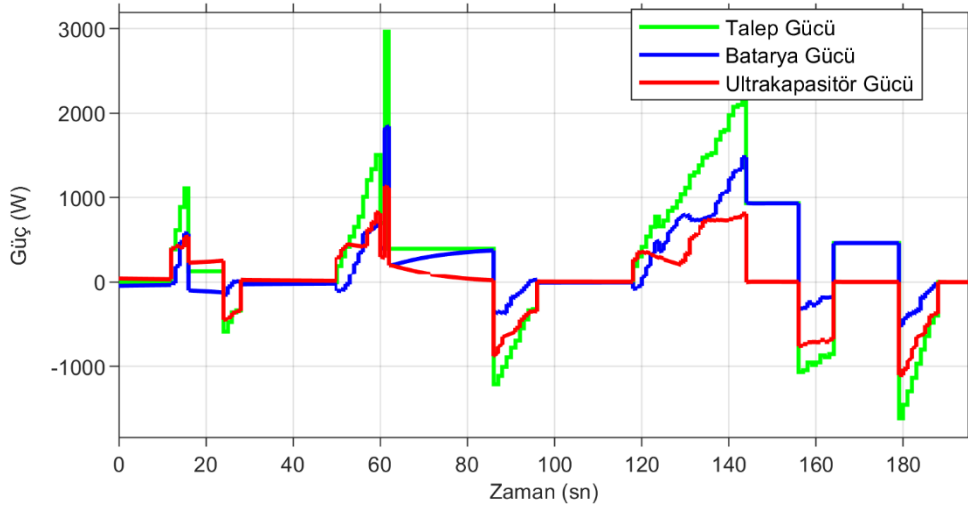
Şekil 4.14: Kural ve bulanık kural tabanlı EYS için ECE sürüş profiline göre UC SOC miktarı değişimi.

ECE sürüş profili boyunca talep edilen güç ve kural tabanlı EYS tarafından belirlenen güç dağılımları Şekil 4.15'te verilmiştir. Gerçekleştirilen bu EYS'nin arzu edilen güç paylaşımını sağladığı görülmektedir. Burada batarya, sürüş profiline bağlı güç talebini çalışma karakteristiğine uygun bir şekilde karşılamaktadır. Anlık güç değişimleri de büyük çoğunlukla karakteristiğine uygun bir şekilde UC tarafından karşılanmıştır. Ayrıca, rejeneratif durumlarda da UC başarılı bir şekilde bu enerjiyi depolamıştır.



Şekil 4.15: Kural tabanlı EYS ile oluşan güç dağılımı.

Benzer şekilde Şekil 4.16 incelendiğinde de aynı işlemi bulanık mantık temelli EYS'nin başarıyla gerçekleştirdiği görülmektedir.



Şekil 4.16: Bulanık mantık EYS ile oluşan güç dağılımı.

4.2 Dinamik Programlama ile EYS Benzetimi

Bu bölümde DP ile EYS benzetimi gerçekleştirmek için DP'nin temelleri verilmiş ve klasik bir örnek üzerinde DP'nin çalışma karakteristiği gösterilmiştir. Daha sonra elektrikli araçlar için DP ile EYS benzetimi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar sunulmuştur.

4.2.1 Dinamik Programlamanın Temelleri

DP, çok aşamalı karar verme problemlerini çözmek için oluşturulmuş sayısal bir yöntemdir (Baalen 2006; Wang ve diğ. 2015). Herhangi bir karmaşıklık düzeyindeki probleme (hesaplama yetenekleri sınırları dahilinde) en uygun çözümü sağlayabilen optimal kontrol tekniğidir. DP lineer ya da lineer olmayan problemlere kısıtlı olsun ya da olmasın uygulanabilen bir yöntemdir. Problemlerde elde edilebilecek en uygun çözümleri vermesine rağmen, DP'nin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılmasını engelleyen en önemli unsur yöntemin nedensel olmamasıdır. DP'nin en uygun çözümü elde etmesi için probleme ilişkin tüm detayların önceden bilinmesi gerekir. Bu nedenle, sadece simülasyon ortamında uygulanabilir. DP, Bellman tarafından “Belirli bir andan sonraki optimum kontrol stratejisi geçmiş kontrol stratejileri ne olursa olsun o ana kadar oluşmuş olan durumların devamıdır” şeklinde ifade edilen optimallik prensibine dayanmaktadır (Bellman 1952).

Dünyadaki birçok sistem, aşamalar biçimindedir. Tüm sistemler tek veya çok aşamalı olarak düşünülebilecek bazı alt sistemlere ayrılabilir. Böylelikle, her bir alt sistem için, optimal kontrol problemi çözülerek ana sisteme ait global optimal çözüme ulaşılabilir. Elektrikli araç EYS problemi de sürüş profilinin zaman dilimlerine bölünmesiyle alt sistemlere ayrılabilir. Böylelikle, her bir zaman dilimine bulunacak en uygun çözümler kullanılarak, sürüş profili için en optimum kontrol yapısı elde edilmiş olur.

Bellman'ın optimallik prensibi ifadesi, herhangi bir ara adımdan sona kadar olan en uygun yolun, tüm optimal çözümün bir parçası olduğu anlamına gelir. Bu prensibin tanımlanmasında Denklem (4.8)'deki ayrık zaman sistemi kullanılabilir.

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k), \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (4.8)$$

Burada k , problemin başlangıcından sonuna kadar olan adımları ifade etmektedir. Denklemde yer alan u_k değerlerinin tamamı bütün x_k değerleri için $u_k \in U(x_k)$ (k . adımdaki kontrol kısıtları) koşuluna uymaktadır. Bu durumda kontrol politikası Denklem (4.9)'deki gibi olmaktadır.

$$\pi = \{u_0, u_1, \dots, u_{N-1}\} \quad (4.9)$$

Başlangıç durumu x_0 ile başlayan π 'nin maliyeti Denklem (4.10)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$J_\pi(x_0) = L_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} L_k(x_k, u_k) \quad (4.10)$$

Burada L_k anlık maliyet fonksiyonudur (sürekli-zaman formülasyonunda integralle aynı). Optimal maliyet fonksiyonu ise Denklem (4.11)'deki gibi toplam maliyeti en aza indiren fonksiyondur.

$$J^*(x_0) = \min_{\pi} J_\pi(x_0) \quad (4.11)$$

Bu maliyet fonksiyonunu veren optimal politika da $\pi^* = \{u_0^*, u_1^*, \dots, u_{N-1}^*\}$ olmaktadır. Öyle ki, bu kontrol değişkenleri kullanıldığında maliyet fonksiyonu denklem (4.12)'de ifade edildiği gibi optimal maliyet fonksiyonuna eşit olmaktadır.

$$J_{\pi^*}(x_0) = J^*(x_0) \quad (4.12)$$

i (ve durum x_i) zamanından N noktasına olan maliyetini en aza indirmenin “alt problemi”, Denklem (4.13)'teki gibi tanımlanır. DP'de hesaplamalar yinelenerek yapılır. Bu bakımdan, alt problemin optimum çözümü sonraki alt problemin girdisidir. Son alt problem çözüldüğünde, problemin tamamının optimum çözümüne ulaşılmış olur.

$$J_i(x_i) = L_N(x_N) + \sum_{k=i}^{N-1} L_k(x_k, u_k) \quad (4.13)$$

Bu durumda alt probleme ait olan optimal kontrol politikası da $\{u_i^*, u_{i+1}^*, \dots, u_{N-1}^*\}$, yani, en uygun politika π^* 'nin son kısmıdır. Bellman'ın optimallik prensibine göre belirtilen kontrol politikası, alt problem için optimal olmaktadır.

Bir problem, DP ile iki yoldan çözülebilir. Bu yollar İleriye Yineleme (Forward Recursion) ve Geriye Yinelemedir (Backward Recursion). İleriye yinelemede denklem (4.14)'teki gibi sorunun başındaki en küçük birimden başlayarak sorunun tamamı

çözülür. Geriye yinelemede de denklem (4.15)'teki gibi sorunun çözümünün son noktasından başlayıp, başına doğru yol alarak problem çözülmüş olur.

$$\mu_k^* = \arg \min_{u_k \in U_k} (L_k(x_k, u_k) + J_{k-1}(f_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}))) \quad k = 1, \dots, N-1, N \quad (4.14)$$

$$\mu_k^* = \arg \min_{u_k \in U_k} (L_k(x_k, u_k) + J_{k+1}(f_k(x_k, u_k))) \quad k = N-1, N-2, \dots, 1, 0 \quad (4.15)$$

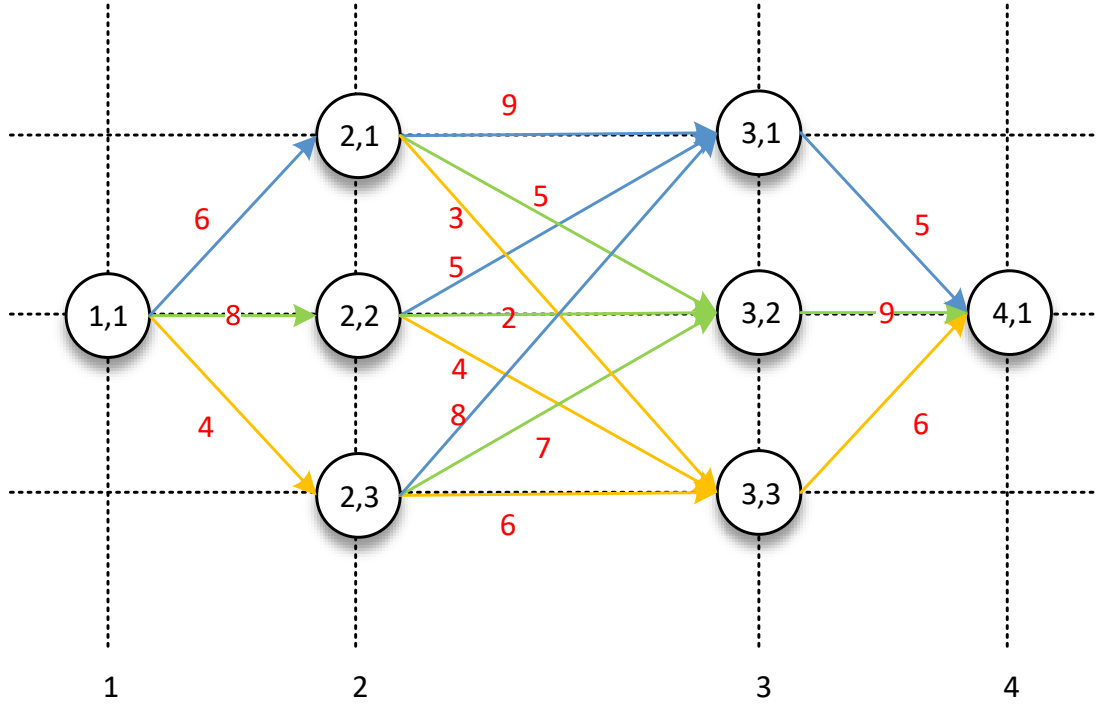
Burada ilk denklemde son adımda üretilen $J_N(x_N)$ ile ikinci denklemde son adımda üretilen $J_0(x_0)$ verilen problem için optimal (minimum) maliyete eşittir. Nihai adımdan geriye doğru giden en iyi kontrol eylemleri dizisini belirlemekle, başlangıç adımından ileriye doğru giden en iyi kontrol eylemleri dizisini belirlemek aynı sonucu vermektedir. Öyle ki, hem maliyet fonksiyonu hem de takip edilecek kontrol değişkenleri aynı bulunmaktadır.

DP'de amaç, durumları belirlemek ve hesap edilen bir durumu kaydederek tekrar aynı durumla karşılaşıldığında aynı değeri hesap etmeye gerek duymadan kayıtlardan kullanmaktır. Burada önemli olan durumları belirlemek ve bu durumlar arasındaki geçişleri iyi ayarlamaktır. Durum sayısı arttığında DP'nin hesaplaması gereken işlem sayısı da katlanarak artmaktadır.

4.2.2 Dinamik Programlama Örneği

Öncelikli olarak DP'nin nasıl çalıştığını göstermek için klasik bir örnek olan A şehrinden B şehrine giden en kısa yolu bulma problemini ele alalım. Ele alınan bu problem Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Problemde, 1,1 durumu ile 4,1 durumu arasındaki en düşük maliyetli rotanın bulunması istenmektedir. Şekildeki gibi her bir durumdan diğerine geçiş için gerekli olan maliyetler çizgiler üzerinde belirtilmiştir.

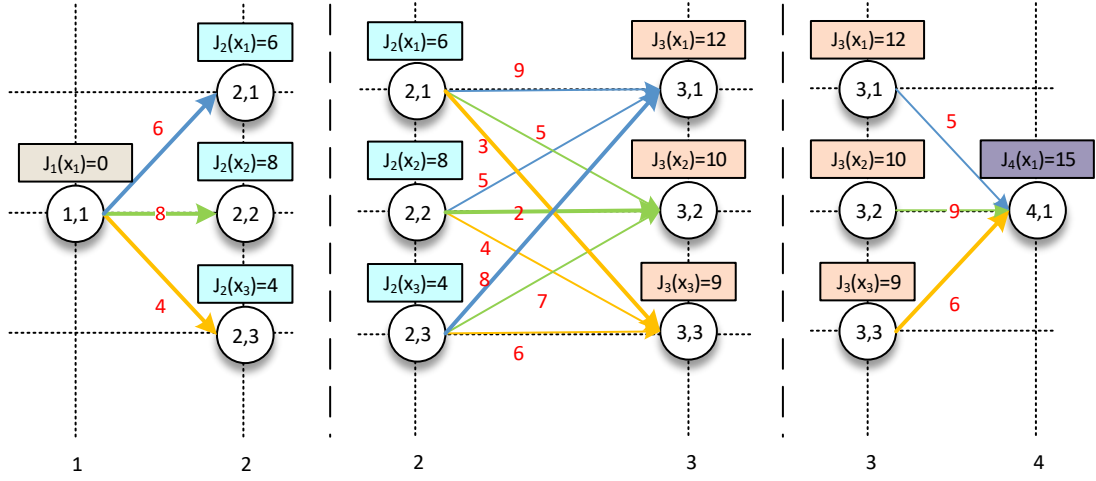
Belirtilen problemi DP ile çözenin daha önce ifade edildiği gibi iki yolu bulunmaktadır. Her iki yolda da bütün problem, her bir zaman diliminden ardışık olan diğer zaman dilimine geçiş olmak üzere alt problemlere bölünür. Daha sonra, baştan ya da sondan başlanarak alt problemler için elde edilen çözümlere bakılır.



Şekil 4.17: Dinamik programlama örneği.

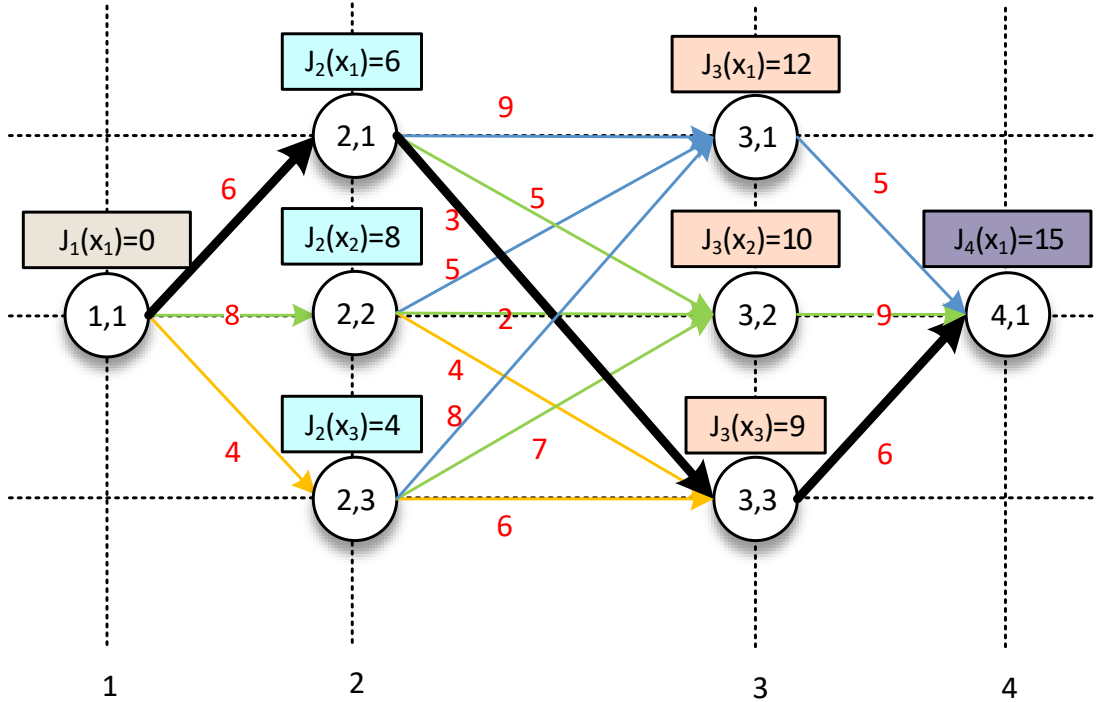
Belirtilen problemin çözümünün, ileri yinelemeli olarak gerçekleştirilmesi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Şekildeki her bir zaman dilimindeki durumların üzerinde yazan $J_k(x_k)$, başlangıç adımından ifadenin bulunduğu duruma kadar olan en düşük maliyetli rotanın değerini göstermektedir. Örneğin başlangıçtan 2,1 durumuna geçmenin maliyeti $J_2(x_1) = 6$ birimdir. Buna karşılık 3. zaman diliminde bulunan herhangi bir duruma ulaşmanın maliyeti, bu durumlara bir önceki zaman diliminden ulaşılacak üç rota bulunması sebebiyle her biri için ayrı hesap gerektirir. Yine örneklemek gerekirse başlangıçtan 3,1 durumuna ulaşan en düşük maliyeti hesaplayabiliriz. Hesap ederken 2. zaman dilimindeki durumların başlangıca olan maliyetlerine, 2. zaman diliminden 3. zaman dilimine geçiş için gerekli olan maliyet eklenir. Bu değerler içerisinde en düşüğü alınır. Bu hesaplama Denklem (4.16) ile ifade edildiği gibidir.

$$J_3(x_1) = \min \begin{cases} J_2(x_1) + 9 \\ J_2(x_2) + 5 \\ J_2(x_3) + 8 \end{cases} = \min \begin{cases} 6 + 9 \\ 8 + 5 \\ 4 + 8 \end{cases} = \min \begin{cases} 15 \\ 13 \\ 12 \end{cases} = 12 \quad (4.16)$$



Şekil 4.18: DP örneğinin ileri yinelemeli olarak çözümü.

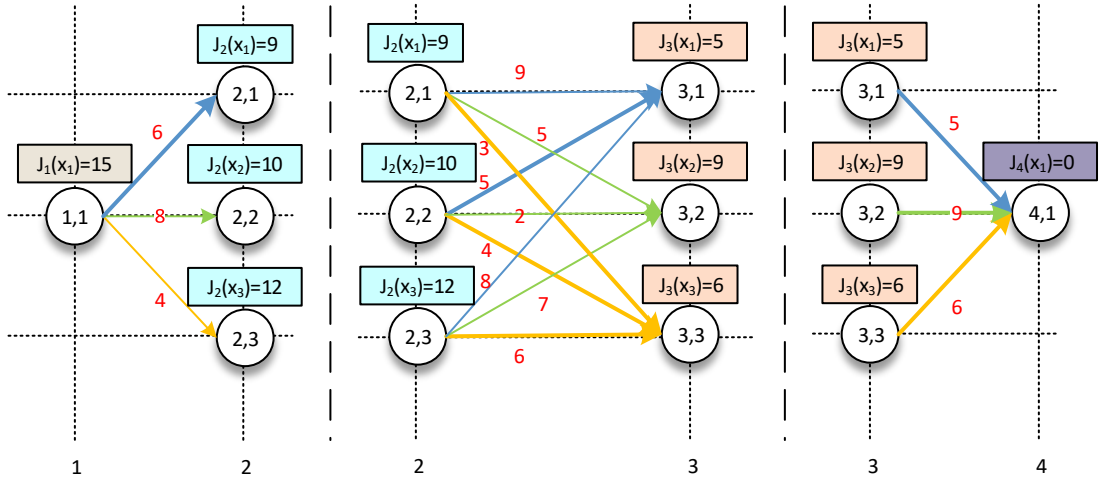
Şekil 4.18'den görüldüğü gibi başlangıçtan son duruma ulaşmak için gerekli olan en düşük maliyet 15 birim olarak bulunmuştur. Bu sonucu veren, en uygun rota siyah oklar ile Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Burada her bir zaman dilimindeki maliyet değerine bakarak, baştan sona olan en uygun çözüm rotasının en düşük olan durumdan geçeceği yanılgısına düşülmemelidir. Örneğin başlangıçtan 2. zaman dilimine olan en düşük maliyet 2,3 durumunda bulunmasına rağmen baştan sona olan en uygun rota bu durumdan geçmemektedir.



Şekil 4.19: DP örneğinin ileri yinelemeli olarak çözümünden elde edilen en iyi rota.

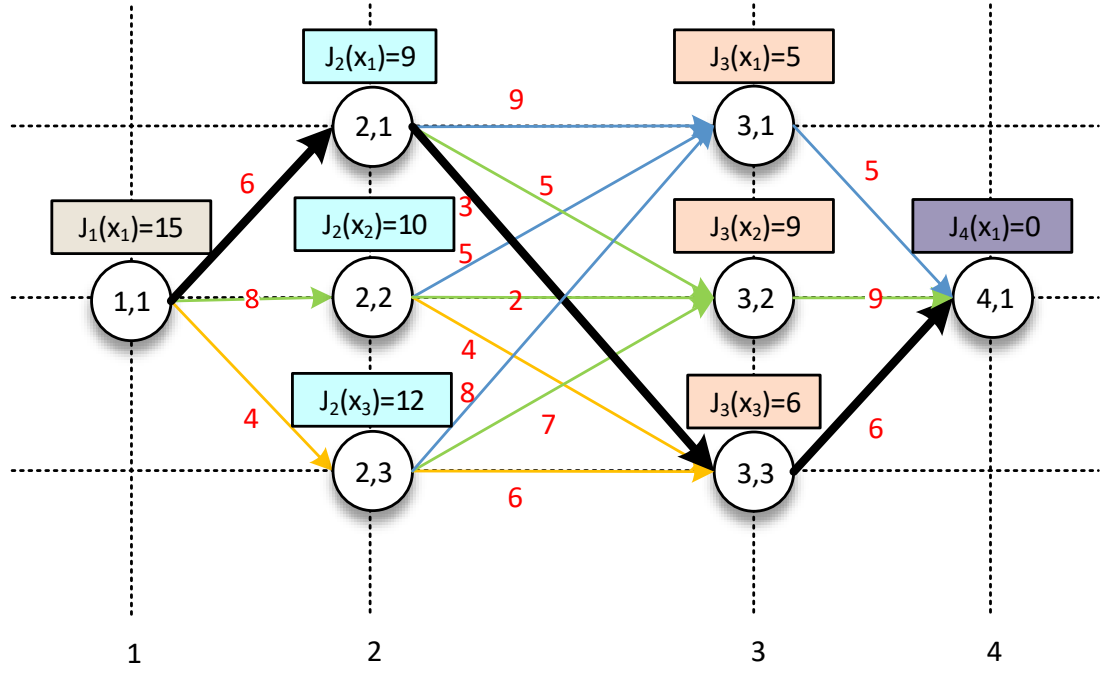
Aynı problemin çözümünde, geri yinelemeli yöntem kullanılmış ve çözüm adımları Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Şekildeki her bir zaman dilimindeki durumların üzerinde yazan $J_k(x_k)$ değerleri, bu sefer son adımdan ifadenin bulunduğu duruma kadar olan en düşük maliyetli rotanın değerini ifade etmektedir. Örneğin sondan 3,3 durumuna geçmenin maliyeti $J_3(x_3) = 6$ birimdir. Buna karşılık 2. zaman diliminde bulunan herhangi bir durumdan sona ulaşmanın maliyeti, bu durumlardan bir sonraki zaman dilimine ulaşılabilir üç rota bulunması sebebiyle her biri için ayrı hesap gerektirir. Örneğin, 2,3 durumundan sona ulaşan en düşük maliyeti bulurken 3. zaman dilimindeki durumların sona olan maliyetlerine, 2. zaman diliminden 3. zaman dilimine geçiş için gerekli olan maliyet eklenir. Bu değerler içerisinde en düşüğü alınır. Bu hesaplama Denklem (4.17) ile ifade edildiği gibidir.

$$J_2(x_3) = \min \begin{cases} J_3(x_1) + 8 \\ J_3(x_2) + 7 \\ J_3(x_3) + 6 \end{cases} = \min \begin{cases} 5 + 8 \\ 9 + 7 \\ 6 + 6 \end{cases} = \min \begin{cases} 13 \\ 16 \\ 12 \end{cases} = 12 \quad (4.17)$$



Şekil 4.20: DP örneğinin geri yinelemeli olarak çözümü.

Bu problemin geri yinelemeli olarak çözümünden en düşük maliyeti veren rota Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Beklenildiği gibi geri yinelemeli çözümden de ileri yinelemeli yöntemle aynı rota bulunmuştur.



Şekil 4.21: DP örneğinin geri yinelemeli olarak çözümünden elde edilen en iyi rota.

Görüldüğü gibi bu hesaplama tekniğinde, alt problemlere bulunan çözümler daha sonraki adımlarda kullanılmaktadır. Önemli olan yollar üzerinde belirtilmiş olan geçiş maliyetlerinin hesaplanması ve ilgili geçişler sonrası değişimlerin iyi kurgulanmasıdır. Her bir dilimdeki durum sayısının artması, işleyişi, hesaplanacak değerler anlamında zorlaştırmaktadır.

4.2.3 Elektrikli Araç için Dinamik Programlama Tabanlı EYS Benzetimi

DP ile elektrikli ve hibrit araçların için EYS gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, neredeyse tamamında enerji depolama birimlerinin doluluk oranının, DP ile çözüm aranan durumlar olarak yapılandırıldığı görülmektedir (Irani 2009; Lian ve diğ. 2017; Pérez ve diğ. 2006; Wang ve diğ. 2015). Böylelikle, EYS problemi herhangi bir zaman diliminde ilgili depolama biriminin SOC'unun belirlenmesi halinde ifade edilmiş olur. Batarya ve UC bulunan bir araçta, donanımlardan birinin SOC değerinin durum değişkeni olarak belirlenmesi yeterli olacaktır. Çünkü diğer bileşenin SOC değeri doğrudan diğeriyle bağlantılıdır.

Genellikle literatürde yapıldığı gibi, bu çalışmada, batarya SOC değeri durum değişkeni olarak seçilmiştir. Kontrol değişkeni olarak da UC güç değeri belirlenmiştir.

Optimum kontrol stratejisini belirlenmesinde, bütün sürüş profili boyunca, her bir zaman dilimindeki güç talebine bağlı olarak bulunulması gereken optimum batarya SOC değerinin belirlenmesi gerekir. Bu SOC değişimi talep gücüne göre batarya-UC arası güç paylaşımı belirlenerek gerçekleştirilir.

