

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENSİLİĞİ ANABİLİM DALI

HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA BİRİMİNE SAHİP ELEKTRİKLİ ARAÇLAR
İÇİN GÜÇ SİSTEMİ TASARIMI VE ÇİFT UYARLANABİLİR ENERJİ
YÖNETİM SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Muhammed Reşit ÇORAPSIZ

EKİM 2023
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENSİLİĞİ ANABİLİM DALI

**HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA BİRİMİNE SAHİP ELEKTRİKLİ ARAÇLAR
İÇİN GÜÇ SİSTEMİ TASARIMI VE ÇİFT UYARLANABİLİR ENERJİ
YÖNETİM SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Muhammed Reşit ÇORAPSIZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01 / 09 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 04 / 10 / 2023

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Karedeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Doktora Programı’nda gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen hibrit enerji depolama sistemine sahip elektrikli araçlar için güç sistemi tasarımı gerçekleştirilmiş ve özgün bir enerji yönetim sistemi önerilmiştir.

Eğitim öğretim hayatım boyunca beni her konuda yönlendiren ve destekleyen, eğitimim için bana bütün olanakları sunan babam Recep ÇORAPSIZ’a ve annem Zeynep ÇORAPSIZ’a, kardeşlerime, akademik çalışma hayatım süresince desteğini her zaman hissettiğim sevgili eşim Elif ÇORAPSIZ’a minnettarım.

Akademik çalışmalara başladığım ilk yıllardan bu yana bana her konuda destek veren, bilimsel etik bilgisinden her an faydalanabildiğim Bölüm Başkanım Doç. Dr. Bünyamin ALIM’a şükranlarımı sunarım.

2012 yılından bu yana birlikte görev yaptığım Bayburt Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Müdürleri Doç. Dr. M. İhsan ÇUBUKÇU’ya, Prof. Dr. Vecihi AKSAKAL’a, Prof. Dr. Ümmügülsüm ERDOĞAN’a ve Doç. Dr. Murat ÇOLAK’a yardım, destek ve anlayışlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çeviricilerin tasarımındaki yardımlarından ötürü İsmail Safa SIRIŞ’a teşekkür ederim.

Gerek yüksek lisans ve doktora ders döneminde gerekse Tez İzlemede yapıcı eleştirileri, hoşgörölü yaklaşımı ve anlayışlarından dolayı Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ’a, ve Tez İzleme süreçlerinde değerli yorumlarını esirgemeyen Doç. Dr. Hüseyin PEHLİVAN’a teşekkürlerimi saygı ve hürmetle sunarım.

Yüksek lisans ve Doktora öğrenimim boyunca beni destekleyen ve yönlendiren tez danışmanım Sayın Hocam Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ’ye güler yüz, sabır, anlayış ve çabalarından ötürü teşekkürlerimi saygı ve minnetle sunarım.

Muhammed Reşit ÇORAPSIZ

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “*Hibrit Enerji Depolama Birimine Sahip Elektrikli Araçlar için Güç Sistemi Tasarımı ve Çift Uyarlanabilir Enerji Yönetim Sisteminin Gerçekleştirilmesi*” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ’nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04/10/2023

Muhammed Reşit ÇORAPSIZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Amacı ve Çözüm Yaklaşımı	3
1.3. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	3
1.4. Elektrikli Araçlar.....	15
1.4.1. Elektrikli Araçların Tarihçesi.....	16
1.4.2. Bataryalı Elektrikli Araçlar	17
1.5. Enerji Depolama Birimleri	20
1.5.1. Enerji Depolama Birimleri ile İlgili Bazı Tanımlar	20
1.5.2. Enerji Yoğunluğu	20
1.5.3. Hücre Gerilimi	20
1.5.4. Elektrik Yüğü (Amper-Saat) Kapasitesi	21
1.5.5. Depolanan Elektrik Enerjisi	22
1.5.6. Özgöl Enerji	22
1.5.7. Özgöl Güç	22
1.5.8. Öz Deşarj.....	23
1.5.9. Şarj Doluluk Oranı	23
1.5.10. Çevrim Ömrü	23
1.5.11. Enerji Verimi.....	24
1.6. Bataryalar	24
1.6.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Türleri	25

1.7. Bataryaların Elektriksel Modelinin Elde Edilmesi.....	26
1.7.1. Model Parametrelerinin Belirlenmesi	29
1.7.2. Şarj Doluluk Oranının Belirlenmesi.....	30
1.8. Süperkapasitörler.....	31
1.9. Süperkapasitörlerin Elektriksel Modelinin Elde Edilmesi	34
1.9.1. Model Parametrelerinin Belirlenmesi	37
1.9.2. Şarj Doluluk Oranının Belirlenmesi.....	40
1.10. Batarya/Süperkapasitör Hibrit Elektrikli Araçlar.....	41
1.11. Ara Bağlantı Topolojileri	43
1.11.1. Pasif Topoloji.....	43
1.11.2. Batarya Yarı Aktif Topoloji	44
1.11.3. Süperkapasitör Yarı Aktif Topoloji	45
1.11.4. Tam Aktif Topoloji	45
1.11.5. Ara Bağlantı Topolojilerinin Karşılaştırılması.....	46
1.12. Enerji Depolama Birimlerinin Konfigürasyonu	46
1.13. DA/DA Çeviricilerin Denetimi	49
1.14. Elektrikli Aracın Boylamsal Modeli	52
1.15. Sürüş Çevrimleri.....	54
1.15.1. Sürüş Çevrimine Göre Yük Gücünün Elde Edilmesi.....	56
1.16. Elektrikli Araçlarda Enerji Yönetimi	58
1.16.1. Kural Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri	59
1.16.2. Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri	60
1.16.3. Frekans Ayrımı Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri	60
1.16.4. Sabit Frekans Ayrımlı Enerji Yönetim Sistemi	61
1.16.5. Adaptif Frekans Ayrımlı Enerji Yönetim Sistemi	63
1.16.6. Çift Uyarlanabilir Güç Tahsisli Enerji Yönetim Sistemi	65
1.16.7. Batarya Çalışma Yüzdesinin Hesaplanması.....	67
1.17. Bulanık Mantık Denetim	68
1.17.1. Bulanıklık Kavramı	69
1.17.2. Bulanık Kümeler	70
1.17.3. Bulanık Küme İşlemleri	72
1.17.4. Bulanık Mantık Denetimin Bileşenleri	74
1.17.5. Bulanıklaştırma	75

1.17.6. Bulanık Kural Tabanı ve Bulanık İşlemci.....	75
1.17.7. Durulaştırma.....	78
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA	80
2.1. Yükselten DA/DA Çeviricilerin Tasarım Kriterleri.....	80
2.2. Yükselten DA/DA Çeviricilerin Tasarımı.....	84
2.3. DA/DA Çeviricilerin Denetimi	93
2.4. DA Elektronik Yükün Programlanması	94
2.5. DA Güç Kaynağının Programlanması.....	100
2.6. STM NUCLEO F746ZG Mikrodenetleyicisi ve Ayarları.....	106
2.7. Akım Sensörleri ve Arayüz Devreleri	108
2.8. Kullanılan Batarya Özellikleri.....	111
2.9. Kullanılan Süperkapasitör Özellikleri	114
2.10. Deneysel Düzenek.....	117
2.11. Enerji Depolama Elemanlarına Ait Deneysel Bulgular	120
2.11.1. Batarya Hücresinin Modellenmesi	120
2.11.2. Süperkapasitör Hücresinin Modellenmesi	127
2.12. Yük Akımlarının Elde Edilmesi	131
2.13. Benzetim ve Deneysel Modellerin Oluşturulması.....	137
2.14. Sabit Frekans Ayrımında Elde Edilen Bulgular	141
2.14.1. Batarya Gurubuna Ait Benzetim ve Deneysel Bulgular	141
2.14.2. Süperkapasitör Gurubuna Ait Benzetim ve Deneysel Bulgular.....	145
2.14.3. Benzetim ve Deneysel Bulguların Karşılaştırılması	149
2.15. Adaptif Frekans Ayrımında Elde Edilen Bulgular	153
2.15.1. Batarya Gurubuna Ait Benzetim ve Deneysel Bulgular	153
2.15.2. Süperkapasitör Gurubuna Ait Benzetim ve Deneysel Bulgular.....	157
2.15.3. Benzetim ve Deneysel Bulguların Karşılaştırılması	161
2.16. Çift Uyarlanabilir Güç Tahsisinde Elde Edilen Bulgular.....	165
2.16.1. Batarya Gurubuna Ait Benzetim ve Deneysel Bulgular	165
2.16.2. Süperkapasitör Gurubuna Ait Benzetim ve Deneysel Bulgular.....	169
2.16.3. Benzetim ve Deneysel Bulguların Karşılaştırılması	173
2.17. Enerji Yönetim Sistemlerinin Karşılaştırılması	177
3. SONUÇLAR.....	187
4. ÖNERİLER.....	189

5. KAYNAKLAR	190
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Doktora Tezi

HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA BİRİMİNE SAHİP ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GÜÇ SİSTEMİ TASARIMI VE ÇİFT UYARLANABİLİR ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Muhammed Reşit ÇORAPSIZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ
2023, 199 Sayfa

Bu tez çalışmasında, Batarya ve Süperkapasitör paketlerinden meydana gelen Hibrit Enerji Depolama Sistemine (HEDS) sahip Elektrikli Araçlar (EA) için özgün bir Enerji Yönetim Sistemi (EYS) önerilmiştir. Bu yöntem temelde yük akımının Alçak Geçiren Filtre (AGF) yardımıyla alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılarak kaynaklara tahsis edilmesi ilkesine dayanmaktadır. Yük akımının filtrelenmesi için, yük akımının genliğine ve süperkapasitör şarj doluluk oranına göre adaptif AGF tasarlanmıştır. Buna ek olarak batarya akımı süperkapasitör doluluk oranına göre belirli bir çalışma yüzdesi ile sınırlandırılarak adaptif hale getirilmiştir. Hem filtre kesim frekansının hem de batarya akımının adaptif hale getirilmesiyle çift uyarlanabilir güç tahsisi gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem hem benzetim hem de deneysel olarak tasarlanmış ve incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatüre sunulan yük akımı filtreleme yöntemleri ile karşılaştırıldığında bu tezde önerilen yöntemin daha düşük batarya akımına ihtiyaç duyduğu ve süperkapasitörde depolanan enerjiyi aktif kullanabildiği için daha yüksek enerji verimliliğine sahip olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lityum İyon Bataryalar, Süperkapasitörler, Hibrit Enerji Depolama Sistemleri, Elektrikli Araçlar, Yükselten DA–DA Dönüştürücü, Enerji Yönetim Sistemi, Matlab/Simulink.

SUMMARY

PhD. Thesis

POWER SYSTEM DESIGN FOR ELECTRIC VEHICLES WITH HYBRID ENERGY STORAGE UNIT AND IMPLEMENTATION OF DOUBLE ADAPTIVE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM

Muhammed Reşit ÇORAPSIZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Science
Electrical–Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hakan KAHVECİ
2023, 199 Pages

In this thesis, a novel Energy Management System (EMS) has been proposed for Electric Vehicles (EVs) with Battery and Supercapacitor Hybrid Energy Storage System (HESS). This method is fundamentally based on separating the load current into low and high frequency components with the help of a Low Pass Filter (LPF) and allocating it to the sources. To filter the load current, the adaptive AGF is designed according to the amplitude of the load current and the supercapacitor state of charge. In addition, the battery current has been made adaptive by limiting it to a specific operating percentage according to the supercapacitor state of charge. Double adaptive power allocation is achieved by adapting the filter cut-off frequency and the battery current. The proposed method has been designed and examined both by simulation and experimentally. When the results obtained are compared with the load current filtering methods presented in the literature, it has been observed that the method proposed in this thesis has higher energy efficiency because it requires lower battery current and can use the energy stored in the supercapacitor more effectively.

Key Words: Lithium-Ion Batteries, Supercapacitors, Hybrid Energy Storage Systems, Electric Vehicles, Step-up DC–DC Converter, Energy Management System, Matlab/Simulink

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Elektrikli araçların genel yapısı, a.) HEA, b.) BEA.....	15
Şekil 1.2. Bataryalı elektrikli araç türleri	19
Şekil 1.3. Hücre geriliminin iç direnç ile ilişkisi.....	21
Şekil 1.4. Amper-saat kapasitesi	21
Şekil 1.5. Batarya yapısı.....	24
Şekil 1.6. İkinci dereceden Thevenin elektriksel devre modeli.....	27
Şekil 1.7. Batarya darbeleri deşarj testi	28
Şekil 1.8. Açık devre gerilimi ve şarj doluluk oranı ilişkisi.....	30
Şekil 1.9. Süperkapasitör hücre yapısı	32
Şekil 1.10. Süperkapasitör paketlerinin iç yapısı	33
Şekil 1.11. Deneysel ve basit RC modelin karşılaştırılması.....	34
Şekil 1.12. Süperkapasitör elektriksel eşdeğer devresi	35
Şekil 1.13. Süperkapasitörün deneysel şarj – deşarj eğrisi.....	37
Şekil 1.14. Süperkapasitör geriliminin zamana bağılı değişimi	38
Şekil 1.15. Batarya ve süperkapasitör özelliklerinin karşılaştırılması	42
Şekil 1.16. Batarya-süperkapasitör hibrit elektrikli araç yapısı	42
Şekil 1.17. Ara bağlantı topolojileri	44
Şekil 1.18. Batarya-süperkapasitör HEDS konfigürasyonu	47
Şekil 1.19. Araca etkiyen kuvvetler	53
Şekil 1.20. Çeşitli sürüş çevrimlerinin hız zaman ilişkileri.....	55
Şekil 1.21. Çeşitli türlerde sürüş çevrimleri	56
Şekil 1.22. Enerji yönetim türleri	59
Şekil 1.23. Yük akımının filtrelenmesi.....	60
Şekil 1.24. Enerji kaynaklarının dinamik tepkileri.....	61
Şekil 1.25. Yük akımının filtrelenmesi ve sabit kesim frekansında güç ayrımı.....	62
Şekil 1.26. Adaptif alçak geçiren filtre ile yük akımının filtrelenmesi	63
Şekil 1.27. Çift uyarlanabilir güç tahsisi	65
Şekil 1.28. Batarya ve süperkapasitör HEDS’de çift uyarlanabilir güç tahsisi	66
Şekil 1.29. Üçgen üyelik fonksiyonu	71
Şekil 1.30. A ve B bulanık kümelerinin kesişimi	72

Şekil 1.31.	A ve B bulanık kümelerinin birleşimi	73
Şekil 1.32.	Bulanık B kümesinin değil işlemi	73
Şekil 1.33.	Bulanık mantık denetleyici temel blok diyagramı	74
Şekil 1.34.	Bulanıklaştırma işlemi.....	75
Şekil 1.35.	Bulanık kural tablosu	76
Şekil 1.36.	Aktif kuralların işletilmesi	77
Şekil 1.37.	BMD'nin bir sistemdeki genel işleyişi.....	78
Şekil 2.1.	Yükselten çevirici genel yapısı	81
Şekil 2.2.	Yükselten çevirici anahtar konum gösterimi.....	81
Şekil 2.3.	Anahtar durumuna göre eşdeğer devreler	82
Şekil 2.4.	Tasarımı yapılan DA/DA yükselten çevirici yapısı	84
Şekil 2.5.	TLP352 kapı sürücü devresi.....	85
Şekil 2.6.	İzoleli DA/DA çevirici modülü.....	86
Şekil 2.7.	AS78L05RTR-E1 lineer voltaj regülatör devresi.....	86
Şekil 2.8.	Giriş gerilimi izolasyon devresi (AMC1200).....	87
Şekil 2.9.	Giriş gerilimi okuma devresi (MPC6001).....	88
Şekil 2.10.	Çıkış gerilimi izolasyon devresi (AMC1200)	88
Şekil 2.11.	Çıkış gerilimi okuma devresi (MPC6001)	89
Şekil 2.12.	Mikroişlemci ve çevirici ara bağlantısı	89
Şekil 2.13.	Tasarlanan DA/DA yükselten çeviricinin üst katman görünüşü.....	90
Şekil 2.14.	Tasarlanan DA/DA yükselten çeviricinin alt katman görünüşü.....	90
Şekil 2.15.	Tasarlanan DA/DA yükselten çeviricinin birleşik katman görünüşü.....	91
Şekil 2.16.	DA/DA yükselten çeviricinin baskı devre kartı	91
Şekil 2.17.	Yükselten DA/DA çevirici devresi	92
Şekil 2.18.	Kaskad denetim yapısı	93
Şekil 2.19.	Programlanabilir DA elektronik yükün akım-gerilim ilişkisi	94
Şekil 2.20.	UNI-T UTL8511 Programlanabilir DA elektronik yük ön paneli	95
Şekil 2.21.	UNI-T UTL8511 Programlanabilir DA elektronik yük arka paneli	96
Şekil 2.22.	Elektronik yük hassas ölçüm bağlantısı	97
Şekil 2.23.	MATLAB test ve ölçüm aracı arayüzü	98
Şekil 2.24.	DA güç kaynağının akım, gerilim ve güç ilişkisi.....	100
Şekil 2.25.	KEITHLEY 2200-20-5 programlanabilir DA güç kaynağı ön paneli.....	102
Şekil 2.26.	KEITHLEY 2200-20-5 programlanabilir DA güç kaynağı arka paneli.....	102
Şekil 2.27.	Programlanabilir DA güç kaynağının basitleştirilmiş blok diyagramı.....	103

Şekil 2.28.	STM NUCLEO F746ZG Mikrodenetleyicisi.....	106
Şekil 2.29.	Mikrodenetleyiciye ait pin çıkışları (CN8-CN9)	107
Şekil 2.30.	Mikrodenetleyiciye ait pin çıkışları (CN7-CN10)	107
Şekil 2.31.	ACS712'nin iletim yolu akımına karşı çıkış gerilimi	108
Şekil 2.32.	ACS712 akım sensörü.....	109
Şekil 2.33.	ACS712 akım sensörü ile akım okuma	110
Şekil 2.34.	ORION INR18650P pil hücresi	111
Şekil 2.35.	Kullanılan batarya grubu.....	112
Şekil 2.36.	Batarya gurubu ve hücrelerin şarj edilmesi.....	113
Şekil 2.37.	KAMCAP HP-2R7-J108UNJ47 model süperkapasitör	114
Şekil 2.38.	Süperkapasitör gurubunun oluşturulması.....	115
Şekil 2.39.	Süperkapasitör hücresinin şarj edilmesi.....	116
Şekil 2.40.	DeneySEL düzenek.....	118
Şekil 2.41.	Deney düzeneğinin blok diyagramı.....	119
Şekil 2.42.	Batarya deşarj işlemi a.) Deşarj eğrisi, b.) Deşarj akımı.....	121
Şekil 2.43.	Pil hücresinin benzetim modeli	122
Şekil 2.44.	Batarya deneysel şarj eğrileri	123
Şekil 2.45.	Şarj doluluk oranı ve açık devre gerilimi ilişkisi	124
Şekil 2.46.	Batarya deneysel eğrileri a.) Hücre gerilimi, b.) Darbe akımı	125
Şekil 2.47.	Batarya parametre kestirimi a.) Kestirim öncesi, b.) Kestirim sonrası	126
Şekil 2.48.	Süperkapasitör deneysel eğrileri a.) Hücre gerilimi b.) Hücre akımı.....	128
Şekil 2.49.	Süperkapasitör elektriksel eşdeğer devre modeli	129
Şekil 2.50.	Süperkapasitör parametre kestirimi a.) Kestirim öncesi, b.) Kestirim sonrası.....	130
Şekil 2.51.	Yük akımının elde edilmesinde kullanılan dinamik model.....	131
Şekil 2.52.	UDDS sürüş çevrimine ait hız, güç ve akım grafikleri	132
Şekil 2.53.	Yük akımını paylaşma teknikleri	134
Şekil 2.54.	EYS'lere göre yük akımının ayrıştırılması.....	135
Şekil 2.55.	EYS'lere göre filtre kesim frekansları ve %R.....	136
Şekil 2.56.	Batarya gurubuna ait benzetim modeli.....	137
Şekil 2.57.	Süperkapasitör gurubuna ait benzetim modeli	138
Şekil 2.58.	Batarya testlerinde STM32F746ZG için tasarlanan model.....	139
Şekil 2.59.	Süperkapasitör testlerinde STM32F746ZG için tasarlanan model	140
Şekil 2.60.	Batarya benzetim sonuçları, a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı	141
Şekil 2.61.	Batarya deneysel sonuçlar, a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı	142

Şekil 2.62.	Batarya benzetim sonuçları, a.) Terminal gerilimi, b.) Batarya akımı, c.) Şarj doluluk oranı	143
Şekil 2.63.	Batarya deneysel sonuçlar, a.) Terminal gerilimi, b.) Batarya akımı, c.) Şarj doluluk oranı	144
Şekil 2.64.	Süperkapasitör benzetim sonuçları, a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı	145
Şekil 2.65.	Süperkapasitör deneysel sonuçlar, a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı.....	146
Şekil 2.66.	Süperkapasitör benzetim sonuçları, a.) Terminal gerilimi, b.) Yük akımı c.) Şarj doluluk oranı	147
Şekil 2.67.	Süperkapasitör deneysel sonuçlar, a.) Terminal gerilimi, b.) Yük akımı c.) Şarj doluluk oranı	148
Şekil 2.68.	Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları.....	149
Şekil 2.69.	Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları.....	150
Şekil 2.70.	Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Batarya akımları, c.) Şarj doluluk oranları	151
Şekil 2.71.	Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Süperkapasitör akımları, c.) Şarj doluluk oranları	152
Şekil 2.72.	Batarya benzetim sonuçları a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı	153
Şekil 2.73.	Batarya deneysel sonuçlar a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı	154
Şekil 2.74.	Batarya benzetim sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Batarya akımı, c.) Şarj doluluk oranı	155
Şekil 2.75.	Batarya deneysel sonuçlar a.) Terminal gerilimi, b.) Batarya akımı, c.) Şarj doluluk oranı	156
Şekil 2.76.	Süperkapasitör benzetim sonuçları a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı	157
Şekil 2.77.	Süperkapasitör deneysel sonuçlar a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı.....	158
Şekil 2.78.	Süperkapasitör benzetim sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Süperkapasitör akımı, c.) Şarj doluluk oranı.....	159
Şekil 2.79.	Süperkapasitör deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Süperkapasitör akımı, c.) Şarj doluluk oranı.....	160
Şekil 2.80.	Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları.....	161
Şekil 2.81.	Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları.....	162
Şekil 2.82.	Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Batarya akımları, c.) Şarj doluluk oranları	163
Şekil 2.83.	Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Süperkapasitör akımları, c.) Şarj doluluk oranları	164
Şekil 2.84.	Batarya benzetim sonuçları a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı	165

Şekil 2.85.	Batarya deneysel sonuçlar a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı	166
Şekil 2.86.	Batarya benzetim sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Batarya akımı, c.) Şarj doluluk oranı	167
Şekil 2.87.	Batarya deneysel sonuçlar a.) Terminal gerilimi, b.) Süperkapasitör akımı, c.) Şarj doluluk oranı	168
Şekil 2.88.	Süperkapasitör benzetim sonuçları a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı	169
Şekil 2.89.	Süperkapasitör deneysel sonuçlar a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı	170
Şekil 2.90.	Süperkapasitör benzetim sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Süperkapasitör akımı, c.) Şarj doluluk oranı	171
Şekil 2.91.	Süperkapasitör deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Süperkapasitör akımı, c.) Şarj doluluk oranı	172
Şekil 2.92.	Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları	173
Şekil 2.93.	Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları	174
Şekil 2.94.	Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Batarya akımları, c.) Şarj doluluk oranları	175
Şekil 2.95.	Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Süperkapasitör akımları, c.) Şarj doluluk oranları	176
Şekil 2.96.	EYS’lerde batarya gurubuna ait benzetim sonuçlarının karşılaştırılması a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları	177
Şekil 2.97.	EYS’lerde batarya gurubuna ait deneysel sonuçların karşılaştırılması a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları	178
Şekil 2.98.	EYS’lerde batarya gurubuna ait benzetim sonuçlarının karşılaştırılması a.) Terminal gerilimleri, b.) Batarya akımları, c.) Şarj doluluk oranları	179
Şekil 2.99.	EYS’lerde batarya gurubuna ait deneysel sonuçların karşılaştırılması a.) Terminal gerilimleri, b.) Batarya akımları, c.) Şarj doluluk oranları	180
Şekil 2.100.	EYS’lerde süperkapasitör gurubuna ait benzetim sonuçlarının karşılaştırılması a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları	181
Şekil 2.101.	EYS’lerde süperkapasitör gurubuna ait deneysel sonuçların karşılaştırılması a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları	182
Şekil 2.102.	EYS’lerde süperkapasitör gurubuna ait benzetim sonuçlarının karşılaştırılması a.) Terminal gerilimleri, b.) Süperkapasitör akımları, c.) Şarj doluluk oranları	183
Şekil 2.103.	EYS’lerde süperkapasitör gurubuna ait deneysel sonuçların karşılaştırılması a.) Terminal gerilimleri, b.) Süperkapasitör akımları, c.) Şarj doluluk oranları	184

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya türlerinin karşılaştırılması.....	25
Tablo 1.2. 1000mAh bataryanın zamana bağlı olarak deşarj süreleri	29
Tablo 1.3. Süperkapasitörlere ait elektriksel özellikler	33
Tablo 1.4. Enerji depolama elemanlarına ait çeşitli ölçeklendirmeler	41
Tablo 1.5. Ara bağlantı topolojilerinin karşılaştırılması.....	46
Tablo 1.6. Çeviricilere ait denetim parametreleri.....	52
Tablo 1.7. EA parametreleri	57
Tablo 2.1. Tasarlanan çeviriciye ait elektriksel parametreler.....	92
Tablo 2.2. Çalışmada kullanılan batarya özellikleri	112
Tablo 2.3. Çalışmada kullanılan süperkapasitör özellikleri	115
Tablo 2.4. Batarya hücresine ait parametre kestirim değerleri.....	127
Tablo 2.5. Süperkapasitör hücresine ait parametre kestirim değerleri	130
Tablo 2.6. Enerji yönetim sistemlerine ait sayısal sonuçlar	185

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AA	: Alternatif akım
ADÇ	: Analog dijital çevirici
AEK	: Ana enerji kaynağı
AFA-EYS	: Adaptif frekans ayrımlı enerji yönetim sistemi
AGF	: Alçak geçiren filtre
AKF	: Adaptif kesim frekansı
BEA	: Bataryalı elektrikli araçlar
BMD	: Bulanık mantık denetim
BMK	: Bulanık mantık kuramı
BYS	: Batarya yönetim sistemi
ÇUGT	: Çift uyarlanabilir güç tahsisi
DA	: Doğru akım
DAÇ	: Dijital analog çevirici
DGM	: Darbe genişlik modülasyonu
EA	: Elektrikli araç
EM	: Elektrik motoru
EYS	: Enerji yönetim sistemi
FAT-EYS	: Frekans ayrımı tabanlı enerji yönetim sistemi
GKF	: Geri kazanımlı frenleme
HEA	: Hibrit elektrikli araçlar
HEDS	: Hibrit enerji depolama sistemi
İYM	: İçten yanmalı motor
SFA-EYS	: Sabit frekans ayrımlı enerji yönetim sistemi
SKF	: Sabit kesim frekansı
TEA	: Tümüyle elektrikli araçlar
YEK	: Yardımcı enerji kaynağı
YGF	: Yüksek geçiren filtre
$\mu(x)$	: Üyelik fonksiyonu
A_f	: Araç ön yüzey alanı
Ah	: Amper-saat

C_0	: Sabit kapasite
C_1, C_2	: Batarya ve süperkapasitör geçici ve kalıcı durum kapasiteleri
C_d	: Aerodinamik sürtünme katsayısı
C_{dc}	: Bara kapasitesi
C_r	: Hava sürtünme direnci
C_v, C_{diff}	: Diferansiyel kapasite
D_{1-4}	: Serbest geçiş diyotları
D_{bat}, D_{sk}	: Batarya ve süperkapasitör çevirici görev oranları
$de(t)$	: Hatanın değişimi
$e(t)$	: Hata
f	: Frekans
F_a	: Aerodinamik sürtünme kuvveti
f_c	: Filtre kesim frekansı
F_{gr}	: Eğim direnci
f_{high}	: Yük akımının yüksek frekansları
F_i	: Başlama direnci
F_{Load}	: Araca etkiyen toplam kuvvet
f_{low}	: Yük akımının düşük frekansları
F_r	: Tekerlek sürtünme direnci
I_{bat_ref}	: Batarya referans akımı
I_{dbat}	: Batarya çeviricisi çıkış akımı
I_{dsk}	: Süperkapasitör çeviricisi çıkış akımı
I_L	: Yük akımı
I_{sk_ref}	: Süperkapasitör referans akımı
i_1, i_2	: Batarya ve süperkapasitör geçici ve kalıcı durum akımları
i_{bat}	: Batarya akımı
i_{dc}	: Bara akımı
i_{sk}	: Süperkapasitör akımı
j	: Atalet momenti
K_i, K_p	: İntegral ve oransal kazanç katsayıları
L_{bat}	: Batarya çevirici endüktansı
L_{sk}	: Süperkapasitör çevirici endüktansı
m	: Araç ağırlığı

P_{bat}, P_{sk}, P_{dc}	: Batarya, süperkapasitör ve bara güçleri
P_{in}, P_{out}	: Giriş ve çıkış güçleri
Q	: Amper-saat cinsinden batarya kapasitesi
Q_1, Q_2	: Süperkapasitör anlık yükleri
Q_1, Q_2, Q_3, Q_4	: Güç MOSFET'leri
Q_{top}	: Süperkapasitör toplam yükü
r	: Tekerlek yarıçapı
R_1, R_2	: Batarya ve süperkapasitör geçici ve kalıcı durum dirençleri
R_{bat}	: Batarya iç direnci
R	: Batarya çalışma yüzdesi
R_{sk}	: Süperkapasitör iç direnci
SoC	: Doluluk oranı
SoC_0	: Başlangıç doluluk oranı
SoC_{bat}	: Batarya doluluk oranı
SoC_{sk}	: Süperkapasitör doluluk oranı
t	: Zaman
U_1, U_2, U_3	: Batarya geçici durum gerilimleri
V_1, V_2	: Batarya ve süperkapasitör geçici ve kalıcı durum gerilimleri
V_{bat}	: Batarya terminal gerilimi
V_{dc}	: Bara gerilimi
V_{OCV}	: Açık devre gerilimi
V_{sk}	: Süperkapasitör terminal gerilimi
V_T	: Terminal gerilimi
ΔI ve ΔV	: Akım ve gerilimin değişimi
η	: Evirici verimi
ξ	: Sönüm oranı
ρ	: Hava yoğunluğu
τ	: Filtre kesim periyodu
v	: Araç hızı
ω_n	: Doğal frekans

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte dünya genelinde sıvı yakıt kullanılan taşıt sayıları artış göstermektedir. Bu taşıtlara ulaşımdan endüstriye hemen her alanda rastlamak mümkündür. Ancak bu taşıtlarda itme gücünü oluşturan içten yanmalı motorlarda (İYM) meydana gelen yanma olayının sera etkisini tetikleyen yüksek miktarda karbondioksit gazı salımı canlıların yaşam alanlarını kısıtlamaya ve küresel ısınmaya sebep olmaktadır (Gupta vd., 2021). Dünya araç üreticileri karbondioksit emisyonlarını azaltmak için önemli teknolojik ilerlemeler kaydetmiş olsalar da ulaşım sektörü sera gazı emisyonlarının yaklaşık dörtte birinden sorumludur (Napoli vd., 2020). Bunun yanı sıra, sanayi ve ulaşımın vazgeçilmez bir parçası olan fosil yakıtlar, son yıllarda yok olma tehlikesiyle karşı karşıya kalmıştır (Ali vd., 2019). Hem fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar hem de bu yakıtların yakın gelecekte tükenme ihtimali göz önüne alındığında yeni araç teknolojilerinin geliştirilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir.

Gelişen güç elektroniği devreleri ile öne çıkmayı başaran Elektrikli Araçlar (EA) sıvı yakıt kullanan araçlara en önemli rakip haline gelmiştir. İYM'nin daha az çalışmasına katkı sağlayarak hem karbon salımını hem de fosil yakıt tüketimini azaltmak için ilk önce Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA) geliştirilmiştir. Bu araçlar itme gücünü hem sıvı yakıt kullanan İYM'den hem de elektrik enerjisi kullanan bir elektrik motorundan (EM) temin etmektedir. Daha sonra ilerleyen batarya teknolojisine paralel olarak tümüyle elektrikli araçlar (TEA) geliştirilmeye başlanmıştır. Bu araçlarda ise sadece EM bulunur ve itme gücü bir doğru akım (DA) enerji kaynağı üzerinden sağlanır. Bu araçları, kara ulaşımında (Liu vd., 2022), hava ulaşımında (Barzkar & Ghassemi, 2020) ve deniz ulaşımında (Kanellos vd., 2014) görmek mümkündür. Yüksek verim, düşük enerji tüketimi, sessiz çalışma ve sıfır ya da düşük karbon salımı bu araçların sahip olduğu avantajlar arasında gösterilebilir. Günümüzde Çin, Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri kayıtlı EA sayısında dünya liderleridir. Bu ülkelerdeki EA satışlarındaki artış bir önceki yıla göre Çin'de %72, Avrupa'da %39 ve Amerika Birleşik Devletleri'nde %27 oranındadır (Napoli vd., 2020). Günümüzde TEA'larda kullanılan enerji kaynakları arasında batarya, süperkapasitör ve yakıt hücreleri bulunmaktadır.

Batarya türü olarak yüksek güç yoğunluğu, düşük özdeşarj, düşük iç direnç, çevrim ömrünün fazla olması, hafıza etkisinin olmaması, yüksek hücre gerilimi sağlaması gibi avantajlarından dolayı lityum-iyon bataryalar tercih edilmektedir (Patil vd., 2008). Bu özelliklerin yanı sıra lityum-iyon bataryalar düşük güç yoğunluğu, sıcaklık duyarlılığı, derindeşarj meydana gelebilmesi ve yüksek maliyet gibi dezavantajlara sahiptir. Günümüzde çok sayıda bataryalı elektrikli araç (BEA) geliştirilmiş olmasına rağmen bu araçlar hala menzil ve performans bakımından sorunlar yaşamaktadır. Tekil enerji kaynağı olarak bataryanın kullanılması yüksek enerji yoğunluğu gerektiren şehirlerarası sürüşlerde düşük menzil problemlerini meydana getirirken, yüksek güç yoğunluğu gerektiren şehir içi sürüşlerde ise araç performansını kısıtlamaktadır. Özellikle ani hızlanma durumlarında yüksek güç gerektiren yüksek tepe akımlar bataryanın çabuk ısınmasına, ani derindeşarja ve çevrim ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelmek için BEA’da ikincil bir enerji kaynağının kullanılması fikri geliştirilmiştir. Özellikle bataryanın yetersiz kaldığı ani tepe akımların emilmesinde, yüksek güç gerektiren ani hızlanma durumlarında ve yüksek geri kazanımlı frenleme (GKF) enerjisinin depolanmasında kullanılacak yardımcı bir enerji kaynağı ile daha uzun menzil ve daha yüksek performans elde edilebilir.

Son yıllarda hızlı bir gelişme gösteren süperkapasitörler yukarıda verilen özelliklere sahip enerji depolama elemanlarına en iyi aday olarak gösterilebilir. Süperkapasitörler yüksek güç yoğunluğu, yüksek çevrim sayısı, yüksek kapasite, düşük iç direnç gibi önemli avantajlara sahiptir. Bunun yanı sıra terminal geriliminin düşük olması, yüksek maliyet ve düşük enerji yoğunluğu bu enerji depolama elemanlarının dezavantajları arasında gösterilebilir (Poonam vd., 2019).

Gerek bataryanın gerekse süperkapasitörün avantajlarını ön plana çıkardığımızda, bu iki kaynak kullanılarak gerçekleştirilecek hibrit enerji depolama sisteminin (HEDS) oldukça verimli olacağı söylenebilir. Bu durum yüksek enerji yoğunluğu gerektiren şehirler arası sürüş çevrimlerinde bataryanın kullanılması ile menzil sorununun üstesinden gelirken, yüksek güç gerektiren şehir içi sürüşlerde süperkapasitörün kullanılması ile performans sorunlarının aşılabileceğini açıklamaktadır. Ancak birden fazla enerji kaynağının sağladığı avantajlar, beraberinde bazı problemleri de ortaya çıkarmaktadır. Yükün talep ettiği toplam gücün enerji kaynaklarından nasıl temin edileceği, GKF enerjisinin kaynaklara nasıl tahsis edileceği gibi sorular bu problemlere örnek olarak gösterilebilir. Bu sorulara cevap aranan araştırmalar sonucunda enerji yönetimi kavramı ortaya atılmıştır. Enerji yönetimi ilk başlarda BEA’da GKF enerjisinin bataryaya depolanarak aracın menzil ve performans

unsurlarına katkı sağlaması olarak düşünülmüştür. Ancak bu yöntemde yüksek şarj akımlarının depolanamaması, verimliliği %8 ile %25 arasında sınırlamıştır. Bu durumda hem yüksek güç yoğunluğuna sahip hem de yüksek GKF enerjisini depolayabilen bir enerji depolama elamanı olan süperkapasitörlerin yardımcı enerji kaynağı olarak kullanılması ile verimin artırılabilirdiği kanıtlanmıştır. Dolayısıyla batarya ve süperkapasitörün daha önce açıklanan avantajları dikkate alındığında, kaynaklar arasındaki güç tahsisinde kullanılacak enerji yönetiminin bu avantajlara göre gerçekleştirilmesinin daha uygun olacağı söylenebilir.

1.2. Tezin Amacı ve Çözüm Yaklaşımı

Bu tez çalışmasında batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen hibrit enerji depolama sistemine sahip elektrikli araçlar için frekans ayrımı tabanlı enerji yönetim sisteminin hem benzetim hem de deneysel olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Elektrikli aracın hareket için ihtiyaç duyduğu yük akımı kaynakların karakteristik özellikleri hesaba katılarak ayrıştırılmıştır. Bataryalara kıyasla çevrim ömürleri daha uzun olduğu göz önüne alınarak geri kazanımlı frenleme enerjisinin tamamının süperkapasitörlere depolanması ile bataryanın çevrim ömrünün artırılması hedeflenmiştir.

Yukarıda açıklanan çözüm yaklaşımı sayesinde geri kazanımlı frenleme enerjisi ile hızlı bir şekilde şarj olan süperkapasitörün doluluk oranına göre batarya akımı belirli bir çalışma yüzdesi ile sınırlandırılarak ilk kez bu tez çalışmasında önerilen adaptif batarya akımı yöntemi geliştirilmiştir. Sistemin benzetimi MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Deneysel aşamada ise elektrikli aracın motorunu temsilen programlanabilir elektronik yük ve geri kazanımlı frenleme enerjisini üretmek için ise programlanabilir DA güç kaynağı kullanılmıştır.

1.3. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Zhao 2022 yılında yaptığı çalışmada yakıt hücresi, fotovoltaik hücre, batarya ve süperkapasitörden meydana gelen çoklu güç kaynaklarına sahip hibrit güç sistemi için dinamik programlamaya dayalı bulanık mantık denetleyici (BMD) tabanlı enerji yönetim sistemi önermiştir. Sunulan çalışmada dalgacık dönüşümü yöntemi ile alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılan yük akımı, kaynaklara karakteristik özelliklerine göre tahsis

edilmiştir. Önerilen yöntemin klasik kural tabanlı enerji yönetim sistemine kıyasla hidrojen tüketimini %14,39 oranında azalttığını savunmuştur (Zhao, 2022).

Podder ve arkadaşları 2021 yılındaki çalışmalarında yakıt hücresi-batarya, batarya-süperkapasitör, yakıt hücresi-süperkapasitör ve batarya-yakıt hücresi-süperkapasitör olmak üzere dört farklı hibrit güç sistemini ayrı ayrı incelemişlerdir. Enerji kaynaklarının farklı kombinasyonlarını içeren bu güç sistemlerini dinamik performans, pil ömrü, enerji verimliliği ve kontrol teknikleri açısından karşılaştırmışlardır. Sunulan çalışmada batarya-süperkapasitör hibrit güç sistemleri için BMD tabanlı EYS'lerin diğer güç sistemlerine kıyasla daha verimli ve uygulanabilir olduğunu savunmuşlardır (Podder vd., 2021).

Liao ve arkadaşları 2021'de yaptıkları çalışmalarında batarya ve süperkapasitör paketlerinden oluşan HEDS'de ayrıştırılmış frekans ve güç seviyesi yöntemlerinin avantajlarını birleştirerek uyarlanabilir frekans ayrımı tabanlı enerji yönetim sistemi (FAT-EYS) önermişlerdir. Sunulan çalışmada batarya ve süperkapasitör paketlerinin şarj doluluk oranları sayısal olarak belirledikten sonra her bir örnekleme frekansına karşılık gelen güç seviyelerini belirlemek için FFT tabanlı güç spektrumu hesaplama algoritması geliştirmişlerdir. Talep edilen gücü, güç spektrumuna eşleyerek kullanılan alçak geçiren filtrenin (AGF) kesim frekansını adaptif olarak belirlemişlerdir (Liao vd., 2021).

Wang ve arkadaşları 2020'deki çalışmalarında batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen HEDS'ye sahip EA'lar için kaynaklar arasında güç paylaşımı gerçekleştirmek için gerçek zamanlı ortalama güç yöntemine dayalı kural tabanlı bir güç ayırım stratejisi önermişlerdir. Güç bölme işlemini yüksek frekanslı güç talebi yerine düzgün ortalama güce yanıt verecek şekilde tasarladıklarından bataryayı yüksek frekans akımlarından korumayı amaçlamışlardır. Önerilen yöntem sayesinde klasik kural tabanlı yönteme kıyasla çeviricilerin enerji kayıplarının, enerji tüketiminin ve sistem veriminin yaklaşık %2 oranında iyileştirilebildiğini savunmuşlardır (Wang vd., 2020a).

Zhang ve Li 2020 yılında yaptıkları çalışmada batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen ve süperkapasitör yarı aktif devre topolojisi kullandıkları HEDS'de yük akımının filtrelenmesi ile BMD kombinasyonuna dayalı gerçek zamanlı bir EYS önermişlerdir. Çalışmalarını üç farklı sürüş çevrimi için sadece pil paketleri içeren EA ile bataryanın hizmet ömrü bakımından karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre önerdikleri yöntemin Yeni Avrupa Sürüş Çevrimine (NEDC) kıyasla %44,42, Otoyol Sürüş Çevrimine (HWDC) kıyasla %30,44, Hindistan Kentsel Sürüş Çevrimine (IUDC) kıyasla %57,16 oranında batarya hizmet ömrünü artırdığını savunmuşlardır (Zhang & Li, 2020).

Wu ve arkadaşları 2020 yılında yaptıkları çalışmada batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen EA'lar için yapay potansiyel alan kullanan uyarlanabilir bir güç tahsis stratejisi önermişlerdir. Yapay potansiyel alan tekniğini süperkapasitörün minimum deşarj ve maksimum şarj akım sınırlamalarını garanti altına almak için kullanmışlardır. Ek olarak DA bara gerilimini daha kararlı hale getirmek için yük değişimlerini önceden telafi edebilen ileri beslemeli kompensatör kullanmışlardır. Sunulan çalışmayı farklı süperkapasitör başlangıç şarj durumları ve farklı sürüş döngülerinde deneysel olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre özellikle şehir içi sürüşlerde pil kapasite kaybında yaklaşık %15 oranında azalma olduğunu savunmuşlardır (Wu vd., 2020).

Wang ve arkadaşları 2020 yılında yaptıkları çalışmada batarya ve süperkapasitör paketlerinden oluşan HEDS için uyarlanabilir model öngörülü kontrol tekniği önermişlerdir. Her iki enerji depolama elemanının ortak bir DA baraya bağlanması sonucu ortaya çıkan gerilim salınımlarını önlemek amacıyla süperkapasitör yarı aktif topoloji kullanmışlardır. Kullanılan enerji depolama elemanlarının boyutlarını sürüş çevriminin tamamlanması için gereken yük akımına göre belirlemişlerdir. Önerilen tekniğin üç farklı sürüş çevrimine uygulanması ile batarya tepe akımlarının en az %24,4 ve toplam enerji kaybının %6,4 oranında azaltılabileceğini savunmuşlardır (Wang vd., 2020b).

Snoussi ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları çalışmada yakıt hücresi-batarya ve süperkapasitör paketlerinden oluşan HEDS'de enerji kaynaklarının DA baraya bağlanması için tam aktif topoloji yapısı kullanmışlardır. Benzetim modeli olarak gerçekleştirilen çalışmada enerji kaynaklarının elektriksel eşdeğer devre modellerini kullanmışlardır. Enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımını gerçekleştirmek için iki farklı kesme frekansına sahip iki adet AGF kullanmışlardır. Enerji kaynaklarından temin edilmesi gereken akımları yine enerji kaynaklarının dinamik kısıtlamalarını ve enerji kapasitesi sınırlarını hesaba katarak belirlemişlerdir (Snoussi vd., 2019).

Nguyen ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları çalışmada batarya ve süperkapasitör paketlerine sahip EA'lar için optimizasyon tabanlı çözümlerin gerçek zamanlı sistemlere uyarlanmasının zorluklarından kaçınmak amacıyla uyarlanabilir bir çevrimdışı EYS sistemi önermişlerdir. Optimizasyon yöntemi olarak Pontryagin Minimum İlkesi kullandıkları çalışmalarında hem batarya akımını hem de DA bara akımını taklit etmesi için süperkapasitör paketleri kullanmışlardır. Önerdikleri strateji ile düşük, orta ve yüksek hızda

olmak üzere üç ayrı sürüş çevrimi için gerçekleştirdikleri testlerin sonucunda etkin batarya akımının %50 oranında azaltılabileceğini savunmuşlardır (Nguyen vd., 2019).

Lu ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptıkları çalışmalarında batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen HEDS'lerde kaynaklar arasındaki güç dağılımını sağlamak için çok amaçlı optimizasyon stratejisine sahip EYS önermişlerdir. Optimizasyon hedefi olarak sistemde daha az güç kaybı, batarya için daha uzun pil ömrü ve süperkapasitörün daha kararlı terminal gerilimi sağlaması olarak üç farklı fonksiyon seti kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçları sadece batarya paketleri içeren EA ve kural tabanlı HEDS ile karşılaştırmaları sonucunda önerdikleri yöntemin daha stabil bir batarya akımı sağladığını, süperkapasitörün yüksek frekanslı akım bileşenlerini daha iyi soğurduğunu ve daha kararlı bir DA bara gerilimi sağladığını savunmuşlardır (Lu vd., 2019).

Vidhya ve Balaji 2019 yılında üç tekerlekli hafif EA için tasarladıkları HEDS'de batarya grubunu Ana Enerji Kaynağı (AEK) ve süperkapasitör grubunu ise Yardımcı Enerji Kaynağı (YEK) olarak belirlemişlerdir. Enerji kaynaklarının ortak bir DA baraya bağlanması için süperkapasitör yarı aktif devre topolojisi kullanmışlardır. AEK ve YEK arasındaki güç dağılımını sağlamak için kural tabanlı ile yük akımının filtrelenmesine dayalı EYS'lerin avantajlarını içeren yeni bir EYS önermişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre önerdikleri yöntemin, sadece batarya kullanan EA'lara kıyasla yaklaşık %30, yük akımının filtrelenmesi yöntemine kıyasla yaklaşık %11 ve kural tabanlı EYS'ye kıyasla yaklaşık %7 oranında bataryadan daha az akım çekildiğini savunmuşlardır (Vidhya & Balaji, 2019).

Eldeeb ve arkadaşları 2019 yılında EA'lar için enerji kaynaklarının boyutlandırılması ve bu kaynaklar arasındaki güç paylaşımını sağlamak için yaptıkları çalışmada çok amaçlı optimizasyon tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmalarında HEDS'nin maliyetini ve boyutunu en aza indirmeyi, batarya ve süperkapasitör paketlerinin çevrim oranını artırmayı amaç fonksiyon olarak kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre önerdikleri yöntemin diğer boyutlandırma yöntemlerine kıyasla maliyeti %40 oranında düşürdüğünü, EA'da kullanılan EM'nin verimliliği arttıkça HEDS'nin maliyetinin azalacağını ancak bu verimliliğin enerji kaynaklarının güç paylaşım oranına hiçbir etkisinin olmadığını savunmuşlardır (Eldeeb vd., 2019).

Traore ve arkadaşları 2019'da yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör içeren HEDS'ye sahip EA'lar için yük akımının frekans ayırma ve BMD'ye dayalı EYS önermişlerdir. Her bir enerji kaynağını ortak DA baraya bağlamak için kaynakların çıkışına DA/DA çevirici yerleştirilen tam aktif topoloji yapısını kullanmışlardır. Önerdikleri EYS'de

kaynaklar arasındaki güç dağılımını, en yüksek frekans bileşenlerine sahip yük akımlarını süperkapasitörlere ve en düşük frekans bileşenlerine sahip yük akımlarını yakıt hücresine yönlendirmek suretiyle gerçekleştirmişlerdir (Traoré vd., 2019).

Manandhar ve arkadaşları 2019 yılında fotovoltaiik panel, batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen mikro şebeke bağlantılı hibrit güç sistemi için enerji üretim, tüketim ve yük bozulmalarına karşı daha hızlı gerilim regülasyonu sağlamak amacıyla bir EYS önermişlerdir. Ek olarak batarya grubu ile şebeke arasındaki dinamik güç paylaşımını, bataryanın doluluk oranına göre belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre yük bozulmalarındaki akımın tepe aşım değerinde yaklaşık %20 oranında iyileştirme sağladıklarını öne sürmüşlerdir (Manandhar vd., 2019).

Hussain ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları çalışmada, güç yoğunluğu eksikliğini gidermek için BEA'lara süperkapasitör paketleri dahil ederek bataryanın dinamik eksikliklerini gidermeyi amaçlayan EYS önermişlerdir. Sunulan çalışmada BMD tabanlı AGF ile enerji kaynakları arasındaki güç dağılımını, yük akımının genliğini ve süperkapasitör paketlerinin doluluk oranını kullanarak Adaptif Alçak Geçiren Filtrenin (A-AGF) kesme frekansına göre belirlemişlerdir. Ek olarak Geri Kazanımlı Frenleme (GKF) enerjisini kaynaklara uygun bir şekilde depolamak için uyarlanabilir Oransal+İntegratör (PI) denetleyici tabanlı şarj kontrolör tasarlamışlardır. Önerdikleri yöntemin batarya güç kaybının, sabit frekans ayırımı tabanlı EYS'lere kıyasla yaklaşık %30 oranında iyileştirdiğini savunmuşlardır (Hussain vd., 2019).

Mamun ve arkadaşları 2019 yılında sürekli çalışma durumunda bulunan askeri araçlarda içten yanmalı motora yardımcı olmak ve yakıt maliyetlerini düşürmek amacıyla enerji depolama elemanı olarak yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum-iyon batarya ve yüksek güç yoğunluğuna sahip süperkapasitör paketleri kullanmışlardır. Süperkapasitör yarı aktif topoloji kullandıkları çalışmalarında kontrol parametrelerini, enerji kaynaklarının hacimsel boyutlandırılmasını ve güç ayırım stratejisini Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre önerdikleri yöntemin sadece batarya bulunan hibrit araca göre yakıt tüketimini %13 oranında azalttığını öne sürmüşlerdir (Mamun vd., 2019).

Wu ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları çalışmada batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen HEDS'lerde enerji kaynaklarının ortak bir DA baraya bağlanması sonucunda ortaya çıkan bara gerilimindeki salınımı azaltmak amacıyla ileri beslemeli yük kompansatörü geliştirmişlerdir. Yük akımının düşük frekanslı bileşenlerini

batarya grubundan ve yüksek frekanslı bileşenlerini ise süperkapasitör grubundan tahsis eden AGF yapısı kullanmışlardır. Önerdikleri yöntem sayesinde DA bara gerilimindeki salınımı, özellikle yük akımının ani değiştiği bölgelerde önemli ölçüde azaltıldığını savunmuşlardır (Wu vd., 2019).

Snoussi ve arkadaşları 2018 yılında yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör grubundan oluşan EA'lar için hem enerji kaynaklarının hacimsel boyutlandırılmasında hem de kaynaklar arasındaki güç dağılımını ayarlayan AGF'nin optimum kesme frekansının belirlenmesinde çok amaçlı gri kurt optimizasyon yöntemini kullanmışlardır. Önerdikleri yöntemde güç sisteminin toplam ağırlığını minimize etmeyi ve bu ağırlığın güç talebi üzerindeki etkisini NEDC ve Kentsel Dinamometre Sürüş Çevrimi (UDDS) üzerinde incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre hem hacimsel boyutlandırmanın hem de filtrelerin kesim frekansının, kaynakların dinamik limitlerine ve depolama kapasitelerine göre optimum şekilde belirlenebildiğini öne sürmüşlerdir (Snoussi vd., 2018b).

Kıyaklı ve Solmaz 2018 yılında EA'ların belirli bir sürüş çevrimini tamamlaması için gereken yük akımının elde edilmesini etraflıca inceledikleri çalışmalarında sadece batarya paketlerinden meydana gelen EA'lar için GKF'nin ve araç ağırlığının enerji tüketimine etkisini incelemişlerdir. GFK enerjisi ile bataryayı şarj etmenin dört farklı sürüş çevrimi için ortalama %8 oranında enerji verimliliği sağladığını ve araç ağırlığı ile hava sürtünme katsayısının artmasının ise enerji verimliliğine negatif yönde etki ettiğini öne sürmüşlerdir. Çalışmalarını MATLAB/Simulink ortamında benzetim yoluyla modellemişlerdir (Kıyaklı & Solmaz, 2018).

Mehdi ve arkadaşları 2018 yılında batarya ve süperkapasitör gruplarından oluşan hibrit güç sistemi için yük akımının filtrelenmesine dayalı gerçek zamanlı EYS önermişlerdir. Yük akımının filtrelenmesi ile enerji kaynakları arasındaki güç dağılımını sağlamak için klasik FAT-EYS'den farklı olarak filtre kesim frekansının belirlenmesinde hem yük akımının genliğini hem süperkapasitör hem de batarya paketlerinin şarj doluluk oranlarını dikkate almışlardır (Mehdi vd., 2018).

Marzougui ve arkadaşları 2018'de yaptıkları çalışmada AEK olarak yakıt hücresi ve YEK olarak süperkapasitör içeren hibrit güç sistemine sahip EA'lar için yük akımının frekans ayırımına dayalı EYS önermişlerdir. Çalışmalarında bir AGF yardımıyla alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılan yük akımının, alçak bileşenlerini yakıt hücresinden ve yüksek bileşenlerini süperkapasitörden temin etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre

önerdikleri yöntemin hidrojen tüketimini azalttığını ve enerji verimliliğini artırdığını savunmuşlardır (Marzougui vd., 2018).

Snoussi ve arkadaşları 2018 yılında yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitörden meydana gelen HEDS'ye sahip EA'lar için hidrojen tüketimini minimize etmek, batarya ve süperkapasitör grubunun kabul edilebilir depolama sınırlarını korumak amacıyla iki farklı AGF kullandıkları bir EYS önermişlerdir. Yakıt hücresinin sağlayacağı akım değerini, yük akımının genliğine bağlı olarak, batarya ve süperkapasitör paketlerinin sağlayacağı akım değerlerini ise BMD tabanlı adaptif AGF ile sağlamışlardır. Tam aktif topoloji yapısı kullandıkları hibrit güç sisteminde çeviricilerin denetimini kayan kipli kontrol ile sağlamışlardır (Snoussi vd., 2018a).

Azizi ve Radjeai 2018'de batarya ve süperkapasitör paketlerinden oluşan EA'larda her bir kaynağın güç akışını ayrı ayrı denetlemek için iki çift yönlü çevirici kullanmışlardır. Kaskad denetim olarak adlandırılan tekniği kullanarak her bir enerji kaynağının çıkış gerilimini, kaynaklardan çekilen akımları kontrol ederek ortak bir DA bara gerilimine yükseltmişlerdir. Çalışmalarında öne çıkan yaklaşım, araç durma aşamasında veya araca uygulanan yük küçük olduğunda batarya grubundan süperkapasitör grubuna enerji aktararak süperkapasitör paketlerini her an aktif bir şekilde kullanmalarındır (Azizi & Radjeai, 2018).

Sandoval ve arkadaşları 2017'de yaptıkları çalışmada yakıt hücresi ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen HEA'lar için enerji kaynaklarının dinamik özelliklerini göz önünde bulundurarak FAT-EYS önermişlerdir. Önerdikleri yöntemin uygulanmasını üç farklı seviyeye ayırarak, birinci seviyede DA bara gerilim denetimini, ikinci seviyede EYS stratejisini, üçüncü seviyede ise hem yakıt hücresinin hem de süperkapasitör grubunun ortak DA baraya bağlanması için gereken güç çeviricilerinin denetimini gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri yöntemin etkinliğini UDDS ve ECE-15 sürüş çevrimleri üzerinde benzetim yoluyla doğrulamışlardır (Sandoval vd., 2017).

Trovao ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada sadece batarya paketleri içeren üç tekerlekli araç prototipine süperkapasitör paketleri dahil ederek her iki güç sistemini karşılaştırmışlardır. Batarya ve süperkapasitör arasındaki güç dağılımını sağlamak için BMD tabanlı bir güç ayırım stratejisi önermişlerdir. Bu stratejide kullanılan BMD'yi batarya ve süperkapasitör gücüne göre yük akımına süperkapasitör tarafından sağlanacak katkı oranını belirlemek için kullanmışlardır. Elde ettikleri benzetim sonuçlarına göre enerji kaynağı olarak sadece batarya paketleri içeren EA'ya kıyasla enerji tüketiminde %3 oranında ve etkin batarya akımında %12 oranında bir azalma olduğunu öne sürmüşlerdir (Trovão vd., 2017b).

Trovao ve arkadaşları 2017 yılında batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen hibrit güç sistemine sahip EA'lar için BMD tabanlı filtreleme tekniğine dayalı sürüş koşullarından ve sürüş çevriminden bağımsız çevrimiçi EYS önermişlerdir. Önerdikleri EYS'de yük akımının AGF ile alçak ve yüksek bileşenlerine ayırarak batarya akımını belirli bir aralıkta sınırlamışlardır. Enerji kaynaklarının akımlarını denetlemek amacıyla tam aktif topoloji yapısı kullandıkları çalışmalarında hem DA çeviricileri hem de DA bara gerilimini PI denetleyici ile kontrol etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre batarya tepe akımlarının %50 oranında azaltılabileceğini savunmuşlardır (Trovão vd., 2017a).

Porru ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada mikro şebekelerin verimini artırmak için kullanılan batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen HEDS'lerde enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımını yük akımının filtrelenmesi tekniği ile sağlamışlardır. Her iki enerji kaynağı için gerek güç sağlamada gerekse mikro şebekedeki fazla enerjiyi depolamada yüksek frekansa sahip akımları süperkapasitör paketlerine yönlendirerek bataryayı aşırı şarj veya deşarj durumundan korumayı amaçlamışlardır. Yük akımının filtrelenme işleminde AGF kullanılmış ve filtre kesim frekansını, yük gücünün ortalama değerine göre belirlemişlerdir (Porru vd., 2017).

Sun ve arkadaşları 2017 yılında üç seviyeli süperkapasitör yarı aktif devre topolojisi kullandıkları çalışmalarında batarya ve süperkapasitör arasındaki güç dağılımını uyarlamalı olarak sağlamak üzere bir algoritma geliştirmişlerdir. Yüksek GKF enerjilerinin tamamını süperkapasitör paketlerine depolamak suretiyle bataryanın ani şarj akımlarından etkilenmesinin önüne geçmişlerdir. Enerji kaynakları arasındaki güç dağılımını, yük akımının Fourier Dönüşümü (DFT) ile belirledikleri kesme frekansını kullanarak AGF ile adaptif olarak sağlamışlardır. Önerdikleri yöntemin, sadece batarya paketleri içeren EA'lara kıyasla hızlanmada ortalama %16 ve GKF'de ortalama %7,5 oranında enerji verimliliğini artırdığını öne sürmüşlerdir (Sun vd., 2017).

Castangs ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmada batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen EA'larda kaynaklar arasındaki güç paylaşımı için yaygın olarak kullanılan optimizasyon tabanlı strateji ile filtreleme tabanlı tekniği gerçek zamanlı olarak karşılaştırmışlardır. Her iki EYS'de şarj doluluk oranını belirli bir aralıkta sınırlandırdıkları süperkapasitörü aşırı deşarj ve aşırı şarj durumundan korumayı amaçlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre süperkapasitörün gerilim aralığının düşük olduğu durumlarda filtreleme tekniğinin daha uygun olduğunu savunmuşlardır (Castangs vd., 2016).

Yin ve arkadaşları 2016 yılında batarya ve süperkapasitör paketleri içeren EA'lar için BMD tabanlı, kaynaklar arasındaki güç paylaşımını adaptif oranda tahsis eden ve önceden herhangi bir sürüş bilgisi gerektirmeyen EYS önermişlerdir. Önerdikleri teknikte bataryayı mümkün olduğu kadar yüksek frekanslı akımlardan korumayı ve sürüş çevrimi sonunda süperkapasitör doluluk oranını farkını en aza indirmeyi hedefleyerek sistem veremliliğini artırmayı amaçlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre önerdikleri yöntemin hem şehir içi hem de otoyol sürüş çevrimlerinde oldukça etkili olduğunu, deneysel sonuçların %5'in altında bir hata ile benzetim sonuçlarını sağladığını öne sürmüşlerdir (Yin vd., 2016).

Gökçe ve Özdemir 2016'da batarya ve süperkapasitör paketleri içeren hibrit güç sistemine sahip elektrikli otobüs için üç aşamadan oluşan kural tabanlı güç ayırım stratejisine dayalı EYS önermişlerdir. Bu aşamalardan birincisini yük akımının yönü, ikincisini enerji kaynaklarının doluluk oranlarına göre yeni ağırlıklandırma parametrelerinin hesaplanması ve üçüncüsü ise ilk iki kurala bağlı olarak gerçekleştirilen güç dağıtım oranı olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre güç sisteminin sadece bataryalardan meydana gelmesi durumuna kıyasla batarya tepe şarj akımını %50 ve batarya tepe deşarj akımını %25 oranında düşürüldüğünü belirtmişlerdir (Gokce & Ozdemir, 2016).

Urtasun ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmada iki fotovoltaiik panel ve iki batarya ve çok sayıda elektrikselle yükten meydana gelen şebeke bağlantılı dağıtık üretim tesisleri için yük akımındaki frekans değişikliklerine dayalı EYS önermişlerdir. Çalışmada öne çıkan yaklaşım kaynaklar arasındaki enerji akışını sağlayan merkezi işletim birimindeki haberleşme kablolarının tamamen ortadan kaldırılması ve güç paylaşımının tamamen yük akımının frekansına bağlı olarak gerçekleştirilmesidir. Önerdikleri yöntemi benzetim ve deneysel çalışmalarla doğrulamışlardır (Urtasun vd., 2015).

Bellache ve arkadaşları 2015'de içten yanmalı dizel motor, lityum-iyon batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen hibrit güç sistemine sahip bir tekne için FAT EYS önermişlerdir. Kullandıkları enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımını yük akımının frekansına göre en yüksek frekanslı akımları süperkapasitör grubuna ve en düşük frekanslı akımları dizel motora yönlendirmek amacıyla iki AGF kullanmışlardır. Filtre kesim frekanslarını enerji kaynaklarının güç değerlerine göre sabit oranda belirlemişlerdir (Bellache vd., 2015).

Florescu ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmada batarya ve süperkapasitör paketlerinden oluşan HEDS'ler için adaptif frekans ayırımına dayalı EYS önermişlerdir. Enerji kaynaklarını ortak DA baraya bağlamak için tam aktif topoloji kullandıkları

çalışmalarında kaynaklar arasındaki güç dağılımını hem alçak hem de yüksek geçiren filtre kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Filtrelerin kesim frekansının belirlenmesinde yük akımının genliğini ve süperkapasitör gerilimini dikkate alarak adaptif oranda tahsis etmişlerdir. Süperkapasitör paketlerini derin şarj ve deşarjdan korumak için minimum ve maksimum seviyelerini belirledikleri gerilim aralıklarında EYS'ye dahil etmişlerdir (Florescu vd., 2015).

Trovao ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmada biri yüksek özgül güce ve diğeri yüksek özgül enerjiye sahip farklı özelliklere sahip iki kaynak arasında enerji ve güç paylaşımı sağlamak için bir kural tabanlı meta sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Batarya ve süperkapasitör şarj doluluk oranlarını temsil eden bir haritalama yöntemiyle enerji kaynaklarından çekilebilecek akımları belirlemişlerdir. Harita üzerindeki minimum, maksimum ve bu iki sınır arasında kalan değerlere göre oluşturdukları kurallara göre kaynakların görev oranlarını belirlemişlerdir (Trovão vd., 2015).

Ostadi ve Kazerani 2015 yılındaki çalışmalarında elektrikli şehir otobüslerinde sadece batarya, sadece süperkapasitör, batarya ve süperkapasitör HEDS kullanılması durumunda enerji depolama birimlerinin optimal boyutlandırılması için karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirmişlerdir. PSO tabanlı optimizasyon tekniği önerdikleri bu analizde, seçilen güç sistemi konfigürasyonunun enerji depolama biriminin hacimsel boyutuna etkisini amaç fonksiyon olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre depolama sisteminin maliyetinin doğrudan seçilen konfigürasyonun türüne bağlı olduğunu öne sürmüşlerdir (Ostadi & Kazerani, 2015).

Santucci ve arkadaşları 2014'de içten yanmalı motor kullanan bir araca batarya ve süperkapasitör paketlerini dahil ederek paralel hibrit elektrikli araç yapısı benimsedikleri çalışmalarında model öngörülü denetim ve dinamik programlama tabanlı güç ayırımı stratejisi önermişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre sadece batarya paketleri içeren EA'ya kıyasla, kural tabanlı stratejinin etkin pil akımını %67 ve batarya tepe akımını %38 oranında azalttığını savunmuşlardır. Model öngörülü denetim stratejisi kural tabanlı tekniğe kıyasla etkin batarya akımını %6 ve batarya tepe akımını %17 oranında azaltırken, dinamik programlama tekniğinin bu değerleri %10 ve %45 oranında azalttığını öne sürmüşlerdir (Santucci vd., 2014).

Amin ve arkadaşları 2014 yılında yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen hibrit güç sisteminde enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımını gerçekleştirmek için yavaş dinamiklere sahip yakıt hücresi ve batarya grubunun

akım eğimlerini sınırlamak ve daha kararlı DA bara gerilimi sağlamak amacıyla EYS önermişlerdir. Önerdikleri teknikte enerji kaynaklarını ortak DA baraya bağlamak için kullandıkları çeviricilerin izlemesi gereken referans akımları model öngörülü denetim tekniği ile sağlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre DA bara geriliminin %6,23'lük aşım ve %4,25'lik dalgalanma ile iyi bir şekilde düzenlendiğini öne sürmüşlerdir (Amin vd., 2014).

Long ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları çalışmada sadece batarya grubu içeren EA'larda GKF verimliliğinin iyileştirilmek, EA'nın sürüş menzilini ve batarya kullanım ömrünün artırmak için güç sistemine süperkapasitör paketleri dahil ederek batarya ve süperkapasitör grubunun akımlarını H_{∞} denetim ile gerçekleştirmişlerdir. Yük akımını enerji kaynakları arasındaki paylaşımını AGF kullanarak elde etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre önerdikleri yöntemle, aynı koşullar altında oransal+integral+türevsel (PID) denetleyici kullanılması durumuna kıyasla yaklaşık %5,3 oranında daha fazla GKF'nin depolanabileceğini savunmuşlardır (Long vd., 2014).

Kollimalla ve arkadaşları 2014'de fotovoltaik panel, batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen HEDS'ler için batarya akımının sabit oranda sınırlanmasına dayanan EYS önermişlerdir. Önerdikleri yöntemde bir AGF kullanarak yük akımını alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayırmak suretiyle enerji kaynaklarına tahsis etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, önerdikleri yöntemin model öngörülü denetime kıyasla, daha hızlı DA bara gerilim regülasyonu sağladığını, bataryanın daha düşük şarj ve deşarj akımlarına maruz kaldığını ve batarya ömrünü uzattığını öne sürmüşlerdir (Kollimalla vd., 2014).

Motapon ve arkadaşları 2014 yılında yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen güç sistemine sahip bir elektrikli uçak için durum makinesi denetimi, kural tabanlı bulanık mantık denetim, klasik PI denetim, adaptif frekans ayırmalı denetim yöntemlerine dayalı EYS'leri karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre sürüş çevrimi sonunda batarya doluluk oranının en yüksek olduğu ve yakıt hücresi tepe akımlarının en düşük olduğu EYS'nin frekans ayırımına dayalı EYS olduğunu savunmuşlardır (Motapon vd., 2014).

Xiaoliang ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları çalışmada batarya ve süperkapasitör paketlerinden oluşan bir EA prototipi için yük akımının filtrelenmesi tekniğine dayalı EYS önermişlerdir. EA'nın sürüş çevrimini kentsel ve otoyol sürüşleri için iki ayrı bölgeye ayırarak filtre kesim frekansını sürüş çevrimine göre sabit oranda tahsis etmişlerdir. Önerdikleri yöntemi ölçeklenmiş NEDC sürüş çevrimi üzerinde süperkapasitör yarı aktif

devre topoloji kullanarak test etmişlerdir. Filtre kesim frekansını 0,01-1Hz aralığında seçmişlerdir (Xiaoliang vd., 2013).

Blanes ve arkadaşları 2013’de batarya grubunu yüksek tepe akımlarından korumak ve batarya hizmet süresini uzatmak amacıyla süperkapasitör grubunu dahil ettikleri hibrit güç sistemi için EYS önermişlerdir. Süperkapasitör yarı aktif topoloji benimsedikleri çalışmalarında çeviricilerin denetimini alanda programlanabilen kap dizisi (FGPA) ile gerçekleştirmişlerdir. Yarı aktif topolojinin kullanımından kaynaklanan çevirici kayıplarının toplam tüketime etkisinin az olduğunu ancak start-stop sürüşlerinde bu kayıpların çok daha fazla olduğunu öne sürmüşlerdir (Blanes vd., 2013).

Lahyani ve arkadaşları 2013 yılında kesintisiz güç kaynaklarında bataryaya uygulanan tepe gücü yumuşatmak ve kısa şebeke kesintileri sırasında tam güç sağlamak için yüksek maliyetlerinden dolayı optimal şekilde boyutlandırılmış süperkapasitör paketleri kullanmışlardır. Çalışmalarında öne çıkan yaklaşım, süperkapasitör paketlerini batarya tarafından makul bir oranda şarj ederek ani değişen yük koşullarının tamamını süperkapasitörler tarafından karşılanmasıdır. Elde ettikleri sonuçlara göre 10 saniyeden kısa süren kesintilerde süperkapasitör paketlerinin tüm yük gücünü sağlayabileceğini savunmuşlardır (Lahyani vd., 2013).

Silva ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları çalışmada yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen HEDS’ler için yük akımının çevrimiçi filtrelenmesine dayalı EYS önermişlerdir. Batarya ve süperkapasitör için çift yönlü çevirici ve yakıt hücresi için yükselten çevirici kullanmışlardır. Enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımını tek AGF kullanarak ve filtre kesim frekansını sabit oranda tahsis ederek gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre önerdikleri yöntemin sadece enerji sağlamada değil aynı zamanda hem GKF enerjisini depolamada hem de yük değişimlerinden bağımsız koşullarda etkili olduğunu savunmuşlardır (Silva vd., 2013).

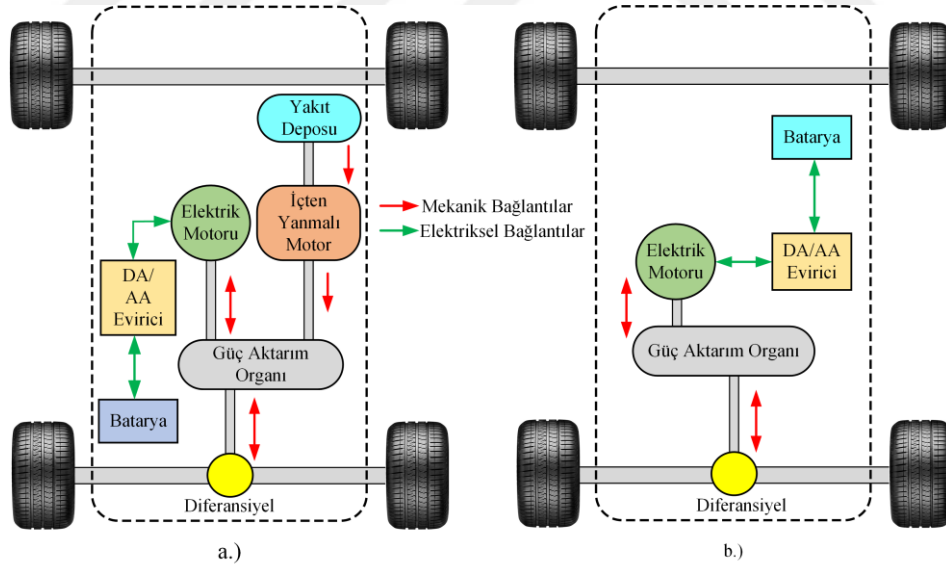
Florescu ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen hibrit güç sistemi için önerdikleri EYS tekniğinde enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımını bir AGF ve bir YGF kullanarak sağlamışlardır. Batarya grubunun referans akım değerini belirlemek için kullanılan AGF’nin kesim frekansını batarya üreticisinin sağladığı maksimum akım eğimini hesaba katarak ve seçilen süperkapasitör boyutuna göre belirlemişlerdir (Florescu vd., 2012).

Azib ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları çalışmada yakıt hücresi ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen HEDS’ler için önemli parametrelerden bir olan DA bara

geriliminin regülasyonuna dayanan EYS önermişlerdir. DA bara geriliminin hızlı regülasyonu için süperkapasitör yarı aktif topoloji kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre tüm geçici yük taleplerinin süperkapasitör grubu tarafından karşılanabildiğini ve tüm sürüş çevrimi boyunca enerji kaynaklarının gerekli olan yük gücünü üstlenebildiğini savunmuşlardır (Azib vd., 2010).

1.4. Elektrikli Araçlar

Elektrikli araçlar, Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEA) ve Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA) olmak üzere iki guruba ayrılabilir. HEA’larda itme gücü İYM ve EM tarafından birlikte sağlanabilir. Ana itme gücü İYM tarafından karşılanırken, anlık performans gerektiren durumlarda veya araç yavaşlama eğilimi gösterdiğinde bir batarya üzerinden beslenen EM’nin desteği ile enerji tüketimi azaltılır. BEA’larda ise sadece batarya aracılığı ile beslenen ve ana itme gücünü üreten bir EM bulunur. HEA ve BEA yapısı Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Elektrikli araçların genel yapısı, a.) HEA, b.) BEA

Şekil 1.1’den görüldüğü gibi yakıt deposu ve İYM dışında HEA ve BEA yapıları birbirine benzemektedir. İYM’nin ağırlığı düşünüldüğünde BEA’ların, HEA’lara kıyasla daha hafif olabileceği ihtimal dahilindedir. Bu durum verimlilik açısından pozitif bir etki sağlayabilir. Ancak fosil yakıtlara kıyasla birim hacim başına üretilen enerji miktarı batarya

kullanılan araçlarda daha az olduğu için bu verimlilik günümüz teknolojisinde yüksek değerlere ulaşamamaktadır.

BEA’larda ise tekil enerji kaynağı olarak bataryalar kullanıldığından güç, menzil ve performans sorunları baş göstermiştir. Her ne kadar Batarya Yönetim Sistemleri (BYS) ile bu sorunlar aşılamaaya çalışılsa da BEA’larda enerji kaynağı olarak sadece bataryaların kullanılmasının bazı dezavantajları mevcuttur. Güç ve performans gerektiren sürüş çevrimlerinde meydana gelebilecek tepe akımlar bataryada aşırı ısınmaya sebep olarak bataryanın kullanım ömrünü azaltabilir. Batarya maliyetleri göz önüne alındığında bu durumun tüketiciler için olumsuz bir etki meydana getireceği açıktır. Dolayısıyla tıpkı HEA’lardaki gibi ikincil bir enerji kaynağının kullanılması bataryanın stresini azaltarak daha uzun ömürlü ve daha verimli kullanımına imkân sağlar. EA’larda birden fazla elektriksel kaynağının kullanılması ile ortaya çıkan Hibrit Enerji Depolama Sistemleri (HEDS) bu temele dayanmaktadır.

1.4.1. Elektrikli Araçların Tarihçesi

Dünya genelinde giderek artan taşıt sayısı, beraberinde hava kirliliğini ve gürültü kirliliğini de artırmış ve bu durum canlıların ihtiyaç duyduğu yaşam alanlarını kısıtlamaya başlamıştır. Fosil yakıtların hem hava kirliliğine neden olması hem de gelecek yıllarda tükenme ihtimali ile karşı karşıya kalması, araştırmacıları taşıt teknolojisi için alternatif hareket kaynakları aramaya yöneltmiştir. Bu arayış, araştırmacıları tarihsel olarak çok eski olmayan yeni bir taşıt teknolojisini tekrar gündeme getirmeye öncü olmuştur.

1800 yılında Alessandro Volta’nın bataryayı geliştirmesi sayesinde 1832 yılında Robert Anderson tarafından gerçekleştirilen ilk prototip ile BEA taşıt teknolojisinde fosil yakıt kullanan araçlara rakip olarak ortaya çıkmıştır. BEA o yıllarda bile kullanım ve konfor bakımından İYM kullanan araçlara kıyasla çok daha üstün olmuştur. Ancak o yıllarda bataryaların yeniden şarj edilememesi, elektrik motorlarının düşük güçlerde ve büyük boyutlarda üretilebilmesi, BEA’ın hem düşük güçte olmasına hem de kullanılan bataryaların çok kısa mesafelerde tükenmesine neden olmuştur. Bu gelişmelerden sonra 1859 yılında Gaston Plante kurşun-asit karışımı yeniden şarj edilebilir bataryayı tasarlamıştır. 1881 yılında ise Camille Faure bu tasarımı geliştirerek günümüzde otomobillerde kullanılan ve otomobilin elektriksel parçalarına enerji sağlayan akülerin gelişimine önemli bir katkı sağlamıştır (Dell & Rand, 2001).

1800'den 1859'a kadar BEA tarihinde sadece yeniden şarj edilebilen batarya geliştirilebilmiştir. Buna paralel olarak İYM kullanılan araçlar seri üretim, yüksek beygir gücü, uzun mesafe ve fosil yakıtlara erişim kolaylığı bakımından çok daha üstün hale gelmişlerdir.

1912 yılına kadar üretimi devam eden BEA, Charles Kettering'in İYM ile çalışan araçlar için ürettiği marşlı motor sayesinde manivellalı motorların çalışma sırasında yarattığı zahmet ortadan kaldırılmış ve İYM ile çalışan araçlar çok popüler hale gelmiştir (Kovarik, 2005). Bu gelişme BEA'nın tamamen tarih olmasına zemin hazırlamıştır.

1950'li yıllarda yarıiletken kavramı ortaya atılmış ve çok hızlı bir gelişim göstererek elektrik devreleri içeren sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır. Devamında yeni batarya teknolojileri geliştirmeye başlanmış ve 1990'lı yıllarda BEA tekrar, eskisinden daha güçlü olacak şekilde sıvı yakıt kullanan araçlara rakip olmuştur. Özellikle güç elektroniği alanındaki gelişmeler sayesinde BEA'da sadece doğru akım (DA) motorlarının değil aynı zamanda alternatif akım (AA) motorlarının da kullanılması daha güçlü taşıtların üretilmesini mümkün kılmıştır.

1990 ve 2000 yılları arasında üretilen EA, uzun süre güç sağlayabilen pil teknolojilerinin geliştirilmesiyle öncelikle İYM'ye destek vermek amacıyla İYM üzerine entegre edilmiş EM ile karşımıza çıkmıştır. Ancak son 20 yılda gelişen batarya teknolojileri ile birlikte tümüyle elektrikli araçlar (TEA) görülmeye başlanmıştır.

1.4.2. Bataryalı Elektrikli Araçlar

Bataryalı elektrikli araçlar (BEA), HEA ve TEA olmak üzere iki kısma ayrılabilir. HEA'da batarya grubu genellikle İYM'ye destek olması için bir EM'yi besler. Ayrıca GKF enerjisinin depolanması için de aktif olarak kullanılmaktadır. Ancak GKF enerjisinin depolanmasında çoğu zaman batarya maksimum şarj akım sınırı ve batarya şarj doluluk oranı göz önünde bulundurulur. Bu durum GKF akımlarının, batarya maksimum şarj akım sınırını aşması durumunda depolanamayacağı anlamına gelmektedir. TEA ise Şekil 1.2'de gösterildiği gibi bir EM'yi besleyen batarya grubundan, yakıt hücrelerinden veya süperkapasitör paketlerinden meydana gelebilmektedir.

Günümüzde batarya paketlerinin kullanıldığı muhtemel TEA türleri Şekil 1.2'de gösterilmiştir. BEA'nın genel yapısını temsil eden Şekil 1.2a'da batarya grubunun sağladığı DA gerilim, evirici aracılığı ile AA gerilim formuna dönüştürülür. Bu yapı EM olarak AA

motorlarının veya fırçasız doğru akım motorlarının kullanılması durumunda geçerlidir. AA motorlarının kullanılması durumunda EM'ye paralel olarak bir generatörün bağlanması gerekmektedir. Bunun sebebi, sürücünün gaz pedalını kullanmadığı hareket durumlarında AA motoruna paralel bağlı generatör aracılığı ile GKF akımlarının üretilmesidir. EM olarak DA motorların kullanılması durumunda ise eviricinin yerini tek yönlü veya çift yönlü DA/DA çeviriciler almaktadır.

