

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ OTOBÜSLER İÇİN HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA
SİSTEMLERİNİN GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seda SAVAŞ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

OCAK 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ OTOBÜSLER İÇİN HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA
SİSTEMLERİNİN GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Seda SAVAS
(504181065)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat YILMAZ

OCAK 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504181065 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Seda SAVAŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ELEKTRİKLİ OTOBÜSLER İÇİN HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Murat YILMAZ**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Murat YILMAZ**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Deniz YILDIRIM

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hülya OBDAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 30 Aralık 2022

Savunma Tarihi : 27 Ocak 2023



ÖNSÖZ

Öncelikle tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Murat Yılmaz’a bu çalışmadaki yardımları ve destekleri için çok teşekkür ederim. Sonrasında akademik hayatımın başından sonuna kadar yanımda olan, benim için tüm süreçleri kolaylaştırmaya çabalayan aileme minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Aralık 2022

Seda Savaş
(Elektrik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	3
2. TOPLU TAŞIMADA KULLANILAN OTOBÜS VE ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ	13
2.1 Toplu Taşımada Kullanılan Otobüs Tipleri.....	14
2.1.1 Geleneksel tip otobüs	14
2.1.2 Hibrit tip otobüs	15
2.1.3 Elektrikli tip otobüsler.....	16
2.2 Elektrikli Otobüsün Hedef Kullanım Hattı.....	17
2.3 Enerji Depolama Sistemleri.....	20
2.3.1 Bataryalar	20
2.3.1.1 Lityum İyon Bataryalar	22
2.3.2 Ultrakapasiteler	23
2.4 Hibrit Enerji Depolama Sistemleri (HESS).....	24
2.4.1 HESS topolojileri	25
2.4.2 HESS kontrol sistemleri	29
3. ELEKTRİKLİ OTOBÜS BENZETİŞİMİ.....	31
3.1 Elektrikli Otobüs Dinamikleri	31
4. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ OPTİMİZASYONU.....	43
4.1 Genetik Algoritma	43
4.1.1 Seçilim Evresi	46
4.1.2 Çaprazlama Evresi.....	47
4.1.3 Mutasyon Evresi.....	47
4.2 HESS Elemanlarının Boyutsal Optimizasyonu	48
4.2.1 Sadece batarya kullanılan model.....	52
4.2.2 Batarya ve UC'nin baraya direkt bağlandığı model.....	53
4.2.3 Bataryanın baraya direkt bağlandığı ve UC'nin baraya dc/dc çevirici ile bağlandığı model.....	55
4.2.4 Bataryanın baraya dc/dc çevirici ile bağlandığı ve UC'nin baraya direkt bağlandığı model.....	57
4.2.5 Batarya ve UC'nin baraya dc/dc çevirici ile bağlandığı model	59
4.3 HESS Sisteminin Enerji Yönetimi Optimizasyonu	61
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	69

KAYNAKLAR	71
EKLER	79
ÖZGEÇMİŞ	91



KISALTMALAR

UC	: Ultrakapasite
EDS	: Enerji Depolama Sistemi
EYS	: Enerji Yönetim Sistemi
HESS	: Hibrit Enerji Depolama Sistemi
GA	: Genetik Algoritma
Li-ion	: Lityum İyon
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
PHEV	: Şebekeden Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar
EV	: Elektrikli Araç
HEV	: Hibrit Elektrikli Araç
BESD	: Sabit Güçle Tampon Enerji Depolama Cihazı
CO₂	: Karbondioksit
BOES	: Enerji Depolama Sistemi Olarak Batarya Kullanılan Yapı
İETT	: İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri
LPG	: Petrol Gazı
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
CNG	: Sıkıştırılmış Doğal Gaz
HVAC	: Motor, Isıtma Ve Ventilasyon Sistemi
LMO	: Lityum Manganese Oksit
LFP	: Lityum Demir Fosfat
LNMC	: Lityum Nikel Manganese Kobalt Oksit

SEMBOLLER

Li^+	: Lityum elementi
Q	: Elektriksel yük
C	: Elektriksel kapasite
V	: Gerilim
A	: Yüzey alanı
ϵ	: Elektriksel iletkenlik sabiti
d	: Uzaklık
F_y	: Yuvarlanma kuvveti
c_t	: Tekerlek sürtünme katsayısı
m	: Otobüs kütlesi
g	: Yer çekimi ivmesi
α	: Eğim açısı
F_h	: Hava sürtünme kuvveti
c_r	: Hava sürtünme katsayısı
ρ	: Havanın yoğunluğu
A_f	: Aracın ön izdüşüm alanı
v	: Araç hızı
v_0	: Rüzgar hızı
F_e	: Eğim kuvveti
F_i	: İvmelenme kuvveti
δ	: Araç kütle faktörü
i	: Toplam mekanik çevirme oranı
F_T	: Toplam çekiş kuvveti
r_d	: Tekerlek yarıçapı
it	: Batarya kapasitesi
i^*	: Batarya akımı
E_0	: Sabit gerilim
$E_{şarj}$	: Hesaplanan batarya şarj gerilimi
$E_{deşarj}$	: Hesaplanan bataryadeşarj gerilimi
Q_T	: Elektriksel şarj
T	: Çalışma sıcaklığı
Ns_{bat}	: Batarya seri hücre sayısı
Np_{bat}	: Batarya paralel hücre sayısı
Ns_{UC}	: UC seri hücre sayısı
Np_{UC}	: UC paralel hücre sayısı
C_{bat}	: Batarya hücre maliyeti
C_{UC}	: UC hücre maliyeti
E_{bat}	: Toplam batarya enerjisi
E_{UC}	: Toplam UC enerjisi
$C_{çevirici}$	: W başına DC/DC çevirici maliyeti
$V_{bat_hücre}$	: Batarya hücre gerilimi

$V_{UC_hücre}$	: UC hücre gerilimi
$I_{bat_hücre}$	: Batarya hücre kapasitesi
$I_{UC_hücre}$	: UC hücre kapasitesi
$w_{bat_hücre}$	: Batarya hücre ağırlığı
$w_{UC_hücre}$	: UC hücre ağırlığı
$t_{gün}$	: Yıllık kullanılan gün sayısı
t_{sefer}	: Günlük sefer sayısı
$cycle$	: Batarya ömür döngüsü
E_{Toplam}	: Maksimum toplam kurulu enerji değeri
E_{sefer}	: Belirlenen seri ve paralel hücre sayılarına göre benzetişimde batarya ve UC'nin tek yöndeki seferde harcadığı toplam enerji miktarı
$f(1)$	: Maliyet amaç fonksiyonu
$f(2)$	: Batarya ömrü amaç fonksiyonu
$f(3)$	: Ağırlık amaç fonksiyonu
Ns_{batmin}	: Minimum batarya seri hücre sayısı
Np_{batmin}	: Minimum batarya paralel hücre sayısı
Ns_{UCmin}	: Maliyet amaç fonksiyonu
Np_{UCmin}	: Minimum UC seri hücre sayısı
Ns_{batmax}	: Minimum UC seri hücre sayısı
Np_{batmax}	: Maksimum batarya seri hücre sayısı
Ns_{UCmin}	: Maksimum batarya paralel hücre sayısı
Ns_{UCmax}	: Maksimum UC seri hücre sayısı
Np_{UCmax}	: Maksimum UC seri hücre sayısı
P_{1min}	: Minimum birinci talep gücü
P_{1max}	: Maksimum birinci talep gücü
P_{2min}	: Minimum ikinci talep gücü
P_{2max}	: Maksimum ikinci talep gücü
P_1	: Simulasyon sonucu birinci talep gücü
P_2	: Simulasyon sonucu ikinci talep gücü
$Ömür$	: Batarya ömrü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Günümüzde kullanılan elektrikli otobüs modelleri.	17
Çizelge 2.2 : İstanbul metrobüs hattı bilgisi [41].	18
Çizelge 2.3 : Beylikdüzü-Söğütlüçeşme hattı bilgileri [42].	19
Çizelge 2.4 : Farklı Enerji Depolama Sistemlerinin Özellikleri [10].	20
Çizelge 2.5 : Farklı Li-on batarya tiplerinin özellikleri [10].	23
Çizelge 2.6 : Farklı durumlarda kullanılan enerji depolama sisteemleri [50].	27
Çizelge 2.7 : Pasif HESS, Yarı Aktif HESS ve Tam Aktif HESS yapılarının avantaj ve dezavantajları [51].	29
Çizelge 3.1 : Elektrikli Otobüs Benzetişiminde Kullanılan Değişken Değerleri.	34
Çizelge 4.1 : Optimizasyonda kullanılan değişken parametreleri.	48
Çizelge 4.2 : Optimizasyonda kullanılan sabitler.	49
Çizelge 4.3 : Optimizasyon parametre sınırları.	51
Çizelge 4.4 : Enerji Depolama Sistemi Olarak Sadece Batarya Kullanılan Senaryonun Seri ve Paralel Hücre Sayısı.	52
Çizelge 4.5 : Enerji depolama sistemi olarak pasif HESS yapısı kullanılan senaryonun seri ve paralel hücre sayısı.	53
Çizelge 4.6 : Maksimum ve Minimum Paralel Hücre Limitleri.	54
Çizelge 4.7 : Pasif HESS Yapısı Optimizasyon Sonuçları.	55
Çizelge 4.8 : Maksimum ve Minimum Hücre Limitleri.	56
Çizelge 4.9 : Yarı Aktif HESS (1) Yapısı Optimizasyon Sonuçları.	57
Çizelge 4.10 : Maksimum ve Minimum Hücre Limitleri.	58
Çizelge 4.11 : Yarı Aktif HESS (2) Yapısı Optimizasyon Sonuçları.	59
Çizelge 4.12 : Maksimum ve minimum hücre limitleri.	60
Çizelge 4.13 : Tam Aktif HESS Yapısı Optimizasyon Sonuçları.	61
Çizelge 4.14 : Farklı HESS yapılarının sonuçlarının karşılaştırılması.	62
Çizelge 4.15 : Talep Gücü Optimizasyonu.	64



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : IEA ülkelerinde sektörlere göre enerji tüketimi [5].	1
Şekil 1.2 : 2020 yılında bir elektrikli aracı oluşturan parçaların maliyetleri [6].	2
Şekil 1.3 : UC/batarya HESS yapısı [12].	5
Şekil 1.4 : Pasif ve aktif HESS yapıları [13].	6
Şekil 1.5 : Amin'in HESS yapısı için önerdiği kontrol sistemi [16].	8
Şekil 1.6 : Batarya ve UC akım ve gerilim dalga şekilleri [16].	8
Şekil 1.7 : Correa ve Grossa'nın makalesinde verilen HESS yapısı [17].	9
Şekil 1.8 : Farklı çalışma durumlarındaki modlar [20].	11
Şekil 2.1 : Geleneksel otobüs modeli [24].	14
Şekil 2.2 : Hibrit tip otobüs genel yapısı [25].	15
Şekil 2.3 : Genel elektrikli otobüs yapısı [29].	16
Şekil 2.4 : Beylikdüzü-Söğütluçeşme metrobüs hattı güzergâhı [41].	18
Şekil 2.5 : Beylikdüzü-Söğütluçeşme metrobüs hattı hız bilgisi [42].	19
Şekil 2.6 : Beylikdüzü-Söğütluçeşme metrobüs hattı yükseklik bilgisi [42].	19
Şekil 2.7 : Farklı batarya kimyalarının örümcek ağı grafiği [10].	21
Şekil 2.8 : Li-on bataryaların şarj ve deşarj durumları [10].	22
Şekil 2.9 : Li-on batarya hücresi [48].	22
Şekil 2.10 : Ultrakapasite hücresi [47].	24
Şekil 2.11 : Pasif HESS topolojisi [50].	25
Şekil 2.12 : Farklı topolojilerdeki HESS yapıları [50].	25
Şekil 2.13 : Yarı aktif HESS yapıları [50].	26
Şekil 2.14 : Talep gücüne göre batarya ve UC kullanımı [50].	27
Şekil 2.15 : (a) Pasif HESS topolojisi, (b) Yarı Aktif HESS topolojisi, (c) Tam Aktif HESS topolojisi [51].	28
Şekil 2.16 : Sıcaklığın UC boyutlandırmasındaki etkisinin sonuçları [52].	28
Şekil 3.1 : Elektrikli araçlara etkiyen kuvvetler [53].	31
Şekil 3.2 : Elektrikli otobüs modelinde direnç kuvvetleri hesaplama blokları.	33
Şekil 3.3 : Toplam sürüş gücü ve çıkış momenti hesaplama bloğu iç gösterimi.	35
Şekil 3.4 : Enerji depolama sistemi güç talebi bloğu.	35
Şekil 3.5 : Benzetişim sonucunda sefer boyunca otobüs hız bilgisi.	36
Şekil 3.6 : Enerji Depolama Sistemi Kullanım Bloğu.	36
Şekil 3.7 : Benzetişimin çalıştırıldığı enerji yönetim sistemi algoritması.	37
Şekil 3.8 : Batarya modeli.	38
Şekil 3.9 : Batarya modeli [59].	38
Şekil 3.10 : Kullanılan LFP Batarya Hücresinin Kapasite Durumuna Göre Gerilim Değişimi [64].	39
Şekil 3.11 : Batarya eşdeğer devre modeli [64].	39
Şekil 3.12 : UC modeli.	41
Şekil 3.13 : Benzetişimlerde kullanılan UC görseli [58].	41
Şekil 3.14 : UC'nin eşdeğer devre modeli [65].	42

Şekil 4.1 : Genetik algoritma aşamaları [68].	44
Şekil 4.2 : Genetik algoritma yöntemi [71].	46
Şekil 4.3 : Çaprazlama evresi örneği [74].	47
Şekil 4.4 : Genetik algoritma işleyiş süreci [75].	47
Şekil 4.5 : Enerji depolama sistemi olarak sadece batarya kullanılan sistemin tek yön seferindeki batarya gerilimi, akımı, SoC'ı ve gücü değişimi.	53
Şekil 4.6 : Pasif HESS yapısı kullanılan sistemdeki benzetişim sonucu.	55
Şekil 4.7 : Birinci yarı aktif HESS yapısı kullanılan sistemdeki benzetişim sonucu.	57
Şekil 4.8 : İkinci yarı aktif HESS yapısı kullanılan sistemdeki benzetişim sonucu.	59
Şekil 4.9 : Tam aktif HESS yapısı kullanılan sistemdeki benzetişim sonucu.	61
Şekil 4.10 : Batarya ömrünün optimize edildiği EYS yapısı.	63
Şekil 4.11 : Optimizasyon sonucunun durma kriteri sonucu grafiği.	64
Şekil 4.12 : Talep edilen güce göre batarya ve UC kullanımı.	65
Şekil 4.13 : Nihai tasarımda UC SoC ve akım grafikleri.	66
Şekil 4.14 : Nihai tasarımda batarya uç gerilimi, SoC ve akım grafikleri.	66



ELEKTRİKLİ OTOBÜSLER İÇİN HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Günümüzde ulaşım sektöründe fosil yakıtlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan bu fosil yakıtların başta küresel ısınma olmak üzere dünyaya birçok zararı bulunmaktadır. Bu yakıtların kullanılmasıyla iklim değişiklikleri son yıllarda dünyanın birçok yerinde doğal felaketlerin oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle ulaşımındaki fosil yakıt tüketimini azaltmak için son yıllarda alternatif enerji kaynaklarıyla ilgili yapılan çalışmalar artmaktadır. Böylece elektrikli ve hibrit araçlarla ilgili yapılan çalışmalar son zamanlarda önem kazanmıştır.

Avrupadaki sera gazı emisyonunun %25'i ulaşımında kullanılan yakıtın %90'ından fazlası petrol kaynaklı olduğu için ulaşımdan kaynaklanmaktadır. İklim değişikliğinin önlenmesi için Avrupa Birliği'nde 2040 yılına kadar karbondioksit emisyonunun %60 seviyelerine düşürülmesi planlanmaktadır. Bu doğrultuda fosil yakıt kullanan sistemlerin azaltılması için şehir içinde kullanılan otobüslerin elektrikli otobüslere dönüştürülmesine yönelik çalışmalar başlamıştır.

Elektrikli ve hibrit araçların günümüzde fosil yakıt tüketilen araçlara göre daha az popüler olmasının en önemli nedenleri maliyet ve menzil limitleridir. Elektrikli araçlardaki bu iki durum da kullanılan enerji depolama sistemiyle (EDS) ilgilidir. Genel olarak elektrikli ve hibrit araçlarda EDS olarak bataryalar kullanılmaktadır. Ancak bataryaların maliyeti hala yüksek seviyelerdedir. Bu nedenle elektrikli araçlar ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda çoğunlukla bataryaların optimizasyonu ile ilgili kısımlar ele alınmaktadır.

Batarya optimizasyonu kimyasal yapısı, boyutu veya birlikte kullanılabilecekleri EDS konfigürasyonları üzerinden yapılabilir. Batarya ile birlikte Ultrakapasite (UC), Volan veya Fuel Cell gibi farklı EDS elemanları kullanılarak Hibrit Enerji Depolama Sistemleri (HESS) oluşturulabilir. Bu HESS yapılarında bataryaların yüksek enerji yoğunluğu ve UC'lerin yüksek güç yoğunluğu özellikleri kullanılarak daha verimli ve performanslı çalışan sistemler oluşturulabilir.

Bu çalışmada karbondioksit salınımının azaltılması için İstanbul'da her gün 52 km'lik hatta 15 otobüs ile her otobüsün 10 sefer düzenlediği Beylikdüzü-Söğütluçeşme metrobüs hattı üzerinde çalışılmıştır. Bu hatta kullanılan bir metrobüs elektrikli otobüse dönüştürülerek batarya ömrü, toplam maliyet ve toplam ağırlık optimize edilecek şekilde HESS optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan HESS sisteminde batarya ile birlikte yüksek güç yoğunlukları ile ön plana çıkan UC de kullanılmıştır. Optimizasyon için birkaç amaç fonksiyonu kullanılabilen Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır. Öncelikle MATLAB/Simulink programında elektrikli otobüsün boylamsal dinamik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modelde sürüş çevrimi olarak metrobüs hattındaki tek sefer kullanılmıştır. Bu kapsamda seferdeki otobüs hızı ve hattaki yolun eğim bilgisi kullanılmıştır.

Dinamik model oluşturulduktan sonra MATLAB programında GA ile optimizasyon sistemi oluşturulmuştur. Optimizasyonun ilk aşamasında pasif HESS, Yarı-Aktif HESS ve Tam Aktif HESS olmak üzere, EDS olarak sadece bataryanın da kullanıldığı 5 farklı senaryo oluşturulmuştur. Oluşturulan bu farklı senaryolar batarya ömrünün artırılması, toplam batarya paket maliyetinin ve toplam ağırlığın azaltılması amaç fonksiyonları çerçevesinde, HESS yapıları ayrı ayrı optimize edilmiştir. Farklı HESS yapılarında batarya seri hücre sayısı, batarya paralel hücre sayısı, UC seri hücre sayısı ve UC paralel hücre sayısı optimizasyon parametreleri olarak kullanılmıştır. Boyutsal optimizasyonda sistemin maksimum kurulu enerjisine, kullanılan gerilim değerlerine, toplam enerjinin tek yön seferi karşılayabilme durumuna göre HESS sisteminde bulunan elemanlara kısıt fonksiyonları eklenmiştir.

Boyutsal optimizasyon sırasında MATLAB’de Optimizasyon için oluşturulan kodlar, MATLAB optimizasyon aracı ve Simulink’te oluşturulan dinamik model her bir optimizasyon aşamasında çalıştırılmıştır. Boyutsal optimizasyon sonucunda en ideal HESS yapısı 3 amaç fonksiyonu sonuçlarına göre seçilmiştir.

Seçilen optimal sonuç için Enerji Yönetim Sistemi (EYS) optimizasyonu yapılmıştır. Bu kısımda talep edilen güç değerine göre enerji ihtiyacını hangi enerji depolama elemanının karşılayacağı belirlenmiştir. Optimizasyon ile iki farklı talep gücü değeri belirlenir. Bu talep güçlerinin üstünde, altında ve arasında talep edilen güç değerleri batarya veya UC’den temin edilir. Sistemin enerji talebi profiline ve HESS sistemindeki elemanların kullanım durumuna göre bu iki talep değeri optimizasyon sonucunda elde edilir. Bu şekilde HESS sisteminde kullanılan batarya ve UC, enerji kapasiteleri ve SoC durumlarına göre en verimli şekilde kullanılır.

Bu tez çalışmasında elektrikli otobüslerde enerji depolama sistemi olarak kullanılan bataryalar yerine, batarya ve UC’nin birlikte kullanıldığı bir HESS yapısının boyutsal ve işletim optimizasyon çalışması verilmiştir. EDS sistemi olarak sadece bataryanın, pasif HESS’in, yarı aktif HESS’in ve tam aktif HESS’in kullanıldığı farklı senaryolar için maliyet, batarya ömrü ve toplam ağırlık optimizasyonu çerçevesinde HESS elemanlarının boyutsal ve EYS optimizasyonu yapılmıştır. Bu sonuçlar EDS olarak sadece batarya kullanılan sistemle, batarya ömrü, toplam maliyet ve toplam ağırlık açısından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak en iyi seçilen EDS ile ilgili EDS elemanlarının gerilim, akım, güç, SoC değişimini gösteren grafikler verilmiştir. En iyi sonucu veren sistem ele alındığında EDS olarak sadece batarya kullanılan sisteme göre 598.178 ₺’lik ek bir maliyetle bataryanın ömrünün 2,55 yıl arttırıldığı görülmüştür.

Uzun vadede bir otobüs için EDS olarak sadece batarya kullanıldığında optimize edilen HESS’in kullanılmasına göre EDS sistemi 1.615.426,68 ₺ ile %37 daha pahalıya mal olmaktadır. Metrobüs hattındaki tüm otobüsler için bu EDS değişimi yapıldığında EDS sistemi maliyeti 24.231.400,2 ₺ azaltılabilmektedir.