DP'da durum değişkeninin sonlu sayıda parçalara ayrılması gerekmektedir. Batarya SOC değeri için ayrıklaştırma işlemi ve elde edilen durumların sayısı Denklem (4.18)'deki gibi bulunabilir.

$$S = \frac{Bat_SOC_{max} - Bat_SOC_{min}}{\Delta SOC} \quad (4.18)$$

Burada; ΔSOC durumlar arasındaki adım aralığını, Bat_SOC_{max} ve Bat_SOC_{min} de bataryanın izin verilen en yüksek ve en düşük SOC değerlerini ifade etmektedir. ΔSOC değerinin doğru seçilmesi DP'nin çalışması açısından oldukça büyük önem arz etmektedir. ΔSOC değerinin çok küçük seçilmesi işlem sayısını oldukça fazla arttıracak, hatta problemi normal bilgisayarlarla hesap edilemez hale getirebilecektir. ΔSOC değerinin çok büyük seçilmesi de işlem sayısını azaltacak ancak DP'nin uygulanabilir sonuçlar verememesine sebep olacaktır. Örneğin, ΔSOC değeri 1 ve batarya SOC değeri maksimum %100 olarak seçilmiş olsun. Bu durumda batarya SOC değerinin %80 den %79'a bir saniye içerisinde değişmesi için gerekli olan anlık güç miktarı aşağıdaki gibi bulunur (Batarya nominal kapasitesi 40 Ah, batarya gerilimi 100,8 V).

$$\Delta P = (80 - 79) * Batarya\ Nominal\ Kapasitesi * Batarya\ Gerilimi * 3600 \quad (4.19)$$

$$\Delta P = 1 * 40 * 100,8 * 3600 = 14515200\ Watt * Saniye \quad (4.20)$$

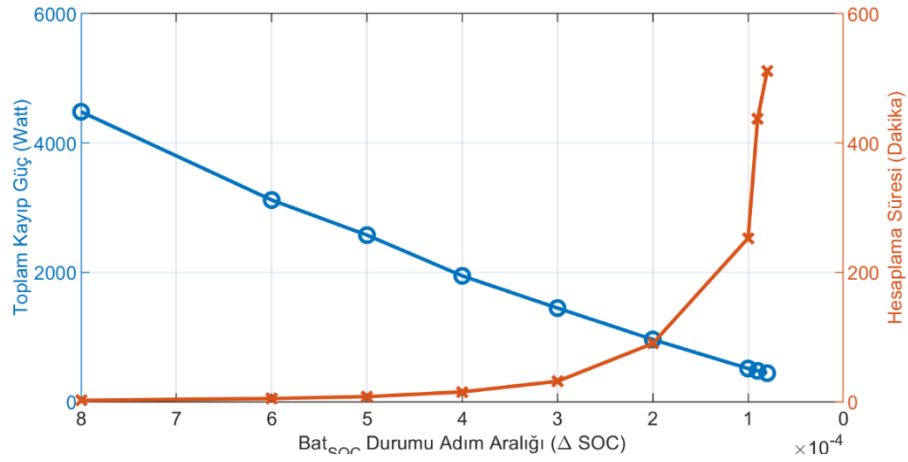
Görüldüğü gibi bulunan bu değer bataryadan ya da UC'den karşılanabilir boyutlarda değildir. Dolayısıyla ΔSOC değerinin büyük seçilmesi durumunda herhangi bir sonuca ulaşamayacaktır. Bu yüzden enerji depolama birimlerinin kısıtlarının belirlenmesi ve buna göre adım aralığının uygun bir değer seçilmesi gerekmektedir. Seçilebilecek maksimum adım aralığını belirlerken bataryanın anlık olarak sağlayabileceği ya da kabul edebileceği maksimum ve minimum güç dikkate alınmalıdır. Denklem (4.21)'de bataryanın anlık olarak sağlayabileceği maksimum

güç değeri ifade edilmiştir. Denklem (4.22)'de de bu güç değeri kullanılarak ΔSOC 'un alabileceği maksimum değer bulunmuştur.

$$\Delta P_{Bat,max} = \text{Batarya Maksimum Akımı} * \text{Batarya Gerilimi} * \Delta t \quad (4.21)$$

$$\Delta SOC_{max} = \frac{\Delta P_{Bat,max}}{\text{Batarya Kapasitesi} * \text{Batarya Gerilimi} * 3600} = 3,2022 * 10^{-4} \quad (4.22)$$

Denklem (4.22) ile ΔSOC_{max} değeri $3,2022 * 10^{-4}$ olarak bulunmuştur. Ayrıca, maksimum değer altında hesaplama süresi ve toplam kayıp arasındaki ilişkiyi görmek için farklı adım aralıkları denenmiş ve bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Adım aralığının değişimine göre elde edilen toplam kayıp ve işlem süresi Şekil 4.22'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere adım aralığının azaltılmasıyla kayıplarda belli bir yere kadar azalma sağlanırken ve hesaplama süresinde ciddi bir artış olmaktadır. Dolayısıyla ΔSOC değerinin seçilmesinde bu gibi etmenler dikkate alınarak uygun bir değer belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.22: ΔSOC adım aralığının sonuçlara ve hesaplama süresine etkisi.

4.2.4 Dinamik Programlama Tabanlı EYS Benzetim Sonuçları

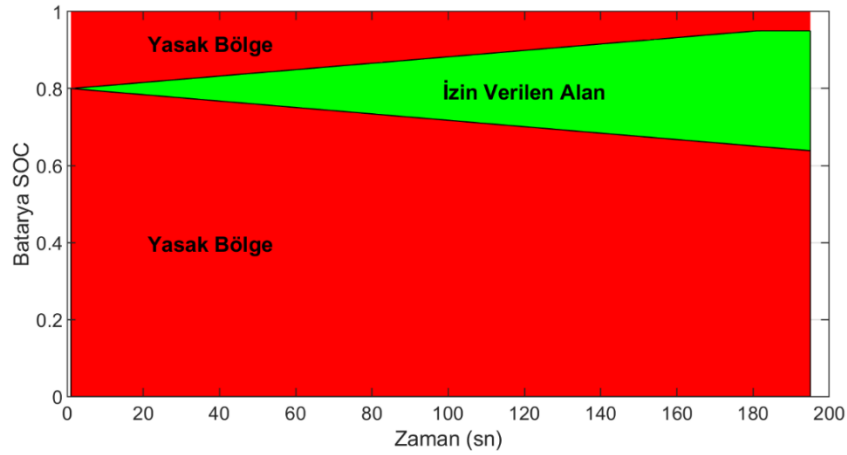
DP ile gerçekleştirilen EYS'nin performansını görebilmek için standart sürüş profillerinden olan ECE sürüş profili seçilmiştir. Önceki bölümde anlatılmış olan DP temellerine göre şekillendirilmiş olan program akış adımları aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu çalışmada ileri yinelemeli DP algoritması tercih edilmiştir. Burada durumlar arası geçişler için gerekli olan maliyetin en düşük olması ya da herhangi bir

zaman diliminde o zaman dilimine ulaşana kadar olan maliyetin en düşük olmasının önemli olmadığını vurgulamak gerekir. Önemli olan sürüş profili sonunda en düşük maliyete sahip durumun belirlenip bu adımdan başlayarak geriye doğru rotanın takip edilmesidir. DP tabanlı EYS işlem adımları Tablo 4.2’de detaylı olarak açıklanmıştır.

Tablo 4.2: DP tabanlı EYS algoritması.

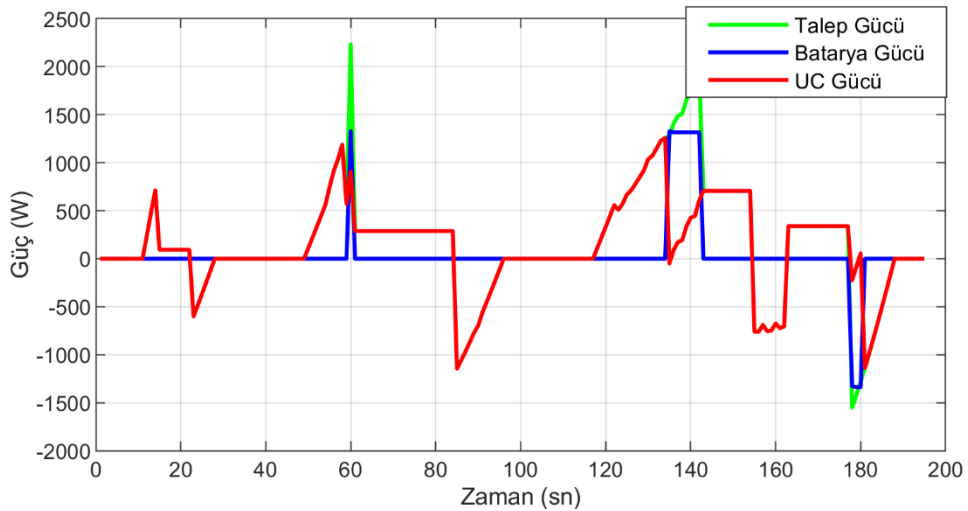
Algoritma: Dinamik Programlama Tabanlı EYS
1. Başla
2. Sürüş profili döngüsü (k)
3. Hedef durum değişkeni döngüsü (j)
4. Şimdiki zaman durum değişkeni döngüsü (i); (Şimdiki durum değişkeni hedefe ulaşılabilecek uzaklıkta olacak şekilde ayarla)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Şimdiki durum değişkeninden hedef durum değişkenine geçiş için gerekli olan maliyeti hesapla=> Cost(i,j) ▪ İlgili geçiş yapıldığında oluşacak güç, akım, SOC değerlerini hesapla ▪ Güç, akım ya da SOC değerlerinden herhangi biri kısıtları ihlal ediyorsa, geçiş maliyetini sonsuz yap. => Cost (i,j)=Inf ▪ Başlangıçtan şimdiki duruma kadar gelmek için gerekli olan maliyet ile geçiş için gerekli olan maliyeti topla, bir önceki değerinden düşükse hedef durum değişkenine başlangıçtan gelmek için gerekli olan maliyet olarak bu değeri kaydet. Güç, akım, gerilim ve SOC değerlerini de ilgili hedef durum değişkeni için kaydet. İlgili hedef durum değişkenine (j) hangi şimdiki durum değişkeni (i) değerinden ulaşıldığını kaydet.
- Sıradaki şimdiki durum değişkenine (i) geç
- Sıradaki hedef durum değişkenine (j) geç
- Sıradaki zaman dilimine (k) geç
5. Son adımda oluşan en düşük maliyeti veren durum değişkeninden o duruma hangi durumdan ulaşıldığına bakarak adım adım geriye doğru en uygun rotayı veren durumlara göre ilgili güç, akım, gerilim ve SOC değerlerini belirle.
6. Bitir

Bu çalışmada da ΔSOC $8 * 10^{-5}$ olarak seçilmiştir. Batarya SOC aralığının %55 ile %95 olarak seçilmesiyle birlikte denklem (4.18)'e göre durum sayısı $S = 5000$ olmuştur. Bu parametrelere göre %80 SOC değeriyle başlayan bataryanın, her adımda bulunabileceği maksimum ve minimum SOC değerleri Şekil 4.23'te yeşil alan ile gösterilmiştir. Bu aralığın dışındaki durumlar kırmızı ile gösterilen bölgelere karşılık gelir. Bu aralıktaki durumlara ulaşmak için kısıtlar ihlal edildiğinden maliyetin sonsuz olacağı ve hesaplamamanın gerekli olmadığı açıktır.



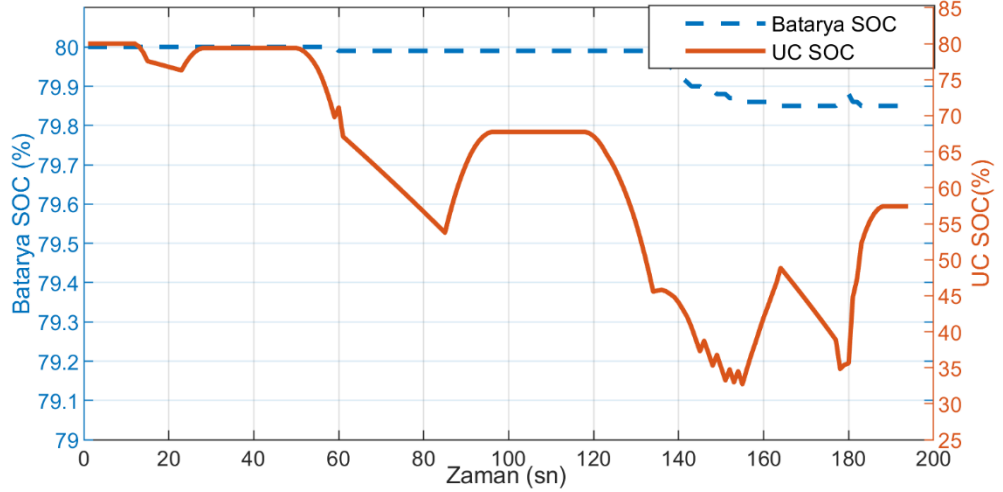
Şekil 4.23: Bataryanın sürüş profili boyunca uygun ve uygun olmayan çalışma alanları.

DP ile bulunan en uygun rotaya göre elde edilen güç dağılımları Şekil 4.24'de gösterilmiştir. Burada UC'nin iç direncinin bataryaya göre oldukça düşük olması sebebiyle kısıtlar aşılmadığı sürece gerekli gücün UC'den karşılandığı görülebilir.



Şekil 4.24: DP tabanlı EYS ile elde edilen güç dağılımı.

Güç dağılımlarıyla ilintili olarak belirtilen güç paylaşımının yapılması durumunda batarya ve UC'nin SOC değişimleri de Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Burada kısıtların aşılmadığı görülebilir. Örneğin UC'nin en düşük SOC seviyesi olan %30'a yaklaşması durumunda, bataryanın devreye girerek hem gerekli gücü sağlayıp hem de UC'yi şarj etmesi söz konusu olmuştur.



Şekil 4.25: DP tabanlı EYS benzetiminde batarya ve UC SOC değişimleri.

4.3 Önerilen Jaya Optimizasyon Yöntemi ile EYS Benzetimi

Elektrikli araçların enerji yönetimi için literatürde oldukça fazla yöntem önerilmiştir. EYS'den beklenen özellikler; verimlilik, doğruluk, tutarlılık ve hızlı çalışma şeklinde özetlenebilir. Bu amaca en uygun grup içerisinde gerçek zamanlı sezgisel optimizasyon yöntemleri görünmektedir. Ancak, sezgisel optimizasyon yöntemlerinin çoğunluğunda ayarlanması gereken birçok parametre bulunmaktadır ve çözüm süreleri gerçek zamanlı uygulama için fazla olabilmektedir. Bu sebeple daha önce elektrikli araçlar için EYS konusunda uygulamasına rastlanılmayan Jaya optimizasyon yöntemi bu amaçla ilk defa tez kapsamında gerçekleştirilmiştir. Jaya yöntemini diğer sezgisel optimizasyon yöntemlerinde ayıran en önemli fark popülasyon sayısı ve maksimum iterasyon sayısı dışında ayarlanması gereken parametresinin bulunmamasıdır. Böylelikle uygulandığı problemlerde, diğer sezgisel yöntemlere nazaran daha hızlı ve daha doğru sonuçlar vermektedir (Kirkbas ve diğ. 2017). Bu üstün özellikleri sebebiyle Jaya optimizasyon yönteminin elektrikli

araçlarda gerçek zamanlı EYS için uygun olacağı değerlendirilmiş ve tez kapsamında konu ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Jaya optimizasyon yönteminin elektrikli araç EYS konusunda kullanılması ve PSO ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması referansta yer almaktadır (Demircali ve Koroglu 2020). Ancak, ilgili çalışmada sadece benzetim yapılmış olup sistemin deneysel doğrulaması gerçekleştirilmemiştir. Bu tez çalışmasında, yöntemin detayları açıklanmış, ECE sürüş profili için sistemin deneysel doğrulaması gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Jaya optimizasyon yönteminin en uygun sonucu arayacağı arama uzayının kısıtlanarak daha iyi sonuç elde etmek için yine literatürde kullanımına rastlanmayan bir yöntem önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yöntemin performansı incelenmiştir.

4.3.1 Jaya Optimizasyon Yönteminin Temelleri

Jaya optimizasyon yöntemi, diğer sezgisel optimizasyon yöntemleri gibi popülasyon temelli bir yöntemdir (Venkata Rao 2016). Yöntem, oluşturulan çözüm adayları popülasyonunun belirli kurallara göre her adımda en iyi çözüme yaklaşması prensibine göre çalışır. Jaya yöntemi popülasyon sayısı ve maksimum iterasyon sayısı dışında ayarlanması gereken parametresinin bulunmaması sebebiyle uygulandığı problemlerde, diğer sezgisel yöntemlere nazaran daha hızlı ve daha doğru sonuçlar vermektedir (Kirkbas ve diğ. 2017).

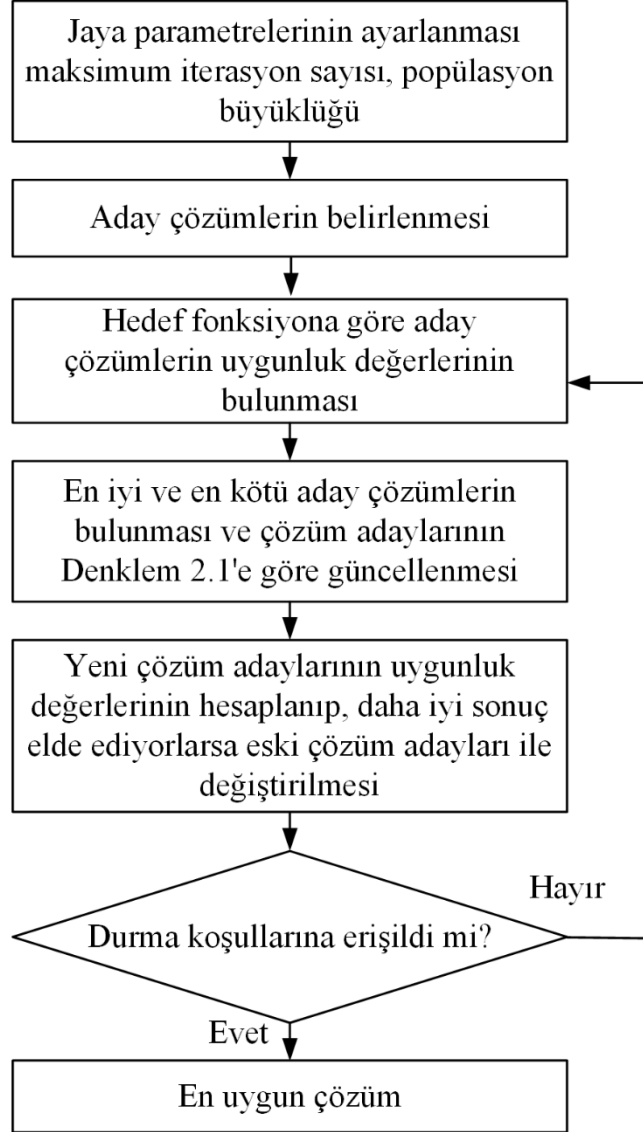
Jaya yönteminde, oluşturulan çözüm adayları için her adımda belirlenen hedef fonksiyona göre uygunluk değerleri hesap edilir. Her çözüm adayı elde edilen uygunluk değerlerine göre en iyi uygunluk değerine yaklaşacak ve en kötü uygunluk değerini elde eden çözüm adayından uzaklaşacaktır. Bu amaçla çözüm adayları denklem (4.23)'te tanımlandığı gibi rastgele hızlarla hareket ettirilir.

$$\bar{X}_{i+1}^d = X_i^d + R1_i^d * [X_{best}^d - |X_i^d|] - R2_i^d * [X_{worst}^d - |X_i^d|] \quad (4.23)$$

Bu denklemde yer alan $R1$ ve $R2$ rastgele değişkeni ifade etmektedir. Burada d değişken boyutunu, i ise her bir iterasyonu ifade etmektedir.

Eğer çözüm adaylarının yeni konumları, eski konumlarına göre daha uygun sonuç veriyorsa konumları tutulur. İlgili çözüm adayı için süreç bu noktadan devam

eder. Bu süreç, maksimum adım sayısına ulaşılan ya da istenilen uygunluk değerine erişilene kadar sürer. Jaya yöntemine ilişkin işlem adımları Şekil 4.26'daki akış şemasında verilmiştir.



Şekil 4.26: Jaya akış şeması.

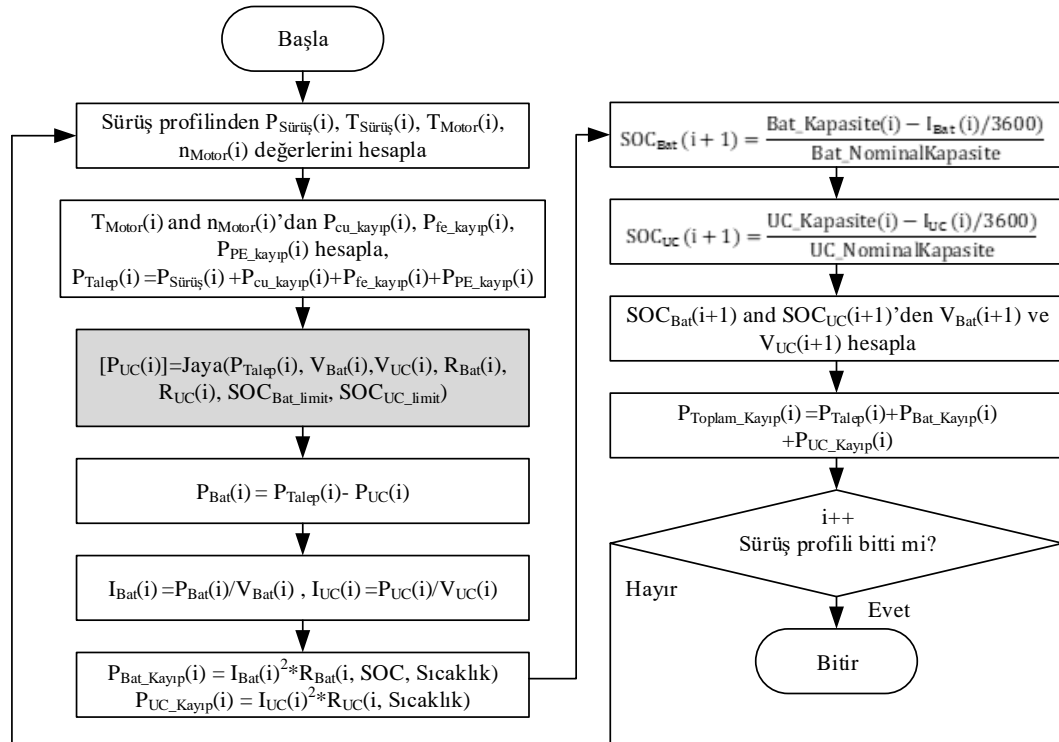
4.3.2 Elektrikli Araç için Jaya Optimizasyon Yöntemi Tabanlı EYS Benzetimi

Batarya ve UC beslenen tümüyle elektrikli bir araç için Jaya optimizasyon yöntemi tabanlı bir EYS önerilmiştir. Literatürde Jaya optimizasyon yönteminin enerji yönetim ve optimizasyonu konusunda ise sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ev

enerji yönetimi alanında (Samuel ve diğ. 2018^a; Samuel ve diğ. 2018^b) tarafından uygulanmıştır. Yöntemin elektrikli araç enerji yönetimi konusunda kullanımına ise bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışma haricinde rastlanmamıştır (Demircali ve Koroglu 2020).

EYS'nin, batarya ve UC arası güç paylaşımını gerçekleştirirken, birimlerin doluluk oranı ve verimlerini dikkate alarak karar vermesi gerekmektedir. Batarya ve UC den sağlanan ya da depolanan güç miktarına göre donanımlarda meydana gelen kayıplar arasında lineer bir ilişki bulunmamaktadır. Dolayısıyla, güç paylaşımını gerçekleştirmek için kayıpları en aza indirecek dağılımı bulan bir optimizasyon yöntemine ihtiyaç vardır. Bunun için EYS, depolama birimlerindeki kayıpları minimize etmelidir. Batarya ve UC'de meydana gelen kayıpları en aza indirmeyi ifade eden hedef fonksiyon denklem (4.24)'teki gibi tanımlanır.

$$J = \min \sum_{k=1}^{k=N} (P_{Bat_Kayıp}(k) + P_{UC_Kayıp}(k)) \quad (4.24)$$



Şekil 4.27: Jaya optimizasyon yöntemi tabanlı EYS akış şeması.

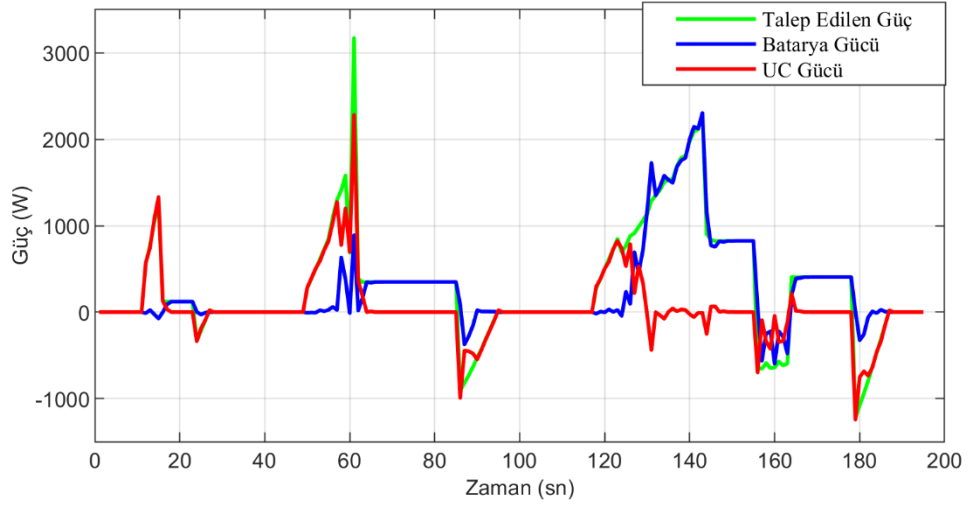
Denklemden motor ve motor sürücüsüne ait kayıpların minimize edilmeye çalışılmamasının sebebi, bu kayıpların batarya ve UC arasındaki güç paylaşımı ile ilişkilerinin olmamasındandır. EYS'nin vereceği güç paylaşımı kararıyla sadece batarya ve UC'de meydana gelen kayıplar artmakta veya azalmaktadır. Jaya optimizasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen EYS için akış şeması Şekil 4.27'de algoritma adımları ise **Hata! Yer işareti başvurusu geçersiz.**'te, verilmiştir.

Tablo 4.3: Jaya optimizasyon yöntemi tabanlı EYS algoritması.

Algoritma: Önerilen Jaya Optimizasyon Tabanlı EYS	
Giriş Parametreleri: Güç Talebi, Batarya Gerilimi, UC Gerilimi, Batarya ve UC eşdeğer devre dirençleri, Batarya ve UC SOC limitleri.	
Başlangıç Parametreleri: PopülasyonBüyüklüğü, Maksimumİterasyon GüncelPopülasyon =rand (PopülasyonBüyüklüğü); YeniMaliyet =Inf; <i>for</i> $i = 1$: Maksimumİterasyon;	
1	$P_{UC} = \text{GüncelPopülasyon};$ $P_{Bat} = P_{Talep} - P_{UC};$ $I_{UC} = P_{UC}/V_{UC};$ $I_{Bat} = P_{Bat}/V_{Bat};$ $P_{UC_Kayıp} = I_{UC}^2 * R_{UC};$ $P_{Bat_Kayıp} = I_{Bat}^2 * R_{Bat};$
2	Maliyeti Hesapla <i>for</i> $j = 1$: PopülasyonBüyüklüğü; $Maliyet(j) = P_{UC_Kayıp}(j) + P_{Bat_Kayıp}(j) ;$ <i>end for</i>
3	En İyi ve En Kötü Maliyeti ve Adayı Bul $En_İyi_Maliyet = \min(Maliyet);$ $En_Kötü_Maliyet = \max(Maliyet);$ $En_İyi_Aday = \text{GüncelPopülasyon}(En_İyi_Maliyet);$ $En_Kötü_Aday = \text{GüncelPopülasyon}(En_Kötü_Maliyet);$
4	Yeni Popülasyonu Bul <i>for</i> $k = 1$: PopülasyonBüyüklüğü; $YeniPopülasyon(k) = \text{GüncelPopülasyon}(k) + R1 * [En_İyi_Aday - \text{GüncelPopülasyon}(k)] - R2 * [En_Kötü_Aday - \text{GüncelPopülasyon}(k)];$ <i>end for</i>
5	İlerlemeyi Kontrol Et <i>for</i> $l = 1$: PopülasyonBüyüklüğü; <i>if</i> $YeniMaliyet(l) < Maliyet(l)$ $Maliyet(l) = YeniMaliyet(l);$ $GüncelPopülasyon(l) = YeniPopülasyon(l);$ <i>end if</i> <i>end for</i>
6	<i>end for</i>

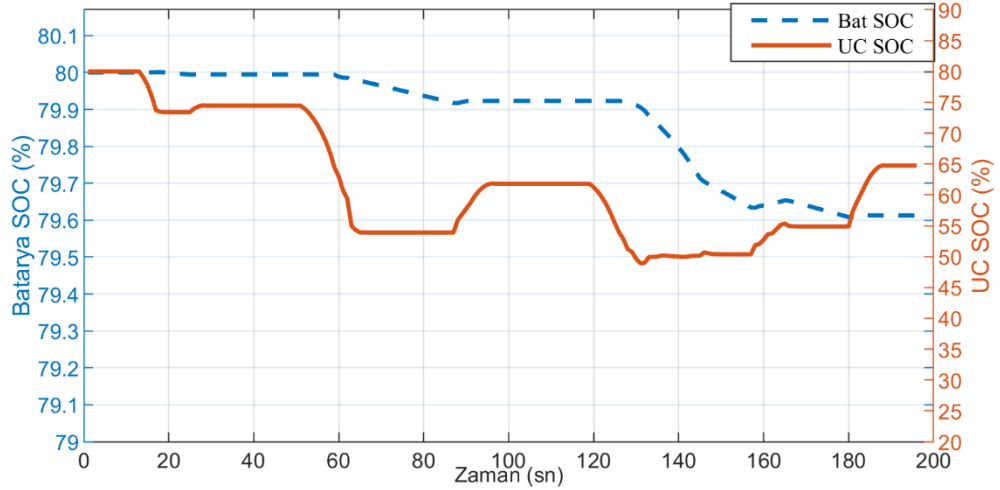
4.3.3 Jaya Tabanlı EYS Benzetim Sonuçları

Jaya tabanlı EYS'nin performansının incelenmesinde yine standart sürüş profillerinden ECE seçilmiştir. Jaya tabanlı EYS ile elde edilen güç dağılımları Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Burada UC'nin iç direncinin bataryaya göre oldukça düşük olması sebebiyle kısıtlar aşılmadığı sürece gerekli gücün UC'den karşılandığı görülebilir. Ayrıca güç talebindeki değişimin büyük olduğu noktalarda UC'nin katkısı da fazla olmuştur. Ayrıca örneğin 62 ile 80. saniyeler arası incelenirse güç talebinin sabit ve değerinin 300 W olduğu görülür. Bu durumda, UC'nin katkısı olmayıp tüm güç batarya tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 4.28: ECE sürüş profiline göre Jaya Tabanlı EYS ile elde edilen güç dağılımları.

ECE sürüş profilinde, optimum güç paylaşımı durumuna göre batarya ve UC'nin SOC değişimleri de Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Bataryada ani değişikliklerin olmadığı ve UC'nin doluluk oranının da belirlenen kısıtlar içerisinde kaldığı görülebilir.