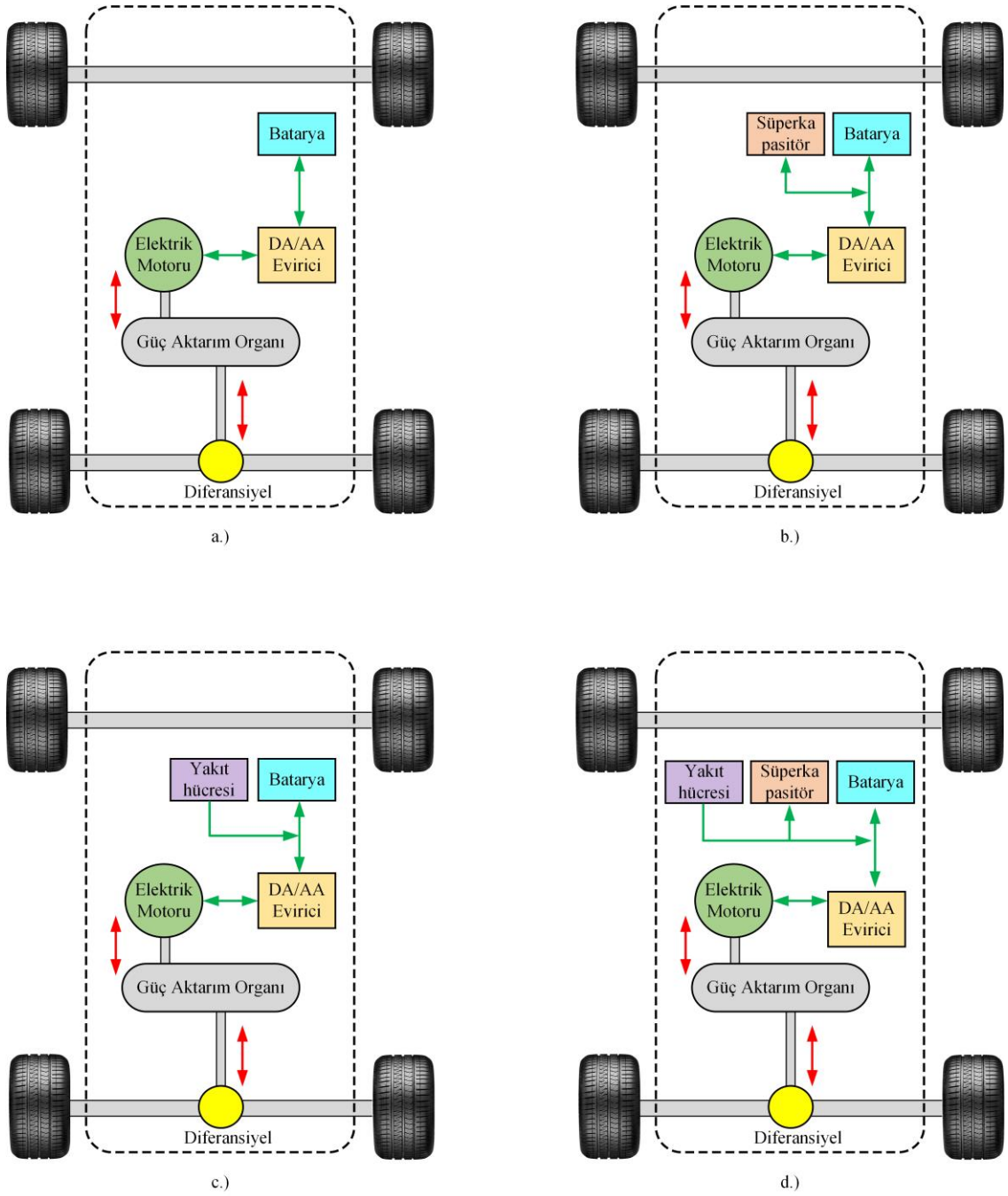
Şekil 1.2b'de batarya-süperkapasitör paketlerinden meydana gelen yapı gösterilmiştir. Bu yapıda genellikle batarya AEK ve süperkapasitör YEK olarak görev yapmaktadır. Batarya ve süperkapasitör hem DA/DA çeviriciler ile hem de doğrudan ortak bir DA baraya bağlanabilmektedir (Wang vd., 2020c). Bu yapının geliştirilmesindeki ana amaç, yüksek güç yoğunluğuna sahip olması sebebiyle süperkapasitörleri ani değişen akımda bir tampon gibi kullanarak bataryanın hizmet ömrünü uzatmaktır. Bataryalar yapıları gereği kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürdükleri için şarj ve deşarj akımları sınırlıdır ve bu sınırların aşılması durumunda termal problemler ortaya çıkabilmektedir.

Şekil 1.2c'de yakıt hücresi ve batarya grubundan oluşan TEA yapısı gösterilmiştir. Bu yapıda genellikle yakıt hücreleri AEK ve bataryalar YEK olarak kullanılmaktadır. Yakıt hücrelerinin enerji depolama özelliği olmadığından GKF enerjisinin tamamı bataryaya depolanacak şekilde ayarlanmaktadır.

Şekil 1.2d'de yakıt hücresi, süperkapasitör ve batarya grubundan oluşan TEA yapısı gösterilmiştir. Bu yapıda genellikle yakıt hücresi AEK, batarya ve süperkapasitör ise sırasıyla YEK-1 ve YEK-2 olarak kullanılmaktadır.

Şekil 1.2'deki BEA türlerinin tamamında enerji depolama birimlerinin farklı kombinasyonları oluşturulurken karşılaşılabilecek en önemli sorunlardan biri hacimsel boyutlandırma. EA'nın hem uzun menzile hem de yüksek performansa sahip olması için tasarımcılar, araç hacmini artırmadan yerleştirebilecek en yüksek seviyede enerji depolama birimi kullanmayı tercih etmektedirler.

Enerji depolama birimlerinin boyutlarının artması hem kullanılacak çeviricilerin hacimsel boyutunun hem de termal problemlerin önüne geçmek için kullanılacak soğutucuların hacimsel boyutunun artmasına sebep olmaktadır. Gerek depolama birimlerinin ve gerekse çevirici ve soğutucu boyutlarının artması araç ağırlığının artmasına sebep olarak performansı kısıtlayabilir. Dolayısıyla tüm bu kriterler performans ve menzilden ödün vermeden optimum bir şekilde belirlenmelidir. Bu boyutlandırma işlemlerinde genellikle çok kriterli optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır.



Şekil 1.2. Bataryalı elektrikli araç türleri

Şekil 1.2’de kırmızı oklar mekanik bağlantıları, yeşil oklar ise elektriksel bağlantıları temsil etmektedir. Çift yönlü gösterilen oklar güç akışının iki yönde de gerçekleştiğini göstermektedir. Araç yokuş eğimli yolda hareket ederken tekerlerde meydana gelen kinetik enerji güç aktarım organı ve EM üzerinden batarya ve süperkapasitör paketlerine depolanabilmektedir.

1.5. Enerji Depolama Birimleri

Elektrikli araçlarda kullanılan enerji depolama birimleri başlıca bataryalar, süperkapasitörler ve yakıt hücreleridir. Bu enerji kaynakları araç ağırlığına, binek veya ticari olarak kullanım şekline, maliyetine ve aracın hacimsel boyutu gibi farklı parametrelere bağlı olarak boyutlandırılmaktadır (Kahveci, 2013). Bu enerji kaynakları arasında hem enerji sağlamada hem de enerji depolamada batarya ve süperkapasitör aktif olarak kullanılırken, yakıt hücreleri sadece enerji sağlamada kullanılmaktadır.

1.5.1. Enerji Depolama Birimleri ile İlgili Bazı Tanımlar

Enerji depolama birimleri genellikle elektriksel ve hacimsel özelliklerine göre tanımlanırlar. Hücre veya terminal gerilimleri, elektrik yükü (amper-saat) kapasitesi, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu gibi kavramlar bu tanımlar arasında gösterilebilir.

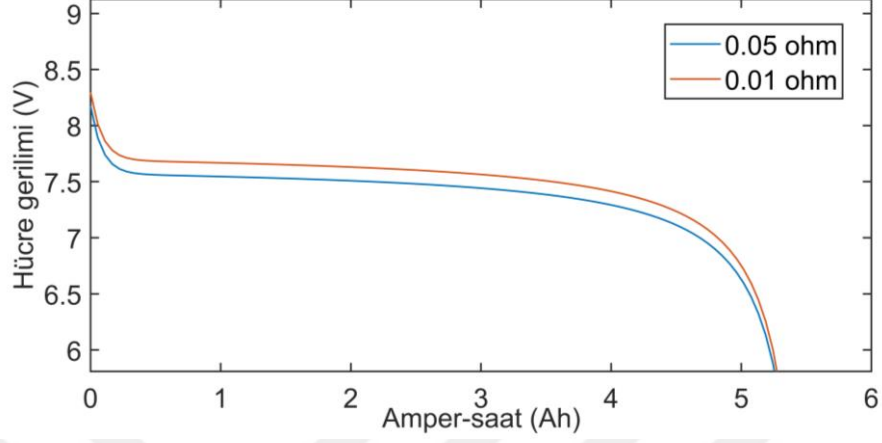
1.5.2. Enerji Yoğunluğu

Enerji depolama birimlerinde enerji yoğunluğu, birim hacim başına depolanan enerji miktarı olarak tanımlanır ve birimi $[Wh/m^3]$ olarak verilir. Elektrikli araçlarda kullanılan enerji depolama birimleri için bu karakteristik özelliğin yüksek olması arzu edilir ve genellikle bu özellik hesaba katılarak boyutlandırma yapılmaktadır.

1.5.3. Hücre Gerilimi

Elektrik enerjisinin depolanabilmesi için bu enerjinin DA formunda olması gerekir. DA elektrik enerjisinde artı ve eksi kutuplar arasındaki potansiyel fark, ölçülen kısmın gerilimini verirken enerji depolama birimlerinin de benzer mantıkta artı ve eksi kutupları arasındaki potansiyel farkı hücre gerilimi olarak tanımlanır. Her elektriksel aygıtın bir iç dirence sahip olduğunu ve bir enerji kaynağı tarafından beslendiğinde bu iç direnç üzerinde gerilim düşümü olacağı göz önünde bulundurulduğunda enerji depolama birimlerinin mümkün olduğunca düşük iç dirence sahip olmaları arzu edilir. Şekil 1.3’de tüm

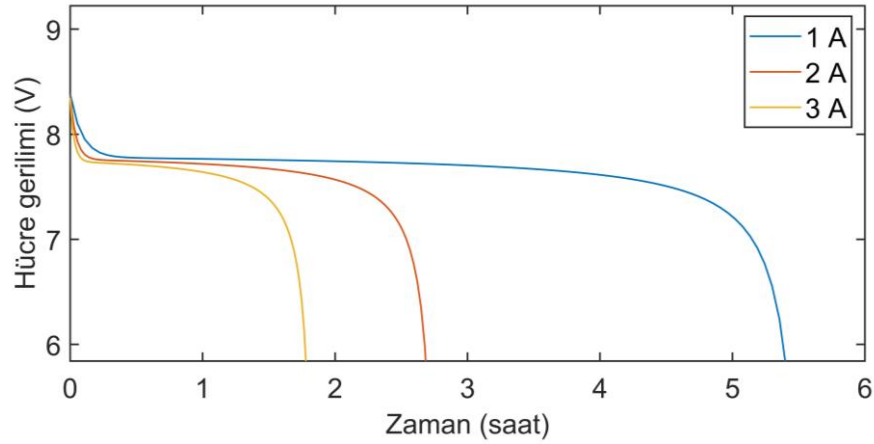
parametreleri eşit iki bataryanın farklı iç dirençlere sahip olması durumunda hücre gerilimlerinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Hücre geriliminin iç direnç ile ilişkisi

1.5.4. Elektrik Yüğü (Amper-Saat) Kapasitesi

Bir saniye boyunca bir iletkenin 1 amper akım akması sonucunda iletken üzerinde taşınan elektrik yükü miktarı 1 Coulomb (C) olur (Larminie & Lowry, 2003). Elektrik yükü birimi, kısa süreli akım akıtılması durumdan amper-saniye olarak ifade edilebilirken uzun süreli yük taşınımalarında ise amper-saat olarak ifade edilir. Amper-saat kapasitesi genellikle enerji depolama birimlerinin şarj doluluk oranlarını belirlemede kullanılmaktadır.



Şekil 1.4. Amper-saat kapasitesi

Örneğin 20Ah değerinde kapasiteye sahip bir batarya analitik hesaplamada bir yüke 20 saat boyunca 1A veya 10 saat boyunca 2A akım sağlayabilir. Ancak pratikte batarya iç direnci, enerji dönüşümü için gerekli kimyasal reaksiyonlar ve ısı kayıpları sebebiyle bu değer teoridekinden daha düşük olacaktır. Şekil 1.4’de 7.2V nominal gerilime sahip 5.4Ah kapasiteli lityum-iyon bataryanın farklı deşarj akımlarına göre deşarj süreleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi deşarj akımları azaldıkça deşarj süreleri de artmaktadır.

1.5.5. Depolanan Elektrik Enerjisi

Enerji depolama birimlerinde, depolanan elektrik enerjisinin birimi Joule (J)’dur. Bu birim elektriksel olarak Watt-saniye (Ws)’nin karşılığıdır. Ancak uzun süreli şarj ve deşarj durumlarında zaman birimi olarak saniyenin kullanılması sayısal karmaşıklığa yol açacağından genellikle bu birim Watt-saat (Wh) olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.4’de zaman eksenini boyuncsa saat yerine saniye kullanılması durumunda oluşacak sayısal değerler mevcut duruma göre oldukça büyük olacaktır.

1.5.6. Özgül Enerji

Bir hücreden elde edilebilen toplam elektrik enerjisinin, o hücrenin kütlesine bölünmesi şeklinde tanımlanır ve birimi [Wh/kg] olarak verilir. Uzun menzilli elektrikli araçların sürdürülebilir şekilde uygulanması ve araç ağırlığı ile menzil arasındaki ilişkiyi belirlemek için kritik bir özellik olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir. Bilimsel çalışmalarda elektrikli araçlarda kullanılacak AEK’nın minimum 225Wh/kg değerinde özgül enerjiye sahip olması gerektiği vurgulanmıştır (Gallagher vd., 2016).

1.5.7. Özgül Güç

Bir enerji depolama biriminin birim kilogram başına sağlayabileceği güç miktarıdır ve tipik olarak [W/kg] cinsinden ölçülür. Bazı enerji depolama birimleri yüksek özgül enerjiye sahipken bazıları yüksek özgül güce sahiptir. Elektrikli araçlar için optimum enerji kaynağının yüksek özgül enerjiye ve yüksek özgül güce sahip olması istenir. Elektrikli araçlarda kullanılan enerji kaynaklarının yüksek özgül enerjiye sahip olması araç için daha

uzun menzil sağlarken yüksek özgül güce sahip olması ise agresif sürüş koşullarında arzu edilen performansı sağlar.

1.5.8. Öz Deşarj

Enerji depolama birimlerinin bir yükü beslemediği durumlarda hücre geriliminin zamana bağlı azalması öz deşarj olarak tanımlanabilir. Bu kavram bataryalarda kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanırken, süperkapasitörlerde ise yüksek iç direncin sebep olduğu etkilerden kaynaklanmaktadır. Öz deşarj değeri, enerji depolama birimi için tavsiye edilen sıcaklık sınırlarının dışına çıkıldığında daha da artacaktır.

1.5.9. Şarj Doluluk Oranı

Bir enerji depolama biriminin depoladığı toplam enerji miktarının, depolayabileceği toplam enerji miktarına oranı olarak tanımlanabilir. Şarj doluluk oranı genellikle yüzde cinsinde ifade edilir. Bataryalarda bu oran deşarj testi, amper-saat sayma, elektrolitlerin fiziksel özelliklerinin ölçülmesi, açık devre gerilimi, empedans spektroskopisi gibi tekniklerle belirlenebilir (Piller vd., 2001). Süperkapasitörlerde ise bu oran hücre geriliminin anma gerilimine oranı ile belirlenebilmektedir (Snoussi vd., 2018a). Ancak şarj durumunda olan bir enerji depolama biriminin şarj doluluk oranının terminal gerilimi şarj gerilimine eşit olacağından genellikle her iki enerji depolama birimi için amper-saat sayma tekniği kullanılmaktadır.

1.5.10. Çevrim Ömrü

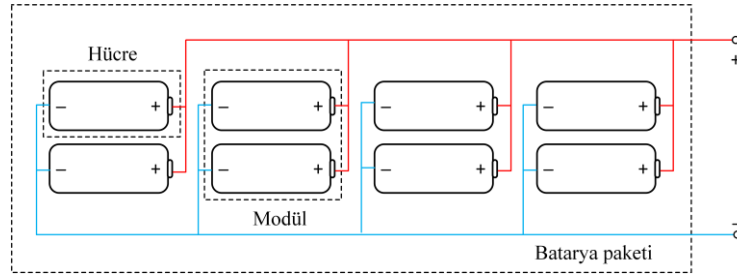
Enerji depolama biriminin anma kapasitesi kadar enerji miktarı sağladıktan sonra tekrar anma kapasitesine kadar enerji depolaması olarak tanımlanabilir. Ayrıca bir enerji depolama biriminin tam deşarjdan sonra tam şarj edilmesi durumudur. Elektrikli araçlarda kullanılacak enerji depolama birimlerinin yüksek çevrim ömrüne sahip olması arzu edilir. Bu sayede yüksek maliyet gerektiren enerji kaynağı yenileme süreçleri geciktirilmiş olur.

1.5.11. Enerji Verimi

Şarj doluluk oranı %100 olan bir enerji depolama biriminin tam deşarj olana kadar verebileceği elektrik enerjisinin, bu enerji depolama birimini tekrar %100 şarj etmek için gerekli elektrik enerjisine oranı olarak tanımlanır.

1.6. Bataryalar

Elektrokimyasal piller, şarj esnasında elektrik enerjisini kimyasal enerjiye çevirerek depolarken, deşarj esnasında ise daha önceden depoladığı kimyasal enerjiyi elektrik enerjisinde dönüştüren elektrokimyasal bir ayardır (Ehsani vd., 2004). Bataryaları meydana getiren hücreler genellikle pil olarak adlandırılır. Birden fazla pil hücresinin bir araya gelmesiyle modüller, modüllerin bir araya gelmesiyle bataryalar meydana gelir. Hücreler, pozitif ve negatif elektrotlardan meydana gelmiş bir elektrolitin içinde bulunur. Hücre gerilimi, elektrotlar ve elektrolit arasındaki kimyasal reaksiyonlardan meydana gelir. Sekonder hücre olarak bilinen şarj edilebilir bataryalarda kimyasal reaksiyon tersine çevrilerek bataryanın şarj olması sağlanır. Şekil 1.5’de sekiz hücre ve dört modülden oluşan batarya yapısı gösterilmiştir. Hücreler birbirine seri bağlanarak bataryanın hücre gerilimi artırılırken, birbirlerine paralel bağlanması durumunda ise deşarj kapasitesi artırılmaktadır.



Şekil 1.5. Batarya yapısı

Şekil 1.5’de verilen batarya sisteminde toplam hücre gerilimi, iki hücrenin gerilimlerinin toplamına eşit olacaktır. Batarya terminal uçlarından akım talep edilmesi durumunda bu akım öncelikle içerdeki dört modüle eşit olarak paylaştırılacak ve her bir modül iki hücreden oluştuğu için modül akımı da içerideki hücrelere eşit olarak dağıtılacaktır. Bu şekilde kombinasyonlar kurularak arzu edilen batarya hücre gerilimi ve batarya deşarj kapasitesi ayarlanabilmektedir. Hücre geriliminin ve deşarj kapasitesinin

artırılmasında en önemli dezavantaj hacimsel boyutu artıracak olmasıdır ve bu durum HEDS’de çok önemli bir tasarım parametresidir.

1.6.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Türleri

1800’lü yıllarda ortaya atılan ve günümüz teknolojisinde hala İYM’lerde ve HEA’larda aktif olarak kullanılan kurşun asit bataryalar sekonder hücreye sahiptir ve bilinen ilk ticari kullanıma uygun bataryalardır. Bu bataryaların tercih edilme sebepleri arasında yapısının güvenilirliği ve maliyet ön plana çıkmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı otomobiller, forkliftler ve kesintisiz güç kaynakları gibi yaygın kullanım alanları bulunmaktadır (URL-2). 1Ah değerinde bir hücre için $0,022\Omega$ gibi oldukça düşük iç dirence sahip kurşun asit bataryaların performansı ortam sıcaklığına oldukça duyarlıdır (Larminie & Lowry, 2003). Ortalama olarak 285 W/kg gibi yüksek özgül güce sahip olmalarından dolayı İYM kullanılan araçların ilk çalışma anlarında meydana gelen yüksek akımların üstesinden kolaylıkla gelebilmektedirler. Ayrıca kurşun asit bataryalar ortalama 43Wh/kg değerinde özgül enerjiye ve 600’den fazla çevrim ömrüne sahiptir (Ehsani vd., 2004).

Tablo 1.1. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya türlerinin karşılaştırılması

Batarya türü	Özgül enerji (Wh/kg)	Özgül güç (W/kg)	Enerji verimi (%)	Çevrim ömrü	Özdeşarj (%)
Kurşun asit	35-50	150-400	>80	500-1000	0,6
Nikel demir	55-60	80-150	75	1500-2000	3
Nikel Çinko	55-75	170-260	65	300	1,6
Nikel kadmiyum	50-60	80-150	75	800	1
Nikel-metal hidrit	70-95	200-300	70	750-1200	6
Lityum iyon	80-130	200-300	>95	1000	0,7

Kurşun asit bataryalara göre daha hafif olan nikel tabanlı bataryalar nikel-demir, nikel-çinko, nikel kadmiyum, nikel-metal hidrit olmak üzere dört farklı yapıda üretilmektedir. Nikel-demir bataryalar ticari olarak kullanıma sunulan ilk nikel tabanlı bataryalardır ve kurşun asit bataryalara kıyasla yaklaşık dört kata kadar daha uzun ömürlüdür.

Nikel-çinko tabanlı bataryalar daha geniş bir sıcaklık aralığında çalışma ve 100Wh/kg gibi yüksek bir özgül enerji avantajı sunarken çevrim ömürlerinin düşük olması ve özdeşarj oranının fazla olması sebebiyle bu bataryaların geliştirilmesinde ticari olarak ilerleme kaydedilememiştir.

20. Yüzyılın ortalarında nikel tabanlı bataryaların dezavantajlarını ortadan kaldırmak için daha yüksek çevrim ömrü, sıcaklık duyarlılığının azaltılması ve maliyetin düşürülmesi gibi kriterler göz önünde bulundurularak geliştirilen nikel-kadmiyum bataryalarda ise hafıza etkisi sorunu ve düşük özgül enerji öne çıkmıştır.

20. Yüzyılın sonlarına doğru geliştirilen nikel-metal hidrit bataryalar geri dönüştürülebilir, 140Wh/kg oranında yüksek özgül enerjiye sahip, maliyetinin düşük, çevrim ömrünün yüksek olması ve hafıza etkisinin bulunmaması gibi üstün özelliklere sahiptir. Hücre gerilimlerinin sınırlı kalması ve yüksek özdeşarj problemleri bu batarya türünün dezavantajları arasında gösterilebilir (URL-3).

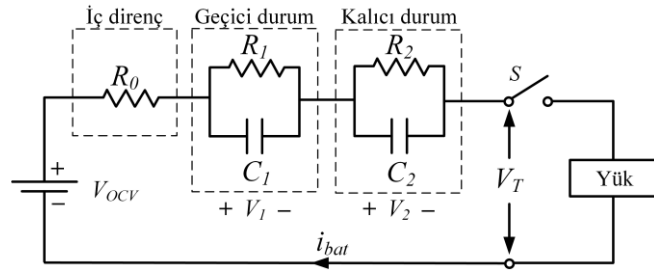
Lityum tabanlı batarya teknolojileri, kurşun asit ve nikel tabanlı gibi düşük enerji yoğunluğuna ve sınırlı gelecek potansiyeline sahip bataryaların eksikliklerini gidermek amacıyla ortaya atılmış ve 1990'lı yıllarda ilk kez Sony Şirketi tarafından ticarileştirilmiştir (Li vd., 2018a). Lityum tabanlı bataryalar yüksek hücre gerilimi, yüksek çevrim ömrü, düşük özdeşarj, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek enerji verimi gibi üstün özellikleri sayesinde taşınabilir elektriksel aygıtlar için dikkat çekici bir enerji kaynağı olmuştur (Kennedy vd., 2000).

Yukarıda bahsedilen özellikleri sebebiyle lityum tabanlı bataryaların elektrikli araçlar için uygun olacağı söylenebilir. Elektrikli araçlarda enerji depolama birimleri seçilirken maliyet ve performans olarak iki önemli kriter ortaya çıkmaktadır ve enerji depolama birimi de bu iki kritere göre belirlenmektedir. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya türleri ve elektriksel özellikleri Tablo 1.1'de verilmiştir (Ehsani vd., 2004).

1.7. Bataryaların Elektriksel Modelinin Elde Edilmesi

Günümüz teknolojisinde EA'lar için yüksek enerji yoğunluğu, düşük selfdeşarj, çevrim ömrünün yüksek oluşu gibi özelliklerinden dolayı Li-ion bataryalar tercih edilmektedir (Yao vd., 2013). EA'ların modellenmesinde en önemli adımlardan biri batarya modelidir. Bataryadan çekilen akımların, geçici ve kalıcı durumların, özdeşarj oranının doğru bir şekilde belirlenmesi model tasarımında hesaba katılacak parametrelere bağlıdır.

Literatürde deneysel, elektrokimyasal ve elektriksel olmak üzere üç tür batarya modeli bulunmaktadır. Bu modeller arasında deneysel modeller oldukça fazla vakit alırken, bataryaların daha çok fiziksel tasarımını optimize etmek için kullanılan elektrokimyasal modeller ise ağır hesaplamalar gerektirmektedir (Chen & Rincon-Mora, 2006). Bunun yanı sıra elektriksel modellerin hem zamandan hem de hesaplama yükünden tasarruf etmek amacıyla oldukça etkili oldukları söylenebilir. Literatürde Rint model, Shepherd model ve Thevenin model gibi çeşitli türlerde elektriksel devre modelleri bulunmaktadır. Rint model bir DA kaynak ve ona bağlı bir seri direnç ile modellenir. Yapısı oldukça basit olmasına rağmen bu modelde bataryanın geçici ve kalıcı durum dinamikleri belirlenemeyeceği için genellikle tercih edilmez. Bunun yanı sıra Shepherd model sürekli deşarj akımı sağlayan bir batarya için doğru benzetim sonuçları verse de bu modelde hâlen cebirsel döngü problemlerinden kaynaklanan benzetim dengesizlikleri mevcuttur (Meng vd., 2018). Yapısında bulundurduğu seri bağlı RC kapalı göz sayısı ile derecelendirilen Thevenin modelin, bataryaların modellenmesi için en uygun model olduğu söylenebilir. Thevenin modelleri arasında, 1. Dereceden Thevenin model ile bataryanın geçici ve kalıcı durum dinamiklerinin tam olarak belirlenememesi (Zhang vd., 2017) ve 3. Dereceden Thevenin modelinin ise hesaplama yükünü artıracak göz önüne alındığında Şekil 1.6’da verilen 2. Dereceden Thevenin eşdeğerinin batarya modellemede, model doğruluğu ve karmaşıklığı arasında bir denge seçimi olduğu söylenebilir.



Şekil 1.6. İkinci dereceden Thevenin elektriksel devre modeli

Şekil 1.6’da R_0 , batarya terminal uçları arasındaki anlık gerilim düşümünü modelleyen iç direnci, R_1 ve C_1 paralel bağlantısından meydana gelen kapalı göz bataryanın geçici durum dinamiklerini, R_2 ve C_2 kapalı göz ise bataryanın kalıcı durum dinamiklerini, V_{OCV} açık devre gerilimini, V_T terminal gerilimini, i_{bat} batarya akımını, V_1 ve V_2 gerilimleri sırasıyla geçici ve kalıcı durum gerilim düşümlerini temsil etmektedir. Şekil 1.6’daki elektriksel devreye ait uç denklemleri aşağıda verilmiştir.

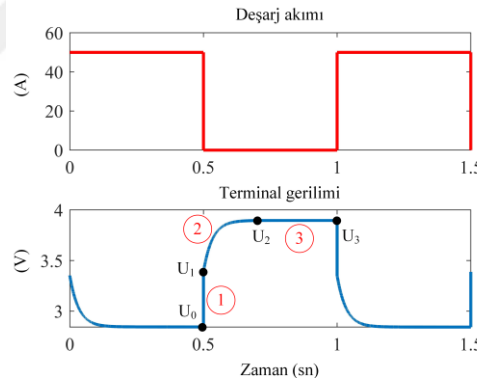
$$V_T = V_{OCV} - Z * i_{bat} \quad (1.1)$$

$$V_T = V_{OCV} - V_1 - V_2 - R_0 * i_{bat}$$

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{R_1 * C_1} + \frac{i_{bat}}{C_1}$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{V_2}{R_2 * C_2} + \frac{i_{bat}}{C_2} \quad (1.2)$$

Bataryanın geçici ve kalıcı durum dinamiklerinin ve Şekil 1.6'daki R_0 ile modellenen batarya iç direncinin belirlenmesinde genellikle batarya darbeleri deşarj eğrisi kullanılmaktadır. Bu eğri, maksimum deşarj akımını aşmayacak şekilde darbe akımlarının bataryadan çekilmesi suretiyle elde edilebilir. Ayrıca bu eğri deneysel olarak elde edildikten sonra batarya eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesinde de kullanılmaktadır (Diab vd., 2017).



Şekil 1.7. Batarya darbeleri deşarj testi

Şekil 1.7'de Lityum-iyon bataryanın darbeleri deşarj akımına karşı terminal geriliminin değişimi gösterilmiştir. Şekil 1.7'den görüldüğü gibi bataryaya 50A'lık, %50 etkin periyoda sahip darbeleri deşarj akımı uygulanmış ve buna karşı terminal geriliminin değişimi izlenmiştir. Darbeleri deşarj akımının uygulanması ile kesilmesi arasında kalan bölgelerde terminal geriliminde üç farklı değişimden söz etmek mümkündür. Birinci bölgede terminal geriliminin doğrusal bir şekilde değiştiği görülmektedir. Eşdeğer devrede R_0 olarak modellenen ve bataryanın iç direncini temsil eden bu değişim birinci bölgede U_0 ve U_1

gerilimleri arasında ($\Delta E_1 = U_1 - U_0$) gözlenebilir. Dolayısıyla batarya iç direnci Denklem (1.3)'teki gibi hesaplanabilir.

$$R_0 = \frac{\Delta E_1}{i_{bat}} = \frac{U_1 - U_0}{i_{bat}} \quad (1.3)$$

Burada i_{bat} şarj veyadeşarj akımını temsil etmektedir. İkinci bölge geçici durum bölgesidir ve bu bölge bataryanın ani akım değişikliklerini modellemek için eşdeğer devrede paralel bağlı bir RC (R_1, C_1) kapalı gözü ile temsil edilir. Kalıcı durum bölgesi olan üçüncü bölge bataryanın sürekli şarj veyadeşarj durumları ile bataryanın dinlenme zamanlarını modellemek için eşdeğer devrede ikinci bir RC (R_2, C_2) paralel bağlı kapalı gözü ile temsil edilir. Denklem 1.2'de verilen R_1, C_1, R_2, C_2 değerleri ise U_1 ve U_3 arasında kalan gerilim değişimi ile ($\Delta E_2 = U_3 - U_1 = V_1 + V_2$) belirlenir.

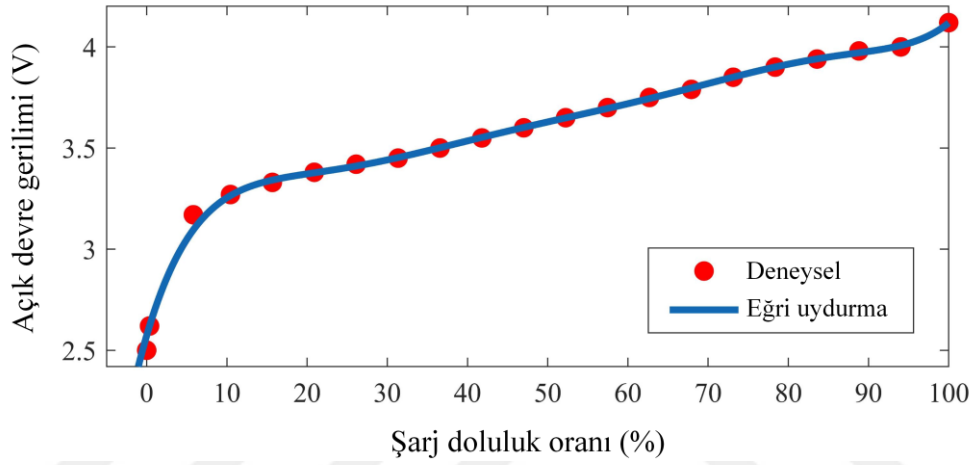
1.7.1. Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Bir bataryanın şarj vedeşarj değerleri genellikle C değeri ($C - rate$) adı verilen ve söz konusu bataryanın tam kapasitesinin $1C$ değerine karşılık geldiği kabul edilen bir büyüklük ile belirlenir. Örnek vermek gerekirse $1C$ 'de $1Ah$ değerinde tam olarak şarj edilmiş bir batarya, 1 saat boyunca $1A$ deşarj akımı sağlamalıdır. Aynı batarya $0,5C$ 'de $500mA$ deşarj akımını 2 saat ve $2C$ 'de $2A$ deşarj akımını ise $0,5$ saat sağlamalıdır. Tablo 1.2'de $1000mAh$ değerine sahip bir bataryanın zamana bağlı olarakdeşarj akımları C değerleri cinsinden verilmiştir.

Tablo 1.2. $1000mAh$ bataryanın zamana bağlı olarakdeşarj süreleri

C – değeri	Deşarj Akımı	Zaman
5C	5A	12 dk.
2C	2A	30 dk.
1C	1A	1s
0,5 veya C/2	0,5A	2s
0,2 veya C/5	0,2A	5s

Çoğu zaman bataryaların devreye sağladığı gerilim değerinin sabit olduğu kabul edilse de gerçekte bu kabulün hatalı olacağı söylenebilir. Çünkü bir bataryanın açık devre gerilimi doğrudan bataryanın şarj doluluk oranına bağlıdır. Gerçek bir sistemde açık devre gerilimi, şarj doluluk oranına bağlı olarak yaklaşık olarak %30 oranında değişeceğinden batarya terminal gerilimi de şarj doluluk oranına bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Şekil 1.8’de bir lityum-iyon bataryanın şarj doluluk oranına karşı açık devre gerilimindeki değişim gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Açık devre gerilimi ve şarj doluluk oranı ilişkisi

Şekil 1.8’den görüldüğü gibi kesme gerilimi 2,5V olan batarya şarj işlemine başladığında açık devre gerilimi nominal gerilim olan 4,2V değerine kadar artmaktadır. Ayrıca bu değişimin tam olarak doğrusal olmadığı söylenebilir. Söz konusu ilişki genellikle deneysel veriler elde edildikten sonra eğri uydurma yöntemleri ile belirlenmektedir.

1.7.2. Şarj Doluluk Oranının Belirlenmesi

Bataryaların doluluk oranının belirlenmesinde Deşarj Testi, Amper Saat Sayma, Elektrolitlerin Fiziksel Özelliklerinin Ölçülmesi, Açık Devre Gerilimi, Empedans Spektroskopisi metotları gibi çok çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Matematiksel olarak hesaplanan bu metotların yanı sıra Kalman, Genişletilmiş Kalman, Koksuz Kalman Filtresi gibi çeşitli tahmin algoritmaları ile de şarj doluluk oranları başarılı bir şekilde elde edilebilmektedir (Muratoğlu, 2017). Şarj doluluk oranının belirlenmesinde çok yaygın bir yöntem olan ve matematiksel olarak hesaplama kolaylığı sunan Amper Saat Sayma

metodunu sıklıkla kullanılmaktadır. Bu metot matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

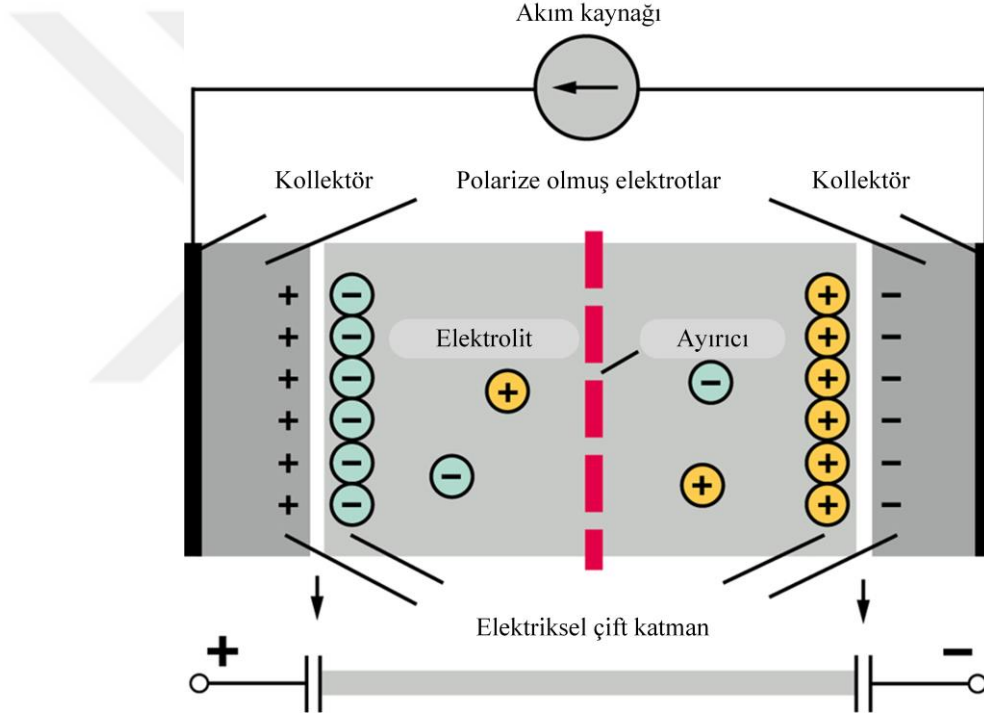
$$\begin{cases} SoC = SoC_0 + \frac{1}{3600 * Q} \int_{t_0}^{t_1} (i_{bat}) dt & \text{\textit{\textit{şarj}}} \\ SoC = SoC_0 - \frac{1}{3600 * Q} \int_{t_0}^{t_2} (i_{bat}) dt & \text{\textit{\textit{deşarj}}} \end{cases} \quad (1.4)$$

Burada SoC , SoC_0 , Q , t_0 , t_1 , t_2 ve i_{bat} sırasıyla, şarj doluluk oranını, başlangıçtaki şarj doluluk oranını, amper saat cinsinden batarya kapasitesini, şarj veyadeşarj süresinin başlangıcını, şarj süresinin sonunu,deşarj süresinin sonunu ve batarya akımını temsil etmektedir.

1.8. Süperkapasitörler

Süperkapasitörler, diğer adıyla ultrakapasitörler veya Elektrik Çift Katmanlı Kapasitörler (*Electric Double Layer Capacitor – EDLC*) fiziksel olarak elektrotlar arasında konumlandırılmış bir dielektrik malzeme yerine bir elektrot üzerinde çift katman biriktirilmesi için kimyasal bir işlem kullanır. Elektrikli çift katman maddenin katı ve sıvı fazı arasında meydana gelen bir bariyerdir ve uygun bir katı ve sıvı kullanılarak bir voltaj uygulandığında zıt kutuplu iki katman meydana gelir (URL-4). Bataryalardan farklı olarak elektrik enerjisini depolamak için kimyasal reaksiyonlar yerine doğrudan fiziksel şarj kullanan süperkapasitörler yaklaşık olarak 5Wh/kg değerinde özgül enerjiye ve 10kW/kg değerinde özgül güce sahiptir. Bu değerler geleneksel batarya türleri ile karşılaştırıldığında süperkapasitörün özgül enerjisinin bataryaya kıyasla çok düşük seviyede ve özgül gücünün ise bataryaya kıyasla oldukça yüksek olduğu söylenebilir (Khedulkar vd., 2023). Süperkapasitörler bu elektriksel özellikleri sebebiyle enerji depolama sistemlerinde, ani güç değişikliklerinde AEK'ya destek vermek ve yükünü azaltmak amacıyla YEK olarak kullanılmaktadırlar. Yüksek güç yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen süperkapasitörler bu değeri sadece birkaç saniye için sağlayabilirler (Huang vd., 2019). Şekil 1.9'da süperkapasitörün hücre yapısı gösterilmiştir (URL-5).

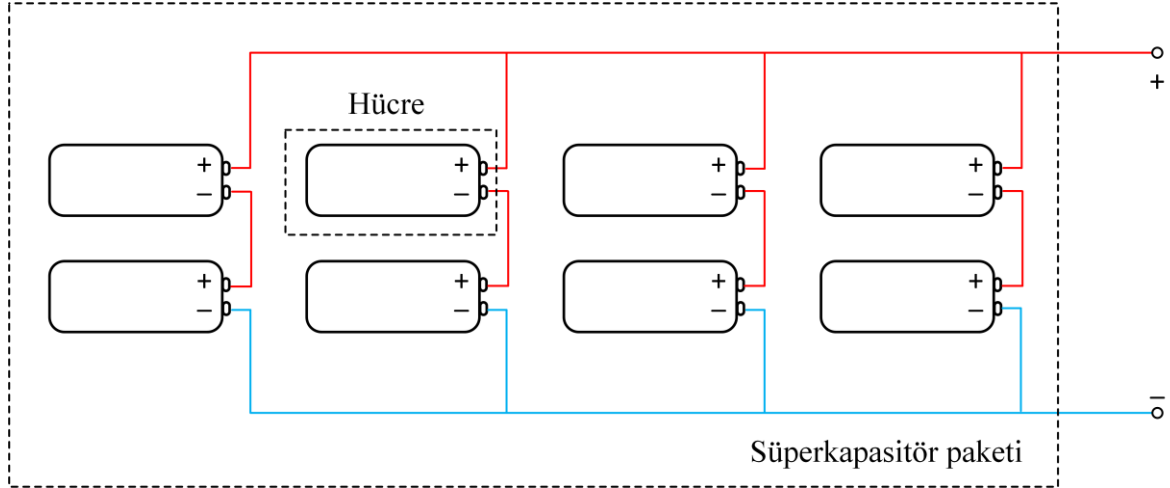
Geleneksel kapasitörler ile karşılaştırıldığında, süperkapasitörlerin öne çıkan üstünlüğü aktive edilmiş pürüzlü yüzey alanına sahip karbon elektrotlar ile ince elektrolitik malzemelerin kullanılmasıyla elde edilen çok geniş yüzey alanlarına sahip olmalarıdır. Bu geniş yüzey alanı geleneksel kapasitörlere nazaran çok daha yüksek kapasite yoğunluklarına olanak tanır. Geniş yüzey alanı, hammaddeye kolay erişim, elektriksel iletkenliğinin iyi olması ve düşük maliyet gibi kriterler elektrotlar için karbonun tercih edilme sebepleri arasında gösterilebilir. Ancak son yıllarda gerçekleştirilen bilimsel araştırmalar elektrot olarak karbon nanotüpler kullanılması ile süperkapasitörlerin performansının artırılabilirliğini göstermiştir (Bui vd., 2020).



Şekil 1.9. Süperkapasitör hücre yapısı

Tıpkı bataryalarda olduğu gibi hücrelerin seri ve paralel bağlanmasıyla süperkapasitörlerin de terminal gerilimleri ve anma kapasiteleri ayarlanabilmektedir. Seri bağlı hücre sayısının artırılmasıyla hücre gerilimi artarken, süperkapasitör grubunun anma kapasitesi azalmaktadır. Paralel bağlı hücre sayısının artırılmasıyla hücre gerilimi sabit kalırken süperkapasitör grubunun anma kapasitesi artmaktadır. Şekil 1.10, iki seri ve dört paralel hücre birbirlerine bağlanarak oluşturulmuş bir süperkapasitör paketini temsil etmektedir. Şekil 1.10'daki süperkapasitör hücrelerinden meydana gelen yapıda iki eş enerji depolama birimi birbirine seri bağlanarak terminal gerilimi iki katına çıkarılmıştır. Bu

bağlantı sonucunda anma kapasitesi yarıya düşmektedir. Bu seri yapıya eş üç farklı paket paralel bağlanarak anma kapasitesi hücre kapasitesinin iki katına çıkarılabilmektedir. Bu şekilde kombinasyonlar oluşturularak süperkapasitörlerin karşılaması gereken hücre gerilimi ve anma kapasitesi ayarlanabilmektedir.



Şekil 1.10. Süperkapasitör paketlerinin iç yapısı

Süperkapasitörlerin geleneksel kapasitörlere kıyasla hücre geriliminin çok düşük olması ve yüksek kapasite elde etmek için hacimsel boyutunun büyük olması gerekliliği bilinen en büyük dezavantajlarıdır.

Tablo 1.3. Süperkapasitörlere ait elektriksel özellikler

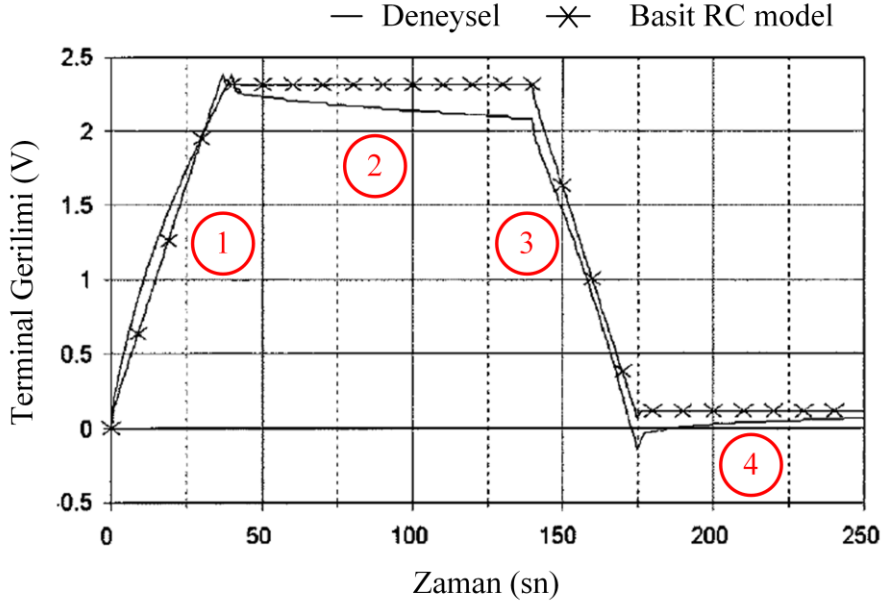
Süperkapasitör türü	Özgül enerji (Wh/kg)	Özgül güç (W/kg)	İç direnç (mΩ)	Anma gerilimi (V)	Anma akımı (A)
BCAP0650	4,1	6800	0,8	2,7	680
BCAP1200	4,7	5800	0,58		930
BCAP1500	5,4	6600	0,47		1150
BCAP2000	5,6	6900	0,35		1500
BCAP3000	6	5900	0,29		1900

Mevcut teknoloji ile tek bir hücre için en yüksek anma kapasitesi 3400F iken bu hücrenin terminal gerilimi 2.7V ve en yüksek hücre gerilimi 3V iken bu hücrenin anma kapasitesi 540F olacak şekilde Maxwell Teknolojileri tarafından üretilmektedir. Adı geçen

firma süperkapasitör üretiminde dünya genelinde önde gelenler arasındadır ve ürettiği süperkapasitörlerden bazılarının karşılaştırılması Tablo 1.3’de verilmiştir (URL-6). Süperkapasitör türünde verilen ürün kodunun son dört hanesi anma kapasitesini temsil etmektedir. Görüldüğü gibi özgül enerji değerleri bataryalara kıyasla çok düşükken özgül güçleri oldukça yüksektir. Anma akımları kapasiteye bağlı olarak artış gösterse de bu artışın hacimsel boyutlarda negatif etkiye sahip olacağı unutulmamalıdır. Anma gerilimleri bütün türler için aynı iken eşdeğer seri iç direncin azaltılmasının anma kapasitesini artıran bir etki olduğuna dikkat edilmelidir. Eşdeğer seri iç direncin küçük olması şarj akımının daha yüksek olmasına katkı sağlarken deşarj anında ise daha düşük gerilim düşümüne olanak tanır. Bu durumun süperkapasitörün enerji verimliliği üzerinde doğrudan etkisi olduğu söylenebilir.

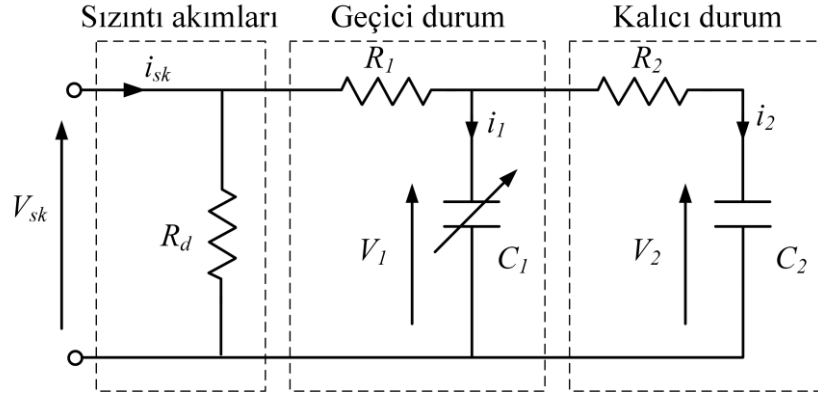
1.9. Süperkapasitörlerin Elektriksel Modelinin Elde Edilmesi

Süperkapasitörler de temel yapıda bir elektrostatik kondansatör gibi çalıştığından genellikle basit bir iç direnç ve bir kondansatörün seri bağlanması (RC) ile temsil edilebilmektedir. Ancak basit RC devresi ile tasarlanan model, süperkapasitörün terminal davranışını tam olarak modelleyememektedir.



Şekil 1.11. DeneySEL ve basit RC modelin karşılaştırılması

Şekil 1.11’de 30A’lık sabit akım değeri ile nominal gerilime kadar şarj edilen ve bir süre sonra aynı büyüklükte sabit akım ile deşarj edilen 470F kapasite değerine sahip bir süperkapasitörün hem deneysel hem de basit RC model cevabı gösterilmiştir. Şekil 1.11’de deneysel ve basit RC model arasında ilk göze çarpan fark basit RC modelde doğrusal olarak değişen şarj ve deşarj eğrilerinin (1 ve 3 ile numaralandırılmış bölgeler) deneysel modelde doğrusal olmamasıdır. Bunun yanı sıra şarj ve deşarj işlemlerinden sonra (2 ve 4 ile numaralandırılmış bölgeler) yani süperkapasitörün dinlenme zamanlarında da önemli farklılıklar görülmektedir (Zubieta & Bonert, 2000). Dolayısıyla basit bir RC model ile süperkapasitör elektriksel modelinin tasarlanması model hata oranını artıracaktır. Bilimsel çalışmalarda Zubieta Model, Stern-Tafel Model, İki Dal Modeli, gibi çeşitli türlerde süperkapasitör elektriksel eşdeğer devre modelleri bulunmaktadır. Bu modeller farklı akım profilleri (sürekli, darbeli, sönümlü) için farklı sonuçlar vermektedir. Bunlar arasında ağır parametre hesaplamaları gerektiren Stern-Tafel Model kısa süreli benzetim modellerinde etkili iken, Zubieta Model hem sürekli hem darbeli sinyal içeren akım profillerinde etkili olmaktadır (Miniguano vd., 2019). İki Dal Modeli ise Zubieta Model’e benzerlik göstermekle beraber elektriksel parametre belirleme hususunda daha az hesaplama yükü sağladığı için tercih edilmektedir.



Şekil 1.12. Süperkapasitör elektriksel eşdeğer devresi

HEDS’de ana amaç bataryayı ani akım darbelerinden mümkün olduğu mertebede korumaktır. Şehir içi sürüş çevrimleri düşünüldüğünde akım profilinin zamana bağlı olarak sıklıkla değişim göstereceği söylenebilir. Dolayısıyla süperkapasitör sürekli olarak ani şarj ve deşarj akımlarına maruz kalacağından sızıntı akımları ihmal edilebilir. Temel yapısı Zubieta Model’e dayanan ve Gualous vd. (2003) tarafından geliştirilen İki Dal Modeli’nin

süperkapasitör eşdeğer devresi için daha uygun olacağı söylenebilir. Şekil 1.12’de gösterilen süperkapasitör elektriksel eşdeğer devresinde V_{sk} terminal gerilimini, R_d sızıntı akımlarını modellemek için gereken sızıntı direncini, R_1 ve R_2 sırasıyla geçici ve kalıcı durum dirençlerini, V_1 ve V_2 geçici ve kalıcı durum kapasite gerilimlerini, C_1 , V_1 gerilimine bağlı değişken kapasiteyi C_2 ise kalıcı durum kapasitesini temsil etmektedir. Gerilim bağımlı C_1 kapasitörü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$C_1 = C_0 + C_v * V_1 \quad (1.5)$$

Denklem (1.5)’de C_0 sabit kapasiteyi, C_v ise V_1 gerilime bağlı kapasiteyi temsil etmektedir. i_{sk} süperkapasitör terminal akımını temsil etmek üzere Şekil 1.11’de kalıcı durum bloğuna ait V_2 gerilimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V_2 = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = \frac{1}{C_2} \int \frac{1}{R_2} (V_1 - V_2) dt \quad (1.6)$$

C_2 kapasitörünün anlık yükü olarak tanımlanan Q_2 büyüklüğü aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$Q_2 = \int i_2 dt \quad (1.7)$$

Bu durumda geçici durum bloğunda C_1 diferansiyel kapasitörünün i_1 akımı, bu akımın anlık yük Q_1 ve diferansiyel kapasite C_1 cinsinden değeri ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{cases} i_1 = i_{sk} - i_2 \\ i_1 = C_1 \frac{dV_1}{dt} = \frac{dQ_1}{dt} = (C_0 + C_v * V_1) \frac{dV_1}{dt} \end{cases} \quad (1.8)$$

Denklem (1.8) Q_1 yükü için çözüldüğünde;

$$Q_1 = C_0 * V_1 + \frac{1}{2} * C_v * V_1^2 \quad (1.9)$$

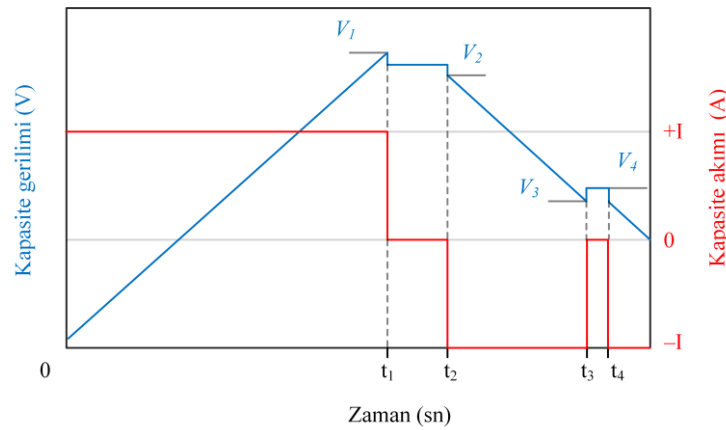
ifadesi elde edilir. V_1 gerilimi ile Q_1 yükü arasında bir ters orantı olduğunu ifade eden Denklem (1.9) V_1 gerilim için çözüldüğünde;

$$V_1 = \frac{-C_0 + \sqrt{C_0^2 + 2 * C_v * Q_1}}{C_v} \quad (1.10)$$

ifadesi elde edilir.

1.9.1. Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Süperkapasitörlerin model parametrelerinin belirlenmesinde izlenecek yolun, bataryanın model parametrelerini belirlerken izlenen yola benzerlik gösterdiği söylenebilir. Genellikle bu yol, üreticinin sağladığı deneysel şarj ve deşarj testlerinden elde edilecek veriler yardımıyla elektriksel devre parametrelerini belirleme ilkesine dayanmaktadır. Model parametreleri üreticinin sağladığı bilgi yapıları ile elde edilebilirken bu parametrelerin bazıları (*örneğin anma kapasitesi, iç direnç gibi*) yine üretici tarafından sağlanan deneysel şarj ve deşarj eğrileri kullanılarak da hesaplanabilir. Şekil 1.13’de üretici tarafından sağlanan deneysel akım profiline karşılık süperkapasitörün terminal geriliminin değişimi gösterilmiştir (URL-8).



Şekil 1.13. Süperkapasitörün deneysel şarj – deşarj eğrisi

Üretici tarafından sağlanan ve Şekil 1.13’de gösterilen deneysel şarj – deşarj eğrilerinde ilk olarak $0 - t_1$ aralığında geçen zaman aralığında, pozitif akım uygulanmasıyla

şarj olan süperkapasitörün hücre geriliminin 0'dan V_1 değerine ulaştığı görülmektedir. İkinci olarak $t_1 - t_2$ aralığında süperkapasitör dinlenmeye bırakılmıştır. Bu işlem genellikle sızıntı akımlarının ölçülmesi için kullanılmaktadır. Üçüncü olarak $t_2 - t_3$ aralığında ilk adımda uygulanan akım ters yönlü tatbik edilerek süperkapasitörün deşarj olması sağlanır. Dördüncü olarak ters yönlü uygulanan akım $t_3 - t_4$ aralığında kısa bir süreliğine kesilip tekrar uygulanmıştır. Bu işlem süperkapasitörün eşdeğer iç direncini belirlemek için uygulanmaktadır. Şekil 1.13'deki eğrilerden ve bu eğrilerin belirlenen noktalarından faydalananak süperkapasitörün eşdeğer iç direnç değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

Şekil 1.12’de gösterilen süperkapasitör eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi için Şekil 1.13’de gösterilen deneysel şarj – deşarj gerilim eğrisi kullanılmaktadır. Şekil 1.14’de süperkapasitör hücre geriliminin değişimi belirli zaman aralıkları için yakınlaştırılmış şekilde gösterilmiştir (Çorapsız & Kahveci, 2023). Eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesinde Şekil 1.13’de süperkapasitör terminallerine uygulanan pozitif akımın (+I) referans değerine yaklaşık olarak 20ms civarında ulaştığı kabul edilir. Akımın referans değere ulaşmasından hemen sonra süperkapasitör terminalleri arasında meydana gelen ve Şekil 1.14a’da ΔV_1 olarak belirtilen gerilim düşümü ile eşdeğer devredeki R_1 direnci aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$R_1 = \frac{\Delta V_1}{I} \quad (1.13)$$

Sabit kapasite C_0 , şarjın hemen başlangıcında Şekil 1.14a’daki gerilim eğrisinden aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$C_0 = I * \frac{\Delta t_1}{\Delta V_2} \quad (1.14)$$

Geçici durum gerilimine bağlı olarak değişen C_v değeri süperkapasitörün şarj sonundaki yük miktarından belirlenebilir. Bu durumda şarj sonu yük miktarı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Q_{top} = I * \Delta t_2 \quad (1.15)$$

Burada Q_{top} toplam yük miktarını, Δt_2 ise şarj süresini temsil etmektedir. Denklem (1.15) gerilim ve kapasite cinsinden ifade edildiğinde;

$$Q_{top} = C_{diff} * \Delta V_3 \quad (1.16)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (1.16)’da C_{diff} diferansiyel kapasiteyi, ΔV_3 ise şarj sonu terminal gerilimini temsil etmektedir. Diferansiyel kapasite yük miktarı ve gerilim cinsinden aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$C_{diff} = \frac{dQ_{top}}{dV_3} \quad (1.17)$$

Denklem (1.17) toplam yük miktarı Q_{top} için çözüldüğünde;

$$Q_{top} = C_0 * \Delta V_3 + \frac{1}{2} * C_v * \Delta V_3^2 \quad (1.18)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (1.15) ve (1.18) birlikte değerlendirildiğinde C_v gerilim bağımlı kapasitesinin değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$C_v = \frac{2}{\Delta V_3^2} (I * \Delta t_2 - C_0 * \Delta V_3) \quad (1.19)$$

Şarj süresinin sonunda kalıcı durum bloğuna ait parametreler ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{cases} R_2 = \frac{\Delta V_3 - (\frac{\Delta V_4}{2})}{C_1} * \frac{\Delta t_3}{\Delta V_4} \\ C_2 = \frac{Q_{top}}{V_5} - (C_0 - \frac{1}{2} * C_v * V_5) \end{cases} \quad (1.20)$$

Burada V_5 gerilimi, Şekil 1.14b'deki deşarj eğrisinin başlamasından hemen sonra ölçülen bir gerilim değeridir.

1.9.2. Şarj Doluluk Oranının Belirlenmesi

Süperkapasitörün şarj doluluk oranının belirlenmesinde Bölüm 1.7.2'de verilen batarya şarj doluluk oranını belirleme yöntemi olarak kullanılan Amper Saat Sayma Metodu veya doğrudan hücre geriliminin şarj gerilimine bölünmesi metodu kullanılabilir.

1.10. Batarya/Süperkapasitör Hibrit Elektrikli Araçlar

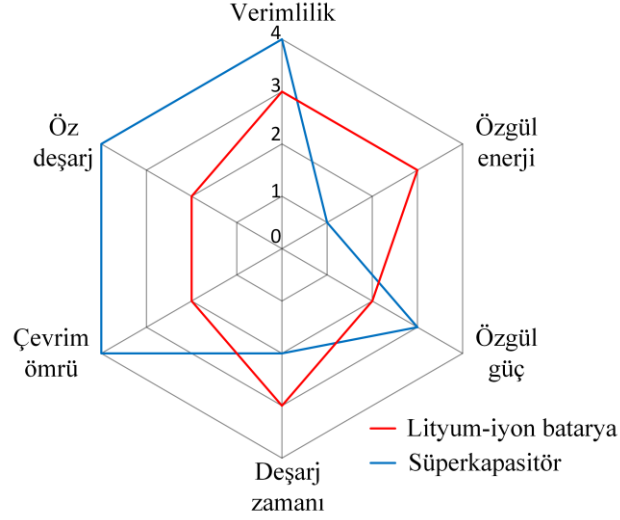
Tümüyle elektrikli araçlar çoğunlukla ya bataryalardan ya da batarya/X $\{X \in \text{Yakıt Hücresi, Süperkapasitör, Yakıt Hücresi/Süperkapasitör}\}$ paketlerinden meydana gelir. Bu kaynaklar arasında sadece batarya ve süperkapasitör geri kazanımlı frenleme enerjisini depolayabilir. Bataryalarda enerji depolama işlemleri elektrokimyasal temellere dayandığından üretici tarafından belirlenen sınırlı şarj akımı ile şarj edilebilirler. Dolayısıyla geri kazanımlı enerjinin belirli bir bölümü bataryaya depolanabilir. Öte yandan süperkapasitörlerde depolama işlemleri elektrostatik temellere dayandığından bataryaya kıyasla daha yüksek şarj akımlarına dayanabilirler. Elektrikli araç teknolojisinde sıklıkla kullanılan Lityum-iyon batarya ve süperkapasitörün bazı spesifik özellikleri Tablo 1.4’de verilmiştir (Snoussi vd., 2018a).

Tablo 1.4. Enerji depolama elemanlarına ait çeşitli ölçeklendirmeler

Özellik	1	2	3	4
Verimlilik (%)	20-40	40-70	70-90	90-98
Özgül enerji (Wh/kg)	<20	20-100	100-500	>500
Özgül güç (W/kg)	0-150	150-1500	1500-5000	>5000
Çevrim ömrü	<1000	1000-20000	20000-50000	>50000
Deşarj zamanı	msn-dak.	msn-1s	dak-s	s-gün
Öz deşarj (%)	<0,1	0,1-1	1-10	10-40

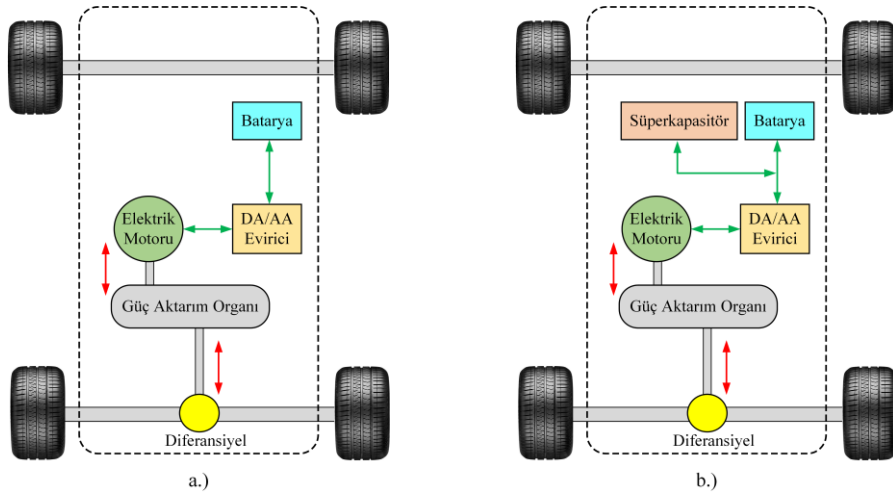
Tablo 1.4’deki sayısal değerlerin görsel olarak daha net anlaşılması için enerji depolama elemanlarının spesifik özelliklerine göre oluşturulan örümcek ağı diyagramı Şekil 1.15’de gösterilmiştir. Her iki enerji depolama elemanı ile tasarlanan bir enerji depolama sisteminin gerek yük gücünü karşılamada gerekse geri kazanımlı frenleme enerjisini depolanmasında yüksek verime sahip olacağı söylenebilir. Araştırmalar süperkapasitörlerin kullanılmasıyla otomobil uygulamalarında %15 ve otobüs uygulamalarında %20 oranında yakıt tüketimini düşürdüğünü göstermiştir (Rafik vd., 2007). Batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen tümüyle elektrikli araçlara ait genel yapı Şekil 1.16’da gösterilmiştir. Genel yapı bir enerji kaynağı, bir DA/AA evirici, bir elektrik motoru ve güç aktarım organından ibarettir. Şekil 1.16a’da enerji kaynağı olarak bataryanın kullanılması ani hızlanma durumlarında bataryadan yüksek deşarj akımlarının çekilmesine sebep olur.

Buna ek olarak ani yavaşlama durumlarında ise batarya yüksek geri kazanımlı frenleme akımlarına maruz kalır. Her iki durum da bataryanın etkili ve verimli çalışmasına engel olur.



Şekil 1.15. Batarya ve süperkapasitör özelliklerinin karşılaştırılması

Şekil 1.16b’de yüksek güç yoğunluğuna sahip süperkapasitör, bataryaya paralel bağlanarak gerek hızlanma gerekse yavaşlama durumlarında meydana gelebilecek tepe akımların karşılanmasında önemli bir rol oynayarak bataryanın stresini azaltır.



Şekil 1.16. Batarya-süperkapasitör hibrit elektrikli araç yapısı

Batarya ve süperkapasitör paketleri içeren elektrikli araç konfigürasyonunda en önemli adımlardan biri kaynakların DA baraya bağlantı biçimidir. Enerji depolama elemanları DA baraya doğrudan bağlanabileceği gibi bir DA/DA çevirici üzerinden de bağlanabilir.

Enerji depolama birimlerinin DA baraya bağlantı biçimine göre (i) pasif topoloji, (ii) batarya yarı-aktif topoloji, (iii) süperkapasitör yarı aktif topoloji, (iv) tam aktif olmak üzere dört farklı türde ara bağlantı topolojisi geliştirilmiştir.

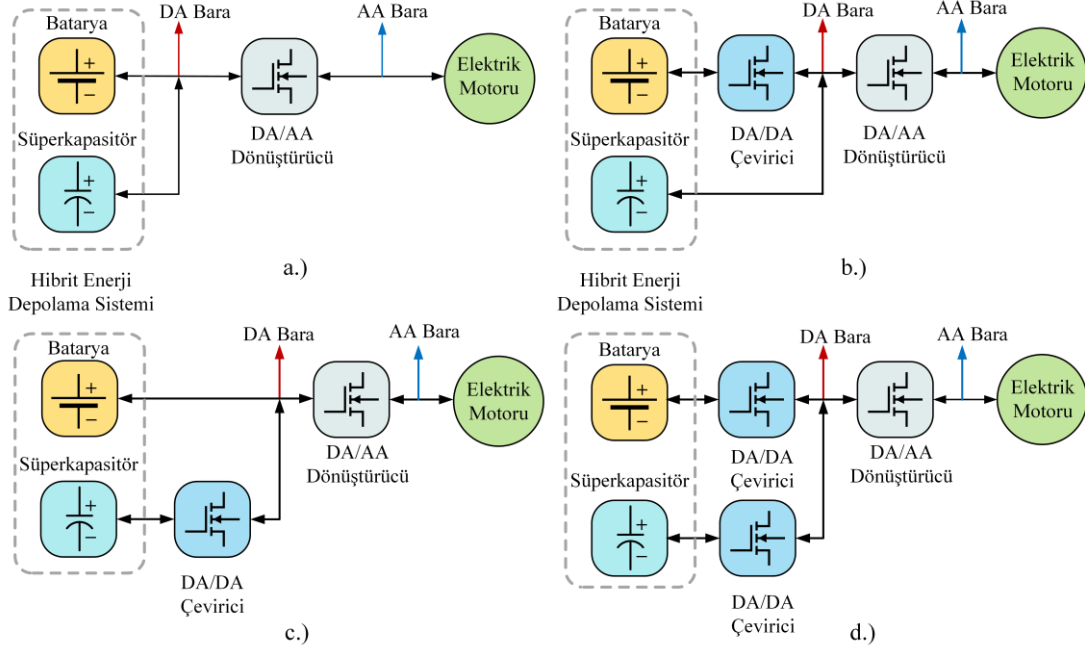
1.11. Ara Bağlantı Topolojileri

Batarya ve süperkapasitör paketlerinin terminal gerilimleri, besledikleri yüke bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu gerilim değişiklikleri elektrikli araç için kullanılacak motorda aracın hareketi için üretilecek momentte titreşimler meydana getirir ve verimin düşmesine sebep olur. Süperkapasitör paketlerinin düşük özgül enerjiye sahip olmalarından dolayı terminal gerilimindeki düşüş bataryalara nazaran daha hızlı gerçekleşir. Bu durum süperkapasitör paketlerinin elektrikli araçlarda tekil enerji kaynağı olarak kullanılamamasının başlıca sebepleri arasındadır. Ayrıca birden fazla enerji depolama birimi kullanılan hibrit güç sistemlerinde enerji kaynaklarının aynı DA baraya bağlanabilmesi için terminal gerilimlerinin birbirine eşit olması gerekmektedir. Ara bağlantı topolojilerinin kullanım amacı, enerji depolama birimlerinin terminal gerilimlerini aynı seviyede tutarak DA bara geriliminde meydana gelebilecek gerilim salınımlarını minimize etmektir.

1.11.1. Pasif Topoloji

Şekil 1.17a’da gösterilen pasif topoloji, batarya ve süperkapasitör paketlerini sisteme bağlamak için oldukça basit bir yaklaşımdır. Ayrıca pasif yapıda, enerji depolama birimleri, aralarında herhangi bir güç çeviricisi olmadan doğrudan DA baraya bağlanır. Bu durumda kaynakların akımları etkili bir şekilde kontrol edilemez ve sistem verimi düşük olur (Lahyani vd., 2013). Denetim kolaylığı ve maliyet açısından en uygun seçenek olan pasif topolojinin kullanılması için gereken şart enerji depolama birimlerinin gerilim seviyelerinin birleşme noktası olan DA bara gerilimiyle eşit olmasıdır. Ayrıca devre yapısından görüldüğü gibi bu topolojide gerçekleştirilecek hibrit yapının verimi oldukça düşük olacaktır. Bunun sebebi enerji yoğunluğu yüksek olan batarya normal koşullarda sabit bir gerilim değeri sağlarken enerji yoğunluğu düşük olan süperkapasitörün sağladığı gerilimin zamana bağlı olarak doğrusal bir şekilde azalmasıdır (Zhang & Li, 2020). Bu yapıda sisteme paralel bağlanan süperkapasitörün avantajı ise hızlı gerilim değişikliklerini engelleyen bir alçak geçiren filtre

görevi görerek kesintili yüksek yük akımlarının meydana getireceği ısıl kapasite etkisinin azaltılmasında oldukça etkili olmasıdır.



Şekil 1.17. Ara bağlantı topolojileri

Bunun yanı sıra enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımı, denetim sisteminden ziyade büyük oranda kendi iç dirençlerine bağlı olarak gerçekleşir. Dolayısıyla kaynaklar etkili bir şekilde yönetilemediğinden EA'nın ani hızlanma ve frenleme durumlarında batarya yüksek frekans akımlarına maruz kalacaktır ki bu da bataryanın verimli ve sağlıklı kullanımını kısıtlar (Shin vd., 2012).

1.11.2. Batarya Yarı Aktif Topoloji

Şekil 1.17b'deki batarya yarı aktif topolojide çift yönlü bir DA/DA çevirici kullanılarak batarya DA baradan izole edilir. Daha sonra bu seri yapıya süperkapasitör doğrudan paralel bağlanır. Bu yapının pasif topolojiye göre ilk göze çarpan dezavantajı ek DA/DA çevirici kullanılması sebebiyle maliyetin artması ve doğrudan DA baraya bağlanan süperkapasitörün güç akışını desteklemek için büyük boyutta seçilmesi gerekliliğidir (Song vd., 2015). Buna rağmen batarya DA baradan ayrılmasıyla EA'nın ani hızlanma ve yavaşlama durumlarında meydana gelebilecek ani akım değişikliklerinden korunmuş olur.

Bu durum ise hem batarya ömrünün uzamasına hem de bataryanın güvenli kullanımına katkı sağlar. Bununla birlikte bu yapıda da pasif topolojide olduğu gibi terminal gerilimi zamana bağlı olarak doğrusal bir şekilde azalan süperkapasitör DA barada geniş salınımlara sebep olabilir. Düşük bara gerilimi, özellikle hızlanma durumlarında EA'larda kullanılan EM'nin çıkış momentini sınırlandırabilir (Zhang & Li, 2020).

1.11.3. Süperkapasitör Yarı Aktif Topoloji

Süperkapasitörü, bir DA/DA çevirici aracılığıyla DA baradan ayıran ve bu seri yapıya bataryanın doğrudan paralel bağlandığı süperkapasitör yarı aktif topoloji Şekil 1.17c'de gösterilmiştir. Süperkapasitörün çevirici aracılığıyla DA baradan ayrılmasının bir sonucu olarak gerilimi denetlenebildiği için etkin bir şekilde kullanılabilmesi, büyük miktarda GKF enerjisi oluşabilecek durumlarda etkili olması ve süperkapasitör şarj durumunun yük geriliminden bağımsız olmasına olanak tanınması bu yapının avantajları arasında gösterilir (Kuperman & Aharon, 2011). Bu yapı kullanılarak gerçekleştirilecek hızlı ve etkili bir enerji yönetimi ile ani değişen yük akımları süperkapasitör tarafından emilir. Bunun yanı sıra sistemin maliyetini artıran DA/DA çevirici bu ani akım değişimlerinin ve yüksek gerilim salınımlarının üstesinden gelebilecek şekilde tasarlanmalıdır.

1.11.4. Tam Aktif Topoloji

Şekil 1.17d'de gösterilen tam aktif yapıda hem süperkapasitör hem de batarya birer DA/DA çevirici aracılığı ile DA baradan izole edilir. Bu şekilde hem bataryanın hem de süperkapasitörün gerilimleri aktif bir şekilde ayrı ayrı kontrol edilebilir. Bu durum hem bataryayı ani değişen akımlardan koruyarak batarya ömrünü uzatır hem de süperkapasitörün etkili bir şekilde kullanılmasına olanak tanır. Buna ek olarak sistem güvenilirliği, sabit DA bara gerilimi ve hata toleransı açısından incelendiğinde tam aktif topolojinin diğerlerine göre üstün olduğu söylenebilir. Daha önce açıklanan topolojilere kıyasla DA/DA çevirici sayısının artması ile sistem kayıplarının, boyutunun ve ağırlığının artması, denetim işleminin daha karmaşık hale gelmesi ve maliyetin artması tam aktif topolojinin dezavantajları arasında gösterilir (Etzeberria vd., 2012).

1.11.5. Ara Bağlantı Topolojilerinin Karşılaştırılması

Bölüm 1.11’de detaylı olarak incelenen ve enerji depolama birimlerinin verimliliğini, güvenliğini, denetimini ve maliyetini doğrudan etkileyen bağlantı topolojilerinin seçimi oldukça önemlidir.

Tablo 1.5. Ara bağlantı topolojilerinin karşılaştırılması

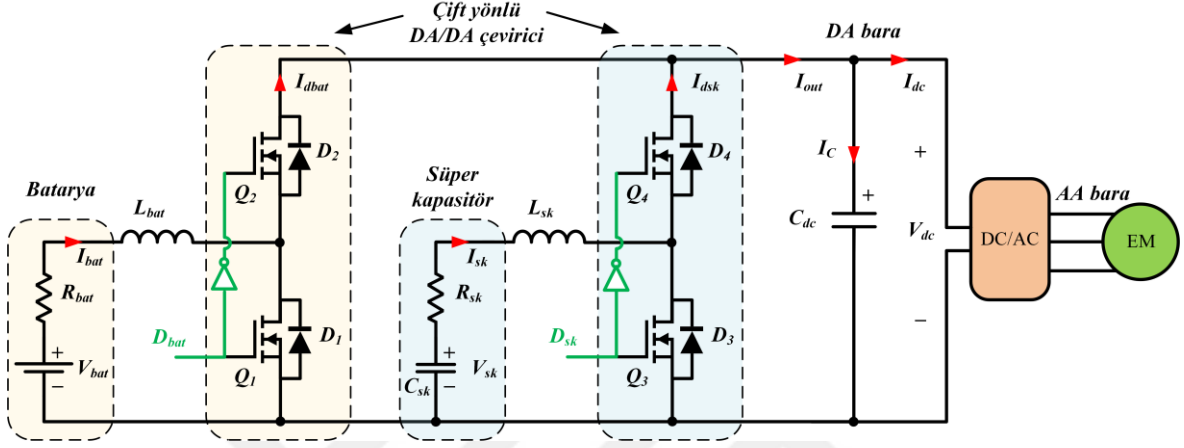
Topoloji yapısı	Maliyet	Denetim uyumu	DA bara salınımı	Hacim	Denetim zorluğu
Pasif	Düşük	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük
Yarı aktif	Orta	Orta	Orta	Orta	Orta
Tam aktif	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek

Pasif topolojide güç akışının doğrudan kontrolü olmadığı için kaynakların çıkış gerilimlerinin birbirlerine eşit olması zorunludur. Bu durum ise süperkapasitörün hacimsel boyutlarını artırır. Yarı aktif topolojilerde kaynakların sadece birinin güç akışı denetlenebilir. Bu durum denetimi yapılamayan kaynağın çıkış gerilimini DA bara gerilimi ile aynı olması zorunluluğunu beraberinde getirir. Aktif topolojide her iki kaynağın çıkış gerilimleri aktif bir şekilde denetlenebilir. Ancak bu durumda hem maliyet hem de denetim zorluğu artar. İncelenen topolojilerin çeşitli özellikleri bakımından karşılaştırılması Tablo 1.5’de verilmiştir. Topolojilere ait bahsedilen avantajlar ve dezavantajlar hep birlikte değerlendirildiğinde yarı aktif topoloji yapılarının maliyet ve kontrol edilebilirlik açısından en uygun seçim olacağı söylenebilir (Wang vd., 2017).

1.12. Enerji Depolama Birimlerinin Konfigürasyonu

Birden fazla enerji depolama biriminin kullanıldığı elektrikli araçlarda, enerji depolama birimlerinin ortak DA baraya bağlanması durumunda bir önceki bölümde açıklanan ara bağlantı topolojileri kullanılmaktadır. Şekil 1.18’de tam aktif topoloji kullanılarak gerçekleştirilen batarya-süperkapasitör hibrit güç sistemine sahip bir elektrikli araca ait genel yapı gösterilmiştir. Şekil 1.18’de Q_i $\{i = 1,2,3,4\}$ güç MOSFET’lerini, V_{bat} batarya terminal gerilimini, R_j iç dirençleri, L_j çevirici endüktanslarını, D_j çevirici görev

oranlarını $\{j \in bat, sk\}$ temsil etmektedir. C_{sk} süperkapasitör anma kapasitesini, V_{sk} süperkapasitör terminal gerilimini, C_{dc} DA bara kapasitesini, V_{dc} DA bara gerilimini temsil etmektedir. Şekil 1.18'deki güç sisteminde batarya ve süperkapasitör paketleri birer çift yönlü çevirici üzerinden DA baraya bağlanmıştır.



Şekil 1.18. Batarya-süperkapasitör HEDS konfigürasyonu

EM'nin güç talep etmesi durumunda çeviricilerin yükselten modda çalışması ile meydana gelen I_{dj} $\{j \in bat, sk\}$ akımları DA baraya enjekte edilir. Öte yandan araç iniş eğimli yoldayken veya sürücünün gaz pedalını kullanmadığı durumlarda çeviriciler düşüren modda çalışarak GKF enerjisini kaynaklara depolar. Güç sistemine ait akım eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I_{out}(t) = I_{dbat}(t) + I_{dsk}(t) \quad (1.21)$$

$$I_{dc}(t) = I_{out}(t) - I_C(t)$$

Burada I_{dbat} ve I_{dsk} sırasıyla çevirici çıkış akımlarını, I_{out} , bu iki akımın toplamını temsil etmektedir, I_{dc} , I_C sırasıyla DA bara akımını ve DA bara kapasite akımını temsil etmektedir. Şekil 1.18'deki güç sisteminin matematiksel modeli elde edilirken bazı kabullerin yapılması gerekir. Çeviricilerin kayıpsız ve sürekli iletim modunda çalıştıkları, anahtarlama frekansının çeviricilerin minimum frekans bant genişliğinden yeterince yüksek olduğu varsayıldığında giriş gücü ile çıkış gücü arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_{in}(t) = P_{out}(t) \quad (1.22)$$

Denklem (1.22)'de P_{in} giriş gücünü, P_{out} çıkış gücünü temsil etmektedir. Giriş gücü, batarya ve süperkapasitör paketlerinin sağladığı güçlerin toplamı olarak ifade edilir. Çıkış gücü P_{dc} ile temsil edildiğinde denklem (1.22) aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$P_{bat}(t) + P_{sk}(t) = P_{dc}(t) \quad (1.23)$$

Denklem (1.23)'de P_k $\{k = bat, sk, dc\}$ sırasıyla batarya gücünü, süperkapasitör gücünü ve DA bara gücünü temsil etmektedir. Denklem (1.23) enerji depolama elemanlarının gerilimleri ve akımları cinsinden aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$V_{bat}(t) * I_{bat}(t) + V_{sk}(t) * I_{sk}(t) = V_{dc}(t) * I_{dc}(t) \quad (1.24)$$

Denklem (1.23) ve (1.24) DA bara geriliminin (V_{dc}) mümkün olduğu kadar sabit tutulması gerektiğinin önemini ortaya koymaktadır. Maksimum güç aktarımı DA bara geriliminin sabit kalmasına bağlıdır (Namho vd., 2001).