OPTIMIZATION OF HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR ELECTRIC BUSES WITH GENETIC ALGORITHM

SUMMARY

Nowadays, fossil fuels are widely used in the transportation sector. These fossil fuel usage have many damages to the world, especially global warming. Climate changes with the use of these fuels have caused natural disasters in many parts of the world in recent years. In recent years, studies on alternative energy sources have been increasing, especially in order to reduce fossil fuel consumption in transportation. Thus, studies on electric and hybrid vehicles have gained importance recently.

25% of the greenhouse gas emissions in Europe results from transportation, as more than 90% of the fuel used in transportation originates from oil. In order to prevent climate change, it is planned to reduce carbon dioxide emissions to 60% by 2040 in the European Union. In this direction, studies have started to transform the buses used in the city into electric buses in order to reduce the systems using fossil fuels.

Cost and range anxiety are the most important reasons why electric and hybrid vehicles are less popular today than fossil fuel vehicles. Both of these situations in electric vehicles are related to the energy storage system used. In general, batteries are used as EDS in electric and hybrid vehicles. However, the cost of batteries is still high. For this reason, studies with electric vehicles mostly focus on the optimization of batteries.

Battery optimization can be done through chemical structure, size or EDS configurations with which they can be used. Hybrid Energy Storage Systems (HESS) can be created by using different EDS elements such as Ultracapacitor (UC) or Fuel Cell together with the battery. In these HESS structures, more efficient systems can be created by using the specific features of each energy storage elements which are high energy density of the battery and the high power density of the UCs.

In this study, in order to reduce carbon dioxide emissions, the Beylikdüzü-Söğütluçeşme metrobus line, which is 52 km long, 15 buses and 10 times of voyage each day, has been studied in Istanbul. A BRT on this line was converted into an electric bus, and HESS optimization was carried out to optimize battery life, total cost and total weight. In HESS, UC was also used together with the battery.

Genetic Algorithm (GA), which can be used with several objective functions, is used for optimization. GA is a biology-inspired method for finding unknowns in models of nonlinear systems such as Li-ion batteries. GA achieves optimal results by generating random chromosome sequences and using biological processes such as crossover, selection and mutation. In these algorithms, the design space is transformed into genetic space. Therefore, GAs work with a set of hardcoded variables. The advantage of working with hardcoded variables is that the codes basically have the ability to transform a continuous space into a discrete space.

Another interesting point is that GAs divide the search space into several regions and compare them randomly according to the performance of the system, removing the weak parts and making the good solutions more dominant than the worse ones to reach convergence. Three parameters are entered as stopping criteria of the optimizations. These are reaching the maximum number of generations (100), the best objective function result found for 1000 seconds, and the best objective function result found over 50 generations.

First of all, a dynamic model of the electric bus was created in the MATLAB Simulink program. In this model, it was used one way voyage of the metrobus line. For this, the speed of the bus and the slope of the road on the line are used.

After the dynamic model was created, an optimization system was created with GA in the MATLAB program. In the first stage of the optimization, 5 different scenarios were created, namely passive HESS, Semi-Active HESS and Fully Active HESS, in which also only the battery is used as EDS. HESS structures have been individually optimized within the framework of the purpose functions of increasing the battery life, reducing the total cost and reducing the total weight of these different scenarios created.

In different HESS structures, battery serial cell number, battery parallel cell number, UC serial cell number and UC parallel cell number are used as optimization parameters. In the dimensional optimization, according to the maximum installed energy capacity, applied voltage level and the fact that one way energy need is provided, several constraint equations are added to the optimisation system.

In general, the maximum busbar voltage value is taken as 800 V when the electric buses available in the optimizations are taken as reference. In the simulations run in the optimizations, the battery SoC value was taken as 50%. The UC SoC value was taken as 80%. According to the EMS structure given in Figure 3.12, the battery was operated between 20% and 80% SoC [1]. According to the same structure, UCs were operated between 10% and 97% SoC values [2]. Regardless of the energy value recovered in the simulations, it was transferred to the battery or UC only according to the SoC states.

During the dimensional optimization, the codes created for optimization in MATLAB, the MATLAB Optimization Tool and the dynamic model created in Simulink were run at each optimization stage. As a result of dimensional optimization, the most ideal HESS structure was selected according to the results of the three objective functions.

For the selected optimal result, Energy Management System (EYS) optimization was made in the next section. In this section, according to the power demand of the system, which energy storage unit provides the energy demand is determined. Two different power demand value is determined with optimisation. The power demand which are above, below or between these two power demand values are provided from battery or UC. According to the energy demand profile and usage of the HESS components, these two power demand values are get as a result of the optimisation. In this way, the battery and the UC is used with most efficient way in terms of energy capacities and SoC situations.

In this thesis, a dimensional and operational optimization study of a HESS structure in which battery and UC are used together, instead of batteries used as energy storage system in electric buses, is given. Dimensional and EYS optimization of HESS

elements has been made within the framework of cost, battery life and total weight optimization for different scenarios which only battery, passive HESS, semi-active HESS and fully active HESS are used as EDS system. These results were compared with the system using only batteries as EDS in terms of battery life, total cost and total weight.

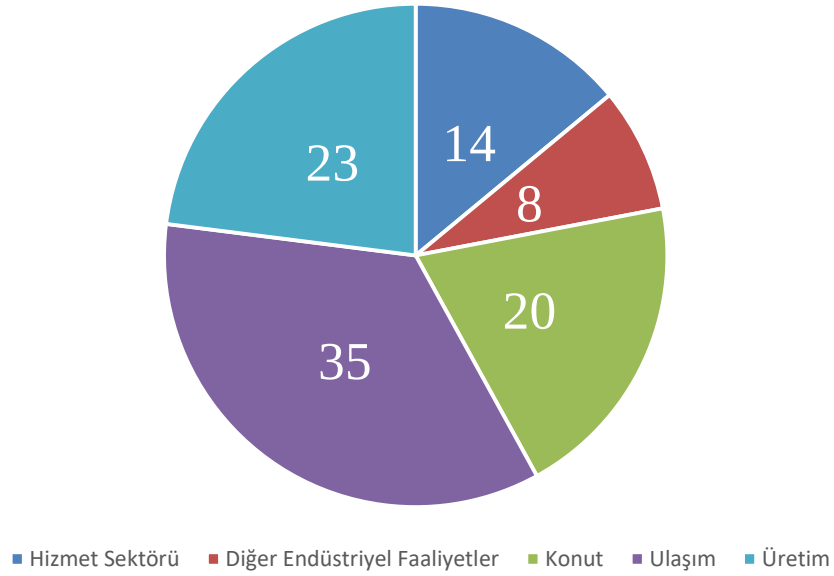
As a result, graphs showing the voltage, current, power, SoC changes of the EDS elements related to the best selected EDS are given. Considering the system that gives the best results, it is seen that the life of the battery has been increased by 2,55 years with an additional cost of 598.178 ₺ compared to the system using only batteries as EDS. In the long run, the EDS system costs 1.615.426,68 ₺ and 37% more expensive than using the optimized HESS instead of using only the battery as EDS for one bus. When this EDS change is made for all buses on the Metrobus line, the cost of the EDS system can be reduced by 24.231.400,2 ₺.





1. GİRİŞ

Karbondioksit (CO_2) tüketiminin artmasıyla birlikte son yıllarda dünyanın sıcaklığı hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu CO_2 tüketiminin en önemli kaynağı ulaşımdaki egzoz gazlarından kaynaklanmaktadır [3]. Dünyanın sıcaklığının bu hızlı artışıyla birlikte iklim değişikliği önemli bir problem haline gelmeye başlamıştır. Küresel ısınmaya neden olan bu iklim değişikliklerinin başlıca nedenlerinden birisi kullanılan fosil yakıtlardır. Fosil yakıtlar günümüzde özellikle ulaşımda kullanılmaktadır. Bu nedenle ulaşımda fosil yakıtlara alternatif enerji kullanımına yönelik çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Özellikle elektrikli ve hibrit araçların geliştirilmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [4].

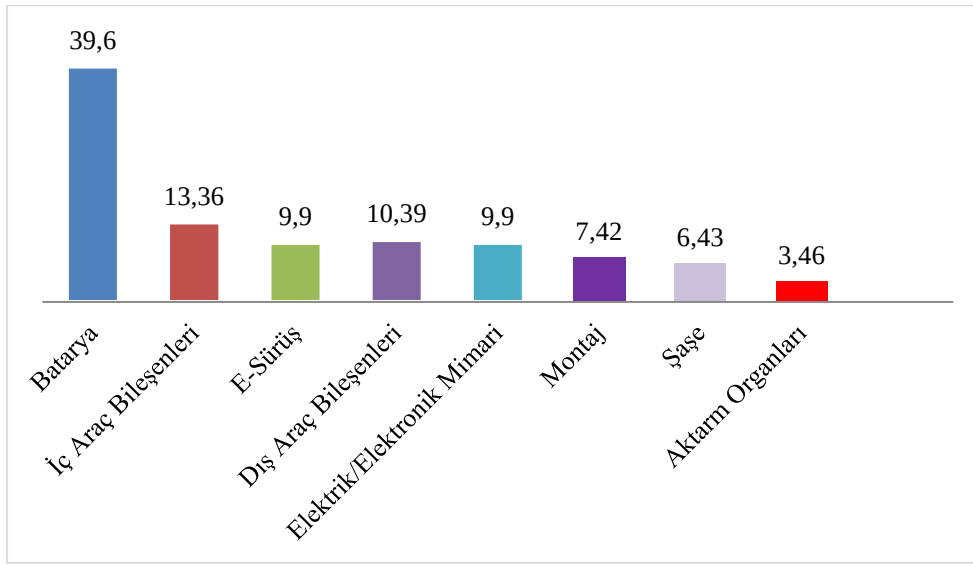


Şekil 1.1 IEA ülkelerinde sektörlere göre enerji tüketimi [5].

Şekil 1.1 ile IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) ülkelerinde 2019 yılındaki sektörlere göre enerji dağılımı verilmiştir. Şekil incelendiğinde ulaşım sektörünün tüm enerji tüketiminin %35 gibi önemli bir oranını oluşturduğu görülmektedir. Bu yüzden son yıllarda ulaşım sektöründe kullanılan fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.

Taşıtlardan kaynaklanan CO_2 emisyonunu azaltmak için son yıllarda toplu taşıma kullanımını teşvik edici çalışmalar artmıştır. Toplu taşımada kullanılan araçların elektrikli araçlarla değiştirilmesiyle CO_2 emisyonunu azalmaktadır. Özellikle şehir merkezlerinde ulaşımında elektrikli otobüslerin kullanılmasıyla birlikte CO_2 emisyonunu azalmasının yanında ses kirliliği ve hava kirliliği de azalmaktadır.

Elektrikli araçların işletme maliyetleri içten yanmalı araçlara göre düşük olmasına rağmen yatırım maliyetleri yüksektir. Son yıllarda özellikle elektrikli araçların yüksek maliyetlerinin düşürülmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır [6].



Şekil 1.2 2020 yılında bir elektrikli aracı oluşturan parçaların maliyetleri [6].

Şekil 1.2 ile 2020 yılında bir elektrikli aracı oluşturan parçaların maliyet dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde batarya maliyetinin, elektrikli araç maliyetinin önemli bir kısmını oluşturduğu görülmektedir. Bu nedenle elektrikli araçların maliyetlerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar çoğunlukla batarya maliyetinin azaltılmasına yönelik yapılmaktadır. Özellikle Lityum İyon (Li-ion) tabanlı bataryalar elektrikli araç pazarında önemli bir yer almaktadır.

Genel olarak elektrikli araçlarda enerji depolama sistemi olarak bataryalar kullanılmaktadır. Ancak farklı sürüş durumlarında batarya yerine ultrakapasite kullanılmasının batarya ömrünü artırma, daha efektif sürüş kabiliyeti sağlama ve düşük maliyet sunma gibi faydaları yer almaktadır. Bu nedenle son yıllarda HESS alanında, enerji depolama sistemi olarak bataryadan farklı sistemlerin de kullanıldığı yapılar üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bataryaların yüksek enerji yoğunlukları ve

ultrakapasitelerin yüksek güç yoğunlukları gibi birbirlerine göre üstün oldukları özellikleri, elektrikli araçların farklı çalışma modlarında kullanılarak, daha verimli ve performansı yüksek bir sürüş sağlanmaktadır. Bu doğrultuda, bu bölüm kapsamında tezin amacı ve tezin ilişkili olduğu konuların literatür özeti yer almaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Tez çalışması kapsamında şehir içinde kullanılan otobüslerin uygun ve optimum enerji depolama sistemleri tasarlanarak elektrifikasyonunun yapılması hedeflenmiştir. Bu enerji depolama sistemi yapısı oluşturulurken batarya ömrünün maksimum, toplam maliyet ve ağırlığın minimum seviyede tutulması amaçlanmıştır.

Bu amaçla İstanbul'da bulunan metrobüs hattındaki otobüsler incelenmiştir. En uzun hatta sahip olan 34G otobüsünün elektrifikasyonunun yapılması amaçlanmıştır. Elektrikli otobüste enerji sistemi olarak bataryanın yanında HESS yapıları oluşturulmuştur. Çalışmada sadece bataryanın kullanıldığı enerji depolama yapısı referans alınarak farklı konfigürasyonlardaki HESS yapıları tanımlanmıştır. Bu farklı HESS yapıları GA kullanılarak batarya ömrünü artırma, maliyeti ve ağırlığı düşürme amaç fonksiyonlarına göre optimize edilmiştir.

Metrobüs hattında kullanılan 18 metrelik körüklü uzun yapılı elektrikli otobüslerin benzetişimi MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Batarya paralel hücre sayısı, ultrakapasite seri hücre sayısı ve ultrakapasite paralel hücre sayısının optimize edildiği GA yapısı için MATLAB yazılımı kullanılmıştır.

Bu çalışma temel olarak 2 optimizasyon aşamasından oluşmaktadır. İlk olarak batarya ve ultrakapasitenin DC baraya bağlanma durumlarına göre oluşturulan tam aktif, yarı aktif ve pasif HESS yapılarının optimize edilip karşılaştırıldıkları kısım yer almaktadır. İkinci kısımda ise ilk kısımda karar verilen en optimal yapının Enerji Yönetim Sistemi (EYS) GA ile optimize edilerek sonuç modeli elde edilir.

1.2 Literatür Araştırması

Son yıllarda elektriksel güç aktarımı otomotiv sektöründe araştırma ve geliştirme açısından önemli bir yer almaya başladı. Bunun en büyük nedeni içten yanmalı motorlu taşıtların neden olduğu çevre kirliliğini elektriksel güç aktarımının

hafifletmesidir. Ayrıca elektriksel güç aktarımı ile dünyanın doğal kaynaklarının tahribatı azalır, yüksek verim sağlanır ve daha ekonomik yakıt kullanılır [7].

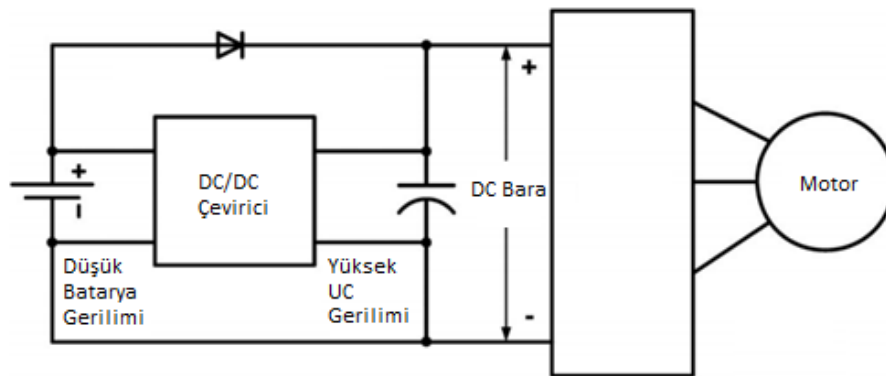
Günümüzde kullanılan petrol kaynaklı yakıtın önemli bir kısmı ulaşımda kaynaklanmaktadır. Bu nedenle taşımacılığın küresel ısınma oluşumuna oldukça büyük bir etkisi vardır. Bu doğrultuda taşımacılıkta elektrikli otobüslerle ilgili yapılan çalışmalar artmıştır [8]. Otobüs çeşitleri incelendiğinde temel olarak geleneksel tip, hibrit tip ve elektrikli tip otobüs çeşitleri yer almaktadır. Geleneksel tip otobüslerde enerji kaynağı olarak petrol gazı (LPG), dizel yakıt, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) gibi yenilenemeyen enerjiler kullanılmaktadır. Hibrit tip otobüslerde içten yanmalı motorla birlikte farklı çalışma durumlarında devreye giren elektrik motorları da yer almaktadır. Elektrikli tip otobüslerde itki içten yanmalı motorla sağlanmaz. Sadece elektrikli motorlar ile itki elde edilir. Elektrikli tip otobüslerde enerji kaynağı çoğunlukla bataryalardır [9-10]. Oluşturduğu materyale göre farklı batarya çeşitleri bulunmaktadır. Lead acid, NaS, NaNiCl, NiCd, VRFB, ZBFB, ve Li-ion bu farklı batarya çeşitlerinden bazılarıdır. Bataryanın nominal gerilimi, hücre maliyeti ve çalışma döngüsü sayısı bataryalar için önemli özelliklerdir. Bu açılarından değerlendirildiğinde Li-ion bataryalar güç ve enerji yoğunlukları açısından diğer batarya tiplerine göre daha avantajlıdır [11].

Günümüzde yüksek enerji tüketimi, maliyetler ve trafik kirliliği ciddi bir sorun haline gelmiştir. Elektrikli araçlar kirli ve doğaya zarar verici gazlar yaymamalarına rağmen kısa sürüş menzili ve sınırlı batarya ömrü sunmaktadırlar. Bunların önüne geçebilmek için son zamanlarda bazı araştırmacılar ultrakapasite ve yakıt pilleri gibi bataryaya ekstra eklenen enerji depolama sistemlerinin bulunduğu HESS yapıları üzerine çalışmaktadırlar [11].

Cao ve Emadi 2012 yılında yayınladıkları makalede elektrikli (EV), hibrit elektrikli (HEV) ve şebekeden şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (PHEV) için yeni bir batarya/ultrakapasite enerji depolama sistemi (HESS) önermişlerdir. Anlık en yüksek güç taleplerini karşılamak için, ultrakapasite ve batarya bağlantısı arasındaki arayüzde kullanılan daha büyük dc/dc dönüştürücü kullanılan geleneksel HESS tasarımıyla karşılaştırıldığında önerilen tasarım, çoğu şehir içi sürüş koşulları için batarya geriliminden yüksek değerlerdeki UC değerlerinde gerilimi devam ettirmek için kontrollü bir enerji pompası olarak çalışan çok daha küçük bir dc/dc dönüştürücü kullanılmaktadır. Batarya sadece, UC'deki gerilim batarya geriliminden düşük

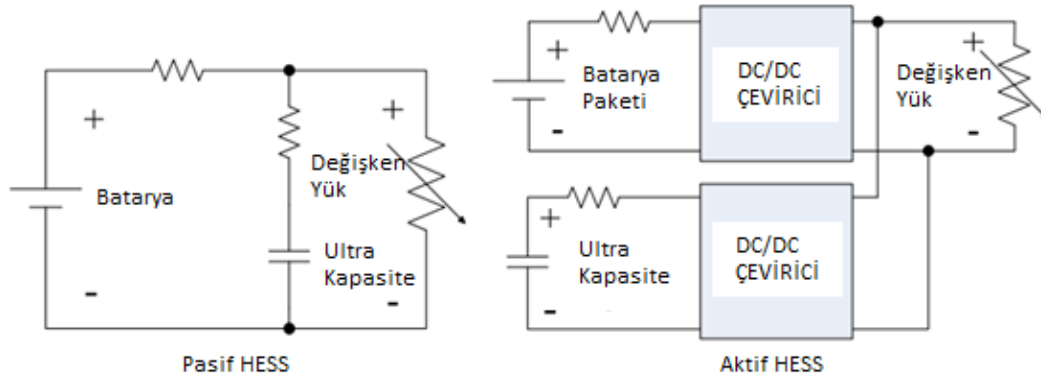
olduğunda direkt olarak güç verir. Böylece batarya için nispeten sabit bir yük profili oluşturulur. Ayrıca batarya, geri kazanımlı frenlemeden gelen enerjiyi direkt olarak depolamak için kullanılmaz. Böylece batarya sık şarj durumlarından izole edilir ve batarya ömrü uzatılır [12].

Geleneksel HESS’de UC, aktarma organlarının anlık tepe enerji ihtiyacını karşılaması için bir dc/dc çevirici ile bağlanır. Bu yüzden dc/dc çeviricinin UC bankasıyla aynı veya maksimum güç talebinden fazla güç kapasitesine sahip olması gerekir. Önerilen HESS bu duruma ortalayıcı konsept (averaging concept) denilen farklı bir yol ile ulaşır. Makalede örneği verilen ve dur kalk durumlarının fazla olduğu bir sürüş çevrimindeki ihtiyaç duyulan enerji grafiği incelendiğinde, bataryanın 36,8-54,8 kW arasındaki yüksek değerlerde şarj ve deşarj olduğu görülmektedir. Ancak bataryadan alınan gücün ortalama 5,95 kW olduğu hesaplanmıştır ve bu değer maksimum güç değerinin neredeyse 1/10’udur. Tepe değer ile ortalama değer arasındaki bu büyük fark yeni bir sistem önerilmesini sağlamıştır. İdeal olarak eğer bir enerji depolama cihazı güç idare etmede iyiye tampon olarak kullanılabilir. dc/dc çeviriciye sadece 5,95 kW’lık bir sabit güçle tampon enerji depolama cihazını (BESD) şarj etmesi için ihtiyaç duyulur. Böylece artırılan BESD hacminin maliyetiyle dc/dc çevirici hacmi küçültülür. Ortalayıcı konsept doğası gereği spesifik taşıt uygulamalarında dc/dc çevirici ve BESD hacminin optimizasyonunun yapılmasının sağlayarak istenen sonuçların ulaşılması elde edilir [12].