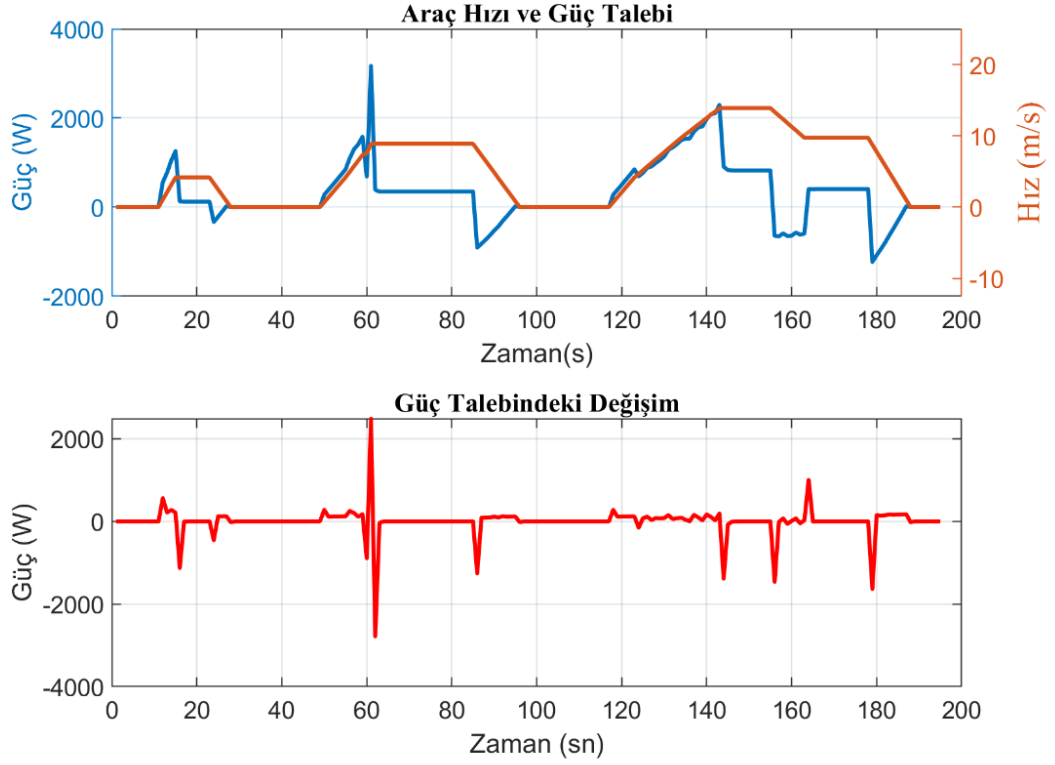


Şekil 4.29: ECE sürüş profilinde Jaya tabanlı EYS ile batarya ve UC SOC değişimleri.

4.3.4 Arama Uzayının Dinamik Olarak Kısıtlanması

EYS'nin görevi, her bir adımda P_{UC} 'nin belirlenmesi ile $P_{Bat_Kayıp}$ ve $P_{UC_Kayıp}$ değerlerinin en az olmasının sağlamaktır. P_{UC} 'nin alabileceği değerler daha önce de belirtildiği gibi UC'nin maksimum sağlayabileceği ya da depolayabileceği güç değerlerini aşmayacak şekilde belirlenmelidir. Bunun yanı sıra, arama uzayının belirli koşullara göre sınırlandırılması da literatürde başvurulan yöntemler arasındadır (Koroglu ve diğ. 2017; Koubaa ve Krichen 2017; Trovao ve diğ. 2013). Belirtilen çalışmalarda, batarya ve UC'nin doluluk oranlarına göre birimlerin güç katkısını belirleyecek katsayılar için sınırlar belirlenmektedir. Daha sonra, sezgisel optimizasyon yöntemlerinden biri ile belirlenen bu sınırlar içerisinde hedef fonksiyonu minimum yapacak bir arama gerçekleştirilmektedir.

Literatürde arama uzayının kısıtları genellikle kullanılan donanımların fiziksel kapasitelerine göre ya da doluluk oranlarına bağlı olarak belirlenmektedir. Bu çalışmada, arama uzayının kısıtlanması için güç talebinde meydana gelen değişimden faydalanılmıştır. ECE sürüş profili için Şekil 4.30.a)'da hız ve güç talebi, Şekil 4.30.b)'de ise güç talebinde meydana gelen değişim gösterilmiştir.

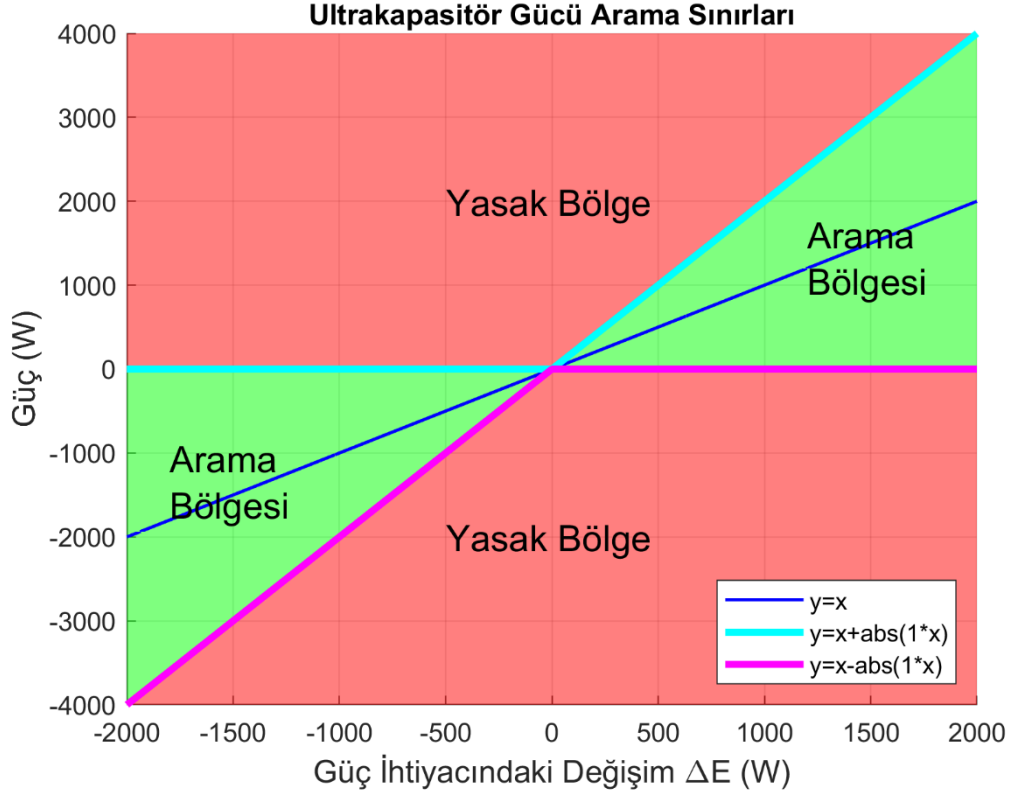


Şekil 4.30: ECE sürüş profili için a) Hız-güç talebi, b) Güç talebinde meydana gelen değişim.

Güç talebindeki değişimler incelendiğinde özellikle aracın hızlanma ve yavaşlama anlarında anlık güç değişimi fazla olmaktadır. Bu durumlarda daha hızlı şarj ve deşarj karakteristiğe sahip UC daha etkin olmalıdır. Buradan yola çıkarak güç talebinde meydana gelen değişikliğin yüksek olduğu yerlerde UC'nin daha çok katkı sağlaması gerektiği planlanmıştır. Bu amaçla P_{UC} 'nin aranacağı aralık olarak güç talebindeki değişime bağlı Şekil 4.31'deki gibi bir sınırlandırma önerilmiştir. Bu sınırlandırmada, P_{UC} için alt ve üst limitler sırasıyla Denklem (4.25) ve Denklem (4.26)'daki gibi tanımlanmıştır.

$$P_{UC,max} = \Delta P_{Talep}(t) + abs(\Delta P_{Talep}(t)) \quad \forall t \quad (4.25)$$

$$P_{UC,min} = \Delta P_{Talep}(t) - abs(\Delta P_{Talep}(t)) \quad \forall t \quad (4.26)$$



Şekil 4.31: UC gücünün arama sınırlarının güç ihtiyacındaki değişime bağlı olarak belirlenmesi.

Burada güç ihtiyacındaki değişiklik pozitif olduğunda UC'nin katkısının kesinlikle pozitif olmaktadır. Değişiklik negatif olduğunda ise UC'nin katkısı kesinlikle negatif, yani depolama yönünde olacaktır. Ancak, bu durum güç ihtiyacındaki değişimin pozitif olduğu ve UC'nin doluluk oranının düşük olduğu durumlarda bazı sorunlara yol açmaktadır. Sürüş profiline göre güç talebindeki değişim pozitif olsa da UC'nin şarj olması gereken durumlar olabilmektedir. Bu durumlarda UC'nin yukarıda belirtildiği gibi kısıtlanması kayıpları arttırmaktadır. Bu olumsuzluğu önlemek için denklem (4.25) ve (4.26), Denklem (4.27) ve (4.28)'de gösterildiği gibi bir w katsayısı eklenmiştir.

$$P_{UC,max} = \Delta P_{Talep}(t) + abs(w * \Delta P_{Talep}(t)) \quad \forall t \quad (4.27)$$

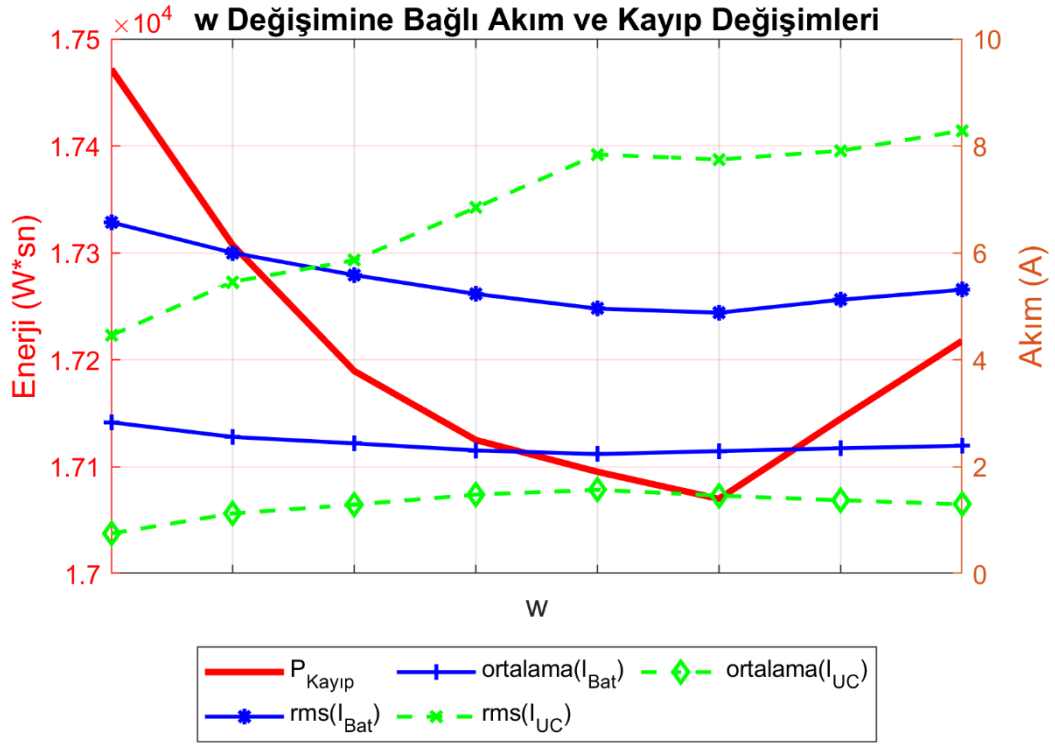
$$P_{UC,min} = \Delta P_{Talep}(t) - abs(w * \Delta P_{Talep}(t)) \quad \forall t \quad (4.28)$$

Denklemden yer alan arama uzayının alt ve üst limitlerini belirleyen w değişkeninin farklı değerleri için ECE sürüş profilinde elde edilen toplam kayıp miktarları Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4: Arama uzayının alt ve üst limitlerini belirleyen w değişkeninin farklı değerleri için ECE sürüş profilinde elde edilen toplam kayıp miktarı ve çeşitli akım değerleri.

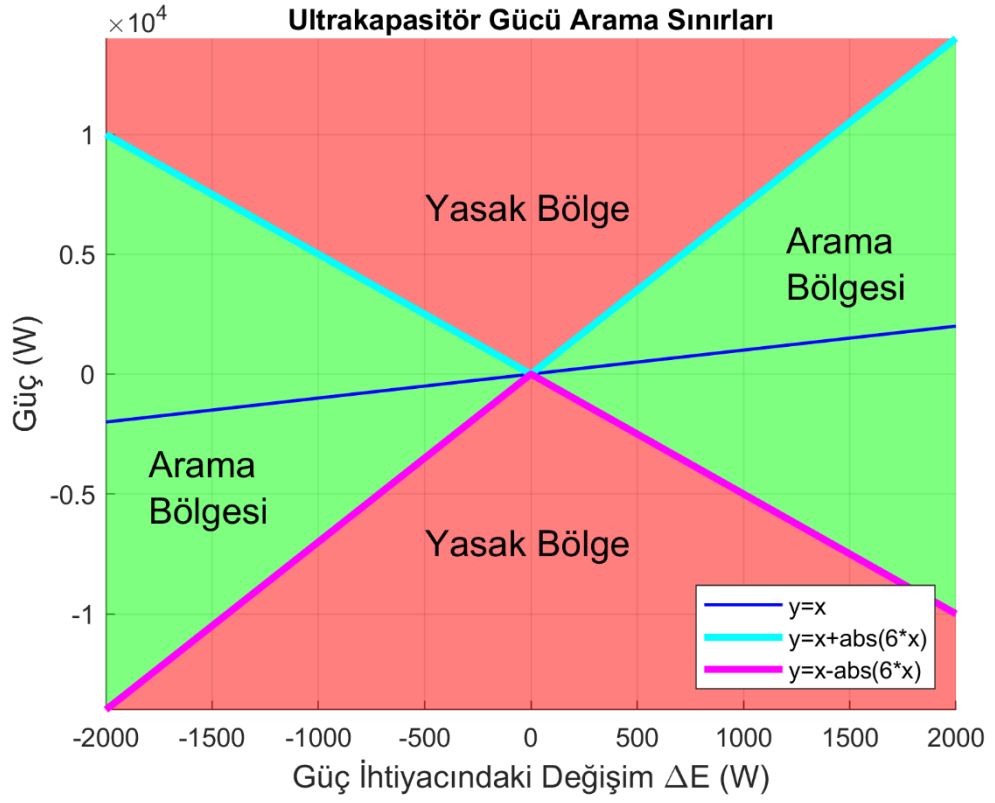
Tanımlama	$w = 1$	$w = 2$	$w = 3$	$w = 4$	$w = 5$	$w = 6$	$w = 7$	$w = 8$
Bat RMS (A)	6,57	6,00	5,58	5,23	4,95	4,88	5,12	5,31
Batarya Akımının Ortalama Değeri (A)	2,83	2,56	2,44	2,31	2,24	2,30	2,36	2,40
Batarya Akımının Standart Sapması (A)	5,94	5,44	5,06	4,71	4,44	4,32	4,57	4,75
UC RMS (A)	4,46	5,46	5,86	6,85	7,84	7,75	7,91	8,28
UC Akımının Ortalama Değeri (A)	0,76	1,13	1,29	1,48	1,57	1,46	1,38	1,30
UC Akımının Standart Sapması (A)	4,41	5,35	5,73	6,70	7,69	7,63	7,81	8,20
Toplam Kayıp (Joule)	17472	17307	17190	17125	17095	17070	17145	17218

Bu w katsayısının değişimine bağlı toplam kayıp ve akım değişimleri Şekil 4.32’de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, w değerinin artışına karşılık UC akımının RMS değeri artmaktadır. Buradan w ’nin artışıyla UC’ün daha çok kullanıldığı sonucunu çıkarabiliriz. Ancak kayıpları incelediğimizde kayıpların sürekli düşmediği rahatlıkla görülebilir. Buradan w ’nin fazla olmasıyla UC’nin gereksiz yere fazlaca kullanıldığı ve kayıpların arttığı sonucuna ulaşılabilir. Bunun nedeni de optimizasyon işleminin anlık olarak yapılmasıdır. Yani belirli bir an için UC kullanmak daha verimli olsa bile, daha sonraki zaman dilimlerinde kullanılan bu enerjinin yerine koyulması gerekmektedir. w değerinin yüksek seçilmesi, UC’nin sağlayabileceği ve depolayabileceği güç değeri için çok fazla bir aralık bırakılması anlamına gelir. Bu durum, UC’nin gereğinden fazla dolup boşalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.32: ECE sürüş profili için arama uzayının alt ve üst limitlerini belirleyen w değişkeninin farklı değerlerinde sürüş profilinde elde edilen toplam kayıp miktarı ve çeşitli akım değerlerinin gösterimi.

EYS için amaç toplam kayıpları en aza indirmektir. Bunu sağlarken de batarya sağlık durumunun dolaylı göstergesi olan batarya akımının RMS değerinin mümkün olduğunca azaltılmalıdır. UC'nin kullanım ömrü bataryaya göre oldukça yüksektir. Dolayısıyla UC RMS değerinin artmış olması kullanım ömrü açısından bataryaya kıyasla UC için bir etkisi olmayacaktır. Tablo 4.4'e bakıldığında en az kayıp w 'nin 6 olduğu durumda 17070 Joule olarak hesaplanmıştır. Bu durum bataryanın akımının RMS değerinin en az olduğu duruma karşılık gelmekte olup değeri 4,88 A olmuştur. Güç talebindeki değişime bağlı olarak P_{UC} 'nin aranacağı aralık w 'nin 6 olması durumunda Şekil 4.33'te gösterilmiştir.



Şekil 4.33: UC gücünün arama sınırlarının güç ihtiyacındaki değişime bağlı olarak belirlenmesi, $w = 6$.

5. ARAÇ BİLEŞENLERİ VE DENEY DÜZENEĞİ

Tez kapsamında yapılan EYS çalışmaları, tasarımına 2014 yılında başlanan, 114E023 proje numaralı “Şehiriçi kullanımlar için yüksek verimli elektrikli araç prototip tasarımı ve gerçekleştirilmesi” isimli TÜBİTAK-FWO (The Research Foundation-Flanders) ikili iş birliği projesi ve sonrasındaki projelerle üretimi gerçekleştirilen ALATAY aracına uygulanmak üzere geliştirilmiştir. Projeler kapsamında üretilen prototip araca ait görsel Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1: ALATAY elektrikli aracı.

ALATAY, TÜBİTAK tarafından düzenlenen Efficiency Challenge (EC) Elektrikli Araç Yarışlarına katılmak üzere yarış kurallarına uygun olarak tasarlanmış bir araçtır. Araç, yaklaşık 60 km/sa hızla 60 km’lik bir menzili tamamlamaktadır. Bu tez çalışmasının uygulanmasında ALATAY aracına ait alt bileşenler kullanılmıştır. Bu araçta enerji depolama birimi olarak batarya bulunmakta ve ilave olarak bu çalışma için sisteme UC eklenmiştir. Araçta iki adet BLDC motor ve bu motorları kontrol etmek için iki adet motor sürücüsü bulunmaktadır. Motorların arasında mekanik bağlantı bulunmaması sebebiyle araç dönüşlerinde araç kontrol sistemi (AKS) üzerinden elektronik diferansiyel uygulaması yapılmaktadır. Ayrıca, telemetri sistemi ile araçtan toplanan önemli veriler kablosuz olarak aktarılmaktadır.

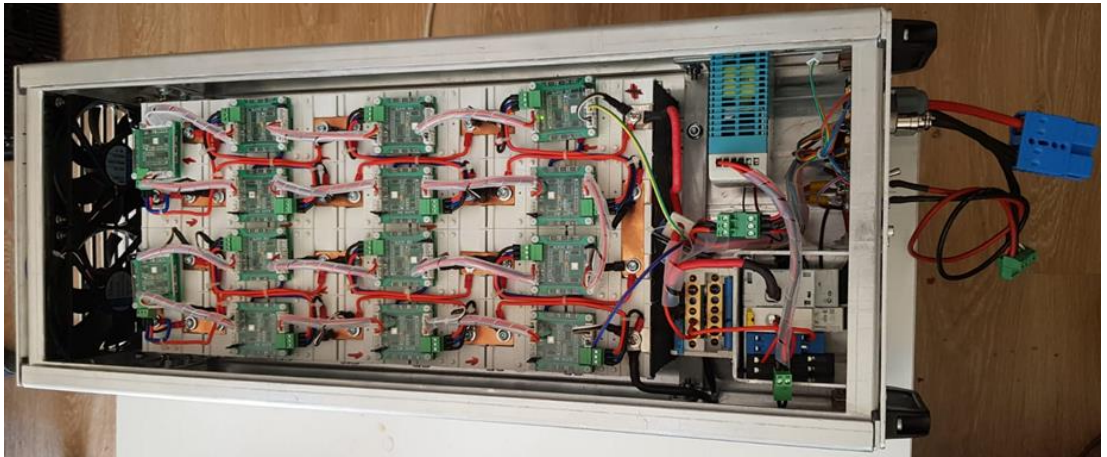
5.1 ALATAY Elektrikli Aracı Bileşenleri

Araçta EYS'nin uygulanması açısından önemli olan donanımları batarya, UC, motor, motor sürücüsü ve DC-DC dönüştürücü olarak sıralayabiliriz. Belirtilen donanımların modellenmesi ve önemli özelliklerine Bölüm 2.5'te yer verilmişti. Bu bölümde de araçta yer alan bu birimlerin donanımsal yapı ve özellikleri sunulmuştur.

5.1.1 Batarya Ünitesi

Batarya besleme ünitesi 14 adet 2850 mAh'lık Samsung 18650 hücresinin paralel bağlanmasıyla elde edilen modüllerden oluşturulmuştur. Ünite, belirtilen modüllerden 28 tane seri bağlanmış ve DC bara gerilimi yaklaşık 100.8 V olarak elde edilmiştir. Böylelikle, batarya kapasitesi yaklaşık 4032 Wh olmuştur.

Kullanılan bataryaların güvenli aralıkta çalıştırılması ve doluluk oranlarının doğru belirlenmesi için araçta BYS bulunmaktadır. BYS'nin tasarımında bir ana denetleyici ve her iki hücreye bir yardımcı denetleyici olmak üzere toplam 14 adet yardımcı denetleyici kullanılmaktadır (Kilic ve diğ. 2017; Kılıç 2016). Ana BYS denetleyicisi AKS ile Can Bus, yardımcı denetleyici kartlar ile UART, haberleşme protokolü ile haberleşmektedir. Batarya hücrelerinin dengelemesinde pasif dengeleme kullanılmaktadır. Batarya ünitesi ve BYS devreleri Şekil 5.2'den görülebilir.



Şekil 5.2: Batarya ünitesi.

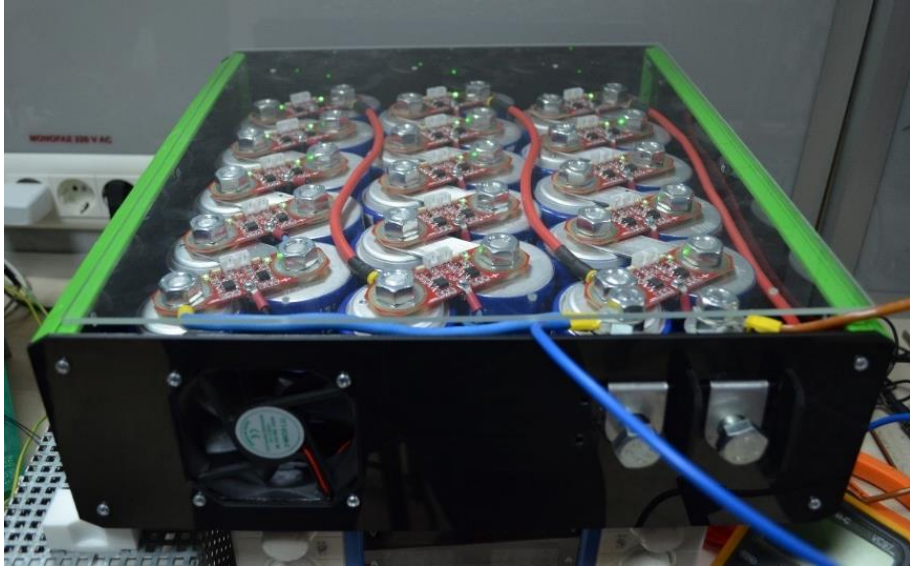
BYS sayesinde her bir hücrenin gerilimi ve sıcaklığı okunabilmekte, hücreler arası gerilim dengesizlikleri pasif dengeleme ile giderilmektedir. BYS, ölçtüğü akım ve gerilimi kullanarak bataryanın SOC'ünü belirlemektedir. Belirlenen ve ölçülen tüm bu bilgiler UART ve CAN Bus haberleşme protokolünü kullanarak gerekli birimlere iletilmektedir.

5.1.2 Ultrakapasitör Modülü

UC modülünün oluşturulmasında, Maxwell firmasının BCAP0650 P270 K049 tip UC hücreleri kullanılmıştır. 30 adet hücrenin seri bağlanmasıyla gerilimi 81 V, kapasitesi 21,67 F, seri direnci 24 mΩ olan bir UC modülü oluşturulmuştur. UC modülünün toplam enerjisi ise Denklem (5.1)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$E_{UC} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} * 21,67 * 81^2 = 71088,44 \text{ Joule} = 19,75 \text{ Wh} \quad (5.1)$$

Bilindiği gibi UC hücreleri yüksek gerilime karşı korunmalıdır. EYS yöntemlerinin uygulanacağı araçta bulunan UC hücrelerinin bu işlevi yerine getirecek koruma donanımları mevcuttur. Oluşturulan UC modülü ve koruma devreleri Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



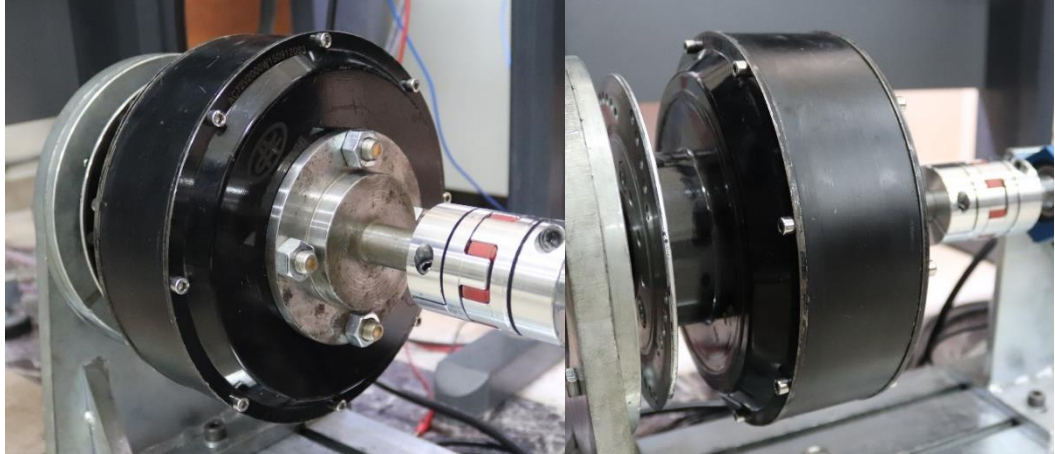
Şekil 5.3: UC modülü ve koruma devreleri.

5.1.3 BLDC Motor

Aracın sürüşü için arka tekerleklere konumlandırılmış iki adet motor kullanılmaktadır. Motorlar dıştan rotorlu BLDC motor olup, her birinin nominal gücü 2kW, pik gücü 3kW, nominal motor hızı 750 rpm, yaklaşık verim %90 civarındadır. Kullanılan dış rotorlu BLDC motorun etiket değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Her bir motor 96 V nominal gerilime sahiptir. Aynı güce sahip diğer motorlara göre hafif olan bu motorlar Şekil 5.4’te gösterilmiştir.

Tablo 5.1: BLDC motor etiket değerleri.

Özellik	Değer
Motor tipi	Dış rotorlu BLDC
Nominal gerilim	96 V
Nominal güç	2 kW
Pik gücü	3kW
Nominal motor hızı	750 rpm
Verim	90%
Koruma sınıfı	IP65



Şekil 5.4: BLDC motor görünümü.

5.1.4 Motor Sürücüsü

Seçilen BLDC motorları sürmek için Kelly marka KBL96151 model motor sürücüleri kullanılmıştır. Motor sürücüsü ana özellikleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Kullanılan sürücünün giriş gerilimi aralığı 18-120 V'tur ve sürekli durumda 60 A'lık akım verebilmektedir. Farklı kutup sayısına sahip motorları sürebilme yeteneğine sahip bu sürücü ile 40000 elektrik rpm'e kadar çıkılabilmektedir. Sürücü farklı rejeneratif çalışma modlarını desteklemekte ve analog girişler vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, CAN Bus haberleşme arayüzü, opsiyonel olarak sürücüde yer alabilmektedir. Kullanılan BLDC motor sürücü Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

Tablo 5.2: Kelly KBL96151 BLDC motor sürücü etiket değerleri.