Denklem (1.25), DA bara geriliminin verilen referans değerinde sabit tutulması durumunda çıkış akımının, çıkış gücünün DA bara gerilimi genliğinde ölçeklenmiş bir kopyası gibi olacağını ifade etmektedir.

$$I_{dc}(t) = \frac{P_{dc}(t)}{V_{dc}(t)} \quad (1.25)$$

Şekil 1.18'de çeviricilerin ortalama modeli hesaba katıldığında (Moon vd., 2014), kaynakların iç dirençleri ihmal edilerek hibrit güç sistemine ait zaman tanım bölgesi dinamik denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$L_{bat} \frac{dI_{bat}(t)}{dt} = V_{bat}(t) - (1 - D_{bat}(t)) * V_{dc}(t) \quad (1.26)$$

$$L_{sk} \frac{dI_{sk}(t)}{dt} = V_{sk}(t) - (1 - D_{sk}(t)) * V_{dc}(t) \quad (1.27)$$

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = (I_{dbat}(t) + I_{dsk}(t)) - I_{dc}(t) \quad (1.28)$$

Denklem (1.26), (1.27) ve (1.28)'de I_{bat} , I_{sk} , V_{dc} kontrol değişkenleridir. Çeviricilerin görev oranları D_{bat} ve D_{sk} DA bara geriliminin sabit tutulmasında önemli bir rol üstlenir. HEDS'de ana gaye, yüksek güç kalitesi ve yüksek güç verimi sağlamak için kaynak akımlarını çeşitli kontrol algoritmaları yardımıyla ayrı ayrı kontrol ederek DA bara gerilimini sabit tutacak çevirici görev oranlarını belirlemektir.

1.13. DA/DA Çeviricilerin Denetimi

Hibrit güç sistemlerinde, güç akışının verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi hem seçilen denetleyici türüyle hem de denetim parametrelerinin ayarlanmasıyla doğrudan ilişkilidir. Denetleyici türünün seçiminde tasarımcının ilk olarak ilgilendiği çeşitli varsayımlarla elde edilen sistemin transfer fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar sistemin zaman uzayında türetilen dinamik denklemlerinin “s” veya frekans uzayına taşınması ile elde edilir. Denklem (1.26), (1.27) ve (1.28)'deki dinamik denklemler yardımıyla Şekil 1.18'deki güç sistemine ait transfer fonksiyonları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I_{bat}(s) = \frac{V_{dc}}{s \cdot L_{bat}} \cdot D_{bat}(s) + \frac{V_{bat}(s) - V_{dc}}{s \cdot L_{bat}} \quad (1.29)$$

$$I_{sk}(s) = \frac{V_{dc}}{s \cdot L_{sk}} \cdot D_{sk}(s) + \frac{V_{sk}(s) - V_{dc}}{s \cdot L_{sk}} \quad (1.30)$$

$$V_{dc}(s) = \frac{1}{s \cdot C_{dc}} I_{out}(s) - \frac{1}{s \cdot C_{dc}} I_{dc} \quad (1.31)$$

Tüm başlangıç koşulları sıfır kabul edildiğinde transfer fonksiyonlarının ortak bir formda yazılabileceği görülmektedir. Dolayısıyla bu üç transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi genel form ile ifade edilebilir (Castro vd., 2011).

$$Y = \frac{A}{s}U(s) + r(s) \quad (1.32)$$

Denklem (1.32)'de Y çıkış işaretini, U giriş işaretini, A integratör katsayısını, r sistem bozucu girişini temsil eder. Bu değişkenlerin denklem (1.29), (1.30) ve (1.31)'deki transfer fonksiyonlarında karşılık geldiği ilişkiler sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$Y \rightarrow \{I_{bat}, I_{sk}, V_{dc}\} \quad (1.33)$$

$$A \rightarrow \left\{ \frac{V_{dc}}{L_{bat}}, \frac{V_{dc}}{L_{sk}}, \frac{1}{C_{dc}} \right\} \quad (1.34)$$

$$U \rightarrow \{D_{bat}, D_{sk}, I_{out}\} \quad (1.35)$$

$$r \rightarrow \left\{ \frac{V_{bat}(s) - V_{dc}}{s \cdot L_{bat}}, \frac{V_{sk}(s) - V_{dc}}{s \cdot L_{sk}}, -\frac{1}{s \cdot C_{dc}} I_{dc} \right\} \quad (1.36)$$

Şekil 1.18'deki çeviricilerin birim geri beslemeli kapalı çevrim transfer fonksiyonu ikinci dereceden olacağı için oransal+integral (PI) denetleyici ile kolaylıkla kontrol edilebilirler.

PI denetleyici transfer fonksiyonu;

$$H_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (1.37)$$

Batarya ve süperkapasitör transfer fonksiyonları $\{j \in bat, sk\}$;

$$H_j(s) = \frac{I_j(s)}{D_j(s)} = \frac{V_{dc}}{s \cdot L_j} \quad (1.38)$$

Denklem (1.38)'in hem batarya hem de süperkapasitör için belirli bir çalışma noktasında doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonu olduğuna dikkat edilmelidir. Bu durumda batarya ve süperkapasitörün geri beslemeli transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$H_{plant,j}(s) = \frac{H_j(s) \cdot H_{PI,j}(s)}{1 + H_j(s) \cdot H_{PI,j}(s)} = \frac{\left(\frac{V_{dc}}{s \cdot L_j} \right) \cdot \left(\frac{s \cdot K_{p,j} + K_{i,j}}{s} \right)}{1 + \left(\frac{V_{dc}}{s \cdot L_j} \right) \cdot \left(\frac{s \cdot K_{p,j} + K_{i,j}}{s} \right)} \quad (1.39)$$

Denklem (1.39) batarya ve süperkapasitör akımlarının denetimi için ikinci derece bir sistemin transfer fonksiyonu ile karşılaştırıldığında;

$$H_{bat}(s) = \frac{s \cdot V_{dc} K_{p,bat} + V_{dc} K_{i,bat}}{s^2 \cdot L_{bat} + s \cdot V_{dc} K_{p,bat} + V_{dc} K_{i,bat}} \equiv \frac{\omega_n^2}{s^2 + s \cdot 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (1.40)$$

$$H_{sk}(s) = \frac{s \cdot V_{dc} K_{p,sk} + V_{dc} K_{i,sk}}{s^2 \cdot L_{sk} + s \cdot V_{dc} K_{p,sk} + V_{dc} K_{i,sk}} \equiv \frac{\omega_n^2}{s^2 + s \cdot 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (1.41)$$

ifadeleri elde edilir.

DA bara gerilimine ait transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$H_{dc}(s) = \frac{V_{dc}(s)}{V_{bat}(s)} = \frac{1}{s \cdot C_{dc}} \quad (1.42)$$

DA bara geriliminin PI denetleyici ile denetlenmesiyle birim geribeslemeli sistemin transfer fonksiyonu denklem (1.43)'teki gibi yazılabilir.

$$H_{dc}(s) = \frac{\left(\frac{1}{s \cdot C_{dc}} \right) \cdot \left(\frac{s \cdot K_p + K_i}{s} \right)}{1 + \left(\frac{1}{s \cdot C_{dc}} \right) \cdot \left(\frac{s \cdot K_p + K_i}{s} \right)} \quad (1.43)$$

Denklem (1.43) DA bara geriliminin denetimi için ikinci derece bir sistemin transfer fonksiyonu ile karşılaştırıldığında;

$$H_{dc}(s) = \frac{s \cdot K_{p,dc} + K_{i,dc}}{s^2 C_{dc} + s \cdot K_{p,dc} + K_{i,dc}} \equiv \frac{\omega_n^2}{s^2 + s \cdot 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (1.44)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (1.40), (1.41) ve (1.44) birlikte değerlendirildiğinde çeviricilerin ve DA bara geriliminin denetimini gerçekleştirmek için PI denetim yapısı kullanılması durumunda gerekli olan denetim parametreleri Tablo 1.6’da verilmiştir.

Tablo 1.6. Çeviricilere ait denetim parametreleri

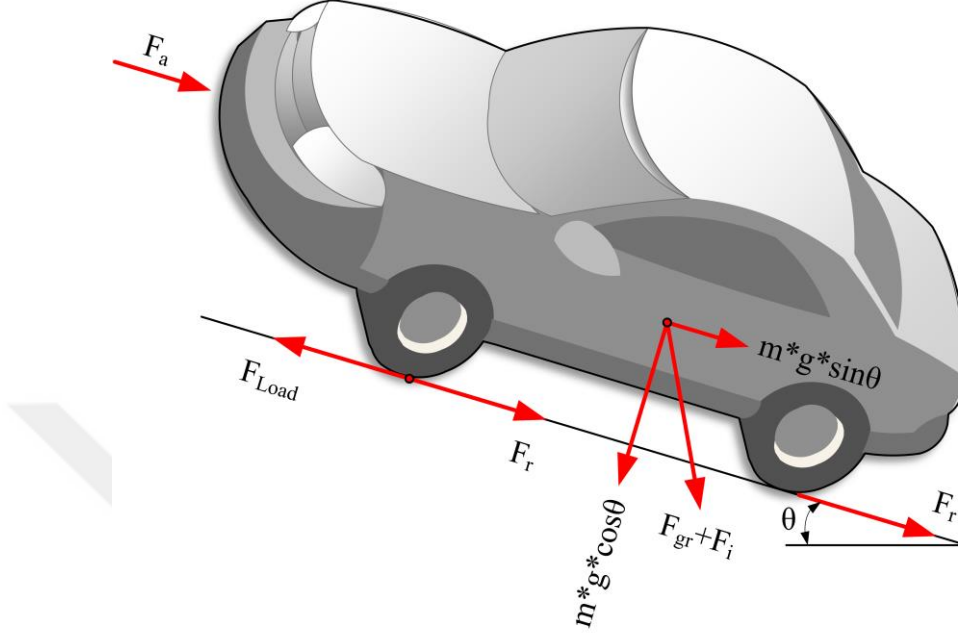
PI Denetleyici	K_p	K_i
I_{bat}	$2\xi\omega_n L_{bat} / V_{dc}$	$\omega_n^2 L_{bat} / V_{dc}$
I_{sk}	$2\xi\omega_n L_{sk} / V_{dc}$	$\omega_n^2 L_{sk} / V_{dc}$
V_{dc}	$2\xi\omega_n C_{dc}$	$\omega_n^2 C_{dc}$

Tablo 1.6’deki sönüm oranları (ξ) ve doğal frekanslar (ω) için uygun değerler seçilerek denetleyici parametrelerinin sayısal değerleri belirlenebilir (Azib vd., 2010).

1.14. Elektrikli Aracın Boylamsal Modeli

Elektrikli araçların hem fiziksel tasarımında hem de enerji depolama elemanlarının hacimsel boyutlandırılmasında sürüş çevrimleri (Kentsel Dinamometre Sürüş Çevrimi, Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi, Otoyol Sürüş Çevrimi vb.) tasarımcılara önemli kolaylıklar sunmaktadır. Gerçek zamanlı tasarımından önce aracın, hangi sürüş koşullarında nasıl bir dinamik tepkiye sahip olacağı çeşitli türlerde sürüş çevrimleri aracılığı ile belirlenebilir. Bunun yanı sıra sürüş çevrimleri tasarımcıların aynı sistem üzerinde farklı enerji depolama kombinasyonlarını denemesine yardımcı olur. Belirli bir sürüş çevrimi için gerekli olan elektriksel güç ve akım hem aracın fiziksel özelliklerine hem de çevresel koşullara bağlıdır. Araç ağırlığı, aracın ön yüzey alanı, tekerlek sürtünmesi ve eğim gibi faktörlerin araçta

kullanılacak HEDS'nin hacmi ile orantılı olduğu söylenebilir. Şekil 1.19 elektrikli aracın boylamsal modelini temsil etmektedir.



Şekil 1.19. Araca etkiyen kuvvetler

Yol eğiminin θ olduğu varsayıldığında araca etkiyen kuvvetler toplamı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_{Load} = F_a + F_r + F_i + F_{gr} \quad (1.45)$$

Denklem (1.45)'de F_a , aerodinamik sürütme veya aerodinamik rezistans olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$F_a = \frac{1}{2} * \rho * C_d * A_f * (v + v_{wind})^2 \quad (1.46)$$

Denklem (1.46)'daki notasyonlarda; ρ hava yoğunluğunu (kg/m^3), C_d aerodinamik katsayıyı, A_f araç ön yüzey alanını (m^2), v araç hızını (m/s), v_{wind} rüzgâr hızını (m/s) temsil etmektedir. Aerodinamik katsayı araç şekline göre deneysel olarak belirlenmektedir ve otomobiller için $0,3 < C_d < 0,4$ aralığındadır. Denklem (1.45)'de F_r , tekerlek sürütme direnci olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$F_r = m * g * C_r * \cos \theta \quad (1.47)$$

Denklem (1.47)'deki notasyonlarda; m araç ağırlığını (kg), g yerçekimi ivmesini (m/s^2), C_r sürüklenme direnci katsayısını, θ yol eğimini (*der.*) temsil etmektedir. Sürüklenme direnci katsayısı yol koşullarına göre değişiklik göstermektedir ve asfalt veya beton yollar için 0,013 civarındadır (Kıyaklı & Solmaz, 2018). Denklem (1.45)'de eğim direnci olarak ifade edilen F_{gr} ve başlama direnci olarak ifade edilen F_i aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} F_{gr} &= m * g * \sin \theta \\ F_i &= m * a \end{aligned} \quad (1.48)$$

Denklem (1.48)'in ikinci ifadesinde a ivmeyi temsil etmektedir. Hesaplama yükünü hafifletmek amacıyla yol eğiminin sıfır olduğu ($\theta = 0^\circ$) varsayıldığında Denklem (1.48)'in ilk ifadesi sıfır olacaktır. Bu durumda gerekli olan yük gücü aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

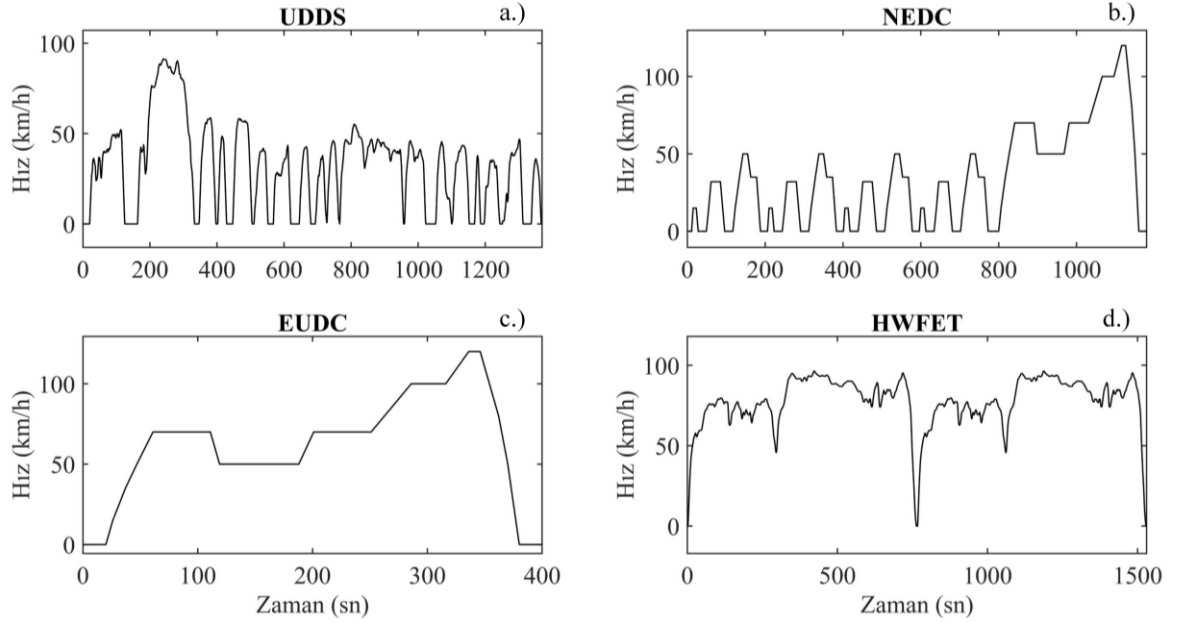
$$P_{Load} = \left(\frac{v}{\eta} \right) * \left[F_r + F_a + \left(m + \frac{j}{r^2} \right) \frac{dv}{dt} \right] \quad (1.49)$$

Denklem (1.49)'da v araç hızını ve η evirici verimini temsil etmektedir. Evirici veriminin genellikle %85-%95 arasında olduğu kabul edilmektedir.

1.15. Sürüş Çevrimleri

Sürüş çevrimi, aracın ilk çalıştırma anından başlayan ve belirli yol koşullarını katettikten sonra aracın tekrar durdurularak enerji kaynaklarından sağlanan güç akışının sonlandırılması arasında geçen sürede aracın hızındaki değişikliklerin bütünü olarak tanımlanabilir. Sürüş çevriminin elde edilmesinde bu hız değişikliklerinin hangi zaman aralıklarında gerçekleştiği bilinmelidir. Sürüş çevrimleri gerek enerji depolama birimlerinin boyutlandırılmasında gerekse birden fazla enerji depolama biriminin kullanıldığı HEDS'lerde kaynaklar arasındaki güç paylaşımının gerçekleştirilmesinde tasarımcıya

kolaylık sağlar. Sürüş çevrimleri gerçek sürüş döngülerini tam anlamıyla yansıtmayan, düz hızlanma ve sabit hız periyotlarından oluşan modal çevrimlerden ve yol sürüş koşullarına bağlı çok sayıda hız varyasyonu içeren geçici çevrimlerden olmak üzere iki ana sınıfa ayrılabilir (URL-7). Şekil 1.20’de elektrikli araçların çeşitli testlerinde sıklıkla kullanılan sürüş çevrimlerinden dört tanesi gösterilmiştir.



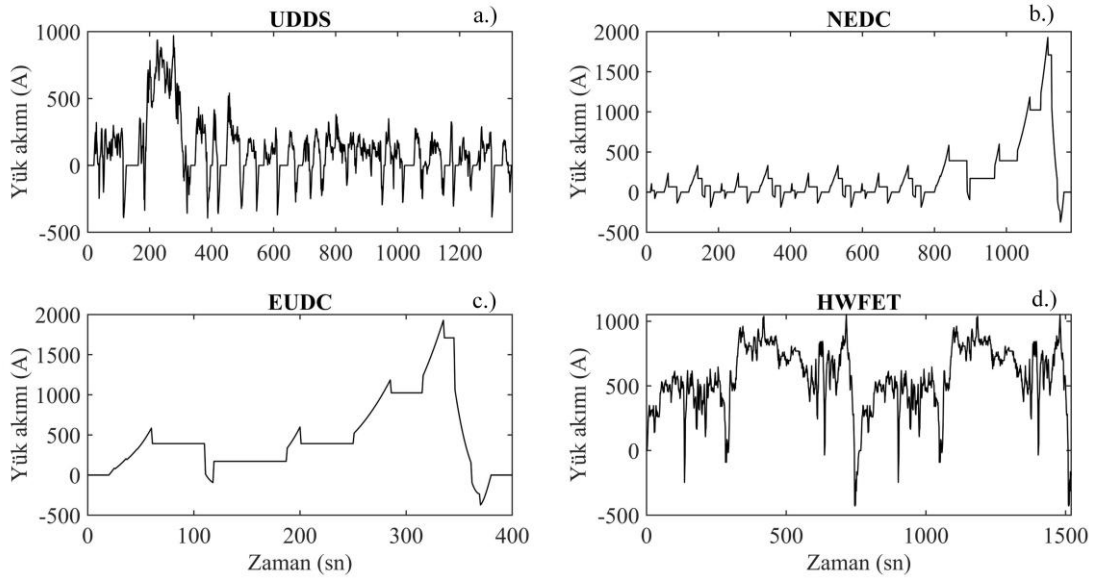
Şekil 1.20. Çeşitli sürüş çevrimlerinin hız zaman ilişkileri

Şekil 1.20a’da Kentsel Dinamometre Sürüş Çevrimi (UDDS) gösterilmiştir. Bu sürüş çevriminin uzunluğu 12,07km, maksimum hızı 56,7km/s, ortalama hız 31,5km/s, süresi 1370sn olup toplam durma süresi 259sn’dir. Bu sürüş çevrimi gerçek zamanlı sürüş koşullarına en yakın olan çevrimlerden biridir. Gerek hızlanma ve gerekse yavaşlayıp, durma anları şehir içi sürüş koşullarına oldukça yakındır. Bu sebeple bu sürüş çevrimi bilimsel çalışmaların çoğunda kullanılmaktadır. Şekil 1.20b’de Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü (NEDC) gösterilmiştir. Bu sürüş çevrimi yukarıda bahsedilen modal sürüş çevrimleri arasındadır ve gerçek sürüş koşullarını pek temsil etmez. Genellikle ani hızlanma ve ani yavaşlama (*agresif sürüş*) koşullarını test etmek için kullanılmaktadır. Şekil 1.20c’de Ekstra Kentsel Sürüş Döngüsü (EUDC) gösterilmiştir. Daha çok otoyol sürüşünü temsil eden bu sürüş çevrimi yüksek hızlı sürüş koşullarını temsil etmek için geliştirilmiştir. Şekil 1.20d’de Otoyol Yakıt Ekonomi Testi (HWFET) gösterilmiştir. Bu sürüş döngüsü adından da

anlaşılacağı üzere daha çok yakıt ekonomisi için geliştirilen tekniklerin testlerinde kullanılmaktadır.

1.15.1. Sürüş Çevrimine Göre Yük Gücünün Elde Edilmesi

Bölüm 1.14’de genel hatlarıyla açıklanan EA’nın boylamsal modelinden türetilen kuvvet denklemleri yardımıyla, araç hız-zaman verileri kullanılarak sürüş çevriminin tamamlanması için gerekli olan yük akımı belirlenebilmektedir. Her ne kadar tam olarak gerçek sürüş koşullarını temsil etmese de bu çevrimler gerçek zamanlı tasarımdan önce üreticilere yakıt tüketimi, çevre kirliliği ve kullanılması gereken HEDS’nin boyutuna ait önemli bilgiler sağlamaktadır. Şekil 1.21’de 20V DA bara gerilimi için Bölüm 1.15’de verilen sürüş çevrimlerine ait yük akımları gösterilmiştir. EA’nın sürüş çevrimindeki hız değerlerini sağlayabilmesi için EM’nin moment üretmesi gerekir. Buradaki “yük akımları” ifadesi bu momentin üretilmesi için enerji kaynaklarından talep edilen akım değeridir.



Şekil 1.21. Çeşitli türlerde sürüş çevrimleri

Şekil 1.21’deki yük akımları denklem (1.49) kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 1.20’deki sürüş çevrimlerine ait araç hızları sisteme girdi olarak verilmelidir. Çıkışta sistemin sürüş çevrimini tamamlaması için gerekli olan yük gücü elde edilir. Daha sonra denklem (1.25) kullanılarak yük akımları belirlenir. Sürüş çevrimlerinden yük akımları elde edilirken DA bara geriliminin sabit olduğu kabul edilir. Şekil 1.21a’daki UDDS sürüş

çevrimine ait yük akımında gerek aracın hareket için ihtiyaç duyduğu akım ve gerekse sağladığı GKF enerjisi oldukça fazladır. Bu yük akım profilinin daha çok GKF enerjisinin dikkate alındığı testlerde etkili olacağı söylenebilir. Şekil 1.21b, 1.21c, 1.21d'deki NEDC, EUDC, HWFET sürüş çevrimlerine ait yük akımlarında GKF enerji etkisinin oldukça az olduğu ve bu yük akım profillerinden NEDC'nin ve EUDC'nin daha çok EA'nın menzilini test etmede ve HWFET yük akım profilinde ise enerji depolama elemanlarının dinamik tepkilerinin belirlenmesinde kullanılabileceği söylenebilir. Yük akımlarının elde edilmesinde kullanılan EA parametreleri Tablo 1.7'de verilmiştir.

Tablo 1.7. EA parametreleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Araç ağırlığı	m	500	kg
Atalet momenti	j	0,5	kg.m ²
Hava sürtünme direnci	C _r	0,015	-
Hava yoğunluğu	ρ	1,25	kg.m ³
Aerodinamik sürtünme katsayısı	C _d	0,51	-
Araç ön yüzey alanı	A _f	2,4	m ²
Tekerlek yarıçapı	r	0,26	m

Şekil 1.21'de sürüş çevrimlerinin tamamında yük akımlarının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu akım değerlerinin laboratuvar ortamında deneysel olarak sağlanması pek mümkün olmamaktadır. Denklem (1.25)'e göre her ne kadar DA bara gerilimi artırılarak yük akımları azaltılabilse de bu durumda hem enerji depolama birimlerinin hem de DA/DA çeviricilerinin hacimsel boyutlarının artması gerekliliği ortaya çıkacaktır. Bilimsel çalışmaların çoğunda bu problemlerin üstesinden gelmek için yük gücünün tasarımcının elinde bulunan enerji depolama birimlerinin anma değerlerine ölçeklenerek elde edildiği belirtilmiştir. Bu sebeple araştırmacılar literatüre sundukları birçok çalışmada yük akımının veya sürüş çevriminin ölçeklenmiş bir versiyonunu kullanmayı tercih etmişlerdir (Florescu vd., 2015; Snoussi vd., 2018a; Yin vd., 2016). Bu ölçeklendirmeler gerçek EA'lar için birebir sonuç vermese de tasarımcıya, kullanılacak enerji kaynaklarının boyutları ve DA/DA çevirici güçleri gibi kritik donanımların belirlenmesinde kolaylık sağlar.

1.16. Elektrikli Araçlarda Enerji Yönetimi

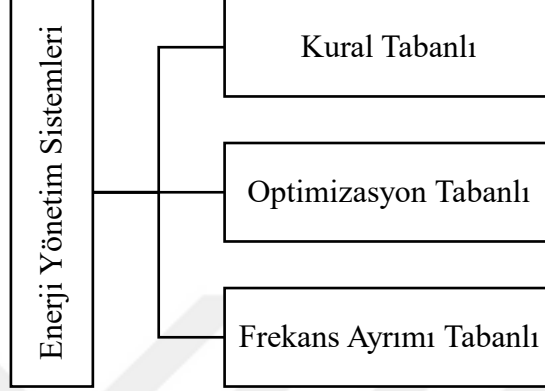
Araç üreticileri, özellikle 1973 yılında gerçekleşen petrol krizi (Balassa, 1981) sonrasında İYM kullanan araçlara bir alternatif üretmenin artık kaçınılmaz olduğunun farkına varmışlardır. O yıllardaki teknolojik gelişmeler göz önüne alındığında ortaya iki alternatif çıkmıştır. Bunlardan birincisi batarya teknolojilerini geliştirmek ve elektrikli araçları tekrar gündeme getirmek, ikincisi ise İYM'nin kullandığı sıvı yakıt miktarını azaltmaktır. Birinci seçenek için yeterli teknolojik altyapının mevcut olmadığını düşünerek İYM kullanan sıvı yakıtlı araçlarda tüketilen enerji miktarını azaltma yolunu seçtiler. Böylece araçlarda enerji yönetimi kavramı doğmuş oldu.

Enerji yönetimi, kalite ve performansı düşürmeden enerji kayıplarını en aza indirmek, enerjiyi en verimli şekilde kullanmak için izlenmesi gereken olaylar bütünü olarak tanımlanabilir. EA'lar arasında öncelikle HEA'larda kullanılan enerji yönetimi, İYM kullanımını minimuma indirerek sıvı yakıttan tasarruf elde etmek için düşünülmüştür (Musardo vd., 2005). Daha sonra sürücünün gaz pedalını kullanmadığı durumlarda tekerler tarafından üretilen kinetik enerjiyi geri kazanımlı frenleme kullanılarak bataryaya tekrar depolama düşüncesi geliştirilmiştir. Bu sayede bataryayı belirli bir enerji seviyesinde çalıştırmak (*örn. %10 ile %90 aralığında*) mümkün olmaktadır (Binggang vd., 2005; Paterson & Ramsay, 1993). Buna ek olarak belirli bir enerji seviyesinde bulunan batarya hem düz hem de yokuş eğimli yolda İYM'ye güç sağlayarak sıvı yakıt tüketimini minimum seviyede tutabilmektedir.

HEA'larda, İYM ile EM arasındaki etkileşimi sağlamak için gerçekleştirilen enerji yönetimi TEA'da da karşımıza çıkmaktadır. Ancak bataryanın ani güç ihtiyacında gerekli gücü ve performansı sağlayamaması sebebiyle ikincil bir enerji kaynağı kullanılması fikri ortaya atılmıştır (Li vd., 2018b). Birden fazla kaynağın bulunduğu sistemlerde, kaynakların karakteristik özelliklerine göre görev/güç paylaşımı gerçekleştirmek enerji yönetiminin en temel görevlerinden biri olarak ifade edilebilir. Son yıllarda geliştirilen yüksek güç yoğunluğuna sahip, çok kısa sürede şarj olabilen, şarj/deşarj döngüsü oldukça yüksek olan süperkapasitörlerin ikincil enerji kaynağı olarak EA'larda kullanılması ile menzil, performans ve batarya ömrünü uzatma işlemlerinde verimli sonuçlar elde edilmiştir (Güneş vd., 2018).

Sağladığı avantajlara rağmen, birden fazla enerji kaynağının kullanımının beraberinde getirdiği bazı problemlerden söz etmek mümkündür. Araştırmacılar bu problemlere çözüm

ararken; hangi enerji kaynağının hangi koşullarda kullanılacağı, hangi enerji kaynağının birincil hangisinin ikincil olacağı, geri kazanımlı frenleme enerjisini hangisinin daha verimli depolayabileceği gibi soruları gaye edinmiştir. İşte tam bu noktada enerji yönetim sistemi (EYS) olarak bahsi geçen kavram ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1.22. Enerji yönetim türleri

TEA’larda iki çeşit EYS’den söz etmek mümkündür. Bunlardan birincisi batarya yönetim sistemleridir ve pil güvenliğini artırmaya ve pilin kullanım ömrünü uzatmaya yönelik gerçekleştirilen yönetim sistemidir. İkinci yönetim biçimi ise enerji depolama birimlerinden oluşan sistemlerde, enerji kaynakları arasında görev/güç dağılımını sağlamak amacıyla gerçekleştirilir. Bu sistemler hibrit enerji depolama sistemleri (HEDS) olarak bilinir. Bu tür sistemlerde ana gaye, bataryayı ani şarj ve deşarj akımından korumaktır. Aksi durumda batarya ömrü normal kullanımından çok daha kısa olacaktır. EA’larda enerji yönetimi Şekil 1.22’de gösterildiği gibi Kural Tabanlı, Optimizasyon Tabanlı ve Frekans Ayrımı Tabanlı olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir.

1.16.1. Kural Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri

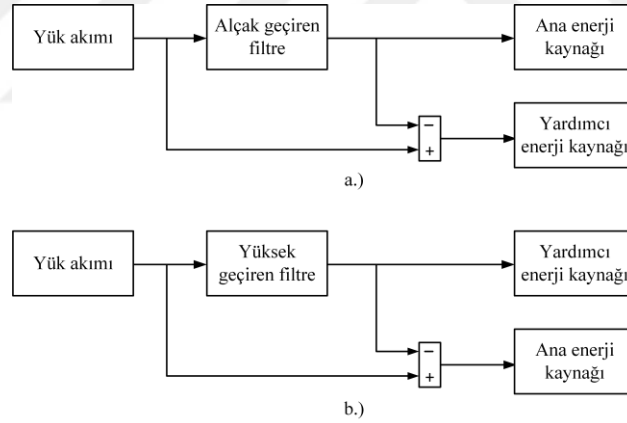
Kural tabanlı EYS’lerin avantajı kolay bir şekilde gerçek zamanlı sistemlere uygulanabilmesidir. Bu sistemler kullanılan enerji kaynaklarının dinamik özelliklerine, sürüş ve yol koşullarına bağlı olarak işletilen kurallardan oluşmaktadır. Bu yönetim sisteminin uygulanmasında önceden belirlenmiş deneyimlere ve kriterlere ihtiyaç duyulması, sürüş ve yol koşullarının değişmesi durumunda yetersiz kalabilmesi bu yöntemin dezavantajları arasına gösterilmektedir.

1.16.2. Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri

Belirli sürüş koşulları için en iyi güç tahsis kurallarını işletebilen optimizasyon tabanlı EYS'ler bir ön koşul gerektirmesi sebebiyle bazı dezavantajlara sahiptir. Örneğin sürüş koşullarının ihtiyaç duyduğu yük profili optimize edilen yük talebinden büyük oranda farklı olması durumunda bu EYS'ler yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca optimizasyon işlemlerinin gerçek zamanlı uygulanması ağır matematiksel hesaplamalar gerektirmektedir.

1.16.3. Frekans Ayrımı Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri

Frekans ayrımı tabanlı EYS'lerin öne çıkan en önemli avantajı diğer EYS'lere kıyasla herhangi bir çalışma veya deneyim koşulu gerektirmemesidir. Enerji depolama birimlerinin sağlaması gereken yük akımı Şekil 1.23'de gösterildiği gibi iki ayrı frekans bileşenine ayrılarak kaynaklardan temin edilir.



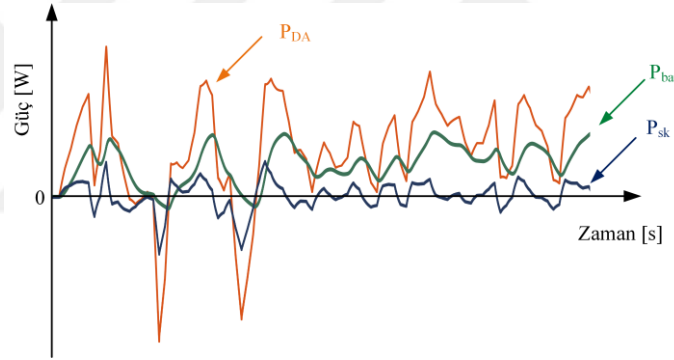
Şekil 1.23. Yük akımının filtrelenmesi

Filtre tipi olarak AGF kullanılması durumunda AGF'nin çıkışı yavaş dinamiklere sahip AEK'ya verilirken, YGF kullanılması durumunda da YGF'nin çıkışı hızlı dinamiklere sahip YEK'ya verilir. Bu EYS'ler, yük akımının sabit bir frekans değeri için ayrıştırılması sonucunda sürüş koşullarından bağımsız hale gelemez ve optimum performansı garanti edemez. Ancak yük akımının frekansını belirli kriterlere göre adaptif oranda tahsis edildiğinde EYS sürüş koşullarından bağımsız hale getirilebilmektedir. Böylece sürüş koşullarının değişmesi durumunda enerji verimliliğinin diğer yöntemlere kıyasla daha

yüksek olacağı söylenebilir. Yük akımının filtrelenmesi ve kullanılacak filtrenin kesim frekansının belirlenmesi bu yöntemin dezavantajları arasında gösterilmektedir.

1.16.4. Sabit Frekans Ayrımlı Enerji Yönetim Sistemi

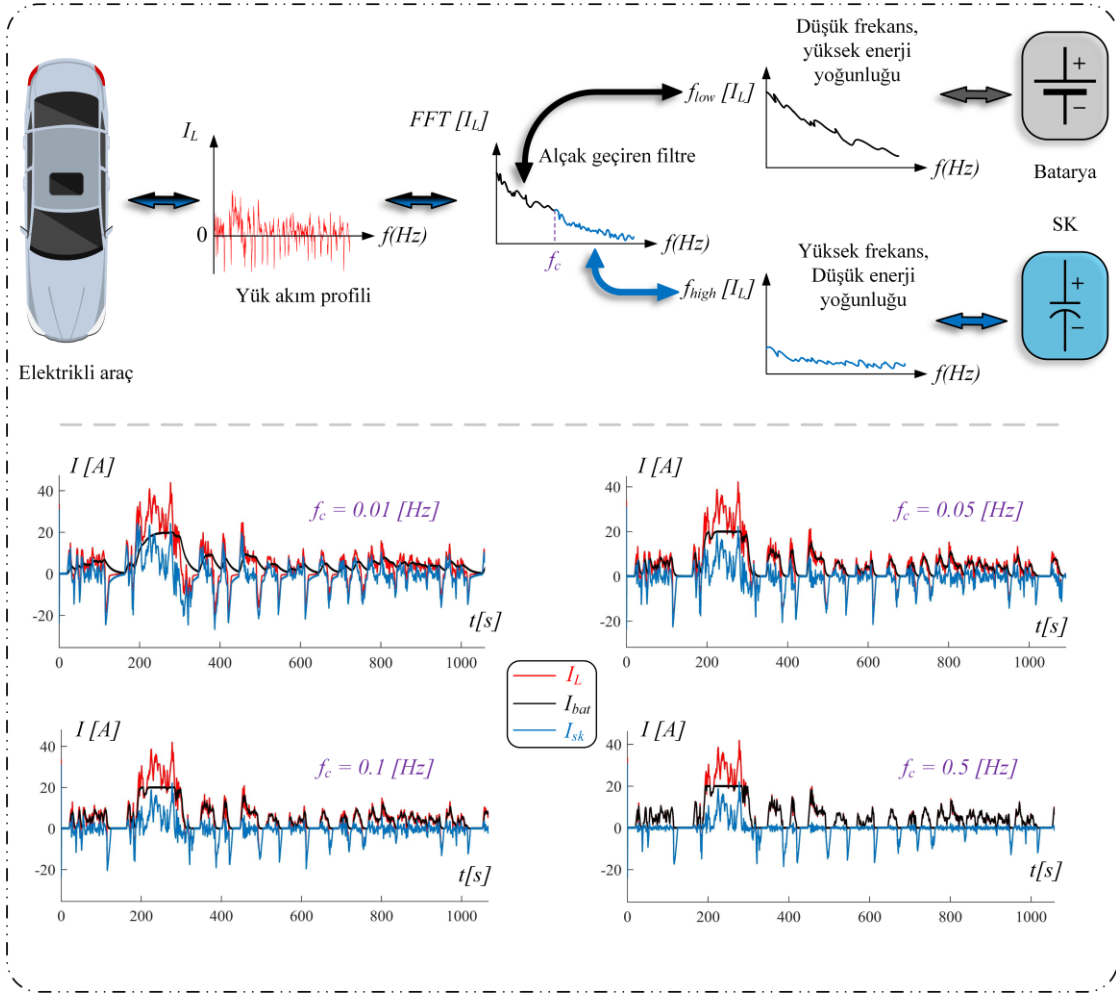
Yük akımının sabit oranda filtrelenmesi ilkesine dayanan Sabit Frekans Ayrımlı Enerji Yönetim Sistemlerinde (SFA-EYS) filtreleme işlemi için AGF, YGF veya her ikisi birden kullanılabilir. Bu filtrelerden birini veya her ikisini kullanarak, yük akımı düşük ve yüksek frekans bileşenlerine ayrıştırılır. Bu akımların kaynaklardan nasıl temin edileceğini belirlemek için belirli yük talebine karşı kaynakların dinamik tepkilerini bilmek gerekir (Silva vd., 2013). Şekil 1.24, belirli bir yük talebi için batarya, süperkapasitör ve DA bara dinamik tepkilerinin bir örneğini göstermektedir.



Şekil 1.24. Enerji kaynaklarının dinamik tepkileri

Şekil 1.24'den görüldüğü gibi DA bara üzerinde oluşan yüksek frekanslı gücü (P_{DA}) elde etmek için, yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya, düşük frekans bileşenlerine sahip güçleri (P_{bat}) karşılarken, yüksek güç yoğunluğuna sahip süperkapasitör, yüksek frekans bileşenlerine sahip güçleri (P_{sk}) karşılamaktadır. Frekans Ayrımı Tabanlı Enerji Yönetim Sistemleri (FAT-EYS) bu prensibe dayanmaktadır. Kullanılan filtrelerin kesim frekansının belirlenmesindeki zorluklar bu yöntemin dezavantajları arasında yer almaktadır. Literatürde sunulan çalışmalar, kesim frekansının belirli simülasyonlardan elde edilebileceğini göstermiştir (Çorapsız & Kahveci, 2022). Kullanılan filtrenin kesim frekansı düşükse, yüksek enerji yoğunluğuna sahip frenleme akımları süperkapasitöre doğru akacaktır. Süperkapasitör hızlı şarj olacağından bu akımların büyük bir kısmının depolanamaması mümkündür. Aksine kesme frekansı yüksek ise batarya yüksek frekanslı akımlara maruz

kalacaktır. Bu nedenle kesim frekansı optimum olarak belirlenmelidir. Şekil 1.25, AGF kullanılarak dört farklı kesme frekansına göre gerekli gücün kaynaklardan nasıl temin edildiğini göstermektedir. Şekil 1.25'de gösterildiği gibi, EA'nın yük akımı öncelikle düşük ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılmıştır. Batarya, düşük frekansta yüksek enerji yoğunluğu sağlarken, süperkapasitör, yüksek frekansta düşük enerji yoğunluğu sağlar. Şekil 1.25'in alt kısmındaki dört farklı kesim frekansı için simülasyon örnekleri incelendiğinde, kesim frekansının artmasıyla birlikte gücün tamamına yakını bataryadan sağlanmaktadır. Bu durumda süperkapasitör sadece GKF enerjisinin depolanmasında etkilidir.

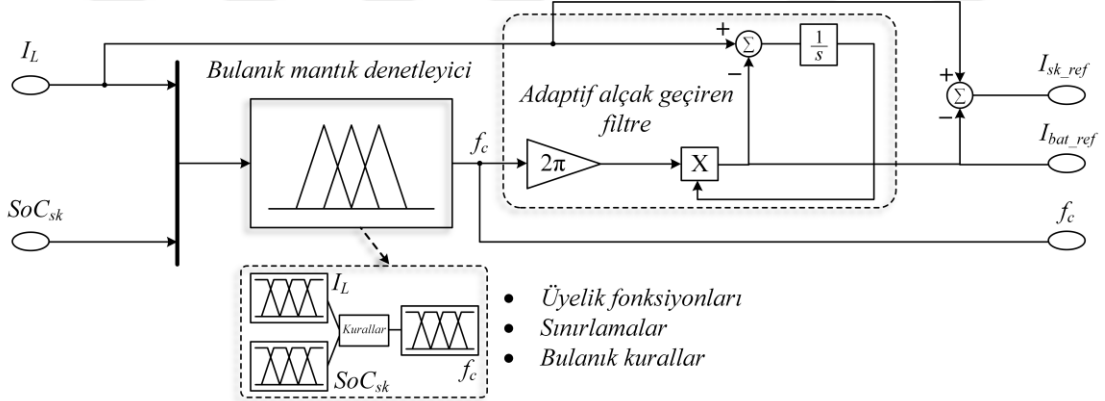


Şekil 1.25. Yük akımının filtrelenmesi ve sabit kesim frekansında güç ayrımı

Şekil 1.25'de I_L yük akımını, f yük akım frekansını, $FFT[I_L]$ yük akımının Fourier dönüşümünü, f_c filtre kesim frekansını, $f_{low}[I_L]$ ve $f_{high}[I_L]$ sırasıyla yük akımının düşük ve yüksek frekans bileşenlerini temsil etmektedir.

1.16.5. Adaptif Frekans Ayrımlı Enerji Yönetim Sistemi

Enerji kaynakları arasında, güç paylaşımı gerçekleştirmek için sabit bir kesme frekansının seçilmesi, her bir sürüş çevrimi için optimum enerji yönetimini garanti edemez. Özellikle şehir içi sürüşlerde araç çok sık yavaşlayıp hızlanacağı için yük akımındaki salınımın yüksek olacağı söylenebilir. Öte yandan, şehirlerarası sürüş çevrimlerinde sürüş koşulları sık değişmeyeceğinden yük akımındaki salınımlar düşük olacaktır. Bu nedenle, şehir içi sürüş çevrimi için belirlenen kesim frekansı, şehirlerarası sürüş çevrimlerinde optimum enerji yönetimini sağlayamayabilir. Ayrıca, kural tabanlı EYS kullanılarak hem şehir içi hem de şehirlerarası sürüş için farklı kesim frekansları belirlense de bu yaklaşım farklı sürüş koşulları için yetersiz olabilir. Bu sorunun üstesinden gelmek ve sürüş koşullarındaki değişikliklere uyum sağlamak için uyarlanabilir filtreler geliştirilmiştir. Yük akımına ve süperkapasitör şarj doluluk oranına göre adaptif olarak belirlenen kesme frekansının HEDS'lerde verimi arttırdığı literatürde birçok çalışma ile kanıtlanmıştır. Şekil 1.26, süperkapasitör doluluğuna (SoC_{sk}) ve yük akımının genliğine (I_L) dayalı olarak AGF'nin kesme frekansının uyarlanmasını göstermektedir.



Şekil 1.26. Adaptif alçak geçiren filtre ile yük akımının filtrelenmesi

Bulanık mantık denetleyici, giriş üyelik fonksiyonlarına ve belirlenen kurallara göre çıkışta kesme frekansını (f_c) üretir. Giriş büyüklüklerine göre kesme frekansının değiştirilmesi bu işlemi uyarlanabilir olarak gerçekleştirir. Uyarlanabilir filtrenin çıkışında düşük frekans bileşenleri oluşacağından, bu sinyal batarya referans akımını (I_{bat_ref}) oluşturur. Batarya referans akımı, yük akımından çıkarılarak süperkapasitör akımının

(I_{sk_ref}) referans değeri elde edilir. Şekil 1.26'daki benzetim modeli elde edilirken, AGF'nin transfer fonksiyonu kullanılabilir.

AGF'nin transfer fonksiyonu;

$$\begin{cases} H_{AGF} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1} \\ \tau = \frac{1}{2\pi f_c} \end{cases} \quad (1.50)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (1.50)'de τ kesim periyodunu temsil etmektedir. Bu durumda batarya ve süperkapasitör referans akımları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{cases} I_{bat_ref} = I_L * \frac{1}{\frac{1}{(2\pi f_c) \cdot s} + 1} \\ I_{sk_ref} = I_L - I_{bat_ref} \end{cases} \quad (1.51)$$

Denklem (1.51)'in ilk ifadesi batarya referans akımı için çözüldüğünde adaptif filtrenin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi elde edilebilir.

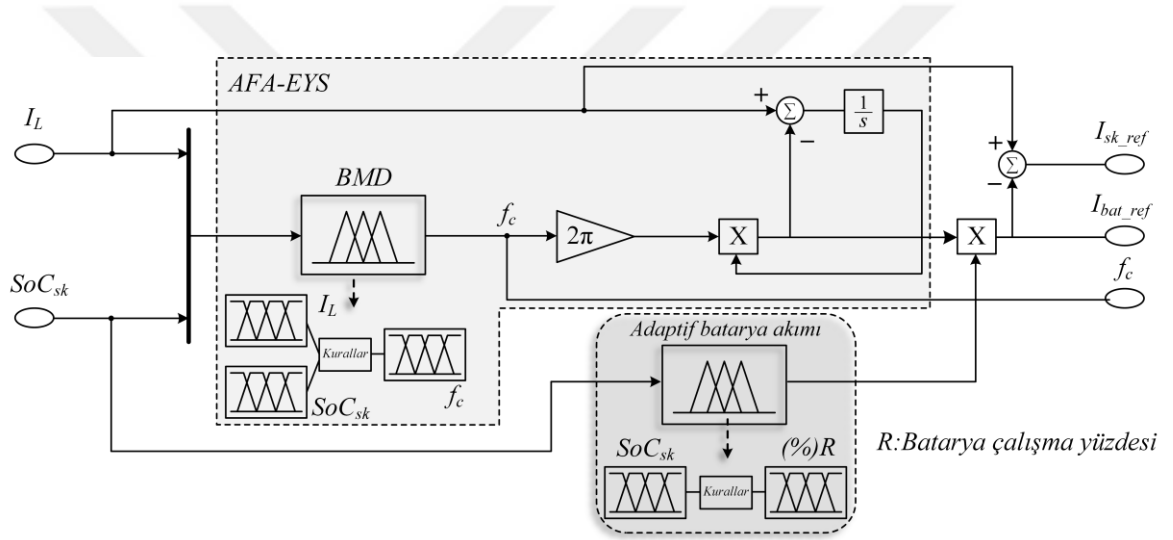
$$I_{bat_ref} = \frac{1}{s} (I_L - I_{bat_ref}) * (2\pi f_c) \quad (1.52)$$

Denklem (1.52)'deki matematiksel ifadenin Şekil 1.26'daki gibi modellenmesi ile adaptif filtre elde edilebilir. AFA-EYS'de filtre kesim frekansının adaptif hale getirilmesiyle kaynaklardan temin edilen güç adaptif hale getirilse de sadece frekansın adaptif olması EYS'nin etkili çalışmasını garanti edemeyebilir. Özellikle yüksek GKF enerjisi içeren sürüş koşullarında sadece frekansın adaptif olması süperkapasitör doluluk oranının, sürüş çevriminin başlangıç seviyesinden çok daha yüksek değerlere ulaşmasına sebep olabilir. Bu durumda süperkapasitörde biriken ve kullanılabilme imkânı olan enerji etkin olarak kullanılmamış olur. Bu durum ise bataryadan daha fazla akım çekilme ihtimalini ortaya çıkarır. Dolayısıyla sürüş koşullarına bağlı olarak hem süperkapasitör doluluk oranına göre kesim frekansını değişken hale getirebilen hem de süperkapasitörde biriken enerjiyi

başlangıç doluluk oranı göz önünde bulundurularak anlık olarak kullanabilen çift uyarlamalı bir güç ayrımı gerçekleştirilmesi ile EYS'nin verimi artırılabilir.

1.16.6. Çift Uyarlanabilir Güç Tahsisli Enerji Yönetim Sistemi

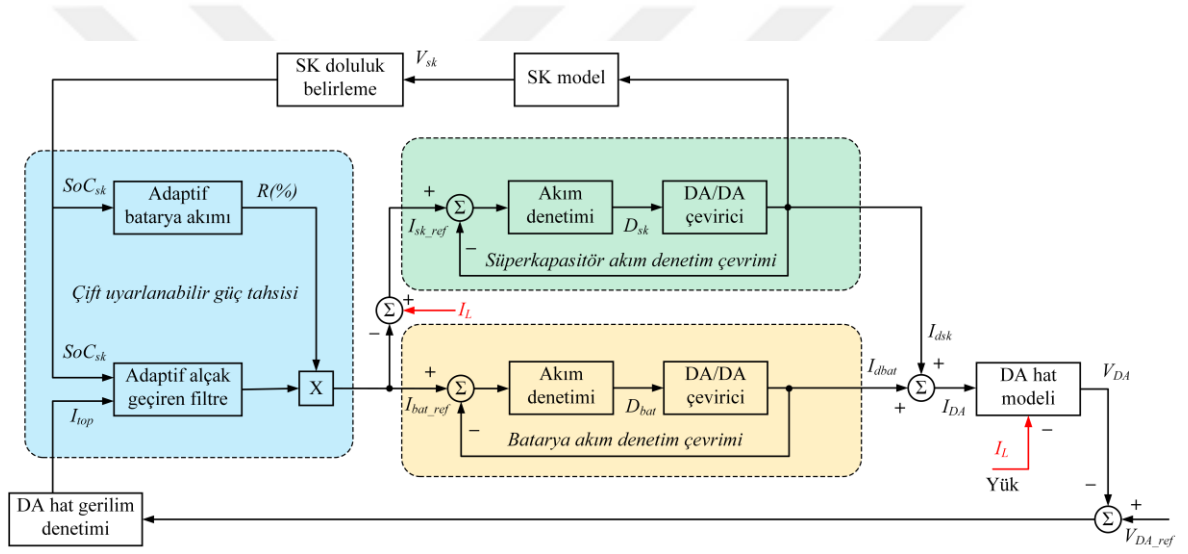
Frekans ayrımı tabanlı EYS'lerde yük akımının ayrıştırılması için kullanılacak filtrenin kesme frekansının adaptif olarak belirlenmesinin enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımını verimli bir şekilde gerçekleştirilebileceği söylenebilir. Çift uyarlanabilir güç tahsisi ise bu yöntemi temel alarak adaptif kesme frekansının yanında batarya akımını da adaptif hale getirmeyi amaçlar.



Şekil 1.27. Çift uyarlanabilir güç tahsisi

Süperkapasitör, yapısı gereği yüksek frenleme akımlarına dayanabilen ve çok hızlı şarj olabilen bir depolama elemanı olduğundan şarj doluluk oranı genellikle belirli aralıklarda (örneğin %50 ile %90) tutulur. Özellikle frenleme akımlarının yüksek olduğu şehirler arası sürüşlerde süperkapasitör aşırı şarj akımlarına maruz kalabilir. Bu durum süperkapasitörün kararlı çalışma koşullarına olumsuz yönde etki eder ve verimli çalışmasını engeller. Süperkapasitörü aşırı şarjdan korumak için çeşitli yöntemlerin geliştirilmesiyle bu problem kısmen ortadan kaldırılabilir. Doluluk oranı %90 değerine ulaşan süperkapasitör güvenli çalışma aralığını aşmış olur ve artık GKF enerjisini depolayamaz. Bu durumda frenleme akımları, üreticinin belirttiği sınır akımları kadar batarya tarafından depolanır. Bu sınırın üstünde kalan akım değerleri ise atık enerji olarak sistem dışında kalmaktadır. Bu durum

depolanabilme ve tekrar kullanılabilme ihtimali olan belirli bir enerjinin kullanılamamasına neden olarak enerji verimliliğini düşürebilir. Dolayısıyla hem süperkapasitörü aşırı şarj durumundan korumak hem de yüksek çevrim ömrü özelliğini kullanarak süperkapasitörü daha etkin kullanmak için batarya akımını adaptif hale getiren çift uyarlanabilir güç tahsisi enerji verimliliğini artırabilir. Sistem, çift uyarlanabilir güç tahsisini gerçekleştirmek için iki bulanık mantık denetleyici kullanır. Bunlardan birincisi yük akımına ve süperkapasitör doluluk oranına bağlı olarak frekansı adaptif hale getirirken diğeri sadece süperkapasitör doluluk oranına bağlı olarak batarya akımını adaptif hale getirir. Böylece süperkapasitör doluluk oranı (SoC_{sk}) bulanık kurallar aracılığı ile belirli aralıklarda tutulurken, batarya akımı ise belirli bir çalışma yüzdesi ile sınırlandırılmış olur.



Şekil 1.28. Batarya ve süperkapasitör HEDS’de çift uyarlanabilir güç tahsisi

Çift uyarlanabilir güç tahsisine ait genel yapı Şekil 1.27’de ve bu EYS’nin batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen HEDS’ye uygulanması ise Şekil 1.28’de gösterilmiştir. Önerilen sistem kaskad denetim olarak isimlendirilen, iki adet iç kontrol ve bir adet dış kontrol döngüsünden meydana gelmektedir. Dış kontrol döngüsünde HEDS’ye ait DA bara gerilimi kontrol edilmektedir. HEDS’de ana gaye DA bara gerilimini sabit tutacak şekilde kaynak akımlarının ayarlanmasıdır. Dolayısıyla DA bara geriliminin (V_{DA}) referans değeri (V_{DA_ref}) ile karşılaştırılması sonucu ortaya çıkan hata bir denetleyiciye giriş olarak verilir. Denetleyici bu hatayı kaynakların akımlarını kontrol ederek ortadan kaldırmaya çalışacağı için denetleyicinin çıkışı, yükü karşılamak için gereken akım değerini (I_{top}) oluşturmaktadır. Daha sonra I_{top} ve SoC_{sk} değerlerine göre adaptif AGF’nin kesim

frekansı belirlenir. Adaptif AGF'nin çıkışında SoC_{sk} bataryanın çalışma yüzdesini (R) sınırlar. Adaptif batarya akımının elde edilmesi işleminde genel olarak aşağıdaki gibi bulanık kurallar işletilir.

Eğer $SoC_{sk} > 80$ ise, o zaman $R = 100$ 'dür.

Eğer $SoC_{sk} > 95$ ise, o zaman $R = 90$ 'dır.

Eğer $SoC_{sk} > 90$ o zaman $R = 85$ 'dir.

Böylece hem AGF'nin kesme frekansı hem de batarya akımı adaptif hale getirilerek çift uyarlanabilir güç tahsisi gerçekleştirilmiş olur. Bu şekilde süperkapasitör daha etkin kullanılarak bataryanın hem çevrim ömrü hem de stresi azaltılabilir. Enerji kaynaklarının referans akım değerlerinin hesaplanmasında, yük akımının (I_L) adaptif batarya referans akımından çıkarılmasıyla (I_{bat_ref}) süperkapasitör referans akımı (I_{sk_ref}) elde edilir. Batarya ve süperkapasitör için referans akım değerleri elde edildikten sonra bu değerler mevcut batarya ve süperkapasitör akımları ile karşılaştırılır ve ortaya çıkan hata iç kontrol döngülerinde bulunan akım denetleyicilerine giriş olarak verilir. Denetleyici bu hatayı ortadan kaldıracak kontrol işaretini üretir ve DA/DA çeviricilerin görev oranlarını (D_{sk}, D_{bat}) belirler. Bu görev oranlarına bağlı olarak üretilen akımlar (I_{dsk}, I_{dbat}) DA baraya enjekte edilerek toplam DA bara akımını (I_{DA}) meydana getirir.

1.16.7. Batarya Çalışma Yüzdesinin Hesaplanması

Şekil 1.27'de gösterilen çift uyarlamalı güç tahsis yönetiminde adaptif batarya akımı bulanık mantık denetleyicisinin çıkışını oluşturan batarya çalışma yüzdesi (R) batarya ve süperkapasitörün enerji yoğunlukları ve spesifik özellikleri dikkate alınarak belirlenebilir. Bu belirleme işlemi şu şekilde özetlenebilir; öncelikle tam şarj edilmiş $3.6V - 2500mAh$ kapasiteye sahip bataryadan elektronik yük yardımıyla $2,5A$ ($1C$) akım çekilmiştir. C-değeri batarya deşarj işlemlerinde sıklıkla kullanılan bir terim olup, bataryayı bir saat içerisinde tamamen deşarj edecek akım değeri $1C$ olarak adlandırılmaktadır. Batarya kapasitesinden anlaşılacağı üzere batarya yüke $1h$ ($3600s$) güç sağlamıştır. Daha sonra $2.7V - 1000F$ kapasiteye sahip tam şarj edilmiş süperkapasitör gurubundan elektronik yük yardımıyla $1A$ akım çekilmiştir. Bu durumda süperkapasitör yüke güç sağlama süresi $2360sn$ olarak

gerçekleşmiştir. Bu sürenin teorik olarak 2700sn olması gerekir. Bu durumda bir hücrede 340Asn'lik bir kayıptan söz edilebilir. Bu durumda kullanılabilir kapasitenin 874F olacağı söylenebilir. Böylece 7 adet hücrenin seri bağlanmasıyla toplam kapasite yaklaşık 143F ve kullanılabilir kapasite yaklaşık 125F olacaktır. Ayrıca süperkapasitör hücresinden 2,5A çekilmesi durumunda yüke güç sağlama süresi yaklaşık 750sn civarında hesaplanmıştır. Süreler dikkate alındığında batarya 2,5A değerinde sabit bir yüke 3600sn güç sağlarken, aynı yüke süperkapasitör 750sn güç sağlayabilmiştir. Dolayısıyla süperkapasitör belirli bir yük talebine bataryanın sağladığı enerji süresinin yaklaşık %20'si kadar enerji sağlayabilir. Bu durumda batarya çalışma yüzdesi aşağıdaki aralıklarda adaptif hale getirilebilir.

$$80\% < R < 100\% \quad (1.53)$$

Denklem (1.53)'de verilen çalışma yüzdesi kullanılan hücre sayısına ve hücrelerin bağlantı biçimine göre daha dar bir aralıkta seçilebilmektedir. Çalışma yüzdesi ile batarya akımını adaptif hale getirmenin iki temel avantajından bahsetmek mümkündür. Birincisi özellikle yüksek GKF enerjisine sahip sürüş çevrimlerinde süperkapasitörün aşırı şarj olmasının önüne geçmektir. İkincisi ise yüksek çevrim oranına sahip süperkapasitörü daha etkin kullanarak bataryanın stresini azaltmaktır. Hem filtre kesim frekansının hem de batarya çalışma yüzdesinin adaptif olarak belirlenmesinde aktif olarak kullanılan bulanık mantık denetleyiciler bu EYS'de önemli görev üstlenmektedir. Bu sebeple Bölüm 1.17'de bulanık mantık kuramı hakkında detaylı açıklamalar ve örnekler verilmiştir.

1.17. Bulanık Mantık Denetim

Doğrusal olmayan sistemlerden kaynaklanan ağır matematiksel hesaplamalar tasarımcılar için zaman kaybına sebep olabilmektedir. Özellikle klasik denetleyicilerin tercih edilmesi durumunda işlemler daha karmaşık hale gelebilmektedir. Bulanık mantık denetimin üstünlüğü doğrusal olan veya olmayan sistemlere kolaylıkla uygulanabilir olmasıdır. Günümüzde otomobil fren sistemleri, DA motorların hız denetimi, adaptif filtreler, çamaşır makineleri gibi denetim ihtiyacının olduğu hemen her alanda bulanık mantık denetleyicilerle karşılaşmak mümkündür. Endüstride sıklıkla kullanılan klasik denetleyici türlerinde (PI, PD, PID) denetleyici parametrelerinin belirlenmesi için matematiksel ifadelerin çözülmesi kaçınılmazdır. Ancak bulanık mantık denetleyici (BMD) sistemin türünden bağımsız olarak

matematiksel ifadelerle ihtiyaç duymaz. Bu ifadeler yerine BMD’lerde denetim parametreleri nitel ifadelerle dayalı insan düşüncesine yakın bir şekilde ayarlanır (Kahveci, 2013). Denetleyici veya gözlemci olarak bir sistemde kullanılan BMD’nin asıl amacı makinelere veya sistemlere “düşük”, “orta”, “yüksek” şeklinde nitel ifadeleri öğretmektir. Bu durum BMD kullanılan sisteme insan gibi düşünmeye yakın bir sonuç üretme yetisi kazandırır. Bu kazanımın gerçekleştirilebilmesindeki doğruluk payı, başka bir değişle denetleyicinin hata payı, denetim tasarımcısının ilgili sisteme ait deneyimlerine bağlıdır. Bulanıklık kavramı, BMD’lerin çalışma şeklinin net bir şekilde ortaya koyulması için en temel adımdır.

1.17.1. Bulanıklık Kavramı

İnsanların günlük hayatta yaşanan olayları ifade ederken veya bir olayın gerçekleşme olasılığını sayısal değerler olmadan ifade etmeye çalışırken kullandığı “az”, “orta”, “çok” gibi nitel kavramların bulanıklık kavramının temelini oluşturduğu söylenebilir. Aristo mantığından farklı olarak kesinlik içermeyen değerler ile ilişkilendirilen bulanık mantık kuramı (BMK) 1965 yılında ortaya atılmıştır (Zadeh, 1965). Sayısal mantıktaki “var–yok”, “eleman–eleman değil”, “düşük–yüksek” gibi ikili kesin değerler, bulanık mantıkta “çok az, az, orta, fazla, çok fazla” gibi sözel değişkenler ile ifade edilirler. BMK’da bir değişkenin durumu, o değişkenin ilgili kümede veya kümelerde var olma seviyesini temsil eden bir üyelik derecesi ile temsil edilir (Kahveci, 2013). Örneğin endüstriyel bir sistemde çalışan DA motorun nominal hızının 1200d/dk olması istendiğini ve bu motorun hızını bir turmetre ile ölçtüğümüzü varsayalım. Bu durumda DA motorun 1210d/dk ile dönmesi durumu “hızlı” olarak ifade edilirken, aynı motorun 1190d/dk ile dönmesi “yavaş” olarak tanımlanacaktır. Öte yandan yine başka bir örnekte sıcaklığın 30°C’ye çıktığı durumlarda belirli bir bölgeyi soğutmak için kullanılacak bir klima olduğunu varsayalım. Bu cihaz, sıcaklık 29,5°C değerine ulaşsa bile ikili Aristo mantığına göre çalışmayacaktır. Yani cihaz için ilgili bölge hala “soğuk” olarak nitelendirilmektedir. Sıcaklığın 30°C değerinden yüksek olduğu durumlarda ise ilgili bölgeyi “sıcak” olarak tanımlayacaktır. Her iki sayısal örnekte de görüldüğü gibi bu değerler birbirlerine oldukça yakındır ve net bir şekilde “hızlı–yavaş”, “sıcak–soğuk” ifadelerini kullanmak zordur. BMK’da ise bulanık kümeler hız uzayında “Az Hızlı”, “Orta”, “Çok Hızlı” ve sıcaklık uzayında “Az Sıcak”, “Orta” ve “Çok Sıcak” şeklinde tanımlanabilir. Bu nitel ifadelerin yukarıda verilen sayısal örneklere uyarlanması ile ilk örnekte 1210d/dk “Az hızlı” kümesinde en düşük üyelik derecesine, “Çok hızlı” kümesinde

ise en yüksek üyelik derecesine sahip olacaktır. Aynı üyelik derecesi ilişkisi ikinci örnek için de söylenebilir. Üyelik derecelerinin kullanılması ile hız ve sıcaklık gibi farklı kesin değerleri göreceli değerler ile ifade etmek mümkün hale gelmektedir. Yukarıda verilen değişkenlere benzer şekilde farklı bulanık kümeler oluşturmak mümkündür. Bulanık kümeler teorisi, bulanık kümelerin işleyişini daha açık bir şekilde ortaya koyar.

1.17.2. Bulanık Kümeler

Farklı üyelik dereceleri bulunan elemanlara sahip olan bulanık kümeler, bulanık sistemlerin en temel elemanı olarak kabul edilir. Bu kümeler 0 ile 1 arasında üyelik derecesine (μ) sahip elemanlardan meydana gelir (Altaş, 1999). Bir elemanın üyelik derecesinin kesin olarak ifade edildiği klasik küme teorisine göre eleman, ilgili kümenin elemanıdır ($var = 1$) veya değildir ($yok = 0$). Bu durum elemanın üyeliğini net bir şekilde ifade eder. Bulanık kümelerde ise elemanın üyelik derecesi yani bir kümeye ne kadar ait olduğu ilgili kümeye tümüyle ait olup olmadığından daha önemlidir. Elemanlar, klasik kümelerde ($var = 1$) veya ($yok = 0$) şeklinde üyelik dereceleri ile ifade edilirken, bulanık kümelerde bu ifadelerin yanı sıra ($Az = 0,25$), ($Orta = 0,5$), ($Çok = 0,75$) şeklinde değerler alabilmektedir. Bu farklılığın klasik ve bulanık küme arasındaki en belirgin özellik olduğu söylenebilir. Bulanık küme teorisine günlük hayattan bir örnek vermek gerekirse; elimizde içi boş bir kova, bir miktar çakıl ve bir miktar kum olduğunu varsayalım. Bu kovanın içerisini tamamen çakıl ile doldurduğumuzda ($var = 1$) veya kova tamamen boş ise ($yok = 0$) veya kovanın içini tamamen kum ile doldurduğumuzda ($var = 1$) veya kova tamamen boş ise ($yok = 0$) ifadeleri kullanırız. Bu ifadeler klasik küme teorisine göre tanımlanmıştır. Ancak kovanın içerisine bir miktar çakıl ve bir miktar kumu birlikte doldurduğumuzda buradaki “bir miktar” ifadesini klasik küme teorisine göre ifade edemeyiz (Çorapsız, 2018). Ancak bulanık küme teorisinde ise çakıl ve kum değişkenlerinin üyelik dereceleri ne kadar çakıl ve ne kadar kum doldurulduğu ile ifade edilebilmektedir. Bulanık mantık teorisi ve bulanık kümeler bu şekilde belirsizlik içeren olayların sonucunda ortaya atılmıştır. Herhangi bir X uzayında;

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\} \quad (1.54)$$

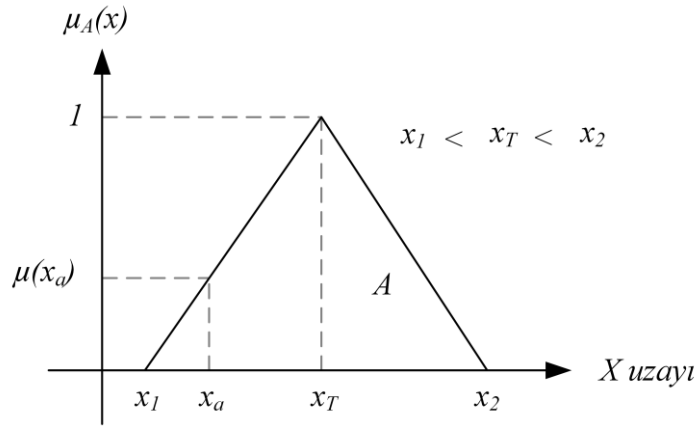
şeklinde tanımlı bulanık A kümesi,

$$A = \int \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (1.55)$$

biçiminde sürekli veya

$$A = \sum_{x_i \in X} \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \quad (1.56)$$

biçiminde ayrık olarak tanımlanabilir. Genel olarak bir üyelik fonksiyonu ile temsil edilen üyelik dereceleri bulanık kümelerdeki elemanları tanımlar. Üyelik fonksiyonları denetleyici tasarımında önemli adımlardan biridir ve genellikle yamuk, gaussian, üçgen, cauchy, çan, sigmoid veya sinüzoidal şeklinde kullanılmaktadır. Bu fonksiyonlara örnek teşkil etmesi açısından üçgen üyelik fonksiyonu Şekil 1.29’da gösterilmiştir.



Şekil 1.29. Üçgen üyelik fonksiyonu

Bulanık A kümesinin X kesin uzayında, üyelik derecesi $\mu_A(x_a)$ olan x_a kesin değeri Şekil 1.29’da gösterilmiştir. Burada x eksenini bulanık küme elemanlarını ve y eksenini elemanların üyelik derecelerini göstermektedir. Ayrıca bulanık A kümesindeki elemanların tamamının x_1 kesin değeri ile x_2 kesin değeri arasında bulunacağı göz önüne alındığında, bulanık A kümesine ait elemanların üyelik dereceleri denklem (1.57)’deki gibi yazılabilir.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & , \quad x < x_1 \\ \frac{x - x_1}{x_T - x_1} & , \quad x_1 \leq x \leq x_T \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_T} & , \quad x_T \leq x \leq x_2 \\ 0 & , \quad x > x_2 \end{cases} \quad (1.57)$$

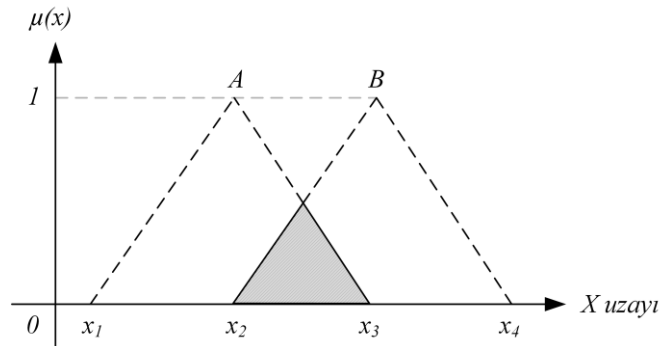
1.17.3. Bulanık Küme İşlemleri

Klasik küme kuramında, birden fazla küme için kullanılan kesişim ve birleşim işlemleri ile bir veya daha fazla küme için kullanılan değil işlemleri bulanık mantık kuramında da kullanılmaktadır. Sözü edilen işlemler bulanık mantık kuramında farklı yöntemler ile tanımlanabilir olsalar da bulanık küme işlemleri en temel seviyede Zadeh'in belirlediği fonksiyonlar kullanılarak açıklanabilir.

Bulanık küme işlemlerinde kesişim işlemi klasik kümelerdeki gibi $A \cap B$ şeklinde ifade edilir. Zadeh, bulanık kümelerdeki kesişim işlemini, herhangi bir x kesin sayısının $A \cap B$ kümesindeki üyelik derecesi, A ve B kümelerindeki üyelik derecelerinden $(\mu_A(x), \mu_B(x))$ küçük olanına eşittir şeklinde tanımlamıştır. Bu tanım denklem (1.58)'deki gibi ifade edilir.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (1.58)$$

Şekil 1.30 A ve B bulanık kümelerinin kesişim kümesini temsil etmektedir.

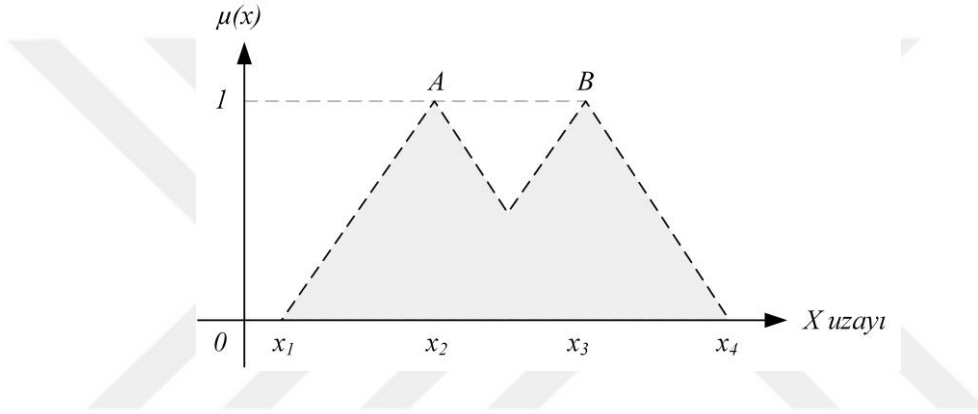


Şekil 1.30. A ve B bulanık kümelerinin kesişimi

Birleşim işlemi bulanık kümelerde, herhangi bir x kesin sayısının $A \cup B$ bulanık kümesindeki üyelik derecesi, A ve B bulanık kümelerindeki üyelik derecelerinden $(\mu_A(x), \mu_B(x))$ büyük olanına eşittir şeklinde tanımlanır ve denklem (1.59)'daki gibi ifade edilir.

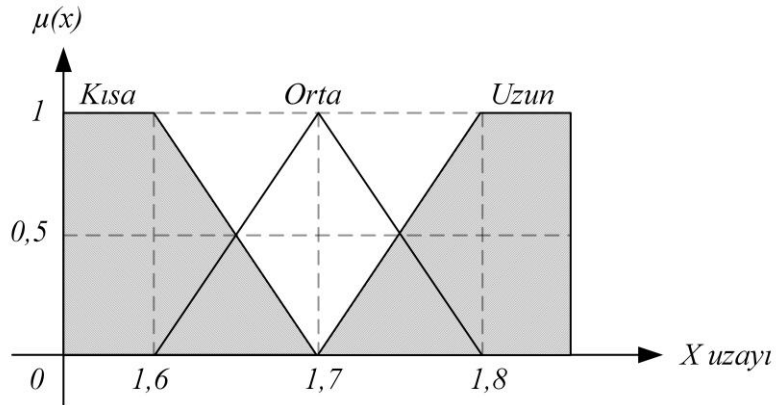
$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (1.59)$$

Şekil 1.31 A ve B bulanık kümelerinin birleşim işlemini temsil etmektedir.



Şekil 1.31. A ve B bulanık kümelerinin birleşimi

Bulanık kümenin dışında kalan elemanlar olarak X uzayında tanımlanan değil işlemi Şekil 1.32'deki gibi gösterilebilir.



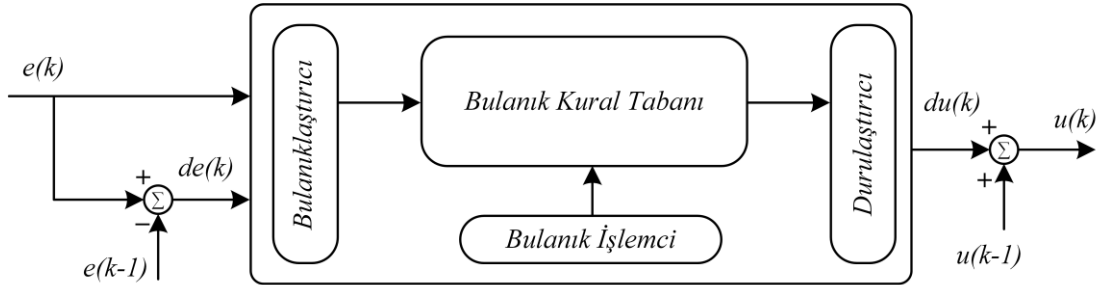
Şekil 1.32. Bulanık B kümesinin değil işlemi

Örneğin, yamuk ve üçgen üyelik fonksiyonları kullanılarak bir X uzayında bir bulanık kümenin olduğunu varsayalım. Bu kümede “Kısa”, “Orta” ve “Uzun” şeklinde elemanlar olsun. Bulanık kümeleri ($A = Kısa$), ($B = Orta$) ve ($C = uzun$) şeklinde tanımlayalım. Bu durumda bulanık B kümesinin değil işlemi aşağıda ifade edildiği gibi olacaktır.

$$\mu_{\bar{B}}(x) = 1 - \mu_B(x) \quad (1.60)$$

1.17.4. Bulanık Mantık Denetimin Bileşenleri

Bulanıklık kavramı ve bulanık küme teorisinin ortaya atılmasından sonra 1974 yılında Mamdani (Mamdani & Assilian, 1975) tarafından ortaya atılan bulanık mantık denetleyici (BMD) Şekil 1.33’de gösterildiği gibi bulanıklaştırıcı, bulanık kural işlemci ve durulaştırıcı birimlerinden oluşur. Hata (e) ve hatanın değişimi (de) olarak temsil edilen blok diyagramda BMD bu iki kesin girişe sahiptir. Bulanıklaştırıcı biriminde bu girişler “0” ile “1” aralığında üyelik derecesine sahip bulanık değerlere dönüştürülerek bulanık kural işlemciye gönderilmektedir.

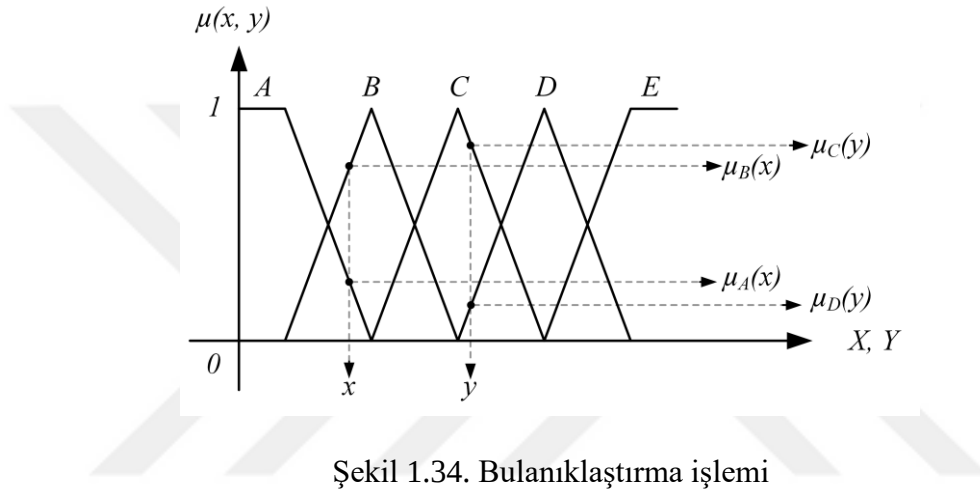


Şekil 1.33. Bulanık mantık denetleyici temel blok diyagramı

Bulanık kural tabanı bloğu deneyimli kişiler tarafından belirlenen kuralları içerir. Bulanıklaştırıcı bloğundan gelen bulanık değerler bu blokta bulunan kurallara bağlı olarak işletilerek durulaştırıcı birimine aktarılır. Durulaştırıcı birimine giriş olarak verilen bulanık değerler bu birimden sonra tıpkı girişteki gibi kesin değerlere dönüştürülür. Şekil 1.33’deki blok diyagramda (d_u) durulaştırıcı çıkışını temsil etmektedir. BMD’nin denetim işareti (u) ise durulaştırıcı çıkışı ile denetim işaretinin bir önceki çıkışının toplanması ile elde edilir.

1.17.5. Bulanıklaştırma

Herhangi bir X, Y uzayında (x, y) şeklinde tanımlanan kesin girişlerin üyelik fonksiyonlarının seçimine bağlı olarak bulanık değerlere dönüştürülmesi bulanıklaştırma olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir sistemin denetimi için BMD kullanılacağını kabul ederek, Şekil 1.34'deki gibi üçgen üyelik fonksiyonlarının (B, C, D) ve yamuk üyelik fonksiyonlarının (A, E) şeklinde tanımlandığını varsayalım.



Şekil 1.34. Bulanıklaştırma işlemi

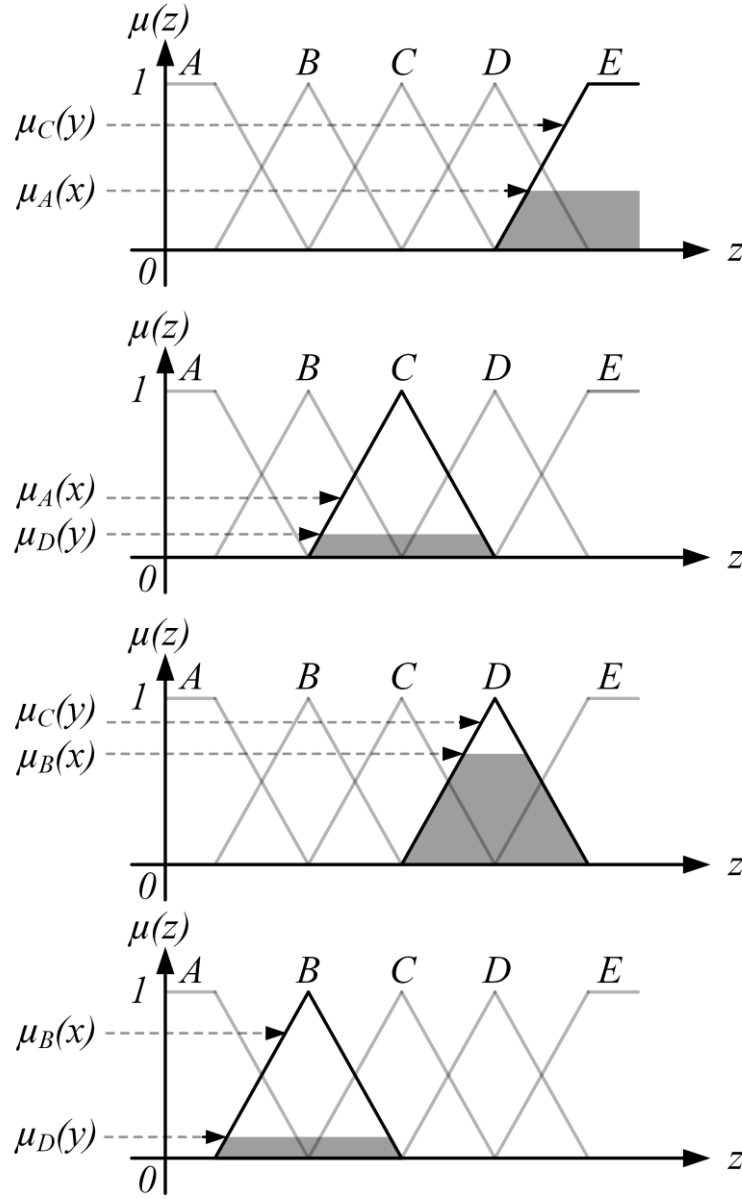
Şekil 1.34'den görüleceği üzere x kesin girişinin bulanık A ve B kümelerinde üyelik derecesi bulunurken, y kesin girişi bulanık C ve D kümelerinde üyelik derecesine sahiptir. Herhangi bir sistemde çıkış değişkenlerinden alınan ölçümlerin veya haricen uygulanan referans girişlerin verildiği bulanıklaştırma adımı, denetleyicinin gerçekleştirdiği ilk işlemdir. Bu işlem sonucunda bulanık değerler elde edilir.