Şekil 1.3 UC/batarya HESS yapısı [12].

Chuan, Chris ve Mengyang aynı yıl yayınlanmış makaleden farklı olarak pasif HESS üzerinde durmuş ve matematiksel ifade, model oluşturma ve gerçekleştirme gibi sistemi farklı şekillerde de yorumlamışlardır. Batarya ve UC arasında bir pasif HESS kullanılarak lityum iyon batarya ve UC için indirgenmiş matematiksel model, benzetişim ve testi yapılmıştır. Bu çalışmada parametre değerlerini verdikleri batarya ve UC için öncelikle matematiksel formülasyonu verip bu formülleri MATLAB’de koşturmuşlardır. Buna göre yük akımı, batarya akımı ve UC akımı karşılaştırılması ve HESS çıkış gerilimi sonuçlarını almışlardır [13].



Şekil 1.4 Pasif ve aktif HESS yapıları [13].

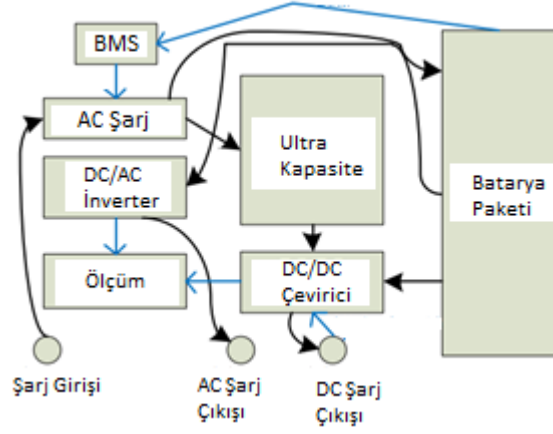
Buna göre kullandıkları pasif HESS sistemi sadece batarya bulunduran enerji depolama sistemine göre güç kapasitesi, deşarj zamanı ve verim olarak sırasıyla 2,6 kat, %30 ve %10 oranlarında üstünlük göstermektedir. Bunun en büyük nedeni ani yüksek güç ihtiyaçlarında UC'nin yardım etmesi ve UC'nin daha küçük iç dirence sahip olmasıdır. Aktif HESS pasif HESS'e göre, UC'nin daha çok kullanılmasından, batarya sabit ve ortalama gücü sağlarken UC'nin anlık yükleri karşılamasından dolayı daha iyi performans sergiler. Ancak EV ve HEV uygulamalarında pasif HESS'in aktif HESS'e göre bazı avantajları olduğu belirtilmiştir. Öncelikle pasif HESS'in yapısı aktif HESS'e göre daha basittir ve bu yüzden EV ve HEV uygulamalarında uyarlanması daha kolaydır. Bir ya da birden fazla yüksek güçlü dc/dc çeviricinin eklenmemesi bile EV ve HEV maliyetinde önemli bir düşüşe neden olur. Bunun dışında pasif HESS'ler aktif HESS'lere göre daha güvenilirlerdir. Bunun nedeni, aktif HESS'te PWM çalışma oranı yük talebine göre sürekli değişmektedir ve düzgün bir kontrol sisteminin kullanıldığından emin olunmalıdır. Ayrıca pasif HESS performansı UC'nin kapasitesi yüksek ve iç direnci düşük seçilerek geliştirilebilir. Bunun dışında yaptıkları benzerişimler pasif HESS'in aktif HESS'e

göre daha yüksek enerji verimi sağladığı belirtmişlerdir. Bunun nedeni ise aktif HESS'teki dc/dc çeviricinin enerji kaybıdır [13].

Moshirvazir aynı yıl yayınladığı bir makalede Cao ve Emadi'nin çalışmasına benzer olarak batarya ve UC arasında bir dc/dc çevirici bulunan bir tasarım önermiştir. Bu HESS ile efektif güç paylaşım kontrolü, esnek gerilim değişimi ve kapasitör enerjisinin iyi bir şekilde kullanılacağı ve yük ile batarya arasındaki dönüşüm aşamalarının minimize edileceği belirtilmiştir. Ama diğer makaleden farklı olarak bu makaledeki en önemli özellik gerçek zamanlı GPS sisteminin kullanımıdır. Bu çalışmada güç karıştırıcı iyileştiricisine (power mix optimizer) sahip bir HESS'in gerçek zamanlı bir GPS sisteminden aldığı verilerle yük dağıtım seçimi yapıldığı bir tasarım geliştirilmiştir. GPS verilerinin güç iyileştiricisinde kullanılmasıyla sistem verimi etkilenmeden ve maliyet artırılmadan batarya şarj akımının %37 azaltıldığı belirtilmiştir. Çünkü GPS sistemi zaten araç içinde mevcuttur. Bu HESS tasarımının en önemli özelliği tepe akım değerinin küçültülmesiyle batarya ömrünün uzatılmasından ziyade bataryanın belirli yüksek değerlerde kullanılıp tepe güç taleplerinde UC'nin kullanılmasıdır [14].

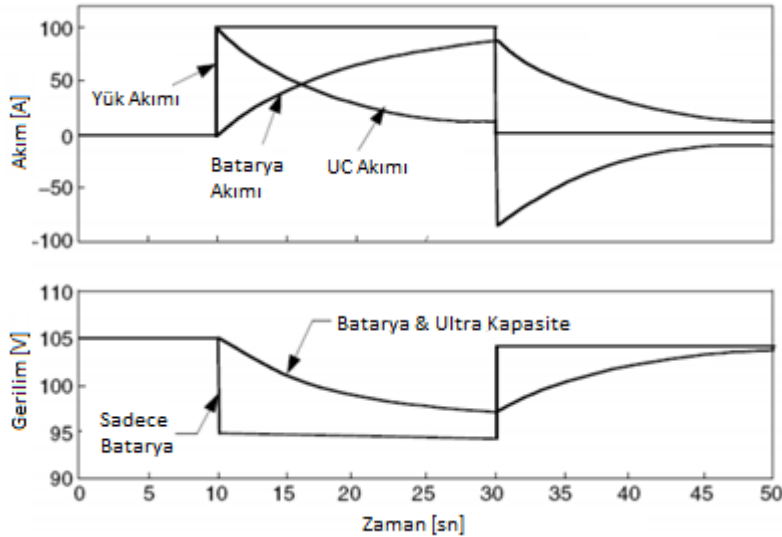
Porru ve arkadaşları 2015 yılında yayınladıkları makalede elektrikli araçlar için yeni bir HESS tasarımı önerilmiştir. Bu tasarımda batarya paketi, UC ve 3 Aşamalı Nötr Noktasında Kenetlenmiş Çeviriciden (Three-Level Neutral-Point Clamped Converter (NPC)) oluşan bir DC bara kontrol sistemi yer alır. UC, DC baraya entegre olmasına rağmen gerilimi geniş bir aralıkta olabilir. Bu sistem, bataryayı ani güç değişikliklerinden koruyacak uygun bir HESS kontrol sistemi kullanılarak sağlanır. HESS'in batarya paketini ivmelenme ve yavaşlama durumlarında yüksek tepe akımlardan koruyacağı gösterilmiştir. Bu durum, NPC'nin uygun bir şekilde kontrolü yapılarak HESS enerji akışı yönetimiyle sağlanmıştır [15].

Amin aynı yıl yayınladığı makalede elektrikli araçları mobil olarak şarj edebilen bir istasyonda kullanılacak batarya, UC ve bunların birlikte kullanıldığı HESS yapısından bahsetmiştir [16].



Şekil 1.5 Amin'in HESS yapısı için önerdiği kontrol sistemi [16].

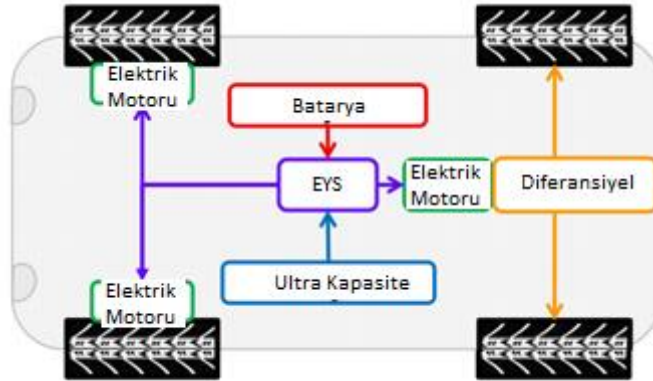
Şekil 1.5 ile bu iki yapının birlikte kullanıldığı sistem gösterilmektedir. Bu yapıda şarj istasyonunun 4 farklı çıkışı yer almaktadır. Buna göre 2 çıkış dc/dc çevirici ile DC hızlı ve ultra hızlı şarj (level-4) yapmaktadır. Diğer 2 çıkış dc/ac evirici ile yavaş şarj (Level 1-2-3) yapmaktadır. Batarya veya kapasite DC şarj sağlarken, batarya yalnız olarak dc/ac eviriciyi besleyerek yavaş şarj sağlayabilmektedir. Bunu dışında batarya görüntüleme sistemiyle birlikte kullanıcı batarya gereksinimi olduğunda uyarılabilmektedir. Batarya ve UC'nin ikisinde şebekeye bağlandığında AC şarj edici giriş ile şarj edilebilmektedir. Bu çalışma durumlarının iyileştirilmiş kontrolü yapılabilmesi için batarya yönetim ünitesi kullanılmaktadır [16].



Şekil 1.6 Batarya ve UC akım ve gerilim dalga şekilleri [16].

Şekil 1.6 incelendiğinde, yük akımı arttığında UC akımının ani olarak arttığı ve sonra yavaş bir şekilde kapasite bitene kadar azaldığı gözükmektedir. Bataryaya bakıldığında, yük akımının artmasıyla batarya akımının yavaş yavaş arttığı ve yük akımının kesilmesiyle yavaş bir şekilde azaldığı görülür. Bunlara bakıldığında UC'nin yük akımına level-4 şarj gibi daha kısa sürede tepki verip deşarj olması yük için daha uygundur. Şekil 1.6 ile sistemden yük talep edildiğinde sadece bataryanın olduğu sistemdeki ve batarya ile UC'nin birlikte olduğu sistemdeki gerilim düşümü durumu verilmiştir. Sadece enerji kaynağı olarak bataryanın olduğu sistemde batarya gerilimi ani olarak düşmektedir. Ancak enerji kaynağı olarak batarya ve UC'nin birlikte olduğu sistemde yük talebiyle birlikte gerilim düşümü daha azdır. Buna göre mobil EV şarj istasyonlarının batarya ve UC kombinasyonlu sisteminin, istasyonun EV deşarjı yaparken gerilim değişimi açısından daha avantajlı olduğu belirtilir [16].

Correa ve Grossa 2017 yılında yayınladıkları makalede batarya ve UC'nin birlikte kullanıldığı bir HESS sisteminin hacmini küçültmek ve elektrikli araç sürüş menzilini artırmak için yeni bir enerji yönetim stratejisi önermişlerdir. Bunun için literatür özetinde verilen önceki makalelerden farklı olarak GA kullanılmıştır. HESS sistemi, batarya ve UC'nin birbirlerinden bağımsız olarak bağlı oldukları bir EYS Şekil 1.7 ile verildiği gibi ifade edilmiştir [17].



Şekil 1.7 Correa ve Grossa'nın makalesinde verilen HESS yapısı [17].

Bu makalede önceki çalışmalardan farklı olarak dc/dc çevirici üzerinden değil, batarya ve UC'nin doğal yapısındaki parametreler kullanılarak bir optimizasyon problemi tanımlanmış ve GA ile çözümlemesi yapılmıştır. Yapılan bu çalışmayla birlikte elektrikli araç performansı etkilenmeden HESS ağırlığının azaltılabildiği gösterilmiştir. Ayrıca batarya geriliminin elektrikli araç menziline ve HESS

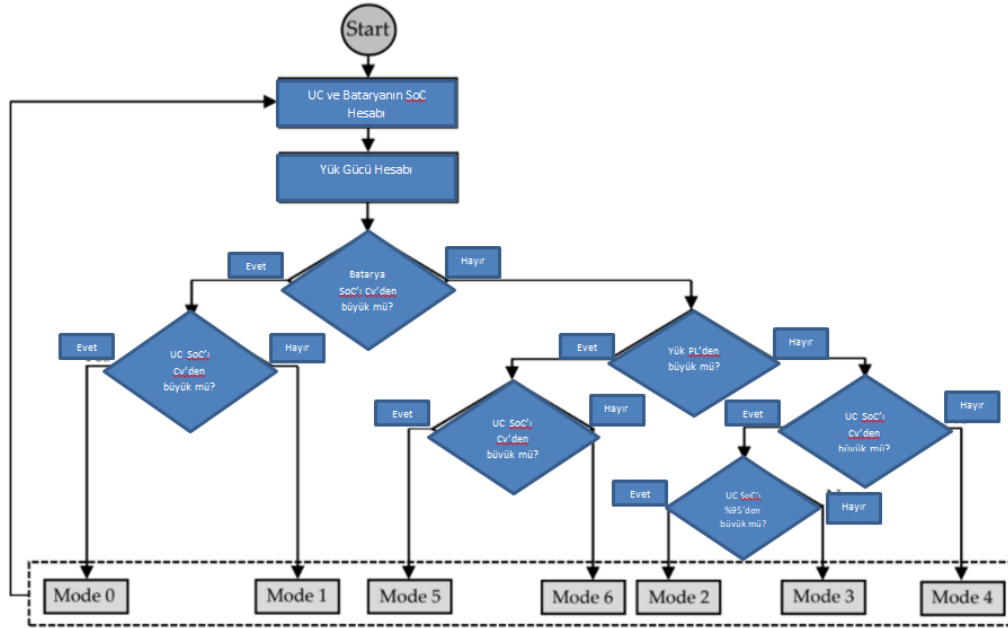
ağırlığında önemli bir payı olduğu belirtilmiştir. Bunun dışında batarya kapasitesi, kapasitör sayısı ve kapasitör modelinin (seri-paralel) ayrıca bu parametrelere etkilerinin olduğu belirtilmiştir [17].

Bai ve arkadaşları 2019 yılında yayınladıkları makalede önceki çalışmalarda kullanılan HESS yapısına benzer olan UC'nin dc/dc çevirici üzerinden, bataryanın da direkt olarak yükü beslediği yarı aktif bir HESS yapısı tanımlamışlardır. Önceki çalışmalardan farklı olarak bu makalede HESS kontrolü H_∞ kontrolörü ile sağlanmıştır. Benzetişim sonuçlarında, tasarlanan sistem bu kontrolör ile birlikte, farklı yük durumlarında UC ve bataryanın akım değerleri doğru olarak takip edilmiştir. Sonuçlar aynı sistemin kontrolünün klasik PID kontrolör ile yapıldığı değerlerle karşılaştırılmış ve H_∞ kontrolör kullanılan sistemin PID kontrolöre göre daha geliştirilmiş sağlam bir sistem olduğunu göstermiştir [18].

Yu ve arkadaşları 2020 yılında yayınladıkları bir makalede HESS sistemini, EV'lerde kullanılan BOES (Enerji depolama sistemi olarak batarya kullanılan yapı) sisteminin yüksek maliyet, düşük güç yoğunluğu ve düşük çevrim ömrü gibi olumsuz özelliklerine bir çözüm olarak belirtmişlerdir. Önceki çalışmalarda belirtilen, UC'nin dc/dc çevirici ile batarya ve yüke bağlandığı ve bataryanın direkt olarak yüke bağlandığı yarı aktif HESS yapısı üzerine çalışılmıştır. Bu makalede diğer makalelerden farklı olarak HESS boyutlandırma kriterleriyle ilgili detaylı bilgiler yer almaktadır. Doğru bir şekilde boyutlandırılmış bir HESS sisteminin ve gerçek zamanlı güç yönetim sisteminin, yeterli sürüş uzunluğu ve batarya çevrim ömrü için ne kadar önemli olduğu gösterilmiştir. Makalenin sonuç kısmında, daha fazla UC kullanılmasının ağırlığın sınırlı olduğu yerlerde daha iyi bir performans sağlayacağını garanti etmediği belirtilmiştir. Bunun yanında UC'nin enerji yoğunluğu kötü olduğu ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasına rağmen bu gücü hızlı bir şekilde boşaltabileceği belirtilmiştir. Ancak makalede önerilen HESS sistemiyle daha az UC kullanımı ve optimize edilmiş güç yönetim sistemiyle oldukça iyi performans elde edilmiştir. Önerilen bi-level optimal boyutlandırma ve kontrol yapısı, hem tasarım hem kontrol parametrelerinde optimal bir sonuç aradığı için evrensel bir optimal sonuç elde edilmesini sağlayabilmektedir [19].

Jaarsveld ve Gouws 2020 yılında yayınladıkları makalede, daha önceki çalışmalarda belirtilen batarya ve UC'nin iki tane dc/dc çevirici ile yüke bağlandığı tam aktif HESS sistemi üzerine çalışmışlardır. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu makalede

HESS kontrol temel olarak bulanık mantık yöntemi ile yapılmıştır. Bulanık mantık yöntemi kapalı devre kontrol topolojisindeki dc/dc çeviricileri kontrol etmek için kullanılırken HESS kontrolü için Kural Tabanlı Kontrol stratejisi kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaya göre bataryanın güç akışını sınırlandırmak için sistem HESS yapısıyla aktif olarak kontrol edilebilmektedir. Sistemin güç ihtiyacının, batarya yerine UC'den sağlanarak optimizasyonun geliştirilebildiği gösterilmiştir [20].



Şekil 1.8 Farklı çalışma durumlarındaki modlar [20].

Şekil 1.8 ile verildiği gibi yük gücü, batarya şarj durumu ve UC şarj durumuna göre 7 farklı çalışma modu tanımlanmıştır. Buna göre batarya şarj durumu B-UC'nin kritik SOC'undan düşükse mod 0 veya mod 1 çalıştırılır. Hangi modun olacağı UC'nin SOC'sinin B-UC'nin kritik SOC'sinden büyük ya da küçük olmasına göre belirlenir. Eğer bataryanın SOC'si B-UC'nin kritik değerinden yüksekse yük gücü, UC'nin B-UC'nin kritik değerinden düşük veya yüksek olması ve UC'nin SOC'sinin %95'ten büyük veya küçük olmasına göre mod 2, mod 3, mod 4, mod 5 veya mod 6 çalıştırılmaktadır. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu yapıda iki yönlü yerine tek yönlü dc/dc çevirici kullanılmıştır. Bu yüzden yükten UC veya batarya şarjı yapılamaz ancak gerekli durumda batarya UC'yi şarj edebilmektedir. Sonuçlar bulanık mantık yönteminin dc/dc çevirici lerin kontrolü için yeterli olduğu ve enerji yönetimi için başka bir kontrol sisteminin kullanılması gerektiğini göstermektedir.

Bu sistem bataryanın enerji transferini sınırlandırdığı için bataryanın daha optimal bir şekilde çalışmasını sağlamıştır [20].

Sonuç olarak bu kısımda elektrikli otobüslerde kullanılan farklı enerji depolama sistemleri ve sistemlerin özelliklerinden bahsedilmiştir. EDS olarak sadece bataryanın kullanıldığı sistemlerden farklı olarak HESS yapısı kullanılan sistemlerde uygun boyutlandırma yapıldığında daha düşük maliyetlerle daha verimli sistemler elde edilebilmektedir. Bu tez kapsamında da EDS olarak sadece bataryanın ve farklı HESS yapılarının kullanıldığı sistemler üzerine çalışılacaktır.



2. TOPLU TAŞIMADA KULLANILAN OTOBÜS VE ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Avrupada ulaşımda kullanılan yakıtın %90'ından fazlası petrol kaynaklı olduğu için sera gazı emisyonunun %25'i ulaşımdan kaynaklanmaktadır. Bunun dışında özellikle otomobiller, traktörler ve otobüsler karbon monoksit gibi diğer zararlı maddelerin yayılımından da sorumludur. Avrupa birliğinde iklim değişikliğini önlemek için 2040 yılına kadar karbondioksit emisyon oranının %60 seviyelerine indirilmesi hedeflenmektedir. Bu nedenle özellikle şehir merkezlerinde 'temiz teknoloji' adı altında tüm ulaşım araçlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır [21].

Bu sebeple şehir içinde kullanılan otobüslerin sıfır emisyon otobüslerle değiştirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Ancak günümüzde petrol yakıtlarının kullanıldığı otobüslerin elektrikli otobüslerle değiştirilmesinin bazı zorlukları bulunmaktadır. Öncelikle yasal olarak kullanılmalarında bir sıkıntı olmamasına rağmen elektrikli otobüs teknolojisinin günümüzdeki otobüs teknolojilerini tam olarak sağlamaları için teknik olarak daha da iyileştirilmeye ihtiyacı vardır. Ayrıca elektrikli otobüsler ve şarj olmaları konusunda farklı birçok opsiyon bulunduğu için kullanılacakları güzergah, teknolojik karmaşıklık ve işletme maliyeti gibi farklı parametrelere göre en optimal elektrikli otobüsün seçimi de önemli bir problemdir [21-22].