Özellik	Değer
Üretici firma	Kelly / ABD
Giriş gerilimi	18-120 V
Sürekli durum akım	60 A
Maksimum akım (1 dk)	120 A
Maksimum akım (10 sn)	150 A
Çalışma frekansı	16,6 kHz
Hız	40000 elektrik rpm'e kadar
Rejeneratif Mod	Var

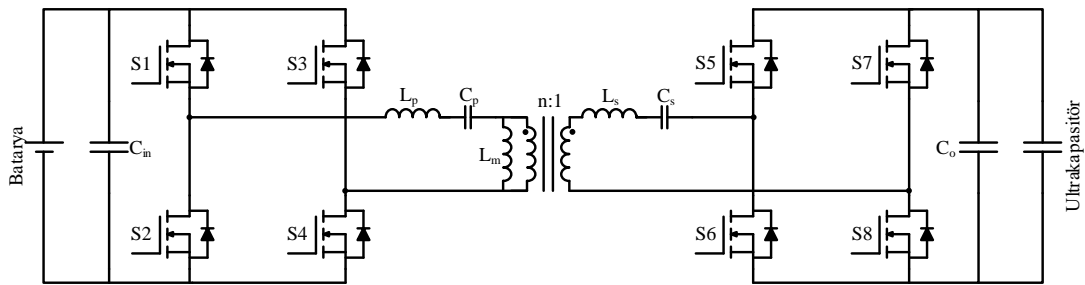


Şekil 5.5: Kelly KBL96151 BLDC motor sürücü görünümü.

5.2 Çift Yönlü CLLC Seri Rezonans Dönüştürücü

Araçta, batarya ve UC arası güç paylaşımının istenilen düzeyde yapılabilmesi için bir DC-DC dönüştürücüye ihtiyaç duyulmuştur. Bu dönüştürücü, EYS'nin tasarım kriterleri de dikkate alınarak tez kapsamında tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen EYS benzetimleri ve literatür çalışmaları, tasarlanacak olan EYS'de en az bir DC-DC dönüştürücü bulunması gerektiğini ortaya koymuştur.

Enerji yönetimi gerçekleştirebilmek için kullanılan depolama birimlerinden en az birinin seçilen topolojiye göre kontrol edilmesi gerekmektedir. Kontrol işlemi, iki yönlü güç akışını sağlayacak bir dönüştürücü vasıtasıyla uygulanmalıdır. Yapılan literatür taraması neticesinde, kullanılacak dönüştürücü topolojisi için günümüzde teorik çalışmaların yoğunlaştığı rezonans dönüştürücüler ön plana çıkmaktadır (Jung ve diğ. 2013; Vu ve diğ. 2018; Zahid ve diğ. 2015). Yüksek verimleri, topolojik olarak çalışma koşullarının büyük bölümünde sıfır gerilim – sıfır akım anahtarlamının sağlanıyor olması ve düşük elektromanyetik girişim değerleri gibi özellikleriyle rezonans dönüştürücüler sıklıkla tercih edilmektedir. Dönüştürücüde, iki taraflı olarak da gerilim arttırma/azaltma işlemi gerekmektedir. Ayrıca, enerji depolama birimleri arasında galvanik izolasyonun sağlanması da güvenlik açısından önemlidir. Bu sebeple, anahtarlama elemanlarının kullanım yapısı için çift taraflı tam köprü yapısı seçilmiştir. Tasarımı ve hesabı yapılacak olan çift yönlü, çift taraflı aktif, tam köprü CLLC (kapasitans-endüktans-endüktans-kapasitans) rezonans dönüştürücü prensip şeması Şekil 5.6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 5.6: Çift yönlü, çift taraflı aktif, tam köprü CLLC rezonans dönüştürücü prensip şeması.

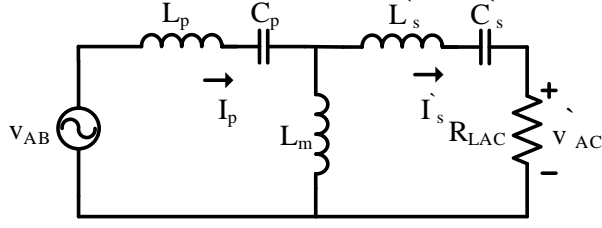
Dönüştürücüdeki hesaplamalar, birincil tarafında araç bataryasının bağlı bulunduğu DC bara, ikinci tarafında ise UC bulunacak şekilde yapılmıştır. Dönüştürücüye ait temel alınan değişken ve tasarım kriterleri Tablo 5.3'te yer

almaktadır. Bara gerilimini oluşturan bataryada kullanılan hücrelerin minimum ve maksimum gerilimleri sırasıyla 3,2 V ve 4,15 V'tur. Dolayısıyla 28 adet hücrenin seri bağlanmasıyla oluşturulan baranın gerilimi de 89,6 - 116,2 V aralığında değişmektedir. Ayrıca, rejeneratif frenleme anında bataryanın baradan ayrılması ile sadece motorların ürettiği gerilim kullanılarak bir dönüştürme işlemi gerekebilir. Dolayısıyla, dönüştürücü tasarımı yapılırken bara geriliminin 80-115 V arasında değişeceği planlanmıştır. Dönüştürücünün ikinci tarafında yer alan UC bloğu ise her biri 2.7 V olan 30 adet UC hücresinin seri bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Böylelikle, UC maksimum gerilimi 81 V olmaktadır. UC'de minimum gerilimin ise 0 V'a kadar düşmesinde yapısal olarak herhangi bir sakınca bulunmamaktadır. Ancak, UC minimum gerilimi 40 V olarak sınırlandırılmıştır. Bunun sebebi, 0-81 V gibi geniş çalışma aralıklarında çalışacak elemanların ve kullanılacak transformatörün belirlenmesinin zorluğundan kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi UC'nin sahip olduğu enerji geriliminin karesiyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Dolayısıyla, nominal geriliminin yarısına kadar kullanılan bir UC'nin mevcut enerjisinin %75'i kullanılmış olacaktır.

Tablo 5.3: Dönüştürücüye ait temel alınan değişken ve tasarım kriterleri.

Tanımlama	Değer
Giriş gerilimi (V_{in})	80-115 V
Çıkış gerilimi (V_{out})	40-80 V
Çıkış Gücü	1500 W
Rezonans frekansı (F_r)	100 kHz

Dönüştürücünün nominal gücüne, ele alınan elektrikli araç için gerçekleştirilen EYS benzetim çalışmalarında meydana gelen güç paylaşım grafiklerine bakılarak karar verilmiştir. Böylelikle, çıkış gücü değeri 1500 W olarak belirlenmiştir. Rezonans frekansı, rezonans dönüştürücülerde kullanılacak olan elemanların seçilmesi ve boyutlandırılmasında oldukça önemlidir. Tasarlanacak dönüştürücü için bu değer 100 kHz olarak seçilmiştir. Bu değer büyük seçilmesiyle tasarlanan dönüştürücünün küçültülmesi sağlanabilir. Ancak, bu durumda, anahtarlama elemanlarının hızı bu frekansta çalışmaya müsaade etmeyebilir.



b)

Şekil 5.7: Rezonans dönüştürücünün, a) CLLC eşdeğer devresi, b) Eşdeğer devre birincil tarafa indirgenmiş FHA gösterimi

$$v_{AB} = \frac{4 * V_{in}}{\pi} * \sin(2\pi F_s t) \quad (5.2)$$

Birinci tarafa aktarılan yük ve rezonans bileşenler sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$R_{LAC} = n^2 \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (5.3)$$

$$L'_s = n^2 L_s \quad (5.4)$$

$$C'_s = \frac{C_s}{n^2} \quad (5.5)$$

Yük tarafı parametreleri çıkış akımı I_o Denklem (5.6), çıkış gerilimi V_o Denklem (5.7)'deki gibi tanımlanır.

$$I_o = \frac{2n}{\pi} \sqrt{2} I'_s \quad (5.6)$$

$$V_o = I_o R_L \quad (5.7)$$

FHA modelinden gerilim kazanç ifadesi Denklem (5.8)'de tanımlanmıştır.

$$\frac{v_{CD}(s)}{v_{AB}(s)} = \frac{Z_m R_{LAC}}{Z_1 Z_2 + Z_1 (R_{LAC} + Z_m) + Z_m (R_{LAC} + Z_2)} \quad (5.8)$$

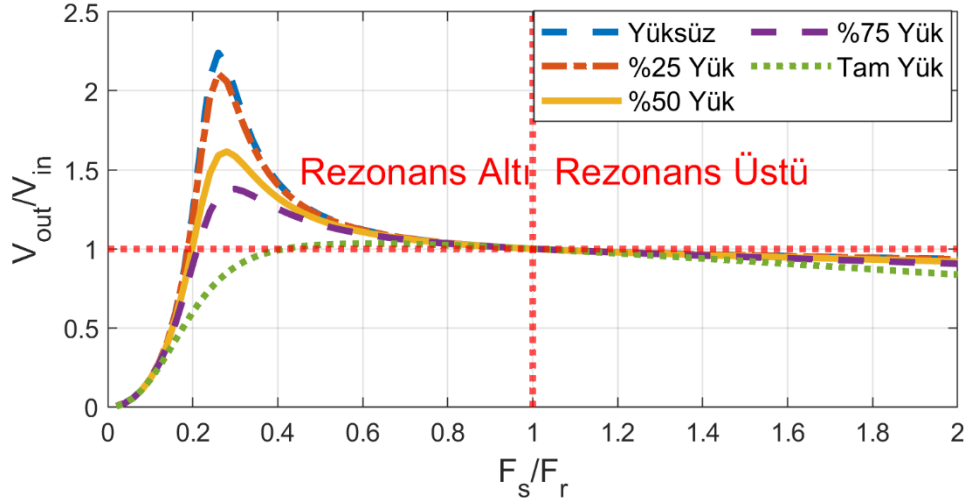
Denklemden belirtilen empedansların açık ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$Z_m = sL_m \quad (5.9)$$

$$Z_1 = sL_p + \frac{1}{sC_p} \quad (5.10)$$

$$Z_2 = sL'_s + \frac{1}{sC'_s} \quad (5.11)$$

Farklı çalışma frekansları için, transformatör dönüştürme oranı 1:1 olan bir rezonans dönüştürücünün, farklı yük değerlerinde gerilim kazanç oranları Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8: Farklı çalışma frekansları için transformatör dönüştürme oranı 1:1 olan bir rezonans dönüştürücünün farklı yük değerlerinde gerilim kazanç oranları.

Dönüştürücünün kazancı Şekil 5.8’den görülebildiği gibi anahtarlama frekansının rezonans frekansına eşit olduğu noktada 1’dir. Rezonans frekansından yüksek anahtarlama frekanslarında kazanç 1’den aşağı düşmektedir. Rezonans frekansından düşük anahtarlama frekansında ise kazanç yük durumuna göre 1’den genellikle büyük olmaktadır.

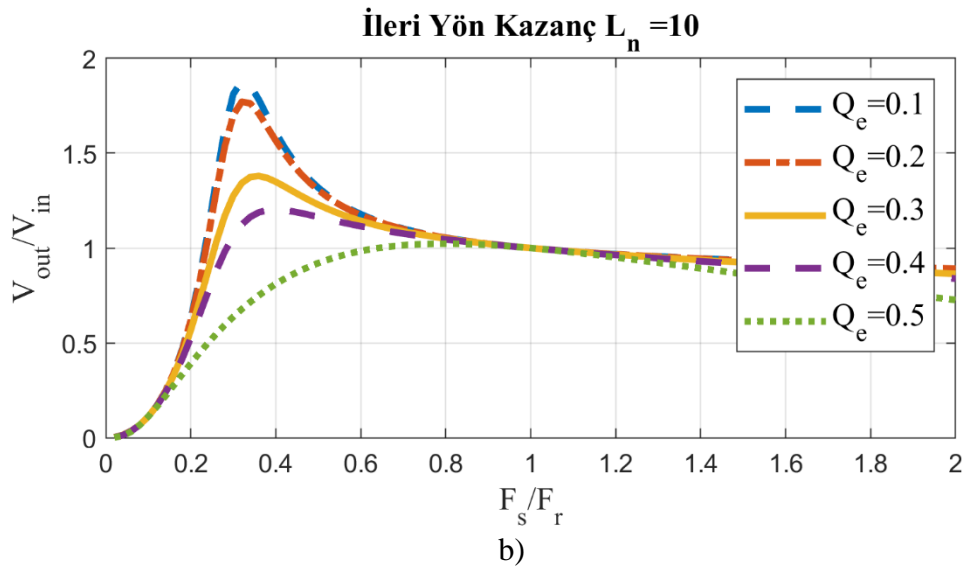
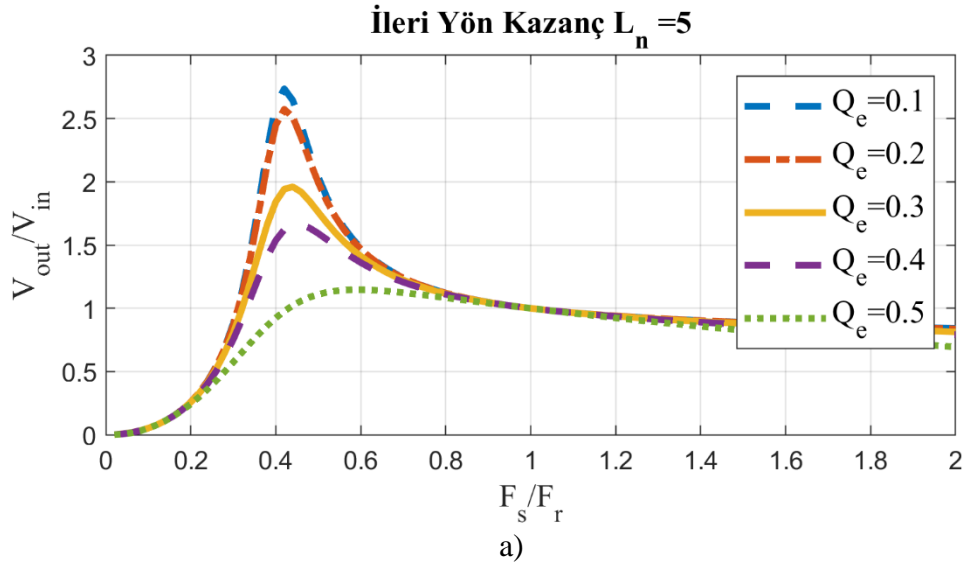
Rezonans dönüştürücü ile ilgili parametreleri temsil eden bazı önemli değişkenler bulunmaktadır. Bu değişkenler, sistemi oluşturan bileşenlere göre ifade edilmekte ve dönüştürücünün çalışmasını oldukça etkilemektedir. Bunlardan ilki Denklem (5.12) ile ifade edilen mıknatıslanma endüktansının rezonans endüktansına oranıdır.

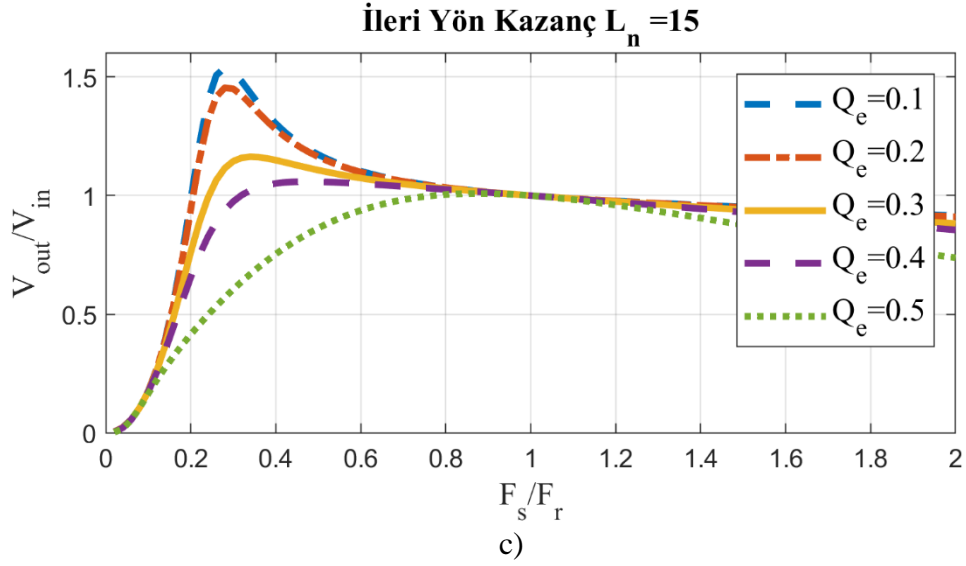
$$L_N = \frac{L_m}{L_p} \quad (5.12)$$

Diğer önemli bir değişken de Denklem (5.13) ile ifade edilen kalite faktörüdür.

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_p/C_p}}{R_{LAC}} \quad (5.13)$$

Burada L_N ve Q_e değişkenleri fiziksel devre parametrelerine dayanmaktadır ve bunların seçimiyle rezonans dönüştürücünün karakteristiği ortaya çıkar (Alemdar 2016). L_N ve Q_e 'nin değişimine bağlı dönüştürücü kazancının değişimi Şekil 5.9'da gösterilmiştir.





Şekil 5.9: L_N ve Q_e 'nin değişimiyle dönüştürücü kazancının değişimi, a) $L_N = 5$, b) $L_N = 10$, c) $L_N = 15$.

Şekil 5.9 incelendiğinde aynı L_N değeri için farklı Q_e değerleri seçildiğinde Q_e değerinin artmasıyla elde edilebilecek maksimum gerilim kazancı düşmektedir. Hatta bazı noktalarda anahtarlama frekansının rezonans frekanstan düşük olduğu halde kazancın 1'den az hale geldiği görülmektedir. Aynı Q_e değeri için farklı L_N değerleri seçildiğinde L_N değerinin artmasıyla elde edilebilecek maksimum kazancın düştüğü de şekilden görülebilmektedir. Örneğin, Q_e 'nin 0,1 olduğu durumda L_N değerinin 5, 10 ve 15 değerleri için elde edilebilecek maksimum kazanç değerleri sırasıyla 2,73, 1,88 ve 1,54'dür.

Tasarlanacak olan transformatörün mıknatıslanma endüktansının değerinin çok küçük olması, birincil taraftaki mıknatıslanma akımını arttıracaktır. Ayrıca, mıknatıslanma endüktansı, anahtarlama elemanlarının çıkış kapasitelerinin bırakılan ölü zaman içerisinde şarj ya da deşarj edilmesi için gereken akımın geçmesine müsaade etmelidir. Rezonans anında Mosfetler üzerindeki gerilimin çıkış kapasitelerini şarj ya da deşarj ederek sıfır geçiş anahtarlama (ZVS) yapılabilmesi için, o esnada sadece mıknatıslanma endüktansının empedansı bunu sınırlamaktadır. Bu sebeple, ZVS'nin garanti edilebilmesi için mıknatıslanma endüktansının olabileceği maksimum değer Denklem (5.14) ile bulunabilir (Jung ve diğ. 2013).

$$L_m \leq \frac{t_{dead}}{16 * C_{oss} * F_{s,max}} \quad (5.14)$$

Burada t_{dead} bırakılacak ölü zamanı temsil etmektedir. Değeri rezonans dönüştürücüde anahtarlama elemanın yükselme (t_{on}) ve düşme zamanına (t_{off}) göre belirlenir. CREE firmasının SiC Mosfetlerinden E3M0065090D modelinde yükselme zamanı ve düşme zamanının toplamı $44+32=76$ ns'dir. Dolayısıyla, ölü zamanın 200 ns seçilmesi yeterli olacaktır. Denklemden yer alan C_{oss} değeri ise anahtarlama elemanın çıkış kapasitesinin değeridir. Belirtilen Mosfetin veri dokümanında, gerilimin devredeki etkin değeri $V_{ds} = 120$ V için C_{oss} değeri 135 pF olduğu bulunabilmektedir. $F_{s,max}$ ise anahtarlama frekansının alabileceği maksimum değerdir. Bu değer çalışma esnasında yaklaşık 200 kHz olabileceği varsayılmaktadır. Değerler Denklem (5.14)'te yerlerine koyulacak olursa mıknatıslanma endüktansının değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$L_m \leq \frac{200 * 10^{-9}}{16 * 135 * 10^{-12} * 200 * 10^3} = 462 \mu H \quad (5.15)$$

Bulunan $462 \mu H$ 'den daha küçük bir L_m değeri ZVS'yi garanti edecektir. L_m 'nin büyük değerlerinde elde edilecek kazanç değeri düşmektedir. Bu sebeple L_m değeri literatürde de sıklıkla rastlandığı gibi bulunan değerden oldukça düşük bir değer olan $10 \mu H$ olarak seçilmiştir.

Rezonans endüktansı belirlenirken dönüştürücüden istenen maksimum kazanç ve istenilen rezonans frekansı dikkate alınır. Hesaplamalarda gösterildiği gibi Q_e değerinin etkisi büyüktür. Q_e 'nin genellikle 0,1 ve 0,5 arasında bir değer olması istenir (Alemdar 2016). Bu değeri, istenilen aralıkta ayarlamak için öncelikle Q_e 'yi etkileyen R_{LAC} değerinin hangi aralıkta değiştiğinin bulunması gerekir. Aktarılacak güç miktarı ve istenilen gerilim değerlerinden yola çıkarak R_L yük değerinin aralığı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{V_{UC,min}^2}{P_o} \leq R_L \leq \frac{V_{UC,max}^2}{P_o} \quad (5.16)$$

$$\frac{40^2}{1500} \leq R_L \leq \frac{80^2}{1500} \quad (5.17)$$

$$1,06 \leq R_L \leq 4,26 \quad (5.18)$$

R_{LAC} 'nin de formülünün $R_{LAC} = n^2 \frac{8}{\pi^2} R_L$ olduğu bilindiği için ileri yön güç aktarımında ikinci taraftaki etkin direncin değişimi Denklem (5.19) ve (5.20)'deki gibi bulunur. Denklemden yer alan n transformatörün dönüştürme oranıdır ve tasarımda 1,75 olarak alınmıştır.

$$n^2 \frac{8}{\pi^2} * 1,06 \leq R_{LAC} \leq n^2 \frac{8}{\pi^2} * 4,26 \quad (5.19)$$

$$2,63 \leq R_{LAC} \leq 10,57 \quad (5.20)$$

Bulunan bu yük değerlerine göre kalite faktörünü istenen aralıkta tutacak endüktans ve kapasitans değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için rezonans frekansı daha önceden belirlendiğine göre C_p denklemde yeniden düzenlenebilir. Böylelikle, kalite faktörü Denklem (5.21)'deki gibi tekrar ifade edilir.

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_p/C_p}}{R_{LAC}} = \frac{\sqrt{\frac{L_p}{1/(F_s^2 * L_p * 4 * \pi^2)}}}{R_{LAC}} = \frac{F_s * L_p * 2 * \pi}{R_{LAC}} \quad (5.21)$$

Buradan kalite faktörünün istenen değerde olması için birincil taraftaki rezonans endüktansının minimum ve maksimum değerleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$L_{p_min} = \frac{Q_{e_min} * R_{LAC_max}}{F_s * 2 * \pi} = \frac{0,1 * 10,57}{100000 * 2 * \pi} = 1,682 \mu H \quad (5.22)$$

$$L_{p_max} = \frac{Q_{e_max} * R_{LAC_min}}{F_s * 2 * \pi} = \frac{0,5 * 2,63}{100000 * 2 * \pi} = 2,093 \mu H \quad (5.23)$$

Aynı hesaplamalar geri yön kazanç faktörü üzerinden ikincil taraftaki endüktans için de yapılırsa aşağıdaki sonuçlar bulunur.

$$L_{s_min} = \frac{Q_{e_min} * R_{L_max} * \frac{8}{n^2 * \pi^2}}{F_s * 2 * \pi} = \frac{0,1 * 1,13}{100000 * 2 * \pi} = 0,179 \mu H \quad (5.24)$$

$$L_{s_max} = \frac{Q_{e_max} * R_{L_min} * \frac{8}{n^2 * \pi^2}}{F_s * 2 * \pi} = \frac{0,5 * 0,28}{100000 * 2 * \pi} = 0,222 \mu H \quad (5.25)$$

Endüktans değerlerinin belirlenmesinden sonra seçilmiş olan rezonans frekansını sağlamak için, kapasitans değerleri de ortaya çıkmış olur. Yapılan

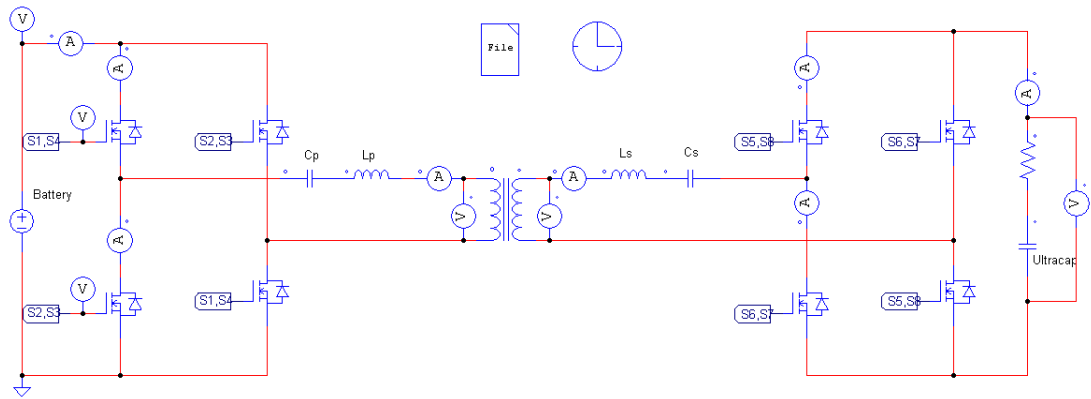
hesaplamalar neticesinde belirlenen rezonans tankı parametreleri Tablo 5.4'te sunulmuştur.

Tablo 5.4: Rezonans tankı parametreleri.

Parametre	Değer
L_p	$2 \mu H$
L_s	$0,2 \mu H$
C_p	$1,265 \mu F$
C_s	$12,65 \mu F$
L_m	$10 \mu H$

5.2.2 Benzetim Çalışmaları

Çift yönlü çift taraflı tam köprü seri rezonans dönüştürücüde, kullanılacak olan parametreler belirlendikten sonra, PSIM programı kullanılarak gerekli benzetim çalışmaları yapılmıştır. CLLC dönüştürücü PSIM benzetim devresi şeması Şekil 5.10'da verilmiştir. Devrede, matematiksel hesaplamalarda olduğu gibi, dönüştürücünün birinci tarafı bataryaya bağlı, ikinci tarafı da UC'ye bağlı olarak oluşturulmuştur. Farklı frekanslarda dönüştürücünün karakteristiği gözlemlenmiştir.



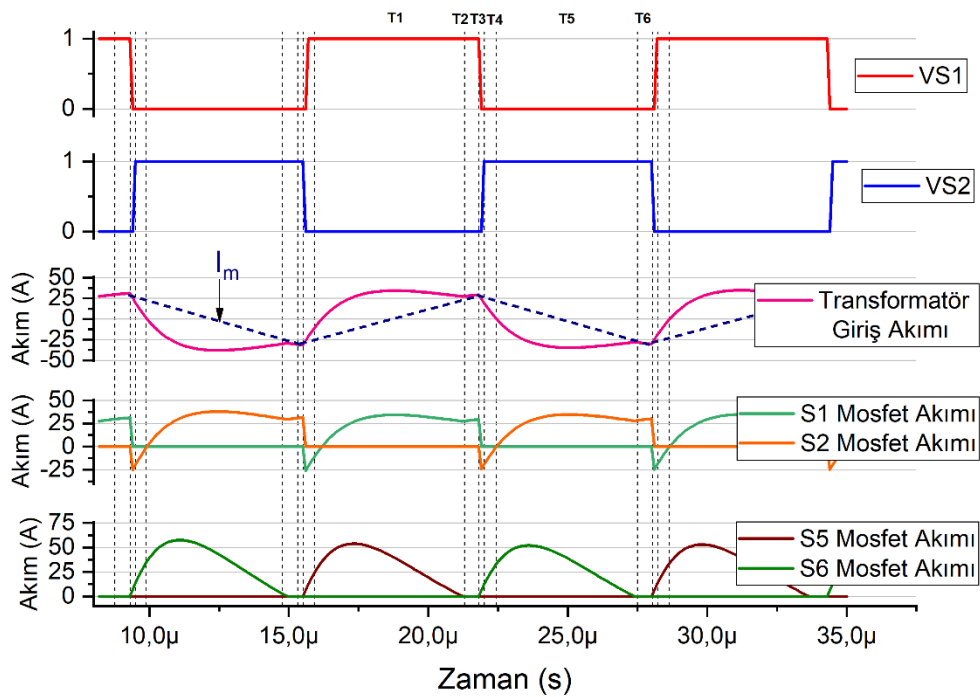
Şekil 5.10: CLLC dönüştürücü PSIM benzetim devresi.

Daha önce bahsedildiği gibi kazancı ve aktarılan gücü değiştirmek için anahtarlama elemanlarının anahtarlama frekansları değiştirilmektedir. Kapı sürme sinyallerinin doluluk oranı ise %50 olarak sabit tutulmaktadır. Diagonal Mosfetler aynı anda anahtarlanmakta, çaprazda bulunan diğer Mosfetleri anahtarlamaya geçmeden

önce bir ölü zaman bırakılmaktadır. Bu, dikey olarak aynı hizada bulunan Mosfetleri aynı anda ilettime geçirmek suretiyle kaynağın kısa devre edilmesini engellemektedir.

Dönüştürücüde, bataryadan UC'ye güç aktarılırken S1-S4 arası Mosfetler anahtarlanmakta, ikinci taraftaki S5-S8 arası Mosfetler ise anahtarlanmamaktadır. Bu durumda S5-S8 arası Mosfetlerin diyotları tam dalga doğrultucu vazifesi görmektedir. UC'den bataryaya güç aktarılırken de bahsedilenin tam tersi geçerlidir.