1.17.6. Bulanık Kural Tabanı ve Bulanık İşlemci

Bulanıklaştırma işleminden sonra gerçekleşen bulanık kural tabanında bulunan bulanık denetim kuralları, deneyim sahibi kişiler tarafından belirlenir ve denetim işlemini gerçekleştirecek koşullardan meydana gelir. Bir sistemin çalışmasında edindiği deneyimleri bir denetim organına aktarabilen uzman personel sayesinde makine-insan etkileşimi ortaya çıkar. Kuralları işletme, öğrenme yetisi ve kararları uygulama gibi insana ait kazanımların makinelerle aktarılmasında önemli bir araçtır.

$$\begin{aligned}
\mu_E(z) &= \min[\mu_A(x), \mu_C(y)] \\
\mu_C(z) &= \min[\mu_A(x), \mu_D(y)] \\
\mu_D(z) &= \min[\mu_B(x), \mu_C(y)] \\
\mu_B(z) &= \min[\mu_B(x), \mu_D(y)]
\end{aligned}
\tag{1.61}$$

Şekil 1.36, denklem (1.61)'deki aktif kuralların işletilmesini görsel olarak göstermektedir.



Şekil 1.36. Aktif kuralların işletilmesi

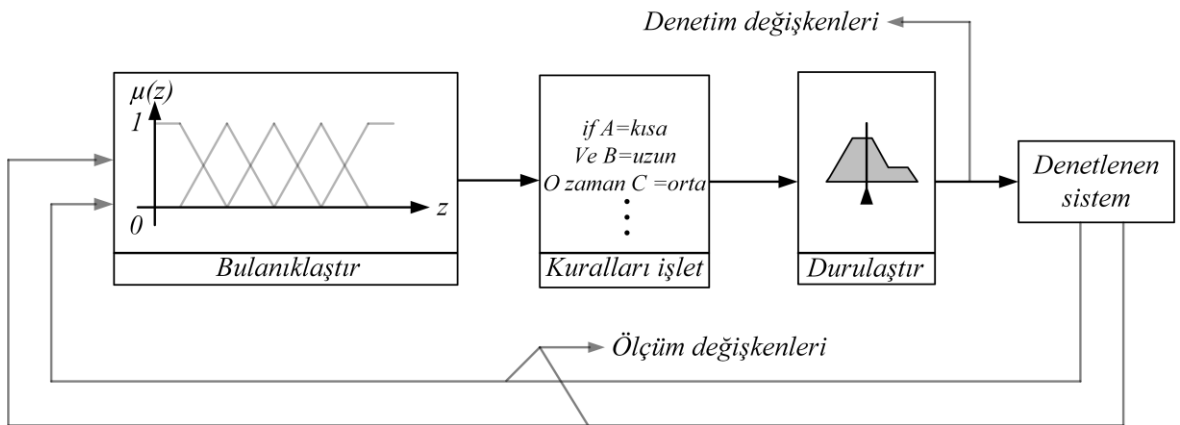
1.17.7. Durulaştırma

Durulaştırma, tecrübe sahibi kişilerin deneyimleri ile hazırlanarak bulanık kural tabanında çözümlenen aktif kuralların kesin ve tek değerlere dönüştürülmesi olarak denetim işleminin son aşamasını temsil etmektedir. Sugeno, maksimumların ortalaması, Tsukamoto ve alanların merkezi gibi yöntemler durulaştırma işleminin gerçekleştirilmesinde kullanılan başlıca yöntemler arasındadır (Altaş, 1999). Alanların merkezi yöntemi durulaştırma yöntemi olarak seçildiğinde

$$z = \frac{\sum_{k=A}^E \mu_k(z_k) z_k}{\sum_{k=A}^E \mu_k(z_k)} \quad (1.62)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (1.62)'de k , çıkıştaki aktif bulanık kümeyi ve z , denetleyici çıkışını temsil etmektedir. Ayrıca $\mu_k(z_k)$, aktif kuraldan bulanık çıkışa ait elde edilen üyelik derecesi ve z_k da aynı kuraldaki aktif çıkış bulanık kümesinde en büyük üyeliğe sahip kesin çıkış değeridir.

Genel olarak yukarıda anlatılan BMD bileşenlerinin herhangi bir sistem üzerindeki işleyişi Şekil 1.37'de gösterilmiştir.



Şekil 1.37. BMD'nin bir sistemdeki genel işleyişi

Şekil 1.37'de denetlenen sistemde, denetlenen sistem üzerinden alınan ölçüm değerleri BMD'nin girişine verilir. Bu değişkenler bir veya daha fazla sayıda olabilir. BMD öncelikle

denetlenen sistem için en uygun olacak şekilde belirlenmiş birer üyelik fonksiyonu ile temsil edilmek üzere bu gerçek değerleri bulanıklaştırır. Bu işlem dışarıdan verilen kesin girişlerin seçilen üyelik fonksiyonlarında ne kadar üyeliği bulunduğunu belirlemektedir. İkinci adımda önceden belirlenmiş kurallar yardımıyla bu üyelik fonksiyonları ağırlık derecelerine göre işletilir. Elde edilen bulanık değerler son adımda durulaştırma işlemine tabi tutularak tekrar kesin sayı değerlerine dönüştürülür. Denetleyici hata payını, hız cevabını, oturma ve aşım sürelerini izlemek için denetim değişkenleri ayrı bir gözlemci kullanılarak ölçülebilir ve daha hassas bulanık kurallar belirlenebilir (Çorapsız, 2017).



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA

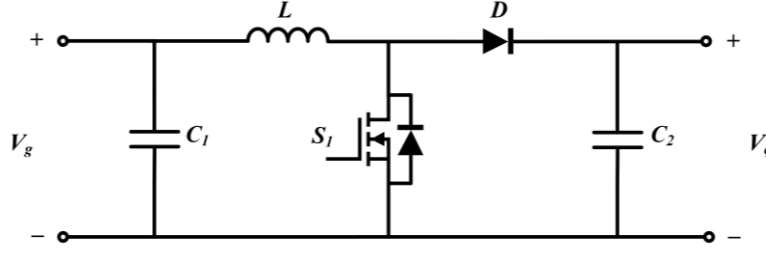
Bu bölümde enerji depolama birimlerini DA baraya bağlamak için gereken DA/DA çeviricilerin tasarımına, yük akımını temsil etmesi için elektronik yük ve DA güç kaynağının programlanmasına, STM32F746ZG mikroişlemcisinin ayarlanmasına ve akım sensörlerinin arayüz devrelerine yer verilmiştir. Buna ek olarak bu bölümün sonunda sabit, adaptif ve çift uyarlanabilir EYS'lerin benzetim ve deneysel bulgularına yer verilmiştir.

2.1. Yükselten DA/DA Çeviricilerin Tasarım Kriterleri

DA/DA çeviriciler, giriş terminallerinden uygulanan gerilimi uygun denetim yöntemleri kullanılarak çıkış katında yükselten, düşüren veya hem yükselten hem düşüren olarak ayarlayabilmektedirler. Uygulamada çıkış gerilimi giriş geriliminden daha yüksek olan çeviricilere yükselten (*Boost*) veya (*Step – up*), çıkış gerilimi giriş geriliminden daha düşük olan çeviricilere düşüren (*Buck*) veya (*Step – down*), çıkış gerilimi girişe göre hem yüksek hem de düşük olan çeviricilere ise düşüren-yükselten (*Buck – Boost*) veya (*Step up – Step down*) çeviriciler denilmektedir.

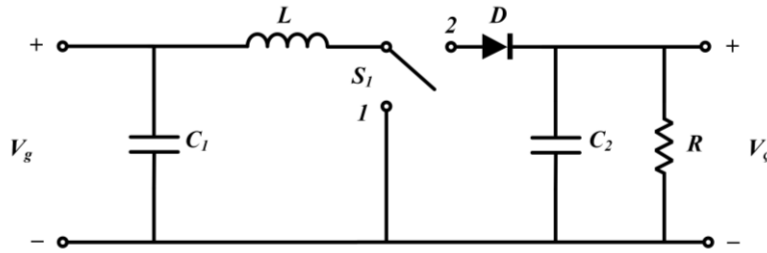
DA/DA çeviriciler AA'daki gerilim ve akımın yükseltilmesi ve düşürülmesi işleminde kullanılan transformatörlerin DA'daki karşılığı olarak tanımlanabilir. DA güç sistemlerinde yük gücünü tahsis etmek için bara geriliminin sabit olması büyük önem arz etmektedir. Örneğin bir bataryadan çekilen akım değeri arttıkça batarya hücre gerilimi azalma eğiliminde olacaktır. Bu değişim Şekil 1.7'den görülebilir. Hücre geriliminin azalması sebebiyle batarya bara gücünü karşılamak için daha fazla akım sağlamak zorunda kalacaktır. Bu olumsuzluk bara geriliminde yüksek salınımlar meydana getirir ve EA'yı süren EM'de moment dalgalanmalarına sebep olur. Dolayısıyla hem tekil enerji kaynağı hem de birden fazla enerji kaynağı kullanımında bara gerilimini arzu edilen değerde sabit tutmak için DA/DA çeviricilerin kullanılması kaçınılmazdır. Bu çeviriciler kullanım durumuna göre tek yönlü veya çift yönlü olabilmektedir. Bu tez çalışmasında bataryanın ve süperkapasitörün hücre gerilimlerinin ortak bir gerilim seviyesine yükseltilmesi için iki adet yükselten çevirici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yükselten çeviricilere ait genel yapı Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Şekil 2.1’de C_1 giriş filtre kapasitörünü, L çevirici endüktörünü, S_1 yarı iletken güç MOSFET’ini, D yük tarafında gerçekleşebilecek ters akımın indüktör akımını zayıflatmaması için kullanılan diyotu, C_2 çıkış filtre kapasitörünü, V_g ve V_c sırasıyla giriş ve çıkış gerilimlerini temsil etmektedir ($V_g < V_c$).



Şekil 2.1. Yükselten çevirici genel yapısı

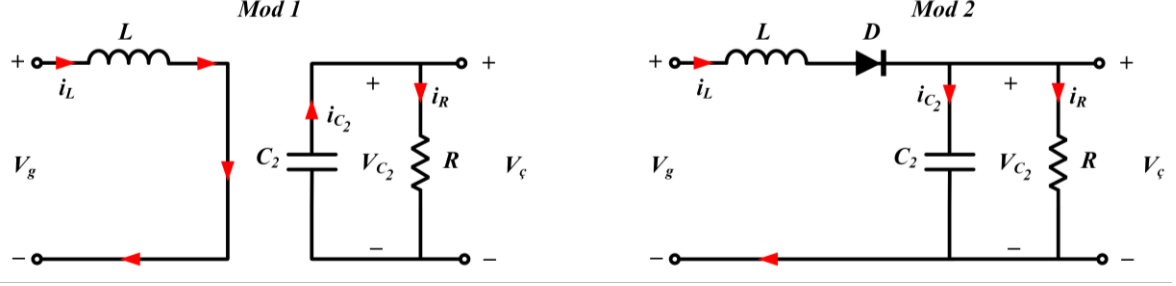
Çeşitli güç sistemlerinde kullanılan yükselten DA/DA çeviricilerin güç seviyeleri değişse de genel yapıları aynıdır. Tasarımda öne çıkan husus çeviricinin giriş ve çıkış güç seviyeleridir. Güç seviyeleri doğrudan giriş ve çıkış tarafının gerilim ve akım değerlerine bağlı olduğundan tasarımın en belirgin kriterlerinin gerilim ve akım değerleri olduğu söylenebilir. Tasarımda kullanılacak olan giriş ve çıkış kapasitörleri, endüktör, diyot ve yarı iletken anahtarlama elemanın bu değerlere göre belirlenmesi gerekir.



Şekil 2.2. Yükselten çevirici anahtar konum gösterimi

Yükselten çeviriciler, diğer tüm çeviricilerde olduğu gibi darbe genişlik modülasyonu (DGM) ile denetlenebilmektedir. Bu denetim S_1 anahtarının iletim ve kesim durumlarında devrenin dinamik davranışını incelemek üzere iki ayrı moddan meydana gelmektedir. Bu yapıda S_1 kontrollü bir anahtar ve D ise kontrolsüz bir anahtar olarak görev yapmaktadır. C_1 giriş filtre kapasitörü, giriş gerilimindeki dalgalanmanın düşük olacağı düşünülerek dinamik analiz aşamasında çoğunlukla ihmal edilir. Dolayısıyla genel yapı Şekil 2.2’de gösterildiği

gibi iki konumlu bir anahtarla temsil edilebilir. Şekil 2.2 ise anahtarın 1 ve 2 konumuna bağlı olarak aşağıdaki gibi temsil edilebilir.



Şekil 2.3. Anahtar durumuna göre eşdeğer devreler

Şekil 2.2'deki eşdeğer devrede S_1 anahtarı 1 konumuna alındığında Şekil 2.3'deki Mod 1 eşdeğer devresi meydana gelir. Giriş kaynağına paralel bağlanan endüktörün akımı hemen hemen doğrusal bir şekilde yükselmeye başlar. Bu modda yük akımını, çıkış kapasitörü üstlenmektedir. Dolayısıyla Mod 1'e ait dinamik eşitlikler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} &= V_g \\ C_2 \frac{dV_{C_2}}{dt} &= -i_R = -\frac{V_{C_2}}{R} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Mod 2, kontrollü anahtar S_1 'in kesime ve kontrolsüz anahtar olan D diyotunun iletme geçmesi ile başlar. Bu aşamada Mod 1'de endüktörde biriken enerji çıkışa aktarılarak çıkış geriliminin yükseltilmesini sağlar. Aynı zamanda endüktör akımı hemen hemen doğrusal bir şekilde azalır. Mod 2'ye ait dinamik denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} &= V_g - V_{C_2} \\ C_2 \frac{dV_{C_2}}{dt} &= i_L - i_R \end{aligned} \quad (2.2)$$

Endüktör volt-saniye prensibine göre, bir endüktörde bir periyot boyunca net akım değişiminin sıfır olduğu hesaba katılarak dinamik denklemlerin ortalama modeli hesaplanabilir. Daha sonra bu denklemler yardımıyla benzetim modeli oluşturulabilir. Bir

periyot boyunca kontrollü anahtarın iletimde olduğu durum d ile temsil edildiğinde anahtarın kesimde olduğu durum $1 - d$ ile gösterilebilir. Dolayısıyla denklem (2.1) ve (2.2)'nin birinci ifadeleri kullanılarak yükselten çeviriciye ait anahtar görev oranı aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$\left(\frac{V_g}{L} * d \right) + \left(\frac{V_g - V_\varsigma}{L} \right) * (1 - d) = 0 \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'de gerekli matematiksel işlemler yapıldıktan sonra çıkış geriliminin giriş gerilimine oranı olarak tanımlanan görev oranı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{V_\varsigma}{V_g} = \frac{1}{1 - d} \quad (2.4)$$

DA/DA çeviricilerin tasarımında şayet özel bir çalışma koşulu istenmiyorsa çeviricinin genellikle sürekli akım modunda çalışması arzu edilir. Yani endüktör akımının sifıra düşmemesi gerekir. Endüktör akımının sifıra düşmesi süresiz akım modu olarak bilinir ve bu modda endüktör çıkışa sürekli enerji aktaramaz. Sonuç olarak çıkış geriliminin minimum salınımlı olması arzu edildiğinde endüktörün her periyotta çıkışa enerji taşıması gerekir. Çeviricinin sürekli akım modunda çalışması devrede kullanılacak pasif elemanların değerlerine, çevirici görev oranına, çeviricinin akım ve gerilim seviyelerine ve çeviricide kullanılan anahtarlama elemanının anahtarlama frekansına bağlıdır.

Endüktör akımının sürekli olması için bir periyot boyunca endüktör dalgalanma akımının $\Delta I = 2I_L$ koşulunu sağlaması gerekir (Rashid, 2015). Burada I_L ortalama endüktör akımını temsil etmektedir. Endüktör dalgalanma akımı aynı zamanda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta I = \frac{V_g * d}{f * L} \quad (2.5)$$

Denklem (2.4) ve (2.5) birlikte hesaba katıldığında çıkış akımının sürekli olması için gereken minimum endüktör değeri bulunabilir.

$$L_{\min} = \frac{d(1-d)^2 R}{2f} \quad (2.6)$$

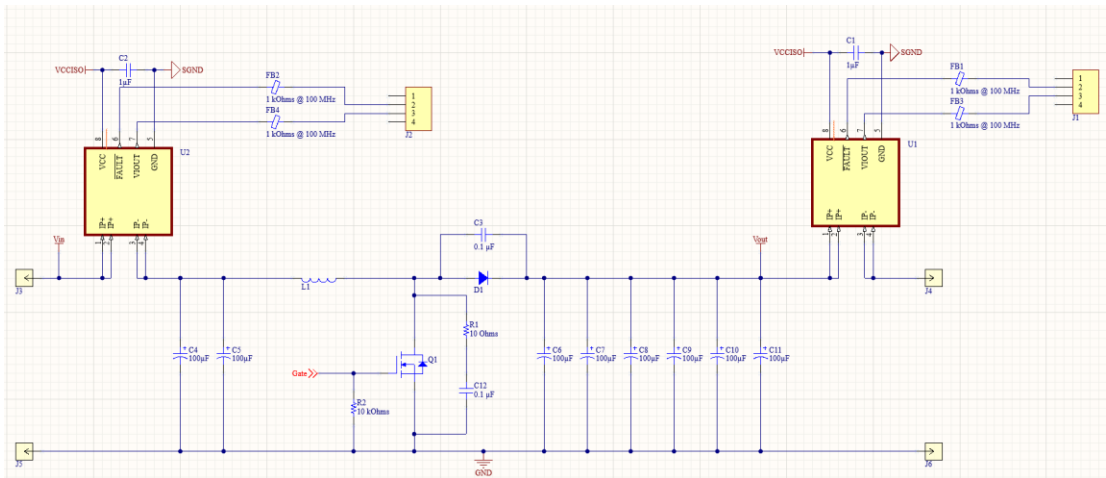
Benzer şekilde V_c ortalama kapasitör gerilimini temsil etmek üzere, sürekli iletim koşulu için $\Delta V_c = 2V_c$ olmalıdır. Bu durumda minimum kapasitör değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$C_{\min} = \frac{d}{2 * f * R} \quad (2.7)$$

Yükselten çeviriciler tek bir yarıiletken eleman içermesinden ötürü yüksek verime sahiptir. Ancak giriş katında bulunan endüktörden dolayı sürekli akım modunda, anahtar yüksek akım seviyelerine dayanacak şekilde seçilmelidir. Çıkış katı ise anahtarın görev oranındaki çok küçük değişimlere oldukça duyarlıdır. Bu sebeple yükselten çeviriciler hassas denetim gerektirirler.

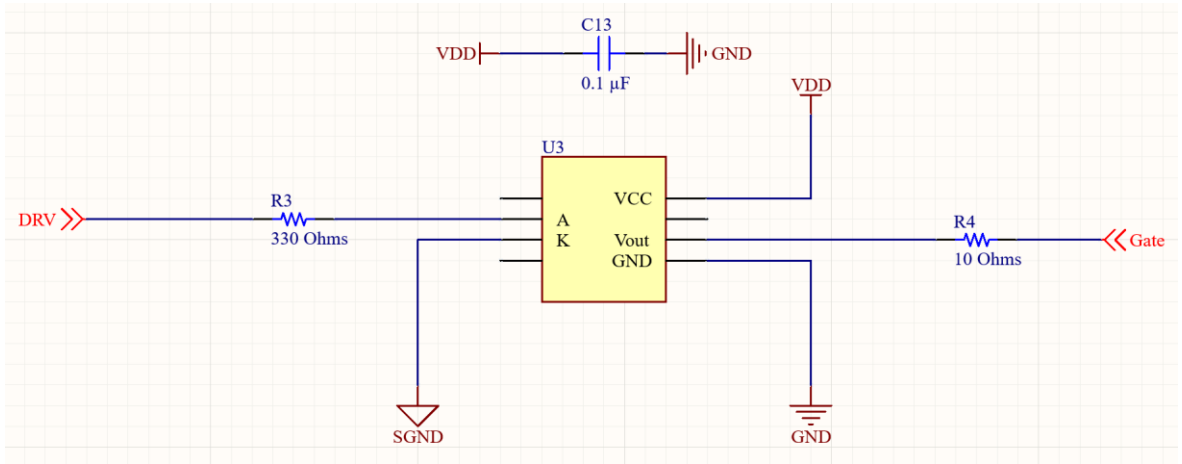
2.2. Yükselten DA/DA Çeviricilerin Tasarımı

Bu tez çalışmasında batarya ve süperkapasitör hücre gerilimlerini ortak bir seviyeye yükseltmek için Bölüm 2.1'deki kriterlere bağlı kalarak ve ALTIUM DESIGNER programı kullanılarak iki ayrı yükselten DA/DA çevirici tasarlanmıştır. Tasarlanan çeviriciye ait genel yapı Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



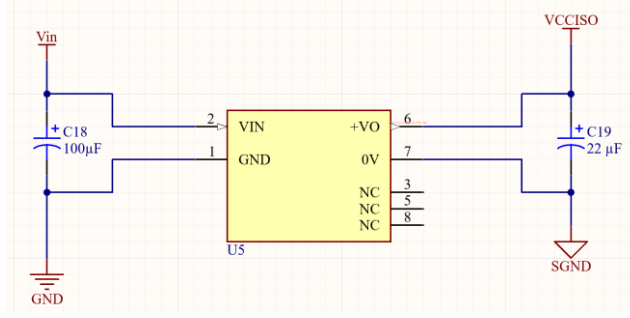
Şekil 2.4. Tasarımı yapılan DA/DA yükselten çevirici yapısı

Şekil 2.4’de J_3 ve J_5 çeviricinin giriş gerilim (V_{in}) terminallerini, J_4 ve J_6 çeviricinin çıkış gerilim (V_{out}) terminallerini temsil etmektedir. Hem çevirici giriş akımını hem de yük akımını ölçmek için giriş ve çıkış pozitif terminallerine ACS711 akım sensörleri bağlanmıştır. C_4 ve C_5 giriş filtre kapasitörlerini, C_i , $\{i \in 6, 7 \dots, 11\}$ ise çıkış filtre kapasitörlerini temsil etmektedir. Anahtarlama elemanı olarak IRFB7545PBF N-kanal MOSFET kullanılmıştır. Güç MOSFET’ini sürmek için TLP352 kapı sürücü devresi Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



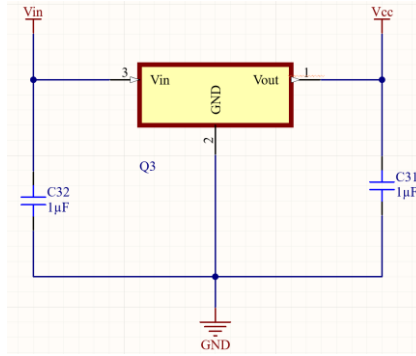
Şekil 2.5. TLP352 kapı sürücü devresi

Şekil 2.5’de *DRV* mikroişlemci aracılığı ile üretilen DGM sinyalini kapı sürücü entegresine taşımak için kullanılmaktadır. *SGND* mikrodenetleyicinin *GND* terminalini, *GND* çeviricinin *GND* terminalini temsil etmektedir. *VDD* kapı sürücü besleme gerilimini temsil etmektedir. Çeviriciler güç katında ihtiyaç duyulan bütün güç ihtiyacını giriş kaynağından sağlayacak şekilde tasarlandığı için akım ve gerilim okuma devrelerinin tamamını beslemek için giriş geriliminden beslenen ve giriş geriliminin 8:1 oranına kadar düşürebilen izole edilmiş DA/DA çevirici modülü kullanılmıştır.



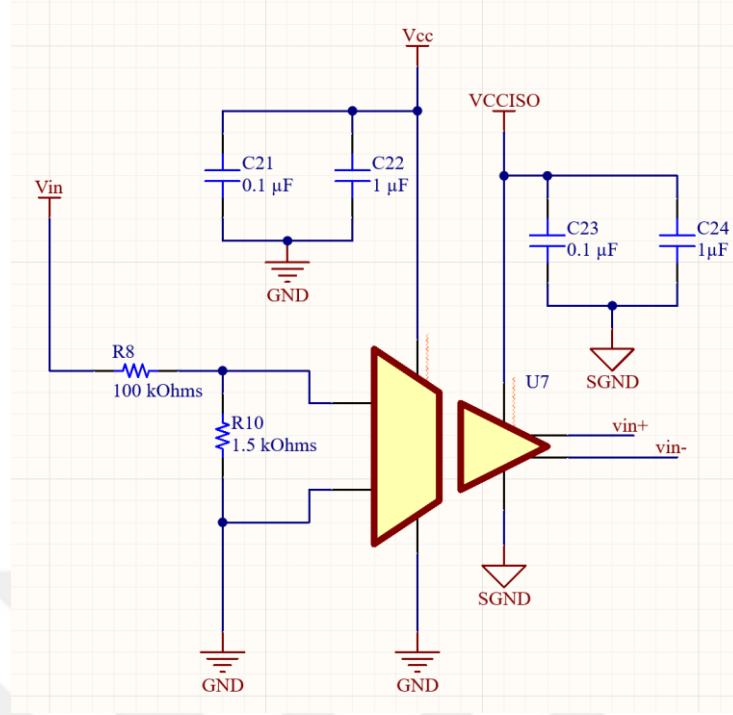
Şekil 2.6. İzoleli DA/DA çevirici modülü

Şekil 2.6'daki çevirici modülünde V_{in} , giriş gerilimini V_{CCISO} , ise izole edilmiş çıkış gerilimini temsil etmektedir. Tasarımda kullanılan MORNSUN marka izole edilmiş çevirici %79 oranında yüksek verime ve 0,12W gibi çok düşük güç tüketimine sahiptir. Giriş gerilimi minimum 4,5V ve çıkış gerilimi maksimum 36V değerindedir. Ek olarak düşük giriş gerilim koruması, çıkış kısa devre koruması ve aşırı akım koruması mevcuttur. Gerilim okuma devrelerinde kullanılan işlemsel yükselteçlerin güç ihtiyacını karşılamak ve gerilim salınımlarından kaynaklanacak okuma hatalarının önüne geçmek için ayrıca AS78L05RTR-E1 lineer voltaj regülatörü kullanılmıştır.



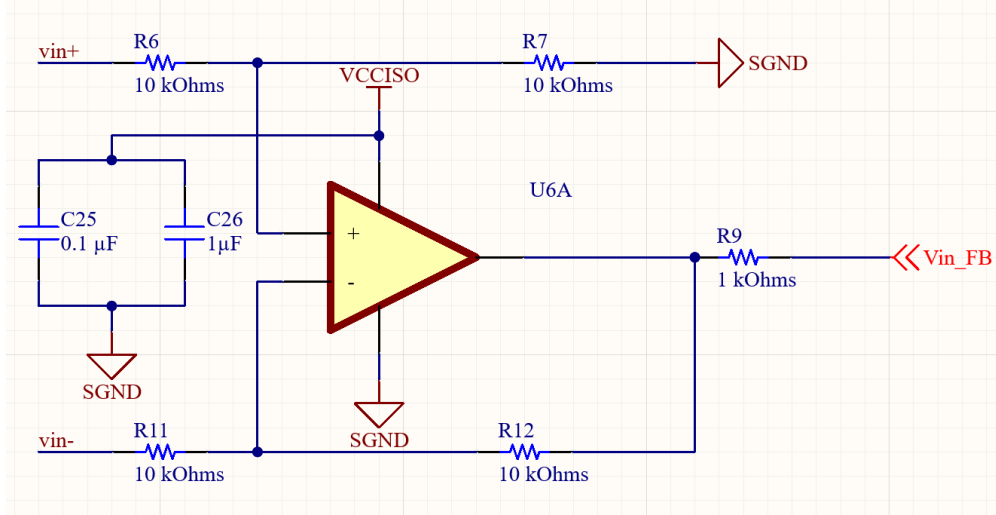
Şekil 2.7. AS78L05RTR-E1 lineer voltaj regülatör devresi

Şekil 2.7'de gösterilen voltaj regülatör devresinde V_{in} giriş gerilimini V_{cc} ise gerilim okuma devrelerinden kullanılan işlemsel yükselteçlerin besleme gerilimini temsil etmektedir. Tasarımda kullanılan voltaj regülatörü 100mA'ye kadar çıkış akımı ve 5V, 12V ve 15V sabit çıkış gerilimi sağlayabilmektedir. Kısa devre akım sınırlaması ve aşırı sıcaklık koruması mevcut olmakla beraber harici bir ekipmana ihtiyaç duymazlar. Giriş ve çıkış gerilimlerinin okunması için AMC1200SDUB izolasyon yükselteci kullanılmıştır.



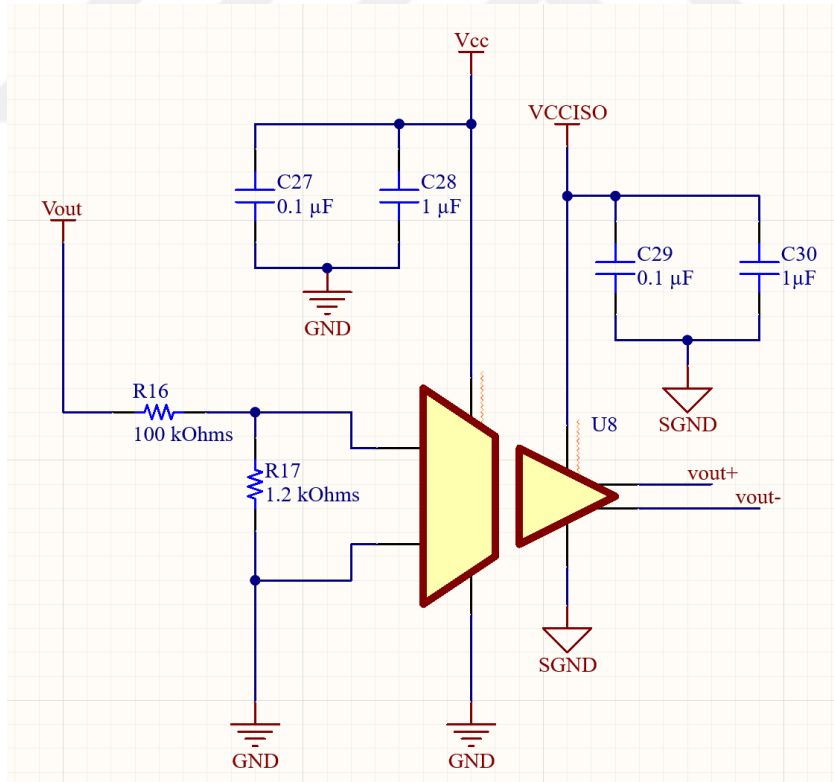
Şekil 2.8. Giriş gerilimi izolasyon devresi (AMC1200)

Şekil 2.8’de gösterilen hassas izolasyon yükselteci, çıkış gerilimini giriş geriliminden ayırmak için yüksek dirence sahip silikon dioksit bariyer kullanır. Girişten uygulanan analog sinyal (V_{in}) işlemsel yükselteç içerisinde dijital sinyale çevrilerek izolasyon bariyerine aktarılır. Daha sonra bu dijital sinyal alçak geçiren filtre ile işlenerek çıkışa tekrar analog sinyal olarak aktarılır. Giriş katında bulunan R_{10} şönt direnci ile optimize edilmiş yükselteç %0,075 gibi oldukça düşük değerde doğrusal olmama durumuna sahiptir (URL-12). Elektrik motorlarının denetiminde, yenilenebilir enerji alanında, frekans eviricilerde ve kesintisiz güç kaynaklarında sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 2.8’de V_{in+} ve V_{in-} olarak simetrik şekilde izole edilen giriş geriliminin okunması ve kontrol katında kullanılması için Mikroçip Teknoloji Şirketi tarafından genel amaçlı uygulamalar için üretilen MCP6001 serisi işlemsel yükselteç kullanılmıştır. Şekil 2.9’daki işlemsel yükselteç otomobillerde, taşınabilir elektronik aygıtlarda, analog filtrelerde ve batarya güç sistemlerinde kullanılmaktadır. Besleme gerilimi 1,8V ile 6V aralığında değişirken, 100 μA gibi çok düşük suskun akım koşullarına sahiptir (URL-13).

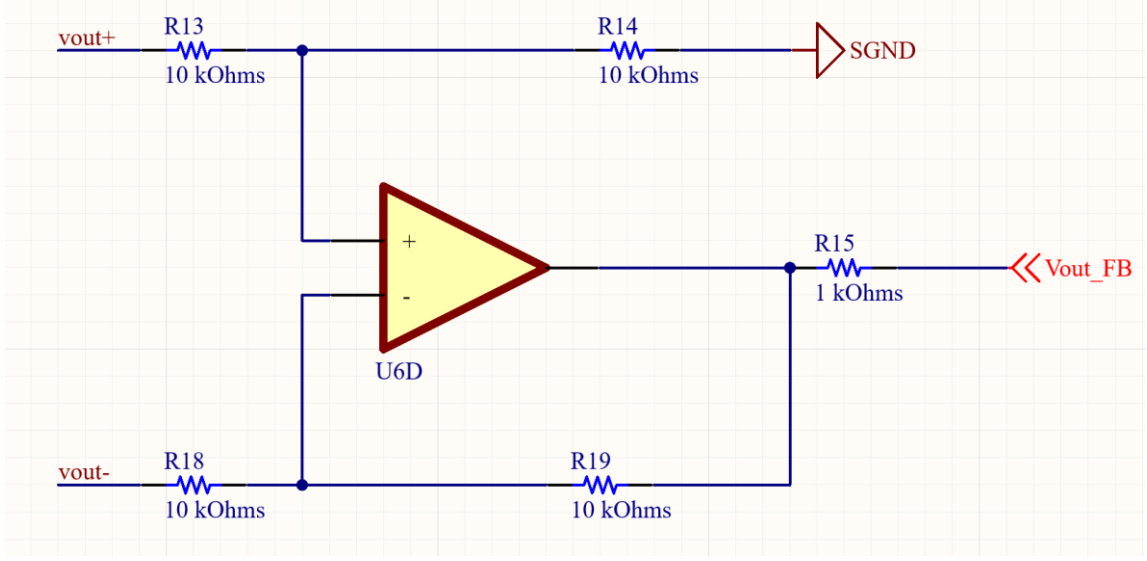


Şekil 2.9. Giriş gerilimi okuma devresi (MPC6001)

Çıkış gerilim katında da giriş gerilimine benzer şekilde tasarlanan izolasyon ve gerilim okuma devreleri sırasıyla Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de gösterilmiştir.

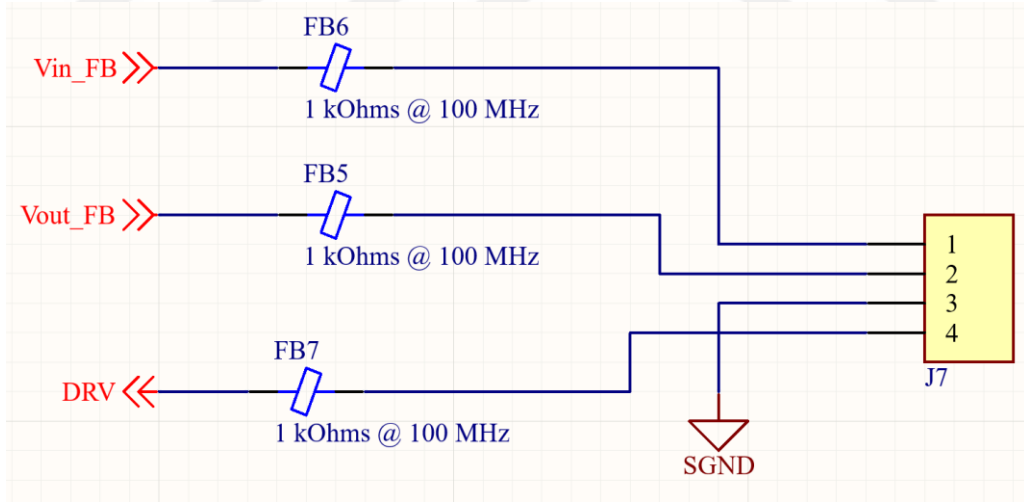


Şekil 2.10. Çıkış gerilimi izolasyon devresi (AMC1200)



Şekil 2.11. Çıkış gerilimi okuma devresi (MPC6001)

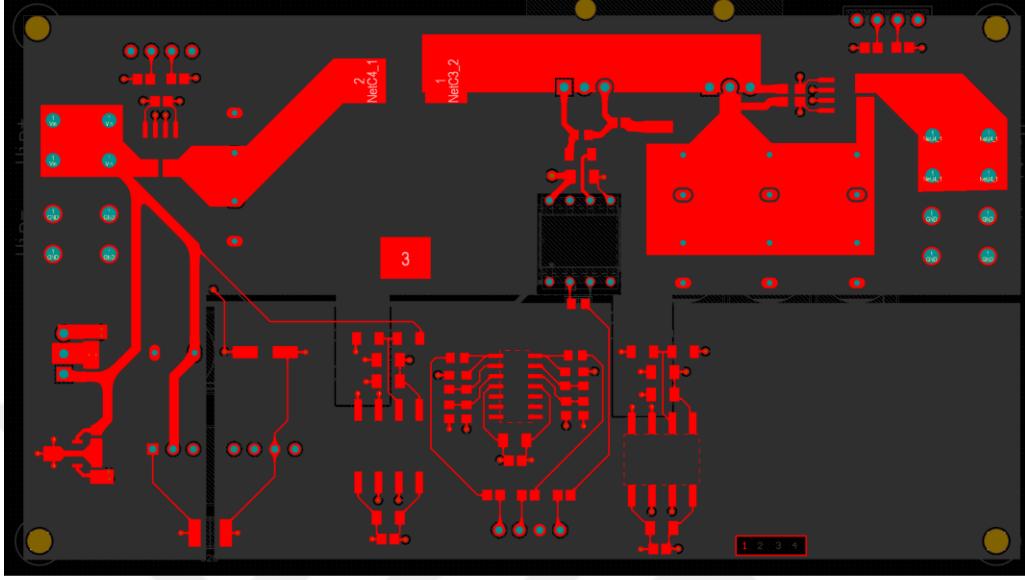
Son olarak giriş ve çıkış gerilimlerini mikrodenetleyiciye aktarmak ve DGM işaretini mikroişlemci üzerinden kontrol katına iletmek için denetim aşamasında kullanılacak bu üç bileşen dörtlü pin ile Şekil 2.12'deki gibi bir araya toplanmıştır.



Şekil 2.12. Mikroişlemci ve çevirici ara bağlantısı

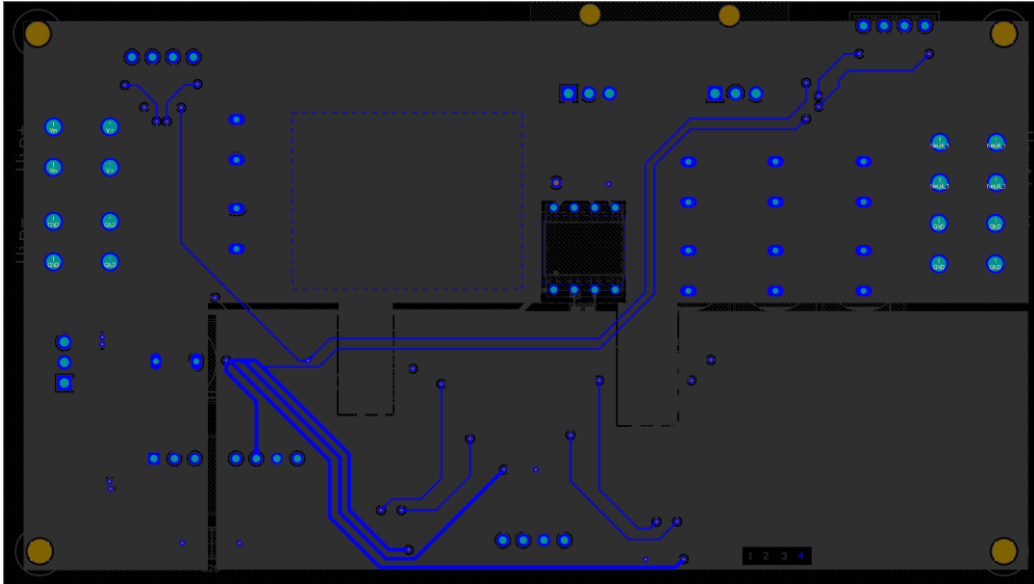
Şekil 2.4'de kullanılan ACS711 akım sensörlerinin çıkışlarında ve Şekil 2.12'de gerilim okuma hatları ve DGM işaretinin hattı üzerinde bulunan ferrit boğumları ($FB_k \{k \in 1, 2, \dots, 7\}$) yüksek frekansların süzülmesini sağlamaktadır. Tasarımların ve baskı devre kartlarının tamamının gerçekleştirilmesinde ALTIUM DESIGNER programı kullanılmıştır.

Baskı devre kartına ait üst katman, alt katman ve birleştirilmiş katman görüntüleri sırasıyla Şekil 2.13, Şekil 2.14 ve Şekil 2.15 de gösterilmiştir.



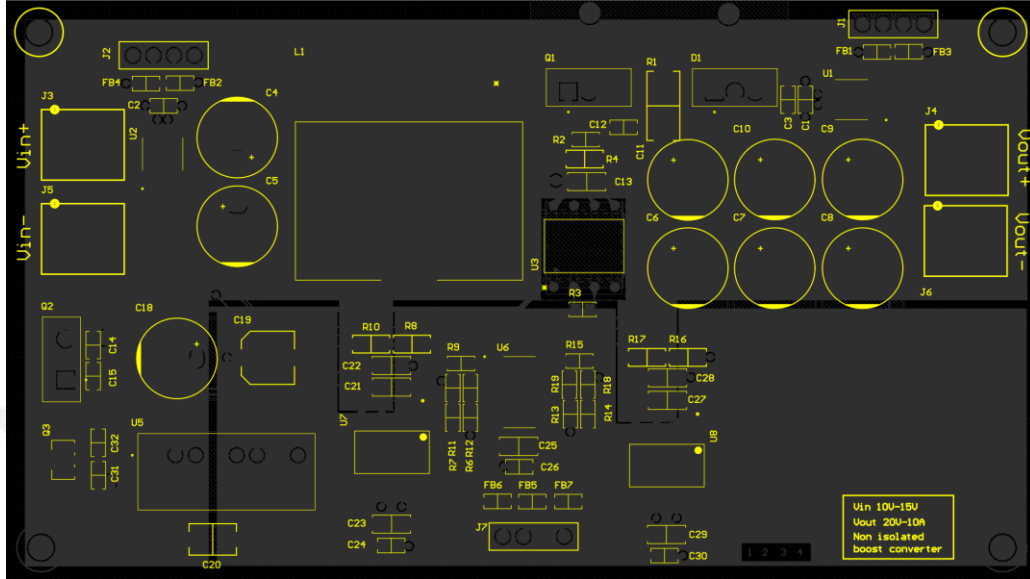
Şekil 2.13. Tasarlanan DA/DA yükselten çeviricinin üst katman görünüşü

Tasarlanan yükselten DA/DA çevirici minimum 10V-15V giriş gerilim aralığına sahiptir. Çıkış tarafında ise 20V gerilimde 10A yükü besleyebilecek şekilde tasarlanmıştır.



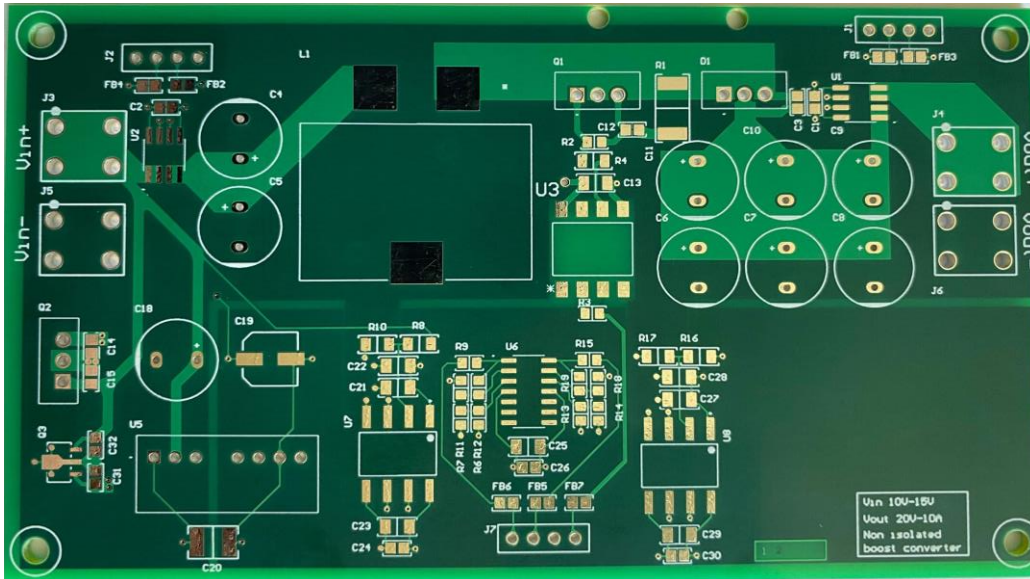
Şekil 2.14. Tasarlanan DA/DA yükselten çeviricinin alt katman görünüşü

Şekil 2.13'deki ve Şekil 2.14'deki katmanlar tasarımıdaki iletim yollarını gösterirken, Şekil 2.15'deki birleştirilmiş katman elektriksel devre elemanlarının konumlarını göstermektedir.



Şekil 2.15. Tasarlanan DA/DA yükselten çeviricinin birleşik katman görünüşü

Tasarımların ve çizimlerin tamamlanmasının ardından üretime gönderilen yükselten DA/DA çeviriciye ait baskı devre kartı Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. DA/DA yükselten çeviricinin baskı devre kartı

Üretim aşamasının ardından, elektriksel elemanların konumlandırma ve lehimleme işlemlerinden sonra yükselten DA/DA çeviricinin dizgisinin tamamlanmış hali Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Yükselten DA/DA çevirici devresi

Tasarlanan yükselten DA/DA çeviriciye ait elektriksel parametreler Tablo 2.1’de verilmiştir.

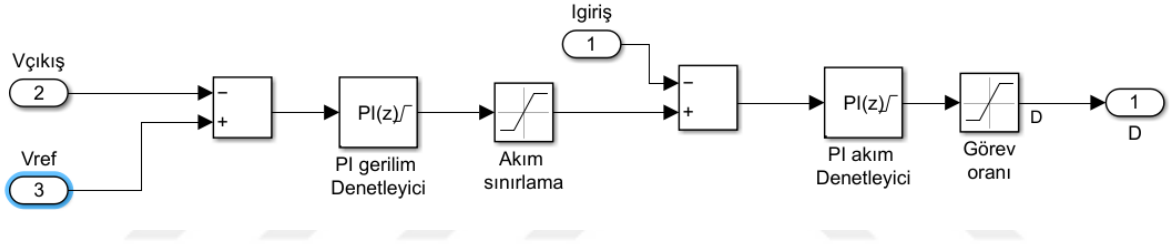
Tablo 2.1. Tasarlanan çeviriciye ait elektriksel parametreler

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Endüktör	L	10	μH
Giriş kapasitörü	C_1	200	μF
Çıkış kapasitörü	C_2	2600	μF
Giriş gerilimi	V_{in}	10-15	V
Çıkış gerilimi	V_{out}	20	V
Çıkış akımı	I_{out}	10	A
Çıkış gücü	P_{out}	200	W
Anahtarlama frekansı	f_{sw}	100	kHz

Tasarım aşamasında çıkış filtre kapasitörü $600\mu\text{F}$ olarak hesaba katılmıştı. Ancak elektrikli araç sürüş çevriminde yük akımının hızlı ve sık değişmesi sebebiyle meydana gelebilecek gerilim salınımlarını en aza indirmek için deneysel çalışmada ek olarak $1000\mu\text{F}$ -35V değerinde iki ayrı kapasitör eklenmiştir.

2.3. DA/DA Çeviricilerin Denetimi

Bölüm 2.2’de tasarım aşamaları etraflıca açıklanan ve çalışmamızda enerji depolama elemanlarının hücre gerilimlerini arzu edilen DA bara gerilim seviyesine yükseltmek için kullanılan DA/DA çeviriciler kaskad denetim tekniği ile kontrol edilmiştir. Kaskad denetime ait blok diyagramı aşağıda gösterilmiştir.

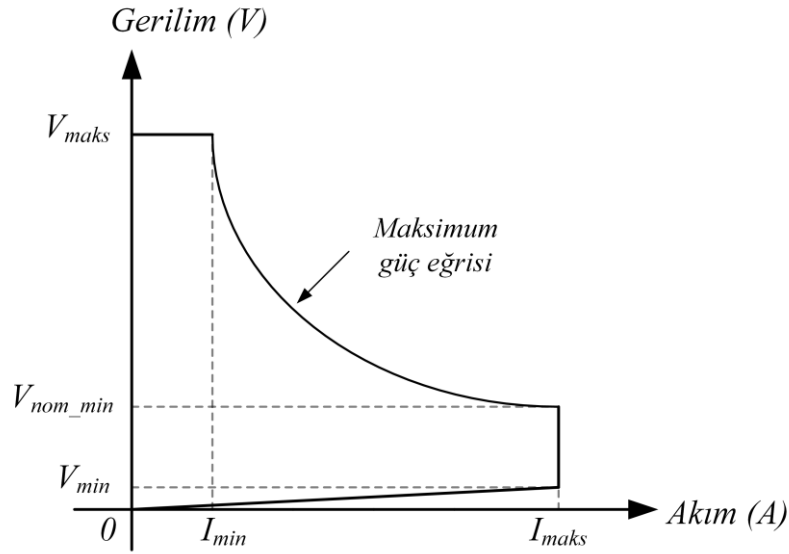


Şekil 2.18. Kaskad denetim yapısı

Şekil 2.18’de $V_{\text{çıkış}}$, DA/DA çeviricinin çıkış gerilimini, V_{ref} , referans bara gerilimini temsil etmektedir. Bu iki büyüklüğün farklı alınarak gerilim hatası hesaplanır ve oransal+integral (PI) denetleyiciye giriş olarak verilmiştir. PI gerilim denetleyicinin çıkışı, bara gerilimini arzu edilen değerde tutacak referans akım değerini oluşturur. Akım sınırlama bloğu ile enerji depolama elemanlarının akımları üretici tarafından önerilen ve enerji depolama elemanından sürekli olarak çekilecek maksimum akım ile sınırlandırılmıştır. Referans giriş akımı $I_{\text{girış}}$ çevirici giriş akımı ile karşılaştırılarak akım hatası hesaplanır ve PI akım denetleyici bloğuna iletilir. Bu blok istenilen çıkış akımını sağlamak için gereken çevirici görev oranını belirler. Yükselten çeviriciler görev oranına karşı oldukça hassas oldukları için çıkış geriliminin tehlikeli değerlere ulaşmaması için görev oranı 0,02 ile 0,7 arasında sınırlandırılmıştır. EA’da sürüş koşullarına bağlı olarak yük akımı oldukça sık değişmektedir. Ek olarak bara gerilimindeki salınımların da minimum düzeyde olması optimum güç aktarımı için önem arz etmektedir. Bu sebeple PI akım denetleyicinin zaman sabiti gerilim denetleyiciye göre on ile on beş kat daha küçük seçilmelidir (Azib vd., 2010).

2.4. DA Elektronik Yükün Programlanması

Elektronik yükler, tasarlanan bir elektronik aygıtın değişken yük koşullarında test edilmesi için kullanılan cihazlardır. Özellikle güç kaynaklarının, DA/DA çeviricilerin, bataryaların ve yakıt hücrelerinin test edilmesinde ve EA'ların sürüş çevrimini tamamlaması için gereken yük akımının simüle edilmesinde kullanılmaktadır. Programlanabilir DA elektronik yükler sürekli gerilim (*Continuous Voltage-CV*), sürekli akım (*Continuous Current-CC*), sürekli güç (*Continuous Power-CP*) şeklinde denetlenen elektronik aygıtın sabit akım, gerilim veya güç altındaki tepkilerinin test edilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra değişken sürekli akım (*Dynamic Continuous Current-DCC*) veya değişken sürekli gerilim (*Dynamic Continuous Voltage-DCV*) şeklinde yük akımını ve gerilimini değişken olarak tahsis eden modları da mevcuttur. Çoğu elektronik yükün güç değerleri Şekil 2.19'daki gibi nominal gerilim değerlerine karşılık yüklenebileceği nominal akım değerlerini içeren bir giriş karakteristik eğrisi ile gösterilir.



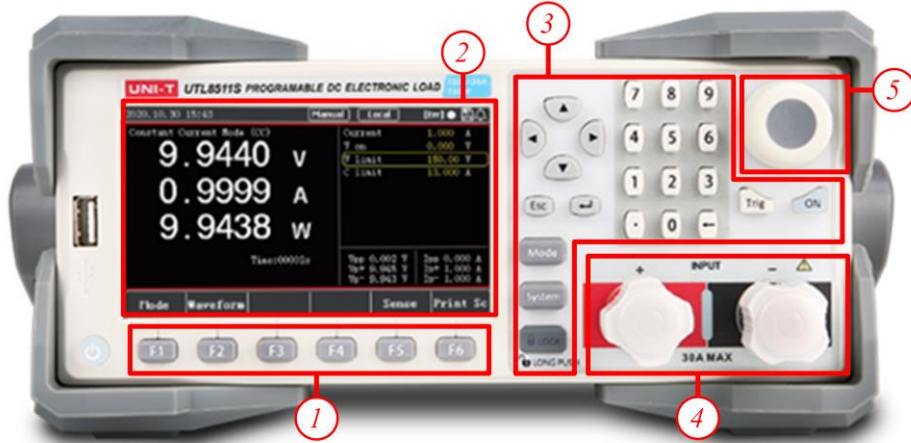
Şekil 2.19. Programlanabilir DA elektronik yükün akım-gerilim ilişkisi

Şekil 2.19'da V_{maks} ve I_{maks} sırasıyla programlanabilir elektronik yükün maksimum gerilim ve maksimum akım değerlerini, V_{min} ve I_{min} ise minimum gerilim ve minimum akım değerlerini temsil etmektedir. Elektronik yükün maksimum akım değerini sağlaması için gereken gerilim sınırı V_{nom_min} olarak gösterilmiştir. Elektronik yükler V_{min} ile V_{nom_min} değerleri arasında maksimum akım sağlayabilirken, sıfır ile I_{min} arasında

maksimum gerilim değeri sağlayabilirler. Genellikle elektronik yükler sabit bir güç girişine sahip olduğundan akım ile gerilim arasında ters bir orantının olacağı söylenebilir. Dolayısıyla elektronik yükler, maksimum güç eğrisi ile sınırlandırılan gerilim ve akım kombinasyonları dahilinde çalıştırılabilirler. Bu bilgilerden yararlanılarak elektronik yük güç sınırı için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$V_{maks} * I_{min} = V_{min} * I_{maks} = P_{maks} \quad (2.8)$$

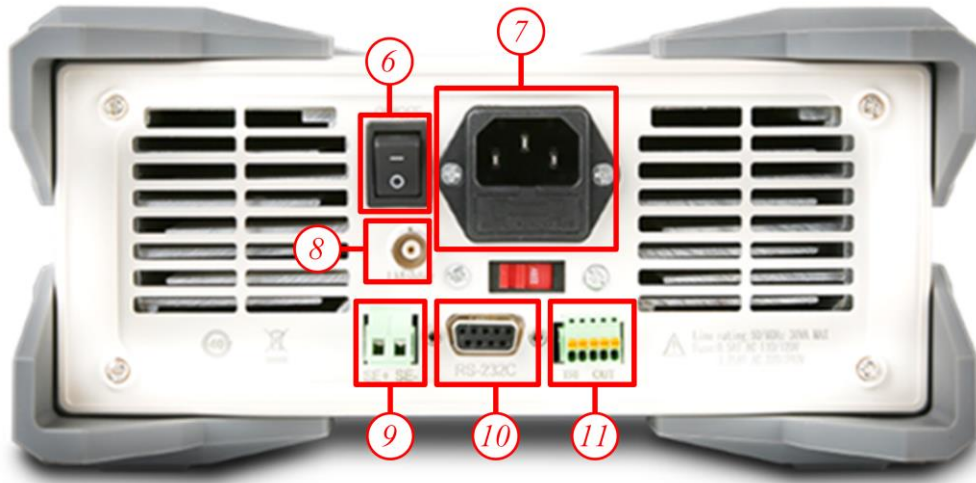
Denklem (2.8)'de P_{maks} elektronik yükün bir kaynaktan çekebileceği maksimum güç olarak tanımlanır ve elektronik yük bu güç seviyesine kadar yüklendirilebilir. Bu tez çalışmasında yük akımının pozitif (kaynaklardan akım çekilen) kısımlarını modellemek için kullanılan UNI-T marka UTL8511 model programlanabilir DA elektronik yükün ön paneli Şekil 2.20'de ve arka paneli Şekil 2.21'de gösterilmiştir (URL-10).



Şekil 2.20. UNI-T UTL8511 Programlanabilir DA elektronik yük ön paneli

Şekil 2.20'deki elektronik yük ön panelinde (1) numaralı pencerede bulunan F_i $\{i \in 1, 2, \dots, 6\}$ tuşları manuel olarak çalışma modunun seçiminde kullanılmaktadır. Sürekli sabit akım, sürekli sabit gerilim, batarya deşarj testi, dinamik akım, dinamik gerilim bu modlardan bazılarıdır. (2) ile gösterilen penceredeki dijital ekran aracılığı ile elektronik yükün yüklenme akım, gerilim ve güç değerleri izlenebilmektedir. Aynı zamanda bu ekran üzerinden sistem başlangıç ayarları yapılabilmekte ve akımların ve gerilimlerin maksimum ve minimum değerleri gözlenebilmektedir. (3) ile gösterilen pencerede bulunan sayısal tuşlar yardımıyla cihaz manuel olarak programlanabilmektedir. Yine aynı penceredeki yön

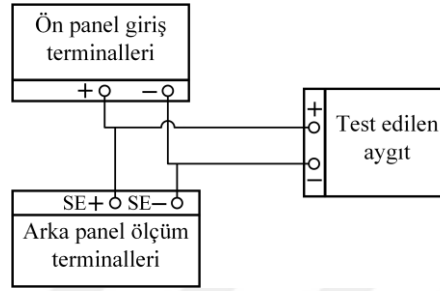
tuşlarıyla parametreler arasında geçiş yapılabilir. Sistem ayarlamaları yapıldıktan sonra elektronik yükü manuel olarak yüklemek için bu pencerede bulunan ON tuşuna basılmalıdır. (4) numaralı pencerede elektronik yükün giriş terminallerini göstermektedir. Test edilecek aygıt veya devre bu terminallere aynı polariteler birbirlerine denk gelecek şekilde paralel bağlanmalıdır. (5) numaralı pencerede bulunan çok fonksiyonlu pot aracılığı ile sağa ve sola dönüşler parametreler arasında geçiş sağlarken üzerine tıklandığında ise ilgili parametre manuel olarak ayarlanabilmektedir.



Şekil 2.21. UNI-T UTL8511 Programlanabilir DA elektronik yük arka paneli

Şekil 2.21'deki elektronik yük arka panelinde (6) numaralı pencerede bulunan anahtar yardımıyla cihaz elektriksel olarak açılıp kapatılabilmektedir. (7) numaralı pencerede bulunan besleme girişi ile elektronik yük doğrudan şebekeye bağlanır. Her ne kadar besleme gerilimi AA olsa da UTL8511 modeli sadece DA yük ile yüklenebilmektedir. (8) numaralı pencerede bulunan BNC soket yardımıyla elektronik yükten çekilen akım ölçüm cihazlarına aktarılacak için kullanılmaktadır. Cihaz akımı izlemek için nominal akım değerine karşılık 10V değerinde bir gerilim sinyali üretir. BNC soket aracılığı ile ölçülen gerilim değeri, cihazın nominal akım değerine bölüldüğünde elektronik yükün yüklendiği gerçek akım değeri işlenmek üzere dijital ortama aktarılabilmektedir. Örneğin cihazın 50A değerinde nominal akıma sahip olduğu ve bu cihazdan 25A akım çekildiği varsayıldığında BNC soket üzerinden bu değer 5V olarak okunacaktır. Bu ise BNC çıkışının 0,2V/A değerinde bir hassasiyete sahip olduğu anlamına gelmektedir. (9) numaralı pencere ile gösterilen girişler test edilen devre veya aygıtın, test esnasında meydana gelebilecek gerilim düşümlerini

ortadan kaldırmak için gereken hassasiyet girişleridir. Özellikle elektronik yük yüksek bir akım ile yüklendirildiğinde test edilen cihaz ile yük terminallerini birbirine bağlayan kablolarla, bu kabloların iç dirençleriyle orantılı olacak şekilde bir gerilim düşümü meydana gelir. Bu durumda test altında olan cihazın terminal gerilimi, elektronik yükün terminallerinden okunmak istendiğinde ölçümde hata meydana gelebilmektedir. Ölçüm doğruluğunu sağlamak için hassasiyet girişleri Şekil 2.22'deki gibi bağlanmalıdır.

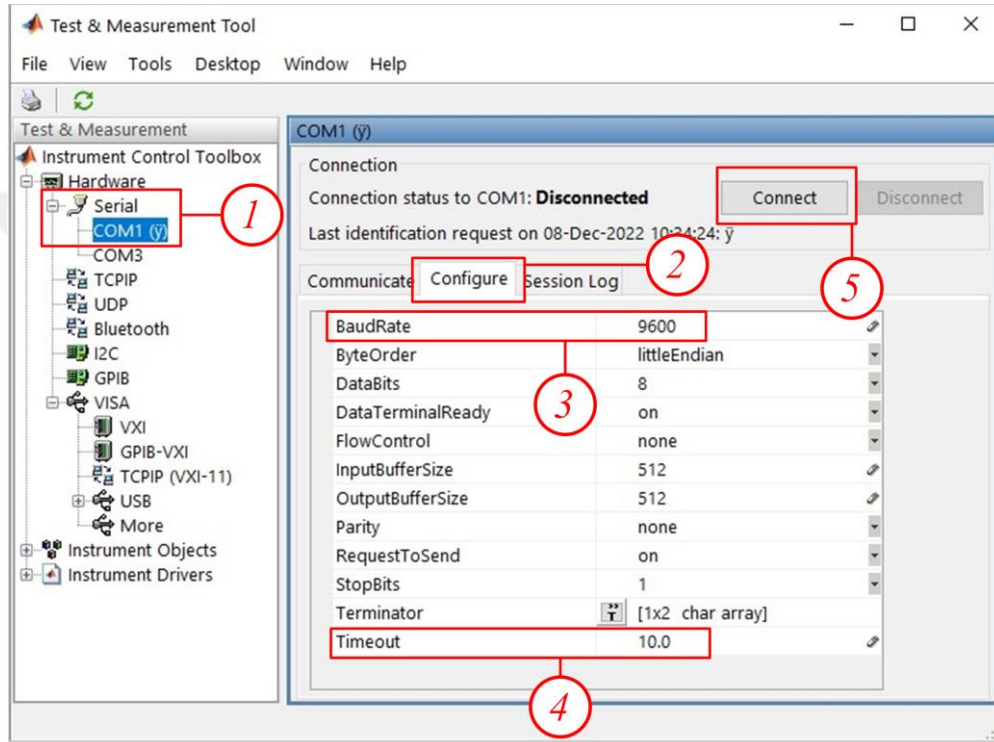


Şekil 2.22. Elektronik yük hassas ölçüm bağlantısı

Şekil 2.21'deki (10) numaralı pencerede bulunan RS232 bağlantı portu yardımıyla elektronik yük ile bilgisayar haberleşmesi sağlanmaktadır. Bu sayede cihaz uzaktan programlanabilmektedir. (11) numaralı pencere ise harici tetikleme için kullanılmaktadır. Çalışmamızda kullandığımız UNI-T UTL8511 programlanabilir DA elektronik yükün temel özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Anma değerleri 150V/30A/150W
- Dört temel test modu Sürekli akım, sürekli gerilim, sürekli direnç, sürekli güç
- Harici tetikleme ve uzaktan akım izleme
- 0,1mV/0,1mA yüksek çözünürlük
- 10kHz değerine kadar dinamik akım/gerilim testi
- 40kHz değerinde gerilim/akım örnekleme
- Aşırı gerilim/Düşük gerilim/Aşırı akım/Aşırı güç/Sıcaklık ve ters bağlantı koruması
- Standart RS232 bağlantı portu
- Hassas gerilim ölçümü fonksiyonu
- Uzaktan kontrol ve izleme
- Dalgalılık örnekleme ve belirleme fonksiyonu
- %20, %50 ve %100 yük etkisi testi

Programlanabilir elektronik yük hem Şekil 2.20’de gösterilen ön panel yardımı ile manuel olarak hem de Şekil 2.21’de gösterilen arka paneldeki RS232 bağlantısı ile uzaktan programlanabilmektedir. Bilgisayar üzerinden programlamak için MATLAB Test ve Ölçüm Araç Kutusu (tmttool) aracılığı ile cihaza bağlanılabilmektedir. İlgili araç kutusuna komut penceresinde tmttool kodu koşturulmak suretiyle erişilebilmektedir. Şekil 2.23’de MATLAB test ve ölçüm aracı arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 2.23. MATLAB test ve ölçüm aracı arayüzü

Şekil 2.23’de (1) numaralı pencere elektronik yük ile bilgisayar haberleşmesini sağlayan seri bağlantı port numarasını göstermektedir. Bu portun üzerine tıklandığında bağlantı özelliklerini ayarlamak için sağ taraftaki pencere açılmaktadır. (2) numaralı konfigürasyon penceresi seçilerek aygıt ile bilgisayar haberleşmesi için gerekli ayarlamalar yapılabilmektedir. (3) numaralı pencerede aygıtı gönderilen veya aygıttan alınan sinyallerin saniyedeki değişim hızı değiştirilirken (4) numaralı pencerede ise aygıtın cevap verme zaman aşım süresi ayarlanabilmektedir. Cihaz ile bilgisayar arasındaki gerekli bağlantı özellikleri sağlandığında (5) numaralı pencere aracılığı ile cihaza bağlanıp uzaktan programlama işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Çoğu test ve ölçüm cihazı programlama dili olarak Programlanabilir Enstrümanlar için Standart Komutlar (*Standard Commands for*

Programmable Instruments-SCPI) yazılımını kullanmaktadır. Ortak bir programlama dilinin kullanılması farklı üreticilere sahip birçok ölçüm ve test aracının aynı çalışmada kullanılabilmesine büyük kolaylık sağlar. Yukarıda açıklanan bilgiler yardımıyla elektronik yük ile bilgisayar haberleşmesi sağlandıktan sonra MATLAB komut satırında aşağıdaki kod satırının koşturulmasıyla cihaz bilgisayara bağlanabilmektedir.

```
ELOAD=instrfind('Type','serial','Port','COM1','Tag','');
```

Yukarıdaki kod satırında ELOAD değişkeni arzu edilen başka bir değişken ismine atanabilir. Parantez içindeki kısım bağlantının tipini ve hangi port üzerinden bağlanılacağını belirtmektedir. Bu adımdan sonra elektronik yükün çalışma modunu belirlemek için aşağıdaki SCPI kod satırları MATLAB komut penceresi yardımıyla koşturulmalıdır.

```
query(ELOAD, 'SOURCE:MODE:CURRENT');  
query(ELOAD, 'SOUR:MODE:VOLT');  
query(ELOAD, 'sour:mode:pow');
```

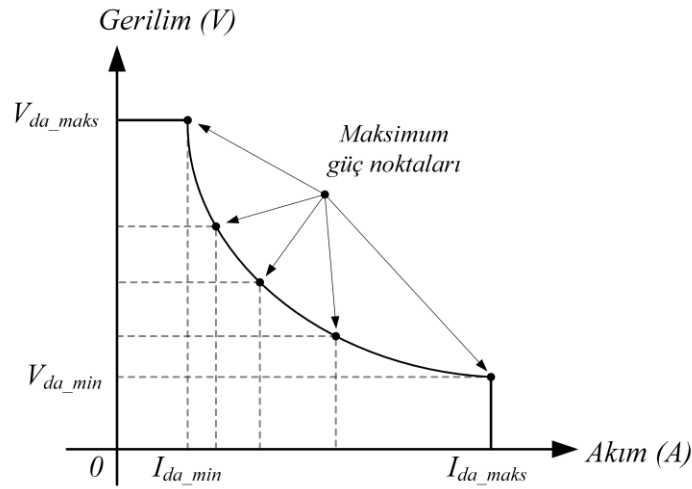
Yukarıda verilen kod satırlarında *query* ifadesi aygıtı komut gönderip cevap almak için kullanılmaktadır. Komutların bazı harflerinin büyük bazı harflerinin küçük olarak verilmiş olması sözdizimini etkilememektedir. Yukarıdaki üçlü kod satırından birinci satır açık şekilde yazılmıştır. Bu kod ikinci satırdaki gibi kısaltılarak veya üçüncü satırdaki gibi büyük küçük harf uyumuna dikkat edilmeden de yazılabilmektedir. Birinci kod satırı elektronik yükün çalışma modunu “sabit akımda çalışma modu” olarak ayarlarken ikinci kod satırı “sabit gerilimde çalışma modu” ve üçüncüsü “sabit güçte çalışma modu” olarak ayarlar. Elektronik yük kullanılarak test edilen aygıttan çekilecek akım değerinin ayarlanması, değişken yük akımı koşullarında bu akımların ölçülmesi için aşağıdaki kod satırı örnek olarak verilmiştir.

```
query(ELOAD, 'inp on');  
query(ELOAD, 'curr 5');  
query(ELOAD, 'meas:curr?');  
query(ELOAD, 'inp off');
```

Yukarıdaki ilk kod satırı cihazın açılmasını, ikinci kod satırı akımın 5A değerine ayarlanmasını, üçüncü kod satırı akımın ölçülmesini ve dördüncü kod satırı ise cihazın kapatılmasını sağlar.

2.5. DA Güç Kaynağının Programlanması

Programlanabilir DA güç kaynakları özellikle enerji depolama cihazlarının şarj edilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra devre kartlarının testlerinde ve DA çeviricilerine değişken giriş gerilimi sağlamada kolay çözümler sunmaktadır. Bu güç kaynakları genelde sürekli gerilim ve sürekli akım olmak üzere iki farklı modda çalışmaktadırlar. Sürekli gerilim (*Continuous Voltage-CV*) modunda güç kaynağı verilen referans girişe göre çıkış gerilimini kontrol eder. Sürekli akım (*Continuous Current-CC*) modunda ise güç kaynağı aynı şekilde akımı kontrol eder. Aygıtın bu iki moddan hangisinde çalıştığı programlanma ayarlarına ve yükün direncine bağlıdır. Sürekli gerilim durumu güç kaynaklarının tipik çalışma durumudur. Çıkış gerilimi manuel ya da programlama yoluyla verilen referans değerde sabit kalır ve çıkış akımı yük empedansı tarafından belirlenir.



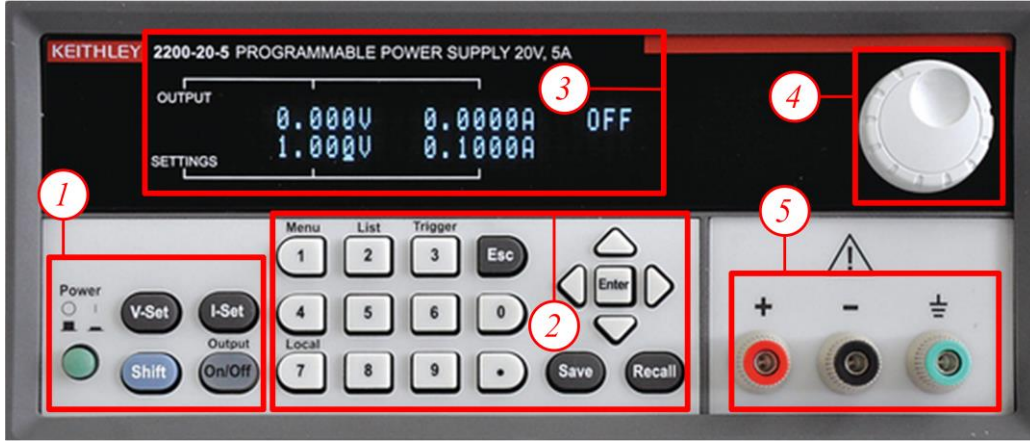
Şekil 2.24. DA güç kaynağının akım, gerilim ve güç ilişkisi

Sürekli akım modunda ise çıkış akımı verilen referans değerde sabit kalırken çıkış gerilimi yük empedansı tarafından belirlenir. Bu mod aynı zamanda bir güvenlik modu olarak bilinmektedir. Bunun sebebi şayet sürekli gerilim modunda çalışırken çıkış akımı verilen referans değer üzerinde çıkarsa güç kaynağı otomatik olarak sürekli akım moduna

geçmektedir. Programlanabilir DA güç kaynaklarının uygulamada öne çıkan parametreleri cihazın üretebileceği akım, gerilim ve güç değerlerinin maksimum değerleridir. Şekil 2.24’de programlanabilir DA güç kaynaklarına ait genel bir akım, gerilim, güç ilişkisini göstermektedir. Şekil 2.24’de V_{da_maks} ve I_{da_maks} sırasıyla programlanabilir DA güç kaynağının maksimum gerilim ve maksimum akım değerlerini, V_{da_min} ve I_{da_min} ise minimum gerilim ve minimum akım değerlerini temsil etmektedir. Güç kaynağının maksimum akım değerini sağlaması için gereken gerilim sınırı genellikle 1V seviyesindedir. DA güç kaynakları sıfır ile V_{da_min} arasında maksimum akım sağlayabilirken, sıfır ile I_{da_min} arasında maksimum gerilim değeri sağlayabilirler. Genellikle DA güç kaynakları sabit bir güç çıkışına sahip olduğundan akım ile gerilim arasında ters bir orantının olacağı söylenebilir. Dolayısıyla güç kaynakları, maksimum güç eğrisi ile sınırlandırılan gerilim ve akım kombinasyonları dahilinde çalıştırılabilirler. Bu durumda akım, gerilim ve güç ilişkisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

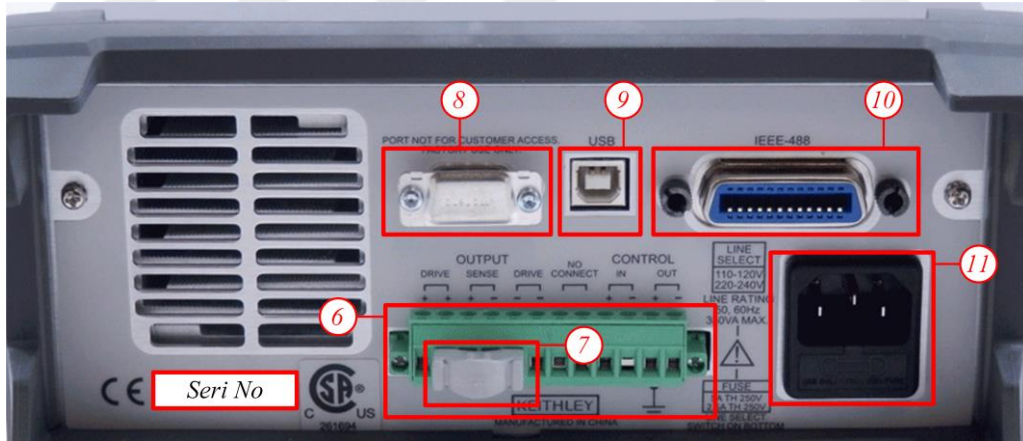
$$V_{da_maks} * I_{da_min} = V_{da_min} * I_{da_maks} = P_{da_maks} \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)’da P_{da_maks} güç kaynağının bir elektriksel yüke verebileceği maksimum güç olarak tanımlanır ve güç kaynakları bu değere kadar güç sağlayabilirler. Bu tez çalışmasında yük akımının negatif (kaynaklara akım verilen) kısımlarını modellemek için kullanılan KEITHLEY marka 2200-20-5 model programlanabilir DA güç kaynağının ön paneli Şekil 2.25’de ve arka paneli Şekil 2.26’da gösterilmiştir . Şekil 2.25’de (1) numaralı pencere yardımıyla cihaz açılıp kapanabilmekte ve gerilim ve akım parametreleri arasında geçiş yapılabilir. (2) numaralı pencere bulunan nümerik tuşlar yardımıyla akım ve gerilim değerleri ayarlanabilmektedir. Yine bu pencerede bulunan yön tuşları ile parametreler ondalıklı olarak girilebilmektedir. Nümerik tuşların üst kısmında yazan özelliklere erişebilmek ve değiştirebilmek için öncelikle *shift* tuşu kullanılmalıdır. (3) numaralı pencerede bulunan dijital ekran yardımıyla ayarlanan parametreler, cihazın çalışma durumu, yerel ya da uzak bağlantı durumu ve sürekli akım veya sürekli gerilim gibi çalışma modları görülebilmektedir.



Şekil 2.25. KEITHLEY 2200-20-5 programlanabilir DA güç kaynağı ön paneli

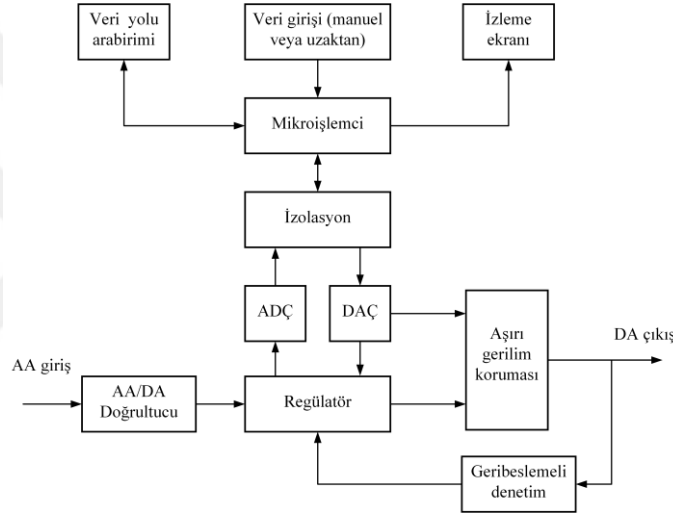
Cihazın dijital ekranında görülen akım ve gerilim değerlerinden alt kısımda bulunanlar ayarlanan parametreleri gösterirken, üst kısımda bulunanlar ise güç kaynağının çalışma anında sağladığı değerleri göstermektedir. (4) numaralı pencerede verilen sonsuz pot aracılığıyla parametreler nümerik tuşları kullanmadan da ayarlanabilmektedir. (5) numaralı pencerede ise güç kaynağının çıkış terminalleri bulunmaktadır.



Şekil 2.26. KEITHLEY 2200-20-5 programlanabilir DA güç kaynağı arka paneli

Şekil 2.26'daki güç kaynağı arka panelinde (6) numaralı pencerede bulunan 12-pin konnektörde iki adet ön paneldeki pozitif çıkışın aynısı olan pozitif çıkış (*output drive +*) ve iki adet ön paneldeki negatif çıkışın aynısı olan negatif çıkış (*output drive -*) bulunmaktadır. DA güç kaynağına bağlanan kabloların iç dirençleri ve uzunlukları ile orantılı olacak gerilim düşümlerini göz ardı edilerek test altındaki cihazın doğrudan giriş gerilimini ölçmek için hassasiyet (*sense + -*) konnektörü, kullanılmayan iki adet

konnektör ve harici tetikleme ile dijital giriş çıkış işlemlerinin kullanılması için bir giriş (*control in + -*) ve bir çıkış (*control out + -*) konnektörü bulunmaktadır. (7) numaralı pencerede bulunan kısa devre klipsi ile hassasiyet özelliğini aktifleştirmek için ilgili pinler kısa devre edilmiştir. (8) numaralı pencerede bulunan RS232 bağlantısı fabrika test bağlantı noktası olarak isimlendirilmiştir ve sadece üretici tarafından kullanılmaktadır. (9) numaralı pencerede gösterilen USB 2.0 tip B girişi ve (10) numaralı pencerede bulunan genel amaçlı arayüz veri yolu (*General Purpose Interface Bus-GPIB*) konnektörü ile bir bilgisayar üzerinden cihaza uzaktan erişim ve veri transferi sağlanabilmektedir. (11) numaralı pencerede bulunan güç konnektörü cihaza enerji vermek için kullanılmaktadır.



Şekil 2.27. Programlanabilir DA güç kaynağının basitleştirilmiş blok diyagramı

Programlanabilir DA güç kaynakları genellikle hem manuel hem de uzaktan ayarlanan gerilim ve akım değerlerini ölçmek için yerleşik ölçüm devreleri içerir. Manuel ya da bilgisayar aracılığı ile ayarlanan dijital girişleri güç kaynağına iletmek için analog dijital çeviriciler (ADÇ) kullanılırken, verilen referans değerleri güç kaynağının çıkış terminallerine iletmek için dijital analog çeviriciler (DAÇ) kullanılmaktadır. Şekil 2.27 programlanabilir DA güç kaynağının iç yapısına ait basitleştirilmiş blok diyagramı göstermektedir.

Şekil 2.27’de AA giriş bir doğrultucu kullanılarak DA gerilime dönüştürülür. Bu DA gerilim anahtarlama elemanlarının karakteristiğinden ötürü dalgalılık içerir. Regülatör bu dalgalılığı minimize etmek için kullanılır. Regülatör çıkışında aşırı gerilim koruması bulunan DA çıkış, bir geribeslemeli denetim aracılığı ile sürekli kontrol edilmektedir. ADÇ

ve DAÇ koruma amaçlı olarak mikroişlemciden izole edilmiştir. Çalışmamızda kullanılan KEITHLEY marka 2200-20-5 model programlanabilir DA güç kaynağına ait bazı teknik özellikler aşağıdaki gibidir.