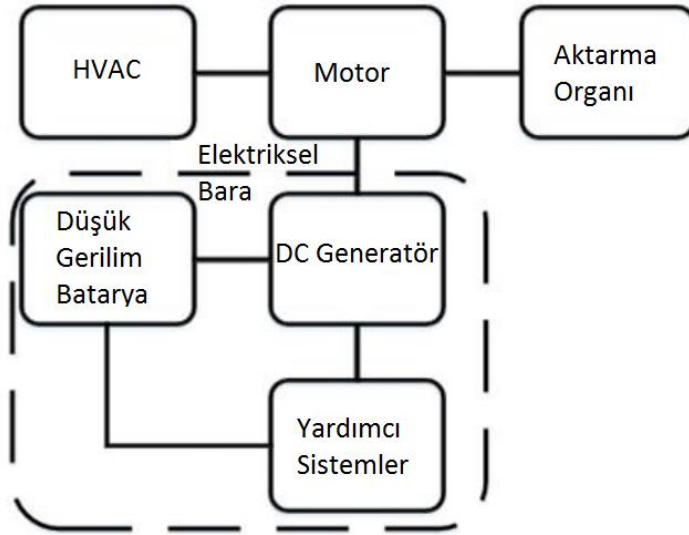
İstanbulda otobüs ile ulaşım İETT (İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri) tarafından kontrol edilmektedir. 2021 İETT verilerine göre İstanbul'da her gün karayolu ile 6.314.718 yolcu seyahat etmektedir [23]. Günümüzde İstanbul'da genel olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle İstanbul ulaşımı her gün ciddi oranda karbondioksit salınımı yapılmasına neden olmaktadır.

2.1 Toplu Taşımada Kullanılan Otobüs Tipleri

2.1.1 Geleneksel tip otobüs

Geleneksel tip otobüslerde kömür, petrol ve doğalgaz gibi yenilenemeyen enerji kaynakları kullanılmaktadır. Dünya’da genel olarak ulaşımda kullanılan otobüsler içten yanmalı motor bulunduran tiptedir. Bu tip otobüslerin en büyük problemi kaynaklarının sınırlı olmasıdır. Ayrıca bu tip otobüsler fosil yakıtlarının yanması ile çalıştıkları için çevreye de ciddi miktarda karbondioksit gazı salınımı yapmaktadırlar. Yakıt olarak dizel ve CNG kullanılan otobüsler uzun menzilli sürüşlerde dayanıklı bir performans sergilerler [8].

Fosil yakıt kullanan otobüslerde genel olarak LPG, LNG, CNG ve dizel yakıt kullanılmaktadırlar. Geçmiş yıllarda LPG otobüslerde sıklıkla kullanılmaktaydı ancak yakıt altyapısının yüksek yatırım maliyeti gerektirmesi ve LPG’nin motor dayanımı için zararlı olması bu durumu değiştirmiştir. Yakıt olarak LNG kullanan otobüslerin sürüş menzilleri uzundur ancak onlar da yüksek yatırım maliyeti gerektirirler. Yakıt olarak fosil yakıt kullanan otobüsler karşılaştırıldıklarında dizel yakıt ve CNG kullanan otobüsler en uygun opsiyon olarak kabul edilmektedir [8-9].



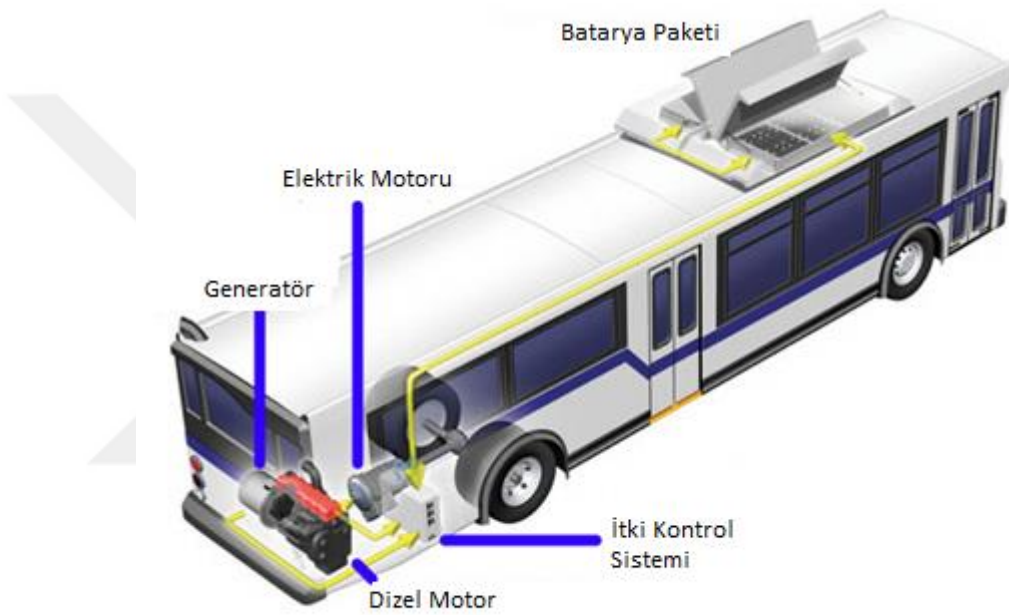
Şekil 2.1 Geleneksel otobüs modeli [24].

Şekil 2.1 ile içten yanmalı motor kullanılan geleneksel tip bir otobüsün genel yapısı verilmiştir. Geleneksel tip otobüsler temel olarak içten yanmalı motor, ısıtma ve ventilasyon sistemi (HVAC), düşük gerilimli batarya, DC generatör, elektrik barası, aktarma organı ve yardımcı cihazlardan oluşmaktadırlar. Bu tip otobüslerde mekanik

enerji içten yanmalı motorlar tarafından üretilmektedir. HVAC yüksek güç çalıştırması gerektirmez ve tüm enerjisini motordan alır [24].

2.1.2 Hibrit tip otobüs

Hibrit tip otobüslerde itki gücü içten yanmalı motor ve elektrik motorunun her ikisinden sağlanır. Genellikle içten yanmalı motor olarak dizel motor kullanılmaktadır [8]. Hibrit elektrikli araçlar temelde içten yanmalı motor, elektrik motoru, güç elektroniği sistemi, enerji depolama sistemi ve aktarma organlarından oluşurlar.



Şekil 2.2 Hibrit tip otobüs genel yapısı [25].

İçten yanmalı motorun ve elektrik motorunun mekanik gücü tekerlere ilettiği aktarma organına bağlanma şekillerine göre temel olarak 3 farklı tipleri bulunmaktadır. İçten yanmalı motorun ve elektrik motorunun aktarma organına direkt bağlandığı yapıya paralel hibrit yapı denir. Bu yapıda elektriksel bir problem oluştuğunda otobüsün ihtiyaç duyduğu itki içten yanmalı motor tarafından sağlanır [26].

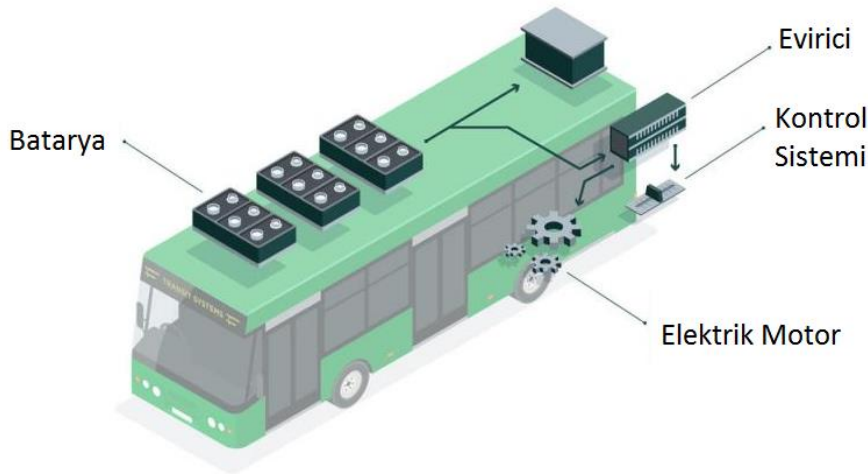
Seri hibrit yapıda mekanik güç tekerlere sadece direkt elektrik motoru tarafından iletilir. Elektrik motorunun ihtiyaç duyduğu güç bataryadan, içten yanmalı motordan veya her ikisinden sağlanır. İçten yanmalı motor çalışması araç hızından ve yoldan bağımsız olduğu için bütün çalışma boyunca neredeyse optimal şekilde çalışır. Bu

yapının dezavantajı elektrik motorunun tüm güç sisteminin verimini düşürmesidir [26].

Bir diğer hibrit yapı ise seri ve paralel konfigürasyonun birleştirildiği karma ve kompleks tip hibrit yapılarıdır. Bu yapıda içten yanmalı motor ve elektrik motoru aktarma organına bağlıken dolaylı olarak da birbirlerine bağlıdır. Bu yapının en önemli özelliği seri ve paralel hibrit yapıların avantajlarını barındırarak verimi yükseltmektedir [28].

2.1.3 Elektrikli tip otobüsler

Elektrikli tip otobüslerde içten yanmalı motor bulunmaz ve aracın itkisi tamamen elektrik motoru tarafından sağlanır. İçten yanmalı motorlu taşıtlara göre elektrikli otobüsler daha verimli çalışır ve yakıt olarak fosil kaynaklar kullanmadıkları için çevre dostudurlar.



Şekil 2.3 Genel elektrikli otobüs yapısı [29].

Şekil 2.3 ile elektrikli otobüslerde bulunan temel elemanlar gösterilmiştir. Şekildeki gibi elektrikli otobüsler genel olarak bataryanın kullanıldığı depolama sistemi, elektrik motorları, eviricilerin bulunduğu güç elektroniği sistemleri ve kontrol sistemlerinden oluşurlar.

Elektrikli taşıtlarda enerji depolama sistemi tarafından sağlanan enerji ile elektrik motoru çalıştırılır ve aracın itkisi sadece elektrik motorundan sağlanır. Bu tip araçlarda kullanılan enerji depolama sistemleri genel olarak batarya veya ultrakapasitelerdir.

Çizelge 2.1 Günümüzde kullanılan elektrikli otobüs modelleri.

Otobüs Markası	Modeli	Menzil [km]	Uzunluk [m]	Batarya Kapasitesi [kWh]	Kaynak
Solaris	Urbino 18	300	18	553	[29]
BYD	K11	354	18,5	578	[30]
Mercedes	e-Citaro	-	18,125	396	[31]
E-Busco 3.0	18M	575	18	500	[32]
Volvo	7900 E A	-	18,7	396	[33]
Proterra	ZX5 MAX	329	12,95	675	[34]
Eurabus	Eurabus 3.0	600	18	773	[35]
Temsa	MD9	-	9,49	200	[36]
Heuliez	GX 337 E	-	12	385	[37]
Yutong	E15	-	14,79	563,83	[38]

Kullanılan bataryalar barındırdıkları üstün özelliklerden dolayı çoğunlukla Lityum İyon (Li-ion) tabanlı bataryalardır. Bataryalar enerji depolama sistemi olarak çok tercih edilmelerine rağmen ultrakapasitelere göre bazı dezavantajları vardır. Enerji depolama kabiliyeti bakımından bataryalar ultrakapasitelere göre daha avantajlı olmalarına rağmen güç yoğunluğu bakımından ultrakapasitelere göre performansları daha düşüktür. Ayrıca ultrakapasiteler güç yoğunluklarının yüksek olmasının yanından bataryalardan daha hızlı şarj ve deşarj olma kabiliyetine sahiptirler. Böylece elektrikli otobüsün kullanıldığı farklı çalışma modlarında bataryalara göre avantaj oluşturmaları [39-40].

2.2 Elektrikli Otobüsün Hedef Kullanım Hattı

İstanbul metrobüs hattı dünyadaki en uzun hatlardan birisidir. 2021 verilerine göre her gün günlük 1.162.050 yolcu otobüs ve metrobüs hattıyla seyahat etmektedir.

Çizelge 2.2 ile İstanbul'daki metrobüs hattında bulunan hatlar ve uzunluk, istasyon sayısı ve sefer süresi bilgileri verilmiştir. Her gün 6 farklı hatta kilometrelerce sefer düzenlenmektedir. Avcılar-Zincirlikuyu ve Beylikdüzü-Cevizlibağ arasında yapılan seferler 26 istasyon sayısı ile en kısa mesafeli olan seferlerdir.

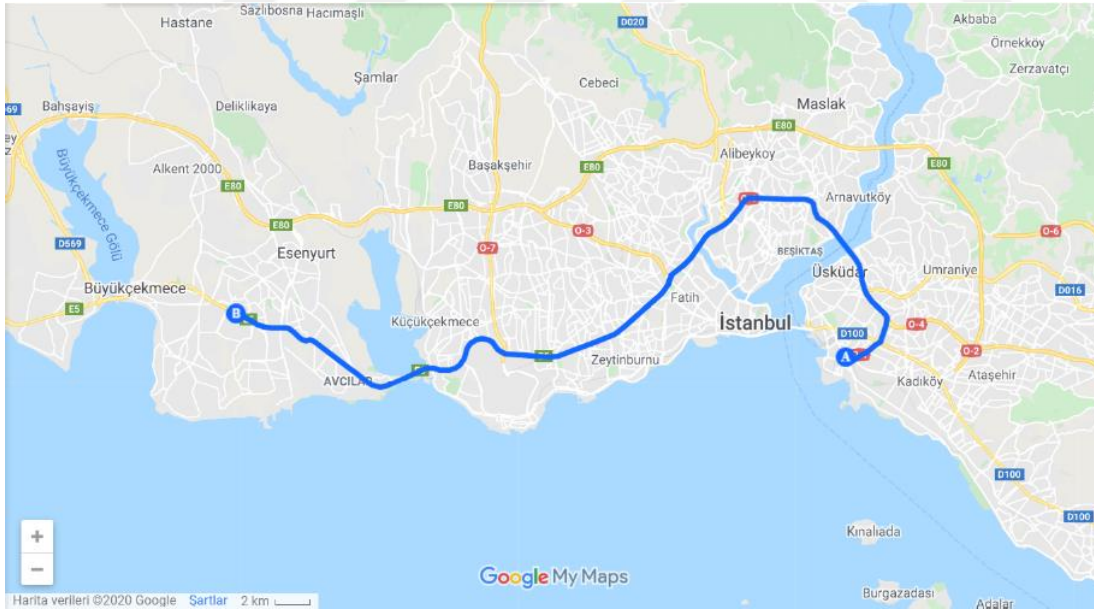
Çizelge 2.2 ile İstanbul'daki metrobüs hattında bulunan hatlar ve uzunluk, istasyon sayısı ve sefer süresi bilgileri verilmiştir. Her gün 6 farklı hatta kilometrelerce sefer

düzenlenmektedir. Avcılar-Zincirlikuyu ve Beylikdüzü-Cevizlibağ arasında yapılan seferler 26 istasyon sayısı ile en kısa mesafeli olan seferlerdir.

Çizelge 2.2 İstanbul metrobüs hattı bilgisi [41].

Hat	Hat Uzunluğu [km]	İstasyon Sayısı	Sefer Süresi (Gidiş-Dönüş) [dk]
Avcılar-Zincirlikuyu	30	26	120
Avcılar-Söğütlüçeşme	42	33	163
Beylikdüzü-Zincirlikuyu	40	37	160
Beylikdüzü-Cevizlibağ	29	26	120
Beylikdüzü-Söğütlüçeşme	52	44	200
Zincirlikuyu-Söğütlüçeşme	11,5	8	52

Bu çalışmadaki elektrikli otobüs tasarımı en uzun metrobüs hattına sahip olan Beylikdüzü-Söğütlüçeşme hattı üzerinden yapılacaktır [41]. Bu hatta her gün metrobüsler tek yön için 52 km’lik hatta 44 istasyonda 1,5 saatten fazla süren seferler düzenlenmektedir. Bu hatta 15 otobüs bulunmaktadır ve her otobüs günlük gidiş-geliş 5 sefer yapmaktadır [41-42].



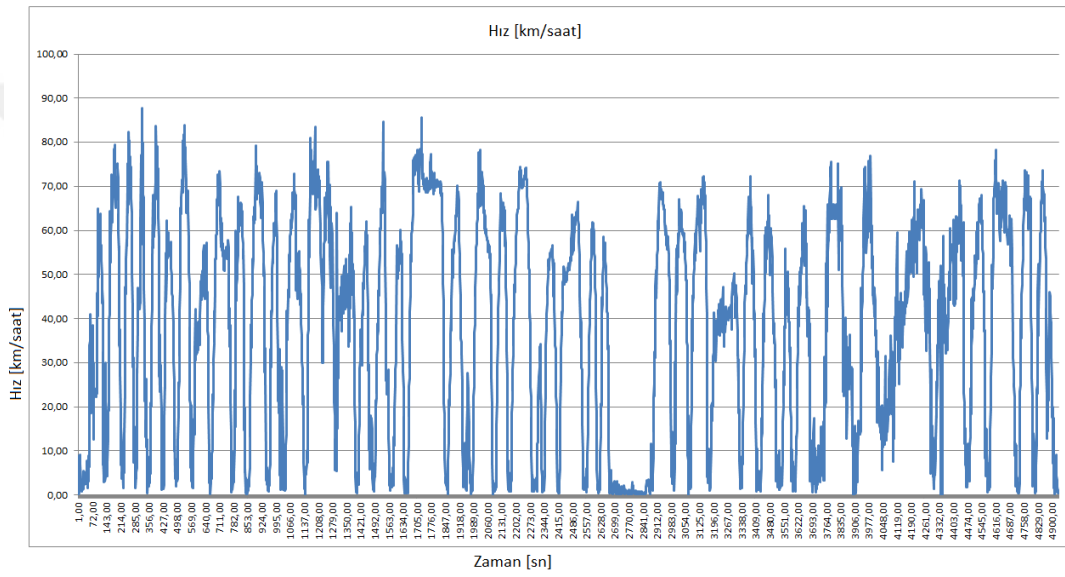
Şekil 2.4 Beylikdüzü-Söğütlüçeşme metrobüs hattı güzergâhı [41].

Çalışmanın olmadığı durumda ilk istasyonda 8 araç ve son istasyonda 7 araç beklemektedir. Rotayla ilgili bilgiler Çizelge 2.3 ile verilmiştir. H. Kaymaz metrobüs hatları üzerine yaptığı çalışmada bu hattın hız ve yükseklik değerlerini hesaplamış ve bir grafik olarak vermiştir [42].

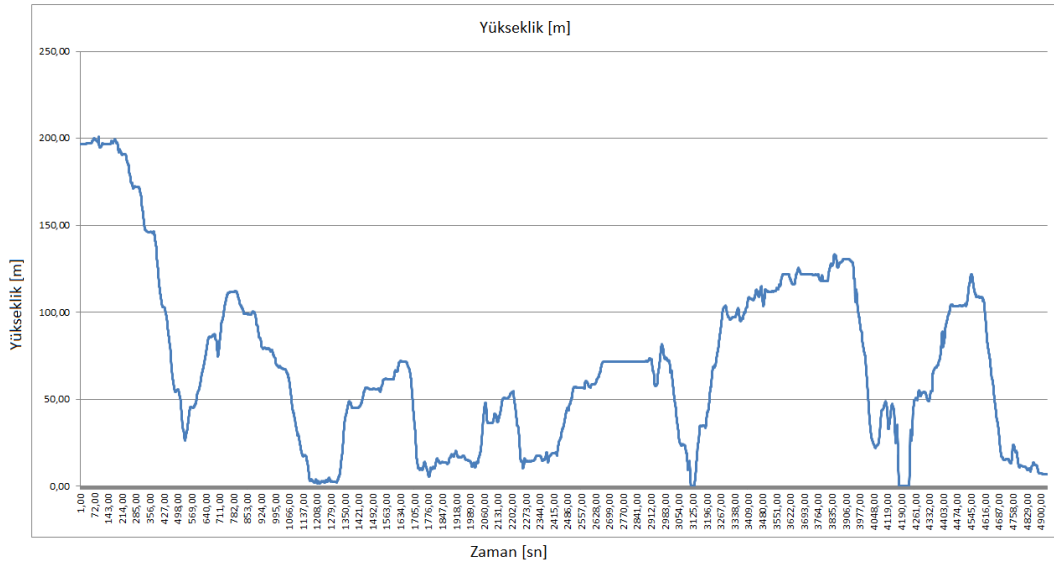
Çizelge 2.3 Beylikdüzü-Söğütlüçeşme hattı bilgileri [42].

Hat	Değer	Birim
Tek Yön Rota Uzunluğu	52	km
Tek Taşıtın Günlük Sefer Sayısı	5	-
Tek Yön Sefer Ortalama Süresi	83	dk
Tek Taşıt Günlük Toplam Sefer Süresi	415	dk
Yılda Günlük Kullanım Sayısı	365	gün

Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 ile verilen hız ve yükseklik verileri elektrikli otobüs modelinde model dinamiklerinin hesabında kullanılmıştır.



Şekil 2.5 Beylikdüzü-Söğütlüçeşme metrobüs hattı hız bilgisi [42].



Şekil 2.6 Beylikdüzü-Söğütlüçeşme metrobüs hattı yükseklik bilgisi [42].

2.3 Enerji Depolama Sistemleri

Çeşitli gücünü elektriksel enerjiden sağlayan elektrikli araçlar için yakıt verimi ve araç performansı enerji depolama sistemi tarafından büyük ölçüde sınırlandırılmaktadır [43]. Farklı yük profillerinde farklı spesifik özelliklere sahip enerji depolama sisteminin kullanılmasıyla güç sisteminin güvenilirliği ve kalitesi arttırılabilir. Buna benzer durumlarda uygulanabilecek ideal çözüm yük değişimine hızlı yanıt verebilecek, yük ihtiyacını tam olarak karşıyabilecek ve genel sistemin nominal çalışmasını etkilemeyecek bir sistem tasarımı yapılmasıdır [44].

2.3.1 Bataryalar

EV'ler 4 ana kısımdan oluşurlar; enerji depolama sistemi, mekanik iletim sistemi, motor ve güç dönüştürücüleri. Lead acid, NaS, NaNiCl, NiCd, VRFB, ZBFB, ve Li-ion bileşenine göre farklı tiplerde bataryalar bulunmaktadır.