Dönüştürücünün çalışma esnasındaki davranışını incelemek üzere 200 ns ölü zaman kullanılarak çeşitli anahtarlama frekanslarında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Dönüştürücü rezonans frekansının altında, 80 kHz'de çalışması durumunda yapılan benzetim dalga şekilleri Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11: 80 kHz anahtarlama frekansında elde edilen dönüştürücü dalga şekilleri.

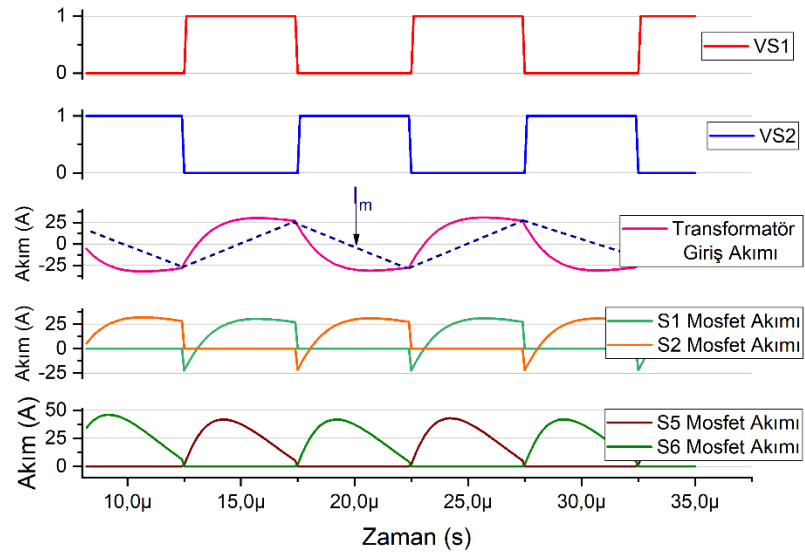
Şekil üzerinden de gösterildiği gibi çalışma esnasında 6 farklı mod oluşmaktadır. Aşağıda belirtilen zaman aralıklarında her moda dönüştürücünün davranışı açıklanmıştır.

- **T1:** Bu zaman dilimi, S1 ve S4 Mosfetlerinin gövde diyotları zaten iletimde olduğu için sıfır gerilimle ilettime geçtikleri ana denk

gelmektedir. Transformatörün birincil akımı yönünü pozitif olarak değiştirir ve güç UC tarafına aktarılır. Mıknatıslanma akımı yavaşça oluşur (I_m), ancak L_m rezonansa katılmaz. Bu çalışma modu, rezonans işlemine sona erer. Yani, transformatörün birincil sargısındaki akım ile mıknatıslanma akımı eşit olduğunda biter. Ayrıca, bu modun sonunda UC'ye güç aktarımı sona erer.

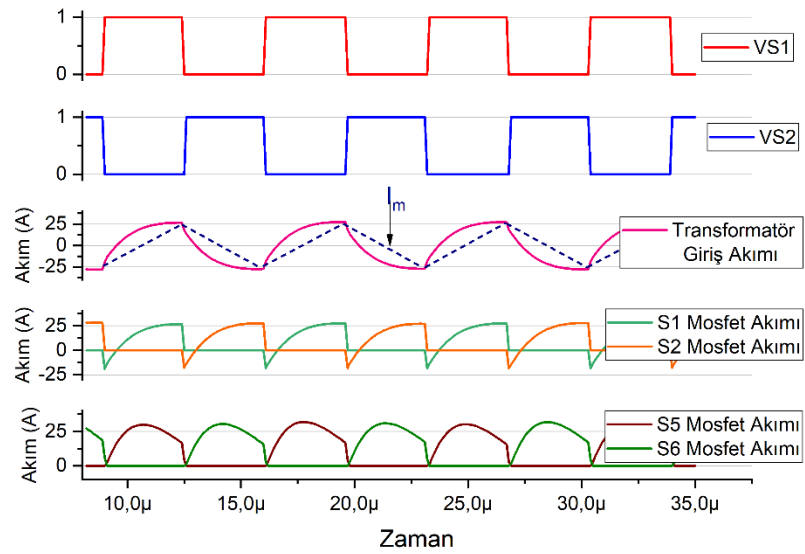
- **T2:** Bu mod transformatör birincil sargı akımının, mıknatıslanma akımını karşıladığı zaman başlar. Transformatörün ikincil akımı sıfırdır ve birincil akım mıknatıslanma akımıyla aynıdır. Mıknatıslanma endüktansı ve birincil taraftaki rezonans elemanları, Mosfet S1 kapalı hale gelene kadar rezonans oluştururlar.
- **T3:** Bu mod, ölü zaman süresidir. İkincil tarafa bir güç aktarımı olmaz. Ancak, rezonans akımı sayesinde Mosfet S1 ve S4'ün dahili kapasiteleri şarj edilir. Aynı zamanda, Mosfet S2 ve S3'ün dahili kapasiteleri boşaltılır.
- **T4:** Bu modda S2 Mosfet akımı negatife düşer. Mosfetin iletme geçmesiyle birlikte akım artmaya başlar.
- **T5:** Bu mod T1 modu ile benzerdir. Bu zaman diliminde Mosfet S2 ve S3'ün sıfır gerilim altında açık konuma geçer. Bu esnada, Mosfet S5 ve S8'in diyotları üzerinden güç UC'ye aktarılır.
- **T6:** Bu mod, birincil taraftaki sargıda rezonansın ve UC'ye güç aktarımının sonuna karşılık gelir. Ayrıca, T2'deki gibi mıknatıslama akımını içeren rezonansın başlangıcına karşılık gelir.

Aynı analizler dönüştürücünün rezonans frekansında ve üstünde çalışması durumunda da gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.12'de dönüştürücünün rezonans frekansı olan 100 kHz frekansında çalıştırıldığında elde edilen karakteristikleri göstermektedir. Şekilden de görülebildiği gibi bu frekansta yukarıda bahsedilen T2 modu gerçekleşmemektedir. Ayrıca ikinci tarafta bulunan Mosfetlerin gövde diyotlarından geçen akımlar arasında boşluk zaman bulunmamaktadır.



Şekil 5.12: 100 kHz anahtarlama frekansında (rezonans frekansı) elde edilen dönüştürücü dalga şekilleri.

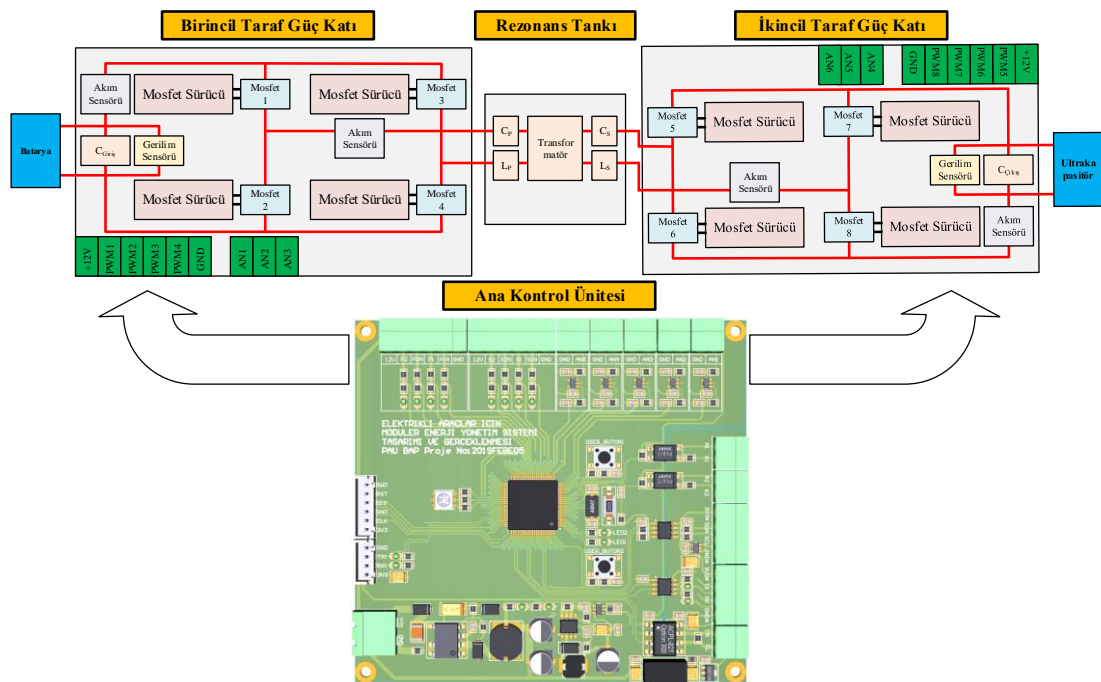
Aynı analizler dönüştürücünün rezonans frekansının üstünde çalışması durumunda da gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.13'te dönüştürücünün 140 kHz frekansında çalıştırıldığında elde edilen karakteristikleri göstermektedir. Görüldüğü gibi birincil tarafta yer alan Mosfetlerde artık sıfır gerilim anahtarlama gerçekleşmemektedir. Ayrıca ikinci tarafta yer alan Mosfetlerin gövde diyotları da akım altında kesime gitmeye zorlanmaktadır.



Şekil 5.13: 140 kHz anahtarlama frekansında elde edilen dönüştürücü dalga şekilleri.

5.2.3 Tasarım Detayları

Tasarımı ve üretimi yapılan dönüştürücünün sistemde yer alan diğer bileşenlerle entegre olarak çalışması amaçlanmıştır. Prototip bir tasarım olduğu için de mümkün olduğunca modüler şekilde yapılmıştır. Tasarlanan dönüştürücü Şekil 5.14'de gösterildiği gibi ana kontrol ünitesi, birincil taraf güç katı, ikincil taraf güç katı ve rezonans tankı olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır. Dönüştürücü temel tasarım özellikleri bu bölümde verilmiştir. CLLC dönüştürücü tasarım detayları ise EK-B'de sunulmuştur.



Şekil 5.14: Çift yönlü çift taraflı aktif tam köprü seri rezonans DC-DC dönüştürücü bölümleri.

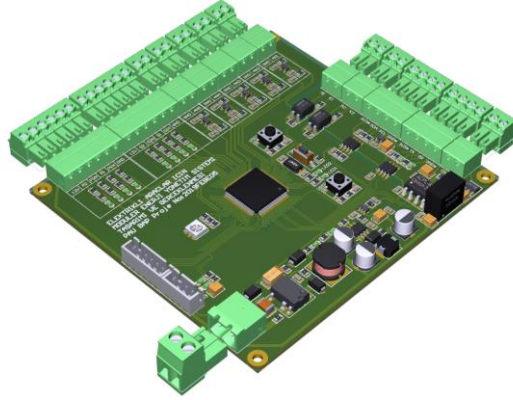
Ana kontrol ünitesinde mikrodenetleyici, iletişim entegre ve portları, bilgi ekranlarına bağlanabilecek ara yüzler, gösterge ledleri, çeşitli giriş-çıkış portları ve bu sistemlerin bataryadan beslenebilmesi için dahili bir düşüren tip dönüştürücü yer almaktadır. Birincil ve ikincil tarafta bulunan güç katı ise birbirinin aynısıdır.

Ana kontrol ünitesi, dönüştürücüde yer alan bütün birimlerin belirlenen kurallara göre kontrolünü sağlayan bir birimdir. Belirlenen algoritmaya göre kontrol ünitesi tarafından anahtarlama birimleri için anahtarlama işaretleri üretilir, oluşan akım gerilim ve sıcaklık gibi bilgiler okunur ve değerlendirilir. Ayrıca, ana kontrol

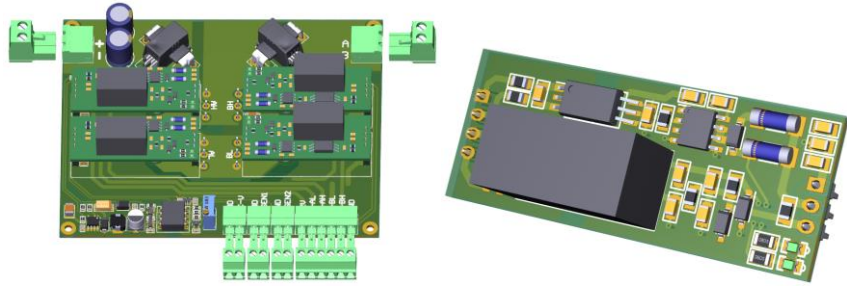
ünitesi, analog, dijital, UART, I2C veya CanBus haberleşme sistemleriyle diğer çevre birimlerle iletişim kurabilmektedir.

Tasarlanan dönüştürücünün 80-200 kHz arasında anahtarlama frekansına sahip olacağı planlanmıştır. Bunun yanı sıra, yüksek hassasiyetle akım, gerilim gibi analog verileri okuması ve değerlendirmesi gerekmektedir. Ayrıca, seçilecek olan mikrodenetleyicinin ana program döngüsünde belirtilen süreleri aşmadan çeşitli iletişim protokolleriyle de haberleşme işlemini yerine getirmelidir. Bütün bu sebeplere uygun olarak, ST firmasına ait 32 bit Cotex-M4 ARM mimarisine sahip STM32F407VGT6 mikrodenetleyicisi seçilmiştir.

Dönüştürücüye ait ana kontrol ünitesi, güç katı ve mosfet sürme kartı şematikleri EK-B’de verilmiştir. Tasarlanan bu birimlerin 3 boyutlu görünümü Şekil 5.15’te görülebilir.



a)



b)

Şekil 5.15: Dönüştürücü bölümlerinin 3 boyutlu gösterimi, a) Ana kontrol kartı, b) Güç katı Mosfet sürme kartları.

Rezonans tankında bulunan elemanların değerleri, dönüştürücünün karakteristiği açısından oldukça fazla önem arz etmektedir. Rezonans tankı diye isimlendirilen bölümde birincil ve ikincil tarafın endüktans ve kapasitansları ile transformatör bulunmaktadır. Tasarım yapılırken transformatörün kaçak endüktanslarının rezonans endüktanslarını karşılaması sağlanarak birincil ve ikincil tarafta harici endüktansların yer almaması hedeflenmiştir. Tasarımlar yapılırken matematiksel modelde hesaplanan değerlere ulaşılmaya çalışılmıştır.

Bilindiği gibi dönüştürücünün tasarımında birbirini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu sebeple, öncelikle çalışma koşullarına göre seçilmesi zorunlu olan bileşenler belirlenmiştir. Daha sonra bu parametrelere göre diğer değişkenlerin hesap edilmesi, gerekirse de başlangıca dönüp tekrar tasarım yapılması gerekmektedir.

Transformatör dönüştürme oranı belirlenirken DC-DC dönüştürücünün hem ileri yönde hem de geri yönde çalışacağı gerilimler dikkate alınarak rezonans dönüştürücüden mümkün olduğunca az frekans değişimi ile elde edilmesi gereken kazanç değerleri hesap edilir. Tablo 5.5 ve Tablo 5.6’da transformatör oranı 1,75 seçildiği durum için rezonans dönüştürücünün elde etmesi gereken kazanç değerleri ileri yön ve geri yön için sırasıyla verilmiştir.

Tablo 5.5 ve Tablo 5.6’dan da görülebildiği gibi transformatör oranı 1 olsaydı elde edilmesi gereken maksimum kazanç oranı 2,875 ve minimum kazanç oranı 0,347 olmaktadır. Transformatör oranının 1,75 seçilmesiyle bu aralık ciddi şekilde azaltılmıştır. Böylelikle, maksimum ve minimum kazanç değerleri sırasıyla 2 ve 0,571 olmuştur. Bu sebeple, transformatör dönüştürme oranının 1,75 olmasına karar verilmiştir.

Tablo 5.5: Transformatör oranı 1,75 seçildiği durum için rezonans dönüştürücünün bataryadan UC’ye güç sağlaması için (İleri Yön) elde etmesi gereken kazanç değerleri.

n=1,75	DC Bara	UC	Oran	Transformatör ile Oran
İleri Yön	70	80	1,142	2
	70	40	0,571	1
	115	80	0,695	1,217
	115	40	0,347	0,609

Tablo 5.6: Transformator oranı 1,75 seçildiği durum için rezonans dönüştürücünün UC'den bataryaya güç sağlaması için (Geri Yön) elde etmesi gereken kazanç değerleri.

n=1,75	UC	Batarya (DC Bara)	Oran	Transformator ile Oran
Geri Yön	40	115	2,875	1,642
	40	80	2	1,142
	80	115	1,437	0,821
	80	80	1	0,571

Transformatörün tasarımında önemli değişkenler olan birincil ve ikincil taraftaki akımların etkin değerleri de çıkış gücü, çıkış gerilimi ve giriş gerilimi kullanılarak yaklaşık olarak aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$I_{s_rms} = \frac{P_o}{v_o} = \frac{1500}{40} = 37.5 A \quad (5.26)$$

$$I_{p_rms} = \frac{I_{s_rms}}{n} = \frac{37.5}{1.75} = 21.43 A \quad (5.27)$$

Tam köprü rezonans dönüştürücüde, transformator bir enerji depolama elemanı olarak değil, sadece izolasyon amacıyla kullanılacaktır. Uygun bir transformator tasarımıyla istenilen değerlerde oluşturulacak kaçak endüktanslar rezonans endüktansı olarak kullanılabilir. Bunun için transformatörün birincil ve ikincil sargıları arasındaki kuplajın bilinçli olarak bir miktar kötü yapılması ya da hava aralıklı nüve tercih edilmesiyle kaçak endüktanslar artırılabilir. Ancak kaçak endüktansın miktarının tasarım esnasında belirlenmesi çok kolay olmamaktadır.

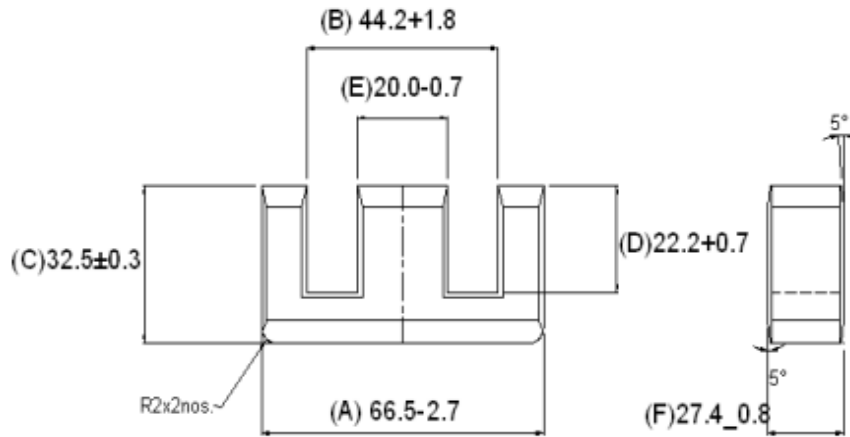
Transformatörde enerji depolanmayacağı için Ferrit nüve malzemesi bu amaç için uygundur (Polat 2015). Ferrit nüvenin seçiminde de çalışma frekans aralığına dikkat etmek gerekir. Bu çalışmada kullanılacak olan 0.5-300 kHz frekans bandında çalışabilecek nüveler içerisinde Cosmo Ferrites Ltd. firmasının C139 tipi nüve malzemesine sahip bir nüve tercih edilmiştir. Cosmo Ferrites Ltd. firmasının C139 tipi ferrit nüve malzemesinin önemli özellikleri Tablo 5.7'de gösterilmiştir.

Şekil 5.16'da fiziksel boyutları verilen Cosmo Ferrites Ltd. firmasının EE6527 kodlu E şeklindeki ferrit nüvesi bu değerleri sağlamaktadır (Cosmo Ferrites Limited Inc. 2019). Transformatörün belirtilen nüvenin iki tanesinin karşılıklı olarak

birleştirilmesiyle oluşturulmasına karar verilmiştir. Belirtilen nüvenin hava aralıksız, 1,5 mm ve 4,25 mm hava aralıklı versiyonları bulunmaktadır. Tasarım yapılırken kaçak endüktansın fazla olması ve endüktans değeri olarak da 10 μ H gibi küçük bir değer istendiği için A_L değeri küçük olan 4,25 mm hava aralıklı olan nüve ve hava aralıksız nüve birlikte tercih edilmiştir.

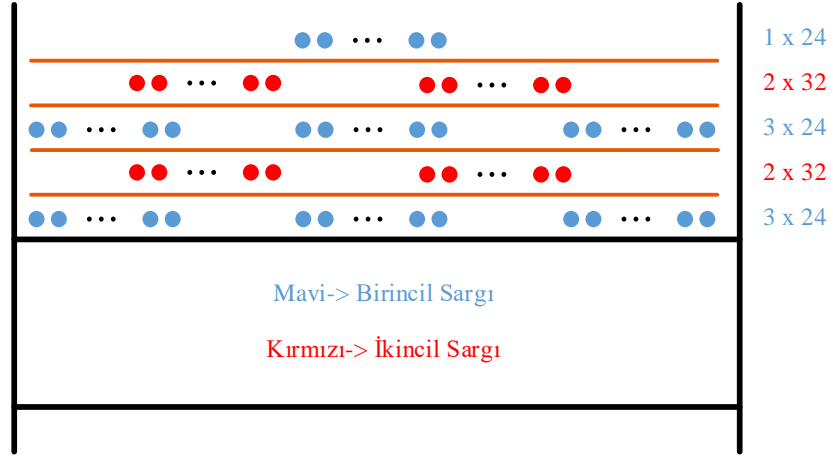
Tablo 5.7: Cosmo Ferrites Ltd. firmasının C139 tipi nüvesinin özellikleri.

Özellik	Değer
Akı Yoğunluğu (mT)	390
Optimum Frekans Aralığı (kHz)	300 khz'e kadar
Nüve Kayıpları (100 kHz – kW/m ³)	<380
Nüve Şekilleri	EP, E, EC



Şekil 5.16: Cosmo Ferrites Ltd. firmasının EE6527 kodlu E şeklindeki ferrit nüve fiziksel ölçüleri.

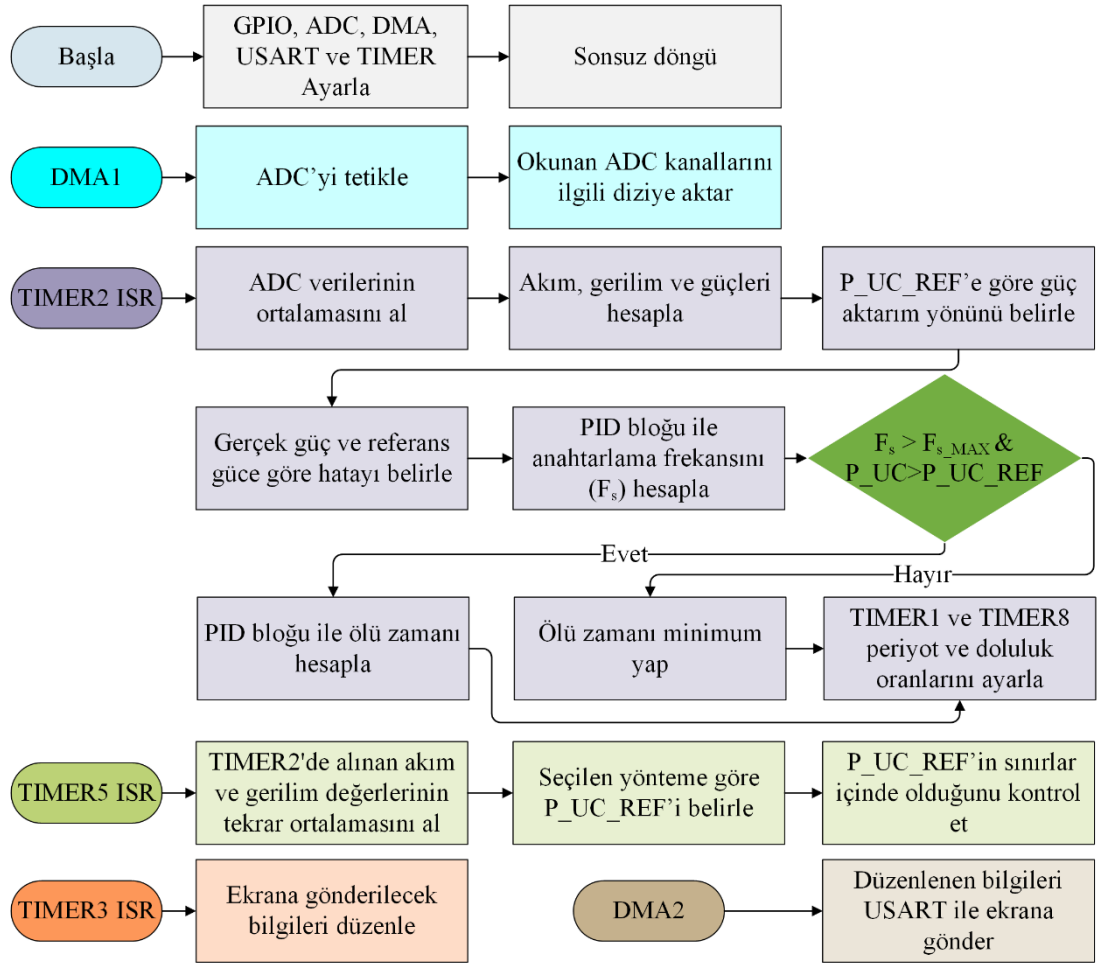
Transformatörde gerekli olan birincil ve ikincil taraf sarım sayıları sırasıyla 7 ve 4 olarak bulunmuştur. Sargılar çalışacakları frekans değerine uygun olarak 0.5 mm çapında iletken kullanılarak oluşturulmuştur. Üzerinden geçecek akım değerlerine göre birincil tarafta 24 adet, ikincil tarafta da 32 adet tel paralel kullanılarak sargılar oluşturulmuştur. Birincil ve ikincil taraf sargıları Şekil 5.17’de gösterilen yapıdaki gibi birbiri üstüne gelecek şekilde planlanmış ve uygulanmıştır.



Şekil 5.17: Transformator sarım düzeni.

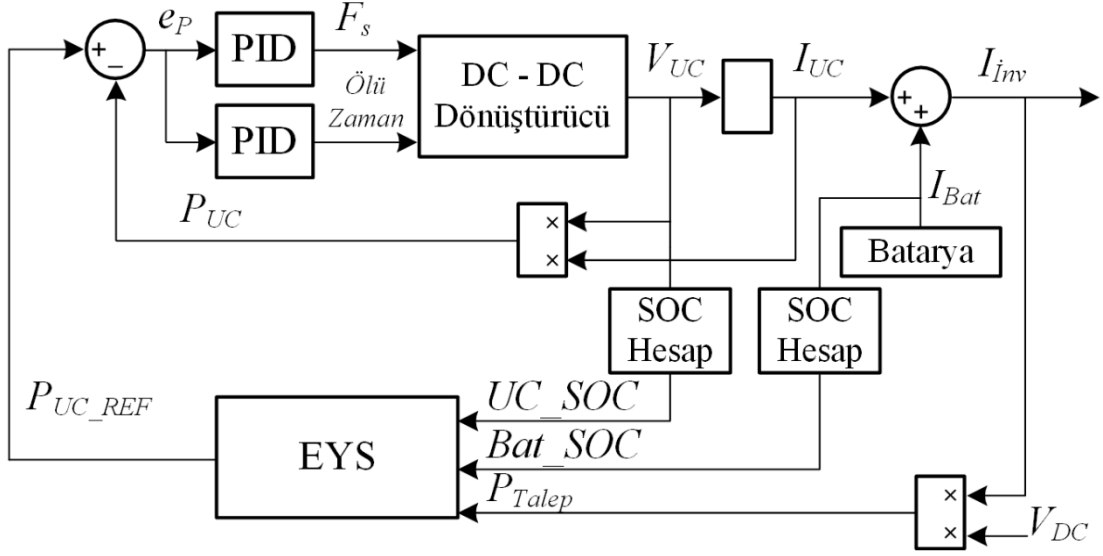
5.2.4 Kontrol Yöntemi

Tasarlanan dönüştürücünün kontrol algoritması planlanan algoritma akışı Şekil 5.18'den görülebilir. Algoritmaya göre dönüştürücü hangi yönde ve ne kadar bir güç aktarımı yapacağı bilgisini TIMER5 içerisinde hesaplanan P_{UC_REF} 'ten almaktadır. P_{UC_REF} ise okunan motor sürücü akımı ve DC bara gerilimi değerlerine göre hesaplanan P_{Talep} 'e ve depolama birimlerinin SOC değerlerine göre EYS tarafından belirlenmektedir. P_{UC_REF} kadar güç aktarabilmek için gerekli olan anahtarlama frekansı, ilgili zamanda okunan güç bilgisine ve referans güce göre PID bloğu vasıtasıyla hesaplanmaktadır. Anahtarlama frekansının üst sınıra ulaştığı ve istenenden fazla güç aktarıldığında ise başka bir PID bloğu ile ölü zaman miktarı artırılarak PWM doluluk oranı değiştirilmektedir. Gerilim ve akım okuma işlemleri ADC'den DMA (Doğrudan Hafıza Erişimi - Direct Memory Access) kullanılarak program akışını etkilemeden sürekli olarak belirlenen değişkenlerin adreslerine yazmak suretiyle gerçekleştirilmektedir. PID işleminin gerçekleştiği TIMER2 zamanlayıcısının periyodu 200 μ s'dir. Dolayısıyla bu bloğa belirlenen kurallara göre referans üreten TIMER5'in periyodunun bundan daha fazla olması gerekmektedir. Algoritmada bu değer 30 ms olarak ayarlanmıştır. Dönüştürücünün çalışması anındaki tüm değişimleri görmek için önemli parametreler TIMER3 zamanlayıcısı içerisinde 100 ms'de bir USART ile sisteme bağlanan ekrana gönderilmektedir.