- Anma değerleri 20V/5A/100W
- Yük ve hat regülasyonu
 - Gerilim $< \pm 0,01 + 2\text{mV}$
 - Akım $< \pm 0,05 + 0,1\text{mA}$
- Dalgalılık ve gürültü
 - Gerilim $< 1\text{mV}$
 - Akım $< 3\text{mA}$
- Çözünürlük
 - Gerilim 1mV
 - Akım $0,1\text{mA}$
- Yerleşme zamanı
 - Yük değişimlerinde $400\mu\text{s}$ ($0,1\text{A}$ 'den 1A değerine yükselirken)
 - Parametre değişimlerinde 35ms (1V 'den 11V 'ye 1A yükte)
- Aşırı gerilim koruması
 - Aralık 1V 'den 19V 'ye kadar
 - Cevap zamanı $< 10\text{ms}$

Klasik DA güç kaynaklarına göre programlanabilir DA güç kaynaklarının göze çarpan ilk özelliği bir analog veya dijital giriş aracılığı ile uzaktan kontrol edilebilmeleridir. Bu işlem genellikle bir bilgisayar üzerinden gerçekleştirilir. Şekil 2.25'deki DA güç kaynağı hem gösterilen ön panel yardımı ile manuel olarak hem de USB-TMC (*USB Test & Measurement Class*) bağlantısı ile uzaktan programlanabilmektedir. Bilgisayar üzerinden programlamak için cihazın arka panelinde gösterilen USB portu aracılığı ile öncelikle bilgisayar ile haberleşmesi sağlanmalıdır. Bu aşamadan sonra MATLAB komut satırında aşağıdaki kod koşturulmalıdır.

```
DAPOWER=visadev("USB0::0x05E6::0x2200::9yyyyy7::0::INSTR");
```

Yukarıdaki kod satırında DAPOWER değişkeni keyfi olarak seçilmiştir ve bilgisayar ile programlanabilir DA güç kaynağın haberleşmesi için bağlantı değişkeninin adını temsil etmektedir. Sanal enstrümanlar standart mimarisi (*Virtual Instrument Standard Architecture-VISA*) ile sağlanan bu haberleşme KEYSIGHT ve National Instrument tarafından arayüzden bağımsız olarak cihazlarla haberleşmek için tanımlanan bir standarttır. Ayrıca bu haberleşmenin sağlanması için MATLAB ölçüm araç kutusu (*Instrument Control Toolbox*) bağlantı yapılan bilgisayarda yüklü olması gerekmektedir. Kod satırındaki parantez içerisinde bulunan ifadede sırasıyla bağlantı tipi, bağlantı adresi, cihazın model ve seri numarası tanımlanmıştır. Kod satırının koşturulmasıyla MATLAB çalışma alanında DCPOWER adında VISA uzantılı bir uzak bağlantı değişkeni tanımlanmış olacaktır. Bu işlem bilgisayar ile cihazın haberleştiğini ve cihazın artık uzaktan programlanabileceğini göstermektedir. Her ne kadar farklı arayüzler sayesinde harici bir bilgisayara bağlanabilseler de güç kaynakları da elektronik yükler gibi gerek ön panellerinde bulunan nümerik tuşlar yardımıyla manuel olarak gerekse SCPI komutları kullanılarak uzaktan programlanabilmektedirler. DA güç kaynağı kullanılarak test edilen aygıtı verilebilecek akım ve gerilim değerinin ayarlanması, değişken yük akımı koşullarında bu akımların ve gerilimlerin ölçülmesi için aşağıdaki kod satırı örnek olarak verilmiştir.

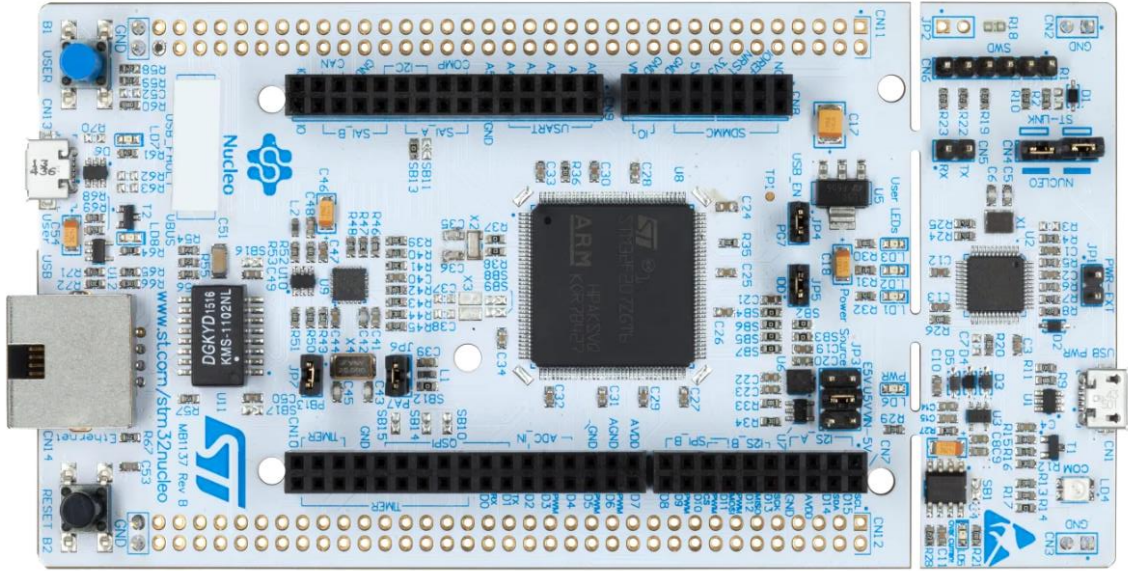
```
write(DAPOWER, 'SOURce:OUTPut:ON');
write(DAPOWER, 'SOURce:VOLtage 5');
write(DAPOWER, 'SOUR:CURR 1');
writeline(DAPOWER, 'meas:volt:dc?');
readline(DAPOWER);
writeline(DAPOWER, 'meas:curr:dc?');
readline(DAPOWER);
write(DAPOWER, 'SOUR:OUTP:OFF');
```

Yukarıda verilen kod satırlarında *write* ifadesi aygıtı komut gönderilmesini, *writeline* ifadesi ölçülmesi istenen parametrenin kaydedilmesini, *readline* ifadesi ise bu parametrenin okunarak bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlamaktadır. Komutların bazı harflerinin büyük bazı harflerinin küçük olarak verilmiş olması sözdizimini etkilememektedir. Yukarıdaki sekizli kod satırından birinci satır açık şekilde yazılmıştır. Bu kod üçüncü satırdaki gibi kısaltılarak veya dördüncü satırdaki gibi büyük küçük harf

uyumuna dikkat edilmeden de yazılabilmektedir. Birinci kod satırı güç kaynağının açılmasını, ikinci koda satırı terminal geriliminin 5V değerine ayarlanmasını, üçüncü kod satırı çıkış akımının 1A değerine ayarlanmasını, dördüncü kod satırı gerilimin ölçülerek kaydedilmesini, beşinci satır bu değer okunmasını, altıncı kod satırı akımın ölçülerek kaydedilmesini, yedinci satır bu değer okunmasını ve sekizinci satır ise güç kaynağının kapatılmasını sağlar.

2.6. STM NUCLEO F746ZG Mikrodenetleyicisi ve Ayarları

Mikrodenetleyiciler, yapılarında merkezi işlem birimi, bellek ve giriş çıkış birimleri bulunduran tümleşik devreler olarak tanımlanabilir. Bu devreler adında da anlaşılacağı üzere giriş biriminden verilen bir bilgiyi saklama, o bilgiyle işlem yapma ve çıkış birimine aktarma gibi denetim olgusunu yerine getirebilen özelliklere sahiptir. Tez çalışmasında, giriş ve çıkış katındaki gerilimlerin ve akımların okunması, DGM işaretlerinin üretilmesi için Şekil 2.28’de gösterilen STMicroelectronics firmasına ait F746ZG modeli tercih edilmiştir.



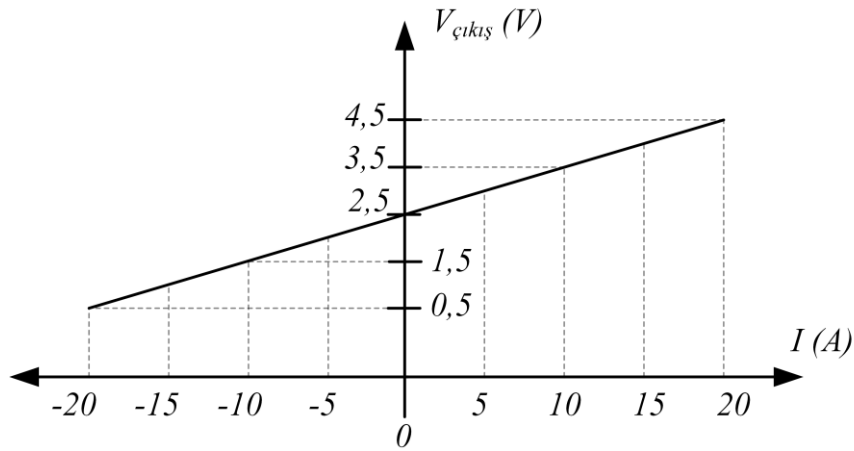
Şekil 2.28. STM NUCLEO F746ZG Mikrodenetleyicisi

Şekil 2.28’deki mikrodenetleyiciye ait pin çıkış diyagramları sırasıyla Şekil 2.29’da ve Şekil 2.30’da gösterilmiştir. Denetleyici 3,3V analog referans gerilimine sahip olmakla beraber sensör besleme gerilimleri için 5V değerinde çıkışa da sahiptir.

üçüncü taraf yazılım programları sayesinde hem MATLAB Editör üzerinden kod ile hem de Simulink arayüzünden hazır bloklar kullanılarak STM ile kolaylıkla haberleşme yapılabilmektedir. Bu haberleşmenin sağlanmasında kod kullanımı için *Embedded Coder Support Package for ARM Cortex-M Processors* ve *Embedded Coder Support Package for STMicroelectronic Discovery Boards* destek paketlerinin bağlantı kurulmak istenen bilgisayara yüklenmesi gerekmektedir. Simulink üzerinden haberleşmede ise *Simulink Coder Support Package for STMicroelectronic Nucleo Boards* destek paketi yüklenmelidir. Bu tez çalışmasında mikrodenetleyicinin programlanması, giriş çıkış akımlarının ve gerilimlerinin izlenmesi ve kullanılacak denetim yöntemi için gerekli DGM işaretlerinin üretilmesinde Simulink arayüzü kullanılmıştır.

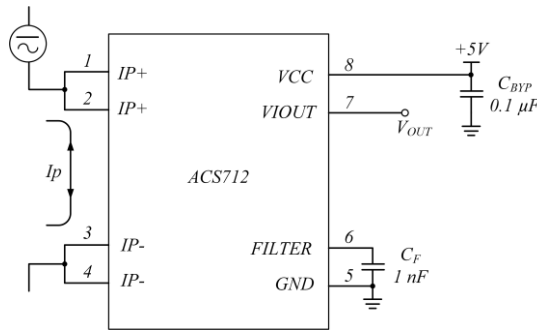
2.7. Akım Sensörleri ve Arayüz Devreleri

Tam aktif topoloji kullanılan çoğu HEDS’de kaskad denetim yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem temelde bir enerji depolama biriminin çıkış gerilimini arzu edilen değerde tutmak için enerji kaynağının sağlayacağı akımı kontrol ederek çeviricinin görev periyodunun ayarlanması ilkesine dayanmaktadır. HEDS’de enerji kaynaklarının bağlandığı ortak DA bara geriliminin mümkün olduğu kadar az salınımlı ve düşük salınıma sahip olması arzu edilir. Kaskad denetim yönteminin uygulanabilmesi için enerji kaynaklarının akımlarının ayrı ayrı ölçülmesi ve bu değerlerin analog giriş olarak kontrol kartına uygun bir şekilde verilmeleri gerekir.



Şekil 2.31. ACS712’nin iletim yolu akımına karşı çıkış gerilimi

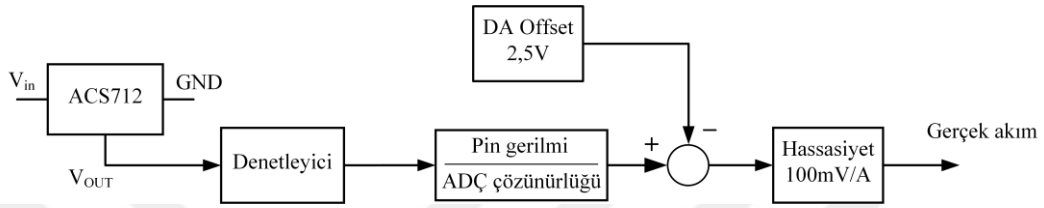
Bu işlemin gerçekleştirilmesi için tasarlanan çeviricilerin giriş ve çıkışlarında ACS711 ve ACS712 akım sensörleri kullanılmıştır. Her iki sensörde elektriksel olarak benzerlik gösterildiği için bu bölümde sadece ACS712 hakkında detaylı bilgi verilmiştir. ACS712 akım sensörleri motor kontrolü, yük algılama, anahtarlama güç kaynakları ve aşırı akım arıza koruma uygulamalarında hem AA hem de DA akım algılama işlemlerinde kullanılmaktadır (URL-1). Besleme gerilimi 5V olan ACS712 akım sensörü, akım okuma işlemini, bakır iletim yolundan akan akıma orantılı bir gerilim değeri oluşturarak gerçekleştirir. İletim yolunun akımı sıfır olduğunda besleme geriliminin yarısı kadar bir çıkış gerilimi üretir. İletim yolunun akımının her 1A artış değerine karşılık çıkış geriliminde, üretici tarafından belirlenen sensör hassasiyeti kadar bir değişim oluşmaktadır. Şekil 2.31’de 100mV/A hassasiyete sahip ACS712 -20/20A akım sensörünün iletim yolundan geçen akımına göre çıkışta oluşturduğu gerilim ilişkisi gösterilmiştir. Şekil 2.31’den görüldüğü gibi iletim yolundan akım geçmediği zamanlarda akım sensörü besleme geriliminin (5V) yarısı genlikte bir çıkış gerilimi (2,5V) üretmektedir. Akımın pozitif yönde artmasıyla amper başına 100mV değerinde değişim oluşmaktadır. Bu durumda iletim yolundan 10A değerinde akım akması ile sensör çıkış gerilimi 3,5V olmaktadır. Akımın şiddetinin negatif yönde 10A değerine ulaşması durumunda ise sensör çıkış gerilimi 1,5V olmaktadır. ACS712 akım sensörü okuma işlemlerini gerçekleştirebilmek için harici beslemeye ihtiyaç duymaktadır. Sensörün 5V değerindeki besleme gerilimi doğrudan kontrol kartı üzerinden sağlanmıştır. Şekil 2.32’de ACS712 akım sensörünün yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.32. ACS712 akım sensörü

Şekil 2.32’de akımın örneklenmesi için kullanılan iletim yolundan pim 1 ve 2’den pim 3 ve 4’e artan bir akım aktığında sensör çıkış gerilimi pozitif bir eğime sahip olur. İletim yolunun iç direnci 1,2mΩ değerindedir ve sensörün nominal akımının beş katı kadar akıma

dayanabilmesini sağlar. İletken yolun terminalleri pim 5 ve 8, sinyal uçlarından elektriksel olarak yalıtılmıştır (URL-1). Sensörün akım büyüklüğüne göre çıkışta ürettiği gerilimin gerçek akım değerine dönüştürülmesi için kontrol kartı üzerinden bazı eklentilerin yapılması gerekmektedir. Bu eklentiler, kontrol kartında bulunan analog dijital çeviricilerin (ADC) çözünürlüğü, kontrol kartı pin gerilimi, sıfır akım koşullarında sensörün ürettiği gerilim ve sensörün hassasiyeti olarak sıralanabilir.



Şekil 2.33. ACS712 akım sensörü ile akım okuma

Şekil 2.33’de ACS712 kullanılarak akıma orantılı üretilen gerilimin gerçek akım değerine dönüştürülmesine ait blok diyagram gösterilmiştir. Akım sensörünün, iletim yolundan geçen akıma orantılı olarak ürettiği gerilim mikrodenetleyiciye verilir. Denetleyiciler genellikle sıfır ile nominal pin gerilimleri aralığındaki değerleri, üzerlerinde bulunan ADC’lerin çözünürlüğüne bağlı olarak dijital veriye çevirmektedirler. Örneğin 10-bit ADC çözünürlüğüne ve 5V nominal pin gerilimine sahip bir denetleyici 0V gerilim değerini 0 olarak okurken, 5V gerilim değerini 1023 olarak dijital veriye çevirmektedir. DA offset sensörün sıfır akım koşullarında ürettiği çıkış gerilimini temsil etmektedir. ACS712’nin ürettiği çıkış gerilimi, denetleyicinin ölçebildiği aralığa indirildikten sonra elde edilen değer DA offset değerinden çıkarılır. Bu değer sensör hassasiyeti ile çarpıldığında gerçek akım değeri belirlenmiş olur.

Tasarlanan DA/DA çeviricilerde hem ACS712 hem de ACS711 akım sensörü bulunmaktadır. ACS712 ve ACS711 akım sensörleri işleyiş açısından oldukça benzerlik göstermektedir. ACS712 akım sensörü 20A değerine kadar, ACS711 akım sensörü 25A’değerine kadar ölçüm yapabilecek şekilde seçilmiştir. Kullanılan akım sensörleri elektriksel özellikleri açısından karşılaştırıldığında aralarındaki birinci farkın hassasiyet seviyeleri olduğu söylenebilir. ACS712 100mV/A değerinde hassasiyete sahipken ACS711 55mV/A değerinde hassasiyete sahiptir. İkinci fark ise besleme gerilimleridir. ACS712 5V besleme gerilime karşı belirtilen hassasiyet değerini sağlarken, ACS711 3.3V besleme geriliminde belirtilen hassasiyette ölçüm yapabilmektedir. Üretici tarafından mutlak

hassasiyetlerin belirlenmesinde yukarıda bahsedilen referans besleme gerilimleri kullanılmıştır. Referans besleme gerilimleri ACS712 için 4,5V-5,5V aralığında iken ACS711 için 3V-5,5V aralığındadır. Mutlak hassasiyet için üretici ACS712 için 5V ve ACS711 için 3,3V referans besleme gerilimlerinde sağlandığını belirtmiştir. Bu değerlerin dışında izin verilen diğer referans gerilimlerinin kullanılması durumunda hassasiyetin değişeceği ve ölçümün hatalı olacağı söylenebilir. Bu olumsuzluğu gidermek için üretici tarafından sensör içerisine oransal develer eklenmiştir. Bu referans gerilim dışındaki besleme gerilimlerinde sensörün hassasiyetinin değişeceği anlamına gelmektedir. Farklı bir besleme gerilim kullanılması durumunda kullanıcı, sensör hassasiyetini deneysel olarak belirlemek durumundadır.

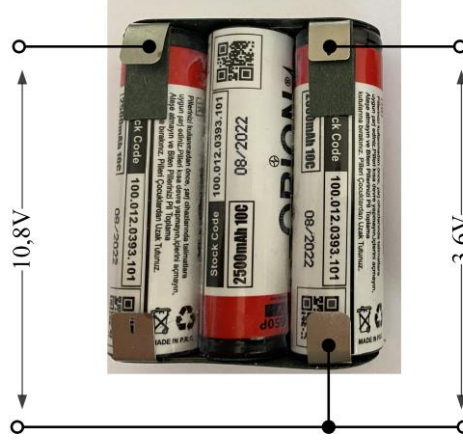
2.8. Kullanılan Batarya Özellikleri

Tez çalışmamızda yüksek enerji yoğunluğu, düşük iç direnç, yüksek çevrim ömrü gibi öne çıkan özelliklere sahip lityum iyon hücrelerden meydana gelmiş batarya grubu kullanılmıştır. Batarya grubunun bir hücresi nominal 3,6V hücre gerilimine ve 2500mAh deşarj kapasitesine sahiptir. ORION marka ve INR18650P model hücre Şekil 2.34’de gösterilmiştir.



Şekil 2.34. ORION INR18650P pil hücresi

Şekil 2.34’de gösterilen lityum iyon pil hücresinin en önemli özelliklerinden biri yüksek deşarj akımına dayanabilmesidir. Bu model 10C (25A) gibi yüksek bir değerde darbeli deşarj akımı ve 8C (20A) seviyesinde sürekli akım koşullarında çalışabilmektedir. Tez çalışmamızda kullanılan çeviricilerin minimum giriş gerilimi 10V ve maksimum giriş gerilimi 15V olduğundan adı geçen pil hücresinden minimum 3 adet ve maksimum 4 adet hücrenin seri bağlanması yoluyla çevirici giriş gerilimleri kolaylıkla sağlanabilir.



Şekil 2.35. Kullanılan batarya grubu

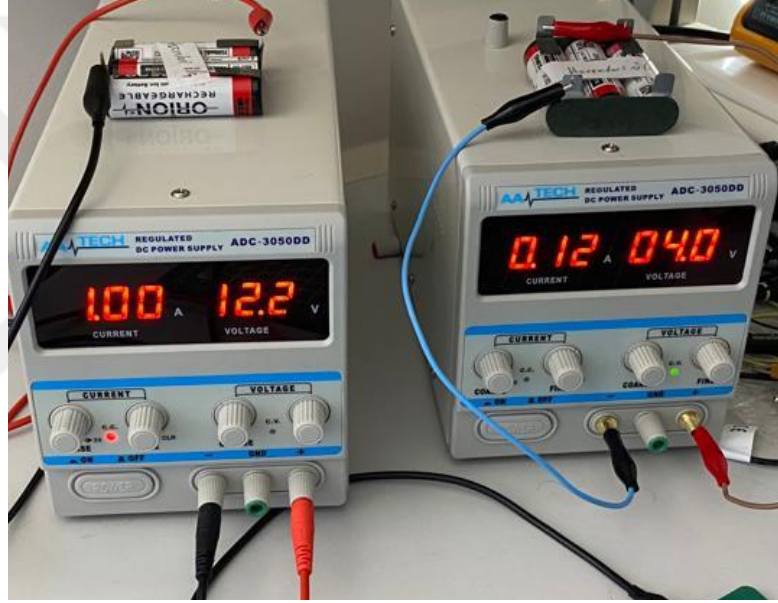
Çalışmamızda kullanılan batarya grubunda bulunan tek bir hücrenin bazı elektriksel ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir (URL-11).

Tablo 2.2. Çalışmada kullanılan batarya özellikleri

Parametre	Değer	Birim
Hücre uzunluğu	18,5x65	mm
Hücre ağırlığı	45 $\pm$ 2	g
Hücre kapasitesi	2500	mAh
Hücre gerilimi	3,6	V
İç direnç	<18	m Ω
Enerji yoğunluğu	9	Wh
Önerilen şarj değerleri	4,2 500	V mA
Maksimum şarj değerleri	4,2 2500	V mA
Maksimum darbeli deşarj akımı	25 (10C)	A
Deşarj kesme gerilimi	2,75	V
Çevrim ömrü	500	-

Şekil 2.35’de çalışmamızda kullanılan batarya grubu gösterilmiştir. 3 adet hücrenin birbirine seri bağlanmasıyla elde edilen bu grup 10,8V terminal gerilimine 2500mAh deşarj kapasitesine sahiptir. Terminal gerilimi DA/DA çeviricilerin minimum giriş gerilimine çok yakın olduğundan ikinci batarya grubundan tek bir hücrenin dahil edilmesiyle terminal

gerilimi nominal 14,4V değerine çıkarılabilmektedir. Tez çalışmasında birden fazla deney gerçekleştirildiği için bataryalar birçok kez şarj edilmiştir. Birincil batarya gurubunun tüm hücreleri ve ikincil batarya gurubunda ise sadece tek bir hücre kullanıldığı için deney sonunda ikincil bataryada birinci hücre gerilimi azalırken ikinci ve üçüncü hücre gerilimleri özdeşarj ihmal edildiğinde son şarj geriliminde kalmaktadır. İkinci deneysel aşamada birincil batarya tamamen şarj edilirken ikincil bataryanın ikinci hücresi kullanılmıştır. Böylelikle her deney sonunda sadece birincil batarya gurubu şarj edilirken üçüncü deney sonunda her iki batarya gurubu da şarj işlemine tabi tutulmuştur. Batarya gurubunun ve tek bir hücrenin şarj edilmesi Şekil 2.36’da gösterilmiştir.



Şekil 2.36. Batarya gurubu ve hücrelerin şarj edilmesi

Kullanılan lityum iyon hücresi hem sürekli akım (*Continuous Current – CC*) hem de sürekli gerilim (*Continuous Voltage – CV*) koşullarında şarj edilebilmektedir. Her iki koşulda da şarj edilmesi durumunda şarj geriliminin 4,2V olması gerekmektedir. Üretici tarafından önerilen nominal şarj akım sınırı 500mA ve maksimum şarj akımı 2500mA değerindedir. Hücre kesme gerilimi 2,75V değerinde olup genellikle hücreyi derindeşarjdan korumak için bu değer %5-%10 civarında yüksek tutulmaktadır. Model numarası ile kodlanan hücre yapısı 18,5mm çapında ve 65mm uzunluğa sahip silindirik yapıdadır. Model numarasındaki 18 hücre çapını, 65 hücre uzunluğunu ve 0 hücre yapısının silindirik olduğunu temsil etmektedir.

2.9. Kullanılan Süperkapasitör Özellikleri

Süperkapasitörlerin ön plana çıktığı en belirgin özellikleri yüksek güç yoğunluğuna sahip olmalarıdır. Buna ek olarak yüksek çevrim ömrüne sahiptirler. Bu özelliklerin göz önünde bulundurulmasıyla ikincil enerji kaynağı olarak kullanıma oldukça uygun bir aday olarak gösterilebilirler. Tez çalışmamızda kullandığımız KAMCAP marka ve HP-2R7-J108UNJ47 model süperkapasitör Şekil 2.37’de gösterilmiştir.



Şekil 2.37. KAMCAP HP-2R7-J108UNJ47 model süperkapasitör

Şekil 2.37’deki 2.7V anma gerilimine ve 1000F kapasiteye sahip sargı tipi süperkapasitör akıllı sayaç sistemlerinde, motor sürücü uygulamalarında, kesintisiz güç kaynaklarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Süperkapasitörlerin bilinen en belirgin dezavantajları düşük enerji yoğunluğuna, yüksek özdeşarja ve düşük anma gerilimine sahip olmalarıdır. Özellikle EA’da kullanımında batarya yarı aktif topoloji tercih edilmişse süperkapasitör anma gerilimi DA bara gerilimine kadar yükseltilmesi gerekir. Bu durum ise enerji kaynağının hacimsel boyutunun artırılmasını zaruri kılar. Tam aktif topolojilerde her ne kadar süperkapasitör hücre gerilimi DA bara gerilimine yükseltilebilse de çevirici kayıplarından ötürü hali hazırda yüksek özdeşarja sahip süperkapasitörün enerjisi hızlı bir şekilde tükenebilir. Bu sebeple oluşturulacak süperkapasitör gurubunun terminal geriliminin DA bara gerilimine yakın olmasının çevirici kayıplarının azaltılmasında daha verimli ve etkili bir tercih olacağı söylenebilir. Bu tez çalışmasında Şekil 2.37’de gösterilen hücrelerden 7 adet seri bağlamak koşulu ile süperkapasitör gurubu oluşturulmuştur. Böylece süperkapasitör terminal gerilimi

18.9V değerine yükseltilmiştir. Bu durumda kapasite yaklaşık 143F olacaktır. Yukarıda bahsedilen bağlantı biçimi Şekil 2.38’de gösterilmiştir.



Şekil 2.38. Süperkapasitör gurubunun oluşturulması

Çalışmamızda kullanılan süperkapasitör grubunda bulunan tek bir hücrenin, üretici tarafından sağlanan bazı elektriksel ve fiziksel özellikleri Tablo 2.3’de verilmiştir (URL-14).

Tablo 2.3. Çalışmada kullanılan süperkapasitör özellikleri

Parametre	Değer	Birim
Hücre uzunluğu	12x5	mm
Hücre kapasitesi	1000	F
Hücre gerilimi	2,7	V
İç direnç	10	mΩ
Aşırı gerilim	2,85	V
Çevrim ömrü	1	Milyon

Süperkapasitör hücreleri ile tek bir grup meydana getirildiğinden her deney sonunda süperkapasitör tekrar şarj edilmiştir. Süperkapasitör regüleli DA kaynak veya programlanabilir DA güç kaynağı kullanılmak suretiyle doğrudan terminal gerilimine şarj edilmiştir. Süperkapasitörler yüksek güç yoğunluğuna sahip oldukları için yüksek oranda deşarj olmuş bir süperkapasitör terminal gerilimine şarj edilirken akım çok yüksek seviyelere

çıkabilmektedir. Süperkapasitörler yüksek akım değerlerine dayanabilse de laboratuvar ortamlarında şarj edilirken akımın kontrollü bir şekilde artırılması deney güvenliği açısından önem arz etmektedir. Bu sebeple deneyde kullanılan süperkapasitör gurubu 30V-5A regüleli DA güç kaynağı ve 20V-5A programlanabilir DA güç kaynağı kullanılarak şarj edilmiştir. Şekil 2.39 süperkapasitör hücresinin şarj edilmesini göstermektedir.



Şekil 2.39. Süperkapasitör hücresinin şarj edilmesi

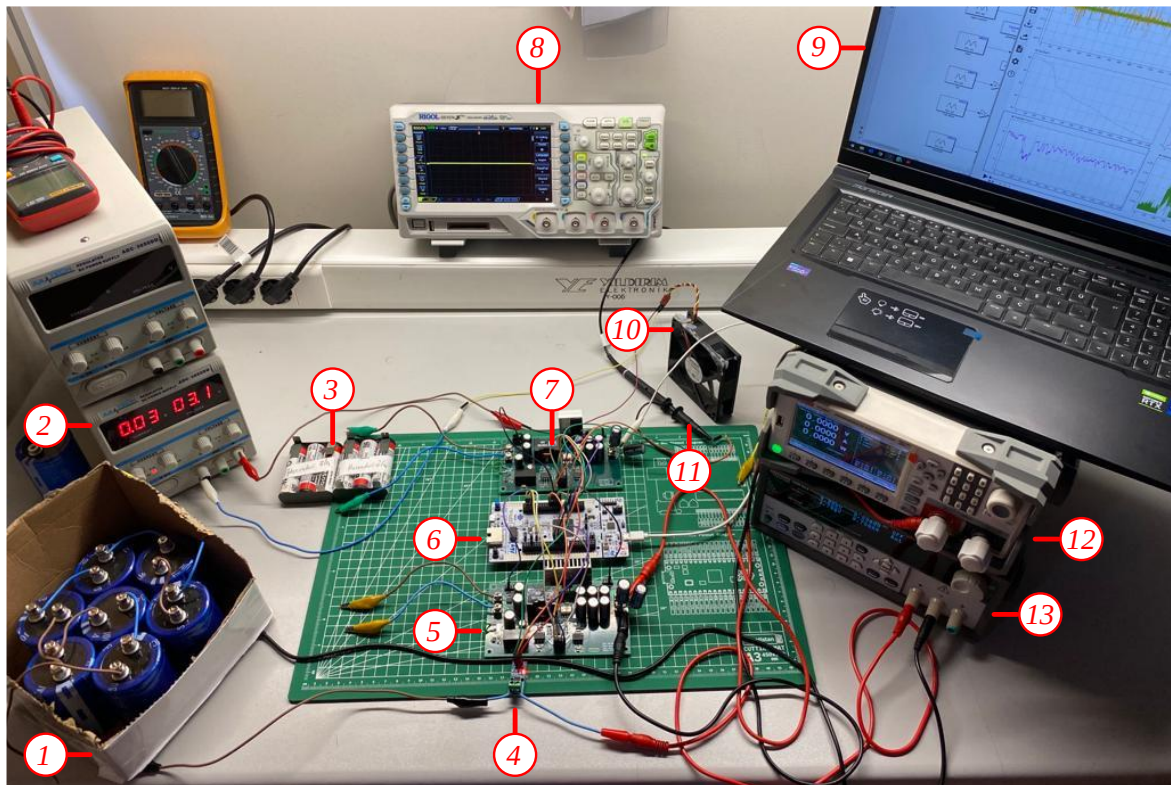
Süperkapasitörlerin enerji yoğunlukları düşük olduğu için bataryalara kıyasla belirli bir yüke çok daha kısa süre güç sağlayabilmektedirler. Dolayısıyla enerji kaynağı olarak süperkapasitörlerin tercih edilmesi durumunda hücre gerilimi ve kapasite değeri arasında bir denge seçimi yapılması gerekmektedir. Bilindiği gibi süperkapasitörlerin de normal kapasitörleri gibi seri bağlanarak terminal gerilimi artırılabilir. Ancak bu durumda toplam grup kapasitesi hücre sayısına bağlı olarak azalacaktır. Bu durumda süperkapasitör gurubu yük değişimlerine ve derin deşarja karşı çok daha duyarlı hale gelecektir. Tez çalışmamızda kullandığımız sürüş çevrimi agresif sürüş koşulları içerdiğinden yük akımı çok hızlı ve çok sık bir şekilde değişmektedir. Buna ek olarak AGF yardımıyla ayrılan yük akımının karşılanmasında batarya daha yavaş dinamiklerle akım sağlarken süperkapasitör çok daha hızlı dinamiklerle akım sağlamaktadır. Bu sebeple tüm sürüş çevrimi boyunca süperkapasitör terminal gerilimi çevirici minimum giriş geriliminin altına düşmemesi için 7 adet hücre seri bağlanarak terminal gerilimi 18,9V değerine yükseltilmiştir. Bu değer süperkapasitörlerin tam şarj edilmesi durumunda DA bara geriliminden (18V) daha yüksektir. Bu durumda süperkapasitör gurubu için DA/DA çeviriciye ihtiyaç duymadan batarya yarı aktif topoloji tekniği kullanılarak doğrudan DA baraya bağlanabilmektedir. Ek olarak 6 adet süperkapasitör hücresinin seri bağlanması 16,2V terminal gerilimi ve yaklaşık 167F kapasite elde edilebilmektedir. Ancak bu durumda süperkapasitörün terminal gerilimi

sürüş çevrimi boyunca çevirici minimum giriş geriliminin altına düşmemesi için bütün deneysel aşamalardan önce süperkapasitör gurubunun tam şarj (%100) edilmesi gerekmektedir. Tez çalışmamızda hem AGF sayesinde yavaş dinamikler sağlayan batarya akımının daha yavaş değişmesi hem de GKF akımının tamamının süperkapasitörlere yönlendirilmesi ile bu GKF akımlarının tamamının depolanamaması söz konusudur. Dolayısıyla süperkapasitör gurubunun her an gerekli enerjiyi sağlayabileceği ve her an GKF akımını depolayabileceği bir dolulukta çalıştırılması gerektiği söylenebilir. Bu sebeple 7 adet hücre %86 oranında şarj edilerek yaklaşık olarak 16,2V terminal gerilimi ile deneysel işlemler gerçekleştirilmiştir.

2.10. Deneysel Düzenek

Deneysel çalışmalar için hazırlanan düzenek Şekil 2.40'da gösterilmiştir. Burada (1) ile numaralandırılmış bölge süperkapasitör gurubunu, (2) 30V-5A regüleli DA güç kaynağını göstermektedir. Bu güç kaynağı (10) ile gösterilen batarya çeviricisine ait soğutucu fanı enerjilendirmek için kullanılmıştır. Tez çalışmamızda yük gücünün büyük bölümünü batarya gurubu üstelendiği için gerçekleştirilen deneysel testlerde batarya çeviricisinde anahtarlama elemanının daha fazla ısındığı gözlenmiştir. Dolayısıyla sadece batarya çeviricisi için soğutucu kullanılmıştır. Şekil 2.40'da (3) batarya gurubunu, (4) ACS712 akım sensörünü göstermektedir. ACS712 akım sensörü GKF etkisini modellemek için kullanılan programlanabilir DA güç kaynağının akımını ölçmek için kullanılmıştır. Bu akım aynı zamanda yazılım arayüzünden programlanabilir DA güç kaynağı için gerekli kodlar yazılarak da ölçülebilmektedir. Ancak bu işlem cihaza komut göndermek ve bu komutu okutmak şeklide iki ayrı kod satırı içermelidir. Bu durum cihaz ile bilgisayar haberleşme hızına ek bir yük getireceğinden ve GKF akımında gecikmelere sebep olabileceğinden harici bir sensör kullanılmıştır. Süperkapasitör ve batarya terminal gerilimlerini DA bara gerilimine yükseltmek için tasarlanan yükselten tip DA/DA çeviricisi sırasıyla (5) ve (7) numaralar ile gösterilmiştir. Enerji depolama elemanlarının giriş, çıkış akımlarını ve gerilimlerini okumak, yük akım değişimlerine karşı gerekli DGM işaretlerini üretmek için kullanılan STM32 F746ZG kartı (6) numara ile gösterilmiştir. Kart üzerinde çevirici başına dört yani toplamda sekiz, GKF akımını ölçmek için bir, yük akımını ölçmek için bir olmak üzere toplamda on adet analog giriş kullanılmıştır. İki adet çeviriciler için bir adet ACS712 akım sensörü için ve bir adet programlanabilir elektronik yük üzerinden yük

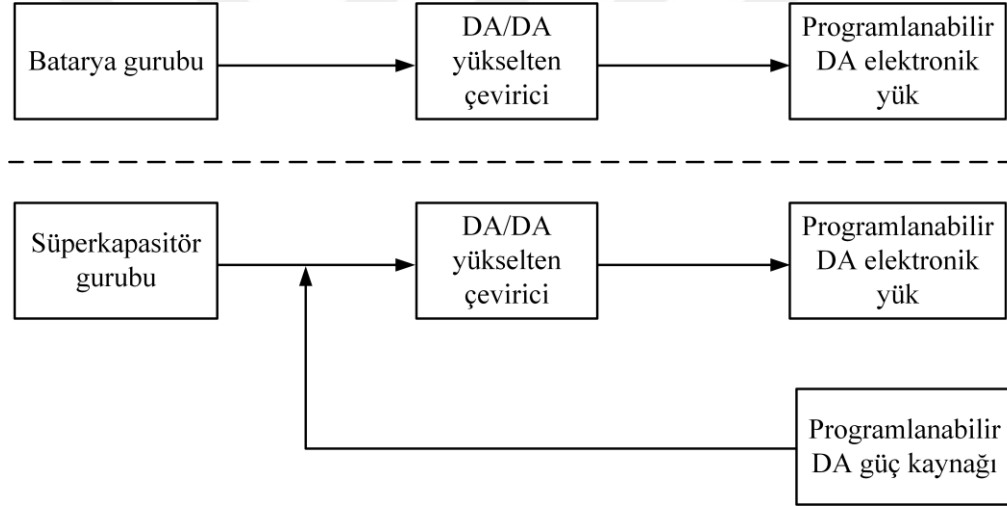
akımını ölçmek için toplamda dört adet GND terminali kullanılmıştır. Son olarak çevirici çıkış gerilimlerini istenilen DA bara gerilimine yükseltmek için iki adet DGM terminali kullanılmıştır. ACS712 akım sensörünün enerjilendirilmesinde ise kart üzerinde bulunan 5V değerinde çıkış kullanılmıştır. Kart ile bilgisayar haberleşmesi Simulink üzerinden (9) gerçekleştirildiği için DA elektronik yük (12) ile DA güç kaynağının (13) programlanması için ayrı bir bilgisayar kullanılmıştır. Bu iki cihazın tüm sürüş çevirimi boyunca programlanması MATLAB editör ortamında sağlanmıştır.



Şekil 2.40. Deneysel düzenek

Şekil 2.40'da (8) kart üzerinden üretilen DGM işaretinin görev oranını, genliğini ve frekansını izlemek ve Simulink üzerindeki aynı parametreler ile karşılaştırmak için kullanılmıştır. Programlanabilir DA elektronik yükün arka panelinde bulunan BNC soket yardımıyla elektronik yükün akımını izlemek için kullanılan prop (11) numara ile gösterilmiştir. Deneysel düzenekte kullanılan çeviriciler çift yönlü olmadıkları için yük akımları enerji kaynaklarını ortak bir DA baraya birleştirmeden ayrı ayrı çekilmiştir. Bu işlemin gerçekleştirilmesinde öncelikle benzetim ortamında sürüş çevrimine göre ölçeklenmiş yük akımı elde edilmiş ve bu yük akımı AGF yardımıyla üç ayrı benzetim

içerecek şekilde alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılmıştır. Yük akımlarının birincisi sabit kesim frekansında, ikincisi adaptif kesim frekansında ve üçüncüsü ise önerilen çift uyarlanabilir güç tahsisi yöntemleri ile ayrıştırılmıştır. Birinci seçenekteki sabit kesim frekansı ikinci ve üçüncü seçenekteki yöntemlerden elde edilen kesim frekanslarının ortalaması alınarak belirlenmiştir. Bu sayede sabit kesim frekansı için optimum bir seçenek belirlenmeye çalışılmıştır. Her üç yöntem için batarya gurubundan sadece pozitif yönde akım çekilirken, hem AGF çıkışında meydana gelen yavaş akım dinamiklerinden hem de GKF etkisiyle ortaya çıkan bütün enerji sadece süperkapasitörlere depolanmıştır. Dolayısıyla deneysel testlerde batarya için sadece elektronik yük kullanılırken, süperkapasitör için hem elektronik yük hem de programlanabilir güç kaynağı kullanılarak yukarıda bahsedilen iki etkiden meydana gelecek enerji süperkapasitörlere aktarılmıştır.



Şekil 2.41. Deney düzeneğinin blok diyagramı

Süperkapasitör için iki cihazında kullanılmasının sebebi programlanabilir DA elektronik yükün GKF enerjisi sağlama özelliğinin olmamasıdır. Bu sebeple yük akımının pozitif kısımlarını modellemek için programlanabilir DA elektronik yük, negatif kısımlarını modellemek için ise programlanabilir DA güç kaynağı kullanılmıştır. Şekil 2.41 deney düzeneğine ait blok diyagramı temsil etmektedir. Deneysel aşamada her iki cihaz da aynı bilgisayar aracılığıyla programlandığı için deneysel sonuçların elde edilmesinde geçen süre sürüş çevrimi süresinden daha uzun gerçekleşmiştir. Cihazların her ikisi de 1sn'nin altındaki komutlara cevap vermemekte veya 1sn'nin altında bir komut gönderilse bile çıkışı 1sn sonra güncellemektedir. Şekil 2.41'deki batarya gurubuna ait deneysel blok diyagramında sadece programlanabilir elektronik yükün kullanılması ve sürüş çevriminin saniye başına veri

girilerek gerçekleştirilmesi sebebiyle sürüş çevrimi süresi ile deneysel test süresi örtüşmektedir. Buna ek olarak programlanabilir elektronik yük bilgisayardan gönderilen kısa komutlara anlık cevap verirken komut süresi arttıkça cihazın cevap hızında düşüşler olduğu da gözlenmiştir. Şekil 2.41'deki süperkapasitör gurubuna ait deneysel blok diyagramında sistem öncelikle elektronik yükün çekmesi gereken akım değerini okuyup elektronik yüke yazdırır, daha sonra DA güç kaynağının sağlaması gereken GKF enerjisinin okuyup DA güç kaynağına yazdırır. Daha önce bahsedilen komut süreleri dikkate alındığında sürüş çevriminde geçen 1sn'lik süre süperkapasitör deneylerinde 2sn olarak gerçekleşmektedir. Bu durum ise 1370sn'lik sürüş çevriminin cihazlardaki gecikmeyle beraber 2800sn civarlarına çıkmasına sebep olacaktır. Cihazlara saniye başına verilerin hem yazdırılıp hem de okutulması bu gecikmenin artmasına sebep olan ikinci bir etkidir.

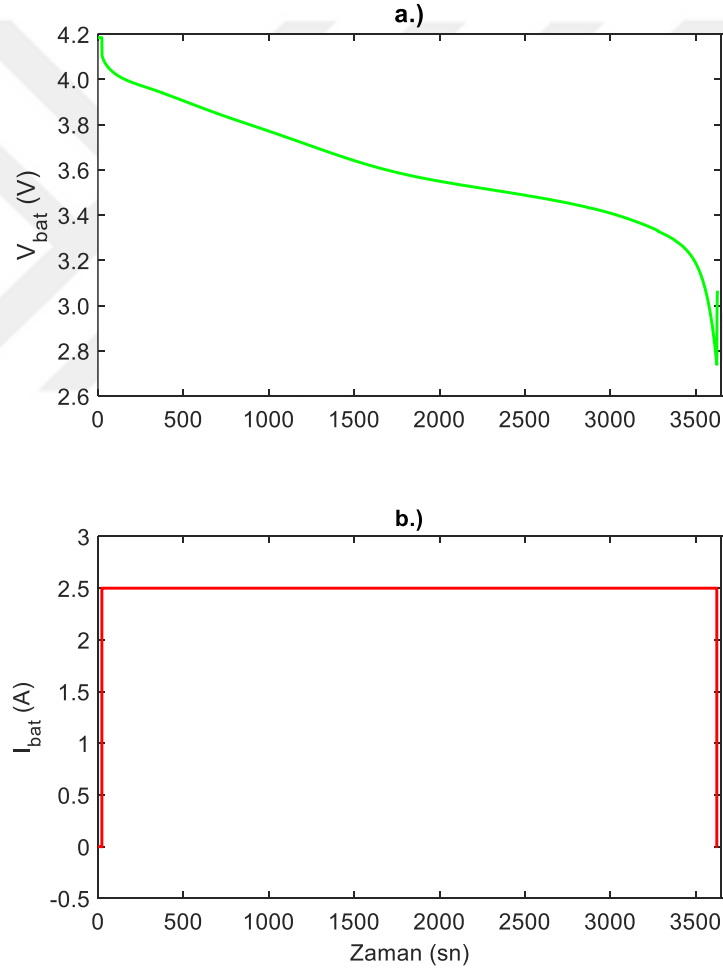
2.11. Enerji Depolama Elemanlarına Ait Deneysel Bulgular

Lityum iyon bataryalar temelde yakın deşarj eğrilerine sahip olsalar da model, üretim şekli, üretici firma farklılıkları gibi üretim aşamasındaki değişimlerin ve deşarj kapasitesi, deşarj akım seviyeleri gibi elektriksel parametrelerin değişken olmasından dolayı farklı iki hücrenin aynı yükte farklı deşarj eğrilerine sahip olabileceği söylenebilir. Benzer ifadeler süperkapasitörler için de söylenebilir. Simulink içerisinde bulunan genel amaçlı batarya ve süperkapasitör modeli çoğu zaman deneysel sonuçları tam olarak temsil edemez. Bu bloklar genellikle kapasiteleri önceden belirlenmiş batarya ve süperkapasitör deşarj eğrileri hakkında bilgi edinmek, farklı deşarj akımlarına karşı enerji depolama elemanlarının genel cevaplarını karşılaştırmak için kullanılmaktadır. Dolayısıyla gerçek zamanlı deneysel sonuçların benzetim sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için her iki enerji depolama elemanın elektriksel eşdeğer devre modelleri elde edilmelidir. Detayları Bölüm 1.7'de ve Bölüm 1.8'de açıklanan bu modeller genellikle ikinci dereceden devreler ile temsil edilirler.

2.11.1. Batarya Hücresinin Modellenmesi

Batarya hücresinin modellenmesinde açık devre gerilimine göre doluluk oranının ve batarya sürekli ve darbeleri deşarj eğrisinin bilinmesi yeterlidir. Bataryanın belirli aralıklarda şarj edilmesiyle ve her bir aralıkta belirli bir dinlenme süresinden sonra ölçülen açık devre

gerilimine karşılık doluluk oranı belirlenebilmektedir. Ancak bu işlem günler alabilmektedir. Ek olarak bu değerler tamamen deşarj olmuş bir bataryanın %100 şarj olana kadar sağlanacak akım değerine karşılık hücre gerilimi ve doluluk oranının ölçülmesiyle de elde edilebilmektedir. Batarya deşarj eğrisi ise tamamen şarj edilmiş bataryanın genellikle 1C değerinde bir deşarj akımıyla tamamen deşarj edilmesiyle elde edilebilmektedir. Yukarıda bahsedilen iki deneysel test verilerinin elde edilmesiyle batarya elektriksel devre parametreleri MATLAB parametre kestirim aracı kullanılarak belirlenebilmektedir. Tez çalışmamızda kullandığımız ORION marka 18650P/25 model pil hücresinde ait 1C değerinde (2,5A) deneysel deşarj eğrisi Şekil 2.42’de gösterilmiştir.

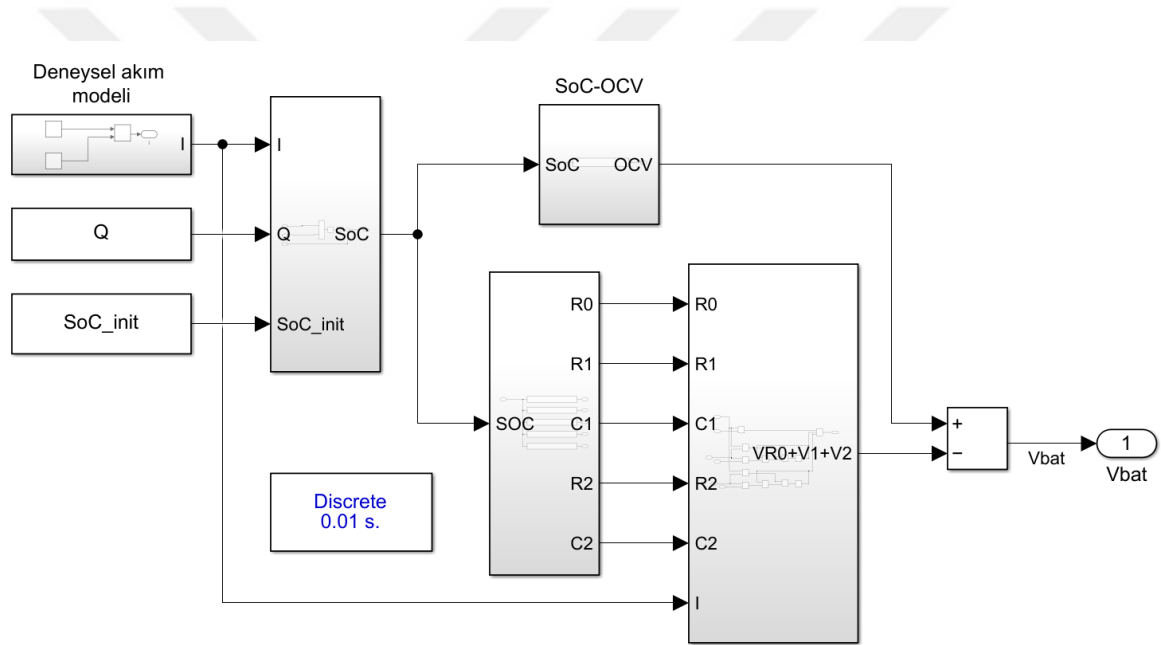


Şekil 2.42. Batarya deşarj işlemi a.) Deşarj eğrisi, b.) Deşarj akımı

Şekil 2.42a'daki deneysel deşarj eğrisi elde edilmesi işleminde öncelikle pil hücresi %100 (yaklaşık 4.2V) doluluk oranına şarj edilmiştir. Daha sonra belirli bir dinlenme süresi bırakılmıştır. Bu işlemden sonra batarya iç direnci sebebiyle bataryanın ilk yüklenme anında

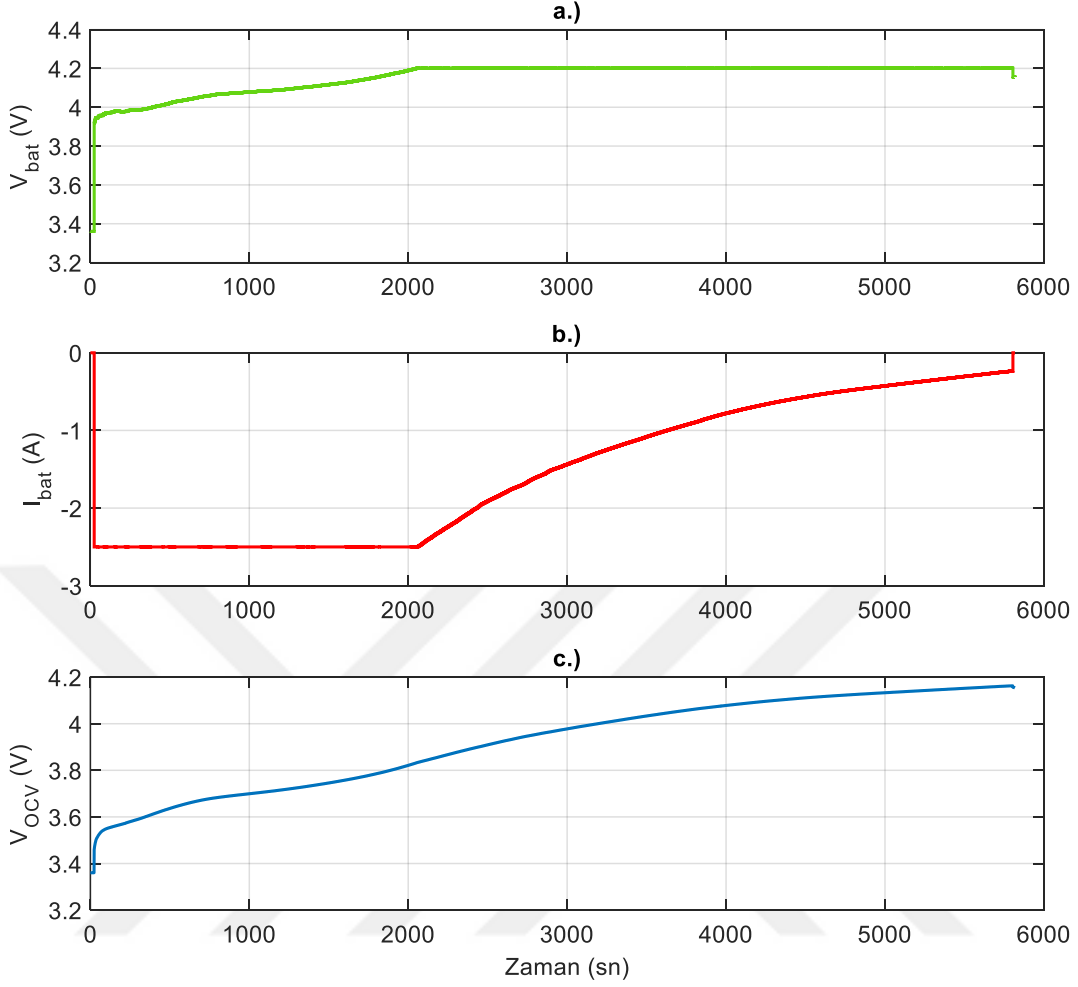
meydana gelen gerilim düşümünün daha net görülmesi için 24sn beklendikten sonra elektronik yük yardımıyla 2,5A yük altında batarya deşarj işlemi başlatılmıştır. Bataryanın iç direnci (R_0) akımın ilk uygulandığı anda meydana gelen doğrusal eğri yardımıyla hesaplanabilir. Şekil 2.42b’de batarya deşarj akım grafiği gösterilmiştir. Çalışmamızda kullanılan pil hücresinin kesme gerilimi 2,75V olduğundan programlanabilir elektronik yük kesme gerilimi 2,75V seviyesine ayarlanmıştır. Deşarj işlemi 3624sn sürmüş ve bu süre sonunda elektronik yük pil hücresinin kesme gerilimde akım çekme işlemini durdurmuştur.

Deneysel eğrinin elde edilmesinden sonra pil hücresinin ikinci derece elektriksel eşdeğer devre modelinden türetilen dinamik denklemler yardımıyla Simulink ortamında oluşturulan benzetim modeli Şekil 2.43’de gösterilmiştir.



Şekil 2.43. Pil hücresinin benzetim modeli

Şekil 2.43’de Q Amper-saat cinsinden pil hücresinin kapasitesini, SoC_{init} pil hücresinin başlangıç şarj doluluk oranını temsil etmektedir ($0 < SoC_{init} < 1$). Şarj doluluk oranı ile açık devre gerilimi arasındaki ilişki ($SoC - OCV$) batarya şarj geriliminden elde edilebilir. Bu ilişkinin elde edilmesi için öncelikle pil hücresi tamamen deşarj edilmiştir. Daha sonra tıpkı deşarj işleminde olduğu gibi 1C (2,5A) değerinde akımla şarj işlemi başlatılmıştır. Şarj işleminin gerçekleştirilmesinde programlanabilir DA güç kaynağı kullanılmıştır. Şarj işlemi sonunda elde edilen deneysel eğrisi Şekil 2.44’de gösterilmiştir.



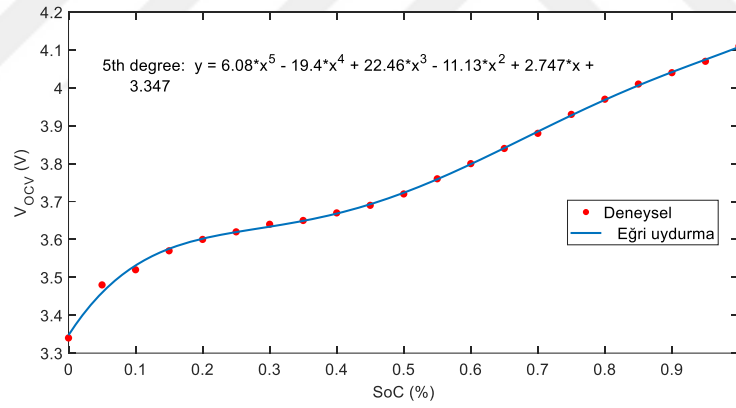
Şekil 2.44. Batarya deneysel şarj eğrileri

Şekil 2.44a batarya şarj gerilimini göstermektedir. Görüldüğü gibi şarj işleminin başlangıcından yaklaşık 2050sn süresine kadar sürekli akım yöntemi ile şarj edilmiş ve batarya hücre gerilimi şarj gerilimine ulaştığına şarj işlemi sürekli gerilim yöntemiyle devam etmiştir. Şekil 2.44b deneysel şarj akımını, Şekil 2.44c ise elektronik yük yardımıyla ölçülen batarya hücresinin açık devre gerilimini göstermektedir. Şekil 2.44c'deki eğri genellikle açık devre gerilimi ile doluluk oranının arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılmaktadır. Batarya hücreleri elektrokimyasal temellere dayandığından iç dirençleri, polarizasyon dirençleri ve polarizasyon kapasiteleri şarj doluluk oranına, çekilen akımın genliğine, sıcaklığa ve çevrim ömrüne göre değişiklik göstermektedir (Jossen, 2006). Bu sebeple batarya elektriksel eşdeğer devresinde bulunan her bir elektriksel parametrenin şarj doluluk oranına göre belirlenmesi model doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Elektriksel eşdeğer devre modelinde R_0 , R_1 , C_1 , R_2 , C_2 olarak verilen polarizasyon dirençleri ve polarizasyon

kapasitörleri ile şarj doluluk oranı arasında polinom ilişkisi olduğu varsayılmıştır (Diab vd., 2017). Bu ilişkiler aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 R_0(\text{SoC}) &= k_1 * e^{(k_2 * \text{SoC})} + k_3 \\
 R_1(\text{SoC}) &= k_4 * e^{(k_5 * \text{SoC})} + k_6 \\
 C_1(\text{SoC}) &= k_7 * e^{(k_8 * \text{SoC})} + k_9 \\
 R_2(\text{SoC}) &= k_{10} * e^{(k_{11} * \text{SoC})} + k_{12} \\
 C_2(\text{SoC}) &= k_{13} * e^{(k_{14} * \text{SoC})} + k_{15}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Şarj doluluk oranı ile açık devre gerilimi arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için batarya hücresinin tamamen deşarj edilmesi ve minimum şarj akımıyla şarj edilmesi gerekir. Tez çalışmamızda kullandığımız batarya hücresi tamamen deşarj edildikten sonra 0.2C (0.5A) akımla şarj edilmiş ve her 900sn süresinde veri alınmıştır. Şarj doluluk oranı ile açık devre gerilimi arasındaki ilişki Şekil 2.45’de gösterilmiştir.

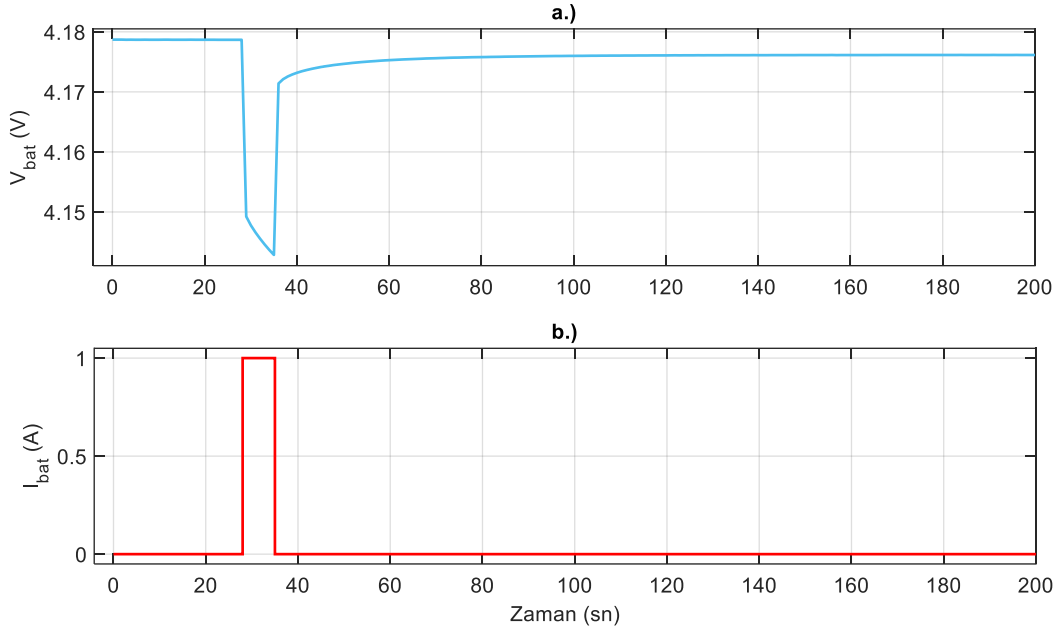


Şekil 2.45. Şarj doluluk oranı ve açık devre gerilimi ilişkisi

Şekil 2.45’de elde edilen deneysel verilere eğri uydurma yöntemiyle beşinci dereceden bir polinom uydurulmuştur. Genellikle çoğu batarya hücresi modelleme işlemlerinde bu eğri elde edilirken 6., 7. veya 8. dereceden polinom uydurma teknikleri kullanılmaktadır. Bu durum model doğruluğunu artırsa da parametre sayısı arttığı için parametre tahmin süresini oldukça uzatmaktadır. Bu sebeple eğri uydurma yönteminde 5. Dereceden polinom uydurma formu tercih edilmiştir. Şekil 2.45’de eğri uydurma sonucunda açık devre gerilimi ile şarj doluluk oranı arasındaki ilişkiyi ortaya koyan polinom aşağıda verilmiştir.

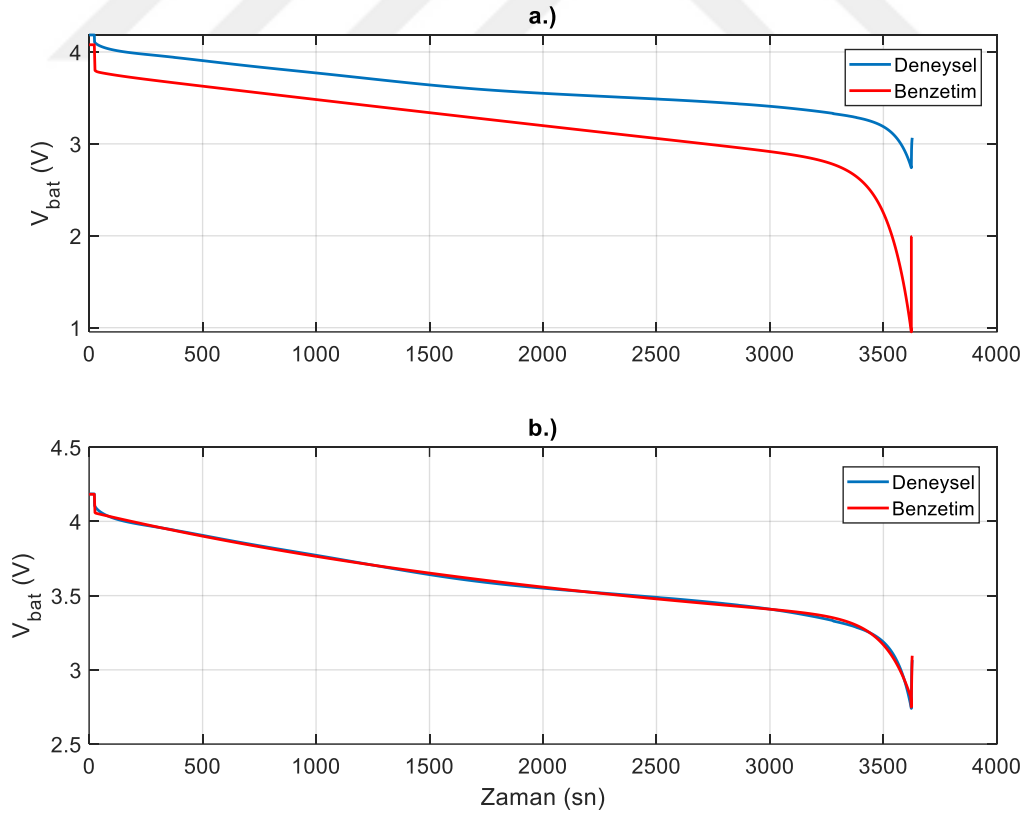
$$V_{OCV}(SoC)=6.08*(SoC^5)-19.4*(SoC^4)+22.46*(SoC^3)-11.13*(SoC^2)+2.747*(SoC)+3.347 \quad (2.11)$$

Parametre kestirim işleminde kullanılan $k_i, \{i \in 1, 2, \dots, 15\}$ sabitlerinin analitik olarak belirlenmesi oldukça zordur. Bu sebeple eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi için darbeli deşarj yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde öncelikle batarya hücresi tamamen şarj edilmiş daha sonra belirli bir dinlenme süresinden sonra batarya hücresine darbeli bir akım uygulanmıştır. Uygulanan bu akım 28sn bekleme süresinden sonra 7sn darbe uygulanmış ve bu sürenin sonunda akım kesilmiştir. Akımın kesilmesinden 165sn sonra deney sonlandırılmıştır. Bu işlem ile ilgili batarya hücre gerilimi ve uygulanan deneysel akım sırasıyla Şekil 2.46a'da ve Şekil 46b'de gösterilmiştir. Şekil 2.46a'daki batarya hücre gerilimi eğrisinde 35sn süresinde meydana gelen doğru yardımıyla R_0 batarya iç direncinin değeri hesaplanmıştır. 35sn ile 54sn aralığı geçici durum olarak kabul edilmiş ve R_1, C_1 geçici durum parametrelerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. 54sn ile 111sn aralığı kalıcı durum olarak kabul edilmiş ve R_2, C_2 kalıcı durum parametrelerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Elde edilen analitik parametreler MATLAB parametre kestirim aracına başlangıç parametreleri olarak tanıtılmıştır.



Şekil 2.46. Batarya deneysel eğrileri a.) Hücre gerilimi, b.) Darbe akımı

Parametre tahmin işlemi başlamadan önceki batarya hücresinin deneysel deşarj eğrisi verileri parametre kestirimi araç kutusunda bulunan *New Experiment* kısmından eklenmiştir. Ek olarak ikinci derece eşdeğer devrede k_i parametrelerinin belirlenmesinin oldukça uzun zaman alacağı söylenebilir. Bu sebeple parametre kestirim işlemi öncelikle birinci derece eşdeğer devre modeli için gerçekleştirilmiştir. Bu adımda elde edilen değerler sonraki adımda başlangıç değerleri olarak kullanılmıştır. Ek olarak parametre kestirim aracında bulunan *select parameters* seçeneği ile k_i parametreleri rastgele olarak değiştirilerek model cevabına en yakın dinamik çıkış elde edilebilir. Dinamik model çıkışının deneysel eğriye yakınlığı parametre tahmin aşamasının süresi ile doğru orantılıdır. Başlangıç parametreleri yardımıyla dinamik model çıkışından batarya deşarj eğrisine yakın bir eğri elde edildikten sonra denklem (2.10)'daki şarj doluluk oranına bağlı parametreler modele eklenmiştir. Her bir parametre kestirim aşamasından sonra tahmin edilen değerler bir sonraki parametre kestirim işleminde başlangıç değeri olarak kullanılmıştır. Şekil 2.43'deki batarya hücreesine ait dinamik model çıkışının deneysel çıkışa uyumu parametre tahmini öncesi ve sonrası için Şekil 2.47'de gösterilmiştir.



Şekil 2.47. Batarya parametre kestirimi a.) Kestirim öncesi, b.) Kestirim sonrası

Batarya hücresine ait parametre kestirim işleminden önce analitik olarak hesaplanan eşdeğere devre parametrelerinden elde edilen ilk tahmin değerleri ve kestirim işlemi sonrasında tahmin edilen devre parametreleri Tablo 2.4.'de verilmiştir.

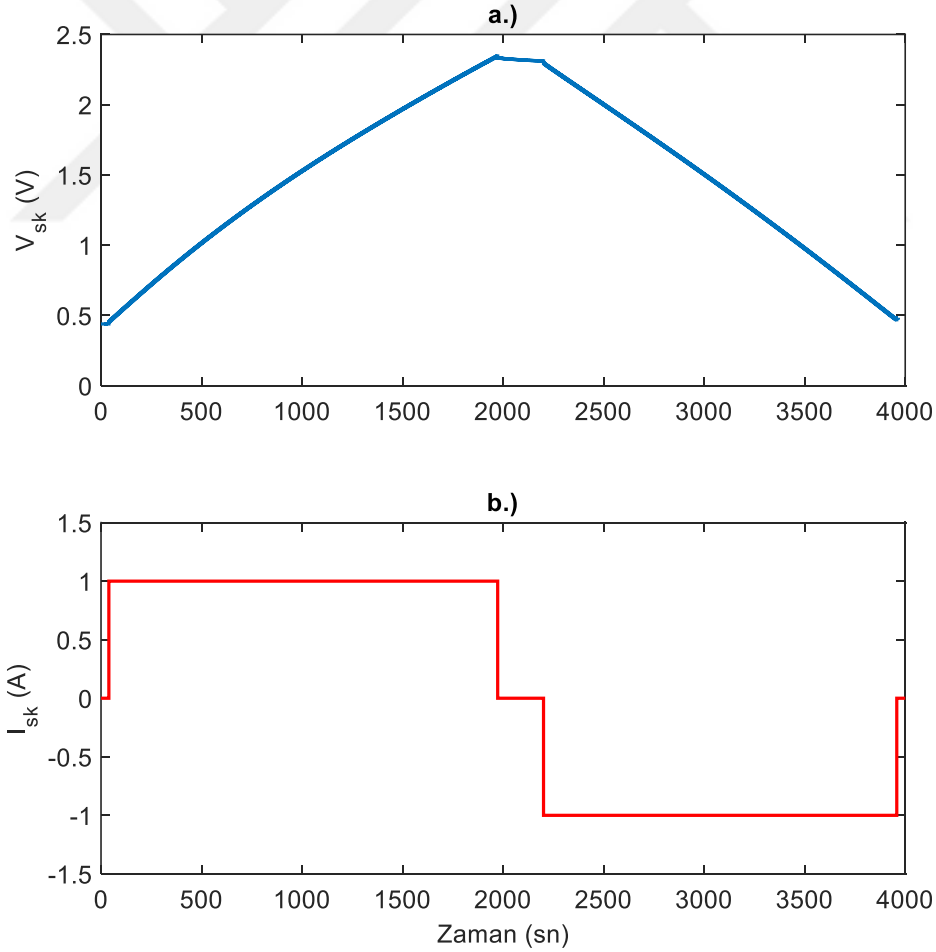
Tablo 2.4. Batarya hücresine ait parametre kestirim değerleri

Parametre	İlk tahmin değeri	Son tahmin değeri
k_1	0,2563	0,23279
k_2	-35,47	0,13067
k_3	0,108	-0,25483
k_4	0,12	-0,038036
k_5	-25,17	1,3532
k_6	0,007	0,18616
k_7	791,8	8,8626
k_8	-18,61	0,81802
k_9	760,35	1,2562
k_{10}	6,807	0,60715
k_{11}	-194,8	-0,28606
k_{12}	0,0085	-0,15527
k_{13}	6157	5968
k_{14}	-21,21	-23,24
k_{15}	10645	9341,2

2.11.2. Süperkapasitör Hücresinin Modellenmesi

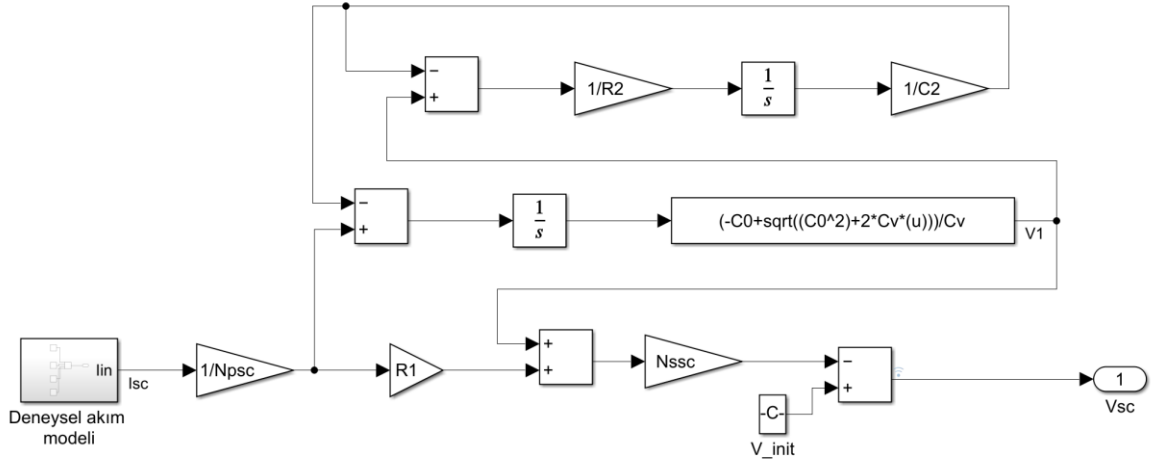
Süperkapasitör hücresinin modellenmesinde, süperkapasitör deneysel şarj, dinlenme süresi ve deneysel deşarj eğrisinin tek bir grafikte elde edilmesi genel kabul görmüş bir yöntemdir. Şekil 2.48'de tez çalışmamızda kullanılan süperkapasitör hücresine ait deneysel eğri gösterilmiştir. Süperkapasitör belirli bir şarj oranıyla hücre gerilimine şarj edilmiştir. Daha sonra belirli bir süre dinlenmeye bırakılmış ve bu süre sonunda şarj akımıyla aynı genlikte deşarj akımı uygulanmıştır. Öncelikle bu deneysel eğri üzerinde analitik çözüm yardımıyla elektriksel eşdeğer devre parametreleri hesaplanmıştır. Analitik değerler birçok uygulama için yakın cevaplar sağlasa da deneysel eğri ile çoğu zaman örtüşmez. Tıpkı

batarya modeline olduğu gibi MATLAB parametre kestirim aracı kullanılarak eşdeğer devre parametreleri en yakın değerlerine ayarlanır. Bu işlemi gerçekleştirmek için öncelikle Bölüm 1.8’de türetilen dinamik denklemler yardımıyla süperkapasitörün doğrusal benzetim modeli oluşturulmuştur. Daha sonra hesaplanan elektriksel eşdeğer devre parametreleri modele tanıtılarak benzetim cevabı elde edilmiştir. Süperkapasitörün benzetim modeli ile deneysel modelin karşılaştırılması için deneysel olarak süperkapasitör %16 şarj doluluk oranından başlamak üzere (yaklaşık 0.4469V) 1A değerinde akım ile şarj işlemine başlanmıştır. Şarj işlemine başlamadan önce şarj akımının daha net görünmesi için 39sn bekleme süresi bırakılmıştır. Daha sonra süperkapasitör hücre gerilimi maksimum değerine ulaştığında (1973sn) şarj işlemi durdurulmuş ve süperkapasitör 228sn dinlenmeye bırakılmıştır. Daha sonra 1A değerinde deşarj akımı ile süperkapasitör deşarj işlemi başlatılmıştır. Başlangıç doluluk oranına ulaşınca kadar deşarj işlemi 1757sn devam etmiştir.



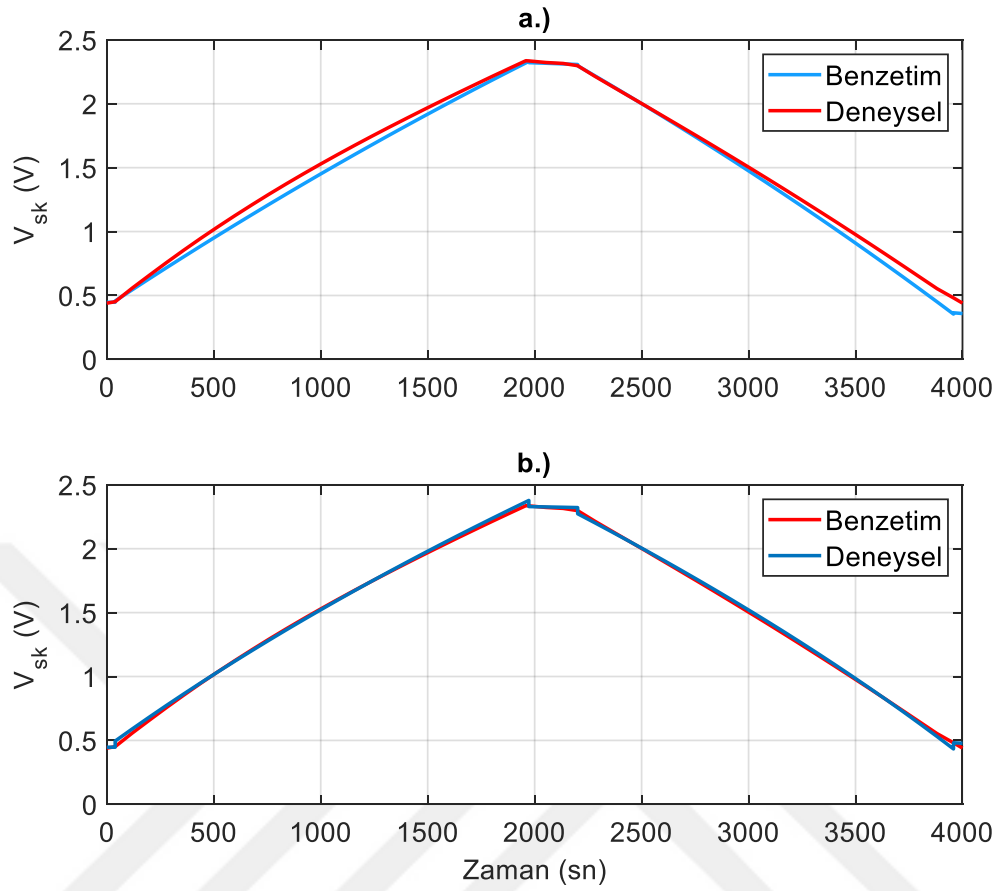
Şekil 2.48. Süperkapasitör deneysel eğrileri a.) Hücre gerilimi b.) Hücre akımı

Şekil 2.48a şarj, dinlenme ve deşarj işlemleri boyunca süperkapasitörün hücre geriliminin değişimini göstermektedir. Deneysel eğri elde edildikten sonra MATLAB parametre kestirim aracına deneysel veri olarak aktarılmıştır. Benzetim ortamında modellenen ve analitik olarak hesaplanan değerler yardımıyla oluşturulan süperkapasitör elektriksel eşdeğer modeli Şekil 2.49’de gösterilmiştir. Benzetim ortamında, deneysel akım modeli oluşturularak süperkapasitör modelinin girişine uygulanmıştır. N_{psc} ve N_{ssc} sabitleri süperkapasitörün sırasıyla paralel ve seri hücre sayısını temsil etmektedir. Deneysel eğri tek hücre üzerinden gerçekleştirildiği için bu değerler 1 olarak seçilmiştir.



Şekil 2.49. Süperkapasitör elektriksel eşdeğer devre modeli

Şekil 2.49’daki benzetim modeli benzetim ortamında koşturulduktan sonra süperkapasitör hücre gerilimi parametre kestirim aracına veri olarak aktarılmıştır. Hem deneysel hem de benzetim sonucunun parametre kestirim aracına aktarılması Şekil 2.50’de gösterilmiştir. Şekil 2.50a’da mavi renkli hücre gerilim eğrisi deneysel, kırmızı renkli hücre gerilim eğrisi ise analitik hesaplar sonucunda elde edilen süperkapasitör hücre geriliminin benzetim cevabını göstermektedir. Parametre kestirim işleminden önce de analitik olarak belirlenen değerler ile deneysel eğrinin birbirine oldukça yakın olduğu söylenebilir. Tahmin edilecek değerlerin her biri fiziksel parametre olduklarından kestirim değerleri minimum sıfır olacak şekilde kestirim işlemi başlatılmıştır. Parametre kestirim aracı her bir iterasyon sonunda belirlediği parametreleri Şekil 2.49’daki modele tanıtarak sonuç almakta ve bu sonucu deneysel eğri ile karşılaştırmaktadır. Benzetim ve deneysel eğrilerden de görüldüğü gibi parametre kestirimi oldukça verimli bir şekilde gerçekleştirilmiş ve kestirim işlemi sonucunda benzetim modeli eğrisinin deneysel eğriye uyumu Şekil 2.50b’de gösterilmiştir.



Şekil 2.50. Süperkapasitör parametre kestirimi a.) Kestirim öncesi, b.) Kestirim sonrası

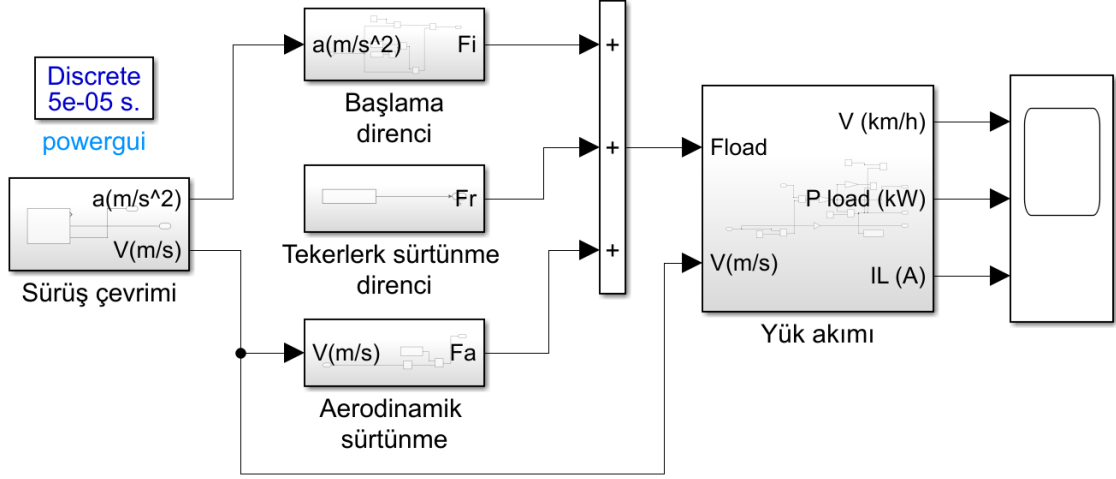
Süperkapasitör hücresine ait parametre kestirim işleminden önce analitik olarak hesaplanan eşdeğere devre parametreleri ve kestirim işlemi sonrasında tahmin edilen devre parametreleri Tablo 2.5.'de verilmiştir.