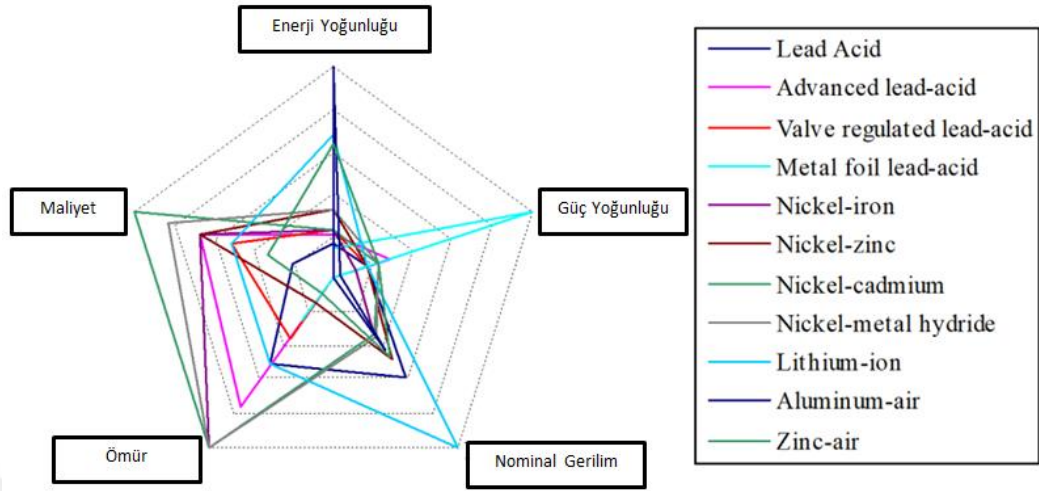
Çizelge 2.4 ile bahsi geçen farklı enerji depolama sistemlerinin özellikleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde VRFB en yüksek yaşam döngüsüne ve Li-on diğerlerine göre en yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olan enerji depolama sistemidir. Ayrıca bataryanın maliyeti, yaşam döngüsü ve nominal gerilimi de kritik faktörlerdir.

Çizelge 2.4 Farklı enerji depolama sistemlerinin özellikleri [10].

Batarya Tipi	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Güç Yoğunluğu (W/kg)	Nominal Gerilim (V)	Yaşam Ömrü (Çalışma Döngü Sayısı)	DoD (%)	Verim (%)	Maliyet (USD/kWh)
Lead-acid	50-80	10-400	2,0	1500	50	82	105-475
NaS	140-300	140-180	2,08	5000	100	80	263-735
NaNiCl	160-275	150-270	-	3000	100	84	315-488
NiCd	60-150	80-600	1,3	2500	85	83	-
VRFB	25-33	1-2	1,4	13.000	100	70	315-1050
ZBFB	55-65	1-25	1,8	10.000	100	70	525-1680
Li-ion	200-400	1.500-10.000	4,3	10.000	95	96	200-1260

Ayrıca bir hücrenin gerilim değeri de batarya paketinin güvenilir ve emniyetli bir şekilde çalışması için gerekli tekli hücre sayısını belirlediği için önemli bir noktadır.

Enerji yoğunluğu, ömür, nominal gerilim, güç yoğunluğu ve maliyet göz önüne alındığında Li-on bataryalar iyi bir seçim gibi durmaktadır.



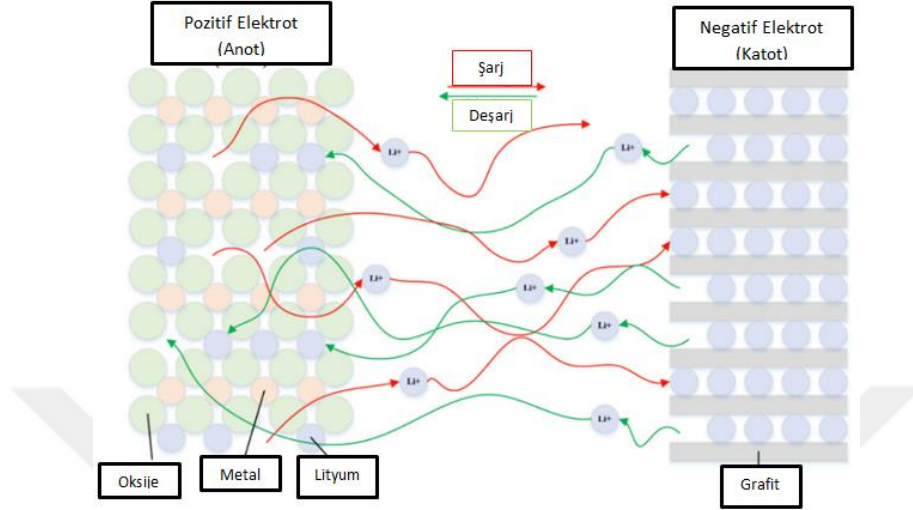
Şekil 2.7 Farklı batarya kimyalarının örümcek ağı grafiği [10].

Şekil 2.7 ile farklı hücre kimyalarının özelliklerinin daha iyi bir karşılaştırma yapılması için gösterilmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmada batarya ömrünün tamamlanması koşulunun tanımlanması gerekmektedir. Genel olarak bataryanın ömrünü tamamlaması bulunduğu sisteme artık gerekli enerji ve gücü sağlayamaması olarak tanımlanır. Bu değer elektrikli araçlarda kullanılan bataryalarda genel olarak başlangıç kapasitesinin %70-80'i olarak verilir. Otomotiv sektöründe kullanılan bataryalar araç menziliyle doğrudan orantılı olduğu için bu batarya ömrü hesabı da bu sektörde önemlidir. Günümüzde Li-ion tabanlı LFP batarya teknolojisinde enerji kapasitesinin %70'ine gelindikten sonra batarya eskimesi önemli ölçüde artmaktadır [1,44-45]. Bu çalışma kapsamında bataryanın sistemde verimli olduğu koşullarda kullanıldığı varsayılmıştır. Bu doğrultuda yapılan hesaplamalarda batarya ömrünün toplam başlangıç kapasitesinin %70'ine ulaştığında tamamlandığı kabul edilmiştir. Ayrıca deşarj derinliği bataryalar için bir diğer önemli parametredir. Bu değer bataryanın enerjisinin %100 dolu durumundan %0 tam boş durumuna kadar olan deşarj edilme oranını ifade eder. Çalışmada yapılacak benzetişimde derin deşarj değeri literatürdeki çalışmalar baz alınarak %90 olarak ele alınmıştır. Benzetişimlerde derin deşarj değeri SoC olarak verilmiştir. Benzetişimlerde enerji depolama komponentinin ortalama

enerji kapasitesi değerini belirtmek için %5 ile %95 SoC değerinin orta noktası olan %50 SoC değerinden benzetişimler koşturulmuştur [1,21, 46-47].

2.3.1.1 Lityum İyon Bataryalar



Şekil 2.8 Li-on bataryaların şarj ve deşarj durumları [10].

Şekil 2.8 ile Li-on bataryaların çalışma prensibi basit olarak verilmiştir. Li-on hücre pozitif elektrot (anot), negatif elektrot (katot), ayırıcı ve iki akım kolektöründen oluşur. Deşarj döngüsünü tamamlamak için Li^+ anottan katota elektrolit ayırıcı üzerinden transfer edilir. Negatif elektrot genellikle grafitten oluşurken anot genellikle Li-ion manganese oxide (LMO), Li-iron-phosphate (LFP), ve Li-nickel-manganese-cobalt-oxide (LNMC)’den oluşur. Diethyl carbonate veya ethylene carbonate genellikle elektrolit için kullanılır. Alüminyum ve bakır sırasıyla pozitif ve negatif akım kolektörleri için kullanılırlar. LMO/graphite kimyasal reaksiyonu şarj ve deşarj için bir örnektir.

Literatürde Li-on bataryanın farklı kimyalarından bahsedilmiştir. Çizelge 2.5 ile farklı Li-on batarya tiplerinin özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2.9 Li-on batarya hücresi [48]

Çizelge 2.5 Farklı Li-on batarya tiplerinin özellikleri [10].

Tip	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Güç Yoğunluğu (W/kg)	Ömür Döngüsü (%100 DOD)	Maliyet (US\$/kWh)	Güvenilirlik	Olgunluk
LMO	160	200	>= 2000	~360	İyi	Yeterli
LFP	120	200	>=2500	~360	İyi	Yeterli
LNMC	200	200	>=2000	~360	İyi	Yeterli
Li-Titanate Oxide	70	1000	>=10000	~860	İyi	Deneme Evresi
Li-Sulfur	500	-	~100	-	İyi	AR-GE Aşaması

Li-on'lar EV'ler için en iyi tercih olsalar da artan performans ve yüksek yaşam döngüsüyle birlikte fiyatlarının düşürülmesine ihtiyaçları vardır. Üretim ve teknoloji gibi farklı perspektiflerle sermaye maliyetleri düşürülebilir. Li-on'ların verimlerini ve deşarj derinliğini geliştirici yönde birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bir çalışmaya göre 2030'a kadar Li-on'ların sermaye maliyeti 77–574 USD/kWh'dan 200–1260 USD/kWh'ya, enerji yoğunluğu 200–735Wh/L ve verimi %2 artacaktır [49].

2.3.2 Ultrakapasiteler

Kapasiteler elektrik enerjisini fiziksel olarak birbirinden ayrılan ve birleşen zıt elektrik yükleri ile depolarlar. Enerji depolaması temel olarak iki elektron arasındaki elektriksel alanın formu olarak sağlanır. Paralel plakaların arasında depolanan elektriksel yükler bir yalıtım maddesi ile ayrılırlar. Kapasitede depolanan enerji denklem 3.1'deki gibi Coulombs birimine göre ölçülür.

$$Q = C.V = \frac{A\varepsilon}{d}V \quad (3.1)$$

Kapasitenin enerji depolayabilme kabiliyeti plakaların alanı olan A ve plakanın elektriksel iletkenlik sabiti olan ε ile doğru orantılıyken, plakalar arası uzaklık olan d ile ters orantılıdır. Ultrakapasiteler ise düşük gerilimlerde yüksek değerdeki enerjiyi depolayabilen özelleşmiş bir kapasite çeşitidir. Bu özellikleri geniş plaka alanına ve yüksek elektriksel iletkenlik katsayısına sahip olmalarından kaynaklanır. Karbon/Metal Fiber Komposit, Köpüklü Cam Karbon, Yapıştırıcı Karbon Partikülü,

Polimer Film Kaplı Karbon ve Metal Oksit Kaplı Metal Folyo farklı ultrakapasite teknolojileri üzerine çalışmalar devam etmektedir.

UC'lerin enerjiyi zıt elektriksel yükleri depolamasıyla elde etmesinin UC'lerin ömür döngüsü, verimleri, enerjileri, güç yoğunlukları ve gerilimleri üzerinden önemli bir etkisi vardır. Nominal çalışmalarında elektrotlar arasında kimyasal olarak bir değişiklik olmadığı için UC'lerin ömürleri yüksektir. Verimleri sadece iletim yolundaki direncin fonksiyonuna bağlı olduğu için yüksektir. Elektriksel yükler elektrotlarda fiziksel olarak depolandığı için güç yoğunlukları oldukça fazladır. Elektronlar fizikler olarak birleşmediği için enerji yoğunlukları düşüktür. Kimyasal bağ eksikliklerinden dolayı SoC değerlerinin bir fonksiyonu olarak yüksek gerilim dalgalanmasına neden olacak şekilde tamamen deşarj olabilirler.



Şekil 2.10 Ultrakapasite hücresi [47]

UC'lerin elektrikli araç teknolojilerinde kullanılmasının en önemli nedenlerinden birisi elektronik arayüz teknolojisindeki gelişmelerle birlikte değişken gerilim aralıklarında çalışabilmeleridir. Ayrıca elektrot alanlarını arttırıcı yöndeki tasarımlarla enerji depolama kabiliyetlerinin arttırılmasına yönelik çalışmalar da devam etmektedir [43].

Günümüzde UC'lerin elektrikli araç teknolojilerinde düşük enerji ihtiyacı gereken durumlarda kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır [44].

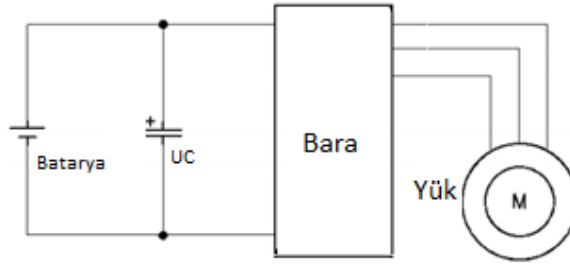
2.4 Hibrit Enerji Depolama Sistemleri (HESS)

Hibrit enerji depolama sistemleri enerji depolama sistemi batarya, ultrakapasite vb. gibi farklı depolama sistemlerin bir arada kullandığı yapılardır. Kullanılacakları sistemlere göre HESS'lerde birbirlerine göre farklı parametrelerde üstünlükleri bulunan depolama sistemleri yer alır. HESS'leri tasarımları kullanıldıkları

sistemlerin enerji miktarı, ihtiyaç olan enerji tipi gibi farklı koşullara göre yapılmaktadır.

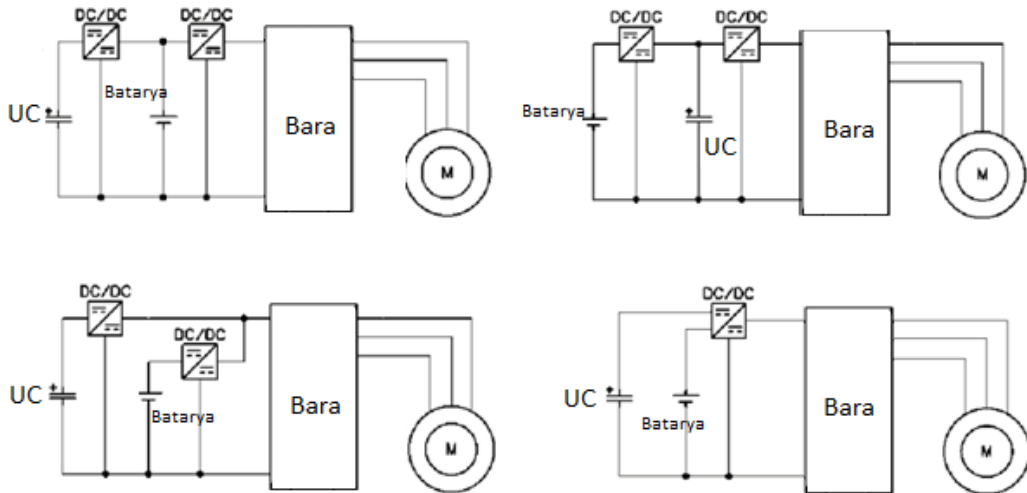
2.4.1 HESS topolojileri

HESS yapılarında genel olarak yük bir DC bara üzerinden beslenmektedir. HESS'i oluşturan enerji depolama sistemlerinin DC baraya bağlanma durumlarına göre farklı HESS yapıları bulunmaktadır. Enerji depolama sistemi elemanlarının baraya bir dc/dc çevirici üzerinden bağlanmadığı yapılara pasif HESS denilmektedir.



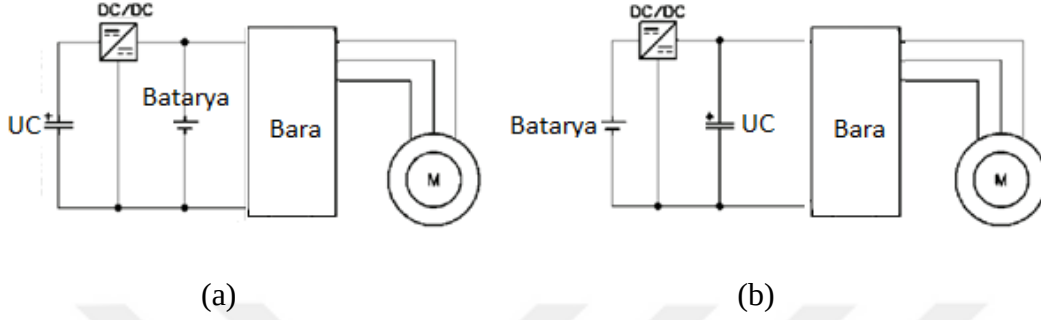
Şekil 2.11 Pasif HESS topolojisi [50].

Şekil 2.11 ile verilen yapıya bakıldığında batarya, kapasite ve DC bağlantı paralel olduğu için hepsinin gerilimi birbirine eşittir. UC'nin enerjisi gerilimin değişimiyle doğru orantılı olduğu için ve UC'nin gerilimi sıfır olmaya uygun olduğu için UC'nin etkin enerjisi de sıfır olabilir. Bu yüzden yüksek HESS verimi sağlamak için dc/dc çevirici ye ihtiyaç vardır [50].



Şekil 2.12 Farklı topolojilerdeki HESS yapıları [50].

Şekil 2.12 ile verilen topolojilerde her depolama ünitesi kendi dc/dc çeviricisini bulundurur. Bu şekilde batarya ve UC'nin baraya bir dc/dc çevirici üzerinden bağlandığı HESS yapıları aktif HESS olarak tanımlanır. Bu topolojiler gerilim, akım ve gücün tam olarak yönetimini sağlarlar ancak fazla çevirici olduğundan maliyet artar.



Şekil 2.13 Yarı aktif HESS yapıları [50].

Bu yüzden genel olarak Şekil 2.13 ile verildiği gibi tekli dc/dc çevirici olan yapılar kullanılır. Enerji depolama sistemi elemanlarından birisinin baraya bir dc/dc çevirici üzerinden ve diğer elemanların direkt bağlandığı yapılara yarı aktif HESS denilmektedir.

Ancak bu yapılar da araç çekiş gücü için düşük güçlü olabilirler. Şekil 2.13 (a) yapısında batarya DC baraya direkt olarak bağlıyken UC dc/dc çevirici üzerinden bağlıdır. Bu topoloji, UC deşarj olurken dc/dc çevirici DC bağlantı gerilimini korur. Böylece depolanmış bütün enerji tüketildiği için hibrit enerji depolama sistemleri içinde en çok kullanılanıdır. Ancak UC'nin ivmelenme için yüksek güç yoğunluğu, geri kazanımlı frenleme ve yüksek sayıda şarj ve deşarj döngüsü gibi bütün avantajları kullanılmak istenirse, dc/dc çeviricinin gücünün UC ünitesinin bütün güç durumlarını sağlaması gerekir ki bu da yüksek maliyetli güç elektroniği cihazlarının kullanımına neden olur.

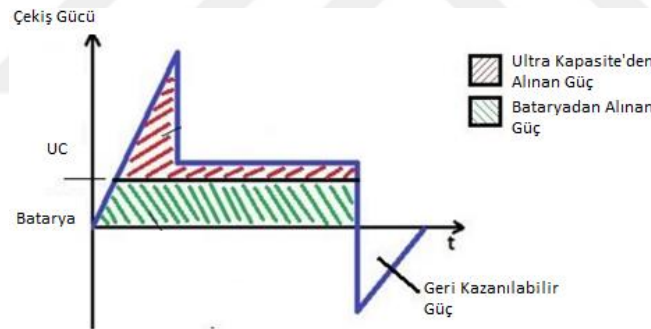
Şekil 2.13 (b) yapısında UC DC baraya direkt olarak bağlıyken batarya bir dc/dc çevirici üzerinden bağlıdır. Bu topolojide batarya dc/dc çeviriciyle bağlı olduğu için batarya akımı çevirici üzerinden tamamen kontrol edilebilir. Böylece herhangi bir sürüş durumunda batarya ani şarj veya deşarj akımından korunabilir. Şekil 2.13 (a)'ya kıyaslandığında UC çoğu güç durumlarını sönmlediği için bu yapı daha düşük güce gerek duyabilir. Ancak UC'ler uzun yüksek hızlı sürüşlerde tükenabilir ve bu durumlarda güç bataryadan sağlanır [50].

Elektrikli araçlarda güç yoğunluğu, güç değişimleri, enerji yoğunluğu ve ortalama güç gibi enerji ve gücün daha etkili olduğu farklı sürüş durumları bulunmaktadır. Bu farklı enerji ve güç ihtiyacı profillerini optimal şekilde karşılamak için elektrikli araçlarda HESS yapısı kullanılması sistemin verimini artırır.

Çizelge 2.6 Farklı durumlarda kullanılan enerji depolama sistemleri [50].

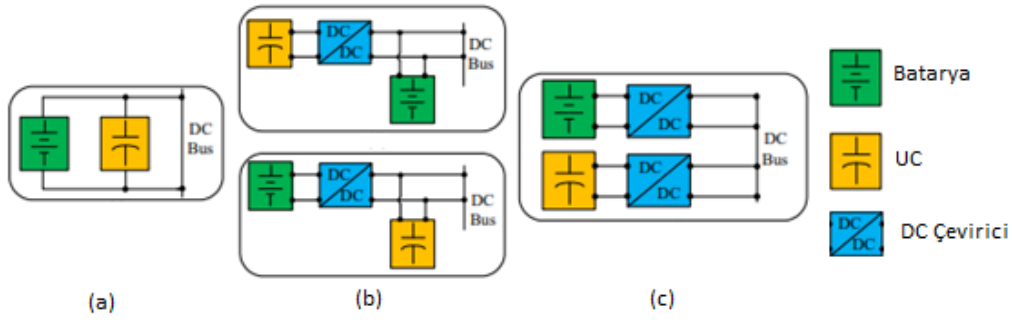
UC:	Güç Yoğunluğu	Güç Değişimleri
Batarya:	Enerji Yoğunluğu	Ortalama Güç

Lastra'nın 2016 yılında yaptığı çalışmada Çizelge 2.6 ile verildiği gibi hangi tip enerji/güç ihtiyacında hangi enerji depolama sisteminin kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Buna göre UC'lerin güç yoğunluğu fazla olduğu için güç değişim durumlarında, bataryanın enerji yoğunluğu fazla olduğundan ortalama güç gereksinimi durumlarında çalışacak şekilde tasarlanması gerektiği belirtilmiştir. Şekil 2.14 ile verildiği gibi çekiş gücü belirli bir sabit güç değerine kadar (batarya akımının batarya satürasyon akımından düşük olduğu) bataryadan sağlanırken, yüksek güç gerektiren güç değişimi durumlarında UC'den sağlanır.