Şekil 5.18: Dönüştürücü kontrol algoritması.

Dönüştürücünün PID kontrol bloğu Şekil 5.19'da görüldüğü gibidir. Burada görülebildiği gibi EYS tarafından UC_SOC , Bat_SOC ve P_Talep 'e göre P_UC_REF hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değer ile UC'nin o anda okunan akım ve gerilimlerinden hesaplanan güç değeri farkı alınmakta ve PID bloklarına girecek hata değeri bulunmaktadır. Birinci PID bloğundan DC-DC dönüştürücü için anahtarlama frekansı çıkmaktadır. İkinci PID bloğundan ise aynı kolda yer alan mosfetler arasında bırakılan ölü zaman belirlenmektedir. UC'ye güç aktarımı için TIMER1, UC'den güç aktarımı için ise TIMER8 PWM çıkışları belirlenen frekansa uygun olarak anahtarlanmaktadır.



Şekil 5.19: DC-DC dönüştürücü PID kontrol şeması.

5.2.5 Dönüştürücünün İmalatı ve Test Edilmesi

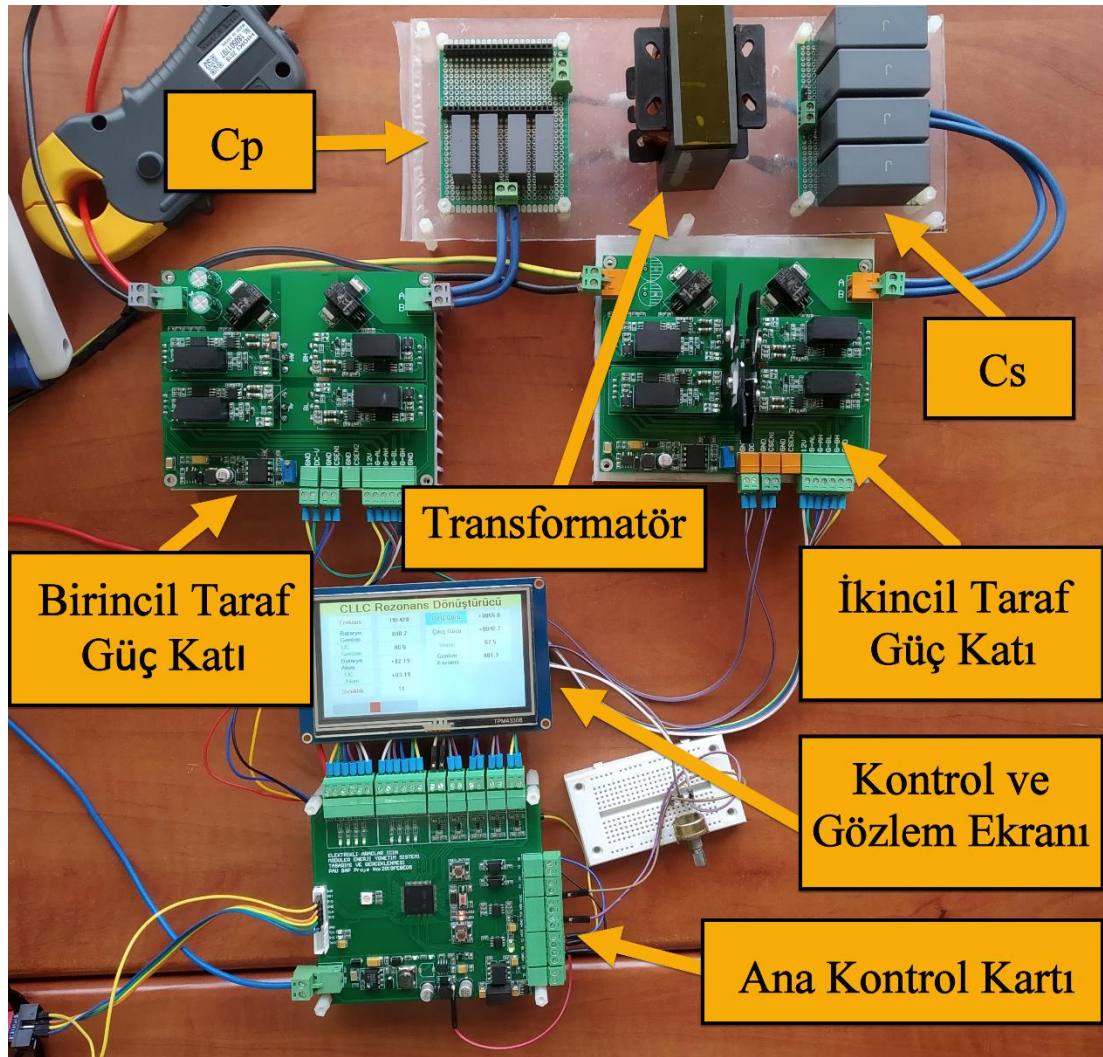
Gerçekleştirilen tasarımlar neticesinde yapılan matematiksel hesaplamalara en yakın devre parametreleri elde edilmeye çalışılmıştır. Kullanılan malzemelerin özelliklerine ve oluşturulan devrenin yapısına göre tam olarak aynı değerlerde üretim gerçekleştirmek mümkün olmamaktadır. Gerçekleştirilen dönüştürücüde ölçülen devre parametreleri Tablo 5.8’de sunulmuştur.

Tablo 5.8: Üretimi gerçekleştirilen dönüştürücünün ölçülen rezonans tankı parametreleri.

Parametre	Değer
L_p	2,3 μH
L_s	0,2 μH
C_p	1,32 μF
C_s	13,2 μF
L_m	11,4 μH

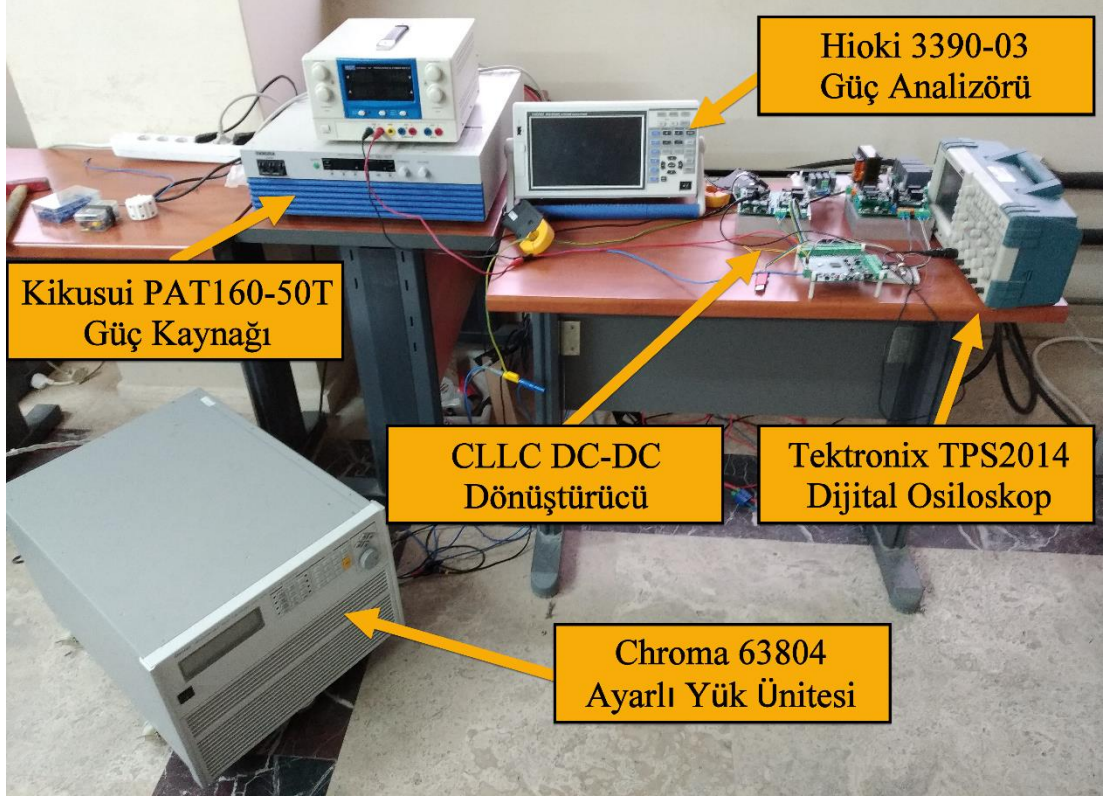
Gerçekleştirilen tasarımlar sonucunda üretilen prototip dönüştürücü Şekil 5.20’de gösterilmektedir. Şekilden görülebildiği gibi birincil ve ikincil taraf güç katı ayrı ayrı yer almaktadır. Rezonans tankı da tasarım esnasında kolay değişiklik yapılabilmesi için yine modüler olarak tasarlanmıştır. Ana kontrol ünitesine ise tasarlanan dönüştürücü ile ilgili bilgileri gözlemleyebilmek ve gerektiğinde

dönüştürücüyü kontrol edebilmek için bir TFT ekran bağlanmıştır. TFT ekran ana kontrol kartı ile USART haberleşme protokolünü kullanarak haberleşmektedir.



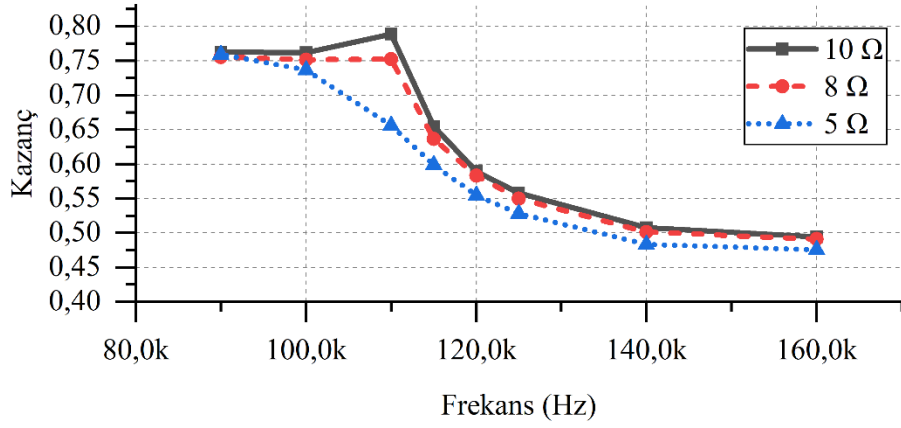
Şekil 5.20: İmal edilen dönüştürücü ve bölümleri.

Dönüştürücünün testlerinde Şekil 5.21’de gösterilen test düzeneği kullanılmıştır. Denemeler öncelikle ayarlı gerilim kaynağıyla (Kikusui PAT160-50T) ve kontrollü yük ünitesi (Chroma 63804) ile gerçekleştirilmiştir. Testlerin gerçekleştirilmesinde ölçümler güç analizörü (Hioki 3390-03) ile yapılmıştır. Sistemin sorunsuz çalıştığı anlaşıldıktan sonra ileri ve geri yön güç aktarımı testlerinde 72 V ve 24 V nominal gerilime sahip batarya üniteleri kullanılmıştır.

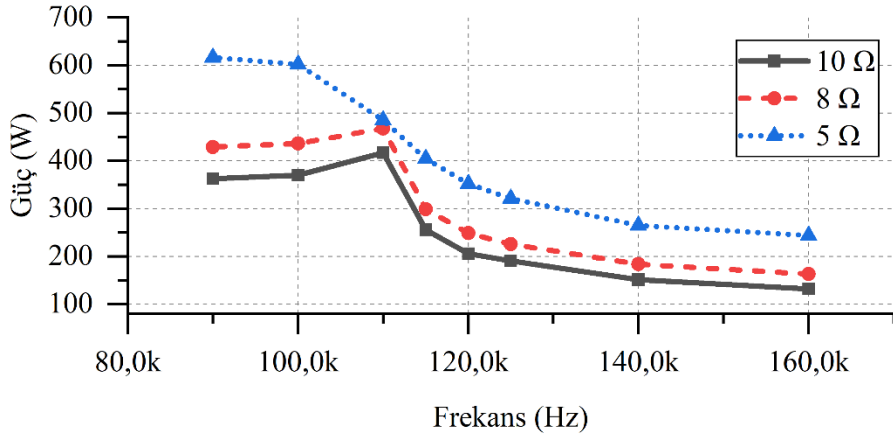


Şekil 5.21: Dönüştürücü test düzeneği.

Tasarlanan dönüştürücünün 72 V bataryadan yüke doğru ileri yönde güç aktarırken kazanç değerleri Şekil 5.22’de gösterilmiştir. Şekilden görülebildiği gibi anahtarlama frekansının farklı değerlerinde farklı gerilim kazancı değerleri elde edilmiştir. Rezonans frekansında elde edilmesi gereken 1/1,75 kazanç oranının da yaklaşık olarak 124 kHz değerinde elde edildiği görülebilmektedir. Bu çalışma karakteristiği ile anahtarlama frekansını değiştirerek yüke aktarılan gücü istenildiği şekilde değiştirmek mümkündür. Belirtilen kazanç değerlerinin elde edildiği durumda yüke aktarılan güç değerleri de Şekil 5.23’te gösterilmiştir.

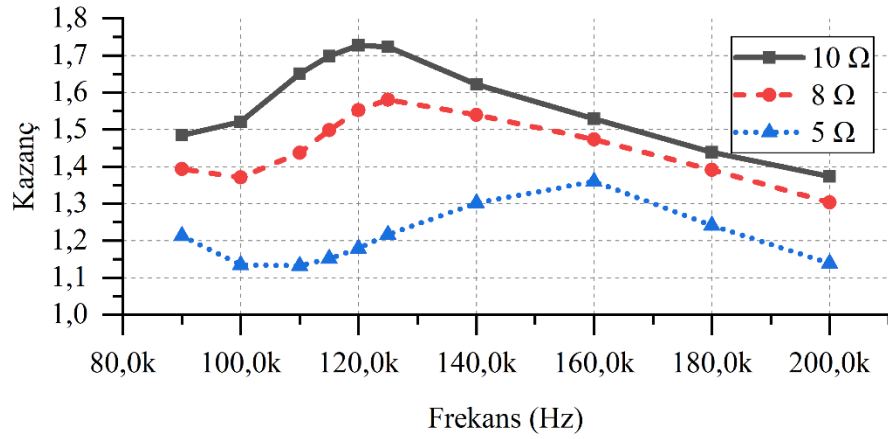


Şekil 5.22: Dönüştürücü ileri yön güç aktarımında elde edilen gerilim kazanç değerleri.

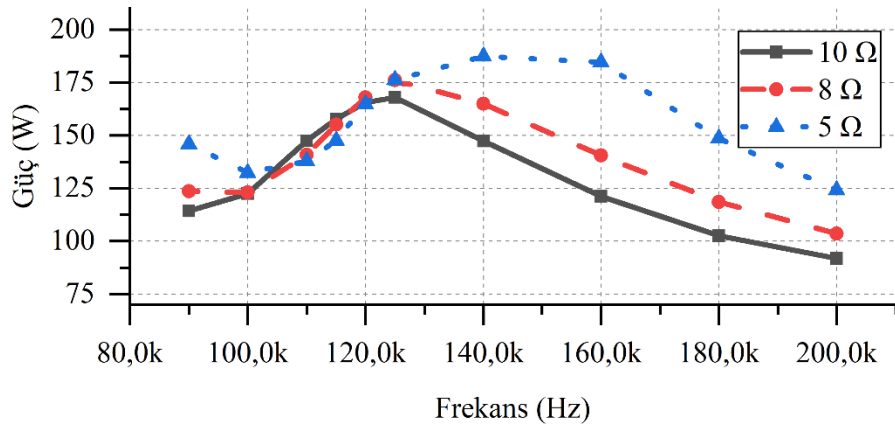


Şekil 5.23: Dönüştürücü ileri yön güç aktarımında elde edilen çıkış gücü değerleri.

Dönüştürücü UC'den bataryaya güç aktarırken gerçekleşen kazanç ve güç aktarımı değerlerini gözlemlemek için ileri yön güç aktarımına benzer deneyler gerçekleştirilmiştir. Geri yön güç aktarımında meydana gelen kazanç değişimi grafiği Şekil 5.24'te gösterilmiştir. Belirtilen kazanç değerlerinin elde edildiği durumda yüke aktarılan güç değerleri de Şekil 5.25'te yer almaktadır. Kazanç değişimi grafiği incelenirse geri yön rezonans frekansının yaklaşık 160 kHz olduğu görülebilir.

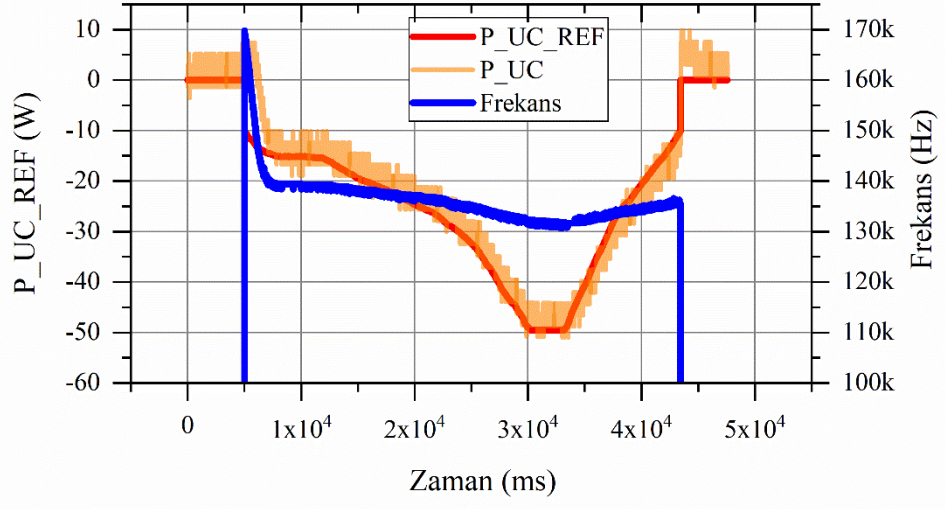


Şekil 5.24: Dönüştürücü geri yön güç aktarımında elde edilen gerilim kazancı değerleri.



Şekil 5.25: Dönüştürücü geri yön güç aktarımında elde edilen çıkış gücü değerleri.

Dönüştürücünün rezistif yüke her iki yönde de güç aktarım karakteristiği incelendikten sonra birincil tarafa batarya, ikincil tarafa da UC bağlanarak iki birim arasındaki güç aktarımı incelenmiştir. Şekil 5.26'da ileri güç aktarımında UC'nin şarj olduğu durumda verilen güç referansını geliştirilen kontrol yönteminin takibi gösterilmiştir. Deneme esnasında -10 W üzerinde bir referans olması durumunda dönüştürücünün devreye girmesi ayarlanmıştır. Normal çalışma esnasında da buna benzer şekilde 0 W'a yakın değerlerde aktarım yönü değişimi olacağı için belirli bir aralıkta dönüştürücü kapatılmaktadır. Şekilden görülebildiği gibi dönüştürücü devreye girdiği anda anahtarlama frekansı, maksimum frekans olarak ayarlanan 170 kHz değerinden hızlı bir şekilde istenilen güç referansının yakalandığı 130 kHz seviyelerine düşmektedir. Referansın tekrar 0'a doğru gittiği bölümde de anahtarlama frekansı beklendiği şekilde yavaş yavaş artmıştır.

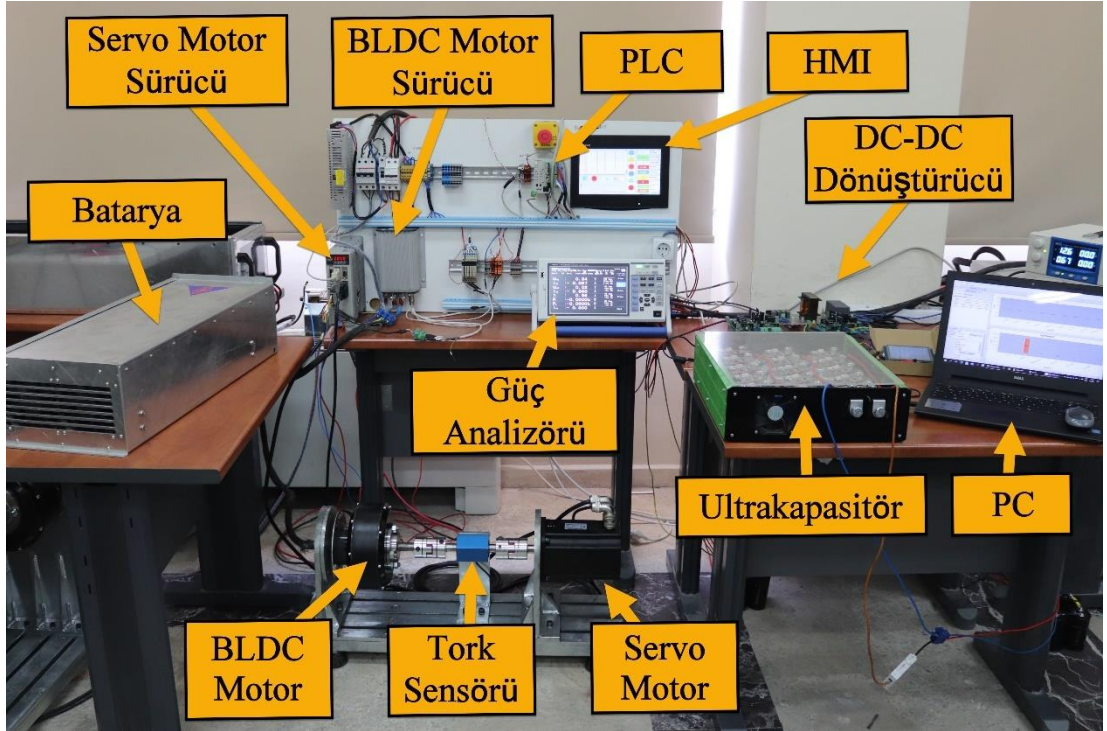


Şekil 5.26: Dönüştürücü bataryadan UC'ye güç aktarımında verilen referansı takip karakteristiği.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

6.1 EYS Test Düzenegi

EYS çalışmalarının test edilmesi, performansının incelenmesi ve sonuçların doğru değerlendirilmesi aynı şartlar altında gerçekleştirilecek testlerle mümkündür. Araç üzerinde gerçekleştirilen ölçümleri etkileyecek çok sayıda bileşen ve çevre koşulları vardır. Bu sebeple araç üzerindeki ölçümlerin zorluğu ve tekrarlanabilirliğinin düşük olması sebebiyle, geliştirilen algoritmalar öncelikle aracı yansıtan bir test düzenegi ile sınanmıştır. Bunun için araç özelliklerini yansıtacak ve standart sürüş profillerinin uygulanabileceği bir deney düzenegine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, çeşitli kontrol ve ölçü birimlerini içeren bir test düzenegi tasarlanmıştır (Kesler ve diğ. 2021). Tez çalışmasında EYS algoritmalarının test edilmesi için oluşturulan bu deney düzenegi Şekil 6.1’de gösterilmiştir.

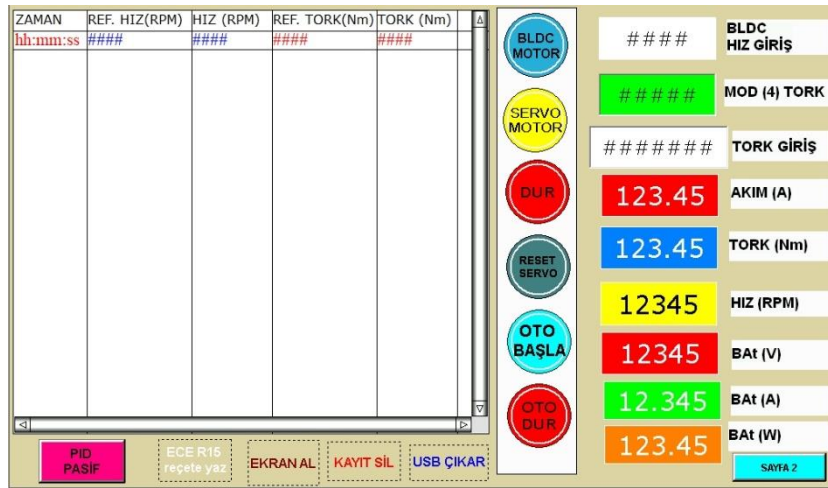


Şekil 6.1: EYS test deney düzenegi.

Deney düzeneginde araçta yer alan batarya, UC, motor ve motor sürücüleri yer almaktadır. Bu bileşenlerin yanında aracın davranışını yansıtarak motor miline pozitif ve negatif tork uygulayabilecek servo motor (Kinco SMH 60S-0020-30ABK) ve bu

motorun sürücüsü (Kinco FD622) de yer almaktadır. Ayrıca sürüş profili ile ilgili bilgileri barındıran ve deneyin kontrolünü sağlayacak olan PLC (Programlanabilir Mantık Denetleyici) (Delta DVP-SX2) ile bu bileşenlere parametre girilmesi ve meydana gelen değişikliklerin izlenip kaydedilebildiği HMI (Human Machine Interface) (Delta DOP-B10S615) bulunmaktadır. Sistemde yer alan güç analizörü (HIOKI PW3390) ile de yüksek hassasiyetli akım, gerilim ve güç ölçülerek EYS ile sağlanan faydanın net şekilde tespiti yapılabilmektedir.

Gerçekleştirilen test çalışmaları kapsamında tasarlanan HMI kayıt sayfası Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Sistemde otomatik test senaryosunun haricinde manuel olarak BLDC motorun ya da servo motorun çalıştırılabileceği menüler de yer almaktadır.

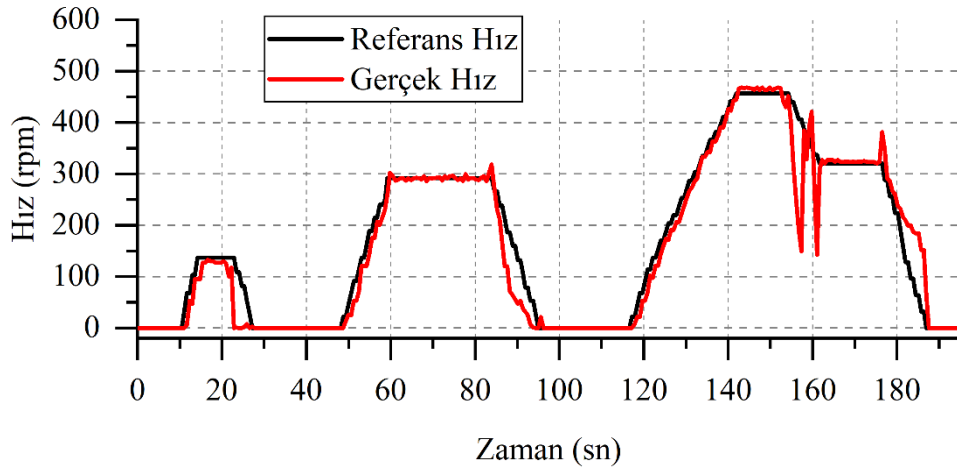


Şekil 6.2: HMI gözlem ve kayıt sayfası.

BLDC motor sürücüsünde hız, tork ve ortak mod olmak üzere üç mod bulunmaktadır. Bu deney düzeneğinde ise BLDC motorun sürüş profiline göre belirlenen hızlarda hareket etmesi istendiği için, BLDC motor sürücü hız modunda kullanılmıştır. Servo motor ise tork modunda kontrol edilmektedir. İstenildiği takdirde belirlenen PID parametreleri kullanılarak tork kontrolü yapılabildiği gibi PID kullanmadan da servo motor kullanılabilir.

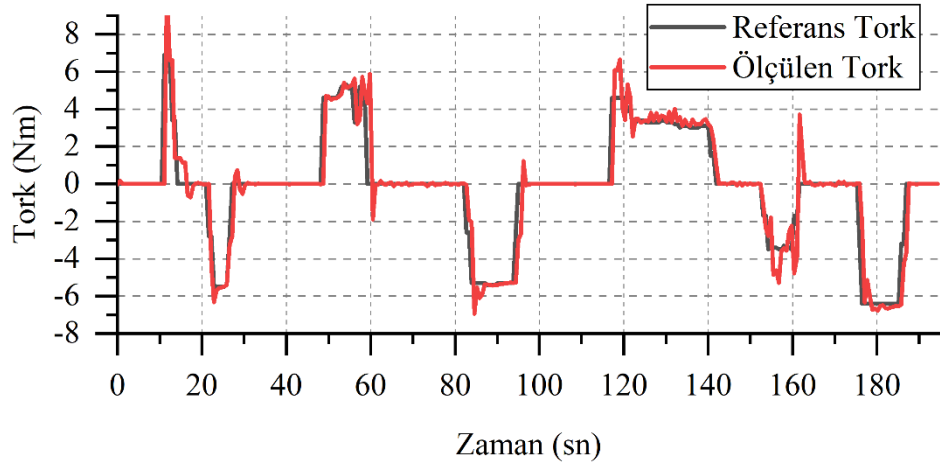
Deney düzeneğinde şehir içi hafif araçların sürüşünü yansıtan ECE sürüş profili kullanılarak testler yapılmıştır. İstenildiği takdirde herhangi bir sürüş profili de tanımlanıp kullanılabilir. Şekil 6.3’te istenilen sürüş profili hız değerlerine karşılık, BLDC motorun bu hız referansını nasıl takip ettiği gösterilmiştir. Görülebildiği gibi BLDC motor milindeki servo motorun araç gibi davranarak yük oluşturmasına rağmen

istenilen hızları takip edebilmektedir. BLDC motor, referans hızı yeterli doğrulukta takip etmesine rağmen aralarında bir miktar farklar oluşabilmektedir. Arada meydana gelen farkların çeşitli sebepleri bulunmaktadır. Sadece hızın azaldığı, yani rejeneratif frenlemenin bulunduğu bölgelerde sürüş profilini tam olarak takip edilememesinin temel sebebi; kullanılan motor sürücüsünün rejeneratif frenleme miktarını hassas bir şekilde ayarlama kabiliyetinin olmamasıdır. Ayrıca, BLDC motor sürücüsünün analog gerilimle kontrol edilmesi nedeniyle, gerilim dalgalanmalarında arzu edilen referansa ulaşamamaktadır. Bunlara ek olarak, BLDC motorun miline bağlı olan servo motorun yük oluşturarak hızlanma/yavaşlamaya sebep olması ve kontrol döngüsünde yer alan birimlerde meydana gelen gecikmeler, referans ve gerçek hız arasında fark oluşturmaktadır.