Tablo 2.5. Süperkapasitör hücresine ait parametre kestirim değerleri

Parametre	Analitik değer	Kestirim değeri	Birim
C_0	907	834,44	F
R_1	10	48,268	m Ω
C_v	109,45	191,18	F
R_2	28,654	35,372	Ω
C_2	1033,45	1491,7	F

2.12. Yük Akımlarının Elde Edilmesi

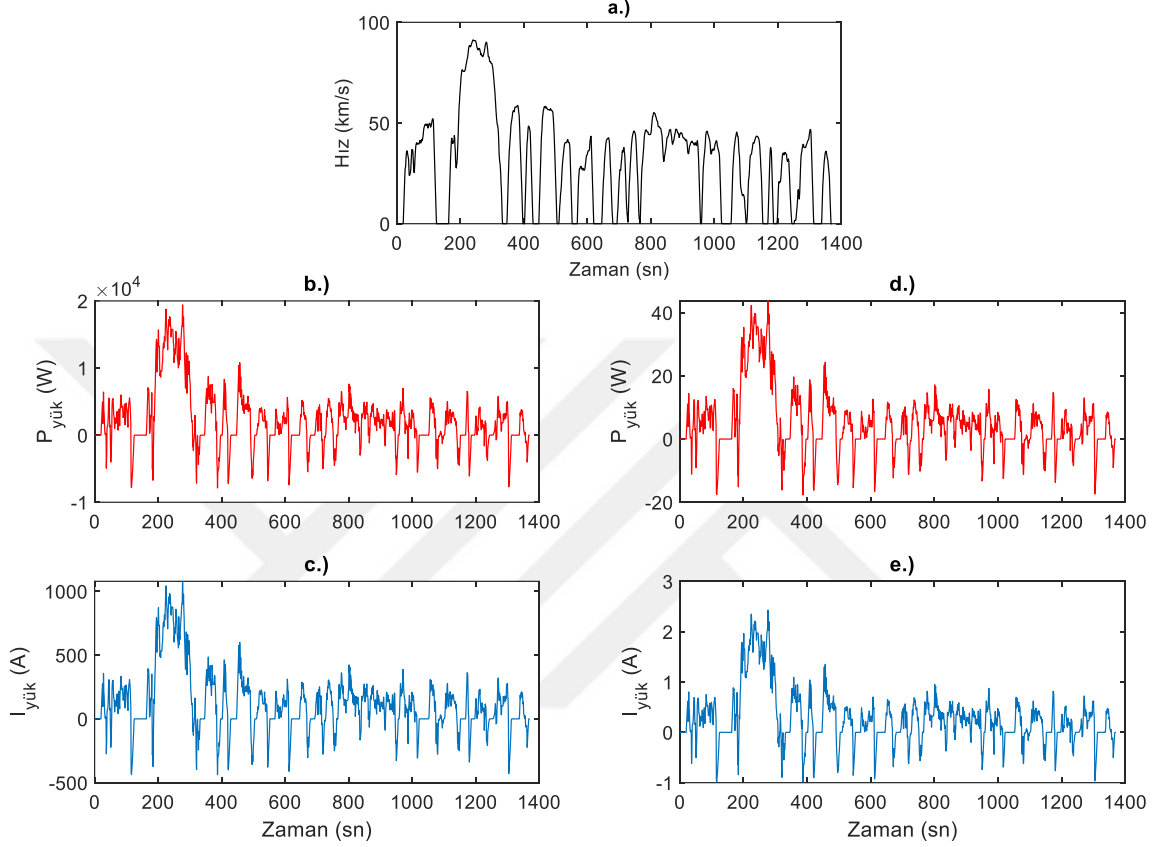
Enerji depolama elemanlarından ayrı ayrı temin edilecek yük akımları EA dinamik modelinden elde edilmiştir. Bölüm 1.14'deki EA'nın boylamsal modelinden türetilen dinamik denklemler yardımıyla oluşturulan benzetim modeli aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2.51. Yük akımının elde edilmesinde kullanılan dinamik model

Şekil 2.51'deki sürüş çevrimi bloğu Kentsel Dinamometre Sürüş Çevrimi (*Urban Dynamometer Driveing Schedule-UDDS*) koşullarını temsil etmektedir. Orta kısımda bulunan başlama direnci, tekerlek sürtünme direnci ve aerodinamik sürtünme blokları EA'nın boylamsal modelinden elde edilen dinamik denklemleri temsil etmektedir. Son kısımda bulunan yük akımı bloğunda ise EA'yı sürüş çevrimine göre hareket ettirmek için gereken güç hesabı gerçekleştirilmiştir. Gerekli güç elde edildikten sonra DA bara gerilim seviyesinin belirlenmesiyle yük akımı elde edilmiştir. Tez çalışmamızda kayıpları düşük seviyede tutmak için DA bara gerilimi, kullanılan batarya ve süperkapasitör terminal gerilimlerine yakın olacak şekilde 18V olarak seçilmiştir. Gerçek zamanlı EA'larda bu değer yük akımını küçük seviyelerde tutmak için 300V ile 400V aralığında çok daha yüksek seviyelerde tercih edilir. Ancak gerçekleştirilen çalışmanın laboratuvar ortamında olması ve çalışmada kullanılan cihazların güç sınırlarının olması sebebiyle yük akımı belirli bir oranda ölçeklemek suretiyle elde edilmiştir. Şekil 2.52'de 18V DA bara gerilimi için sürüş çevrimine ait hız, güçler ve yük akımları gösterilmiştir. Şekil 2.52a'da seçilen sürüş çevrimine ait hız-zaman grafiği gösterilmiştir. Bu çalışmada bu sürüş çevrimin tercih

edilmesinin sebebi şehir içi sürüşlere en yakın sürüş çevrimi olarak kabul edilmesidir. Şehir içi sürüşlerde yük akımı sık sık değişim göstereceğinden EYS'nin verimliliğini bu koşullarda ölçmenin daha verimli olacağı söylenebilir.



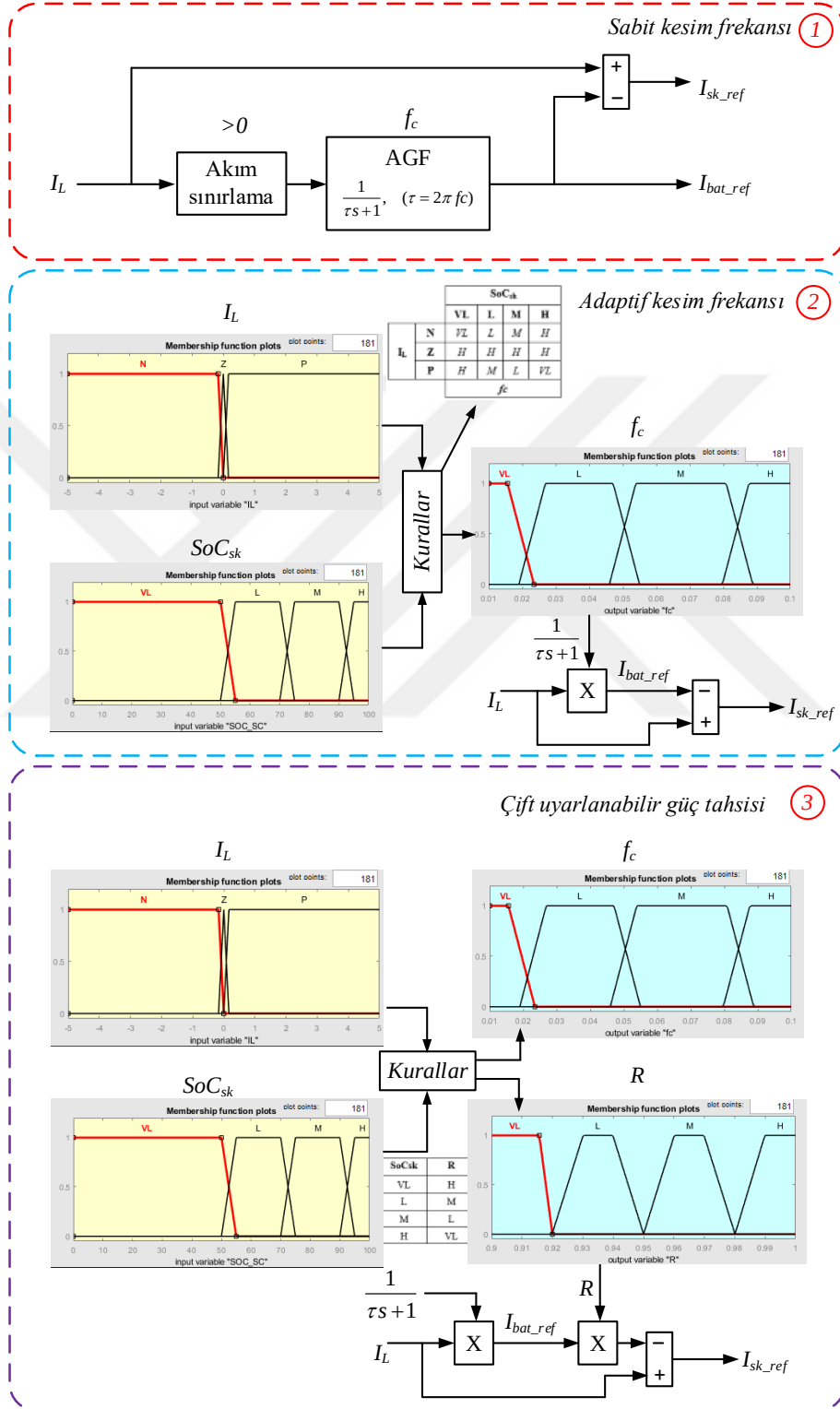
Şekil 2.52. UDDS sürüş çevrimine ait hız, güç ve akım grafikleri

Şekil 2.52b’de ve Şekil 2.52c’de sırasıyla 18V bara geriliminde EA’nın sürüş çevrimini tamamlaması için gereken yük gücü ve yük akımı gösterilmiştir. Görüldüğü gibi DA bara geriliminin düşük tutulması sebebiyle maksimum yük gücü yaklaşık olarak 19,5kW ve dolayısıyla maksimum yük akımı yaklaşık olarak 1078A seviyesine yükselmiştir. Bu büyüklüklerin, kullanılan cihazların güç seviyelerine düşürülmesi için yük akımı 1/444 oranında ölçeklenerek elde edilmiştir. Şekil 2.52d ve Şekil 2.52e sırasıyla belirtilen ölçeklendirme seviyesine göre sınırlandırılmış yük gücünü ve yük akımını temsil etmektedir. Ölçeklendirme sonrasında maksimum yük gücü yaklaşık olarak 43,7W ve maksimum yük akımı 2,428A seviyesindedir. Ölçeklendirilmiş yük akımları elde edildikten sonra yük akımının enerji depolama elemanları arasında paylaşılması için bu tez çalışmasında incelenen Sabit Kesim Frekansı (SKF) tekniği, Adaptif Kesim Frekansı (AKF) tekniği ve ilk

kez bu tez çalışmasında önerilen Çift Uyarlanabilir Güç Tahsisi (ÇUGT) tekniği kullanılmıştır.

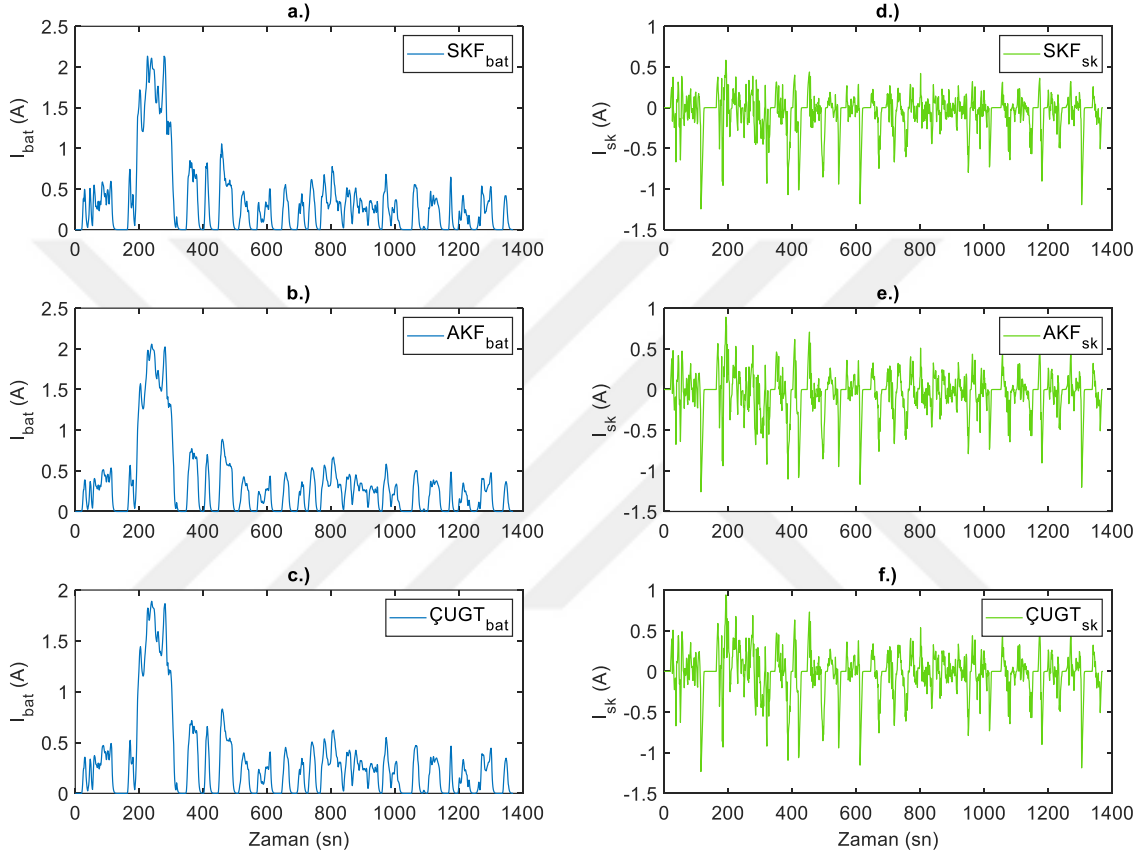
Çalışmada kullandığımız elektronik yük ve DA güç kaynağının sürüş çevrimine göre programlanması için yük akımının bir veri seti veya sürüş çevrimi zamanına bağlı bir satır veya sütun vektörü şekline elde edilmesi gerekir. Dolayısıyla bahsedilen teknikler kullanılarak yük akımı benzetim ortamında alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılmıştır. Şekil 2.53’de yük akımlarının ayrıştırılma işlemi gösterilmiştir. Şekil 2.53’de 1 numaralı pencerede SKF tekniği ile batarya ve süperkapasitör gurubunun karşılaşması gereken akımların ayrıştırılması gösterilmiştir. Bu yöntemde öncelikle batarya akımı minimum sıfır olacak şekilde yük akımı bir AGF’den geçirilerek batarya akım cevabının dinamik olarak yavaş tepki vermesi sağlanır. Bu dinamik cevap alçak frekans bileşenlerine sahip akımlardan meydana geleceği için batarya akımının referans değerini oluşturur. Yük akımından batarya akımının farkı alınarak yüksek frekans bileşenine sahip yük akımları elde edilir. Bu akım ise yüksek güç yoğunluğuna sahip süperkapasitör gurubu için referans akım değerini oluşturmaktadır. Batarya akımının pozitif bölgede sınırlandırılması bütün GKF enerjisini süperkapasitör gurubuna aktarılacağı anlamına gelmektedir. Tez çalışmamızda batarya çevrim ömrünü uzatmak ve bataryayı mümkün olabilecek en az seviyede kullanmak amacıyla GKF enerjisinin tamamını süperkapasitör gurubuna yönlendirilmiştir. Şekil 2.53’deki 2 numaralı pencerede AKF tekniği ile yük akımının ayrıştırılması gerçekleştirilmiştir. AKF tekniği yük akımının ayrıştırılması için bir bulanık adaptif filtre kullanımına dayanmaktadır. SKF tekniğindeki sabit filtre kesim frekansı (f_c) AKF tekniğinde adaptif hale getirilir. Bu adaptif aralık genellikle enerji depolama birimlerinin güç ve enerji yoğunlukları belirlenerek bazı matematiksel temellere dayandırılmış olsa da kesim frekansı aralığı daha çok belirli benzetim veya deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmektedir. Örneğin yük akımının minimum ve süperkapasitör şarj doluluk oranının maksimum olduğu bir çalışma bölgesinde f_c azaltılarak batarya akımının yumuşatılması sağlanır. Bu teknik bataryanın ısıl problemlerine çözüm sunarak batarya çevrim ömrünün uzamasına katkıda bulunur. Şekil 2.53’deki 3 numaralı pencerede bu tez çalışması için önerilen ÇUGT tekniği ile yük akımının ayrıştırılması gösterilmiştir. ÇUGT tekniğinde AGF tekniğine ek olarak kesim frekansı ile beraber batarya akımı da adaptif hale getirilir. Batarya akımını adaptif hale getiren aralık süperkapasitör gurubunun iç direncinin ve öz deşarjının yüksek olması sebebiyle ($0.90 < R < 1$) olarak seçilmiştir. Şekil 2.53’deki üç tekniğin ayrı

ayrı kullanılmasıyla sürüş çevrimi boyunca enerji depolama birimlerinin sağlaması gereken yük akımları Şekil 2.54’de gösterilmiştir.



Şekil 2.53. Yük akımını paylaşma teknikleri

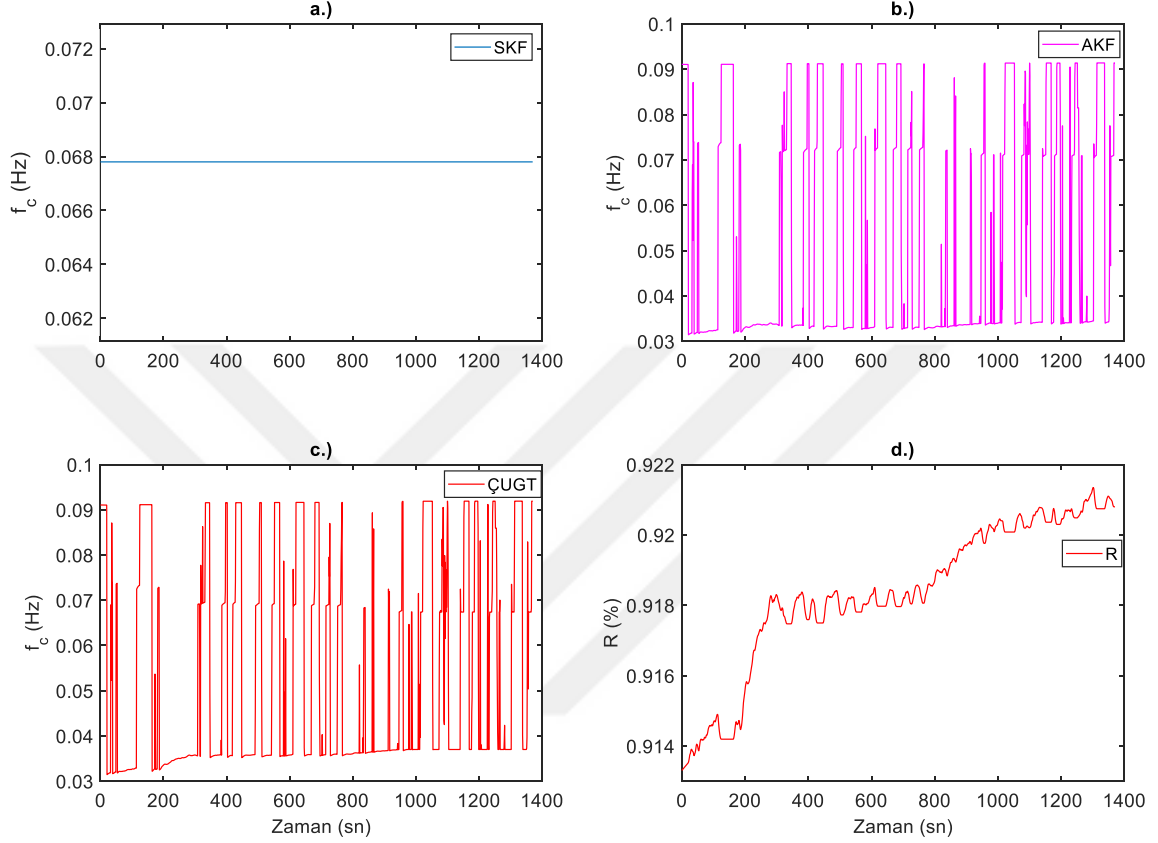
Şekil 2.54a, Şekil 2.54b ve Şekil 2.54c sırasıyla SKF, AKF ve ÇUGT tekniklerine göre bataryanın sağlaması gereken akımları göstermektedir. Batarya akımları incelendiğinde en yüksek akım genliğinin SKF tekniğinde olduğu ve en düşük akım genliğinin ÇUGT tekniğinde olduğu açıkça görülmektedir. Bu durumda ÇUGT tekniğinde bataryanın daha az kullanılacağı sonucuna varılabilir.



Şekil 2.54. EYS'lere göre yük akımının ayrıştırılması

Şekil 2.54d, Şekil 2.54e ve Şekil 2.54f sırasıyla SKF, AKF ve ÇUGT tekniklerine göre süperkapasitörün sağlaması gereken akımları göstermektedir. Süperkapasitör akımları incelendiğinde ise en yüksek akım genliğinin ÇUGT tekniğinde olduğu ve en düşük akım genliğinin SKF tekniğinde olduğu açıkça görülmektedir. Bu durumda ÇUGT tekniğinde süperkapasitörün daha aktif kullanılacağı sonucuna varılabilir. Bu teknikte süperkapasitörün aktif olarak kullanılmasının sebebi batarya akımının adaptif hale getirilmesidir. Batarya akımı, süperkapasitörün şarj doluluk oranına göre üretilen belirli bir çalışma yüzdesi ($0.90 < R < 1$) ile sınırlandırılmıştır. Böylece bataryaya kıyasla yaklaşık 2000 kat daha yüksek çevrim ömrüne sahip olan süperkapasitör daha etkin kullanılarak bataryanın çevrim

ömrünün uzatılmasına katkı sağlanmış olur. Şekil 2.54'deki tekniklerle alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılan yük akımlarının paylaşımında kilit rol üstlenen filtre kesim frekansları ve ÇUGT tekniğindeki batarya çalışma yüzdesi aşağıda gösterilmiştir.



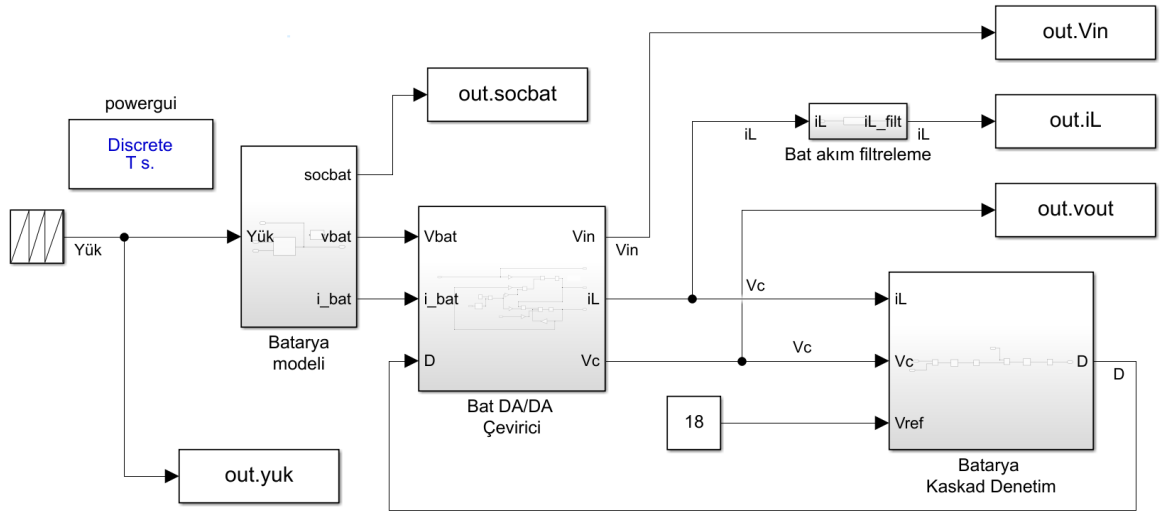
Şekil 2.55. EYS'lere göre filtre kesim frekansları ve %R

Şekil 2.55a'da SKF tekniğinde yük ayrımını gerçekleştirmek için kullanılan AGF'nin kesim frekansını sabit olduğu görülmektedir. Bu sabit değer, EYS'lerin karşılaştırılmasını daha objektif bir şekilde gerçekleştirmek adına AKF ve ÇUGT tekniklerindeki kesim frekanslarının ortalaması alınarak belirlenmiştir. Şekil 2.55b'de AKF tekniğinde elde edilen adaptif kesim frekansını göstermektedir. Şekil 2.54'deki batarya akımları ile karşılaştırıldığında yük akımının artması durumunda kesim frekansı azalırken yük akımının azalması durumunda kesim frekansının arttığı görülmektedir. Bunun sebebi kullanılan adaptif AGF'nin, EA'nın yük akımının ani değişmesi sırasında meydana gelecek tepe akımları süperkapasitöre yönlendirmesidir. Şekil 2.55c ÇUGT tekniğinde adaptif kesim frekansını temsil etmektedir. AKF ve ÇUGT yöntemlerindeki kesim frekansları karşılaştırıldığında ÇUGT tekniğinde kesim frekansının daha dar aralıkta gerçekleştiği

görülmektedir. Sürüş çevrimi boyunca süperkapasitörün şarj doluluk oranına bağlı olarak batarya çalışma yüzdesinin değişimi Şekil 2.55'de gösterilmiştir. Batarya çalışma yüzdesi aralığı teorik değer aralığından daha dar olarak seçilmiştir. Bunun sebebi deneyde kullanılan süperkapasitörlerin hem içi dirençlerinin yüksek hem de kullanılabilir kapasitelerinin nominal kapasiteye göre düşük olmasıdır.

2.13. Benzetim ve Deneysel Modellerin Oluşturulması

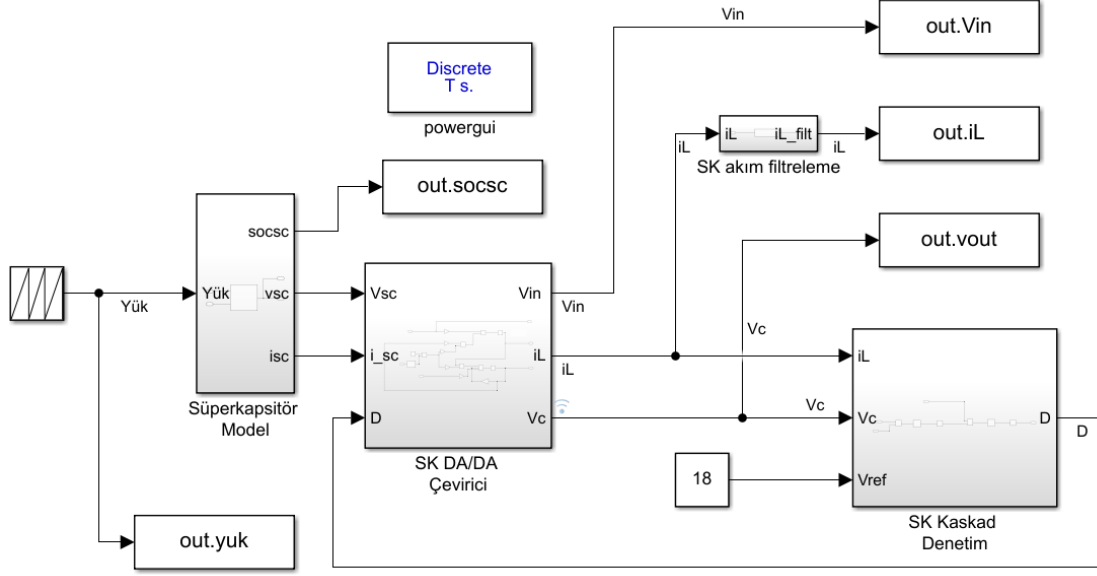
Bölüm 2.12'de açıklanan yöntemlerle yük akımlarının ayrıştırılması işleminden sonra EYS'lerin karşılaştırılabilmesi için MATLAB/Simulink ortamında benzetim modelleri oluşturulmuştur. Şekil 2.56 ve Şekil 2.57 sırasıyla batarya ve süperkapasitör gurubu için oluşturulan benzetim modellerini göstermektedir.



Şekil 2.56. Batarya gurubuna ait benzetim modeli

Şekil 2.56'daki batarya gurubuna ait benzetim modeline sırasıyla SKF, AKF ve ÇUGT tekniğine göre elde edilen sürüş zamanına bağlı batarya akımları giriş olarak verilmektedir. Batarya modeli bloğu, Bölüm 2.11.1'de deneysel verilere bağlı olarak benzetim ortamında modellenen batarya gurubunu temsil etmektedir. DA/DA çevirici bloğu yükselten çeviricinin dinamik denklemleri ile oluşturulan doğrusal modeli temsil etmektedir. Kaskad denetim bloğu ise çevirici görev oranını belirlemek için kullanılan, çıkış gerilimine ve endüktör akımına bağlı olarak gerçekleştirilen denetim sistemini temsil etmektedir. Çevirici anahtarlama frekansının yüksek olması sebebiyle endüktör akımındaki salınımları süzmek

için akım filtreleme yöntemi kullanılmıştır. Batarya gurubunun benzetim ortamında modellenmesine benzer şekilde oluşturulan süperkapasitör gurubuna ait benzetim modeli Şekil 2.57’de gösterilmiştir.

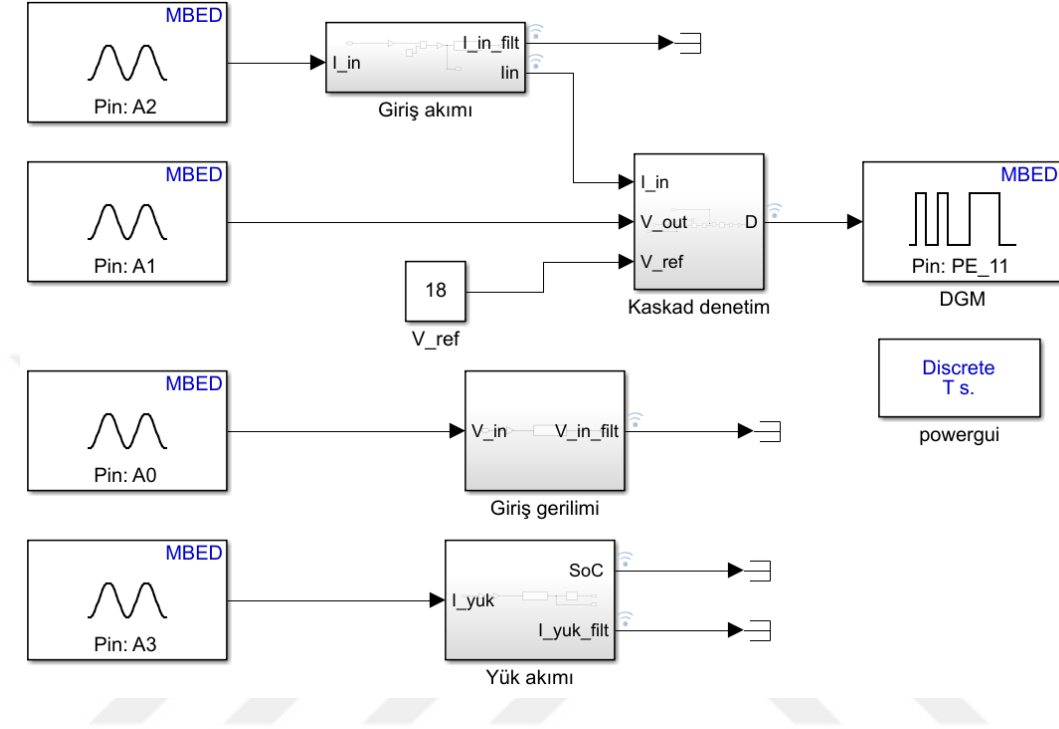


Şekil 2.57. Süperkapasitör gurubuna ait benzetim modeli

Şekil 2.57 ile Şekil 2.56 arasında, enerji depolama elemanlarının modellerinin değişmesi dışında hiçbir fark olmadığı açıkça görülmektedir. Şekil 2.57’deki süperkapasitör gurubuna ait benzetim modeline sırasıyla SKF, AKF ve ÇUGT tekniğine göre sürüş zamanına bağlı süperkapasitör gurubunun sağlaması gereken akımlar verilmiştir. Sürüş çevriminin uzun olması sebebiyle Simulink ortamında çıkışların izlenmesi, benzetim süresini oldukça etkilemektedir. Dolayısıyla ölçülen büyüklükler *To workspace* bloğu kullanılarak MATLAB çalışma ortamına aktarılmıştır. Benzetim modelleri incelendiğinde SKF, AKF, ÇUGT tekniğine göre elde edilen akımlara karşı sistem çıkışlarını gözlemek için 6 farklı simülasyon işlemi gerçekleştirilmesi gerektiği açıkça görülmektedir. Simülasyon sayısının ve süresinin daha kısa sürmesi için aynı Simulink çalışma ortamında üç batarya modeli oluşturulmuş ve bu modellerin sadece giriş akımları değiştirilmiştir. Benzer şekilde bu yöntem süperkapasitör modeli için de kullanılmıştır. Böylece hem simülasyon sayısı azaltılmış hem de tüm sonuçların kolaylıkla karşılaştırılabilmesi sağlanmıştır.

DeneySEL olarak kurulan düzenekte ise altı farklı deney gerçekleştirilmiştir. Öncelikle batarya gurubuna ait çıkışların izlenmesi için SKF yöntemine göre bataryanın sağlaması gereken akımla elektronik yük programlanmış ve sürüş çevrimi sonuna kadar çıkışlar

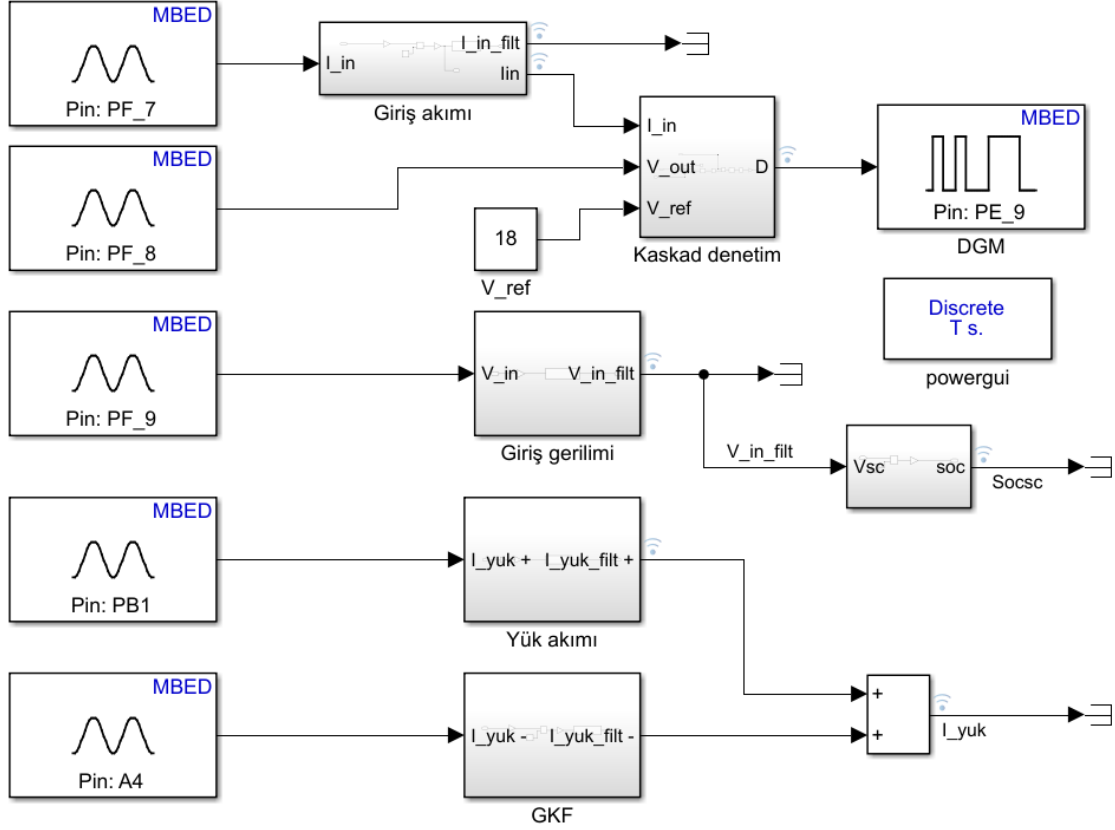
gözlenmiştir. Daha sonra aynı deneysel prosedür ile AKF ve ÇUGT teknikleri için elektronik yük programlanmış ve ölçümler alınmıştır. Böylece batarya gurubuna ait üç ayrı deneysel işlem gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.58. Batarya testlerinde STM32F746ZG için tasarlanan model

Süperkapasitör gurubunun deneysel işlemlerinde ise önce SKF yöntemine göre elektronik yük programlanmıştır. Ek olarak GKF enerjisinin süperkapasitörlere depolanması sebebiyle Şekil 2.54'deki süperkapasitör akımlarının negatif bölgelerindeki akımları sağlaması için DA güç kaynağı programlanmıştır. Daha sonra deneysel işlemler başlatılarak çıkışlar gözlenmiştir. Daha sonra aynı deneysel prosedür AKF ve ÇUGT teknikleri için tekrarlanmıştır. Şekil 2.58'de ve Şekil 2.59'da sırasıyla batarya ve süperkapasitör grubunun deneysel işlemlerinin gerçekleştirilmesi için STM32F746ZG mikrodeneleyicisinin programlanmasında kullanılan Simulink donanım modeli gösterilmiştir. Şekil 2.58'de $A_i, \{i \in 0, 1, 2, 3\}$ mikrodeneleyicinin analog girişlerini temsil etmektedir. Analog giriş A_2 yardımıyla giriş akımı ölçülür ve mikrodeneleyici referans gerilimi ile sensör sıfır akım voltajı ve sensör hassasiyeti hesaba katılarak gerçek giriş akımı hesaplanır. Daha sonra bu akım analog giriş A_1 yardımıyla okunan çıkış gerilimi ile birlikte kaskad denetim bloğuna iletilir. Bu bloğun diğer girişini ise DA baranın referans gerilim değeri oluşturmaktadır. Denetim yönteminin gerçekleşmesi sonrasında çevirici görev oranı belirlenir. Bu çıkışı

mikrodenetleyicinin PWM (DGM) PE_11 pinine bağlanmıştır. Analog girişlerden A_0 giriş gerilimini ve A_3 yük akımını ölçmek için kullanılmıştır. Batarya gurubunu doluluk oranı amper-saat sayma yöntemiyle, süperkapasitör gurubunun doluluk oranı ise doğrudan hücre geriliminden hesaplanmıştır. Ölçüm değerlerinin doğruluğunu artırmak için hem benzetim modelinde hem de deneysel modelde örnekleme adımı $T_s = 7\mu s$ seçilmiştir.



Şekil 2.59. Süperkapasitör testlerinde STM32F746ZG için tasarlanan model

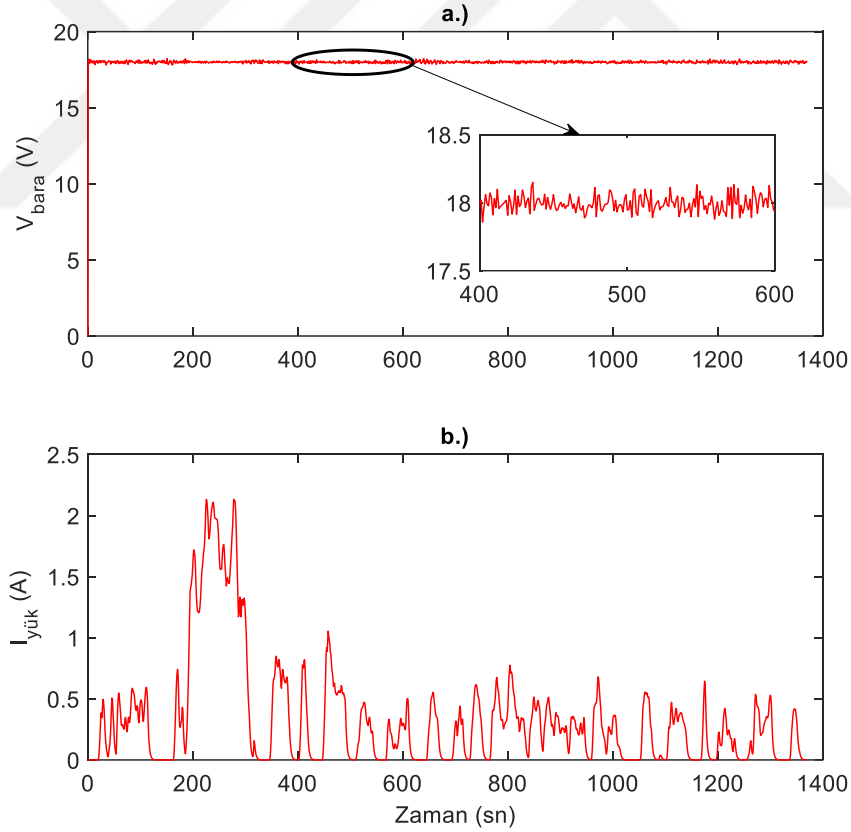
Süperkapasitör gurubu için tasarlanan donanımsal modelin batarya gurubu için tasarlanan modelden iki ayrı farkı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi şarj doluluk oranının doğrudan terminal geriliminden ölçülmesidir. İkincisi ise GKF enerjisinin okunması için kullanılan harici ACS712 akım sensörünün bağlandığı ekstra bir analog giriştir (A_4). Süperkapasitör ölçümlerinin okunması için PF_7 , PF_8 , PF_9 , PB_1 analog girişleri kullanılmış ve gerekli DGM'nin üretilmesinde PE_9 PWM pini kullanılmıştır.

2.14. Sabit Frekans Ayırımında Elde Edilen Bulgular

Bu bölümde sabit kesim frekansı yöntemine göre gerçekleştirilen güç tahsis işlemine ait bulgulara hem benzetim hem de deneysel olarak birinci alt başlık altında yer verilmiştir. Ek olarak benzetim modeli ile deneysel model arasındaki ilişkilerin net olarak ortaya koyulması için ikinci bir alt başlık altında karşılaştırmalara yer verilmiştir.

2.14.1. Batarya Gurubuna Ait Benzetim ve Deneysel Bulgular

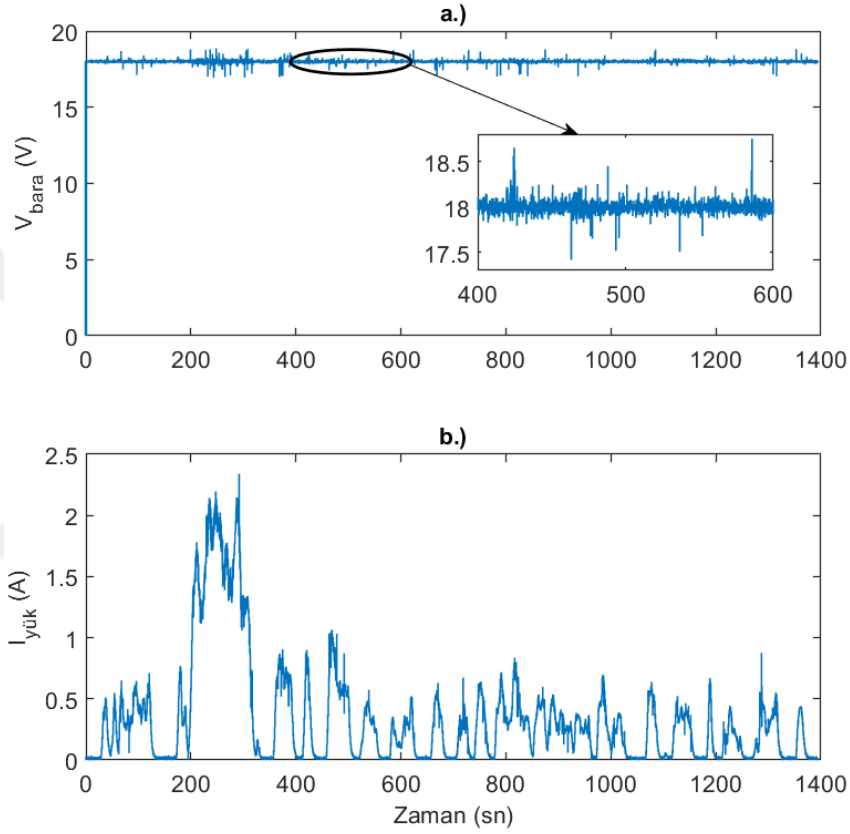
Şekil 2.60 Sabit Kesim Frekansı (SKF) yöntemine göre batarya gurubuna ait benzetim sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.60a'da DA bara gerilimi ve aynı grafik içerisinde 400sn ile 600sn aralığında bara geriliminin yakınlaştırılmış görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.60. Batarya benzetim sonuçları, a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı

Tüm sürüş çevrimi boyunca bara geriliminin, 18V referans bara gerilimine oldukça yakın ve mümkün olduğu kadar az salınımlı olması kaskad denetimin etkisini

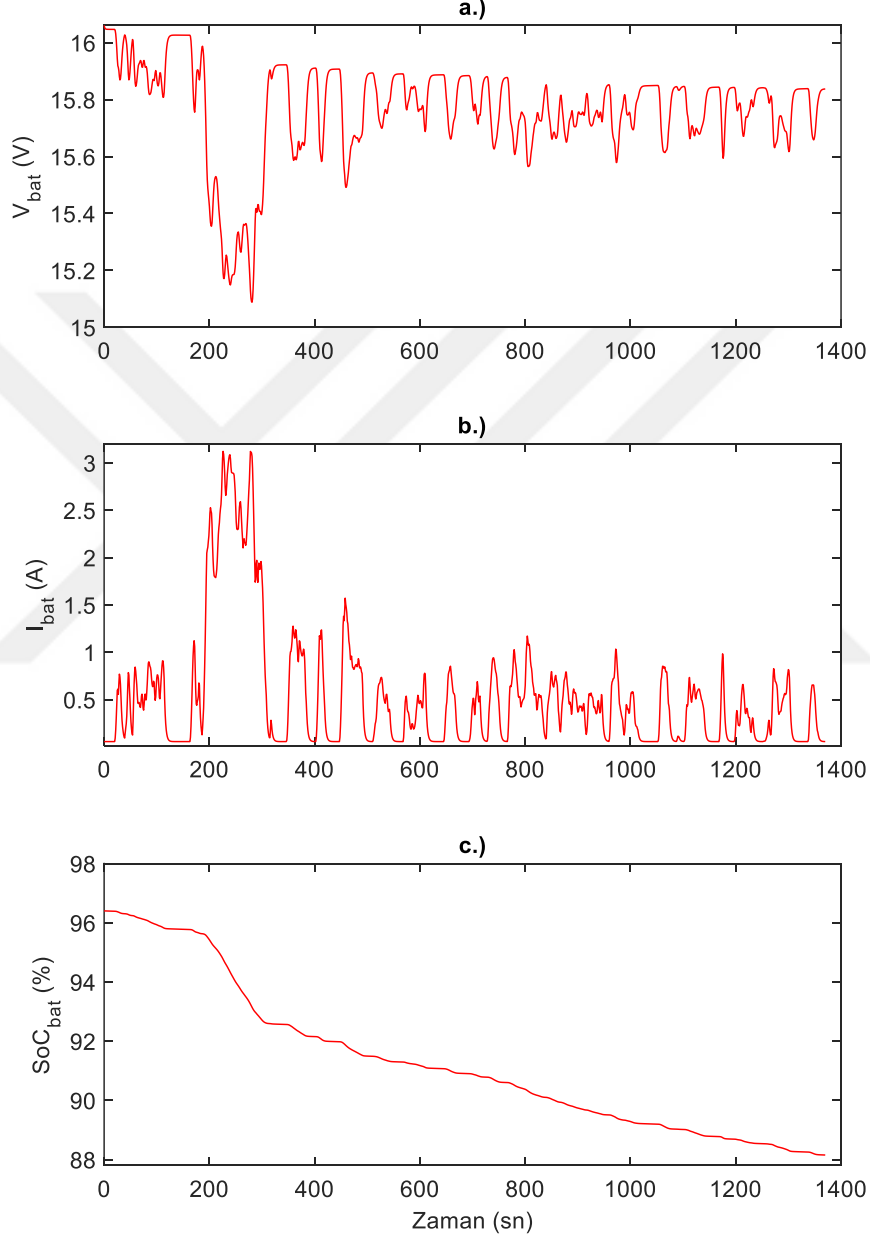
göstermektedir. Şekil 2.60b sürüş çevrimi boyunca batarya gurubundan temin edilecek akımı göstermektedir. SKF’de batarya gurubunun sağlaması gereken yük akımının maksimum değeri yaklaşık olarak 2,133A ölçülmüştür. Şekil 2.61a ve Şekil 2.61b sırasıyla DA bara geriliminin ve yük akımının deneysel sonuçlarını göstermektedir. Benzetim testlerinde 17,8V ile 18,2V arasında salınan bara gerilimi, deneysel testlerde herhangi bir filtre kullanılmadan ölçülmüş ve 17,5V ile 18,5V arasında salınım göstermiştir.



Şekil 2.61. Batarya deneysel sonuçlar, a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı

Yük yoğunluğunun arttığı bölgelerde bara gerilimindeki salınımların arttığını, ancak kullanılan kaskad denetim yapısının bu durumun üstesinden gelecek kadar hızlı olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 2.61b’deki deneysel yük akımının benzetimdeki yük akımıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum EA’nın güç tüketim durumunu modellemek için kullanılan elektronik yükün doğru bir şekilde programlandığını göstermektedir. Sürüş çevrimi süresince benzetim testlerinde batarya terminal gerilimindeki, batarya çıkış akımındaki ve batarya şarj doluluk oranındaki değişim Şekil 2.62’de gösterilmiştir. Şekil 2.62a batarya terminal gerilimindeki değişimi göstermektedir. Yaklaşık olarak 16,2V seviyelerinden başlayan terminal gerilimi, yük akımının maksimum seviyeye ulaşmasıyla

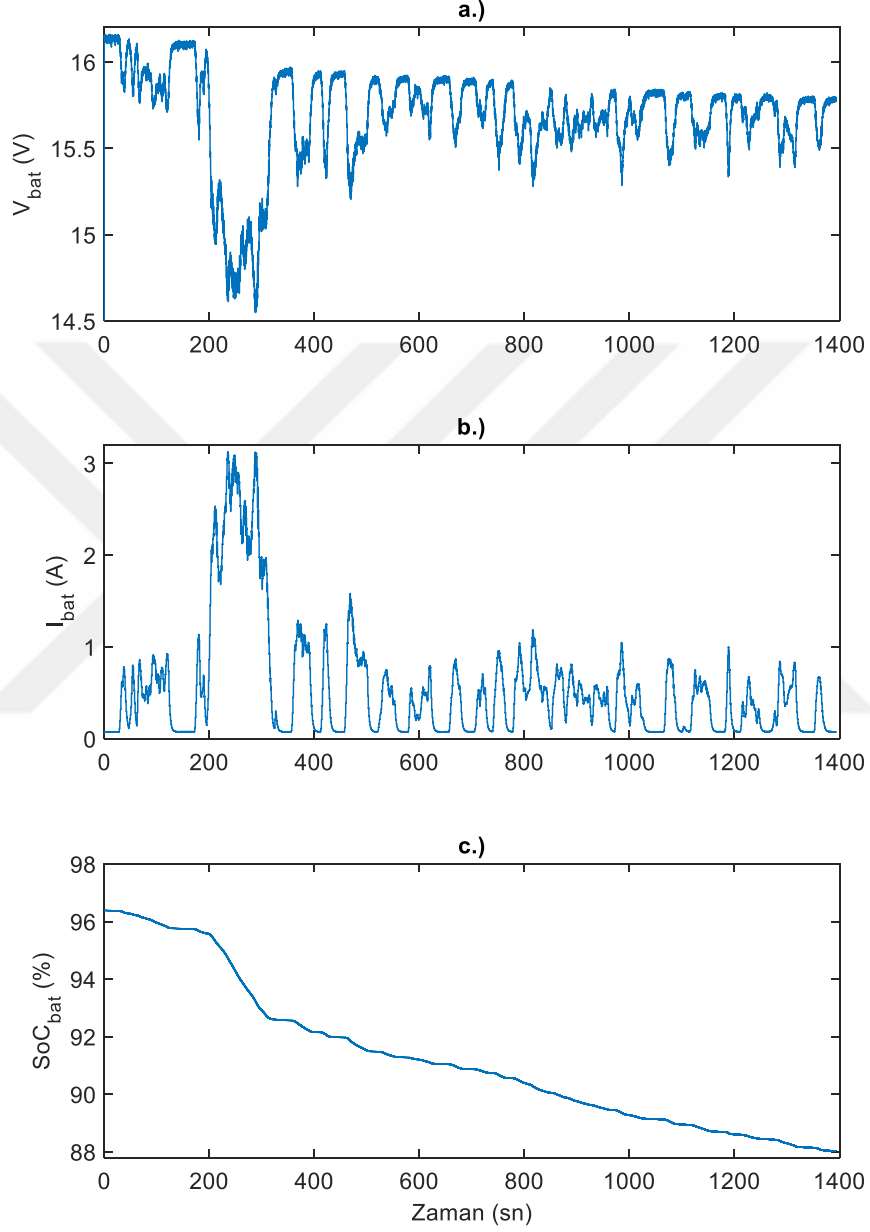
15,09V seviyelerine kadar düşmüş ve sürüş çevrimini yaklaşık 15,83V seviyelerinde tamamlamıştır. Şekil 2.62b'deki batarya çıkış akımının maksimum değeri, çevirici ve iletim kayıplarından ötürü yaklaşık olarak 3,12A seviyelerinde gerçekleşmiştir. Tüm benzetim ve deneysel testlerde batarya gurubunun başlangıç doluluk oranı yaklaşık %96 civarındadır.



Şekil 2.62. Batarya benzetim sonuçları, a.) Terminal gerilimi, b.) Batarya akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 2.62c'de bu seviyelerden teste başlatılan bataryanın şarj doluluk oranı sürüş çevrimi sonunda yaklaşık olarak %88,15 seviyelerine kadar düşmüştür. Şekil 2.63 batarya terminal gerilimi, batarya çıkış akımı ve batarya şarj doluluk oranındaki deneysel test sonuçlarını

göstermektedir. Şekil 2.63a'da yaklaşık 16,2V seviyelerinden deneysel teste başlatılan batarya gurubunda yük akımının maksimum seviyelere ulaşmasıyla terminal gerilimi 14,55V seviyelerine düşmüş ve sürüş çevrimini 15,79V seviyelerinde tamamlamıştır.

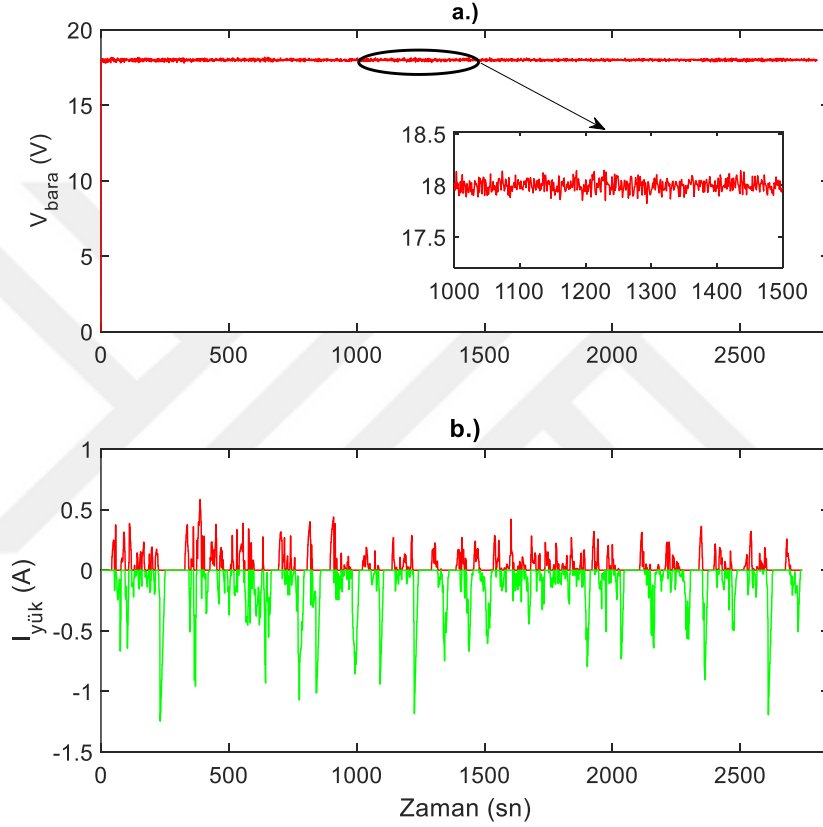


Şekil 2.63. Batarya deneysel sonuçlar, a.) Terminal gerilimi, b.) Batarya akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 2.63b'de batarya deneysel giriş akımının maksimum değerinin 3,12A seviyelerinde gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 2.63c'de gösterilen batarya şarj doluluk oranı %96 seviyelerinden başlatılmış ve sürüş çevrimi sonunda %88,02 seviyelerine düşmüştür.

2.14.2. Süperkapasitör Gurubuna Ait Benzetim ve DeneySEL Bulgular

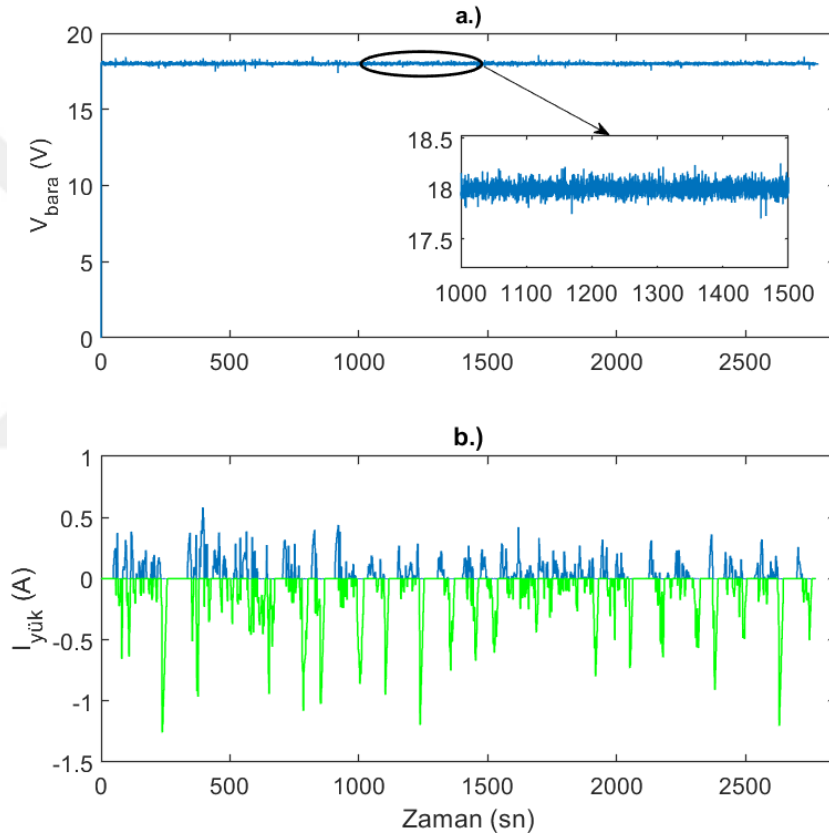
Şekil 2.64 Sabit Kesim Frekansı (SKF) yöntemine göre süperkapasitör gurubuna ait benzetim sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.64a'da DA bara gerilimi ve aynı grafik içerisinde 1000sn ile 1500sn aralığında bara geriliminin yakınlaştırılmış görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.64. Süperkapasitör benzetim sonuçları, a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı

Tüm sürüş çevrimi boyunca bara geriliminin, 18V referans bara gerilimine oldukça yakın ve mümkün olduğu kadar az salınımlı olması kaskad denetimin etkisini göstermektedir. Şekil 2.64b sürüş çevrimi boyunca süperkapasitör gurubundan temin edilecek akımı göstermektedir. Şekil 2.64b'de pozitif bölgede gösterilen kırmızı renkli akım, süperkapasitör gurubunun karşılaması gereken akım değerini, yine Şekil 2.64b'de negatif bölgede gösterilen yeşil renkli akım ise süperkapasitöre depolanan Geri Kazanımlı Frenleme (GKF) akımını temsil etmektedir. SKF'de süperkapasitör gurubunun sağlaması gereken yük akımının maksimum değeri yaklaşık olarak 0,583A ölçülmüştür. GKF akımının maksimum seviyesi 1,24A civarındadır. Şekil 2.65a ve Şekil 2.65b sırasıyla DA bara geriliminin ve yük

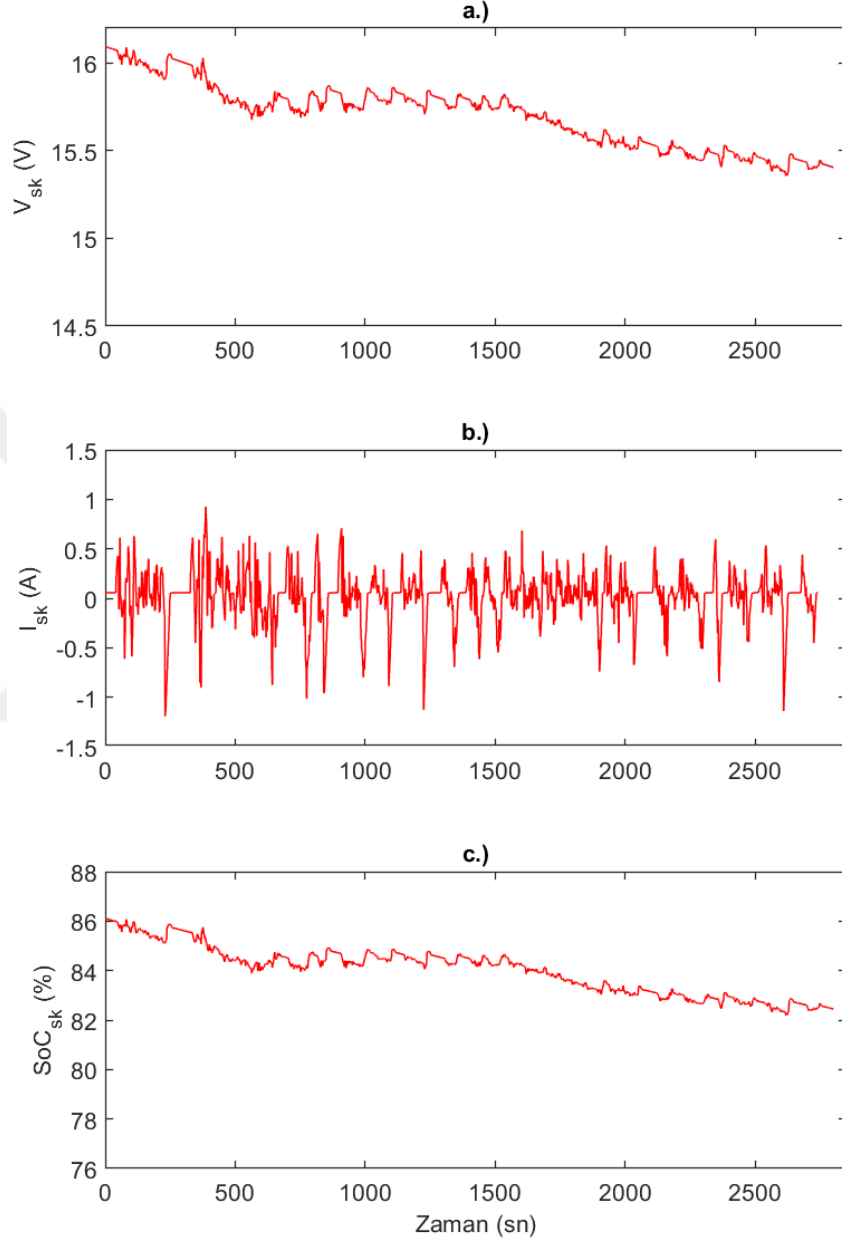
akımının deneysel sonuçlarını göstermektedir. Benzetim testlerinde 17,9V ile 18,1V arasında salınan bara gerilimi deneysel testlerde herhangi bir filtre kullanılmadan ölçülmüş ve yaklaşık olarak 17,8V ile 18,2V arasında salınım göstermiştir. Şekil 2.65b’de yük akımının deneysel olarak üretilmesinde pozitif yönlü akımlar elektronik yük ile ve negatif yönlü akımlar DA güç kaynağı ile programlanmıştır. Bu işlemin gerçekleştirilmesinde çevirici çıkışına bağlanan elektronik yük ile süperkapasitörden pozitif yönlü akımlar çekilirken, doğrudan süperkapasitör terminallerine bağlanan DA güç kaynağı ile negatif yönlü GKF akımları süperkapasitöre aktarılmıştır.



Şekil 2.65. Süperkapasitör deneysel sonuçlar, a.) Bara gerilimi, b.) Yükleme akımı

Şekil 2.66’da SKF yöntemine göre süperkapasitör gurubuna ait terminal geriliminin, yük akımının ve şarj doluluk oranının değişimi gösterilmiştir. Şekil 2.66a’da süperkapasitör terminal gerilimi yaklaşık olarak 16,2V seviyelerinden benzetim testine başlatılmış ve sürüş çevrimi sonunda bu değer 15,4V seviyelerine düşmüştür. Görüldüğü gibi süperkapasitör terminal gerilimi batarya terminal geriliminden farklı olarak zaman zaman azalma ve artma eğilimindedir. Bunun sebebi GKF akımlarının tamamının süperkapasitör gurubuna yönlendirilmesidir. Şekil 2.66b’de benzetim testlerinde ölçülen süperkapasitör giriş akımı

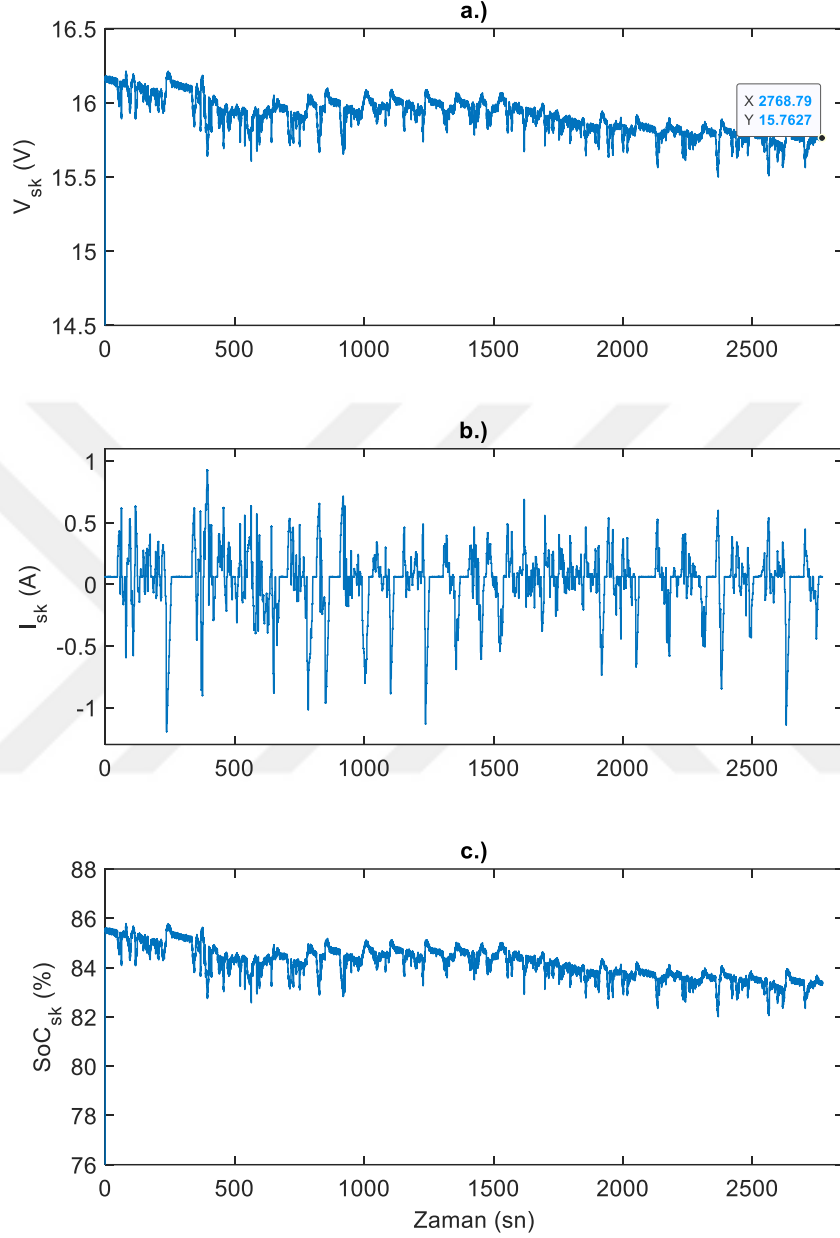
gösterilmiştir. Süperkapasitör gurubunda yük ve GKF akımları hem benzetim hem de deneysel olarak ayrı ayrı tasarlanmış olsa da süperkapasitör giriş akımı bu iki akımın toplamı olacak şekilde gösterilmiştir. Giriş akımının maksimum değeri 0,925A seviyesindedir.



Şekil 2.66. Süperkapasitör benzetim sonuçları, a.) Terminal gerilimi, b.) Yük akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 2.66c’de %86 seviyelerinden benzetim testine başlatılan süperkapasitör gurubunun şarj doluluk oranı sürüş çevrimini yaklaşık olarak %82,45 doluluk oranı ile tamamlamıştır. Yaklaşık 500sn ile 1500sn aralığında GKF akımlarının etkisiyle süperkapasitör gurubunun şarj doluluk oranı hemen hemen aynı kaldığı görülmektedir. Şekil

2.67’de SKF yöntemine göre gerçekleştirilen deneysel testlerde süperkapasitör gurubuna ait terminal geriliminin, giriş akımının ve şarj doluluk oranının değişimi gösterilmiştir.

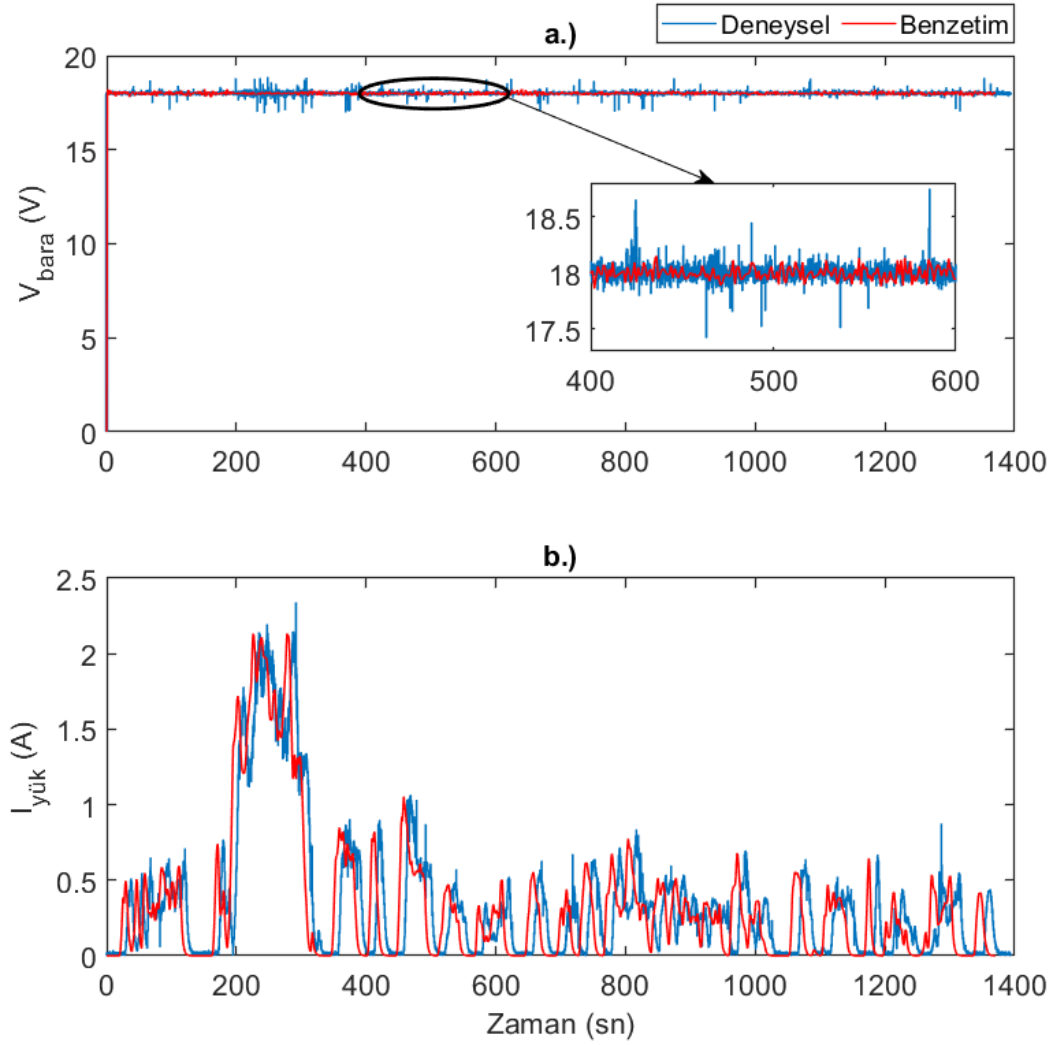


Şekil 2.67. Süperkapasitör deneysel sonuçlar, a.) Terminal gerilimi, b.) Yük akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 2.67a’da süperkapasitör terminal gerilimi 16,2V seviyelerinden deneysel teste başlatılmış ve sürüş çevrimini yaklaşık 15,76V seviyelerinde tamamlamıştır. Şekil 2.67’deki süperkapasitör giriş akımının benzetim testlerindeki değerine uyum sağladığı görülmektedir. Şekil 2.67c’de süperkapasitör gurubunun şarj doluluk oranı sürüş çevrimini yaklaşık olarak %83,31 doluluk oranı ile tamamlamıştır.

2.14.3. Benzetim ve Deneysel Bulguların Karşılaştırılması

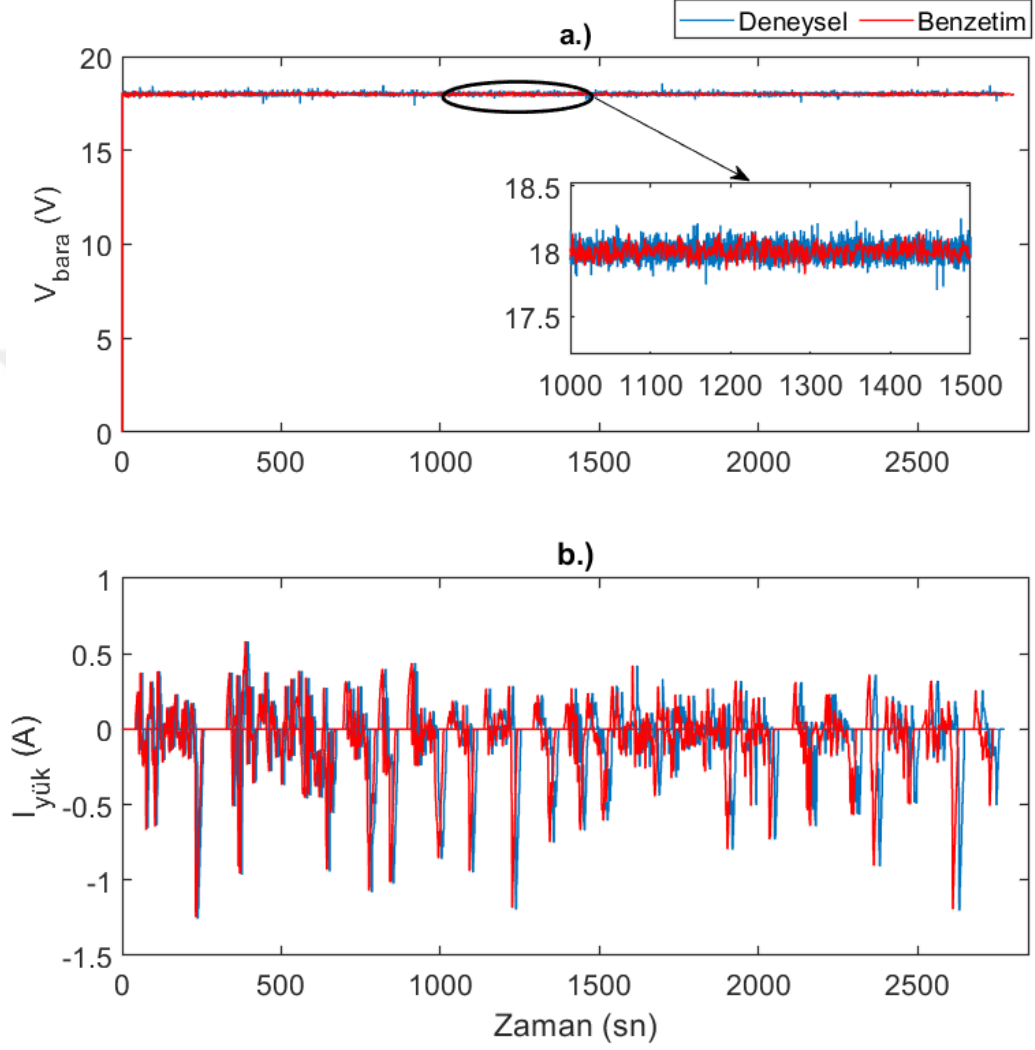
SKF yönteminde batarya gurubuna ait DA bara gerilimlerinin ve yük akımlarının benzetim ve deneysel testlerin karşılaştırılmaları Şekil 2.68’de gösterilmiştir. Şekil 2.68a’da benzetim sonuçlarına kıyasla deneysel sonuçlardaki DA bara geriliminde meydana gelen yüksek salınımların deney ortamındaki elektriksel gürültüden kaynaklandığı söylenebilir. Buna rağmen benzetim ve deneysel sonuçların birbirlerini yakından izlediği görülmektedir.



Şekil 2.68. Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları

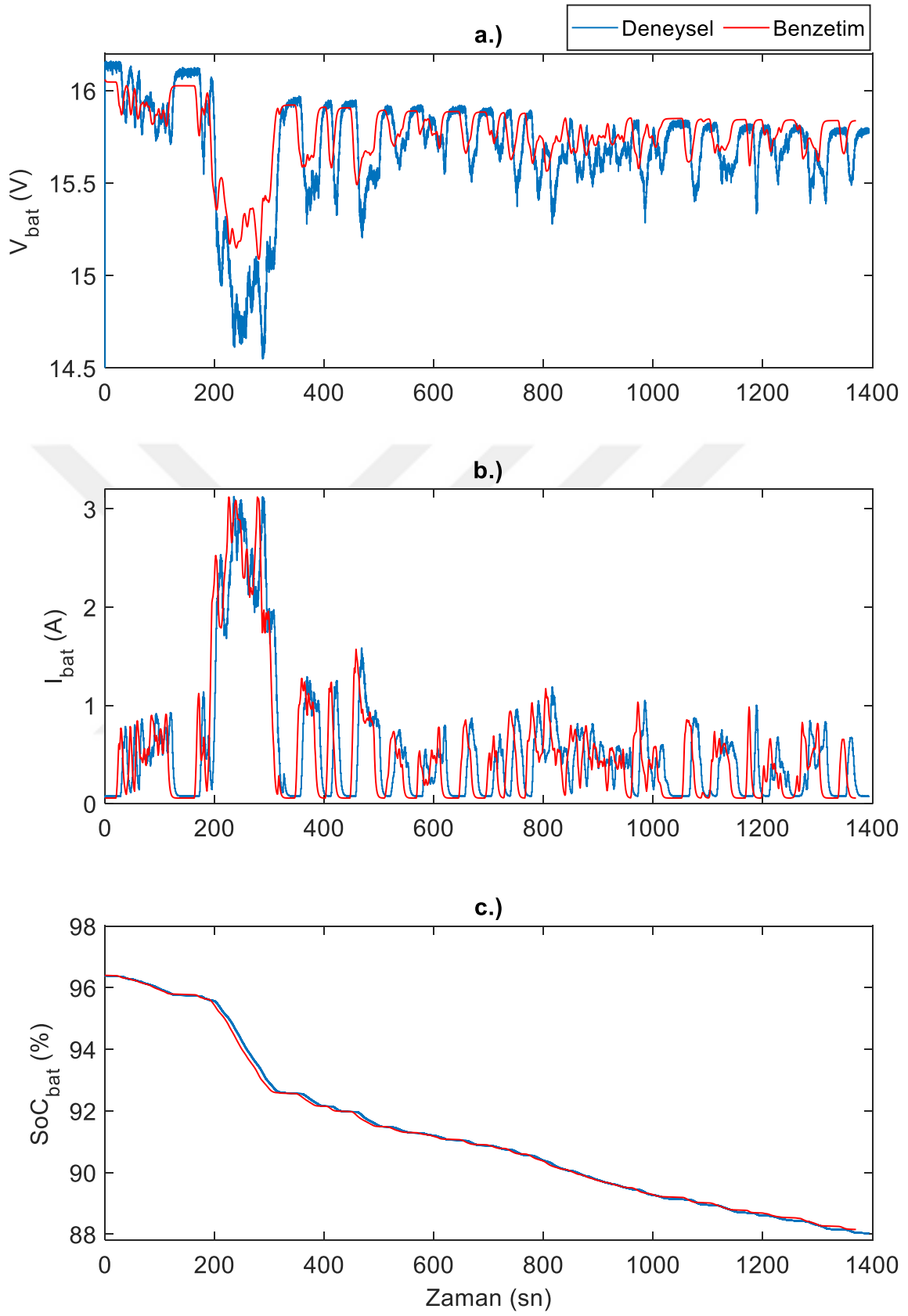
Şekil 2.68b’de benzetim ortamında ölçülen yük akımının, deneysel ortamdaki yük akımına göre sürüş çevrimini daha erken tamamladığı görülmektedir. Bu durum, sürüş çevriminin uzun olmasından dolayı elektronik yük ile bilgisayar arasındaki haberleşme gecikmesinden kaynaklanmaktadır. Sürüş çevrimi 1370sn olmasına rağmen, elektronik yük

bu süreyi 1400sn'de tamamlamıştır. Şekil 2.69'da süperkapasitör gurubuna ait DA bara gerilimlerinin ve yük akımlarının benzetim ve deneysel testlerin karşılaştırılmaları gösterilmiştir.