Şekil 2.14 Talep gücüne göre batarya ve UC kullanımı [50].

Shen'in HESS yapıları üzerine yaptığı çalışmasında Şekil 2.15 ile verildiği gibi batarya ve UC'nin DC baraya Pasif HESS, Yarı Aktif HESS ve Tam Aktif HESS yapıları olacak şekilde farklı bağlantıları ve topolojileri üzerine detaylı olarak çalışmıştır [51]. Çalışmada bataryanın ve UC'nin direkt olarak DC baraya bağlandığı yapı pasif HESS yapısı olarak tanımlanır. Yarı Aktif HESS yapısında tek yönlü veya çift yönlü dc/dc çeviriciye göre batarya ve UC arasında tek veya çift yönlü güç akışı sağlanır. Tam Aktif HESS yapısında bataryanın da UC'nin de gerilim seviyesi DC bara geriliminden daha düşüktür. Sistemden bir güç talebi olduğunda batarya ve UC'nin gerilim seviyesi artırılır.

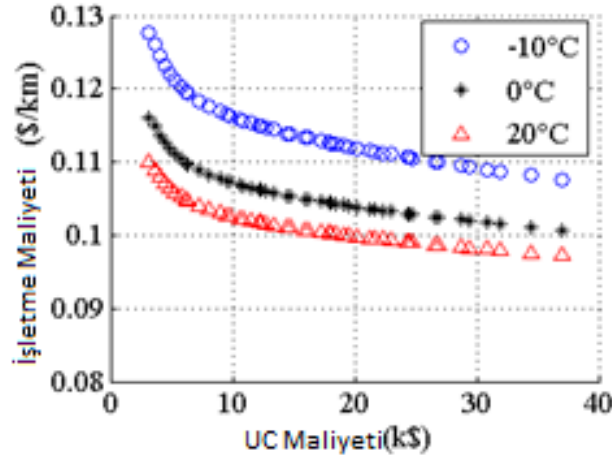


Şekil 2.15 (a) Pasif HESS topolojisi, (b) Yarı Aktif HESS topolojisi, (c) Tam Aktif HESS topolojisi [51].

Pasif HESS, Yarı Aktif HESS ve Tam Aktif HESS'in Çizelge 2.7 ile verildiği gibi farklı avantaj ve devantajları bulunmaktadır [51].

Song ve arkadaşlarının 2018 yılında yayınladıkları makalede temel olarak farklı sıcaklık değerlerinin optimize edilen HESS sistemi üzerindeki etkisini, UC'nin boyut optimizasyonu ve EV için EYS'yi de hesaba katarak göstermişlerdir.

Çalışmada DC baraya direkt olarak bağlı bir batarya ve dc/dc çevirici üzerinden bağlı bir UC bulunan HESS yapısı kullanılmıştır. Çalışmada sıcaklığın HESS sistemi üzerindeki etkisi üzerine çalışılmıştır [52].



Şekil 2.16 Sıcaklığın UC boyutlandırmasındaki etkisinin sonuçları [52].

Şekil 2.16 ile verilen grafiklerde sıcaklığın UC boyutlandırmasındaki etkisinin sonuçları verilmiştir. Grafiklere göre sıcaklık düştükçe çalıştırma maliyeti artmaktadır ve bu nedenle HESS yapılarında boyutlandırma çalışmaları yapılırken sıcaklık faktörünün de bir değişken olarak alınması önemlidir [52].

Çizelge 2.7 Pasif HESS, Yarı Aktif HESS ve Tam Aktif HESS yapılarının avantaj ve dezavantajları [51].

Topoloji	Avantaj	Dezavantaj
Pasif HESS	Basit Yüksek güvenilirlik Düşük maliyet	Aktif olarak kontrol edilemez Enerji depo komponentlerinin tüketimi sınırlı
Yarı Aktif HESS	Yarı aktif kontrol stratejileri uygulanabilir. HESS performansını arttırmak için aktif kontrol edilen enerji depolama komponentlerinin çalışma aralığını arttırabilir. Aktif kontrol edilebilen bazı enerji depolama komponentlerinin boyut/gerilimini düşürmek için kısmi esneklik sağlar.	Eğer aktif kontrol iyi bir şekilde sağlanamazsa, bataryaların DC baraya bağlanma nedeni sabit gerilim sağlaması olmasına rağmen yük dalgalanmaları oluşabilir.
Tam Aktif HESS	Bütün enerji depolama komponentlerinde tam aktif kontrol ve en yüksek esneklik HESS performansını arttırmak için aktif kontrol edilen enerji depolama komponentlerinin çalışma aralığını yüksek ölçüde arttırabilir. Enerji depolama komponentlerinin hepsinin hacim/gerilim oranının küçültülme potansiyeli vardır.	Sistemin hacim/ağırlık oranı büyüktür ve fazla dc/dc çevirici ihtiyacından dolayı yüksek maliyet oluşur. Fazla güç elektroniği cihazları kullanıldığı için yüksek güç kaybı oluşur

2.4.2 HESS kontrol sistemleri

HESS’lerde farklı karakteristik özelliklere sahip enerji depolama sistemi elemanları kullanıldığı için enerji yönetimi bu özellikler dikkate alınarak yapılmaktadır. Batarya ve UC’nin spesifik özelliklerinin dışında elektrikli otobüsün anlık yük ihtiyaç profiline de verimli bir güç yönetimi yapılabilmesi için enerji yönetim sisteminde hesaba katılması gerekmektedir. HESS’nin güç akışı kontrolünün daha doğru bir

şekilde sağlanması için Pasif HESS yerine Yarı Aktif veya Tam Aktif HESS yapısı kullanılması daha doğrudur.

Yarı aktif ve tam aktif HESS yapılarında batarya ve UC'ler baraya bir dc/dc çevirici üzerinden bağlanır. Bataryanın ve UC'nin sistemin ne zaman güç kaynağı olacağına veya sistemden güç alacak depolama sistemi olarak çalışacaklarına göre güç yönetimi yapılır. Bu yönetim yapılırken batarya ve UC'nin çeşitli güç değerleri göz önünde bulundurulur. Bunlar dışında kullanılan dc/dc çevirici güç kapasitesi ve çevirici tipi de EYS için önemli parametrelerdir. Kullanılacak HESS yapısı belirlendikten sonra sistemde hangi dc/dc çeviricinin kullanılacağına da karar verilir.

EYS optimizasyonu için enerjinin hangi durumlarda hangi depolama elemanından alınması gerektiği tanımlanmalıdır. Yapılan bu tanıma göre enerji depolama sistemi elemanlarının anlık SoC durumu, terminal gerilimleri, karakteristik özellikleri, yük profili vb. özellikler dikkate alınarak enerji yönetimi sağlanır. Enerji yönetimi yapılırken kullanılacak EDS sisteminin bulunacağı yük profili de önemli bir kriterdir. Yük profiline göre kullanılacak EYS algoritması belirlenir.

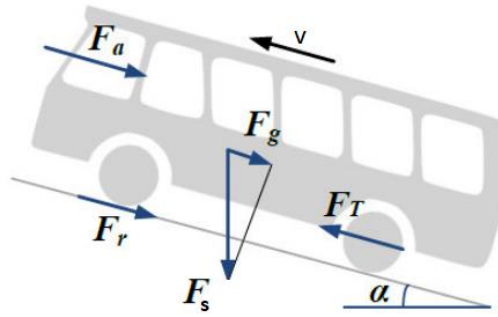
Örneğin UC'lerin güç yoğunluğu özellikleri yüksek olduğu için ani yüksek güçler talep eden bir yük profilinde bataryanın ömrünün uzatılması amacıyla ani yükler daha çok UC'lerden karşılanabilir. Bu şekilde kullanılacak EDS sisteminde daha önemli olan parametrenin hangisi olduğuna karar verilerek EYS yönetimi yapılabilir. Bu şekilde optimal bir EYS ile optimal maliyetle, komponent ömrüyle ve toplam ağırlıkla EDS tasarımı gerçekleştirilebilir.

3. ELEKTRİKLİ OTOBÜS BENZETİŞİMİ

3.1 Elektrikli Otobüs Dinamikleri

Elektrikli araçların hareketleri sırasında direnç kuvvetleri olarak tanımlanan, araçların genellikle hareketlerine karşı oluşan kuvvetler tanımlanır. Bu dış kuvvetler aracın gidiş yönüne, yapısına, hareketine, hızına, yol eğimine, yol durumuna veya aracın ivmelenmesine göre değişir.

Elektrikli araç modellemesinde bu dış kuvvetler temel olarak 4 başlık altında toplanır. Şekil 3.1 ile araca etkiyen bu kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Elektrikli araçlara etkiyen kuvvetler [53].

Yuvarlanma kuvveti otobüsün kütlesi, yer çekimi ivmesi ve tekerlek sürtünme katsayısı (c_t) bileşenleriyle doğru orantılı olan bir direnç kuvvetidir. c_t katsayısı, tekerleklerin yuvarlanmaları sırasında yol ve lastiklerdeki şekil değiştirmelerden ve lastiğin histeresiz kayıplarını ifade eden bir değerdir. Yuvarlanma kuvveti denklem 4.1'deki gibi ifade edilir.

$$F_y = c_t \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (4.1)$$

F_y : Yuvarlanma kuvveti (N)

m : Otobüs kütlesi (kg)

g : Yer çekimi ivmesi (m/s^2)

c_t : Tekerlek sürtünme katsayısı

α : Eğim açısı

Bir diğer direnç kuvveti de hava sürtünme kuvvetidir. Hava sürtünme kuvveti aracın ön izdüşüm alanına, hava sürtünme katsayısına, havanın yoğunluğuna ve hıza bağlı olarak değişen bir kuvvet değeridir. Hava içerisinde hareket eden taşıt gövdesinin sürtünmesinden kaynaklanır. Aracın hareketi sırasında hızın karesi ile orantılı olarak değişen bir kuvvettir. Hava sürtünme kuvveti denklem 4.2'deki gibi ifade edilir.

$$F_h = \frac{1}{2} \cdot c_r \cdot \rho \cdot A_f \cdot (v \pm v_0)^2 \quad (4.2)$$

F_h : Hava sürtünme kuvveti (N)

c_r : Hava sürtünme katsayısı

ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

A_f : Aracın ön izdüşüm alanı (m^2)

v : Araç hızı (m/sn)

v_0 : Rüzgar hızı (m/sn)

Eğim kuvveti araca etkiyen bir diğer direnç kuvvetidir. Eğim kuvveti otobüsün kütlesine, yer çekimi ivmesine ve eğime bağlı bir değişken kuvvettir. Bu kuvvet eğime göre pozitif veya negatif olabilir. Eğim kuvveti denklem 4.3'teki gibi ifade edilebilir.

$$F_e = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (4.3)$$

F_e : Eğim kuvveti (N)

Son olarak ivmelenme kuvveti de araca hareket esnasında etkiyen bir direnç kuvvetidir. İvmelenme kuvveti otobüsün kütlesine, aracın kütle faktörüne ve ivmesine bağlı bir kuvvettir. Dönen kütlenin ivmelenmesieylemsizlik yükü olarak araca etki eder. İvmelenme kuvveti ve araç kütle faktörü sırasıyla denklem 4.4 ve 4.5'deki gibi ifade edilebilir.

$$F_i = \delta \cdot m \cdot a \quad (4.4)$$

$$\delta = 1,04 + 0,0025i^2 \quad (4.5)$$

F_i : İvmelenme kuvveti (N)

δ : Araç kütle faktörü

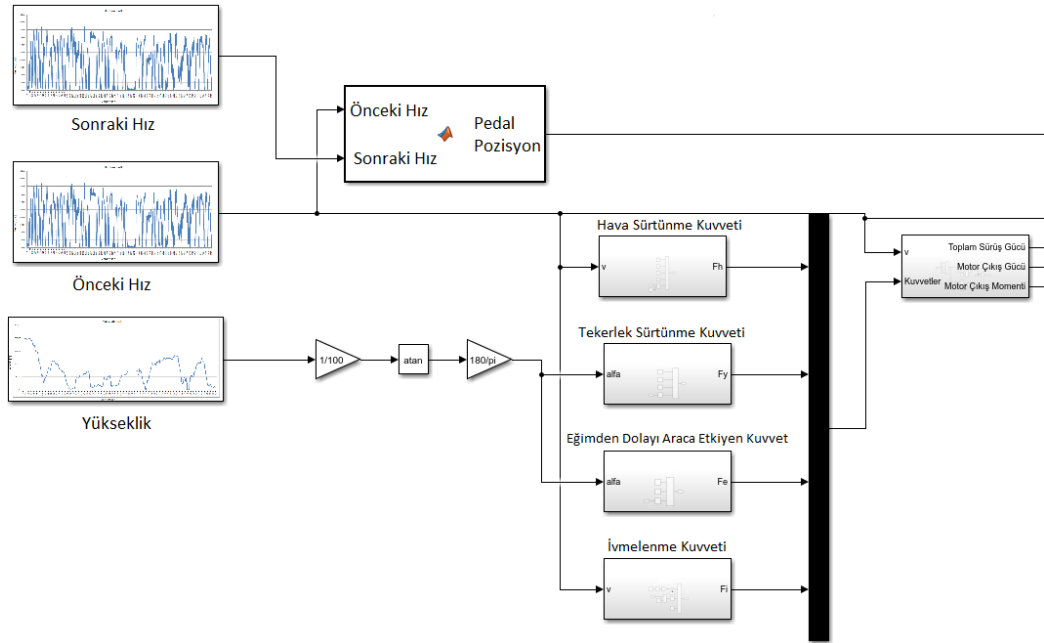
i : Toplam mekanik çevirme oranı

Aracın toplam çekiş kuvveti denklem 4.6'daki gibi bu kuvvet değerlerinin toplamına eşittir.

$$F_T = F_y + F_h + F_e + F_i \quad (4.6)$$

F_T : Toplam çekiş kuvveti (N)

Tez çalışmasında elektrikli otobüs modeli benzetişimi için MATLAB/Simulink programı kullanılmıştır. Elektrikli otobüsün sefer sırasında tüketeceği enerjinin daha doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için Beylikdüzü-Söğütlüçeşme metrobüs hattının gerçek hız ve eğim değerleri benzetişimde kullanılmıştır. Bu değerlerle birlikte Çizelge 3.1 ile verilen elektrikli otobüs verileri kullanılarak elektrikli taşıta etkiyen toplam direnç kuvveti hesaplanmıştır.



Şekil 3.2 Elektrikli otobüs modelinde direnç kuvvetleri hesaplama blokları.

Şekil 3.2 ile verildiği gibi benzetişimin ilk kısmında metrobüs hattı hız ve eğim verileri işlenmiştir. Direnç kuvvetlerinin hesabı dışında metrobüs hattı hız verisiyle elektrikli otobüsün geri kazanımlı frenleme yapma durumu da çıkartılmıştır. Metrobüs hattının hız verisi ile her bir saniyedeki verinin bir sonraki saniyeye

alınmış değerleri arasında bir karşılaştırma yapılarak elektrikli otobüsün o an hızlandığı veya yavaşladığı bilgisi elde edilmiştir.

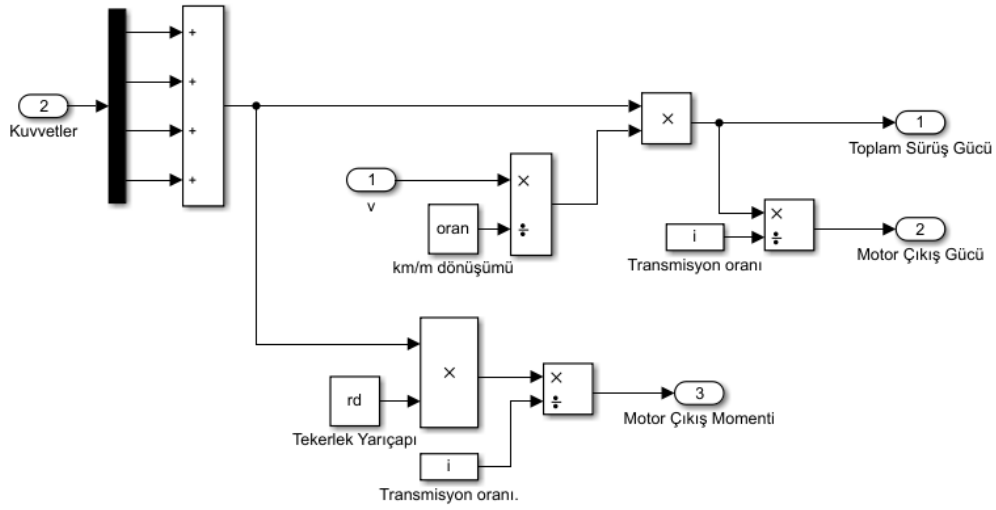
Pedal pozisyon bloğunda elektrikli otobüsün hızlanma ve yavaşlama durumuna göre göre bilgi MATLAB’de EK (a)’daki kod döngüsü eklenerek bir pedal pozisyon bilgisi elde edilmiştir. Elektrikli otobüs benzetişiminde kullanılan değişken değerleri Çizelge 3.1 ile verilmiştir. Çizelgede belirtilen r_d tekerlek yarıçapını ifade etmektedir.

Çizelge 3.1 Elektrikli otobüs benzetişiminde kullanılan değişken değerleri.

Değişken	Değer	Birim	Kaynak
c_r	0,65		[54]
d	1,23		[55]
A_f	8,16	m^2	[55]
oran	3,6		
c_t	0,009		[55]
m	30.000	kg	[55]
g	9,81	m/s^2	
i	20		
r_d	0,466	m	[55]
Araç Genel Yükler	15	kW	[56]
Batarya Hücresi Nominal Gerilim	3,2	V	[57]
Batarya Hücresi Üst Şarj Limiti	3,65	V	[57]
Batarya Hücresi Minimum Gerilimi	2,5	V	[57]
Batarya Hücresi Kapasitesi	45	Ah	[57]
Batarya Hücresi İç Direnci	2	$m\Omega$	[57]
Batarya Hücresi Enerji Yoğunluğu	145	Wh/kg	[57]
Maksimum Ömür Döngüsü (%70 SoH ve %100 DoD)	3000	-	[57]
UC Hücresi Kapasitesi	3.000	Farad	[58]
UC Hücresi Nominal Gerilimi	2,7	V	[58]
UC Hücresi Maksimum Akım	2.165,78	A	[58]
UC Hücresi Güç Yoğunluğu	6.033	W/kg	[58]
UC Hücresi Enerji Yoğunluğu	3,0375	Wh/kg	[58]
UC Hücresi ESR	0,29	$m\Omega$	[58]
UC Hücresi Ömür Döngüsü	500.000	-	[58]
Batarya Hücresi Ağırlığı	0,99	kg	[59]
Batarya Hücresi Fiyatı	20	\$	[59]
UC Hücresi Maliyeti	493,70	₺	[60]

Benzetışimde kullanılan bataryanın katalog bilgileri EK O, UC’nin katalog bilgileri EK P ve EK S ile verilmiştir. Toplam çekiş kuvveti ve otobüs hızı bilgileri kullanılarak toplam çekiş gücü hesabı için Şekil 3.3 ile verilen hesaplamalar

kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalarla birlikte toplam sürüş gücü, motor çıkış gücü ve motor çıkış momenti değerleri elde edilmiştir.



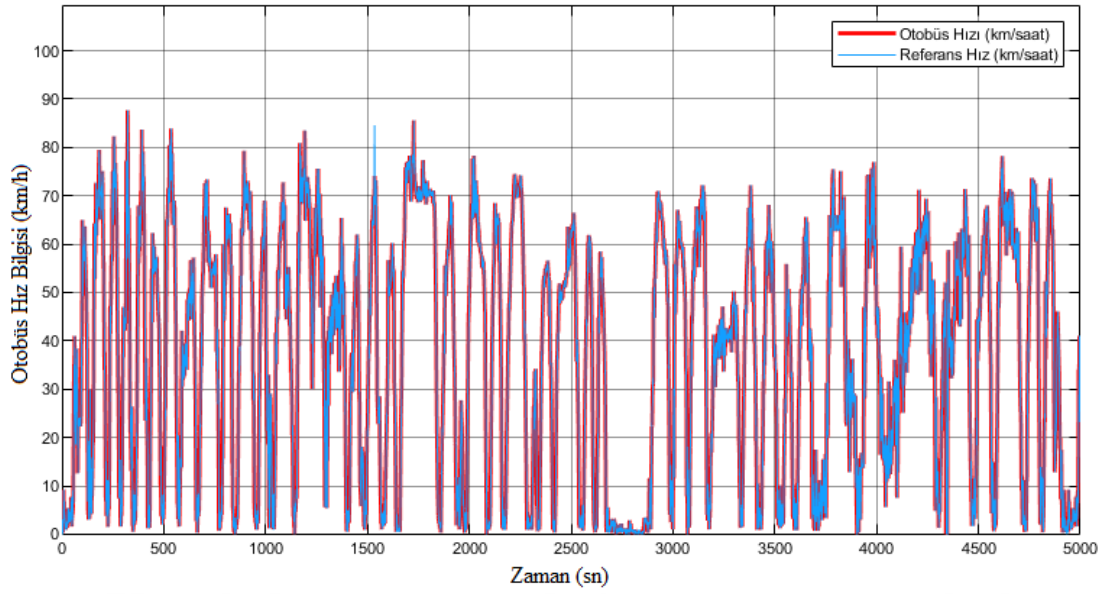
Şekil 3.3 Toplam sürüş gücü ve çıkış momenti hesaplama bloğu iç gösterimi.

Hesaplanmış motor çıkış gücü, pedal pozisyonu, çıkış momenti ve otobüs hızı bilgileri kullanılarak enerji depolama sisteminin güç talebi hesaplanmaktadır.