Şekil 6.3: Deney düzeneği ile ECE sürüş profili için elde edilen referans hız - gerçek hız değerleri.

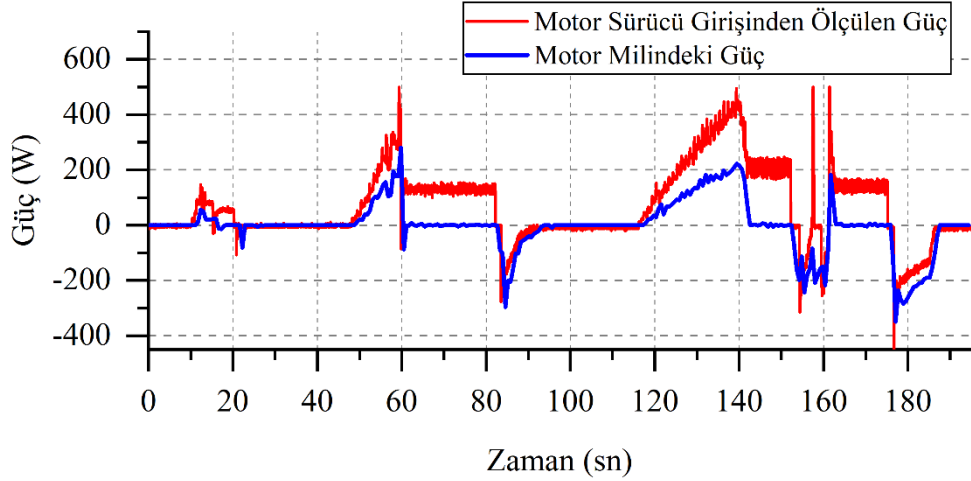
Araca servo motor ile uygulanan tork değerleri, araç parametrelerine göre sürüş profili boyunca hesap edilen torka göre uygulanmaktadır. Sürüş profili tork değerinin hesaplanmasından sonra bu değer PID kontrol bloğuna referans giriş olarak kullanılmaktadır. PID bloğu ile milde meydana gelen torkun, referans torku mümkün olduğunca hızlı yakalamasına çalışılmaktadır. Sürüş profili esnasında hesap edilen referans ve buna karşı milde oluşan tork değerleri Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Mildeki tork değerleri tork sensörü ile ölçülerek kaydedilmiştir.



Şekil 6.4: Deney düzeneği ile ECE sürüş profili için elde edilen referans tork ve ölçülen tork.

6.2 Sadece Batarya Olması Durumu

Tasarlanan test ünitesinde, öncelikle gerçekleştirilen EYS çalışmalarına temel teşkil etmesi amacıyla sadece batarya bulunması durumu ele alınmıştır. Bu durumda, ECE sürüş profili boyunca gerçekleşen hız, tork ve güç değişimleri incelenmiştir. Test esnasında meydana gelen hız ve tork değişimleri sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Şekil 6.5'te sürüş profili boyunca bataryanın sağladığı ve depoladığı güç değerindeki değişim gösterilmiştir. Güç ölçümü ve hesabı iki şekilde yapılmıştır. Birincisi, motor sürücüsünün girişinde yer alan akım ve gerilim sensörleri kullanarak ölçülmüştür. İkinci yöntem olarak ise motor milinden ölçülen hız ve tork değerlerine göre mile aktarılan güç hesaplanmıştır. Şekilden görülebildiği gibi aracın hızlandığı bölümlerde bataryadan enerji çekildiği, yavaşladığı bölümlerde ise bataryanın tekrar şarj edildiği görülmektedir. Şekilde negatif güç değerleri batarya kapasitesinin arttığını, pozitif güç değerleri ise batarya doluluk oranının azaldığını ifade etmektedir. Şekilden görülebildiği gibi gücün pozitif olduğu bölümlerde motor sürücü girişinden ölçülen güç, motor milindeki güçten büyük olmaktadır. Aynı şekilde gücün negatif olduğu bölümlerde ise bu durumun tersi gerçekleşmektedir. Bunun sebebi de ölçülen iki güç arasındaki bölümde motor ve motor sürücüde meydana gelen kayıplar olduğu açıktır.



Şekil 6.5: Motor sürücü girişinden ve motor milinden ölçülen güç karşılaştırılması.

Bu çalışmada, batarya ve UC'ye depolanan ve bu birimlerden kullanılan enerji miktarı önemli olduğu için motor sürücü girişinden ölçülen güç referans alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Ölçülen güç değerine göre sürüş profili başlangıcından sonuna kadar batarya enerjisinde 13828 W.sn azalma meydana gelmiştir. Yani 3,84 Wh azalma ile batarya kapasitesi %0,095 azalmıştır.

6.3 Kural Tabanlı EYS Uygulaması

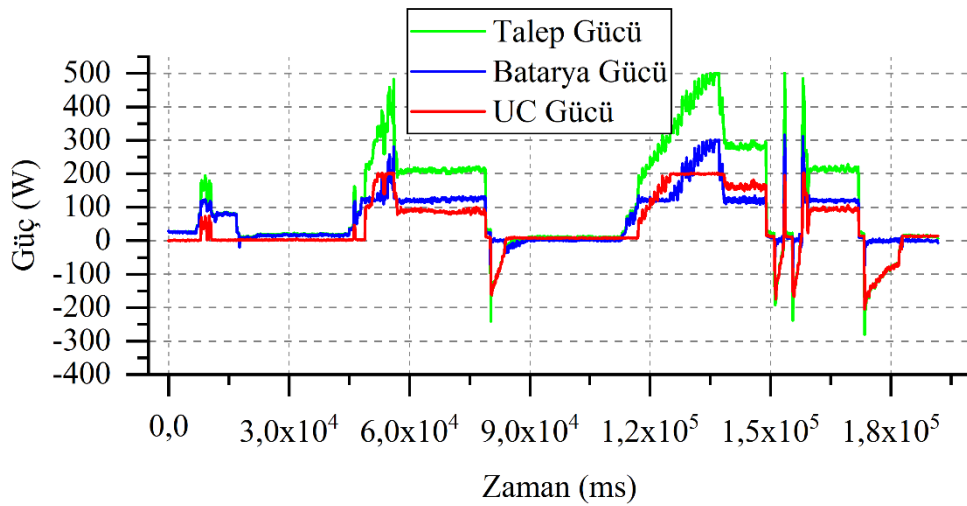
Geliştirilen test düzeneği üzerinde sadece batarya durumunda ilgili veriler alındıktan sonra sisteme UC ve tasarlanan DC-DC dönüştürücü dahil edilmiştir. Sistem topolojisi Bölüm 2.4'te de açıklandığı gibi batarya doğrudan UC dönüştürücü üzerinden olacak şekilde düzenlenmiştir. Dolayısıyla, DC bara gerilimi batarya gerilimiyle aynı olmaktadır.

UC'nin depolayacağı ya da sağlayacağı güç değeri, Bölüm 5.2.4'te açıklandığı gibi UC SOC değeri, batarya SOC değeri, motor sürücü akımı ve DC bara gerilimine göre belirlenmektedir. EYS işleyişi için kurallar ise Bölüm 4.1.1'de yer aldığı şekliyle uygulanmıştır. Sadece test düzeneğinin sınırları sebebiyle kurallarda yer alan değerler Tablo 6.1'deki gibi düzenlenmiştir.

Tablo 6.1: Kural tabanlı EYS güç tanımlamaları.

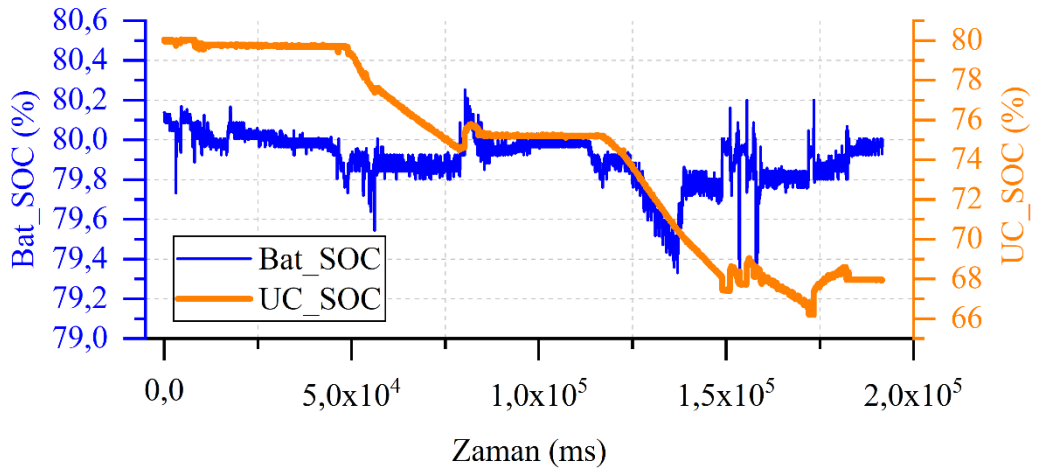
Özellik	Değer (W)
P_{Min}	120
P_{Chg}	-20
P_{UC_REF}	$-200 < P_{UC_REF} < 200$

ECE sürüş profili boyunca talep edilen, batarya ve UC gücü değerleri Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Şekilden görülebildiği gibi talep gücü batarya ve UC arasında belirlenen kurallara göre paylaştırılmaktadır. Sadece batarya bulunması durumuna göre değerlendirildiğinde, batarya gücündeki dalgalanma azalmaktadır. Sürüş profili sonunda batarya enerjisinde 12905 W.sn, UC enerjisinde ise 8976 W.sn'lik azalma meydana gelmiştir. Yani, 3,58 Wh azalma ile batarya kapasitesi %0,088, 2,49 Wh azalma ile UC kapasitesi %12,6 azalmıştır.



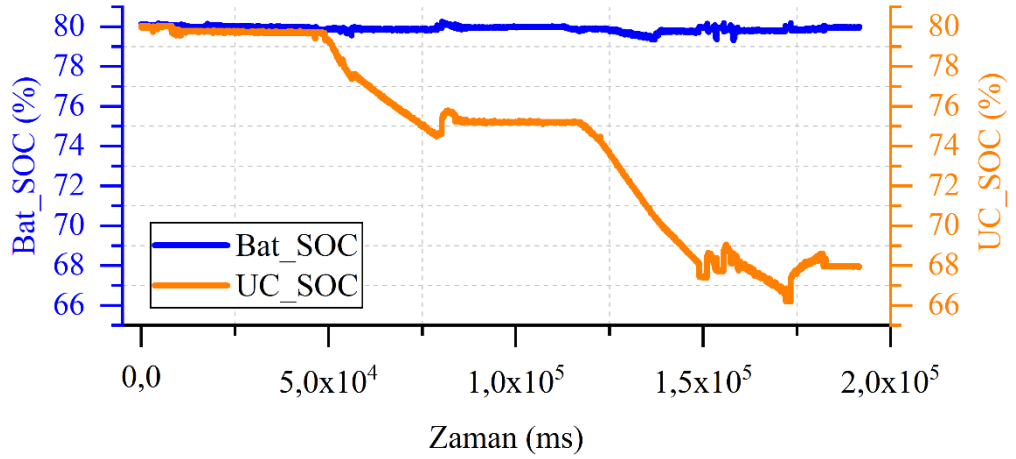
Şekil 6.6: Kural tabanlı EYS güç paylaşım grafiği.

Şekil 6.6'da negatif güç değerleri depolama birimi kapasitelerinin arttığını, pozitif güç değerleri ise azaldığını ifade etmektedir. Bu durumda batarya ve UC'nin SOC değeri değişimi de Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Batarya kapasitesindeki %0,088 ve UC kapasitesindeki %12,6 azalma Şekil 6.7'den de sürüş profili sonundaki değerlerine bakılarak görülebilmektedir. Şekilden bataryanın ve UC'in şarj olduğu bölümlerdeki kapasite artışı görülebilmektedir. ECE sürüş profilinin 195 sn gibi kısa bir süre sürmesi sebebiyle batarya kapasitesinde ciddi bir düşüş meydana gelmemiştir.



Şekil 6.7: Kural tabanlı EYS ile UC SOC değişimi.

Şekil 6.7 incelendiğinde batarya kapasitesindeki değişimin dalgalanmasının çok olduğu düşünülebilir. Ancak değişim çok küçük bir aralıkta kaldığı için şekilde böyle görünmektedir. Eksen sınırları UC ile aynı yapıldığında Şekil 6.8'deki gibi batarya kapasitesinin sürüş profili boyunca çok ciddi değişikliklere uğramayarak profil sonunda oldukça az bir miktarda azaldığı görülebilir.

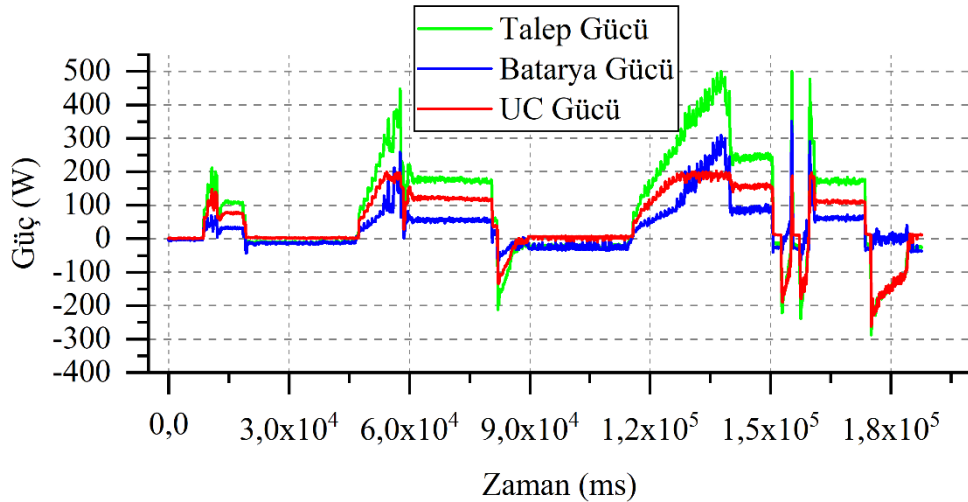


Şekil 6.8: Kural tabanlı EYS ile UC SOC değişimi (geniş eksen sınırları ile).

6.4 Jaya Tabanlı EYS Uygulaması

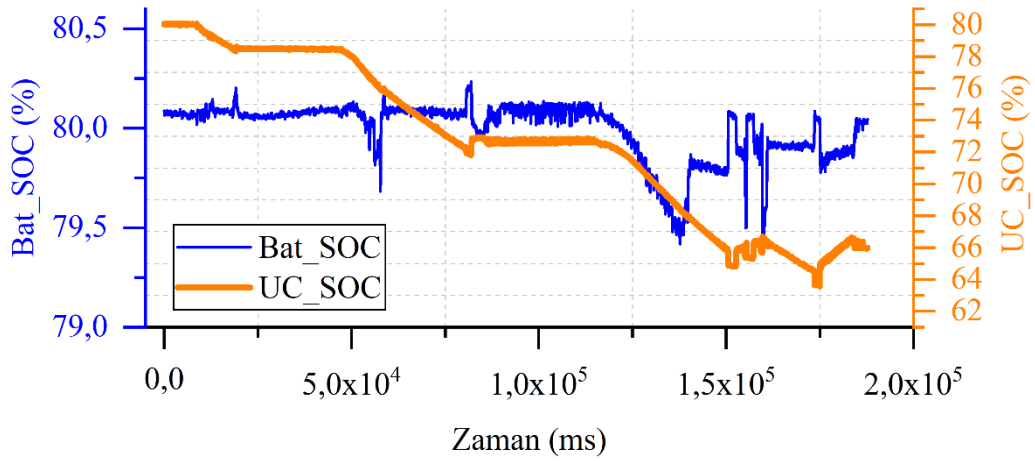
Batarya ve UC beslemeli elektrikli araç için tez kapsamında önerilen Jaya tabanlı EYS, tasarlanan deney düzeneği ile test edilmiştir. Yöntemin uygulanmasında popülasyon büyüklüğü 30 ve maksimum adım sayısı 20 olarak belirlenmiştir. Böylelikle güç paylaşım kararı algoritma tarafından 30 ms içerisinde diğer işlemler devam ederken belirlenebilmektedir. Dolayısıyla gerçek zamanlı uygulanabilir bir EYS elde edilmiştir. Diğer işlem süreleri ve gerçekleştirilen işlemler de Bölüm 5.2.4'te sunulduğu gibi gerçekleşmektedir. Dönüştürücüde istenilen güç referansına ulaşabilmek için anahtarlama frekansı kontrolünün yanı sıra ölü zaman kontrolü kullanılarak PWM doluluk oranı da değiştirilmektedir.

ECE sürüş profili boyunca elde edilen talep, batarya ve UC gücü değerleri Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi talep gücü Jaya tabanlı EYS tarafından batarya ve UC arasında paylaştırılmaktadır. Sürüş profili sonunda batarya enerjisinde 6304 W.sn, UC enerjisinde ise 10238 W.sn azalma meydana gelmiştir. Yani 1,75 Wh azalma ile batarya kapasitesi %0,04, 2,84 Wh azalma ile UC kapasitesi %14,4 azalmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Jaya tabanlı EYS'nin kural tabanlı EYS'ye göre UC'nin daha fazla kullanılmasını sağladığı söylenebilir. Aynı zamanda batarya ve UC'nin kapasitelerindeki azalmanın toplamının kural tabanlı EYS'ye göre daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu yöntem sadece batarya bulunması durumuyla karşılaştırıldığında, batarya gücündeki dalgalanmaları da önemli ölçüde azaltmıştır.



Şekil 6.9: Jaya tabanlı EYS güç paylaşım grafiği.

Jaya tabanlı EYS ile sürüş profili boyunca batarya ve UC'nin SOC değeri değişimi Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Açıkça şekilden görüldüğü gibi UC'nin SOC değerinin sürüş profili sonunda %80,3'ten %65,9'a düşmektedir. Bu sonuç Jaya tabanlı EYS'de UC'nin etkin bir şekilde kullanıldığı anlamına gelir. Sürüş profili sonunda batarya kapasitesinde %0,04 ve UC kapasitesinde %14,4 azalma Şekil 6.10'a bakıldığında açıkça görülmektedir.



Şekil 6.10: Jaya tabanlı EYS ile UC SOC değişimi.

6.5 Yöntemlerin Karşılaştırması

Bu tez çalışması kapsamında deneysel çalışmalar sadece batarya, kural tabanlı EYS ve önerilen Jaya tabanlı EYS için gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılmıştır. Uygulaması gerçekleştirilen kural tabanlı ve Jaya tabanlı EYS yöntemleri birbirleri ile toplam kayıp miktarı ve EYS yöntemlerinin depolama birimlerine etkileri açısından karşılaştırılmıştır.

Depolama birimlerinde meydana gelen kapasite değişim miktarları karşılaştırmalı olarak Tablo 6.2'de sunulmuştur. Tablodan görüldüğü gibi en az enerji kaybı 13828 W.sn ile sadece batarya olması durumunda gerçekleşmiştir. Bunun temel nedeni sistemde ilave bir DC-DC dönüştürücünün olmamasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Çünkü, sisteme DC-DC dönüştürücü eklendiğinde her güç aktarımı anında dönüştürücü üzerinde bir kayıp meydana gelmektedir. Ayrıca, deney seti kısıtlarından dolayı deneysel çalışmalar tasarlanan elektrikli aracın nominal

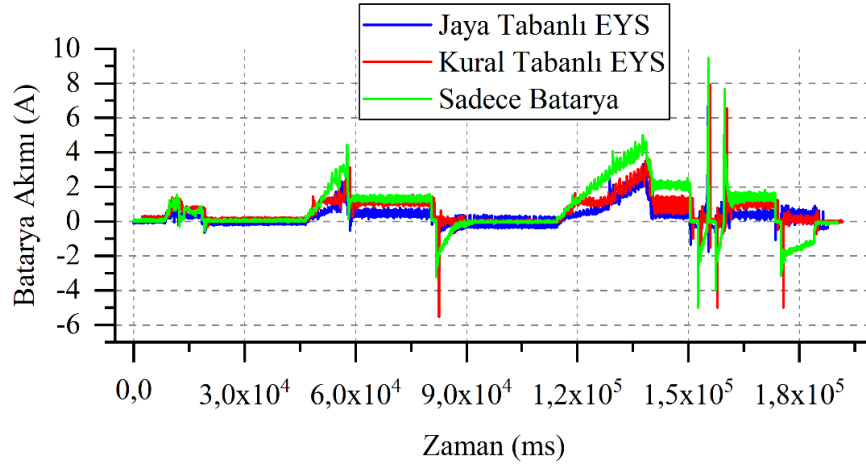
kapasitesinin altında gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, dönüştürücü tasarlandığı nominal güç değerinin altında çalıştırılmaktadır. Bu sebeple DC-DC dönüştürücünün verimi ve toplam sistem verimi daha düşük olmaktadır. Yani, tasarlanan elektrikli araca göre dönüştürücünün tasarım gücü 1500 W'tır. Ancak deney esnasında maksimum 200 W civarında güç aktarımı yapılmaktadır. Bu durum da verimi düşürmektedir.

Tablo 6.2: Farklı EYS yöntemleriyle ölçülen batarya akımlarının karşılaştırılması.

Yöntem	Batarya Kapasite Değişimi (W.sn)	UC Kapasite Değişimi (W.sn)	Toplam Enerji Değişimi (W.sn)
<i>Sadece Batarya</i>	13828	-	13828
<i>Kural Tabanlı EYS</i>	12905	8976	21881
<i>Jaya Tabanlı EYS</i>	6304	10238	16542

Tablo 6.2 incelendiğinde Jaya tabanlı EYS ile kural tabanlı EYS'ye göre oldukça verimli bir EYS gerçekleştirildiği görülür. Bunun sebebi de Jaya tabanlı EYS'de güç paylaşımı kararı batarya ve UC birimlerinin en verimli çalışacağı şekilde verilmesidir. Bu durum daha verimli bir donanım olan UC'nin Jaya tabanlı EYS ile daha fazla kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Tablodan görülebildiği gibi Jaya tabanlı EYS'de, kural tabanlı EYS'ye göre %24,4 daha az toplam enerji kaybı meydana gelmiştir. Bu da önerilen Jaya tabanlı EYS'nin toplam sistem verimini artırdığını göstermektedir.

UC ve DC-DC dönüştürücü eklenmesi sadece verim açısından önemli olmayıp batarya sağlığı üzerindeki olumlu etkisi mutlaka dikkate alınmalıdır. Bu şekildeki bir düzenleme kontrol edilebilir bir güç paylaşımı ve depolama birimlerinin esnek kullanımını sağlar. Sisteme UC eklenmesinin en büyük faydası batarya sağlığının dolaylı göstergesi olan batarya akımı RMS değerinin azaltılmış olmasıdır. Şekil 6.11'de sadece batarya bulunması, kural tabanlı EYS ve Jaya tabanlı EYS durumlarında batarya akımının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.11: Batarya akımlarının karşılaştırması.

Şekilde yer alan batarya akımlarının RMS değeri hesaplanacak olursa Tablo 6.3'te yer alan değerler elde edilmektedir. Tablodan görüldüğü gibi sisteme UC eklenmesiyle batarya akımı RMS değeri oldukça ciddi şekilde azalmaktadır. Kural tabanlı EYS ile %35,56 azalan bu değer, Jaya tabanlı EYS ile %54,13 azalarak neredeyse yarıya düşmüştür. Böylece bataryanın kullanım ömrü uzamaktadır. Ayrıca Jaya tabanlı EYS ile kural tabanlı EYS'den %28,8 daha az batarya akımı ölçülmüştür.

Tablo 6.3: Farklı EYS yöntemleriyle ölçülen batarya akımlarının karşılaştırılması.

Yöntem	Batarya Akımı RMS (A)	Değişim (%)
<i>Sadece Batarya</i>	1,476	-
<i>Kural Tabanlı EYS</i>	0,951	35,56
<i>Jaya Tabanlı EYS</i>	0,677	54,13

Tablo 6.4'te de kural tabanlı ve Jaya tabanlı EYS yöntemlerinin uygulandığı durumda UC akımında meydana gelen değişiklikler sunulmuştur. Görülebildiği gibi Jaya tabanlı EYS ile UC'nin daha fazla kullanıldığı bu sonuçlardan da anlaşılmaktadır.

Tablo 6.4: Farklı EYS yöntemleriyle ölçülen UC akımlarının karşılaştırılması.

Yöntem	UC Akımı RMS (A)	UC Akımı Ortalama (A)
<i>Kural Tabanlı EYS</i>	1,727	0,843
<i>Jaya Tabanlı EYS</i>	2,007	0,991

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde Jaya tabanlı EYS'nin kural tabanlı EYS'den oldukça iyi bir EYS gerçekleştirdiği açıktır. Jaya tabanlı EYS kural tabanlı EYS'ye göre toplam kayıp miktarını %24,4, batarya akımı RMS değerini ise %28,8 azaltmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında batarya ve UC'den beslenen elektrikli araçlar için modüler bir EYS tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiş ve gerçek zamanlı uygulanabilir bir EYS elde etmek için izlenmesi gereken işlem adımları belirlenmiştir.

EYS geliştirme aşamasında kullanılacak olan algoritmaların benzetim çalışmalarını gerçekleştirebilmek için elektrikli araç dinamik modeli oluşturulmuştur. Buna ek olarak kullanılan standart sürüş profilleri incelenmiş, tezde gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılmak üzere şehir içi sürüşe en uygun görünen ECE sürüş profili seçilmiştir. Daha sonra batarya ve UC'nin bağlantı şeklini belirleyen elektrikli araç topolojileri ağırlık, maliyet, karmaşıklık, UC ve motor sürücüsü verimi gibi kriterlere göre incelenmiştir. Sistemde ek bir DC-DC dönüştürücü bulunması, DC bara geriliminin sabit kalması ve UC'den etkin şekilde yararlanma gibi üstün özellikleri nedeniyle batarya doğrudan UC dönüştürücü üzerinden bağlantılı topoloji uygulanmak üzere seçilmiştir.

EYS benzetim çalışmalarının doğru bir şekilde yapılabilmesi için elektrikli araç bileşen modelleri oluşturulmuştur. Modeller oluşturulurken doğruluğun yanında benzetim çalışmalarında getirecekleri işlem yükleri de dikkate alınmıştır. Batarya ve UC modelleri sıcaklığa bağlı etkileri de içerecek şekilde yapılandırılmıştır. Motor ve motor sürücüsü modelleri ise hız ve torka bağlı olarak verim haritaları şeklinde elde edilmiştir. Elektrikli araç EYS konusunda literatürde yer alan önemli yöntemler sınıflandırılmış ve genel özelliklerine yer verilmiştir. Yöntemlerin üstün yanları ve kısıtlarından bahsedilmiş ve kullandıkları çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Literatürde yer alan EYS yöntemlerinden kural, bulanık mantık, DP ile ilgili EYS benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada Jaya optimizasyon yönteminin elektrikli araç EYS konusunda ilk kullanımı gerçekleştirilmiştir. Kural ve bulanık mantık temelli EYS benzetimi için MATLAB / Simulink'te elektrikli araç bileşen modelleri oluşturulmuştur. Kural tabanlı EYS'nin kontrol bloğu MATLAB/Simulink/Stateflow kütüphanesinde bulunan sonlu durum makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık tabanlı EYS kontrol bloğu ise MATLAB bulanık mantık arayüzü ile oluşturulmuş ve belirlenen kurallar detaylı olarak sunulmuştur. DP

ve Jaya tabanlı EYS benzetimlerinde ise hazır kütüphane kullanılmamış, kodlama ve benzetimler MATLAB üzerinde gerçekleştirilmiştir. Benzetimi gerçekleştirilen dört yöntem için de elde edilen sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur. Hem elde edilen performans hem de gerçek zamanlı uygulanma imkanı sebebiyle Jaya tabanlı EYS'nin gerçek sistem üzerinde uygulanmasına karar verilmiştir. Ayrıca, Jaya tabanlı EYS uygulaması sırasında araç talep gücünün değişimine göre Jaya arama uzayını sınırlayacak yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımla önerilen Jaya tabanlı EYS'nin daha verimli hale getirilmesi sağlanmıştır.

Tasarlanan EYS çalışmalarının uygulanabilmesi için UC ve DC bara arasında iki yönlü güç aktarımını sağlayacak çift yönlü DC-DC dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan dönüştürücü CLLC türünde bir seri rezonans dönüştürücüdür. Dönüştürücünün matematiksel modeli, benzetimi, baskı devre tasarımı ve testi ayrıntılı olarak sunulmuştur. Dönüştürücünün kontrolünde anahtarlama frekansının ayarlanmasının yanında ilave olarak ölü zaman kontrolü de eklenmiştir. Anahtarlama frekansı ve ölü zamanın PID kontrol bloğu ile belirlenmesi sayesinde istenilen güç aktarımı büyük bir doğrulukla sağlanmıştır.