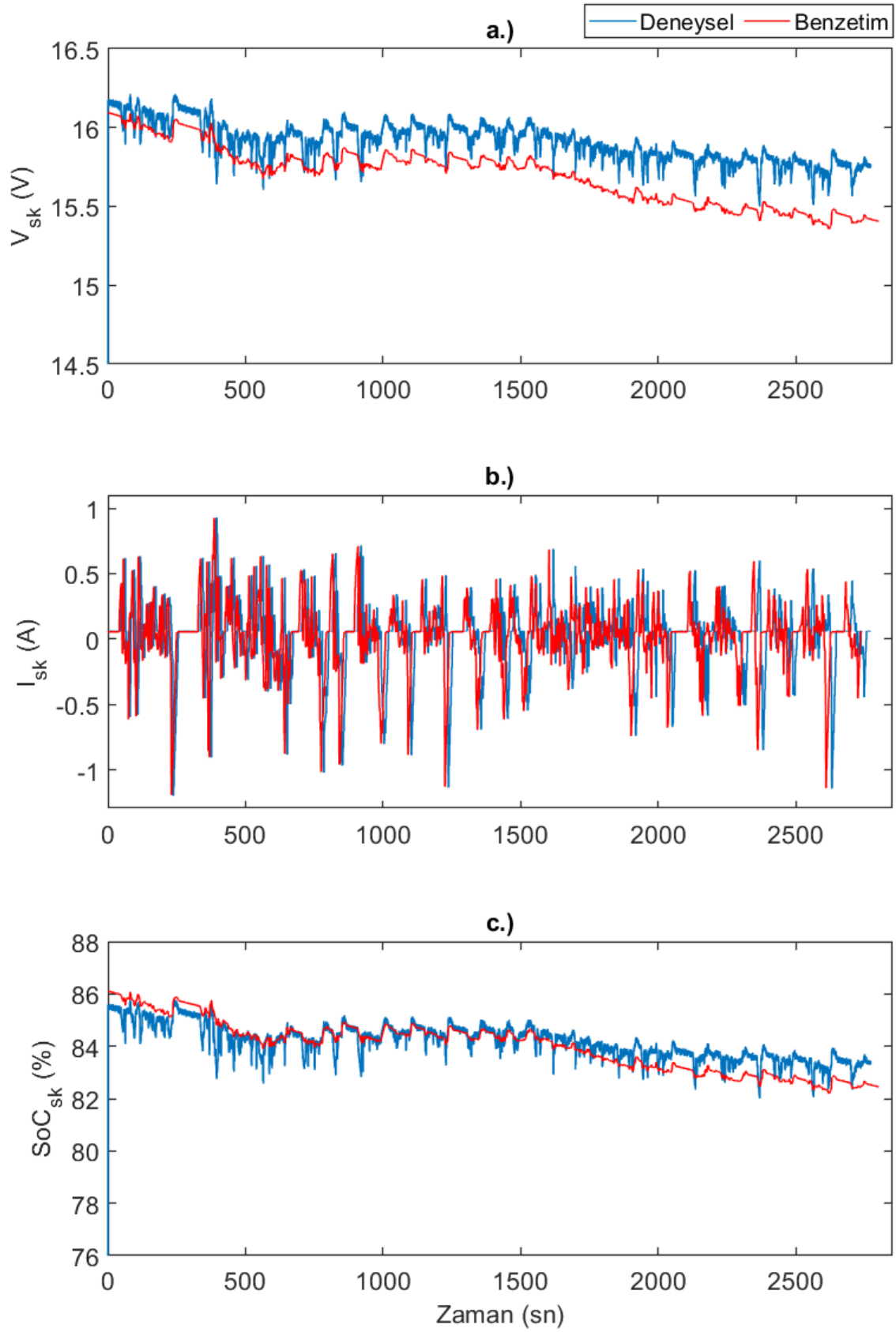


Şekil 2.69. Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları

Batarya gurubuna kıyasla, süperkapasitör gurubuna ait DA bara geriliminin daha az salınıma sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, süperkapasitörlerin güç yoğunluğunun daha yüksek olması ve hızlı akım değişimlerine bataryaya nazaran daha iyi uyum sağlamsıyla açıklanabilir. Şekil 2.70 ve Şekil 2.71 sırasıyla batarya ve süperkapasitör gurubunun terminal gerilimlerinin, giriş akımlarının ve şarj doluluk oranlarının benzetim ve deneysel olarak karşılaştırılmalarını göstermektedir.



Şekil 2.70. Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Batarya akımları, c.) Şarj doluluk oranları



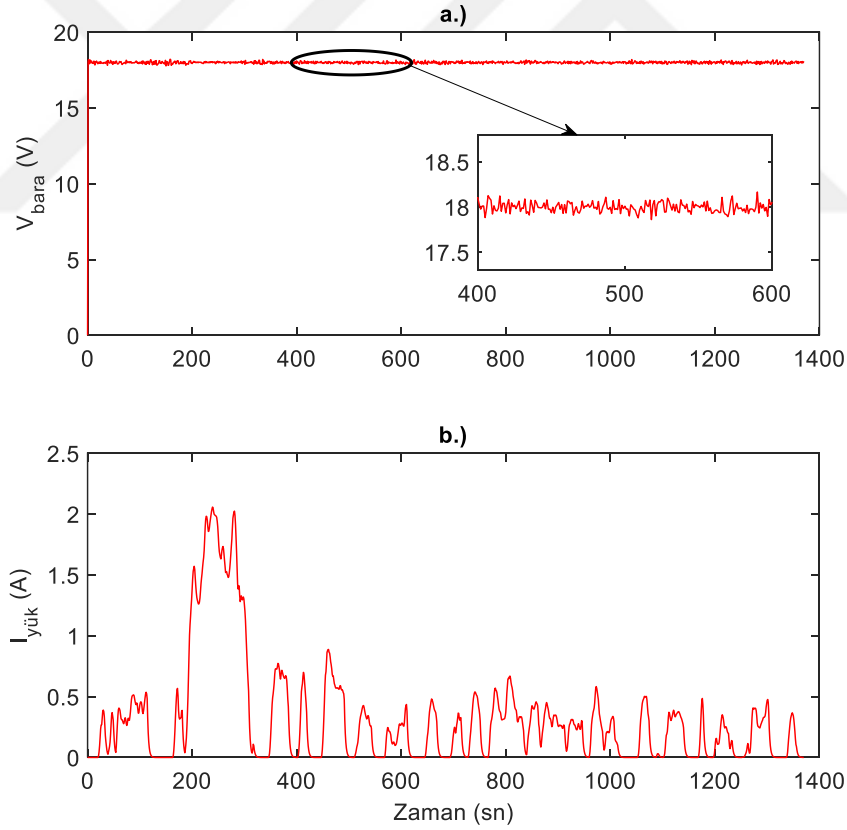
Şekil 2.71. Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Süperkapasitör akımları, c.) Şarj doluluk oranları

2.15. Adaptif Frekans Ayırımında Elde Edilen Bulgular

Bu bölümde adaptif kesim frekansı yöntemine göre gerçekleştirilen güç tahsis işlemine ait bulgulara hem benzetim hem de deneysel olarak birinci alt başlık altında yer verilmiştir. Ek olarak benzetim modeli ile deneysel model arasındaki ilişkilerin net olarak ortaya koyulması için ikinci bir alt başlık altında karşılaştırmalara yer verilmiştir.

2.15.1. Batarya Gurubuna Ait Benzetim ve Deneysel Bulgular

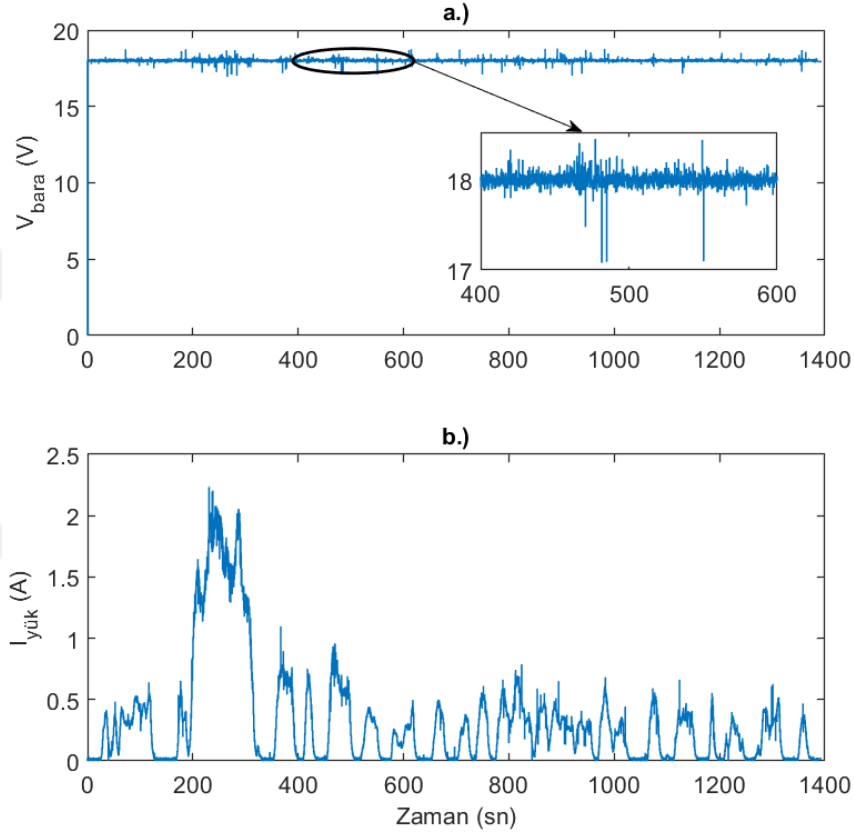
Şekil 2.72 Adaptif Kesim Frekansı (AKF) yöntemine göre batarya gurubuna ait benzetim sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.72a'da DA bara gerilimi ve aynı grafik içerisinde 400-600sn aralığında bara geriliminin yakınlaştırılmış görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.72. Batarya benzetim sonuçları a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı

Tüm sürüş çevrimi boyunca bara geriliminin, 18V referans bara gerilimine oldukça yakın ve mümkün olduğu kadar az salınımlı olması kaskad denetimin etkisini

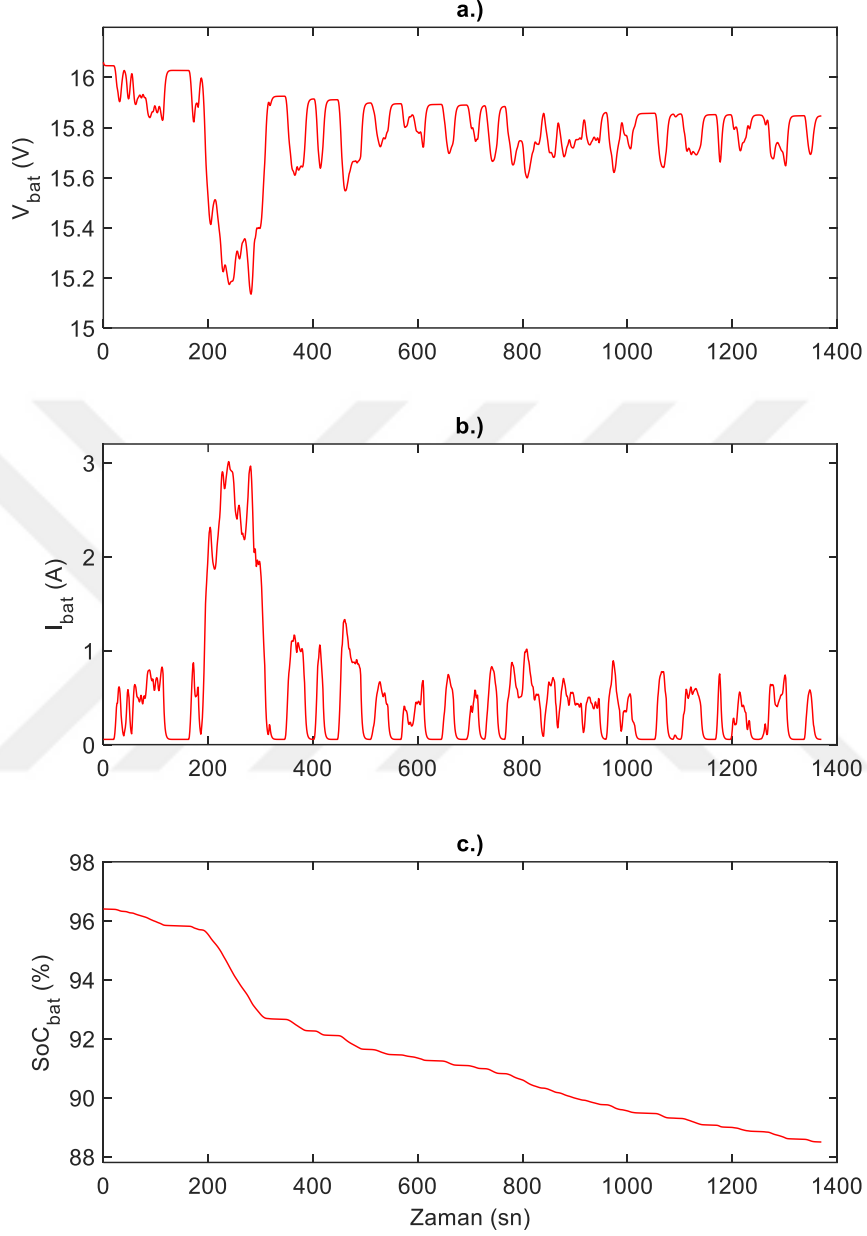
kanıtlamaktadır. Şekil 2.72b sürüş çevrimi boyunca batarya gurubundan temin edilecek akımı göstermektedir. AKF’de batarya gurubunun sağlaması gereken yük akımının maksimum değeri yaklaşık olarak 2,05A ölçülmüştür. Şekil 2.73a ve Şekil 2.73b sırasıyla DA bara geriliminin ve yük akımının deneysel sonuçlarını göstermektedir. Benzetim testlerinde 17,9V ile 18,1V arasında salınan bara gerilimi deneysel testlerde herhangi bir filtre kullanılmadan ölçülmüş ve 17V ile 18,75V arasında salınım göstermiştir.



Şekil 2.73. Batarya deneysel sonuçlar a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı

Şekil 2.73b’deki deneysel yük akımının benzetimdeki yük akımıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum EA’nın güç tüketim durumunu modellemek için kullanılan elektronik yükün doğru bir şekilde programlandığını göstermektedir. Sürüş çevrimi süresince benzetim testlerinde batarya terminal gerilimindeki, batarya çıkış akımındaki ve batarya şarj doluluk oranındaki değişim Şekil 2.74’de gösterilmiştir. Şekil 2.74a batarya terminal gerilimindeki değişimi göstermektedir. Yaklaşık olarak 16,2V seviyelerinden başlayan terminal gerilimi, yük akımının maksimum seviyeye ulaşmasıyla 15,13V seviyelerine kadar düşmüş ve sürüş çevrimini yaklaşık 15,84V seviyelerinde tamamlamıştır.

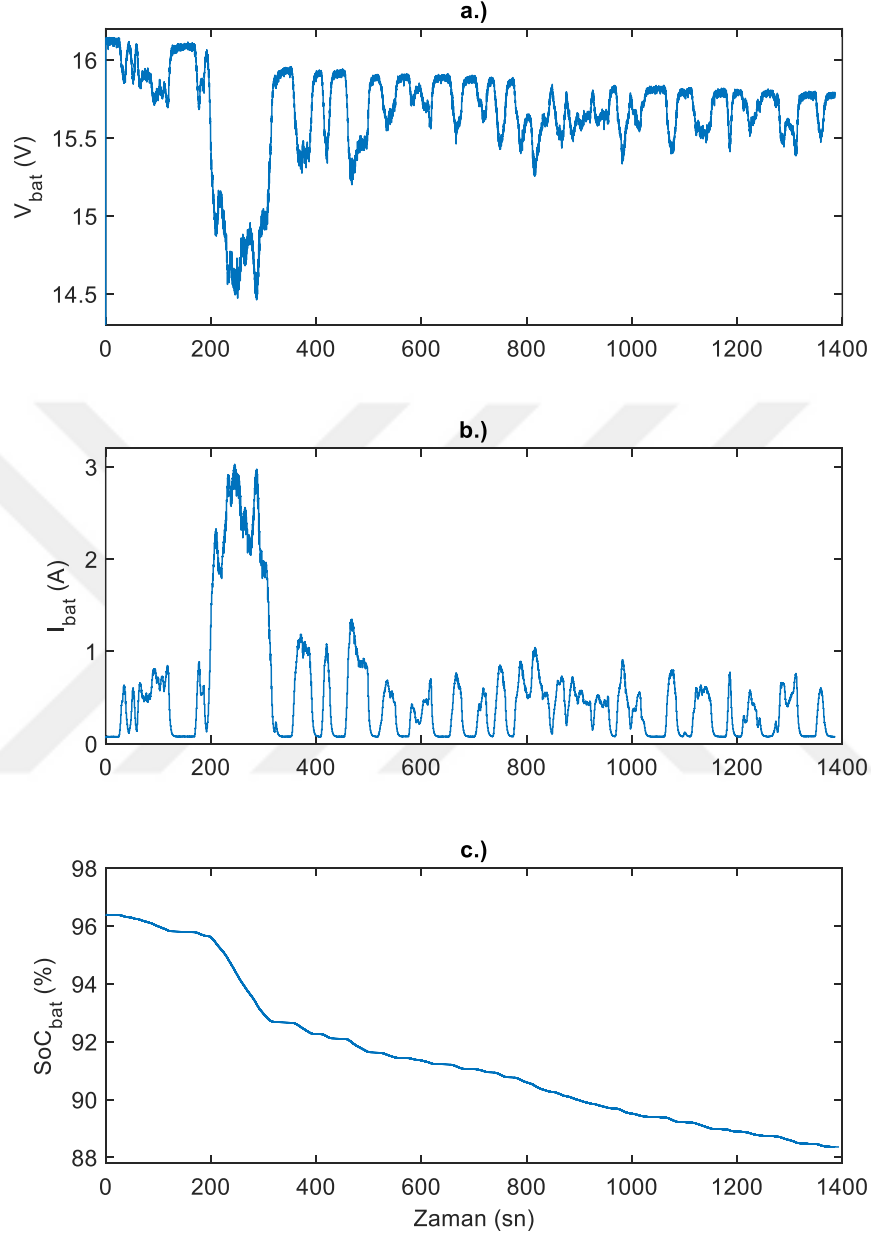
Şekil 2.74b'deki batarya çıkış akımının maksimum değeri, çevirici ve iletim kayıplarından ötürü yaklaşık olarak 3,01A seviyelerinde gerçekleşmiştir.



Şekil 2.74. Batarya benzetim sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Batarya akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 2.74c'deki benzetim testinde bataryanın şarj doluluk oranı sürüş çevrimi sonunda yaklaşık olarak %88,49 seviyelerine kadar düşmüştür. Şekil 2.75 batarya terminal gerilimindeki, batarya çıkış akımındaki ve batarya şarj doluluk oranındaki deneysel test sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.75a'da yaklaşık 16,2V seviyelerinden deneysel teste başlatılan batarya gurubunda yük akımının maksimum seviyelere ulaşmasıyla terminal

gerilimi 14,46V seviyelerine düşmüş ve sürüş çevrimini yaklaşık 15,75V seviyelerinde tamamlamıştır.

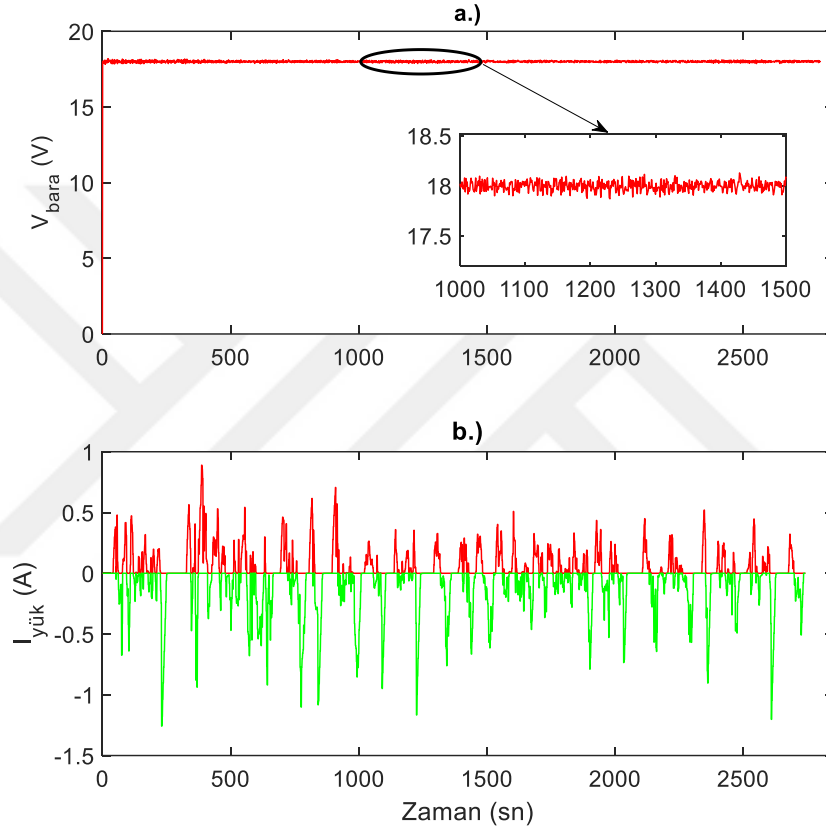


Şekil 2.75. Batarya deneysel sonuçlar a.) Terminal gerilimi, b.) Batarya akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 2.75b’de batarya deneysel giriş akımının maksimum değerinin yaklaşık 3,02A seviyelerinde gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 2.75c’de gösterilen batarya şarj doluluk oranı %96 seviyelerinden başlatılmış ve sürüş çevrimi sonunda %88,36 seviyelerine düşmüştür.

2.15.2. Süperkapasitör Gurubuna Ait Benzetim ve Deneyisel Bulgular

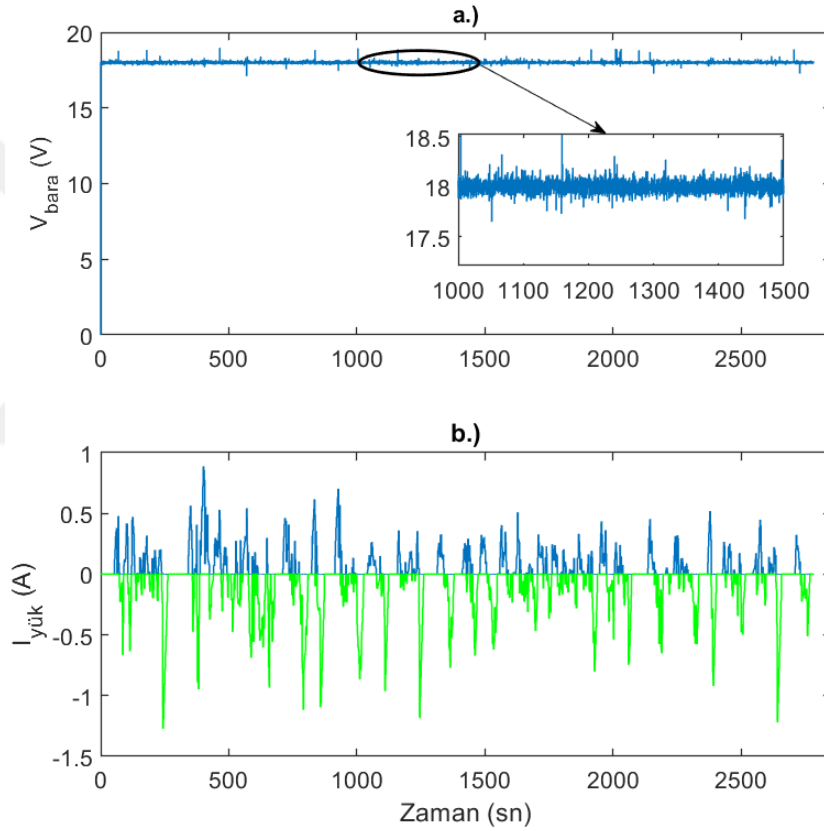
Şekil 2.76 Adaptif Kesim Frekansı (AKF) yöntemine göre süperkapasitör gurubuna ait benzetim sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.76a'da DA bara gerilimi ve aynı grafik içerisinde 1000sn ile 1500sn aralığında bara geriliminin yakınlaştırılmış görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.76. Süperkapasitör benzetim sonuçları a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı

Tüm sürüş çevrimi boyunca bara geriliminin, 18V referans bara gerilimine oldukça yakın ve mümkün olduğu kadar az salınımlı olması kaskad denetimin etkisini göstermektedir. Şekil 2.76b sürüş çevrimi boyunca süperkapasitör gurubundan temin edilecek akımı göstermektedir. Şekil 2.76b'de pozitif bölgede gösterilen kırmızı renkli akım, süperkapasitör gurubunun karşılaması gereken akım değerini, yine Şekil2.76b'de negatif bölgede gösterilen yeşil renkli akım ise süperkapasitöre depolanan Geri Kazanımlı Frenleme (GKF) akımını temsil etmektedir. AKF'de süperkapasitör gurubunun sağlaması gereken yük akımının maksimum değeri yaklaşık olarak 0,889A ölçülmüştür. GKF akımının maksimum seviyesi 1,24A civarındadır. Şekil 2.77a ve Şekil2.77b sırasıyla DA bara geriliminin ve yük

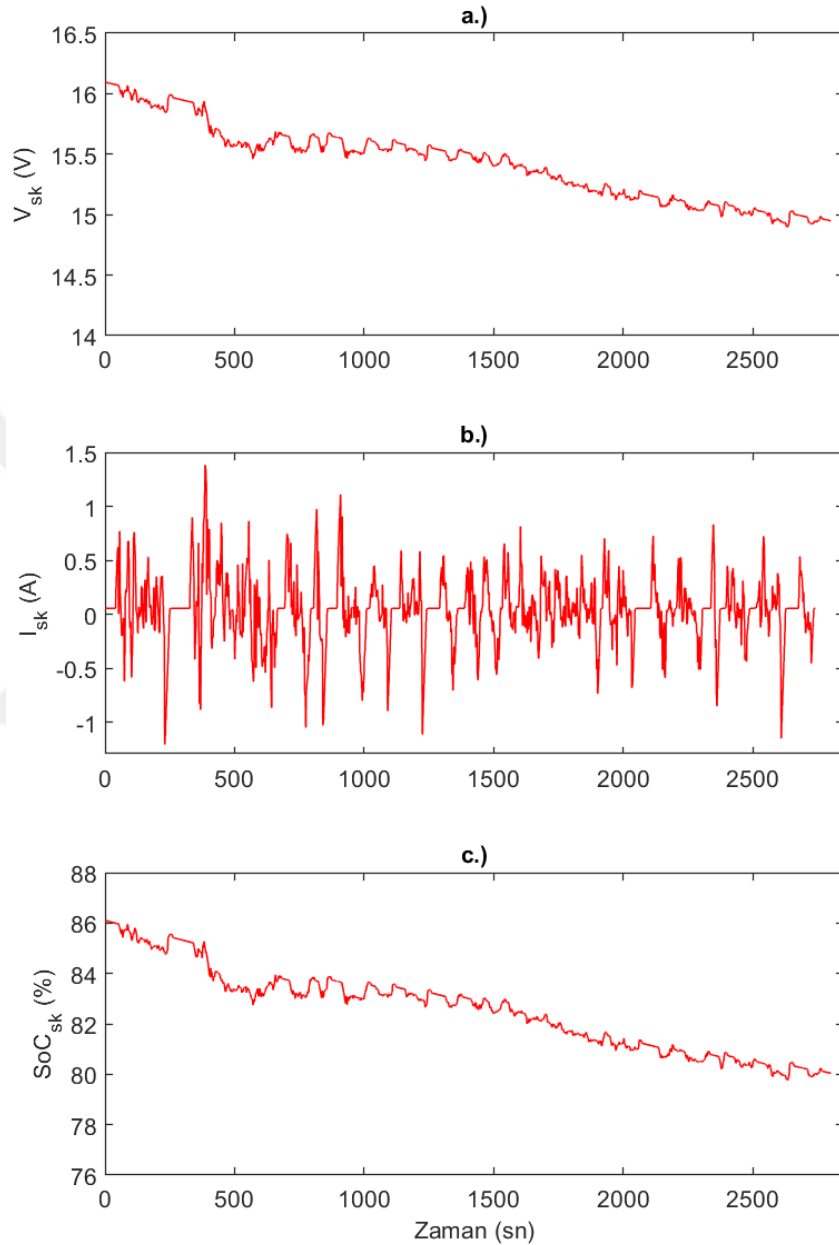
akımının deneysel sonuçlarını göstermektedir. Benzetim testlerinde 17,9V ile 18,1V arasında salınan bara gerilimi deneysel testlerde herhangi bir filtre kullanılmadan ölçülmüş ve yaklaşık olarak 17,8V ile 18,2V arasında salınım göstermiştir. Şekil 2.77b’de yük akımının deneysel olarak üretilmesinde pozitif yönlü akımlar elektronik yük ile ve negatif yönlü akımlar DA güç kaynağı ile programlanmıştır. Bu işlemin gerçekleştirilmesinde çevirici çıkışına bağlanan elektronik yük ile süperkapasitörden pozitif yönlü akımlar çekilirken, doğrudan süperkapasitör terminallerine bağlanan DA güç kaynağı ile negatif yönlü GKF akımları süperkapasitöre aktarılmıştır.



Şekil 2.77. Süperkapasitör deneysel sonuçlar a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı

Şekil 2.78’de AKF yöntemine göre süperkapasitör gurubuna ait terminal geriliminin, yük akımının ve şarj doluluk oranının değişimi gösterilmiştir. Şekil 2.78a’da süperkapasitör terminal gerilimi yaklaşık olarak 16,2V seviyelerinden benzetim testine başlatılmış ve sürüş çevrimi sonunda bu değer 14,94V seviyelerine düşmüştür. Görüldüğü gibi süperkapasitör terminal gerilimi batarya terminal geriliminden farklı olarak zaman zaman azalma ve artma eğilimindedir. Bunun sebebi GKF akımlarının tamamının süperkapasitör gurubuna yönlendirilmesidir. Şekil 2.78b’de benzetim testlerinde ölçülen süperkapasitör giriş akımı

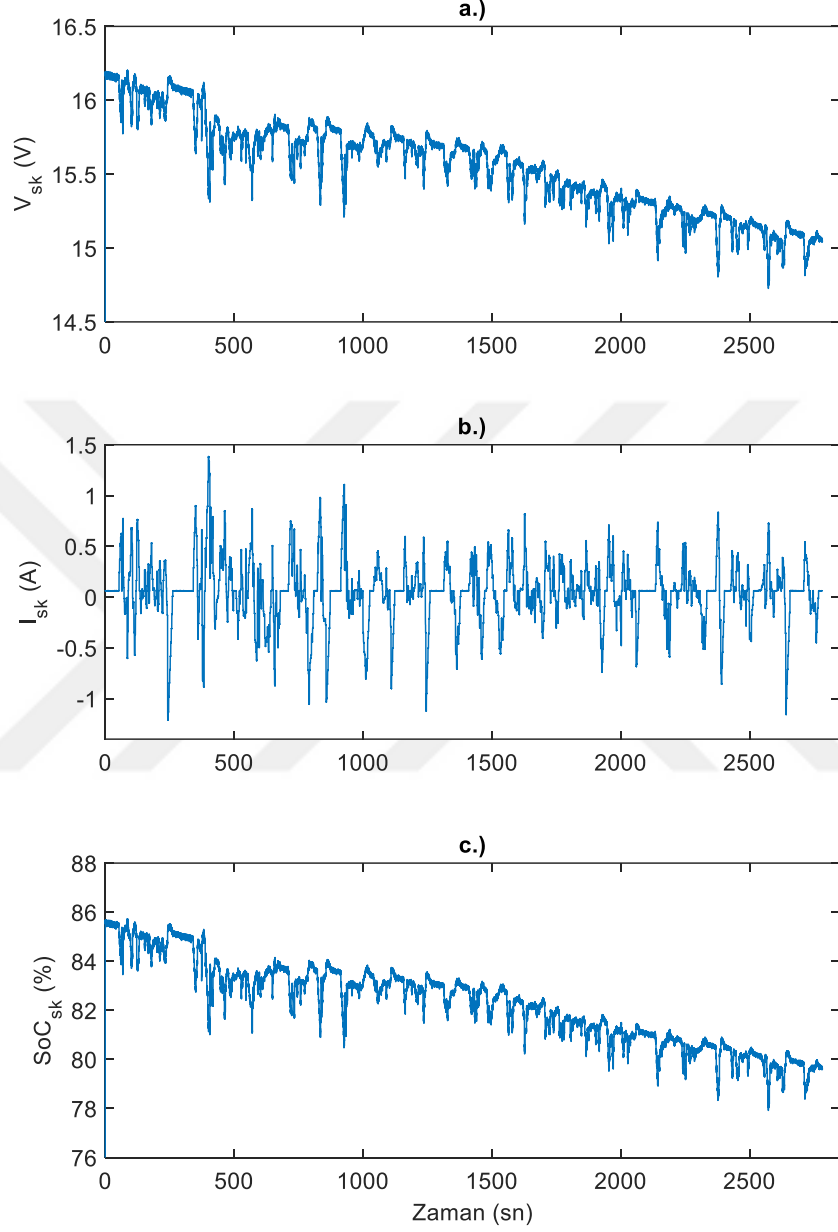
gösterilmiştir. Süperkapasitör gurubunda yük ve GKF akımları hem benzetim hem de deneysel olarak ayrı ayrı tasarlanmış olsa da süperkapasitör giriş akımı bu iki akımın toplamı olacak şekilde gösterilmiştir. Giriş akımının maksimum değeri 1,38A seviyesindedir.



Şekil 2.78. Süperkapasitör benzetim sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Süperkapasitör akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 2.78c’de %86 seviyelerinden benzetim testine başlatılan süperkapasitör gurubunun şarj doluluk oranı sürüş çevrimini yaklaşık olarak %80,04 doluluk oranı ile tamamlamıştır. Yaklaşık 500sn ile 1500sn aralığında GKF akımlarının etkisiyle süperkapasitör gurubunun şarj doluluk oranının hemen hemen aynı kaldığı görülmektedir.

Şekil 2.79 AKF yöntemine göre gerçekleştirilen deneysel testlerde süperkapasitör gurubuna ait terminal geriliminin, giriş akımının ve şarj doluluk oranının değişimi göstermektedir.

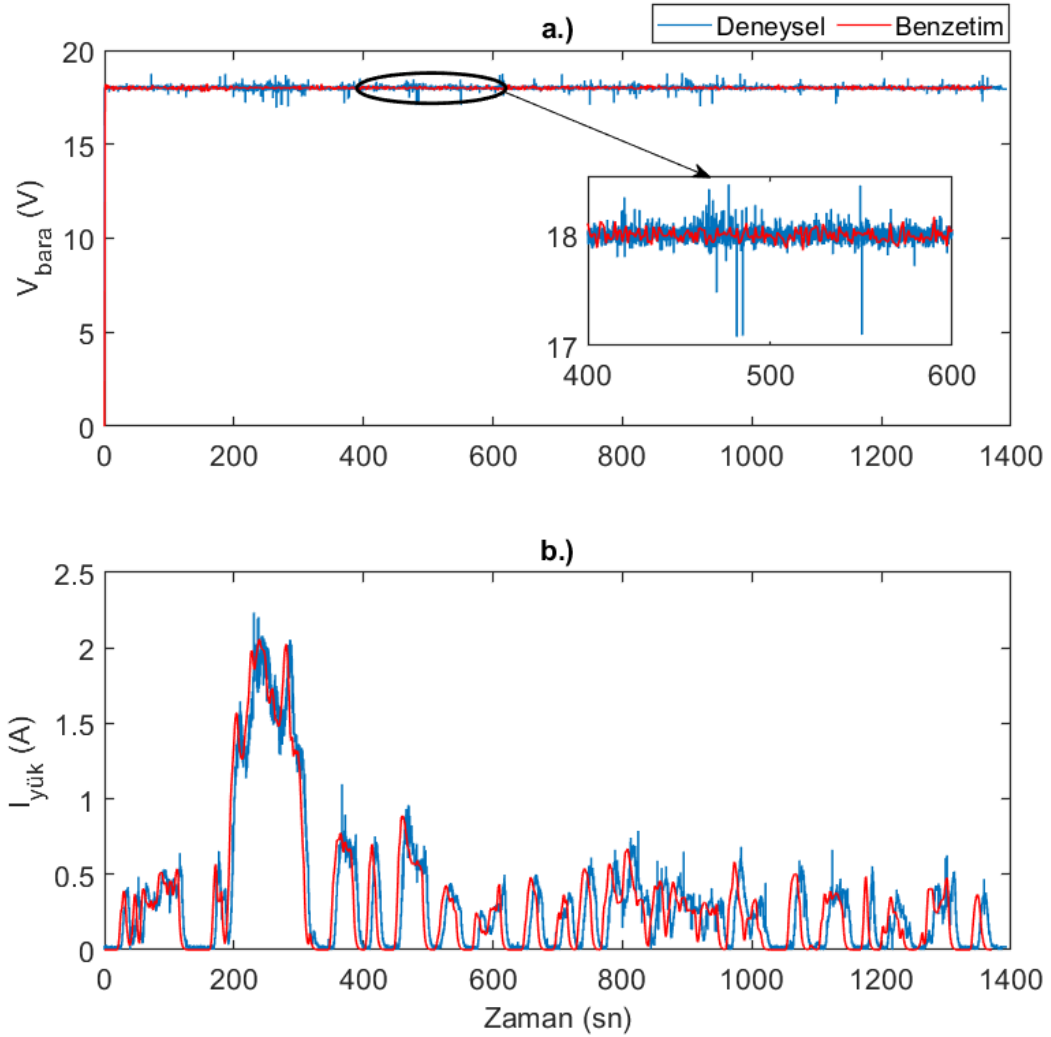


Şekil 2.79. Süperkapasitör deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Süperkapasitör akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 2.79a’da süperkapasitör terminal gerilimi 16,2V seviyelerinden deneysel teste başlatılmış ve sürüş çevrimini yaklaşık 15,04V seviyelerinde tamamlamıştır. Şekil 2.79’daki süperkapasitör giriş akımının benzetim testlerindeki değerine uyum sağladığı görülmektedir. Şekil 2.79c’de süperkapasitör gurubunun şarj doluluk oranı sürüş çevrimini yaklaşık olarak %79,58 doluluk oranı ile tamamlamıştır.

2.15.3. Benzetim ve Deneysel Bulguların Karşılaştırılması

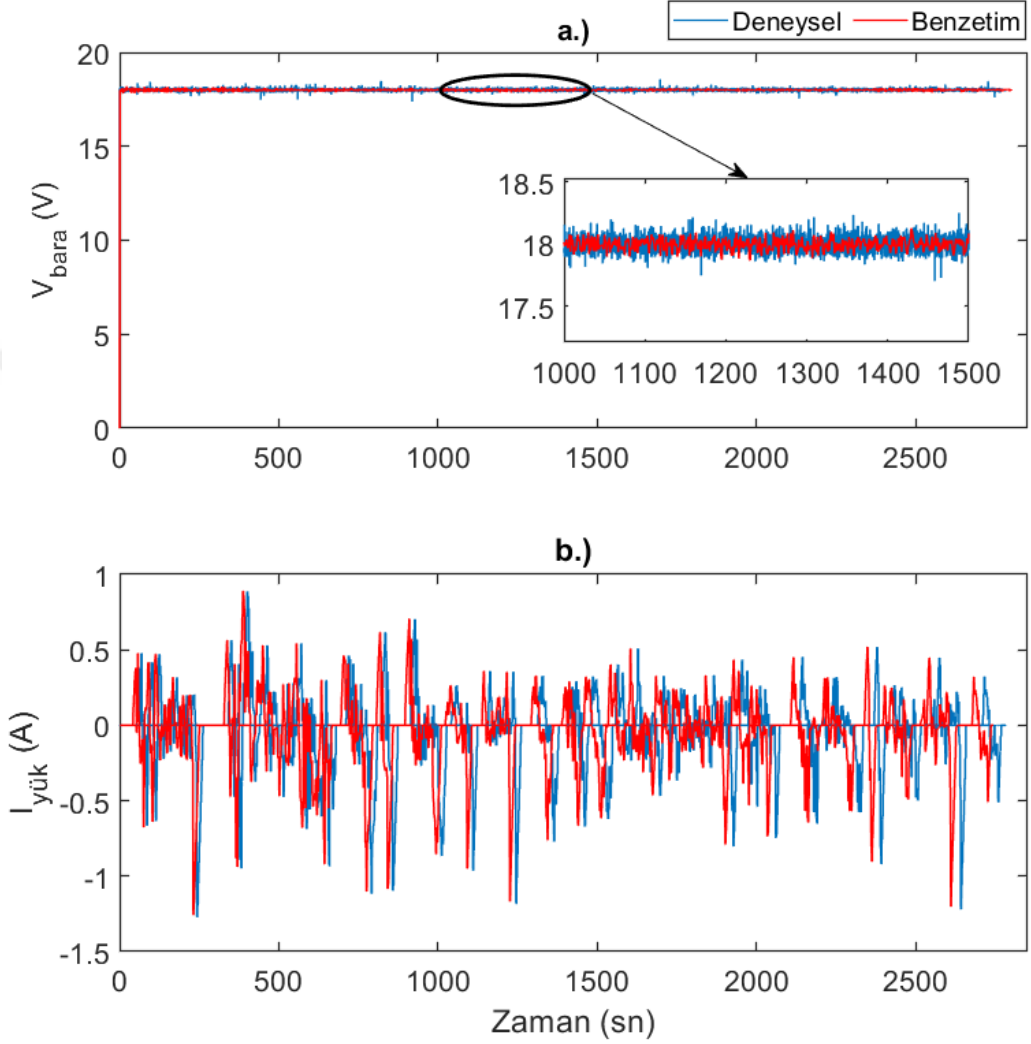
AKF yönteminde batarya gurubuna ait DA bara gerilimlerinin ve yük akımlarının benzetim ve deneysel testlerin karşılaştırılmaları Şekil 2.80’de gösterilmiştir. Şekil 2.80a’da benzetim sonuçlarına kıyasla deneysel sonuçlardaki DA bara geriliminde meydana gelen yüksek salınımların deney ortamındaki elektriksel gürültüden kaynaklandığı söylenebilir. Buna rağmen benzetim ve deneysel sonuçların birbirlerini yakından izlediği görülmektedir.



Şekil 2.80. Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları

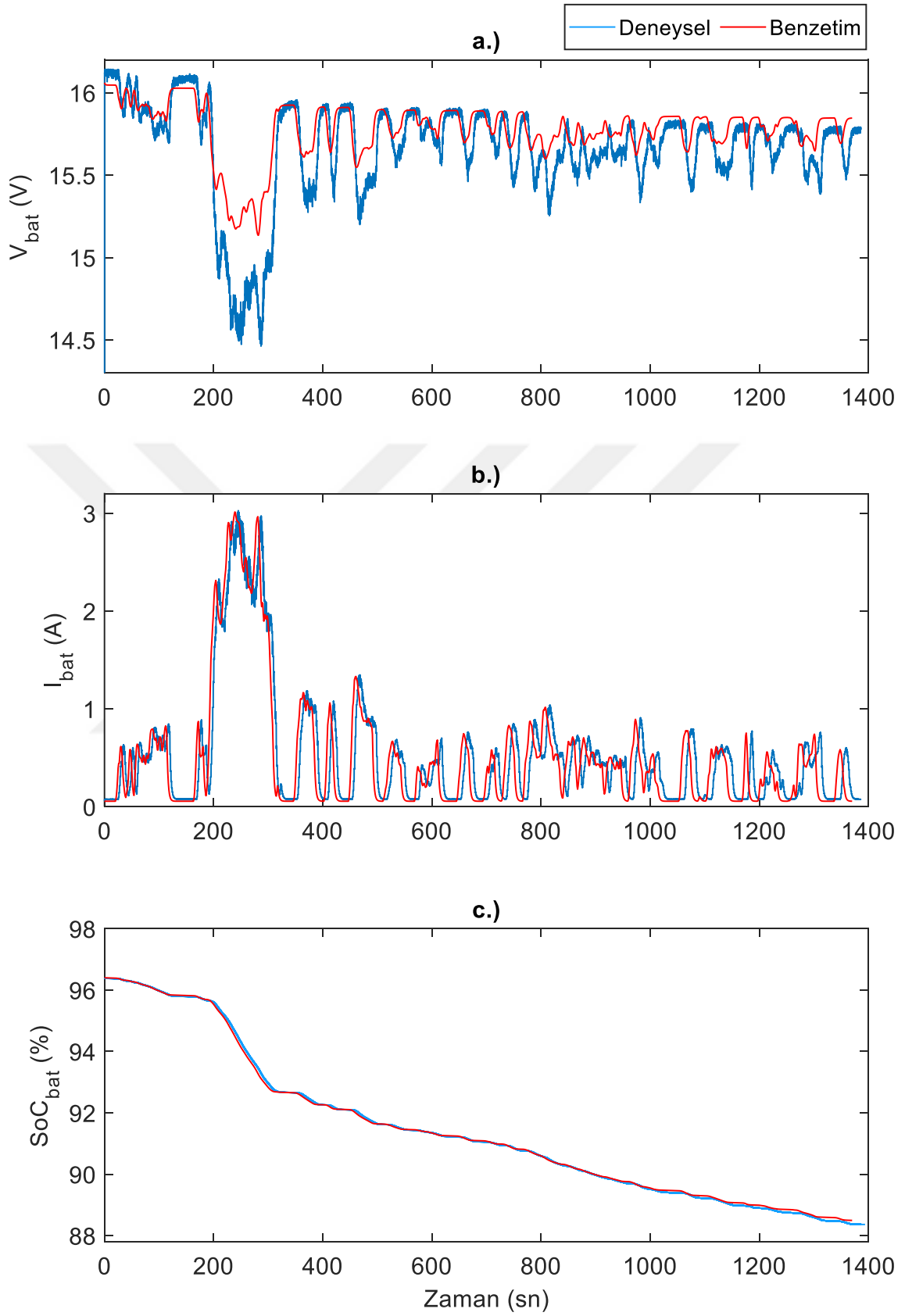
Şekil 2.80b’de benzetim ortamında ölçülen yük akımının, deneysel ortamdaki yük akımına göre sürüş çevrimini daha erken tamamladığı görülmektedir. Bu durum, sürüş çevriminin uzun olmasından dolayı elektronik yük ile bilgisayar arasındaki haberleşme gecikmesinden kaynaklanmaktadır. Sürüş çevrimi 1370sn olmasına rağmen, elektronik yük

bu süreyi 1400sn'de tamamlamıştır. Şekil 2.81'de süperkapasitör gurubuna ait DA bara gerilimlerinin ve yük akımlarının benzetim ve deneysel testlerin karşılaştırılmaları gösterilmiştir.

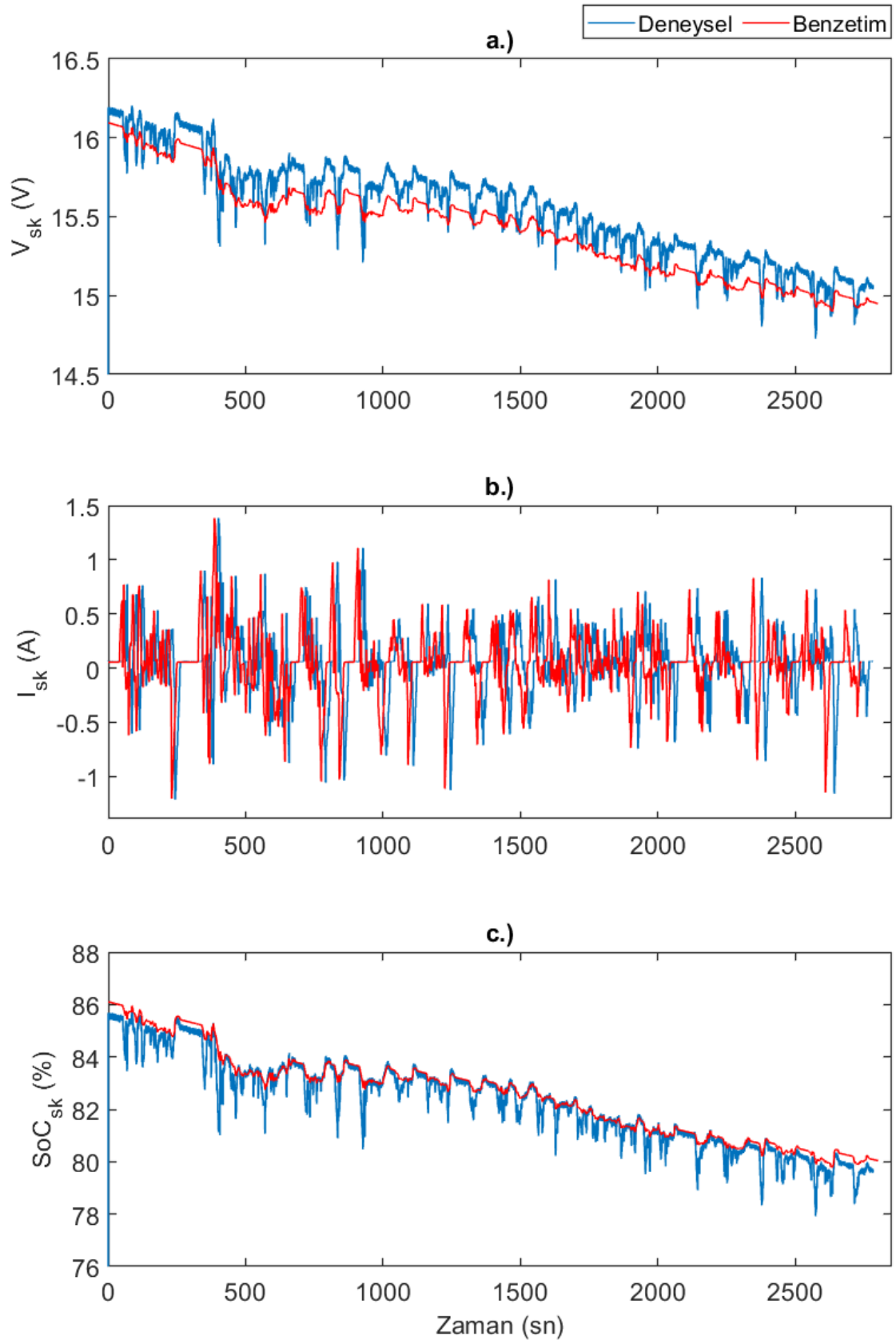


Şekil 2.81. Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları

Batarya gurubuna kıyasla, süperkapasitör gurubuna ait DA bara geriliminin daha az salınıma sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, süperkapasitörlerin güç yoğunluğunun daha yüksek olması ve hızlı akım değişimlerine bataryaya nazaran daha iyi uyum sağlamsıyla açıklanabilir. Şekil 2.82 ve Şekil 2.83 sırasıyla batarya ve süperkapasitör gurubunun terminal gerilimlerinin, giriş akımlarının ve şarj doluluk oranlarının karşılaştırılmasını göstermektedir.



Şekil 2.82. Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Batarya akımları, c.) Şarj doluluk oranları



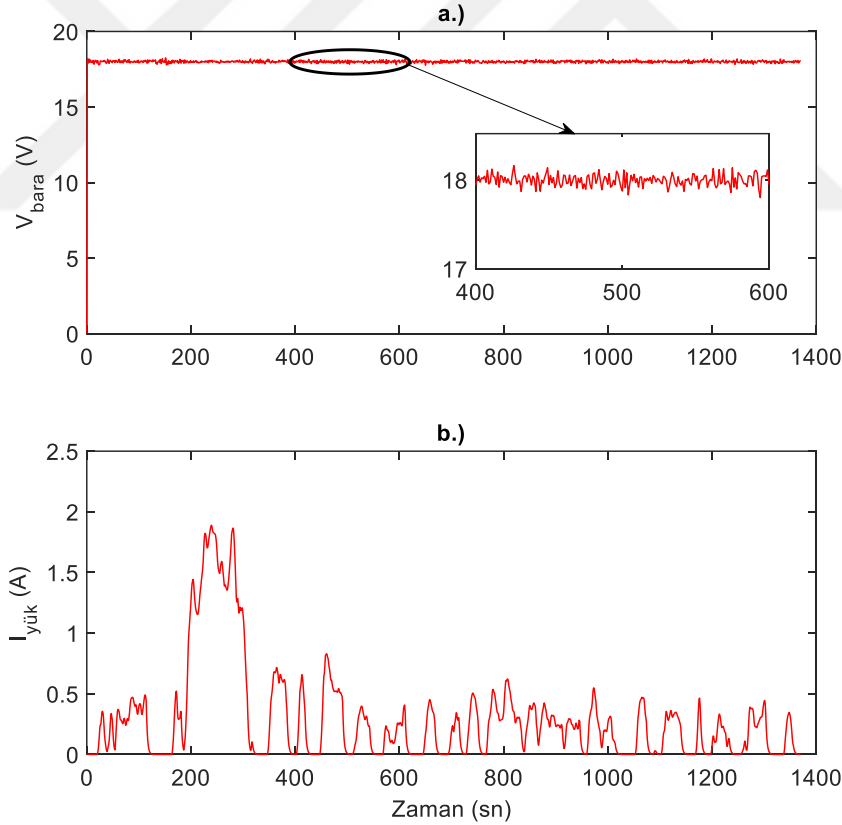
Şekil 2.83. Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Süperkapasitör akımları, c.) Şarj doluluk oranları

2.16. Çift Uyarlanabilir Güç Tahsisinde Elde Edilen Bulgular

Bu bölümde çift uyarlanabilir güç ayırımına göre gerçekleştirilen güç tahsis işlemine ait bulgulara hem benzetim hem de deneysel olarak birinci alt başlık altında yer verilmiştir. Ek olarak benzetim modeli ile deneysel model arasındaki ilişkilerin net olarak ortaya koyulması için ikinci bir alt başlık altında karşılaştırmalara yer verilmiştir.

2.16.1. Batarya Gurubuna Ait Benzetim ve Deneysel Bulgular

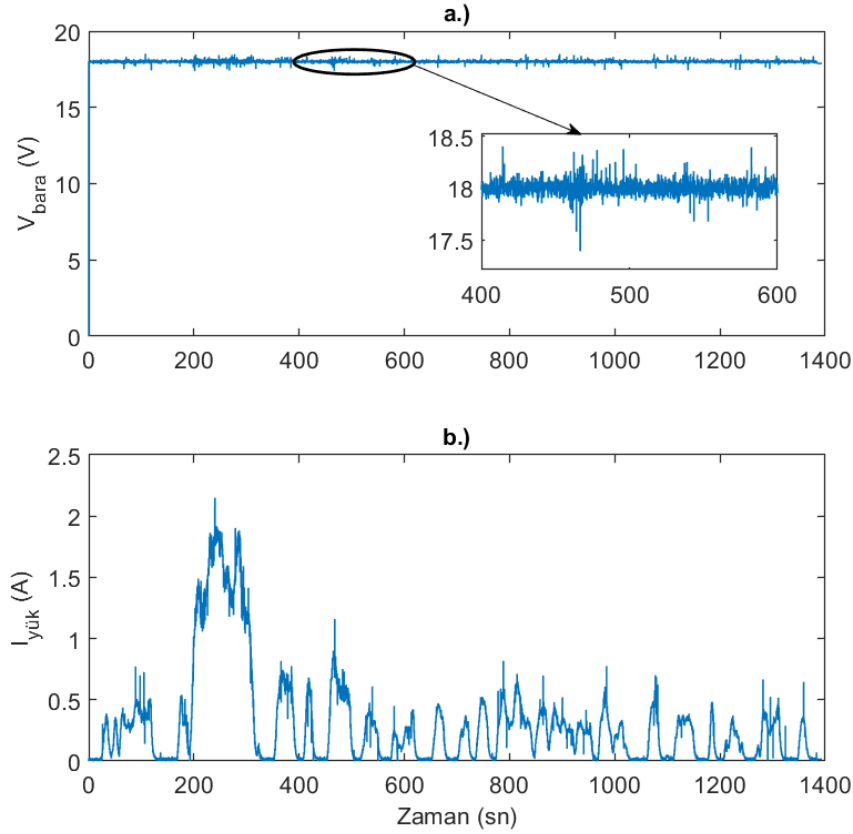
Şekil 2.84 Çift Uyarlanabilir Güç Tahsisi (ÇUGT) yöntemine göre batarya gurubuna ait benzetim sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.84a'da DA bara gerilimi ve aynı grafik içerisinde 400-600sn aralığında bara geriliminin yakınlaştırılmış görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.84. Batarya benzetim sonuçları a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı

Tüm sürüş çevrimi boyunca bara geriliminin, 18V referans bara gerilimine oldukça yakın ve mümkün olduğu kadar az salınımlı olması kaskad denetimin etkisini

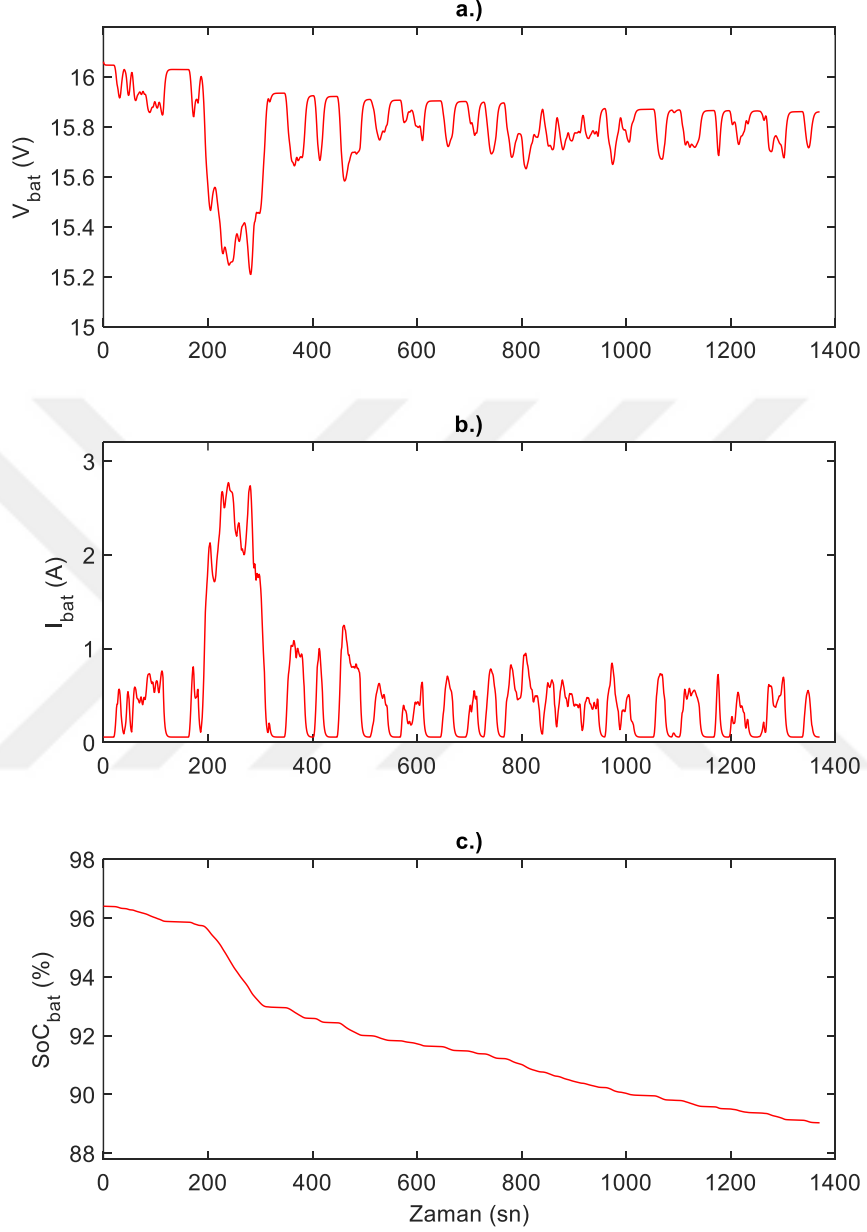
kanıtlamaktadır. Şekil 2.84b sürüş çevrimi boyunca batarya gurubundan temin edilecek akımı göstermektedir. ÇUGT'de batarya gurubunun sağlaması gereken yük akımının maksimum değeri yaklaşık olarak 1,89A ölçülmüştür. Şekil 2.85a ve Şekil 2.85b sırasıyla DA bara geriliminin ve yük akımının deneysel sonuçlarını göstermektedir. Benzetim testlerinde 17,9V ile 18,1V arasında salınan bara gerilimi deneysel testlerde herhangi bir filtre kullanılmadan ölçülmüş ve 17,5V ile 18,5V arasında salınım göstermiştir.



Şekil 2.85. Batarya deneysel sonuçlar a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı

Şekil 2.85b'deki deneysel yük akımının benzetimdeki yük akımıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum EA'nın güç tüketim durumunu modellemek için kullanılan elektronik yükün doğru bir şekilde programlandığını göstermektedir. Sürüş çevrimi süresince benzetim testlerinde batarya terminal gerilimindeki, batarya çıkış akımındaki ve batarya şarj doluluk oranındaki değişim Şekil 2.86'da gösterilmiştir. Şekil 2.86a batarya terminal gerilimindeki değişimi göstermektedir. Yaklaşık olarak 16,2V seviyelerinden başlayan terminal gerilimi, yük akımının maksimum seviyeye ulaşmasıyla 15,2V seviyelerine kadar düşmüş ve sürüş çevrimini yaklaşık 15,86V seviyelerinde tamamlamıştır.

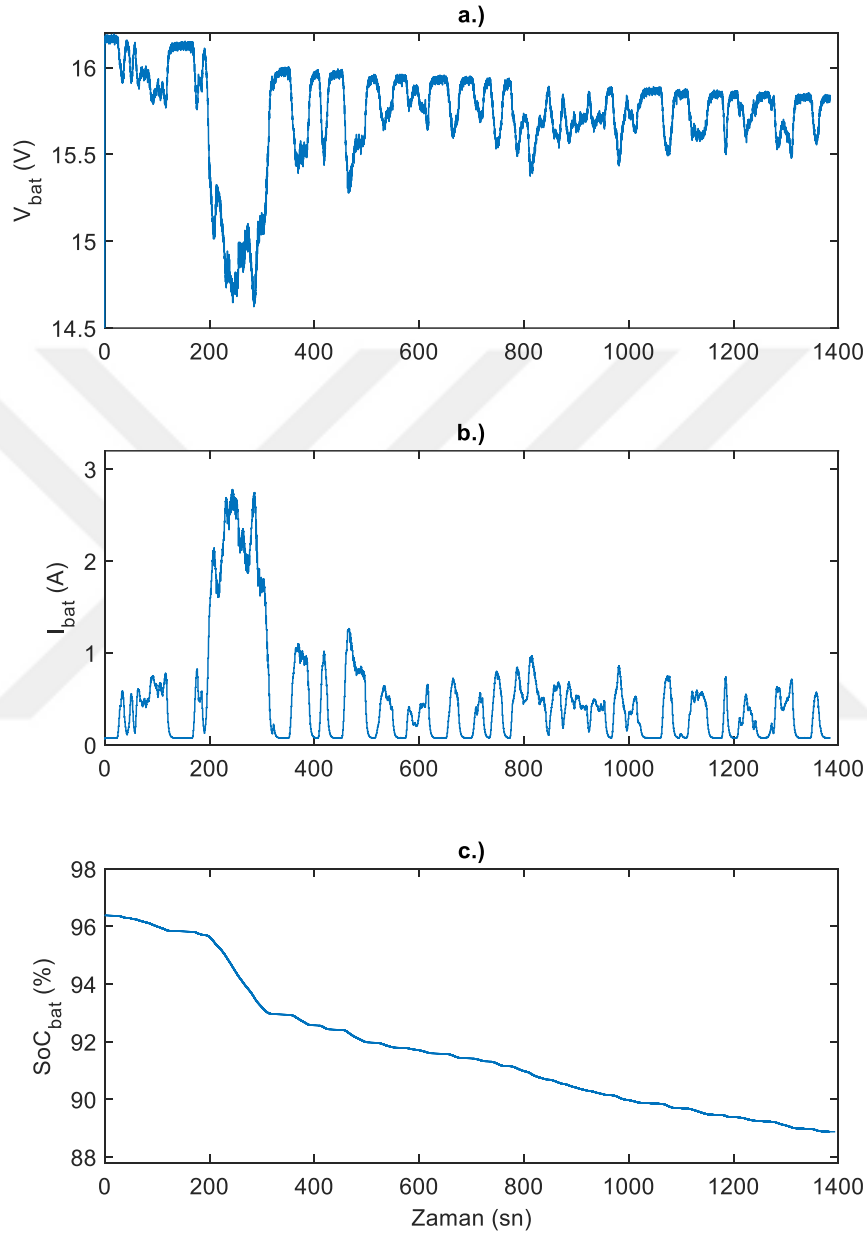
Şekil 2.86b'deki batarya çıkış akımının maksimum değeri, çevirici ve iletim kayıplarından ötürü yaklaşık olarak 2,77A seviyelerinde gerçekleşmiştir.



Şekil 2.86. Batarya benzetim sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Batarya akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 2.86c'deki benzetim testinde bataryanın şarj doluluk oranı sürüş çevrimi sonunda yaklaşık olarak %89,03 seviyelerine kadar düşmüştür. Şekil 2.87 batarya terminal gerilimindeki, batarya çıkış akımındaki ve batarya şarj doluluk oranındaki deneysel test sonuçlarını göstermektedir.

Şekil 2.87a’da yaklaşık 16,2V seviyelerinden deneysel teste başlatılan batarya gurubunda yük akımının maksimum seviyelere ulaşmasıyla terminal gerilimi 14,62V seviyelerine düşmüş ve sürüş çevrimini yaklaşık 15,83V seviyelerinde tamamlamıştır.

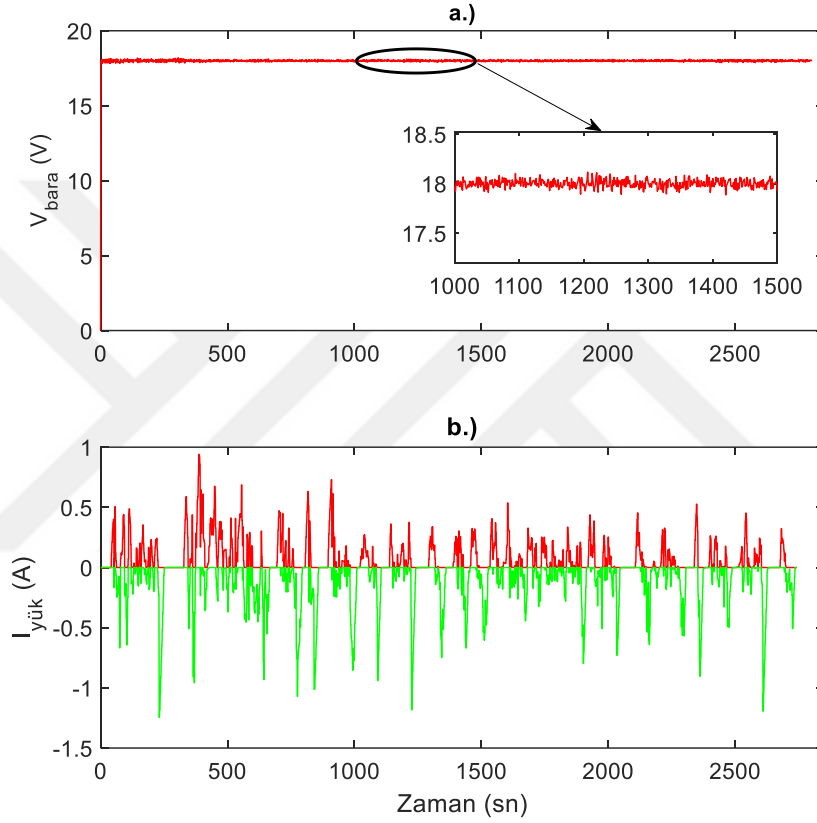


Şekil 2.87. Batarya deneysel sonuçlar a.) Terminal gerilimi, b.) Süperkapasitör akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 87b’de batarya deneysel giriş akımının maksimum değerinin yaklaşık 2,77A seviyelerinde gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 2.87c’de gösterilen batarya şarj doluluk oranı %96 seviyelerinden başlatılmış ve sürüş çevrimi sonunda %88,88 seviyelerine düşmüştür.

2.16.2. Süperkapasitör Gurubuna Ait Benzetim ve Deneyisel Bulgular

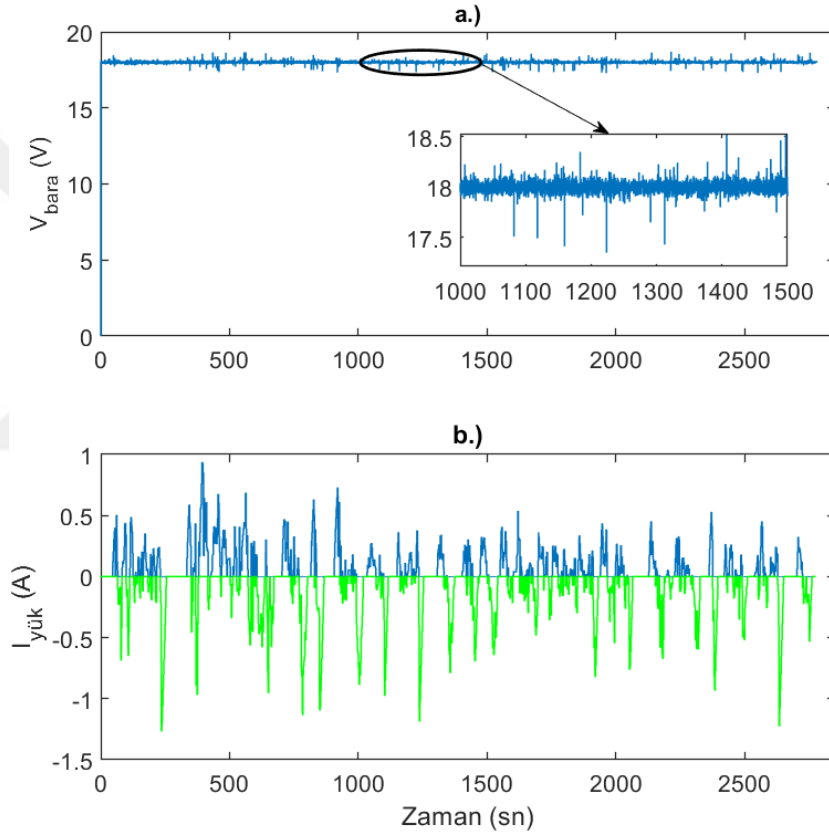
Şekil 2.88 Çift Uyarlanabilir Güç Tahsisi (ÇUGT) yöntemine göre süperkapasitör gurubuna ait benzetim sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.88a'da DA bara gerilimi ve aynı grafik içerisinde 400sn ile 600sn aralığında bara geriliminin yakınlaştırılmış görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.88. Süperkapasitör benzetim sonuçları a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı

Tüm sürüş çevrimi boyunca bara geriliminin, 18V referans bara gerilimine oldukça yakın ve mümkün olduğu kadar az salınımlı olması kaskad denetimin etkisini göstermektedir. Şekil 2.88b sürüş çevrimi boyunca süperkapasitör gurubundan temin edilecek akımı göstermektedir. Şekil 2.88b'de pozitif bölgede gösterilen kırmızı renkli akım, süperkapasitör gurubunun karşılaması gereken akım değerini, yine Şekil2.88b'de negatif bölgede gösterilen yeşil renkli akım ise süperkapasitöre depolanan Geri Kazanımlı Frenleme (GKF) akımını temsil etmektedir. ÇUGT'de süperkapasitör gurubunun sağlaması gereken yük akımının maksimum değeri yaklaşık olarak 0,94A ölçülmüştür. GKF akımının maksimum seviyesi 1,24A civarındadır. Şekil 2.89a ve Şekil2.89b sırasıyla DA bara geriliminin ve yük

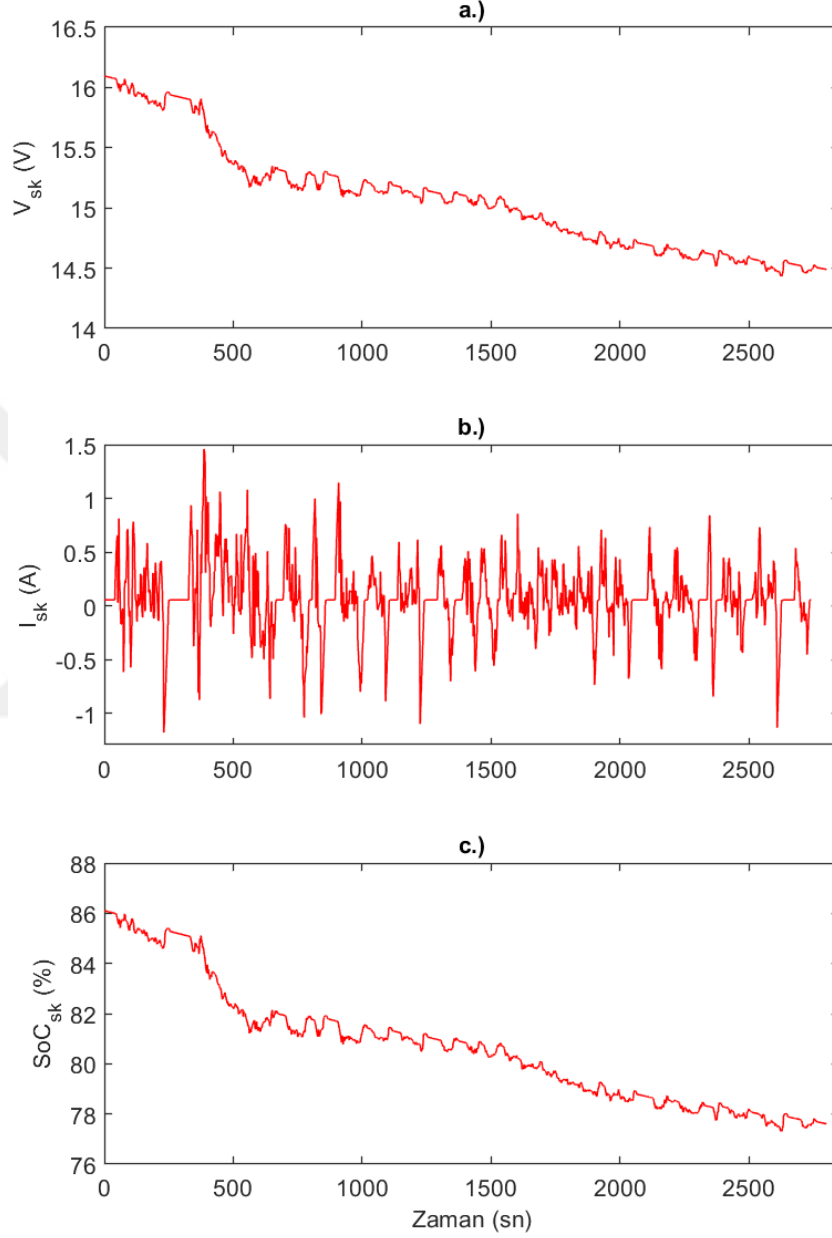
akımının deneysel sonuçlarını göstermektedir. Benzetim testlerinde 17,9V ile 18,1V arasında salınan bara gerilimi deneysel testlerde herhangi bir filtre kullanılmadan ölçülmüş ve yaklaşık olarak 17,5V ile 18,5V arasında salınım göstermiştir. Şekil 2.89b’de yük akımının deneysel olarak üretilmesinde pozitif yönlü akımlar elektronik yük ile ve negatif yönlü akımlar DA güç kaynağı ile programlanmıştır. Bu işlemin gerçekleştirilmesinde çevirici çıkışına bağlanan elektronik yük ile süperkapasitörden pozitif yönlü akımlar çekilirken, doğrudan süperkapasitör terminallerine bağlanan DA güç kaynağı ile negatif yönlü GKF akımları süperkapasitöre aktarılmıştır.



Şekil 2.89. Süperkapasitör deneysel sonuçlar a.) Bara gerilimi, b.) Yük akımı

Şekil 2.90’da ÇUGT yöntemine göre süperkapasitör gurubuna ait terminal geriliminin, yük akımının ve şarj doluluk oranının değişimi gösterilmiştir. Şekil 2.90a’da süperkapasitör terminal gerilimi yaklaşık olarak 16,2V seviyelerinden benzetim testine başlatılmış ve sürüş çevrimi sonunda bu değer 14,49V seviyelerine düşmüştür. Görüldüğü gibi süperkapasitör terminal gerilimi batarya terminal geriliminden farklı olarak zaman zaman azalma ve artma eğilimindedir. Bunun sebebi GKF akımlarının tamamının süperkapasitör gurubuna yönlendirilmesidir. Şekil 2.90b’de benzetim testlerinde ölçülen süperkapasitör giriş akımı

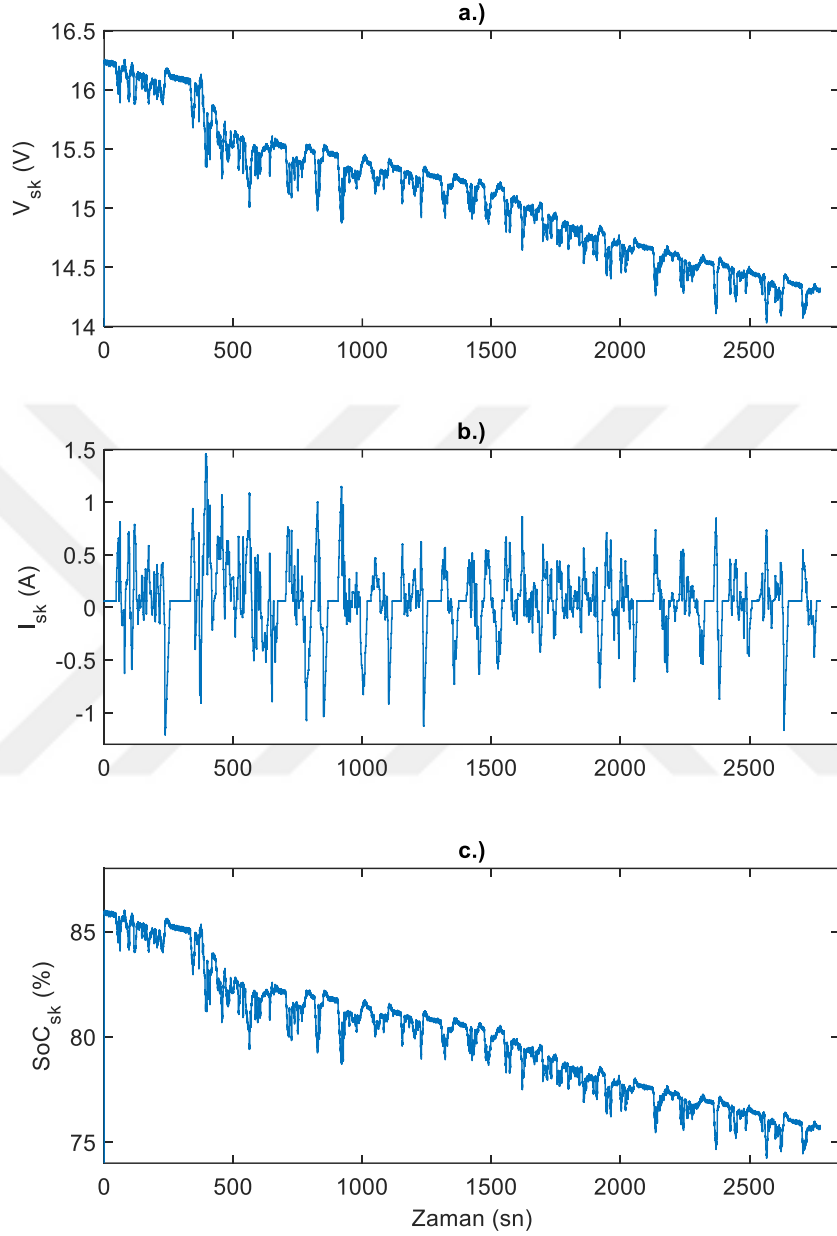
gösterilmiştir. Süperkapasitör gurubunda yük ve GKF akımları hem benzetim hem de deneysel olarak ayrı ayrı tasarlanmış olsa da süperkapasitör giriş akımı bu iki akımın toplamı olacak şekilde gösterilmiştir. Giriş akımının maksimum değeri 1,457A seviyesindedir.



Şekil 2.90. Süperkapasitör benzetim sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Süperkapasitör akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 2.90c’de %86 seviyelerinden benzetim testine başlatılan süperkapasitör gurubunun şarj doluluk oranı sürüş çevrimini yaklaşık olarak %77,6 doluluk oranı ile tamamlamıştır. Yaklaşık 500sn ile 1500sn aralığında GKF akımlarının etkisiyle süperkapasitör gurubunun şarj doluluk oranının hemen hemen aynı kaldığı görülmektedir.

Şekil 2.91 ÇUGT yöntemine göre gerçekleştirilen deneylerde süperkapasitör gurubuna ait terminal geriliminin, giriş akımının ve şarj doluluk oranının değişimini göstermektedir.