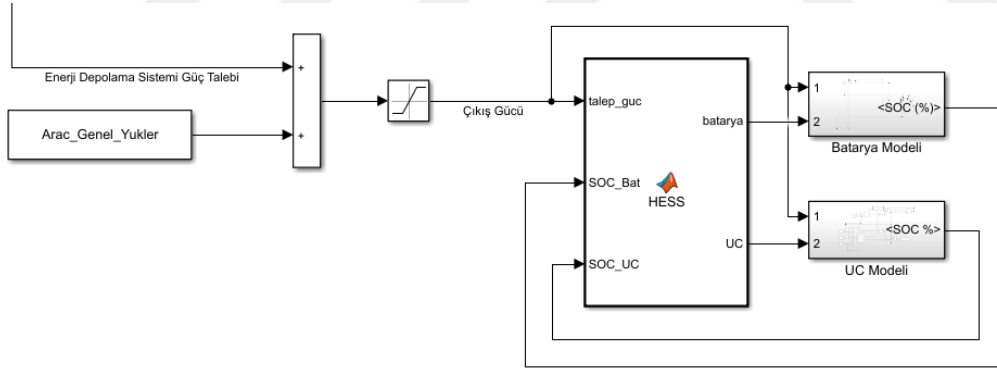
Şekil 3.4 Enerji depolama sistemi güç talebi bloğu.

Elde edilen hız ve moment bilgilerinden yola çıkılarak elektrik motorunun verim değeri elde edilmiştir. Elektrikli otobüs modelinde elektrikli motor olarak piyasadaki elektrikli otobüslerin incelemesi sonucunda 125 kW gücünde 2 adet asenkron motor kullanılmıştır [61-63]. Benzetişimde asenkron motorun verim haritası bir veri tablosu olarak işlenmiştir [63]. Şekil 3.5 ile verilen otobüs hızı ve çıkış momenti değerine göre asenkron motor verimi EK (b)'de belirtilen MATLAB kodu ile hesaplanmış ve verim değeri elde edilmiştir.



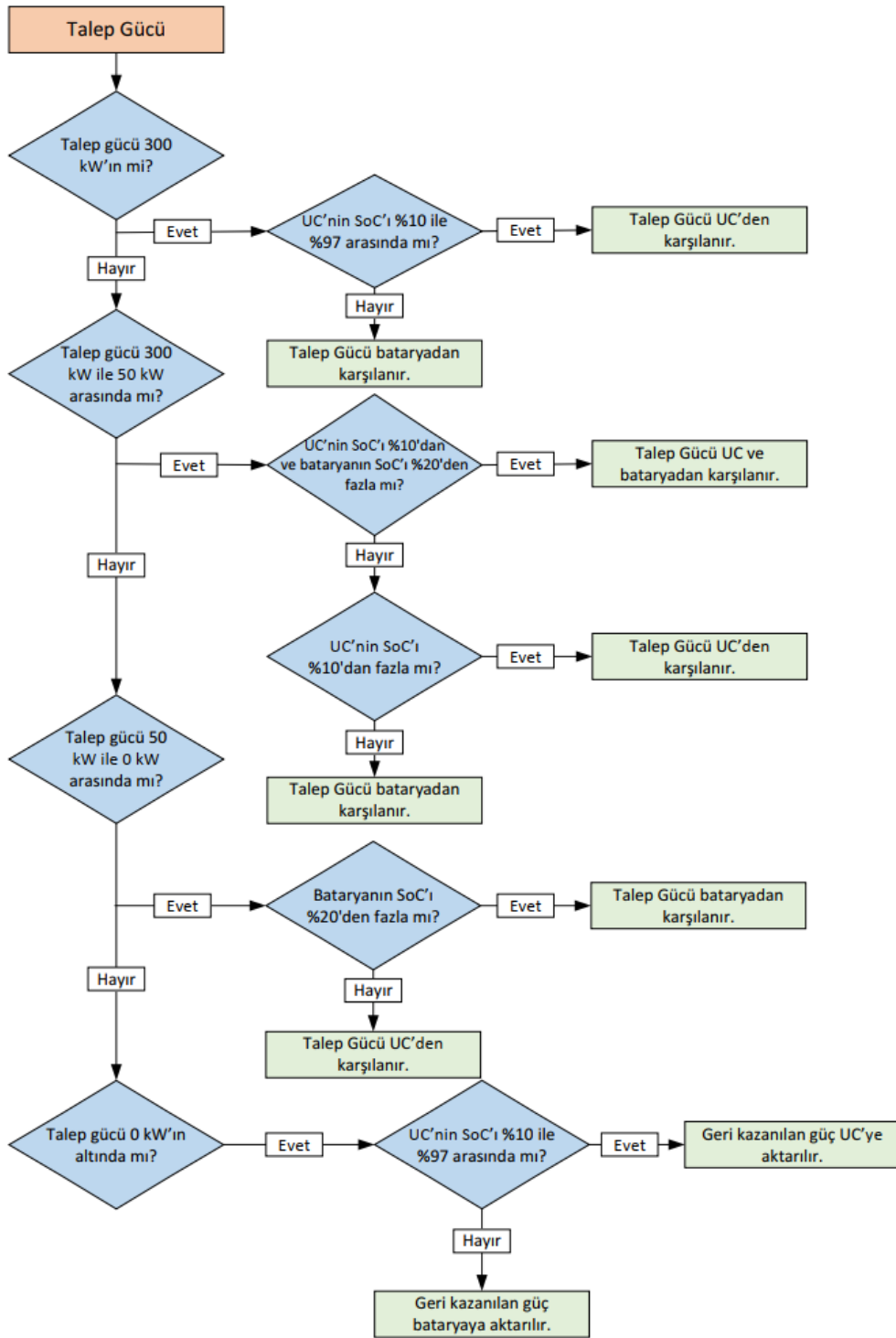
Şekil 3.5 Benzetişim sonucunda sefer boyunca otobüs hız bilgisi.

Enerji depolama sisteminden talep edilen güç bilgisi için güç elektroniği sistemi benzetişimde 0,95 olarak bir katsayı değerinde kullanılmıştır. Motor çıkış gücü, elektrik motoru verilimi ile enerji depolama sisteminden talep edilen güç bilgisi hesaplanmıştır.



Şekil 3.6 Enerji Depolama Sistemi Kullanım Bloğu.

Aracın itkisi için gereken güç talebi hesaplandıktan sonra aydınlatma, klima, havalandırma vb. gibi yardımcı güç ihtiyacı olan sistemlerin güç talebi, bu güç değeri üzerine yapılan bir çalışma referans alınarak 15 kW olarak eklenmiştir [56]. Toplam çıkış gücü hesabından sonra elde edilen güç değerinden sonra geri kazanımlı frenlemede kullanılacak eksi güç değerlerini sınırlamak için bir blok eklenmiştir. Benzetişimde geri kazanımlı frenlemedeki güç limini 30 kW olarak alınmıştır.



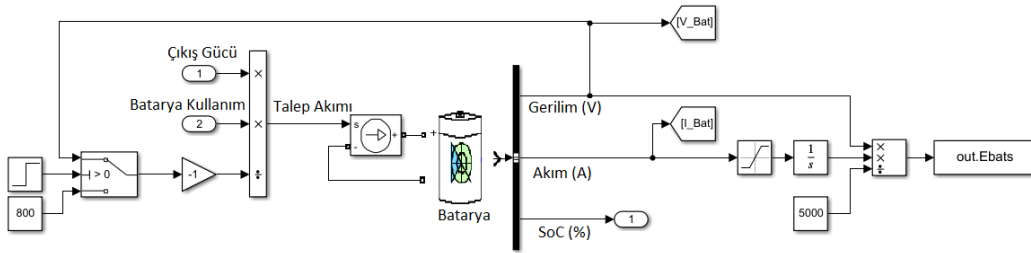
Şekil 3.7 Benzetişimin çalıştırıldığı enerji yönetim sistemi algoritması.

Hesaplanan çıkış gücü bilgisi, batarya modelinin SoC ve UC modelinin SoC verileri alınarak bir EYS modeli MATLAB’de EK (c)’deki gibi kodlanarak ifade edilmiştir. Şekil 3.7 ile bu EYS’nin çalışma algoritması verilmiştir. Optimisasyonun ilk aşamasında tüm HESS yapılarına bu EYS’ye göre optimizasyon yapılacaktır. EYS sistemi incelendiğinde 300 kW’ın üstündeki talep gücü değerlerinde UC’nin SoC

durumuna göre talep gücü öncelikle UC'den karşılanır. 50-300 kW'lık talep gücü değerlerinde batarya ve UC'nin SoC durumuna göre talep gücü öncelikle batarya ve UC'den birlikte karşılanır. 0-50 kW'lık talep gücü değerinde bataryanın SoC durumuna göre talep gücü öncelikle bataryadan karşılanır. Geri kazanılan enerji EDS elemanlarının SoC durumlarına bakılarak öncelikle UC'ye aktarılır. Bu algoritmaya göre MATLAB kodu oluşturulmuştur.

Çalışmanın sonraki kısmında Şekil 3.7 ile verilen EYS yapısı kullanılmıştır. Ancak ilerleyen kısımlarda GA ile EYS sistemi optimizasyonu yapılırken bu algoritma da güncellenmiştir.

Şekil 3.8 ile batarya modeli ve hesaplamaları verilmiştir. Batarya bloğunda çıkış gücü ve batarya kullanım durumuna göre akım üretici tarafından bataryadan talep edilecek akım değeri oluşturulmaktadır. Bu değerle birlikte ihtiyaç olan batarya akımı değerine göre bataryaya gerilim bilgisi verilir ve çıkışından bataryanın uç gerilimi, akım değeri ve SoC bilgisi elde edilir.



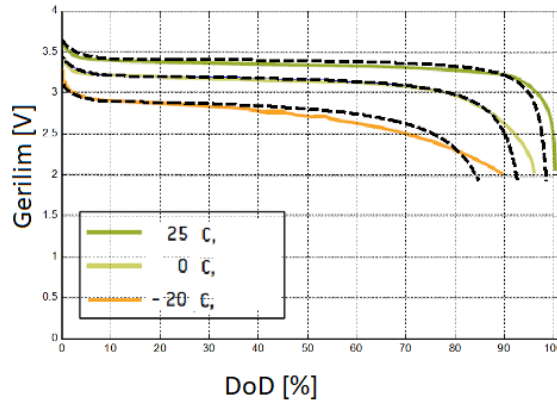
Şekil 3.8 Batarya modeli.

Benzetişim başlangıcında bataryadan talep edilen akım hesabı için batarya gerilimi gereklidir. Bu değer başlangıç anında hesaplanmamış olduğu için benzetişimin ilk anında batarya gerilimi değeri 800 V olarak verilmiştir. Daha sonra talep edilen akım ve batarya parametrelerine göre hesaplanan batarya uç gerilimi, bataryadan talep edilen akımı hesaplamak için kullanılmaktadır.



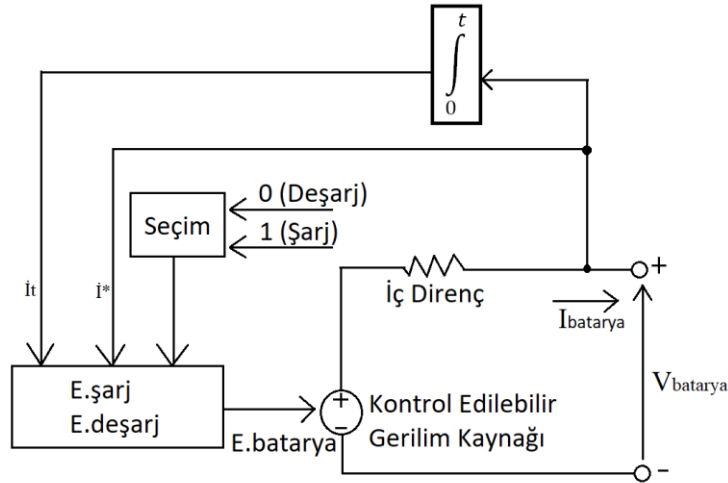
Şekil 3.9 Batarya modeli [59].

Benzetişimde batarya tipi olarak Lityum Demir Fosfat (LFP) batarya kullanılmıştır. Kullanılan batarta parametrelerinin bilgisi izelge 3.1 ile verilmiştir.



şekil 3.10 Kullanılan LFP Batarya Hücresinin Kapasite Durumuna Göre Gerilim Değişimi [64].

şekil 3.10 ile benzetilişimde kullanılan bataryanın kapasite doluluk oranı ve sıcaklık değerine göre gerilim değişimi grafiği verilmiştir. Hesaplamalar yapılırken elektrikli otobüsün yıllık olarak her gün çalışacağı düşünöldüğü için çıkış gerilimi değeri 25 °C sıcaklık değeri sabit alınarak yapılmıştır. Bu şekilde batarya hücresi nominal gerilim değeri 3,4 V olarak alınmıştır.



şekil 3.11 Batarya eşdeğer devre modeli [64].

şekil 3.11 ile batarya bloğunun eř değer devre modeli verilmiştir. şekle göre 1. dereceden eşdeğer devre modeli kullanılan bataryanın iç direnç değeri ve kapasitesine göre batarya akımı hesaplanır. Hesaplanan akım değeri, toplam akım değeri ve bataryanın o andaki şarj veya deşarj olma durumuna göre bir batarya

gerilimi hesaplanır. Bu değere göre gerilim kaynağı değeri belirlenir. Anlık hesaplanan akım değerinin pozitif olduğu durumlarda batarya deşarj, akım değerinin negatif olduğu durumlarda batarya şarj gerilimleri hesaplanır. Batarya şarj ve deşarj gerilimi hesaplama denklemleri 4.7 ve 4.8 ile verilmiştir.

$$E_{şarj} = E_0 - \frac{Q}{it + 0,1.Q} \cdot i^* - \frac{Q}{Q - it} \cdot it \quad (4.7)$$

$$E_{deşarj} = E_0 - \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - -\frac{Q}{Q - it} \cdot it \quad (4.8)$$

Q : Maksimum batarya kapasitesi (Ah).

it : Batarya kapasitesi (Ah).

i^* : Batarya akımı (A).

E_0 : Sabit gerilim (V).

$E_{şarj}$: Hesaplanan batarya şarj gerilimi (V).

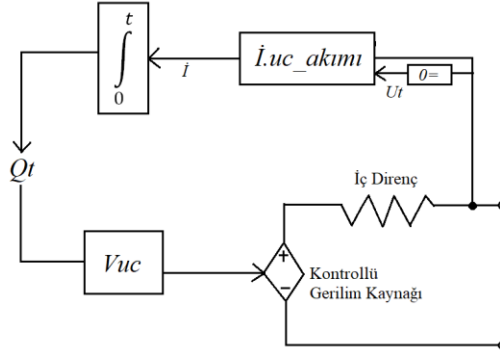
$E_{deşarj}$: Hesaplanan batarya deşarj gerilimi (V).

Batarya paketi gerilimi, akımı ve SoC'ı hesaplanırken 1. dereceden batarya modeli kullanılmıştır. Batarya matematiksel modelinde batarya gerilimi kontrol edilebilir bir gerilim kaynağı ve bir iç direnç ile modellenmiştir.

Benzetişimde batarya modeli olarak Simulink kütüphanesinde bulunan 'Battery' bloğu kullanılmıştır. Batarya SoC'ı Coulomb counting yöntemiyle denklem 4.9'deki gibi bataryanın kullandığı akım bilgisine göre elektriksel yük toplanarak hesaplanmıştır [64].

$$\text{SoC} = 100(1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt) \quad (4.9)$$

İlerleyen kısımlardaki boyutsal optimizasyon kısmında batarya modelinde optimize edilen seri ve paralel hücre sayısı verilerine göre bir sefer boyunca bataryadan tüketilen enerji bilgisine de ihtiyaç duyulacaktır. Bu nedenle bataryadan çekilen akımlar da toplanıp batarya gerilimiyle çarpılarak Ebats ismi ile MATLAB workspace ortamında saklanmaktadır.



Şekil 3.14. UC'nin eşdeğer devre modeli [65].

Bu gerilim değeriyle kontrollü bir gerilim kaynağı değerlendirilerek iç direnç değerine göre UC akımı hesaplanır. Hesaplanan akıma göre elektriksel yük hesabı yapılarak yeniden gerilim hesabı yapılır. UC çıkış gerilimi (V_{UC}) hesabı Simulink kütüphanesinde bulunan 'Supercapacitor' modeline göre UC toplam direnci, UC akımı, UC seri ve paralel hücre sayısı, elektriksel şarj, ideal gaz sabiti, çalışma sıcaklığı ve materyalin elektriksel geçirgenliği kullanılarak yapılır [65].

İlerleyen kısımlardaki boyutsal optimizasyon kısmında UC modelinde optimize edilen seri ve paralel hücre sayısı verilerine göre otobüsün bir seferi boyunca UC'den tüketilen enerji bilgisine de ihtiyaç duyulacaktır. Bu nedenle UC'den çekilen akımlar da toplanıp UC gerilimiyle çarpılarak EUCs ismi ile MATLAB workspace ortamında saklanmaktadır.

UC SoC'ı Coulomb counting yöntemiyle denklem 4.11'deki gibi bataryanın kullandığı akım bilgisine göre elektriksel yük toplanarak hesaplanmıştır [65].

$$\text{SoC} = \frac{Q_{ilk} - \int_0^t i(t) dt}{Q_T} \times 100 \quad (4.10)$$

4. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ OPTİMİZASYONU

Bu bölümde HESS’de bulunan batarya ve UC’lerin maliyet, ömür ve ağırlık bilgileri temel alınarak boyutsal olarak optimizasyonu yapılacaktır. Boyutsal optimizasyon 2 aşamadan oluşmaktadır.

İlk aşamada kullanılan batarya ve UC’nin seri ve paralel hücre sayıları optimize edilerek maksimum ömür, minimum maliyet ve minimum ağırlık koşulları farklı kısıt ve sınırlarla sağlanmaya çalışılacaktır. Bu optimizasyon çalışması enerji depolama sistemi olarak sadece batarya , pasif HESS , yarı aktif HESS ve tam aktif HESS’in kullanıldığı beş farklı senaryoda gerçekleştirilecektir. Bu beş farklı senaryonun optimizasyon sonuçları karşılaştırılarak farklı parametrelere göre optimal sonuç seçilip optimizasyonun ikinci aşamasına geçilecektir.

İkinci aşamada, birinci aşamadan seçilen optimal topoloji ile genetik algoritmanın kullanıldığı EYS optimizasyonu gerçekleştirilecektir. Bu aşamada benzetişimde kullanılan EYS’deki limit değerleri optimize edilecek parametreler olarak alınarak maksimum ömür, minimum maliyet ve ağırlık amaç fonksiyonları çerçevesinde optimizasyon yapılacaktır.

4.1 Genetik Algoritma

Mühendislik optimizasyon problemlerinin genellikle çoğunun çözümleri zor ve çok karmaşıklardır. Son yıllarda evrimsel algoritmaların kullanımı birçok araştırmacı tarafından farklı optimizasyon alanlarında değerlendirilmektedir. En umut verici evrensel optimize edicilerden biri olan evrimsel algoritmalar içinde GA’lar en çok kullanılanlardandır.

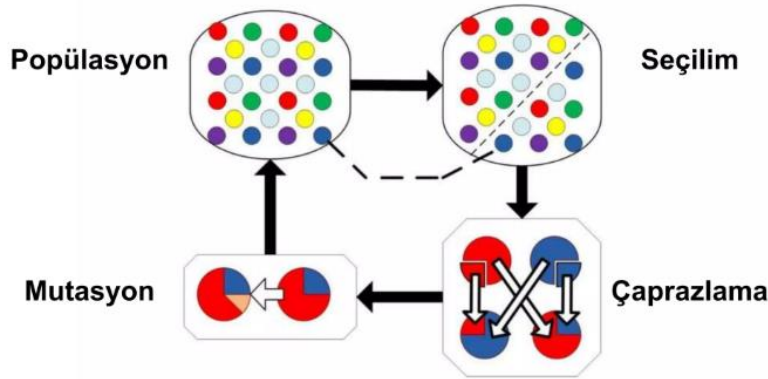
GA’lar, metasezgisel yöntemler olarak, Charles Darwin tarafından ortaya konan genetik ve evrim teorisinden fikir ve tekniklere dayalı optimizasyon problemlerine uygun çözümler bulmak için doğal seçim genetik mekanizmaları sürecini taklit etmek için farklı araştırma alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. GA’lar amaç fonksiyonunun süresiz, türevlenemez, stokastik veya oldukça doğrusal olmayan

problemler de dahil olmak üzere, standart optimizasyon algoritmaları için pek uygun olmayan çeşitli optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılabilirler [66].

GA'nın tasarım optimizasyonu problemleri için verimli bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca GA evrensel optimizasyon noktasının bulunması durumları için iyi bir yöntemdir. Genel olarak, mevcut geleneksel optimizasyon yöntemleri, amaç fonksiyonlarının her birine ağırlık katsayısı atayarak çoklu amaç fonksiyonlu optimizasyon problemini tek amaç fonksiyonlu bir optimizasyon problemine dönüştürür. Bu da onların genel problemdeki önemini gösterir. Ancak, gerçek durumu doğru bir şekilde gösterebilecek uygun ağırlıkları bulmak zordur.

Generik algoritmada bazı temel kavramlar yer almaktadır. Bunlardan birisi 'Gen'dir. Gen, genetik bilginin yer aldığı en küçük anlamlı yapıdır. Kromozom, problemdeki tüm bilginin barındığı, genlerin bir araya gelmesiyle oluşan yapıdır. Popülasyon, kromozomlardan oluşan bireylerin bulunduğu toplu çözüm kümelerine verilen isimdir [66-67].