Önerilen yöntemlerin deneysel olarak gerçekleştirilmesini sağlayacak bir test düzeneği hazırlanmıştır. Test düzeneğinde araç bileşenlerine ilave olarak aracın dinamik davranışını yansıtacak bir servo motor bulunmaktadır. Bu sayede istenilen sürüş profiline göre pozitif veya negatif tork uygulanabilmektedir. Test düzeneğinin kontrolü ise PLC ve HMI ile sağlanmakta ve güç değerleri de güç analizörü ile ölçülmektedir. Tasarlanan test düzeneği üzerinde kural tabanlı EYS ile Jaya temelli EYS yöntemleri test edilmiştir. Test edilen EYS yöntemleri birbirleri ile ve sistemde sadece batarya bulunması durumuyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar hem verim hem de batarya sağlığına etkileri açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Jaya tabanlı EYS kural tabanlı EYS'ye göre toplam kayıp miktarını %24,4, batarya akımı RMS değerini ise %28,8 azaltmaktadır.

Bu tez çalışmasında yapılan çalışmaları kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Batarya ve UC bulunan elektrikli araç için kural, bulanık kural, DP ve Jaya optimizasyon tabanlı EYS benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

- Jaya optimizasyon yönteminin uygulanması sırasında kullanılacak arama uzayının dinamik olarak kısıtlanması önerilmiştir.
- UC ve DC bara arası güç aktarımı iki yönlü olarak gerçekleştiren bir CLLC rezonans DC-DC dönüştürücü tasarlanmıştır.
- Tasarlanan CLLC dönüştürücü ile batarya ve UC arasında iki yönlü güç aktarımı başarı ile gerçekleştirilmiştir.
- DC-DC dönüştürücüde aktarılan gücün miktarını kontrol etmek için anahtarlama frekansının değiştirilmesinin yanı sıra doluluk oranının da değiştirilmesini sağlayacak bir algoritma geliştirilmiştir.
- Kural tabanlı ve Jaya optimizasyon tabanlı EYS yöntemleri deneysel olarak uygulanmıştır.
- Sadece batarya bulunması durumu, kural tabanlı EYS ve Jaya tabanlı EYS yöntemleriyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki önerilen Jaya tabanlı EYS ile daha verimli bir EYS gerçekleştirilmektedir. Bu sayede aracın enerji tüketimi azaltılmakta ve dolayısıyla menziline artış sağlanmaktadır.

Tezin devamı konusunda ise yapılabilecek çalışmalar ve öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Tasarlanan Jaya tabanlı EYS yöntemi farklı sürüş profilleri için uygulanabilir. Böylelikle, farklı sürüş profilleri için de önerilen yöntemin performansı ortaya konulabilir.
- Tasarlanan Jaya tabanlı EYS için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında önerilen arama uzayının talep gücü değişimine göre dinamik olarak kısıtlanması yöntemi deneysel olarak doğrulanabilir.
- Benzetim çalışmaları gerçekleştirilen bulanık mantık tabanlı EYS gerçek zamanlı uygulama için oldukça uygun görünmektedir. Bu benzetimdeki yapıda yer alan giriş-çıkış üyelik fonksiyonlarına ve kurallara çeşitli katsayılar eklenerek yöntemin zenginleştirilmesi mümkündür. Daha sonra, bu ağırlık katsayılarının çeşitli makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerle bulunması ve sürüş esnasında güncellenmesi sağlanabilir.

- Dönüştürücüde üst ve alt kol anahtarlamaları arasında bırakılan ölü zamanın optimum belirlenmesi için daha detaylı incelemeler gerçekleştirilebilir.
- Dönüştürücü kontrolündeki frekans ve PWM doluluk oranı çevrimlerinde yer alan PID katsayıları çeşitli yöntemler kullanılarak adaptif yapılabilir. Kullanılan bu yöntemlerin dönüştürücü performansına etkileri incelenebilir.

8. KAYNAKLAR

Affanni, A., Bellini, A., Franceschini, G., Guglielmi, P. and Tassoni, C., "Battery Choice and Management for New-Generation Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52 (5), 1343-1349, (2005). <https://doi.org/10.1109/TIE.2005.855664>

Akar, F., Tavlasoglu, Y. and Vural, B., "An Energy Management Strategy for a Concept Battery/Ultracapacitor Electric Vehicle with Improved Battery Life", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3 (1), 191-200, (2017). <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2638640>

Alemdar, Ö. Ş., "Transformer Module Using Llc Resonant Converter", MSc Thesis, *Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences.*, Electrical and Electronics Engineering Department, Ankara, (2016).

Alobeidli, K. and Khadkikar, V., "A new ultracapacitor state of charge control concept to enhance battery lifespan of dual storage electric vehicles", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67 (11), 10470-10481, (2018). <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2871038>

Azib, T., Bethoux, O., Remy, G. and Marchand, C., "Saturation management of a controlled fuel-cell/ultracapacitor hybrid vehicle", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60 (9), 4127-4138, (2011). <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2165092>

Baalen, J. v., "Strategy for the Honda Civic IMA", MSc Thesis, *Technische Universiteit Eindhoven*, Eindhoven, (2006).

Bauman, J. and Kazerani, M., "A comparative study of fuel-cell-battery, fuel-cell-ultracapacitor, and fuel-cell-battery-ultracapacitor vehicles", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57 (2), 760-769, (2008). <https://doi.org/10.1109/TVT.2007.906379>

Bayat, P., Baghranian, A. and Bayat, P., "Implementation of hybrid electric vehicle energy management system for two input power sources", *Journal of Energy Storage*, 17, 423-440, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.03.019>

Bellman, R., "On the Theory of Dynamic Programming", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 38 (8), 716-719, (1952). <https://doi.org/10.1073/PNAS.38.8.716>

Borhan, H., Member, S., Vahidi, A., Phillips, A. M., Kuang, M. L., Kolmanovsky, I. V. and Cairano, S. Di., "MPC-Based Energy Management of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20 (3), 593-603, (2012).

Cao, J. and Emadi, A., "A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (1), 122-132, (2012). <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2151206>

Castaings, A., Lhomme, W., Trigui, R. and Bouscayrol, A., "Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints", *Applied Energy*, 163, 190-200, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.020>

Chen, S. Y., Hung, Y. H., Wu, C. H. and Huang, S. T., "Optimal energy management of a hybrid electric powertrain system using improved particle swarm optimization", *Applied Energy*, 160, 132-145, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.047>

Chen, Z., Xiong, R. and Cao, J., "Particle swarm optimization-based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles considering uncertain driving conditions", *Energy*, 96, 197-208, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.071>

Chen, Z., Zhang, H., Xiong, R., Shen, W. and Liu, B., "Energy management strategy of connected hybrid electric vehicles considering electricity and oil price fluctuations: A case study of ten typical cities in China", *Journal of Energy Storage*, 36, 102347, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102347>

Cosmo Ferrites Limited Inc., "EE6527 Product Data Sheet [online]", (14 February 2021), https://cdn.ozdisan.com/ETicaret_Dosya/343335_316218.pdf, 2019.

CREE, "6.6 kW bi-directional EV on-board charger", Durham, NC, USA, (2018).

Deign, J., "Which Country Will Become the First to Ban Internal Combustion Cars? [online]", (13 August 2017), <https://www.greentechmedia.com/articles/read/what-country-will-become-the-first-to-ban-internal-combustion-cars>, 2017.

Demircali, A. and Koroglu, S., "Jaya algorithm-based energy management system for battery- and ultracapacitor-powered ultralight electric vehicle",

International Journal of Energy Research, 44 (6), 4977-4985, (2020).
<https://doi.org/10.1002/er.5248>

Demircali, A., Sergeant, P., Koroglu, S., Kesler, S., Öztürk, E. and Tumbek, M., "Influence of the temperature on energy management in battery-ultracapacitor electric vehicles", *Journal of Cleaner Production*, 176, 716-725, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.066>

Dusmez, S. and Khaligh, A., "A supervisory power-splitting approach for a new ultracapacitor-battery vehicle deploying two propulsion machines", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10 (3), 1960-1971, (2014). <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2299237>

Fares, D., Chedid, R., Karaki, S., Jabr, R., Panik, F., Gabele, H. and Huang, Y., "Optimal power allocation for a FCHV based on linear programming and PID controller", *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (36), 21724-21738, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.020>

Ferreira, A. A., Pomilio, J. A., Spiazzi, G. and de Araujo Silva, L., "Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23 (1), 107-115, (2008). <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.911799>

Geetha, A. and Subramani, C., "A comprehensive review on energy management strategies of hybrid energy storage system for electric vehicles", *International Journal of Energy Research*, 41, 1817-1834, (2017). <https://doi.org/10.1002/er.3730>

Golchoubian, P. and Azad, N. L., "Real-Time Nonlinear Model Predictive Control of a Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66 (c), 1-12, (2017). <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2725307>

Gomozov, O., Trovao, J. P. F., Kestelyn, X. and Dubois, M. R., "Adaptive Energy Management System Based on a Real-Time Model Predictive Control with Nonuniform Sampling Time for Multiple Energy Storage Electric Vehicle", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66 (7), 5520-5530, (2017). <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2638912>

Hemi, H., Ghouili, J. and Cheriti, A., "A real time fuzzy logic power management strategy for a fuel cell vehicle", *Energy Conversion and Management*, 80, 63-70, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.040>

Henze, V., "Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh [online]", (14 February 2021), <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh>, 2020.

Hussain, S., Ali, M. U., Park, G., Nengroo, S. H., Khan, M. A. and Kim, H., "A Real-Time Bi-Adaptive Controller-Based Energy Hybrid Electric Vehicles", *Energies*, 12 (4662), 1-24, (2019). <https://doi.org/10.3390/en12244662>

International Energy Agency, "Key World Energy Statistics 2020 [online]", (14 February 2021), <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020/final-consumption#abstract>, 2020.

Irani, F., "On Dynamic Programming Technique Applied to a Parallel Hybrid Electric Vehicle", MSc Thesis, *Chalmers University of Technology*, Göteborg, (2009).

Jiang, Q., Ossart, F. and Marchand, C., "Comparative study of real-time HEV energy management strategies", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66 (12), 10875-10888, (2017). <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2727069>

Ju, F., Zhang, Q., Deng, W. and Li, J., "Review of structures and control of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles", (eds: J. Li, S. Zhou, and Y. Han), *Advances in Battery Manufacturing, Service, and Management Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 303–318, (2016). <https://doi.org/10.1002/9781119060741.ch13>

Jung, J. H., Kim, H. S., Ryu, M. H. and Baek, J. W., "Design methodology of bidirectional CLLC resonant converter for high-frequency isolation of DC distribution systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28 (4), 1741-1755, (2013). <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2213346>

Kesler, S., Boyacı, Ö. and Tümbek, M., "Elektrikli Araçlarda Enerji Yönetimi ve Verimliliğinin Analiz Edilmesi için Bir Test Sistemi Tasarımı", *IV. International Ankara Conference on Scientific Research*, Ankara Türkiye, 67-70, (2021).

Khaligh, A. and Li, Z., "Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59 (6), 2806-2814, (2010). <https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2047877>

Kilic, A., Koroglu, S., Demircali, A., Kesler, S., Oner, Y., Karakas, E. and Sergeant, P., "Design of Master and Slave Modules on Battery Management System for Electric Vehicles", *6th International Conference on Advanced Technology & Sciences*. 161-166, (2017).

Kirkbas, A., Kizilkaya, A. and Bogar, E., "Optimal Basis Pursuit Based on Jaya Optimization for Adaptive Fourier Decomposition", *40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Barcelona, Spain, 538-543, (2017).

Kılıç, A., "Batarya Yönetim Sistemlerinde Ana ve Uydu Denetleyici Modül Tasarımı ve CAN Protokolü Kullanımı", Yüksek lisans tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2016).

Koroglu, S., Demircali, A., Kesler, S., Sergeant, P., Ozturk, E. and Tumbek, M., "Energy management system optimization for battery- ultracapacitor powered electric vehicle", *Journal of Electrical Systems*, 13 (1), 16-26, (2017).

Koubaa, R. and Krichen, L., "Double layer Metaheuristic based Energy Management Strategy for a Fuel Cell/Ultra-Capacitor Hybrid Electric Vehicle. Energy", 133, 1079-1093, (2017).
<https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.070>

Kouchachvili, L., Yaïci, W. and Entchev, E., "Hybrid battery / supercapacitor energy storage system for the electric vehicles", *Journal of Power Sources*, 374 (2018), 237-248, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.040>

Kuperman, A. and Aharon, I., "Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2), 981-992, (2011). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>

Lee, H. and Cha, S. U. K. W. O. N., "Reinforcement Learning Based on Equivalent Consumption Minimization Strategy for Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Access*, 9, 860-871, (2021).
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047497>

Lee, H., Jeong, J., Park, Y. and Cha, S. W., "Energy Management Strategy of Hybrid Electric Vehicle Using Battery State of Charge Trajectory Information", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4 (1), 79-86, (2017).
<https://doi.org/10.1007/s40684-017-0011-4>

Li, Q., Chen, W., Li, Y., Liu, S. and Huang, J., "Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic",

International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 43 (1), 514-525, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.06.026>

Lian, H., Zeng, C. and Cai, Z., "Dynamic programming based optimal control strategy of the hybrid vehicular power system", *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 7123-7127. (2017). <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217246>

Liu, C., Wang, Y., Wang, L. and Chen, Z., "Load-adaptive real-time energy management strategy for battery/ultracapacitor hybrid energy storage system using dynamic programming optimization", *Journal of Power Sources*, 438 (August), 227024, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227024>

Lu, X., Chen, Y., Fu, M. and Wang, H., "Multi-objective optimization-based real-time control strategy for battery/ultracapacitor hybrid energy management systems", *IEEE Access*, 7, 11640-11650, (2019). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2891884>

Marzougui, H., Amari, M., Kadri, A., Bacha, F. and Ghouili, J., "Energy management of fuel cell/battery/ultracapacitor in electrical hybrid vehicle", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (13), 8857-8869, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.190>

Maxwell, "Datasheet of K2 Ultracapacitors - 2.7 V Series Typical Characteristics [online]", (14 February 2021), https://www.maxwell.com/images/documents/k2series_ds_10153704.pdf, 2014.

Miro-Padovani, T., Colin, G., Ketfi-Chérif, A. and Chamaillard, Y., "Implementation of an Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Including Drivability Constraints", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65 (8), 5918-5929, (2016). <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2476820>

Moreno, J., Ortúzar, M. E. and Dixon, J. W., "Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53 (2), 614-62., (2006). <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.870880>

Moura, S. J., Fathy, H. K., Callaway, D. S. and Stein, J. L., "A Stochastic Optimal Control Approach for Power Management in Plug-In Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Control System Technologies*, 19 (3), 545-555, (2011). <https://doi.org/10.1109/TCST.2010.2043736>

Musardo, C., Rizzoni, G., Guezennec, Y. and Staccia, B., "A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management", *European Journal of Control*, 11 (4-5), 509-524, (2005). <https://doi.org/10.3166/ejc.11.509-524>

Nory, H. and Akyun, Y., "Experimentally Constrained Design Parameters Approach for PMSM and BLDC Motor", *6th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS*, 123-129, (2020). <https://doi.org/10.1109/EPECS48981.2020.9304526>

Pan, C., Liang, Y., Chen, L. and Chen, L., "Optimal Control for Hybrid Energy Storage Electric Vehicle to Achieve Energy Saving Using Dynamic Programming Approach", *Energies*, 12 (588), 1-19, (2019). <https://doi.org/10.3390/en12040588>

Panday, A. and Bansal, H. O., "A Review of Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicle", *International Journal of Vehicular Technology*, 2014, 1-19, (2014). <https://doi.org/10.1155/2014/160510>

Payri, F., Guardiola, C., Pla, B. and Blanco-Rodriguez, D., "A stochastic method for the energy management in hybrid electric vehicles", *Control Engineering Practice*, 29, 257-265, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.01.004>

Peng, H., Wang, J., Shen, W., Shi, D. and Huang, Y., "Compound control for energy management of the hybrid ultracapacitor-battery electric drive systems", *Energy*, 175, 309-319, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.088>

Pérez, L. V., Bossio, G. R., Moitre, D. and García, G. O., "Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming", *Mathematics and Computers in Simulation*, 73 (1), 244-254, (2006). <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2006.06.016>

Piccolo, A., Ippolito, L., zo Galdi, V. and Vaccaro, A., "Optimisation of energy flow management in hybrid electric vehicles via genetic algorithms", *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1, 434-439, (2001). <https://doi.org/10.1109/AIM.2001.936493>

Polat, A. H., "Sıfır gerilimde anahtarlama, faz kaydırmalı rezonant PWM kontrollü, tam köprü DC-DC dönüştürücü tasarımı ve uygulanması", Yüksek lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2015).

Rosario, L., "Power and energy management of multiple energy storage systems in electric vehicles", Ph.D Thesis, *Cranfield University Department of Aerospace Power & Sensors*, Wiltshire, (2007).

Samuel, O., Javaid, N., Aslam, S. and Rahim, M. H., "JAYA optimization based energy management controller for smart grid: JAYA optimization based energy management controller", *International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies: Invent, Innovate and Integrate for Socioeconomic Development*, 1-8, (2018). <https://doi.org/10.1109/ICOMET.2018.8346337>

Samuel, O., Javaid, S., Javaid, N., Ahmed, S. H., Afzal, M. K. and Ishmanov, F., "An efficient power scheduling in smart homes using jaya based optimization with time-of-use and critical peak pricing schemes", *Energies*, 11(11), 1-27, (2018). <https://doi.org/10.3390/en11113155>

Santucci, A., Sorniotti, A. and Lekakou, C., "Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications", *Journal of Power Sources*, 258, 395-407, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.118>

Shen, J., "Energy Management of a Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles", Ph.D Thesis, *University of Maryland*, College Park, (2016). <https://doi.org/10.13016/M28N5K>

Shen, J. and Khaligh, A., "Design and Real-Time Controller Implementation for a Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12 (5), 1910-1918, (2016). <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2575798>

Shi, L. and Crow, M. L., "Comparison of ultracapacitor electric circuit models", *IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy*, 1-6, (2008). <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596576>

Slama, B., Sihem, N., Zafar, B. and Adnane, C., "Performance study and efficiency improvement of Hybrid Electric System dedicated to transport application", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (17), 12777-12789, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.145>

Song, Z., Li, J., Hou, J., Hofmann, H., Ouyang, M. and Du, J., "The battery-supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicle applications: A case study", *Energy*, 154, 433-441, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.148>

Thounthong, P., Davat, B. and Raël, S., "Drive Friendly", *IEEE Power and Energy Magazine*, 6, 69-76. (2008). <https://doi.org/10.1109/MPAE.2008.4412942>

Tie, S. F. and Tan, C. W., "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 82-102, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077>

Trovao, J. P. F., Roux, M. A., Menard, E. and Dubois, M. R., "Energy- and power-split management of dual energy storage system for a three-wheel electric vehicle", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66 (7), 5540-5550, (2017). <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2636282>

Trovao, J. P. F. and Antunes, C. H., "A comparative analysis of meta-heuristic methods for power management of a dual energy storage system for electric vehicles", *Energy Conversion and Management*, 95, 281-296, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.030>

Trovao, J. P. F., Pereirinha, P. G., Jorge, H. M. and Antunes, C. H., "A multi-level energy management system for multi-source electric vehicles - An integrated rule-based meta-heuristic approach", *Applied Energy*, 105, 304-318, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.081>

United States Environmental Protection Agency, "Dynamometer Drive Schedules [online]", (14 February 2021), <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>, 2020.

Van Leekwijck, W. and Kerre, E. E., "Defuzzification: Criteria and classification", *Fuzzy Sets and Systems*, 108 (2), 159-178, (1999). [https://doi.org/10.1016/s0165-0114\(97\)00337-0](https://doi.org/10.1016/s0165-0114(97)00337-0)

Venkata Rao, R., "Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7 (1), 19-34, (2016). <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2015.8.004>

Voltaplex, "Samsung 29E 18650 Battery [online]", (14 February 2021), <https://voltaplex.com/samsung-29e-18650-battery-inr18650-29e>, 2012.

Vu, V. B., Tran, D. H. and Choi, W., "Implementation of the Constant Current and Constant Voltage Charge of Inductive Power Transfer Systems with the Double-Sided LCC Compensation Topology for Electric Vehicle Battery Charge Applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33 (9), 7398-7410, (2018). <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2766605>

Vural, B., Uzunoglu, M., Erdinc, O. and Onar, O. C., "A dynamic ultracapacitor model for vehicular applications", *International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP*, 595-598, (2009). <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2009.5211994>

Wang, B., Xu, J., Wai, R. J. and Cao, B., "Adaptive Sliding-Mode with Hysteresis Control Strategy for Simple Multimode Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64 (2), 1404-1414, (2017). <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2618778>

Wang, J., Member, S., Taylor, B., Sun, Z. and Howe, D., "Experimental Characterization of a System for Downsized ICE Vehicles", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56 (6), 3674-3681, (2007). <https://doi.org/10.1109/TVT.2007.901885>

Wang, X., He, H., Sun, F. and Zhang, J., "Application study on the dynamic programming algorithm for energy management of plug-in hybrid electric vehicles", *Energies*, 8 (4), 3225-3244, (2015). <https://doi.org/10.3390/en8043225>

Wang, Y., Wang, W., Zhao, Y., Yang, L. and Chen, W., "A fuzzy-logic power management strategy based on Markov random prediction for hybrid energy storage systems", *Energies*, 9 (1), (2016). <https://doi.org/10.3390/en9010025>

West, M. J., Bingham, C. and Schofield, N., "Predictive control for energy management in all/more electric vehicles with multiple energy storage units", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Toulouse France*, 222-228, (2003).

Xing, Y., Ma, E. W. M., Tsui, K. L. and Pecht, M., "Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles", *Energies*, 4 (12), 1840-1857, (2011). <https://doi.org/10.3390/en4111840>

Xiong, R., Chen, H., Wang, C. and Sun, F., "Towards a smarter hybrid energy storage system based on battery and ultracapacitor - A critical review on topology and energy management", *Journal of Cleaner Production*, 202, 1228-1240, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.134>

Yin, H., Zhou, W., Li, M., Ma, C. and Zhao, C., "An Adaptive Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy on Battery/Ultracapacitor Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2 (3), 300-311, (2016). <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2552721>

Zadeh, L. A., "Fuzzy sets", *Information and Control*, 8 (3), 338-353, (1965).

[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

Zahid, Z. U., Dalala, Z. M., Chen, R., Chen, B. and Lai, J. S., "Design of bidirectional DC-DC resonant converter for Vehicle-to-Grid (V2G) applications", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1 (3), 232-244, (2015). <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2476035>

Zandi, M., Payman, A., Martin, J., Pierfederici, S., Davat, B. and Meibody-Tabar, F., "Energy Management of a Fuel Cell / Supercapacitor / Battery Power Source for Electric Vehicular Applications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60 (2), 433-443, (2011). <https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2091433>

Zhang, P., Yan, F. and Du, C., "A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48 (205), 88-104, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.093>

Zhang, X., Lu, Z., Tan, C. and Wang, Z., "Fuzzy Adaptive Filtering-Based Energy Management for Hybrid Energy Storage System", *Computer Systems Science & Engineering*, 36 (1), 117-130, (2021). <https://doi.org/10.32604/csse.2021.014081>

Zubieta, L. and Bonert, R., "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36 (1), 199-205, (2000). <https://doi.org/10.1109/28.821816>

EKLER

9. EKLER

EK A Bulanık Mantık Tabanlı EYS Kuralları

1	$(P_Talep==NY) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=ND)$
2	$(P_Talep==NY) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=NY)$
3	$(P_Talep==NY) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=NY)$
4	$(P_Talep==NY) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=Z)$
5	$(P_Talep==NY) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=ND)$
6	$(P_Talep==NY) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=NY)$
7	$(P_Talep==NY) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=Z)$
8	$(P_Talep==NY) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=Z)$
9	$(P_Talep==NY) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=ND)$
10	$(P_Talep==ND) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=ND)$
11	$(P_Talep==ND) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=ND)$
12	$(P_Talep==ND) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=ND)$
13	$(P_Talep==ND) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=Z)$
14	$(P_Talep==ND) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=ND)$
15	$(P_Talep==ND) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=ND)$
16	$(P_Talep==ND) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=PD)$
17	$(P_Talep==ND) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=Z)$
18	$(P_Talep==ND) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=ND)$
19	$(P_Talep==Z) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=Z)$
20	$(P_Talep==Z) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=Z)$
21	$(P_Talep==Z) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=ND)$
22	$(P_Talep==Z) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=Z)$
23	$(P_Talep==Z) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=Z)$
24	$(P_Talep==Z) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=Z)$
25	$(P_Talep==Z) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=PD)$
26	$(P_Talep==Z) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=Z)$
27	$(P_Talep==Z) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=Z)$
28	$(P_Talep==PD) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=Z)$

29	$(P_Talep==PD) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=Z)$
30	$(P_Talep==PD) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=ND)$
31	$(P_Talep==PD) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=PD)$
32	$(P_Talep==PD) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=Z)$
33	$(P_Talep==PD) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=Z)$
34	$(P_Talep==PD) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=PD)$
35	$(P_Talep==PD) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=PD)$
36	$(P_Talep==PD) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=Z)$
37	$(P_Talep==PY) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=PD)$
38	$(P_Talep==PY) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=Z)$
39	$(P_Talep==PY) \& (UC_SOC==D) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=ND)$
40	$(P_Talep==PY) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=PY)$
41	$(P_Talep==PY) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=PY)$
42	$(P_Talep==PY) \& (UC_SOC==O) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=PD)$
43	$(P_Talep==PY) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==D) \Rightarrow (P_UC=PY)$
44	$(P_Talep==PY) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==O) \Rightarrow (P_UC=PY)$
45	$(P_Talep==PY) \& (UC_SOC==Y) \& (Bat_SOC==Y) \Rightarrow (P_UC=PY)$

10. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Akif Demirçalı

Doğum Yeri ve Tarihi : Çivril – 30.08.1990

Lisans Üniversite : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Y. Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : akifdemircali@pau.edu.tr

İletişim Adresi : Pamukkale Üniversitesi Mühendislik
Fakültesi A – Blok 4. Kat Oda No MA-K4-12
Kınıklı Pamukkale / DENİZLİ

Yayın Listesi :

• Demircali, A. and Koroglu, S., “Jaya algorithm-based energy management system for battery- and ultracapacitor-powered ultralight electric vehicle”, *International Journal of Energy Research*, 44 (6) 4977-4985, (2020). <https://doi.org/10.1002/er.5248>

• Kirkbas, A., Demircali, A., Koroglu, S. And Kizilkaya, A., “Fault diagnosis of oil-immersed power transformers using common vector approach”, *Electric Power Systems Research*, 184 (106346), (2020). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106346>

• Demircali, A., Sergeant, P., Koroglu, S., Kesler, S., Öztürk, E. and Tumbek, M., “Influence of the temperature on energy management in battery-ultracapacitor electric vehicles”, *Journal of Cleaner Production*, 176, 716-725, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.066>

• Koroglu, S., Demircali, A., Kesler, S., Sergeant, P., Ozturk, E. and Tumbek, M., “Energy management system optimization for battery- ultracapacitor powered electric vehicle”, *Journal of Electrical Systems*, 13 (1), 16-26, (2017).

• Koroglu, S. and Demircali, A., “Diagnosis of Power Transformer Faults Based on Multi-layer Support Vector Machine Hybridized with Optimization Methods”, *Electric Power Components and Systems*, 44 (19), 2172-2184, (2016).
<https://doi.org/10.1080/15325008.2016.1219427>

Konferans listesi :

• Öztürk, E., Köroğlu, S., Can, Ö., Güler, R. F., Bıyıklı, F. M., Balkan, M. E. and Demirçalı, A. “Otonom Taşıtlar İçin Hiposikloid Direksiyon Dişli Kutusu Tasarımı ve Prototip İmalatı”, *6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2018)*, Antalya Turkey, 39–46, (2018).

• Kilic, A., Koroglu, S., Demircali, A., Kesler, S., Oner, Y., Karakas, E. and Sergeant, P., “Design of Master and Slave Modules on Battery Management System for Electric Vehicles”, *6th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT’Riga)*, Riga, Latvia, 161-166, (2017).

• Kilickir, H. N., Demircali, A., Koroglu, S., Kesler, S., Tumbek, M. and Kilic, A., “RF Telemetry Design for Electric Vehicle”, *6th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT’Riga)*, Riga, Latvia, 167-170, (2017).

• Koroglu, S., Demircali, A., Kesler, S., Sergeant, P., Ozturk, E. and Tumbek, M., “Energy Management System for Battery/Ultracapacitor Electric Vehicle with Particle Swarm Optimization”, *International Conference on Recent Advances in Electrical System*, Hammamet, Tunisia, 23-27, (2016).

• Kesler, S., Karakaş, E., Köroğlu, S., Tumbek, M. and Demirçalı, A., “Verification of Electrical Specification and Parameters of the PMSM with High Accuracy by FEM Models”, *International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, Afyonkarahisar, Turkey, 1031-1035, (2016).

• Demirçalı, A. and Köroğlu, S., “Güç Transformatörü Arızalarının Destek Vektör Makineleriyle Belirlenmesi”, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Denizli, Türkiye, 10-12, (2015).

- Köroğlu, S., Demirçalı, A., Yıldız, M., alı, M. E. and Mıhçı, G., “G  Transformatörleri Arızalarının Yağda öz nm ş Gaz Analiziyle Tanılanması”, *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 27-29, (2014).