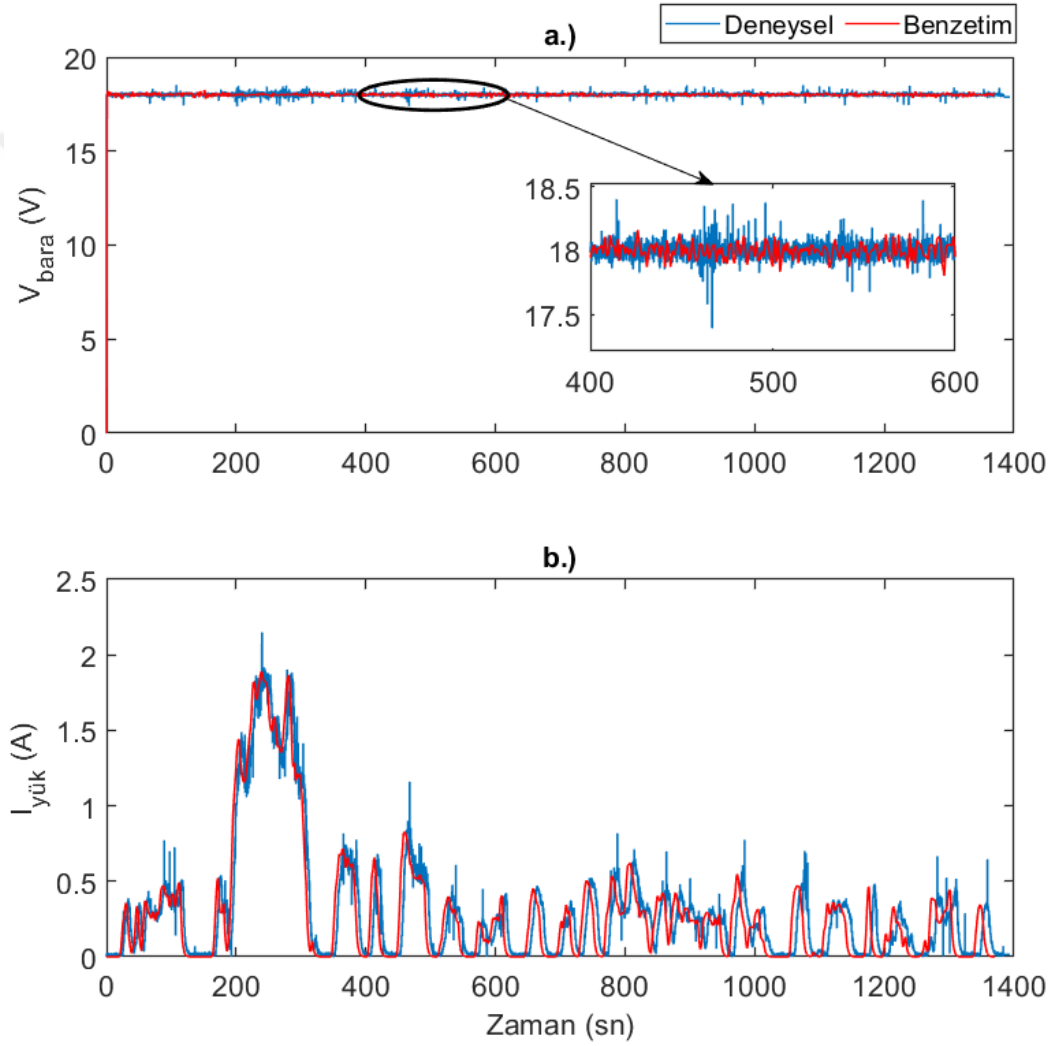


Şekil 2.91. Süperkapasitör deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimi, b.) Süperkapasitör akımı, c.) Şarj doluluk oranı

Şekil 2.91a’da süperkapasitör terminal gerilimi 16,2V seviyelerinden deneysel teste başlatılmış ve sürüş çevrimini yaklaşık 14,3V seviyelerinde tamamlamıştır. Şekil 2.91’deki süperkapasitör giriş akımının benzetim testlerindeki değerine uyum sağladığı görülmektedir. Şekil 2.91c’de süperkapasitör gurubunun şarj doluluk oranı sürüş çevrimini yaklaşık olarak %75,64 doluluk oranı ile tamamlamıştır.

2.16.3. Benzetim ve Deneysel Bulguların Karşılaştırılması

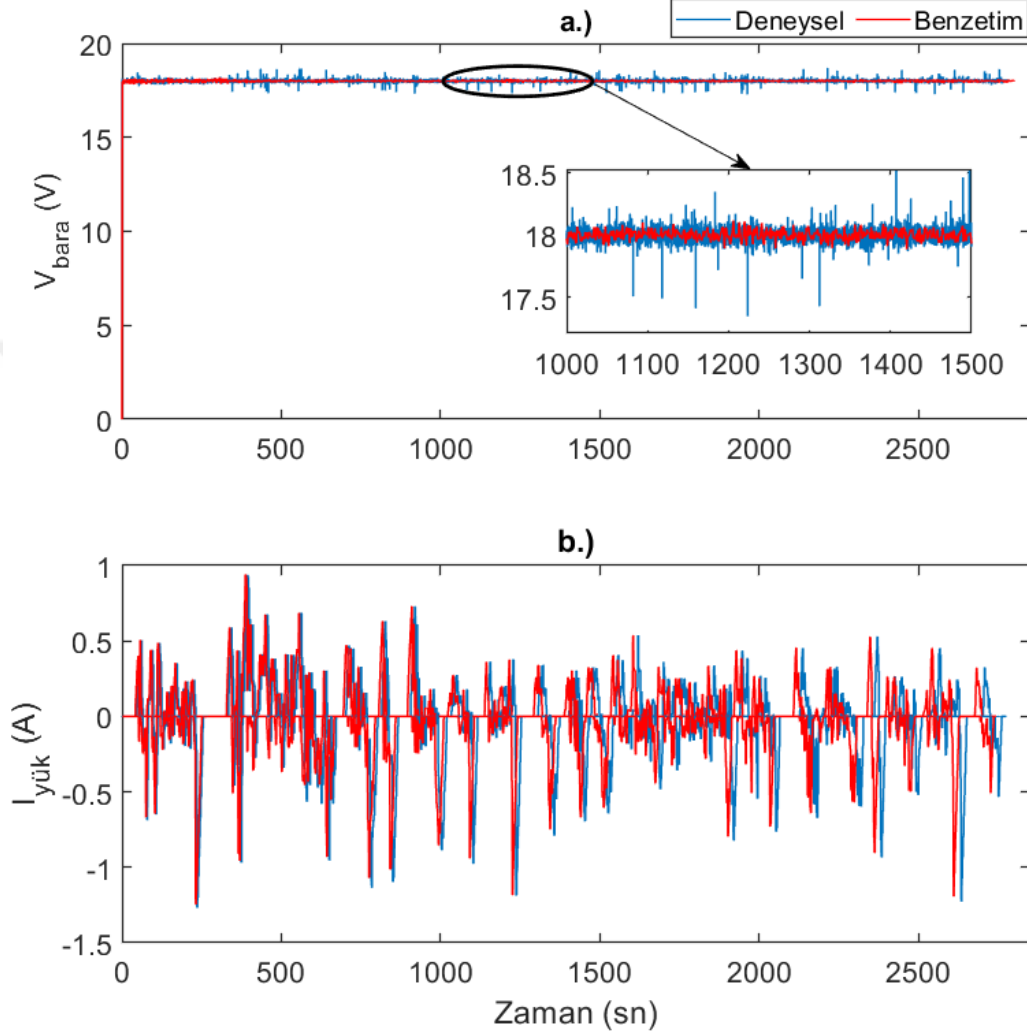
ÇUGT yönteminde batarya gurubuna ait DA bara gerilimlerinin ve yük akımlarının benzetim ve deneysel testlerin karşılaştırılmaları Şekil 2.92’de gösterilmiştir. Şekil 2.92a’da benzetim sonuçlarına kıyasla deneysel sonuçlardaki DA bara geriliminde meydana gelen yüksek salınımların deney ortamındaki elektriksel gürültüden kaynaklandığı söylenebilir. Buna rağmen benzetim ve deneysel sonuçların birbirlerini yakından izlediği görülmektedir.



Şekil 2.92. Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları

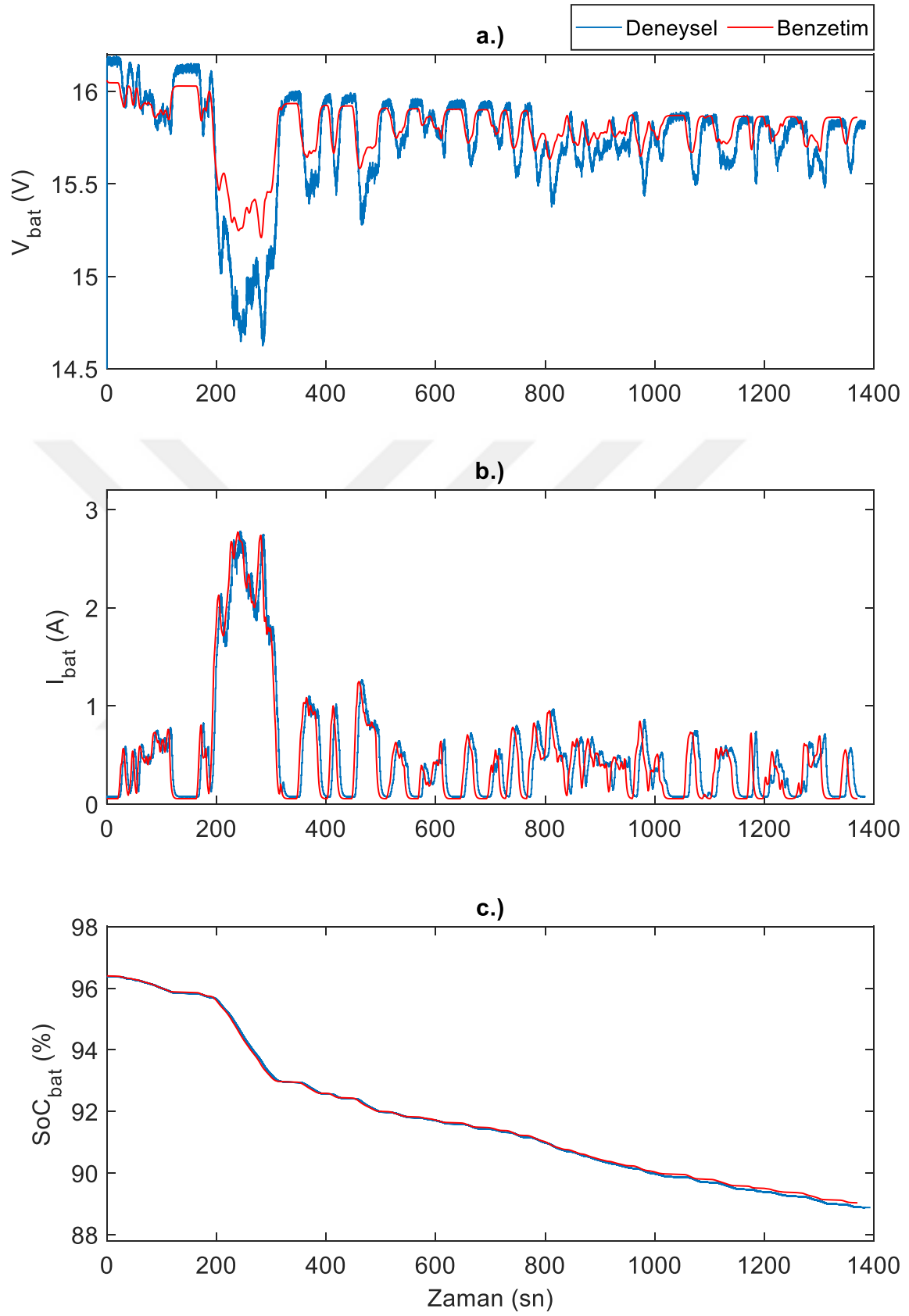
Şekil 2.92b’de benzetim ortamında ölçülen yük akımının, deneysel ortamdaki yük akımına göre sürüş çevrimini daha erken tamamladığı görülmektedir. Bu durum, sürüş çevriminin uzun olmasından dolayı elektronik yük ile bilgisayar arasındaki haberleşme gecikmesinden kaynaklanmaktadır. Sürüş çevrimi 1370sn olmasına rağmen, elektronik yük

bu süreyi 1400sn'de tamamlamıştır. Şekil 2.93'de süperkapasitör gurubuna ait DA bara gerilimlerinin ve yük akımlarının benzetim ve deneysel testlerin karşılaştırılmaları gösterilmiştir.

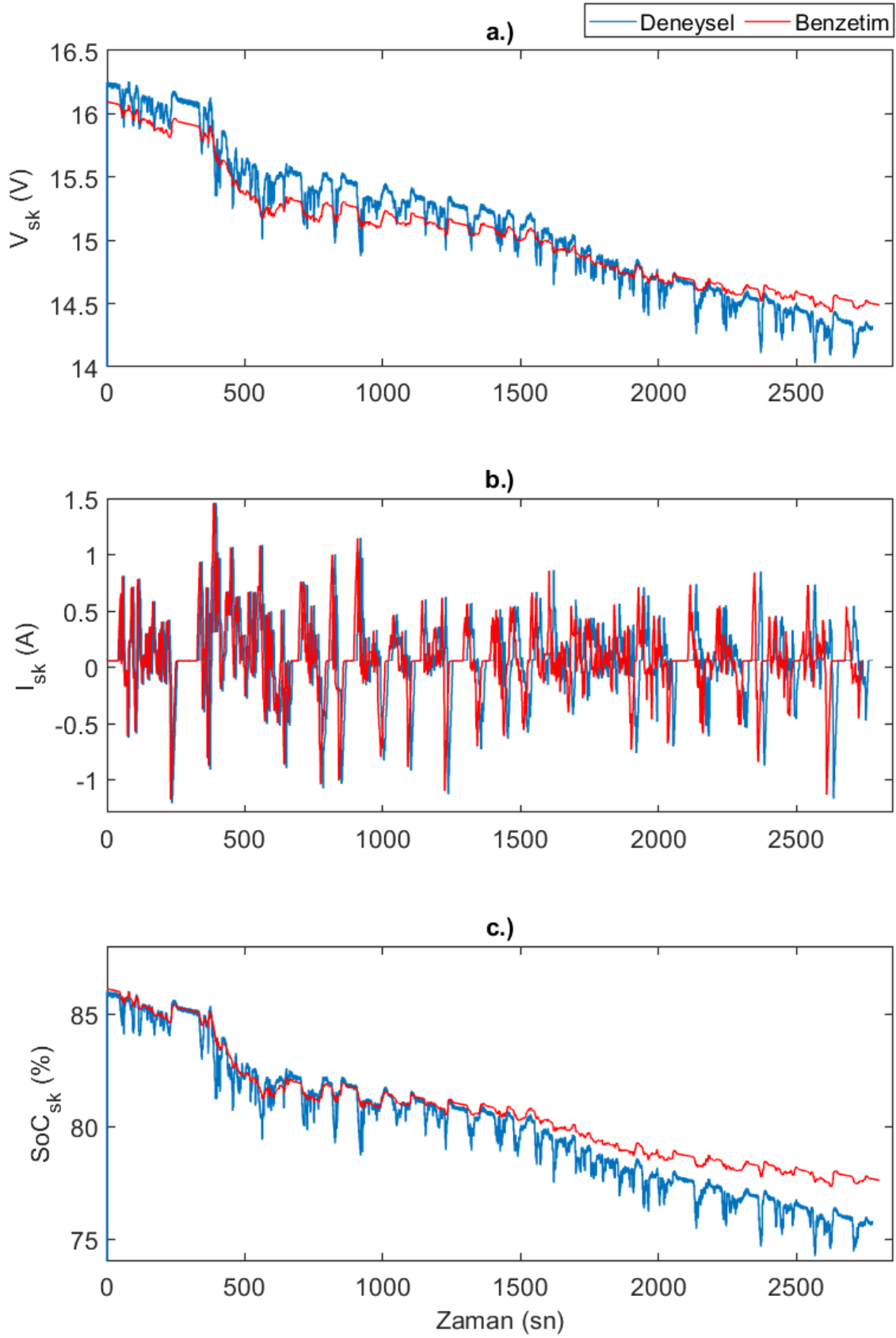


Şekil 2.93. Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları

Batarya gurubuna kıyasla, süperkapasitör gurubuna ait DA bara geriliminin daha az salınıma sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, süperkapasitörlerin güç yoğunluğunun daha yüksek olması ve hızlı akım değişimlerine bataryaya nazaran daha iyi uyum sağlamsıyla açıklanabilir. Şekil 2.94 ve Şekil 2.95 sırasıyla batarya ve süperkapasitör gurubunun terminal gerilimlerinin, giriş akımlarının ve şarj doluluk oranlarının karşılaştırılmasını göstermektedir.



Şekil 2.94. Batarya benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Batarya akımları, c.) Şarj doluluk oranları

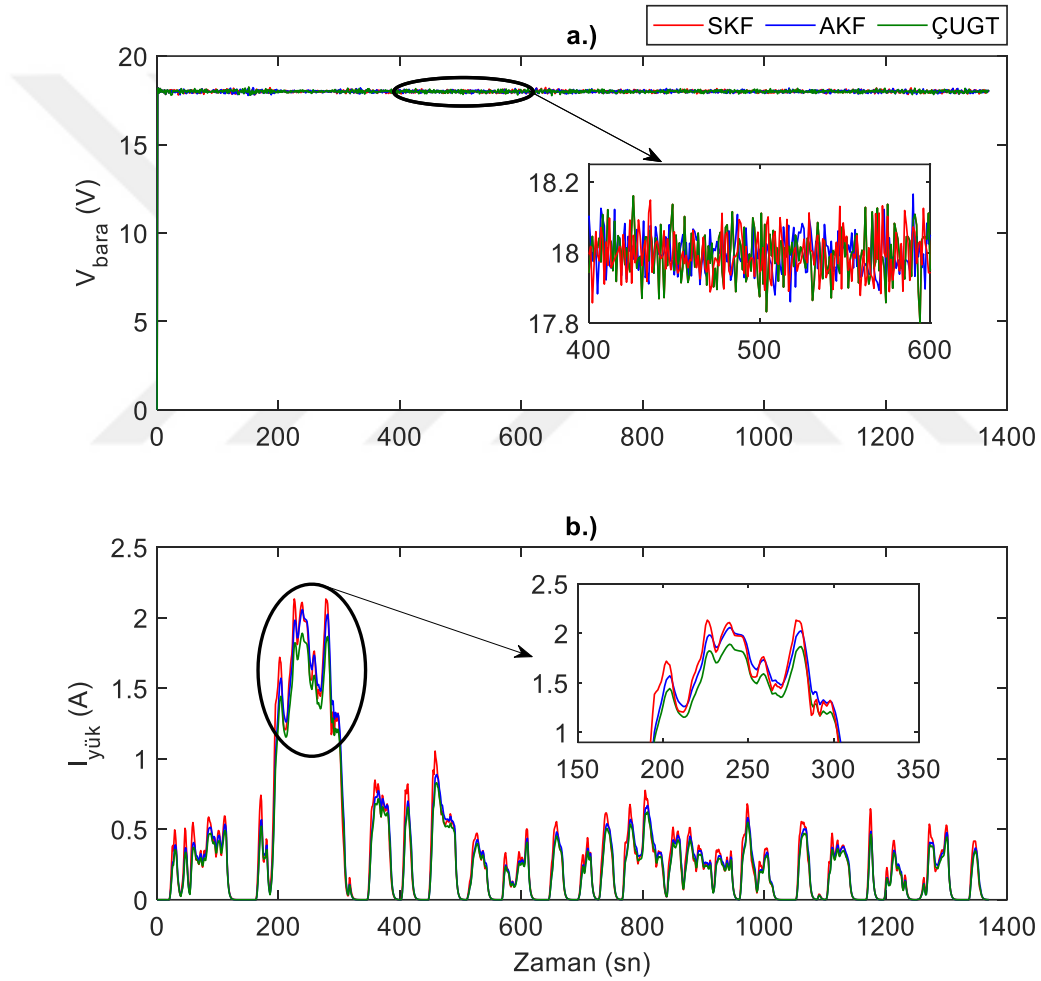


Şekil 2.95. Süperkapasitör benzetim ve deneysel sonuçları a.) Terminal gerilimleri, b.) Süperkapasitör akımları, c.) Şarj doluluk oranları

2.17. Enerji Yönetim Sistemlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, Bölüm 2.14’de, Bölüm 2.15’de ve Bölüm 2.16’da benzetim ve deneysel bulguları verilen enerji yönetim sistemlerinin karşılaştırılmalarına yer verilmiştir.

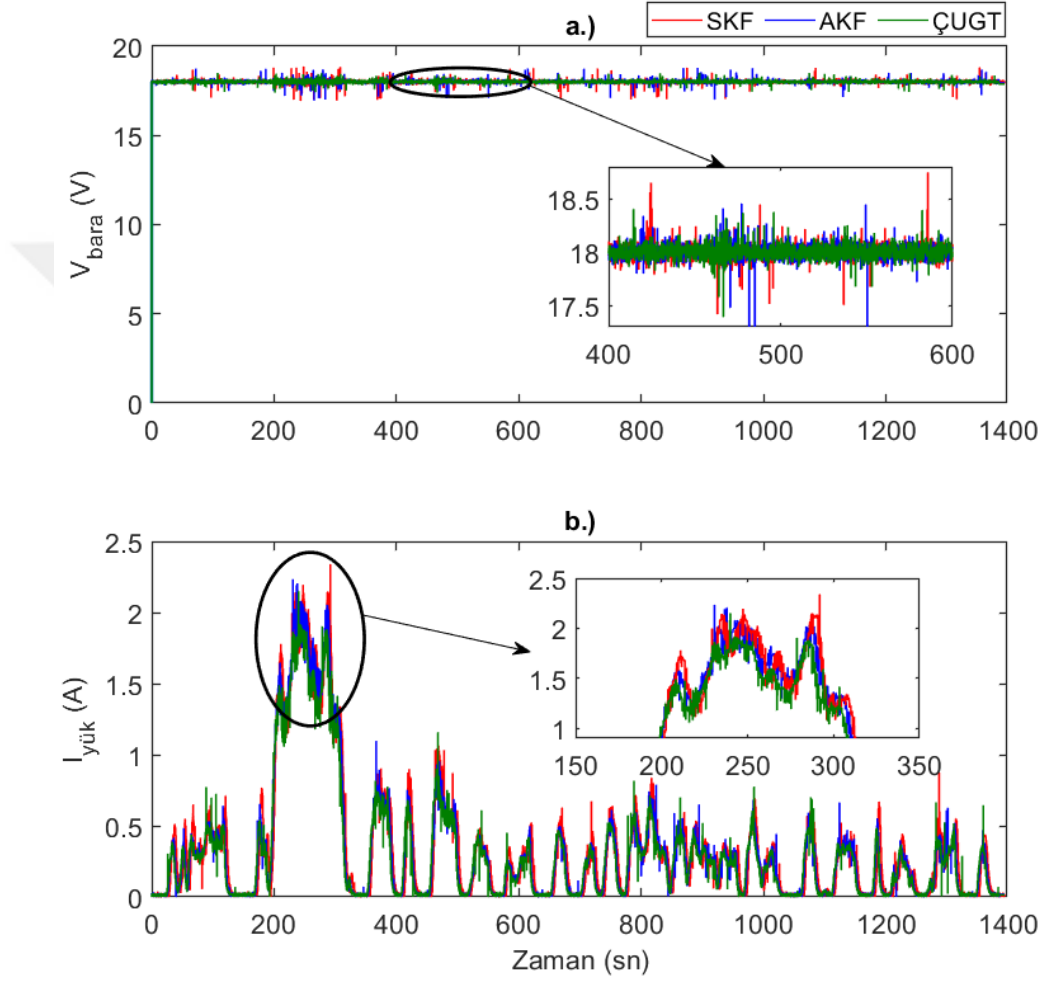
Şekil 2.96’da SKF, AKF ve ÇUGT yöntemlerine göre batarya gurubu için gerçekleştirilen benzetim sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Her üç EYS’de Şekil 2.96a’da gösterilen DA bara gerilimlerinin referans değeri yakından takip ettiği görülmektedir. Dolayısıyla bara gerilimlerinin aynı olduğu söylenebilir.



Şekil 2.96. EYS’lerde batarya gurubuna ait benzetim sonuçlarının karşılaştırılması a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları

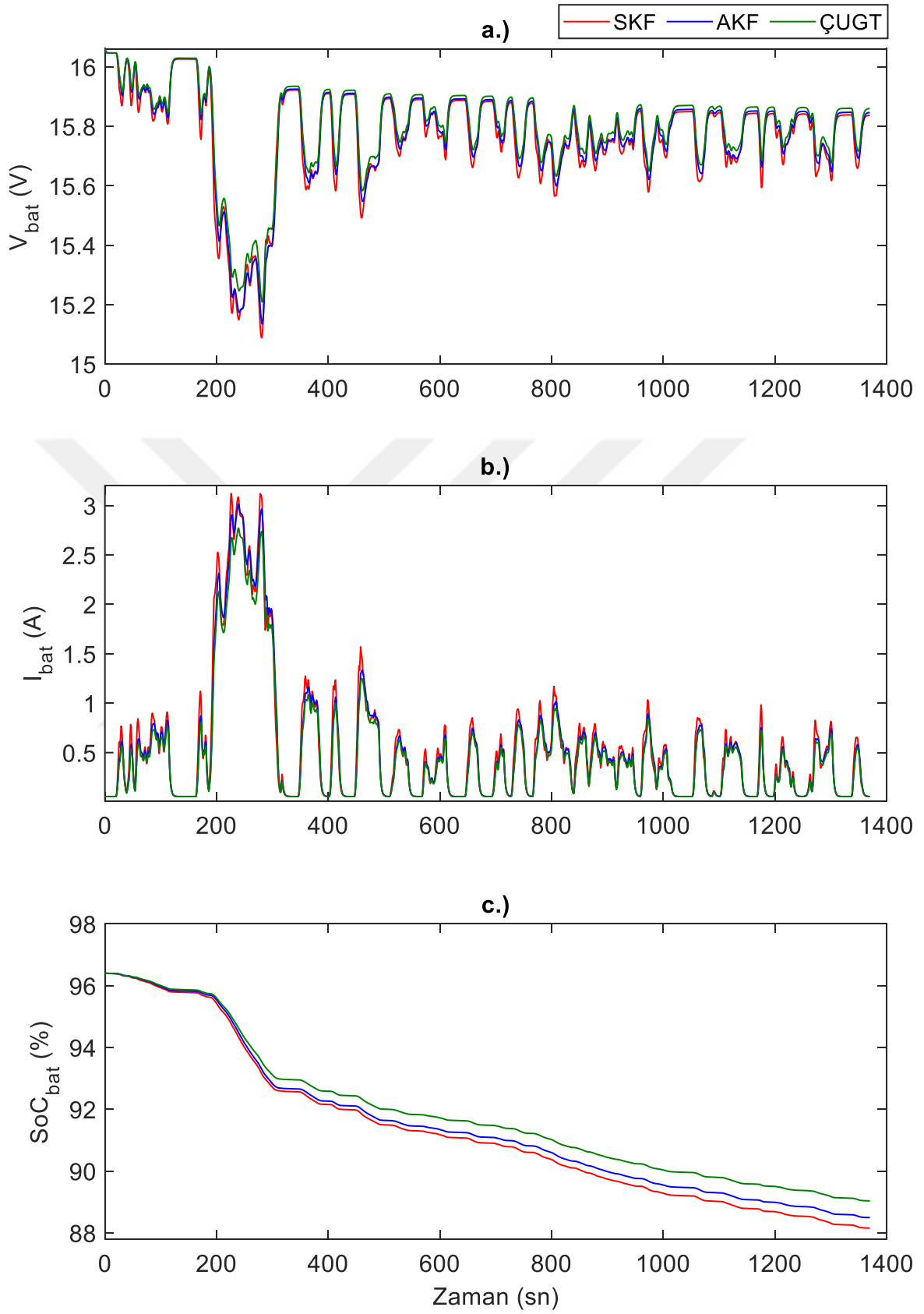
Şekil 2.96b’de SKF, AKF ve ÇUGT teknikleri ile ayrıştırılan yük akımlarının benzetim sonuçları gösterilmiştir. Aynı grafik içerisinde yük akımlarının maksimum değerlerine ulaştığı 150-350sn aralığının yakınlştırılmış görüntüsü gösterilmiştir. Batarya

gurubundan temin edilecek yük akımları incelendiğinde en yüksek yük akımının SKF tekniğinde olduğu ve en düşük yük akımının ise ÇUGT tekniğinde olduğu görülmektedir. Bu durumda ÇUGT tekniğinin aynı koşullar altında diğer tekniklere göre bataryadan daha az akım çekmek suretiyle batarya çevrim ömrünü uzamasına katkıda bulunacağı söylenebilir.

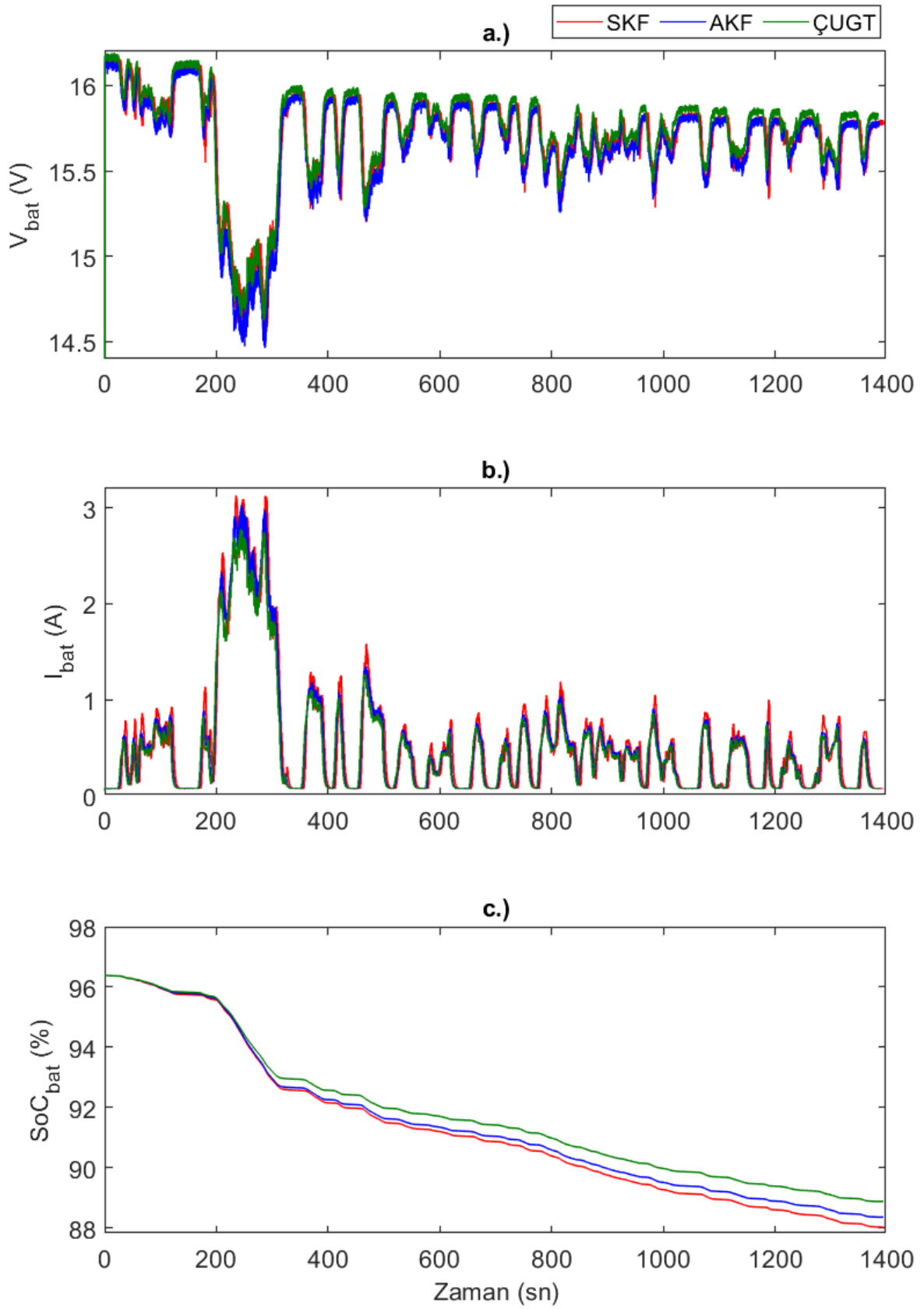


Şekil 2.97. EYS’lerde batarya gurubuna ait deneysel sonuçların karşılaştırılması a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları

Şekil 2.97’de SKF, AKF ve ÇUGT yöntemlerine göre batarya gurubu için gerçekleştirilen deneysel sonuçların karşılaştırılması gösterilmiştir. Deneysel sonuçlarda Şekil 2.97a’da gösterilen bara gerilimindeki farklılığı oldukça küçük olduğu söylenebilir. Şekil 2.97b’deki deneysel yük akımı sonuçlarının benzetim sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

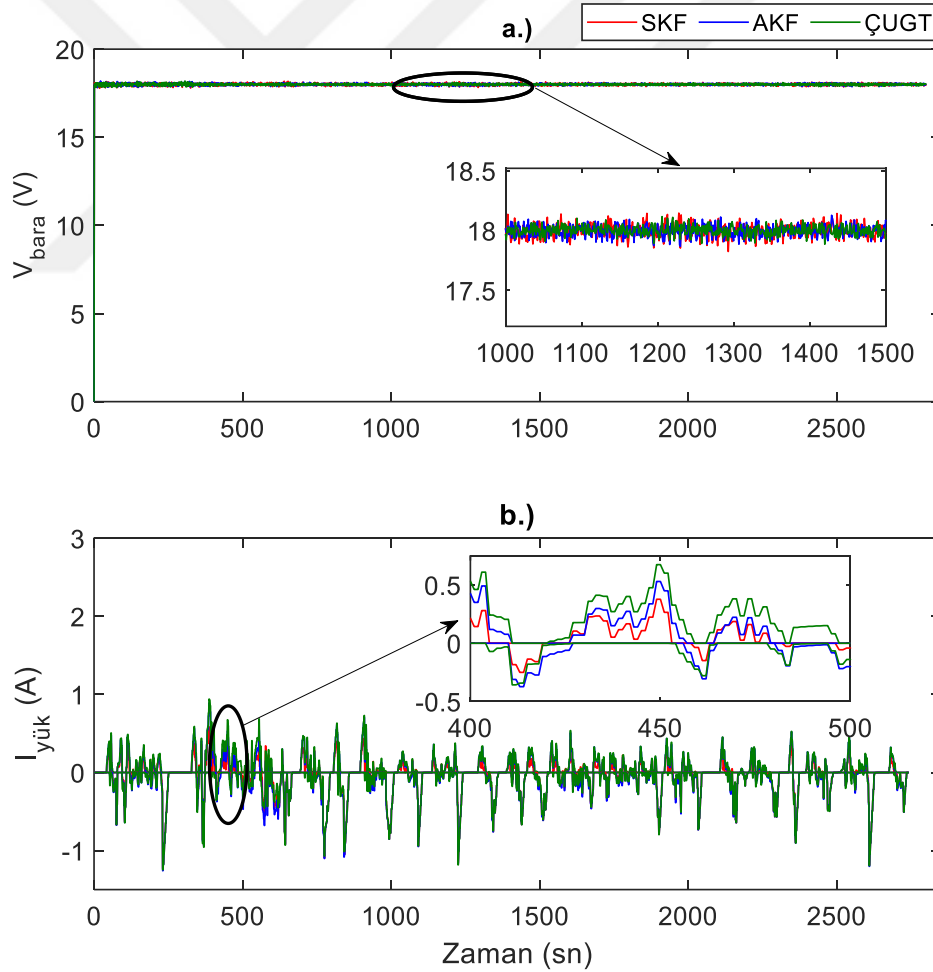


Şekil 2.98. EYS'lerde batarya gurubuna ait benzetim sonuçlarının karşılaştırılması a.) Terminal gerilimleri, b.) Batarya akımları, c.) Şarj doluluk oranları



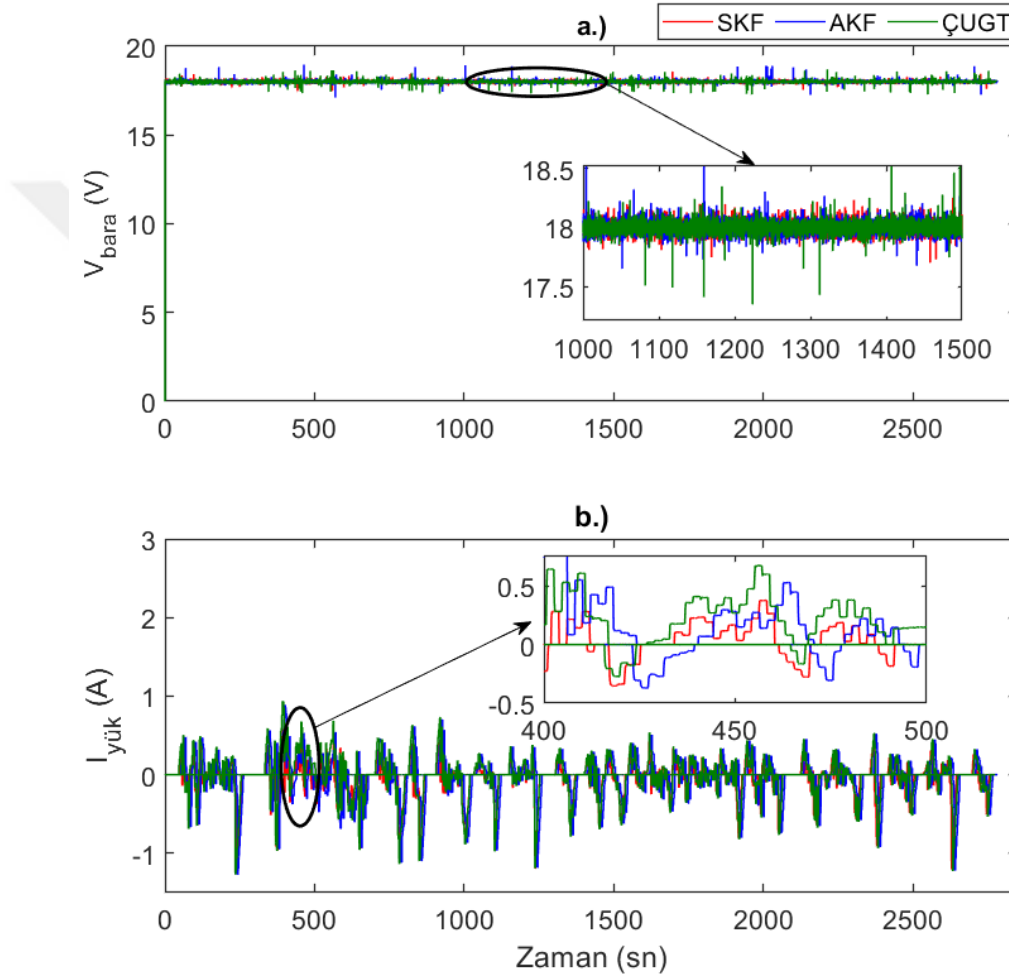
Şekil 2.99. EYS'lerde batarya gurubuna ait deneysel sonuçların karşılaştırılması a.) Terminal gerilimleri, b.) Batarya akımları, c.) Şarj doluluk oranları

Şekil 2.98 ve Şekil 2.99’da batarya gurubuna ait sırasıyla terminal gerilimlerinin, çıkış akımlarının ve şarj doluluk oranlarının benzetim ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Benzetim ve deneysel sonuçlar incelendiğinde SKF tekniğinde meydana gelen terminal gerilimi düşümünün diğer tekniklere kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi SKF tekniğinde bataryanın karşılaması gereken akımların diğer EYS’lere göre daha fazla olmasıdır. Benzer şekilde SKF tekniğinde gerçekleştirilen güç paylaşımında batarya gurubunun yük akımının karşılanması için daha fazla katkıda bulunması sebebiyle şarj doluluk oranı diğer EYS’lere kıyasla daha fazla azalmıştır. Bunun sonucu olarak SKF tekniği ile gerçekleştirilen EYS’lerde bataryanın çevrim ömrü daha kısa sürede tamamlayacağı söylenebilir. Şekil 2.100’de süperkapasitör gurubuna ait bara gerilimlerinin ve yük akımlarının benzetim sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmiştir.



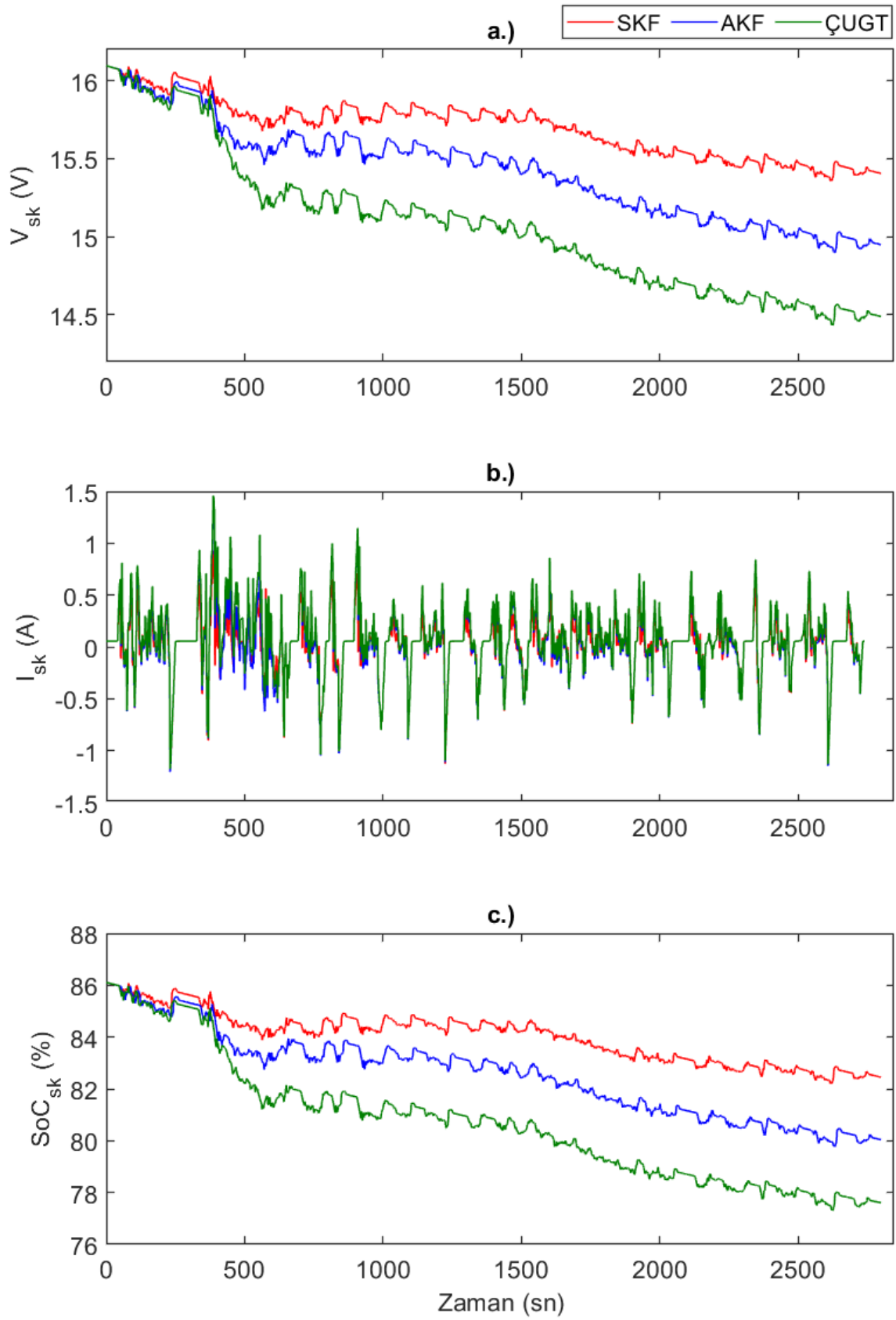
Şekil 2.100. EYS’lerde süperkapasitör gurubuna ait benzetim sonuçlarının karşılaştırılması
a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları

Her üç EYS’de DA bara geriliminin referans değeri yakından takip ettiği görülmektedir. İncelenen EYS’ler ile gerçekleştirilen yük paylaşımında yük akımının karşılanması için en yüksek katkının ÇUGT tekniği ile sağlanabildiği görülmektedir. Bu sebeple ÇUGT tekniği batarya gurubunun daha yüksek doluluk oranıyla sürüş çevrimini tamamlanmasını sağlamıştır. Şekil 2.100b’den görüldüğü gibi gerekli yük akımının sağlanmasında ÇUGT tekniğinde süperkapasitör gurubu daha fazla katkıda bulunmuştur.

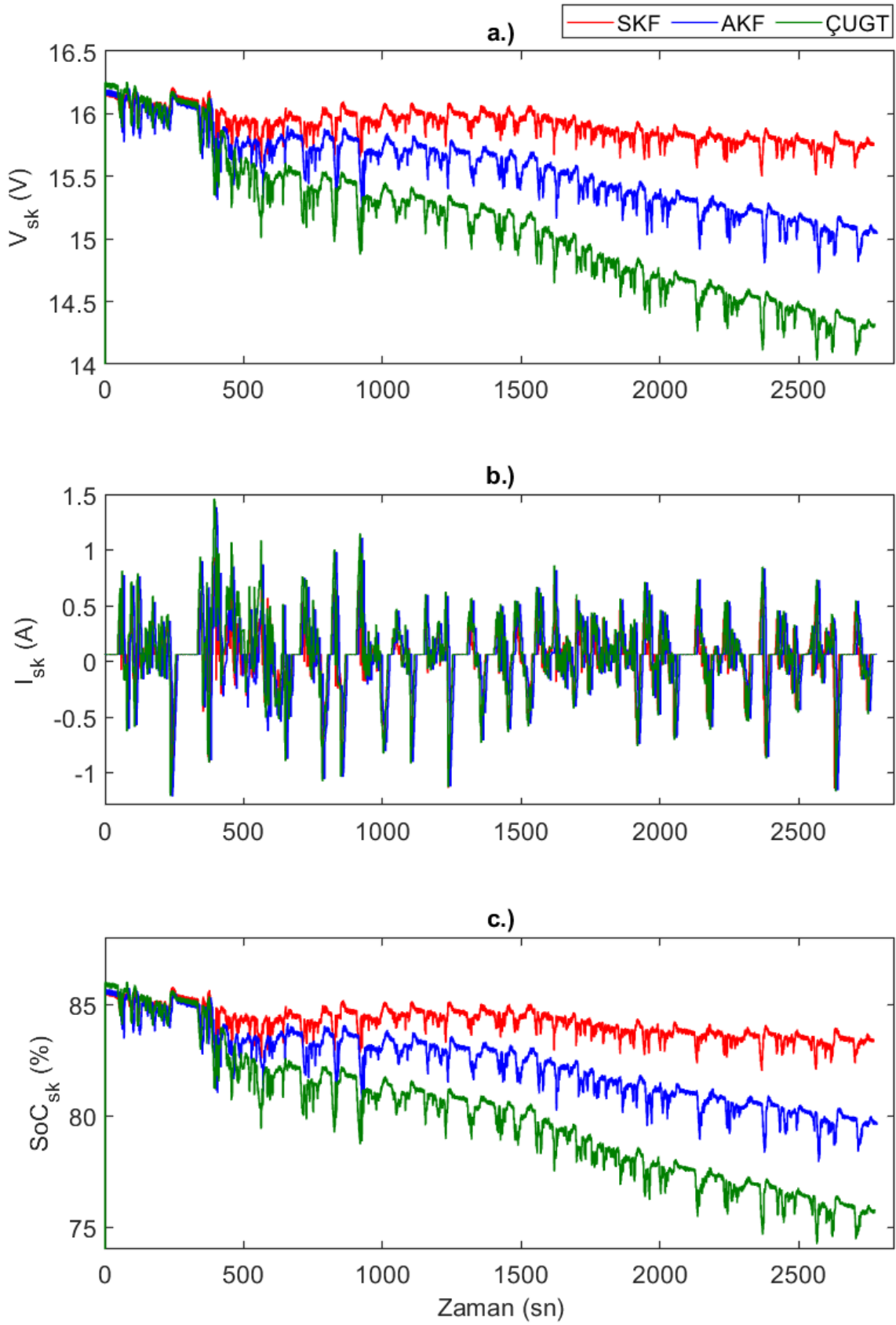


Şekil 2.101. EYS’lerde süperkapasitör gurubuna ait deneysel sonuçların karşılaştırılması
a.) Bara gerilimleri, b.) Yük akımları

Şekil 2.101’de SKF, AKF ve ÇUGT yöntemlerine göre gerçekleştirilen EYS’lere ait deneysel sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Deneysel sonuçlarda da Şekil 2.101a’da gösterilen bara gerilimindeki farklılığı oldukça küçük olduğu söylenebilir. Şekil 2.101b’deki deneysel yük akımı sonuçlarının benzetim sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir



Şekil 2.102. EYS’lerde süperkapasitör gurubuna ait benzetim sonuçlarının karşılaştırılması
a.) Terminal gerilimleri, b.) Süperkapasitör akımları, c.) Şarj doluluk oranları



Şekil 2.103. EYS'lerde süperkapasitör gurubuna ait deneysel sonuçların karşılaştırılması
a.) Terminal gerilimleri, b.) Süperkapasitör akımları, c.) Şarj doluluk oranları

Şekil 2.102 ve Şekil 2.103’de batarya gurubuna ait sırasıyla terminal gerilimlerinin, çıkış akımlarının ve şarj doluluk oranlarının benzetim ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Benzetim ve deneysel sonuçlar incelendiğinde SKF tekniğinde meydana gelen terminal gerilimi düşümünün diğer tekniklere kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi SKF tekniğinde süperkapasitörün karşılaması gereken akımların diğer EYS’lere göre daha az olmasıdır. Benzer şekilde SKF tekniğinde gerçekleştirilen güç paylaşımında süperkapasitör gurubunun yük akımının karşılanması için daha az katkıda bulunması sebebiyle şarj doluluk oranını diğer EYS’lere kıyasla daha yüksek oranda tamamlamıştır. Bunun sonucu olarak SKF tekniği ile gerçekleştirilen EYS’lerde süperkapasitörün etkin kullanılmadığı söylenebilir. EYS’lere ait sayısal sonuçlar Tablo 2.6’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2.6. Enerji yönetim sistemlerine ait sayısal sonuçlar

	Parametre	Batarya Gurubu		Süperkapasitör Gurubu	
		Benzetim	Deneysel	Benzetim	Deneysel
SKF EYS	Bara gerilim salınımı	17,8-18,2V	17,5-18,5V	17,9-18,1V	17,8-18,2V
	Maksimum yük akımı	2,133A	2,133A	0,583A	0,58A
	Terminal gerilimi	15,83V	15,79V	15,4V	15,76V
	Terminal akımı	3,12A	3,12A	0,925A	0,925A
	Şarj oranı	%88,15	%88,02	%82,45	%83,31
AKF EYS	Bara gerilim salınımı	17,9-18,1V	17-18,75V	17,9-18,1V	17,8-18,2V
	Maksimum yük akımı	2,05A	2,05A	0,889A	0,889A
	Terminal gerilimi	15,84V	15,75V	14,94V	15,04V
	Terminal akımı	3,01A	3,02A	1,38A	1,38A
	Şarj oranı	%88,49	%88,36	%80,04	%79,58
ÇUGT EYS	Bara gerilim salınımı	17,9-18,1V	17,5-18,5V	17,9-18,1V	17,5-18,5V
	Maksimum yük akımı	1,89A	1,89A	0,94A	0,94A
	Terminal gerilimi	15,86V	15,83V	14,49V	14,3V
	Terminal akımı	2,77A	2,77A	1,457A	1,457A
	Şarj oranı	%89,03	%88,88	%77,6	%75,64

Süperkapasitör gurubu ile batarya gurubuna ait benzetim ve deneysel sonuçlar incelendiğinde sürüş çevriminin her iki enerji depolama elemanı için de aynı (1370sn) olmasına rağmen süperkapasitör gurubuna ait sonuçlarda bu değer 2800sn seviyelerinde gerçekleşmiştir. Bunun sebebi süperkapasitör testlerinde sürüş çevrimine göre yük akımının programlanması için iki ayrı cihaz kullanılmasıdır. Süperkapasitör deneysel düzeneğinde iki ayrı cihazın (elektronik yük ve DA güç kaynağı) programlanması ve bu cihazlara 1sn'nin altında komut gönderilememesi sebebiyle süperkapasitör sürüş çevrimi normal sürüş çevriminin iki katına kadar uzamıştır.

Benzetim ortamında herhangi bir süre gecikmesi olmadığı için süperkapasitör benzetim sonuçlarını 1370sn boyunca elde etmek mümkündür. Ancak bu durumda benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasının oldukça zor olacağı söylenebilir. Dolayısıyla objektif bir karşılaştırma yapmak için süperkapasitör gurubunun deneysel testlerinden elde edilen yük akımları veri olarak alınmış ve benzetim testlerinde yük akımı olarak kullanılmıştır.

Elde edilen benzetim ve deneysel veriler hep birlikte incelendiğinde ÇUGT tekniği ile gerçekleştirilecek yük akım paylaşımında batarya gurubunun karşılaması gereken akımın SKF ve AKF tekniklerine kıyasla daha az olacağı ifade edilebilir. Bataryanın aynı sürüş çevriminde daha az akım sağlamasının bataryanın hem ısı problemlerinin hem de çevrim ömrü problemlerinin önüne geçebileceği söylenebilir.

3. SONUÇLAR

Bataryaların, süperkapasitörlerin veya yakıt hücrelerinin çeşitli kombinasyonlarından meydana gelen elektrikli araçlarda bu enerji depolama birimlerinin hangi zaman aralıklarında ve hangi ölçüde kullanılacağı enerji yönetim sistemlerinin temel sorusunu ortaya çıkarmaktadır. Özellikle geçtiğimiz otuz yılda çok hızlı bir gelişme gösteren elektrikli araçlarda sadece batarya paketlerinden veya sadece yakıt hücrelerinden oluşan enerji depolama birimleri bulunabilmektedir. Düşük enerji yoğunluğu sebebiyle sadece süperkapasitör paketlerinden oluşan bir elektrikli araç günümüz teknolojisinde pek mümkün görünmemektedir. Yakıt hücrelerinin geri kazanımlı frenleme enerjisini depolayamamasından ötürü günümüz literatüründeki çalışmalar batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen elektrikli araçlar üzerine yoğunlaşmıştır. Ana enerji kaynağı olarak kullanılan batarya gurubu yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle menzil problemlerinin üstesinden gelmesine çözüm olanakları sağlarken, yardımcı enerji kaynağı olarak kullanılan süperkapasitör gurubu ise yüksek güç yoğunluğu sebebiyle ani değişen yük akımlarının karşılanmasında etkin bir rol oynar.

Bu tez çalışmasında, batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen elektrikli araçlar için yük akımının paylaşılması ilkesine dayanan özgün bir enerji yönetim sistemi geliştirilmiştir. Bu teknik mevcut literatürde frekans ayrımı tabanlı enerji yönetim sistemleri olarak bilinmektedir. Bu yöntem genellikle bir alçak veya yüksek geçiren filtre yardımıyla yük akımının alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılmasıyla gerçekleştirilir. Bu yöntemin, sürüş koşullarından bağımsız bir güç paylaşımı sağlaması sebebiyle diğer enerji yönetim sistemlerinden daha üstün olduğu söylenebilir.

Çalışmada, yük akımı enerji depolama birimlerinin karakteristik özelliklerine göre ayrıştırılmış ve seçilen sürüş çevrimi boyunca kaynaklardan temin edilmiştir. Yük akımının sağlanmasında yüksek enerji yoğunluğuna sahip akım bileşenleri batarya gurubu tarafından karşılanırken, hem yüksek güç yoğunluğuna sahip akımlar süperkapasitör gurubundan sağlanmış hem de geri kazanımlı frenleme akımlarının tamamı süperkapasitör gurubuna yönlendirilmiştir. Bu prosedür temel alınarak Sabit Kesim Frekansı (SKF), Adaptif Kesim Frekansı (AKF) ve bu tezin özgün yanını oluşturan Çift Uyarlanabilir Güç Tahsisi (ÇUGT) teknikleri ayrı ayrı hem benzetim hem de deneysel olarak incelenmiştir.

İlk olarak kullanılan enerji depolama elemanlarının elektriksel eşdeğer devreleri seçilmiş ve deneysel testlerden elde edilen verilerle, parametre kestirim yöntemi kullanılarak enerji kaynaklarının benzetim modelleri oluşturulmuştur. İkinci olarak elektrikli aracın boylamsal modeli ve seçilen sürüş çevrimi kullanılarak gerekli yük akımı hesaplanmıştır. Sürüş çevriminin seçilmesinde, incelenen enerji yönetim sistemlerini objektif bir şekilde test edebilecek ve şehir içi sürüşe uygun olabilecek kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Son olarak gerekli yük akımının kaynaklardan temin edilmesinde ve geri kazanımlı frenleme akımlarının belirlenen kaynağa yönlendirilmesinde kullanılmak üzere elektronik yük ve DA güç kaynağının programlanma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

İncelenen SKF tekniğinde, enerji depolama birimleri arasındaki yük paylaşımında batarya gurubunun karşılaması gereken akım değerinin diğer tekniklere göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. SKF tekniğinde kullanılan alçak geçiren filtrenin kesim frekansı, sonuçları objektif bir şekilde karşılaştırmak adına AKF ve ÇUGT tekniklerinde elde edilen adaptif kesim frekanslarının ortalamaları alınarak belirlenmiştir.

İncelenen AKF tekniğinde, enerji depolama birimleri arasındaki yük paylaşımında batarya gurubunun karşılaması gereken akım değerinin SKF tekniğine göre daha az olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi, kesim frekansının yük akımının genliğine ve süperkapasitör doluluk oranına göre adaptif hale getirilmiş olmasıdır.

Önerilen ÇUGT tekniğinde, enerji depolama birimleri arasındaki yük paylaşımında batarya gurubunun karşılaması gereken akım değerinin SKF ve AKF tekniğine göre daha az olduğu gözlenmiştir. Ek olarak süperkapasitör gurubunun karşılaması gereken akımlarda ise en yüksek oran ÇUGT tekniğindedir. Bunun sebebi, bu tekniğin, yüksek çevrim ömrüne sahip olan süperkapasitör gurubundaki enerjiyi daha etkin kullanmasıdır.

Sonuç olarak ÇUGT tekniğinin, hibrit enerji depolama sistemine sahip elektrikli araçlar için gerçekleştirilecek enerji yönetim sisteminde, çevrim ömrü sınırlı olan batarya gurubunun daha az kullanılması sağlayarak hem batarya çevrim ömrünün uzatılmasına hem de batarya ısı problemlerinin önüne geçilmesine yeni bir çözüm yolu getirdiği düşünülmektedir.

4. ÖNERİLER

Doktora tezi olarak sunulan bu çalışmada, batarya ve süperkapasitör paketlerinden meydana gelen hibrit enerji depolama sistemine sahip elektrikli araçlar için yük akımının filtrelenmesi ve batarya akımının adaptif hale getirilmesi ilkesine dayanan yeni bir enerji yönetim sistemi geliştirilmiştir. Hibrit enerji depolama sistemine sahip elektrikli araçlarda veya mikro şebekelerde bu tezde önerilen teknikle çalışma yapmak isteyen araştırmacılara iletilmek istenen öneriler aşağıda belirtilmiştir:

- Enerji depolama birimlerinin benzetim ortamında modellenmesinde ikinci derece eşdeğer devreler kullanılmıştır. Çalışmayı geliştirmek için farklı derece seviyelerine sahip eşdeğer devreler kullanılabilir. Ancak model doğruluğunun eşdeğer devredeki kullanılan parametrelere bağlı olduğu unutulmamalıdır.
- Enerji depolama birimi olarak batarya ve süperkapasitör paketlerine ek yakıt hücreleri de kullanılarak önerilen tekniğin etkinliği araştırılabilir. Araştırmacı geri kazanımlı frenleme akımlarını batarya veya süperkapasitör paketleri üzerinden hesaba katmalıdır.
- Bu çalışmada kullanılan enerji depolama elemanlarının hacimsel boyutları ve hücre gerilim dengesizlikleri göz ardı edilmiştir. Hem elektrikli araç için hacimsel boyut hesaplamaları hem de enerji kaynakları için hücre dengeleme teknikleri kullanılarak önerilen yöntem geliştirilebilir.
- Bu tez çalışmasında kullanılan çeviricilerin denetimi oransal-integral denetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çeviricilerin denetiminde farklı kontrol teknikleri uygulanabilir. Ancak iç akım kontrol döngülerinin, dış gerilim kontrol döngülerinden yaklaşık on ile on beş kat daha hızlı olması gerektiği hesaba katılmalıdır.
- Önerilen teknikte yol eğiminin sıfır olduğu kabul edilmiştir. İniş veya yokuş eğimli yol koşullarında ekstra optimizasyon teknikleri veya kural tabanlı teknikler kullanılarak yöntemin etkinliğini artıracak çalışmalar yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Ali, M. U., Zafar, A., Nengroo, S. H., Hussain, S., Junaid Alvi, M., & Kim, H.-J. (2019). Towards a Smarter Battery Management System for Electric Vehicle Applications: A Critical Review of Lithium-Ion Battery State of Charge Estimation. *Energies*, 12(3), 446-478.
- Altaş, İ. H. (1999). Bulanık Mantık: Bulanıklılık Kavramı. *Aylık 3e (Enerji, Elektrik, Elektromekanik) Dergisi*, 62, 80-85.
- Amin, Bambang, R. T., Rohman, A. S., Dronkers, C. J., Ortega, R., & Sasongko, A. (2014). Energy Management of Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Sources Using Model Predictive Control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 1992-2002.
- Azib, T., Bethoux, O., Remy, G., Marchand, C., & Berthelot, E. (2010). An Innovative Control Strategy of a Single Converter for Hybrid Fuel Cell/Supercapacitor Power Source. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12), 4024-4031.
- Azizi, I., & Radjeai, H. (2018). A new strategy for battery and supercapacitor energy management for an urban electric vehicle. *Electrical Engineering*, 100(2), 667-676.
- Balassa, B. (1981). The Newly-Industrializing Developing Countries After the Oil Crisis. *Weltwirtschaftliches Archiv*, 117(1), 142-194.
- Barzkar, A., & Ghassemi, M. (2020). Electric Power Systems in More and All Electric Aircraft: A Review. *IEEE Access*, 8, 169314-169332.
- Bellache, K., Camara, M. B., Zhou, Z., & Dakyo, B. (2015). *Energy Management in Hybrid Electric Boat Based on Frequency Distribution Approach - Using Diesel, Lithium-Battery and Supercapacitors*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 1-6, Montreal, QC.
- Binggang, C., Zhifeng, B., & Wei, Z. (2005). *Research on control for regenerative braking of electric vehicle*. IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 92-97, Shaan'xi.
- Blanes, J. M., Gutiérrez, R., Garrigós, A., Lizán, J. L., & Cuadrado, J. M. (2013). Electric Vehicle Battery Life Extension Using Ultracapacitors and an FPGA Controlled Interleaved Buck-Boost Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12), 5940-5948.
- Bui, T. A. N., Nguyen, T. G., Darmanto, W., & Doong, R.-A. (2020). 3-Dimensional ordered reduced graphene oxide embedded with N-doped graphene quantum dots for high performance supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 361, 137018.

- Castaings, A., Lhomme, W., Trigui, R., & Bouscayrol, A. (2016). Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints. *Applied Energy*, 163, 190-200.
- Castro, R. d., Trovão, J. P., Pacheco, P., Melo, P., Pereirinha, P. G., & Araújo, R. E. (2011). *DC link control for multiple energy sources in electric vehicles*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1-6, Chicago.
- Chen, M., & Rincon-Mora, G. A. (2006). Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2), 504-511.
- Çorapsız, M. R. (2017). Performance Analysis of Speed Control of PMDC Motor using Fuzzy Logic Controller. *Eastern Anatolian Journal of Science*, 3(2), 16-29.
- Çorapsız, M. R. (2018). *Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Komütasyon Moment Dalgalarının Azaltılması*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Çorapsız, M. R., & Kahveci, H. (2023). A study on Li-ion battery and supercapacitor design for hybrid energy storage systems. *Energy Storage*, 5(1), e386.
- Çorapsız, M. R., & Kahveci, H. (2022). Double adaptive power allocation strategy in electric vehicles with battery/supercapacitor hybrid energy storage system. *International Journal of Energy Research*, 46(13), 18819-18838.
- Dell, R. M., & Rand, D. A. J. (2001). *Understanding Batteries*. Cambridge, United Kingdom: The Royal Society of Chemistry.
- Diab, Y., Auger, F., Schaeffer, E., & Wahbeh, M. (2017). Estimating Lithium-Ion Battery State of Charge and Parameters Using a Continuous-Discrete Extended Kalman Filter. *Energies*, 10(8), 1075.
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E., & Emadi, A. (2004). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. London: CRC Press.
- Eldeeb, H. H., Elsayed, A. T., Lashway, C. R., & Mohammed, O. (2019). Hybrid Energy Storage Sizing and Power Splitting Optimization for Plug-In Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2252-2262.
- Ettxeberria, A., Vechiu, I., Camblong, H., & Vinassa, J. M. (2012). Comparison of three topologies and controls of a hybrid energy storage system for microgrids. *Energy Conversion and Management*, 54(1), 113-121.
- Florescu, A., Bacha, S., Munteanu, I., & Bratcu, A. I. (2012). *Frequency-separation-based energy management control strategy of power flows within electric vehicles using ultracapacitors*. 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2957-2964, Montreal.

- Florescu, A., Bacha, S., Munteanu, I., Bratcu, A. I., & Rumeau, A. (2015). Adaptive frequency-separation-based energy management system for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 280, 410-421.
- Gallagher, K. G., Trask, S. E., Bauer, C., Woehrle, T., Lux, S. F., Tschuch, M., . . . Jansen, A. N. (2016). Optimizing Areal Capacities through Understanding the Limitations of Lithium-Ion Electrodes. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(2), A138-A149.
- Gokce, K., & Ozdemir, A. (2016). A Rule Based Power Split Strategy for Battery/Ultracapacitor Energy Storage Systems in Hybrid Electric Vehicles. *International Journal of Electrochemical Science*, 11, 1228-1246.
- Gualous, H., Bouquain, D., Berthon, A., & Kauffmann, J. M. (2003). Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature. *Journal of Power Sources*, 123(1), 86-93.
- Gupta, R. S., Tyagi, A., & Anand, S. (2021). Optimal allocation of electric vehicles charging infrastructure, policies and future trends. *Journal of Energy Storage*, 43, 103291.
- Güneş, D., Tekdemir, İ. G., Karaarslan, M. Ş., & Alboyacı, B. (2018). Assessment of the impact of electric vehicle charge station loads on reliability indices. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 33(3), 1073-1084.
- Huang, G., Wang, Y., Zhang, T., Wu, X., & Cai, J. (2019). High-performance hierarchical N-doped porous carbons from hydrothermally carbonized bamboo shoot shells for symmetric supercapacitors. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 96, 672-680.
- Hussain, S., Ali, M. U., Park, G.-S., Nengroo, S. H., Khan, M. A., & Kim, H.-J. (2019). A Real-Time Bi-Adaptive Controller-Based Energy Management System for Battery–Supercapacitor Hybrid Electric Vehicles. *Energies*, 12(24), 4662.
- Jossen, A. (2006). Fundamentals of battery dynamics. *Journal of Power Sources*, 154(2), 530-538.
- Kahveci, H. (2013). *Doğrudan Sürüşlü Elektrikli Araçlar için Bulanık Mantık Tabanlı Elektronik Diferansiyel Sisteminin Gerçeklenmesi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Kanellos, F. D., Tsekouras, G. J., & Hatziargyriou, N. D. (2014). Optimal Demand-Side Management and Power Generation Scheduling in an All-Electric Ship. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(4), 1166-1175.
- Kennedy, B., Patterson, D., & Camilleri, S. (2000). Use of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 90(2), 156-162.

- Khedulkar, A. P., Pandit, B., Dang, V. D., & Doong, R.-a. (2023). Agricultural waste to real worth biochar as a sustainable material for supercapacitor. *Science of The Total Environment*, 161441.
- Kıyaklı, A. O., & Solmaz, H. (2018). Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 2(4), 9-15.
- Kollimalla, S. K., Mishra, M. K., & Narasamma, N. L. (2014). Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(4), 1137-1144.
- Kovarik, W. (2005). Ethyl-leaded Gasoline: How a Classic Occupational Disease Became an International Public Health Disaster. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 11(4), 384-397.
- Kuperman, A., & Aharon, I. (2011). Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 981-992.
- Lahyani, A., Venet, P., Guermazi, A., & Troudi, A. (2013). Battery/Supercapacitors Combination in Uninterruptible Power Supply (UPS). *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(4), 1509-1522.
- Larminie, J., & Lowry, J. (2003). *Electric Vehicle Technology Explained*. England: Wiley.
- Li, M., Lu, J., Chen, Z., & Amine, K. (2018a). 30 Years of Lithium-Ion Batteries. *Advanced Materials*, 30(33), 1800561.
- Li, Z., Zhu, L., Tao, F., & Fu, Z. (2018b). *Energy Management Strategy Based on Model Prediction Control for Hybrid Batteries/ Supercapacitors Electrical Vehicle*. Chinese Automation Congress (CAC), 2463-2468, Xi'an.
- Liao, H., Peng, J., Wu, Y., Li, H., Zhou, Y., Zhang, X., & Huang, Z. (2021). Adaptive Split-Frequency Quantitative Power Allocation for Hybrid Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(4), 2306-2317.
- Liu, Y., Sun, Q., Han, Q., Xu, H., Han, W., & Guo, H. Q. (2022). A Robust Design Method for Optimal Engine Operating Zone Design of Plug-in Hybrid Electric Bus. *IEEE Access*, 10, 6978-6988.
- Long, B., Lim, S. T., Bai, Z. F., Ryu, J. H., & Chong, K. T. (2014). Energy Management and Control of Electric Vehicles, Using Hybrid Power Source in Regenerative Braking Operation. *Energies*, 7(7), 4300-4315.
- Lu, X., Chen, Y., Fu, M., & Wang, H. (2019). Multi-Objective Optimization-Based Real-Time Control Strategy for Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Management Systems. *IEEE Access*, 7, 11640-11650.

- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An Experiment in Linguistic Synthesis with A Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man–Machine Studies*, 7(1), 1-13.
- Mamun, A. A., Liu, Z., Rizzo, D. M., & Onori, S. (2019). An Integrated Design and Control Optimization Framework for Hybrid Military Vehicle Using Lithium-Ion Battery and Supercapacitor as Energy Storage Devices. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(1), 239-251.
- Manandhar, U., Ukil, A., Gooi, H. B., Tummuru, N. R., Kollimalla, S. K., Wang, B., & Chaudhari, K. (2019). Energy Management and Control for Grid Connected Hybrid Energy Storage System Under Different Operating Modes. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(2), 1626-1636.
- Marzougui, H., Kadri, A., Amari, M., & Bacha, F. (2018). *Frequency separation based energy management strategy for fuel cell electrical vehicle with super-capacitor storage system*. 9th International Renewable Energy Congress (IREC), 1-6, Hammamet.
- Mehdi, S., Betka, A., Drid, S., Djerdir, A., Tiar, M., & Abdedaim, S. (2018). *Implementation of new adaptive power-split management strategy in a battery-super capacitor electric vehicle*. 2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), 1-6, Algeria.
- Meng, J., Luo, G., Ricco, M., Swierczynski, M., Stroe, D.-I., & Teodorescu, R. (2018). Overview of Lithium-Ion Battery Modeling Methods for State-of-Charge Estimation in Electrical Vehicles. *Applied Sciences*, 8(5), 659.
- Miniguano, H., Barrado, A., Fernández, C., Zumel, P., & Lázaro, A. (2019). A General Parameter Identification Procedure Used for the Comparative Study of Supercapacitors Models. *Energies*, 12(9), 1776.
- Moon, S. H., Jou, S. T., & Lee, K. B. (2014). *State-space average modeling of bidirectional DC-DC converter for battery charger using LCLC filter*. 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA), 224-229.
- Motapon, S. N., Dessaint, L. A., & Al-Haddad, K. (2014). A Comparative Study of Energy Management Schemes for a Fuel-Cell Hybrid Emergency Power System of More-Electric Aircraft. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(3), 1320-1334.
- Muratoğlu, Y. (2017). *Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum iyon Pillerin Şarj Durumlarının Kokusuz Kalman Filtresi ile Kestirilmesi*. Mersin Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Mersin.
- Musardo, C., Rizzoni, G., Guezennec, Y., & Staccia, B. (2005). A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management. *European Journal of Control*, 11(4), 509-524.

- Namho, H., Jinhwan, J., & Kwanghee, N. (2001). A fast dynamic DC-link power-balancing scheme for a PWM converter-inverter system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(4), 794-803.
- Napoli, G., Polimeni, A., Micari, S., Andaloro, L., & Antonucci, V. (2020). Optimal allocation of electric vehicle charging stations in a highway network: Part 1. Methodology and test application. *Journal of Energy Storage*, 27, 101102.
- Nguyen, B. H., German, R., Trovão, J. P. F., & Bouscayrol, A. (2019). Real-Time Energy Management of Battery/Supercapacitor Electric Vehicles Based on an Adaptation of Pontryagin's Minimum Principle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(1), 203-212.
- Ostadi, A., & Kazerani, M. (2015). A Comparative Analysis of Optimal Sizing of Battery-Only, Ultracapacitor-Only, and Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for a City Bus. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(10), 4449-4460.
- Paterson, J., & Ramsay, M. (1993). *Electric vehicle braking by fuzzy logic control*. IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting, 2200-2204, Toronto.
- Patil, A., Patil, V., Wook Shin, D., Choi, J.-W., Paik, D.-S., & Yoon, S.-J. (2008). Issue and challenges facing rechargeable thin film lithium batteries. *Materials Research Bulletin*, 43(8), 1913-1942.
- Piller, S., Perrin, M., & Jossen, A. (2001). Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of Power Sources*, 96(1), 113-120.
- Podder, A. K., Chakraborty, O., Islam, S., Kumar, N. M., & Alhelou, H. H. (2021). Control Strategies of Different Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles Applications. *IEEE Access*, 9, 51865-51895.
- Poonam, Sharma, K., Arora, A., & Tripathi, S. K. (2019). Review of supercapacitors: Materials and devices. *Journal of Energy Storage*, 21, 801-825.
- Porru, M., Serpi, A., Salimbeni, A., & Damiano, A. (2017). *An advanced frequency-based energy management of hybrid energy storage systems for microgrids*. 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 7617-7622, Beijing.
- Rafik, F., Gualous, H., Gallay, R., Crausaz, A., & Berthon, A. (2007). Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling. *Journal of Power Sources*, 165(2), 928-934.
- Rashid, M. H. (2015). *Güç Elektroniği Yarıiletken Elemanlar, Devreler ve Uygulamaları*. Ankara: Nobel Yayınevi.
- Sandoval, C., Alvarado, V. M., Carmona, J. C., Lopez, G. L., & Gomez Aguilar, J. F. (2017). Energy management control strategy to improve the FC/SC dynamic behavior on

- hybrid electric vehicles: A frequency based distribution. *Renewable Energy*, 105, 407-418.
- Santucci, A., Sornioti, A., & Lekakou, C. (2014). Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications. *Journal of Power Sources*, 258, 395-407.
- Shin, D., Kim, Y., Wang, Y., Chang, N., & Pedram, M. (2012). Constant-current regulator-based battery-supercapacitor hybrid architecture for high-rate pulsed load applications. *Journal of Power Sources*, 205, 516-524.
- Silva, M. A., Trovão, J. P., Pereirinha, P. G., & Jorge, H. M. (2013). *Application of a decoupling method based on online filtering technique for multi-source electric vehicles*. 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 1-10, Lille.
- Snoussi, J., Elghali, S. B., Benbouzid, M., & Mimouni, M. F. (2018a). Auto-Adaptive Filtering-Based Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. *Energies*, 11(8), 2118.
- Snoussi, J., Elghali, S. B., Benbouzid, M., & Mimouni, M. F. (2018b). Optimal Sizing of Energy Storage Systems Using Frequency-Separation-Based Energy Management for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(10), 9337-9346.
- Snoussi, J., Elghali, S. B., & Mimouni, M. F. (2019). *Sizing and Control of Onboard Multisource Power System for Electric Vehicle*. 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 347-352, Sousse.
- Song, Z., Hofmann, H., Li, J., Han, X., Zhang, X., & Ouyang, M. (2015). A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 274, 400-411.
- Sun, L., Feng, K., Chapman, C., & Zhang, N. (2017). An Adaptive Power-Split Strategy for Battery–Supercapacitor Powertrain—Design, Simulation, and Experiment. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(12), 9364-9375.
- Traoré, B., Doumiati, M., Morel, C., Olivier, J. C., & Soumaoro, O. (2019). *Energy management strategy design based on frequency separation, fuzzy logic and Lyapunov control for multi-sources electric vehicles*. 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2676-2681, Lisbon.
- Trovão, J. P., Silva, M. A., & Dubois, M. R. (2017a). Coupled energy management algorithm for MESS in urban EV. *IET Electrical Systems in Transportation*, 7(2), 125-134.
- Trovão, J. P. F., Roux, M. A., Ménard, É., & Dubois, M. R. (2017b). 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.

- Trovão, J. P. F., Santos, V. D. N., Antunes, C. H., Pereirinha, P. G., & Jorge, H. M. (2015). A Real-Time Energy Management Architecture for Multisource Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(5), 3223-3233.
- URL-1. (2023, Ocak 29). ACS712 Current Sensor Datasheet. <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/zero-to-fifty-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs712>. adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2023, Ocak 18). Kurşun Asit Akü Nasıl Çalışır? <https://birikimpilleri.net/blog/kursun-asit-aku-nasil-calisir>. adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2023, Ocak 19). What are Nickel based batteries. <https://batteryguy.com/kb/knowledge-base/what-are-nickel-based-batteries/>. adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2023, Ocak 19). Supercapacitors Structure and How it Works. <https://passive-components.eu/supercapacitors-structure-and-how-it-works/>. adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2023, Ocak 19). The Silent Power of Supercapacitors. <https://www.powersystemsdesign.com/articles/the-silent-power-of-supercapacitors/135/13510>. adresinden alınmıştır.
- URL-6. (2023, Ocak 19). Ultracapacitor Overview. <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/>. adresinden alınmıştır.
- URL-7. (2023, Ocak 21). The Different Driving Cycles. <https://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/>. adresinden alınmıştır.
- URL-8. (2023, Ocak 23). Datasheet K2 Series Ultracapacitors. https://www.mouser.com.tr/datasheet/2/257/Maxwell_K2Series_DS_1015370-4-1179730.pdf. adresinden alınmıştır.
- URL-9. (2023, Şubat 1). Series 2200 Programmable DC Power Supplies. <https://www.tek.com/en/support/product-support?series=Keithley%202200%20DC%20Power%20Supply>. adresinden alınmıştır.
- URL-10. (2023, Şubat 1). UTL8500X SERIES programmable DC electronic load. <https://instruments.uni-trend.com/dc-electronic-loads/998.html>. adresinden alınmıştır.
- URL-11. (2023, Şubat 3). ORION 18650P/25 2500mAh 10C(25A) Lithium Ion Cell. <https://www.pilsitesi.com/uploads/dosyalar/orion-18650p-2500.pdf>. adresinden alınmıştır.
- URL-12. (2023, Temmuz 28). AMC1200/B Fully-Differential Isolation Amplifier. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1200.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-ww&ts=1690539081690&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fg

eneral%252Fdocs%252Fsuppproductinfo.tsp%253FdistId%253D10%2526gotoUrl%253Dhttps%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Flit%252Fgpn%252Famc1200 . adresinden alınmıştır.

- URL-13. (2023, Temmuz 27). MCP6001/1R/1U/2/4 1 MHz, Low-Power Op Amp. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP6001-1R-1U-2-4-1-MHz-Low-Power-Op-Amp-DS20001733L.pdf>. adresinden alınmıştır.
- URL-14. (2023, Temmuz 30). Key Features of 2.7V Series Winding Supercapacitor. <https://www.kamcappower.com/products/winding-type-2.7-volt-super-capacitors/>. adresinden alınmıştır.
- Urtasun, A., Barrios, E. L., Sanchis, P., & Marroyo, L. (2015). Frequency-Based Energy-Management Strategy for Stand-Alone Systems With Distributed Battery Storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(9), 4794-4808.
- Vidhya, S. D., & Balaji, M. (2019). Modelling, design and control of a light electric vehicle with hybrid energy storage system for Indian driving cycle. *Measurement and Control*, 52(9-10), 1420-1433.
- Wang, B., Hu, Q., & Wang, Z. (2020a). Improving Power Output of Battery and Mode Switching Frequency Based on Real-Time Average Power Method for Multi-Mode Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles. *IEEE Access*, 8, 34654-34663.
- Wang, L., Wang, Y., Liu, C., Yang, D., & Chen, Z. (2020b). A Power Distribution Strategy for Hybrid Energy Storage System Using Adaptive Model Predictive Control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(6), 5897-5906.
- Wang, R., Peng, J., Zhou, Y., Liao, H., & Huang, Z. (2017). Primal-dual Interior-point Method based Energy Distribution Optimization for Semi-active Hybrid Energy Storage System. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14477-14482.
- Wang, Y., Wang, L., Li, M., & Chen, Z. (2020c). A review of key issues for control and management in battery and ultra-capacitor hybrid energy storage systems. *eTransportation*, 4, 100064.
- Wu, Y., Huang, Z., Liao, H., Chen, B., Zhang, X., Zhou, Y., . . . Peng, J. (2020). Adaptive power allocation using artificial potential field with compensator for hybrid energy storage systems in electric vehicles. *Applied Energy*, 257, 113983.
- Wu, Y., Huang, Z., Liao, H., Zhou, Y., Liu, Y., Li, H., . . . Peng, J. (2019). *An Improved Feed-Forward Load Compensation Method for Hybrid Energy Storage Systems*. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 5753-5758, Baltimore, MD.
- Xiaoliang, H., Hiramatsu, T., & Yoichi, H. (2013). *Energy Management Strategy based on frequency-varying filter for the battery supercapacitor hybrid system of Electric Vehicles*. World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 1-6, Barcelona.

- Yao, L. W., Aziz, J. A., Kong, P. Y., & Idris, N. R. N. (2013). *Modeling of lithium-ion battery using MATLAB/simulink*. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1729-1734, Vienna.
- Yin, H., Zhou, W., Li, M., Ma, C., & Zhao, C. (2016). An Adaptive Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy on Battery/Ultracapacitor Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(3), 300-311.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- Zhang, L., Peng, H., Ning, Z., Mu, Z., & Sun, C. (2017). Comparative Research on RC Equivalent Circuit Models for Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles. *Applied Sciences*, 7(10), 1002.
- Zhang, Q., & Li, G. (2020). Experimental Study on a Semi-Active Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicle Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(1), 1014-1021.
- Zhao, Z. H. (2022). Improved fuzzy logic control-based energy management strategy for hybrid power system of FC/PV/battery/SC on tourist ship. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(16), 9719-9734.
- Zubieta, L., & Bonert, R. (2000). Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(1), 199-205.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Reşit ÇORAPSIZ, ilk, Orta ve Lise öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2009’da Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünü bitirerek ilk lisans derecesini aldı. 2011 yılına kadar Erzurum Enerji Nakil Hatlarının Yer Altına Alınması işinde yardımcı kontrolör olarak çalıştı. 2015’te Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik–Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun olarak ikinci lisans derecesini aldı. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı’ndan Elektrik Yüksek Mühendisi Ünvanı ile mezun oldu. 2018 yılından bu yana Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Doktora Programı’nda çalışmalarına devam etmektedir. 2012 yılı Şubat ayından itibaren Bayburt Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü’nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.

Web of Science Kapsamında Yayınlanan Makaleler

Çorapsız M.R., Kahveci H. “*A study on Li-ion battery and supercapacitor design for hybrid energy storage systems*”, Energy Storage, 2023;5(1), e386, (doi:10. 1002/est2.386).

Çorapsız M.R., Kahveci H. “*An overview of frequency-based power split strategies in electric vehicles with battery/supercapacitor hybrid energy storage system*”, Energy Storage. 2022, e429, (doi:10.1002/est2.429).

Çorapsız M.R., Kahveci H. “*Double adaptive power allocation strategy in electric vehicles with battery/ supercapacitor hybrid energy storage system*”, Int J Energy Res. 2022;46(13):18819-18838, (doi:10.1002/ er.8501).