GA, Li-on bataryalar gibi lineer olmayan sistemlerin modellerindeki bilinmeyenlerin bulunması için biyolojiden esinlenilen bir metottur. GA, rastgele kromozom dizileri oluşturarak popülasyon, seçilim, çaprazlama ve mutasyon gibi Şekil 5.1 ile verilen biyolojik işlemleri kullanarak optimal sonuca ulaşır [10].



Şekil 4.1. Genetik algoritma aşamaları [68].

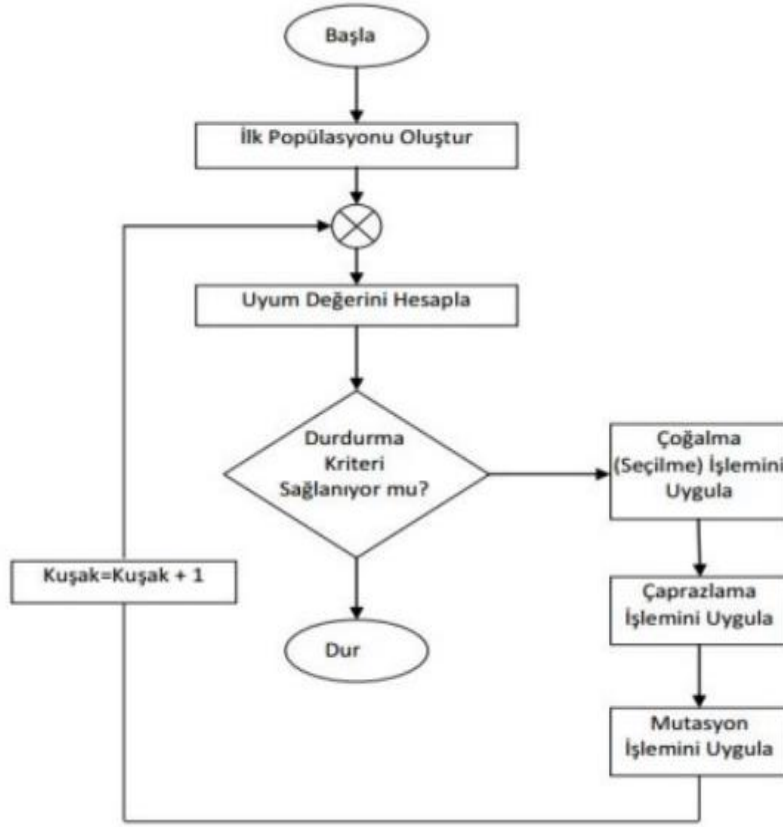
Bu algoritmalarda tasarım uzayı genetik uzaya dönüştürülür. Bu nedenle, GA'lar bir dizi kodlanmış değişkenle çalışır. Kodlanmış değişkenlerle çalışmanın avantajı, kodların temelde sürekli uzayı ayrık bir uzaya dönüştürme kabiliyetine sahip olmasıdır. Bir başka ilginç nokta ise, GA'ların arama uzayını birkaç bölgeye ayırması ve bunları sistemin performansına göre rastgele karşılaştırması, zayıf kısımları

ortadan kaldırması ve yakınsamaya ulaşmak için iyi çözümleri daha kötü olanlara göre daha baskın hale getirmesidir. GA'lar ilk olarak optimizasyon sürecinde belirtilen yaratma fonksiyonuna dayalı olarak başlangıç popülasyonunun (bireylerin) rastgele oluşturulmasıyla başlar. Ardından, oluşturulan popülasyondaki her bireyin (çözümün) uygunluk değeri, o bireyin derecesini belirleyen belirtilen uygunluk fonksiyonuna göre hesaplanır [66].

GA'da, bir dizi çözüm, kromozom adı verilen bir dizi şeklinde kodlanır. Bir kromozom seti (başlangıç popülasyonu), uygunluk fonksiyonuna dayalı olarak değerlendirilen bir problem için potansiyel bir çözümdür. En iyi kromozomlar (daha yüksek uygunluk değerine sahip olanlar) bir sonraki nesil için bozulmadan kalır ve çaprazlama ve mutasyon operatörleri gibi GA operatörleri tarafından yeni bir nesil oluşturulur. Çaprazlama, ebeveyn kromozomlarındaki elemanları değiştirerek yeni bir nesil (çocuklar) üretirken mutasyon, ebeveyn kromozomlarında küçük rastgele değişikliklerle yeni bir nesil üretir. Bu işlemler, popülasyon optimum noktaya en yakın hale geldiğinde durdurma kriterleri sağlanana kadar gerçekleştirilir [69].

GA yöntemi temelde ilk popülasyon oluşumu, uyum değeri hesabı, seçim, çaprazlama, mutasyon ve durdurma kısımlarından oluşur. Temelde ilk popülasyon oluşturulur. Bu popülasyondaki iyi ve kötü bireyler, belirtilmiş fonksiyona uygun şekilde seçilir. Yeni bir neslin oluşturulması için iyi olarak belirlenen bireylerin kromozomları çiftleştirilir. Daha sonra oluşturulan kromozomun kendi geninde değişiklikler yapılır. Bu döngü istenen durdurma kriterine ulaşılan kadar devam eder [70].

GA'larda öncelikle optimize edilen değişkenlerin olası çözümlerinin kodlandığı bir çözüm kümesi oluşturulur. Oluşan bu çözüm grupları popülasyon, çözüm gruplarındaki değişkenlerin kodlarına da kromozom denir. Bu kısımda optimum aramanın yapılacağı popülasyonda bulunan birey sayısı belirlenir. Popülasyon değeri için bir standart bulunmamaktadır. Seçilen sayının büyüklüğü işlemlerin karmaşıklığını etkiler. Diğer aşamada popülasyondaki bu kromozomların ne kadar iyi olduğu tayin edilir. Uygunluk hesaplamasının yapıldığı bu aşamada, amaç fonksiyonu ve kısıtlamalara göre bireyler ayrıştırılır. İyi olarak belirlenen bireyler eşleştirilerek yeniden kopyalama ve değiştirme işlevleri kullanılır. Böylece bu bireylerin meydana getirdiği bir popülasyon elde edilir. Oluşturulan bu yeni bireylerle popülasyon sayısını sabit tutmak için eski bireyler silinir.



Şekil 4.2 Genetik algoritma yöntemi [71].

Bu kromozomların uygunluk değerleri yeniden hesaplanır ve bu yeni popülasyonun başarısı belirlenir. GA bitiş kriteri dolmadığı sürece bu aşamalar tekrarlanmaya devam eder. Sonuç olarak elde edilen değer, o ana kadar popülasyonda bulunan en iyi değerdir, çünkü en iyilerin ayıklandığı popülasyon içinden seçilmiştir [72].

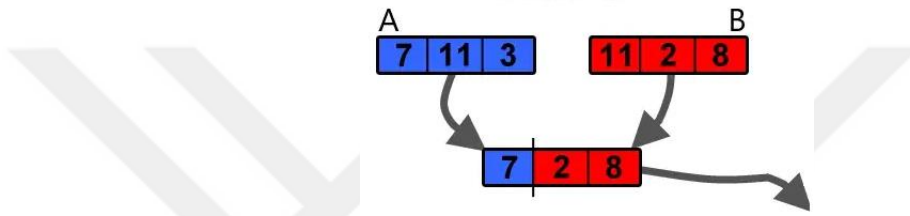
4.1.1 Seçilim Evresi

Mevcut popülasyondan, yeni bir popülasyon oluşturmak için bireylerin seçildiği evredir. Bu seçilen bireyler daha sonra çaprazlama ve mutasyon aşamalarından geçirilir. GA temeline göre bu bireyler, popülasyondaki iyi bireylerden seçilir ve bir sonraki nesle bu bireylerin kromozomları aktarılır. Bu bireyler seçilirken uygunluk değeri yüksek olanlar tercih edilir. Uygunluk değerinin yüksek olduğu bireylerin seçilme şansları fazladır. Çeşitli seçilim yöntemleri bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi turnuva seçilimidir. Buna göre popülasyon içerisinde herhangi bir sayı değeri kadar (1, 3, 7...) birey seçilir ve bunların içinde uygunluk değeri en yüksek olan birey seçilir. Bu yöntemlerden bir diğeri rulet seçilimidir. Bu yöntemde popülasyondaki bireylerin uygunluk değerleri toplanır ve bireyler, kendi uygunluk değerlerinin bu değere olan oranlarına göre bir seçilme şansı elde ederler. Bir diğ

yöntem ise sıralı seçimdir. Bu yöntemde ise en kötü uygunluk değeri olan bireye en düşük sayı değeri verilerek, ondan daha iyi olanlara, iyi olma oranlarında bir sayı değeri verilir ve bu şekilde seçim yapılır [73].

4.1.2 Çaprazlama Evresi

Çaprazlama kısmında iyi olarak seçilen bireylerin değerleri arasında çaprazlama yapılır. Popülasyonda zaten iyi olarak seçilen bireylerin çaprazlanmasıyla uygunluk değeri daha yüksek çocuklar elde edilmesi amaçlanır. Bu şekilde daha yüksek uygunluk değerine sahip yeni nesil elde edilir. Çaprazlama işlemi farklı şekillerde yapılmaktadır. Bunlardan birisi tek noktalı çaprazlamadır.

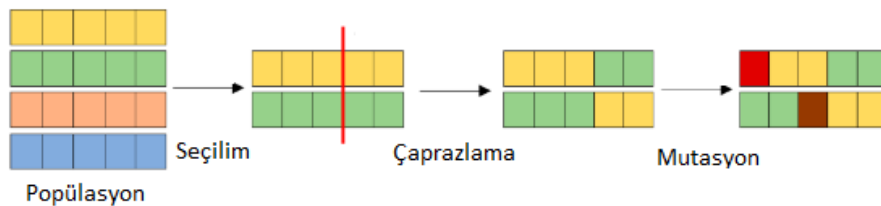


Şekil 4.3 Çaprazlama evresi örneği [74].

Buna göre eşlenecek olan 2 kromozomun çaprazlama işlemi, bulundurdıkları bilgi serisinde tek bir noktadan ayrıştırılarak Şekil 5.3'teki gibi eşlenirler. Diğer bir yöntem çift noktalı çaprazlamadır. Bu yöntemde kromozomların çaprazlanması, bulundurdıkları bilgi serisinde iki noktadan ayrıştırılarak yapılır [71].

4.1.3 Mutasyon Evresi

Çaprazlamadan sonra yeni oluşan bireylerin kromozomlarındaki bilgilerin değiştirildiği evredir. Bu aşamada kromozomların genlerini oluşturan küçük birimler değiştirilir. Bu aşamanın yapılmasıyla popülasyonun kısır döngüye girmesi önlenir. Aksi takdirde rastgele aynı seçilen bireylerin çaprazlanması durumunda aynı nesiller oluşur. Bu durum yerel optimizasyon oluşumuna neden olabilir.



Şekil 4.4 Genetik algoritma işleyiş süreci [75].

Mutasyon genel olarak kromozomlardaki bilgilerin yerlerine göre veya sıralarına göre gerçekleşir. Yerlerine göre yapılan mutasyonda rastgele seçilen genlerin yerleri değiştirilir. Sıralarına göre yapılan mutasyonda, kromozomdan rastgele seçilen iki ardışık genden ikincisinin birincisi ile yer değiştirilmesiyle elde edilir. [76]

4.2 HESS Elemanlarının Boyutsal Optimizasyonu

HESS elemanlarının boyutsal optimizasyonunu belirlemek için Bölüm 3.1’de oluşturulan benzetişim ve GA yapısı birlikte kullanılmıştır. Batarya ve UC’nin seri ve paralel hücre sayılarını belirlemek için çoklu GA yapısı uygulanmıştır. Boyutsal optimizasyon ile batarya ve UC’nin kurulu enerji değeri belirlenmektedir. Bu değerin belirlenmesi için batarya ve UC’nin seri ve paralel hücre sayıları optimize edilmiştir. Optimize edilen değerler Çizelge 4.1 ile verilmiştir.

Çizelge 4.1 Optimizasyonda kullanılan değişken parametreleri.

Değişken	Açıklama
Ns_{bat}	Batarya seri hücre sayısı
Np_{bat}	Batarya paralel hücre sayısı
Ns_{UC}	UC seri hücre sayısı
Np_{UC}	UC paralel hücre sayısı

Yapılan optimizasyonlarda üç amaç fonksiyonu bulunmaktadır. İlk amaç fonksiyonu minimum maliyet üzerinedir. Kullanılan enerji depolama sistemi ve senaryodaki maliyet en düşük tutulacak şekilde seri ve paralel hücre sayısı GA ile belirlenmektedir. Çizelge 4.2 ile optimizasyonda kullanılan sabitler ve toplam batarya enerjisi ve toplam UC enerjisi değerleri verilmiştir.

$$E_{bat} = Ns_{bat} \cdot Np_{bat} \cdot V_{bat_hücre} \cdot l_{bat_hücre} \quad (5.1)$$

$$E_{UC} = Ns_{UC} \cdot Np_{UC} \cdot V_{UC_hücre} \cdot l_{UC_hücre} \quad (5.2)$$

Denklem 5.1 ve 5.2’de HESS’de bulunacak toplam batarya ve UC kurulu enerjisi hücre gerilimleri, hücre akımları, seri hücre ve paralel hücre sayısı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.2 Optimizasyonda kullanılan sabitler.

Sabit	Açıklama	Değer	Birim	Kaynak
C_{bat}	Batarya hücre maliyeti	20	\$	[59]
C_{UC}	UC hücre maliyeti	479,43	₺	[60]
E_{bat}	Toplam batarya enerjisi	-	kWh	
E_{UC}	Toplam UC enerjisi	-	kWh	
$C_{\text{çevirici}}$	W başına DC/DC çevirici maliyeti	0,075	W/\$	[77]
$V_{bat_hücre}$	Batarya hücre gerilimi	3,2	V	[57]
$V_{UC_hücre}$	UC hücre gerilimi	2,7	V	[60]
$I_{bat_hücre}$	Batarya hücre kapasitesi	45	Ah	[57]
$I_{UC_hücre}$	UC hücre kapasitesi	2,25	Ah	[60]
$w_{bat_hücre}$	Batarya hücre ağırlığı	0,99	Kg	[57]
$w_{UC_hücre}$	UC hücre ağırlığı	0,51	Kg	[60]
$t_{\text{gün}}$	Yıllık kullanılan gün sayısı	365	-	
t_{sefer}	Günlük sefer sayısı	10	-	
cycle	Batarya ömür döngüsü	3000	-	[57]
E_{Toplam}	Maksimum toplam kurulu enerji değeri	500	kWh	

Çizelgedeki batarya hücresi, UC hücresi ve dc/dc çevirici maliyetinde kullanılan döviz kuru 10 Mayıs 2022 tarihli değer alınmıştır. Buna göre 1\$ 15,1₺'dir. Denklem 5.3'te minimum maliyeti amaçlayan birinci amaç fonksiyonu verilmiştir. Eşitlikte kullanılan sabitler ve açıklamaları Çizelge 4.2 ile verilmiştir. Buna göre belirlenen seri ve paralel hücre sayısına bağlı olarak belirlenen enerji boyutu ile hücre maliyetleri çarpılıp, belirlenen enerji kapasitesi ile çevirici maliyeti çarpılarak elde edilen maliyet ile toplanır.

$$f(1) = N_{s_{bat}} \cdot N_{p_{bat}} \cdot C_{bat} + N_{s_{UC}} \cdot N_{p_{UC}} \cdot C_{UC} + E_{bat} \cdot C_{\text{çevirici}} + E_{UC} \cdot C_{\text{çevirici}} \quad (5.3)$$

Diğer amaç fonksiyonu ise batarya ömrüdür. UC'nin ömrü batarya ömrüne göre oldukça fazla olduğu için bir kısıt olarak alınmamıştır. Bu amaç fonksiyonunda belirlenen HESS boyutlarına göre simüle edilen sistemde bataryadan talep edilen enerji değeri işlenerek optimizasyondaki amaç fonksiyonu denklemine eklenmiştir. Denklem 5.4'te batarya ömrünün maksimum olarak alındığı amaç fonksiyonu denklemi yer almaktadır. Eşitlikte kullanılan sabitler ve açıklamaları Çizelge 4.2 ile verilmiştir.

$$f(2) = \frac{-(Ns_{bat} \cdot Np_{bat} \cdot V_{bat_{hücre}} \cdot I_{bat_{hücre}} \cdot cycle)}{(E_{sefer} - E_{UC}) \cdot t_{gün} \cdot t_{sefer}} \quad (5.4)$$

E_{sefer} : Belirlenen seri ve paralel hücre sayılarına göre benzetişimde batarya ve UC'nin tek yöndeki seferde harcadığı toplam enerji miktarı (Wh).

Amaç fonksiyonunda batarya ömrü kısım 2.3.1'de açıklandığı üzere bataryanın SoH değerinin %70'ine geldiğinde harcamış olacağı enerji ömür döngüsü ile belirtilmiştir. Buna göre seri ve paralel hücre sayısı belirlenen batarya ile bataryanın kullanıldığında SoH'inin %70'ine geleceği ömür döngüsü çarpılıp bataryadan o süre boyunca alınabilecek toplam enerji miktarı hesaplanır. Daha sonra bu değer tek yöndeki otobüs seferinde HESS'den talep edilen enerji olan E_{sefer} 'den E_{UC} 'nin çıkartılmasıyla bataryadan talep edilen enerji miktarına bölünerek bataryadan tek seferde talep edilen enerji miktarı hesaplanır. Bu değer yıllık kullanılan gün ve sefer sayısına bölünerek bataryanın ömrü yıllık olarak hesaplanır. Formülün başında bulunan negatif işaret, MATLAB'deki GA optimizasyon algoritmasında amaç fonksiyonlarının minimize edilerek tanımlanmasından kaynaklanmaktadır.

Son amaç fonksiyonu ise HESS sisteminde bulunan enerji depolama elemanlarının ağırlıklarının azaltılmasına yöneliktir. Buna göre belirlenen seri ve paralel hücre sayısına göre belirlenen enerji boyutu ile hücre ağırlıkları çarpılarak son amaç fonksiyonu denklem 5.5'deki gibi tanımlanır. Eşitlikte kullanılan sabitler ve açıklamaları Çizelge 4.2 ile verilmiştir.

$$f(3) = Ns_{bat} \cdot Np_{bat} \cdot w_{bat} + Ns_{UC} \cdot Np_{UC} \cdot w_{UC} \quad (5.5)$$

Optimizasyon algoritmasında sisteme bazı kısıtlamalar eklenmiştir. Bunlardan ilki tüm sistemin kurulu enerjisinin 500 kWh ile sınırlandırılmasıdır. Günümüzde kullanılan elektrikli otobüslerin menzilleri ve kurulu enerjileri baz alındığında 500 kWh değeri üst sınır olarak alınmıştır [78]. Bu şekilde sadece batarya kullanılan sistemde batarya enerjisi 500 kWh olarak alınıp benzetişim sonuçları elde edilmiştir. HESS yapısı olan senaryolarda batarya ve UC'nin toplam enerjisinin 500 kWh'i geçmemesi için denklem 5.6'daki kısıt eklenmiştir.

$$E_{toplam} \geq (Ns_{bat} \cdot Np_{bat} \cdot V_{bat_{hücre}} \cdot I_{bat_{hücre}} + Ns_{UC} \cdot Np_{UC} \cdot V_{UC_{hücre}} \cdot I_{UC_{hücre}}) \quad (5.6)$$

Bu kısıt dışında elde edilecek HESS elemanlarının boyutsal olarak tek seferde enerji ihtiyacını karşılayabilmelerini garanti etmek için bir eşitsizlik eklenmiştir. Denklem 5.7'ye göre batarya kurulu gücünün tek seferde talep edilen enerji ihtiyacını karşılaması beklenmektedir.

$$E_{sefer} \leq E_{bat} \quad (5.7)$$

Burada belirtilen E_{sefer} ve E_{bat} enerji değerleri bir sabit değildir. E_{bat} optimizasyonun her adımında sonuç olarak alınan seri ve paralel hücre sayısına göre elde edilir. E_{sefer} değeri ise her adımda elde edilen batarya ve UC'nin seri ve paralel hücre sayısına göre benzetişimin koşturulması sonucu, tek yönde HESS'den talep edilen enerjinin hesaplanmasıyla elde edilir.

Bunlar dışında optimizasyonda optimize edilen parametreler için denklem 5.8-5.11'de belirtilen bazı sınırlar tanımlanmıştır.

$$Ns_{batmin} \geq Ns_{bat} \geq Ns_{batmax} \quad (5.8)$$

$$Np_{batmin} \geq Np_{bat} \geq Np_{batmax} \quad (5.9)$$

$$Ns_{UCmin} \geq Ns_{UC} \geq Ns_{UCmax} \quad (5.10)$$

$$Np_{UCmin} \geq Np_{UC} \geq Np_{UCmax} \quad (5.11)$$

Çizelge 4.3 Optimizasyon parametre sınırları.

Limit	Açıklama
Ns_{batmin}	Minimum batarya seri hücre sayısı
Np_{batmin}	Minimum batarya paralel hücre sayısı
Ns_{UCmin}	Minimum UC seri hücre sayısı
Np_{UCmin}	Minimum UC seri hücre sayısı
Ns_{batmax}	Maksimum batarya seri hücre sayısı
Np_{batmax}	Maksimum batarya paralel hücre sayısı
Ns_{UCmax}	Maksimum UC seri hücre sayısı
Np_{UCmax}	Maksimum UC seri hücre sayısı

Çizelge 4.3 ile optimize edilen parametlerin alt ve üst sınırları verilmiştir. Burada yer alan değerler her farklı topoloji ve senaryoya göre değişmektedir. Bunlar dışında batarya ve UC gerilimleri de belli sınırlar içinde tutulmaktadır. Ancak bu sınırlar

ayrıca verilmek yerine seri ve paralel hücre sınırları verilerek sağlanmıştır. Bu limit değerleri her bir optimizasyon kısımlarında verilecektir.

Genel olarak optimizasyonlarda var olan elektikli otobüsler referans alındığında maksimum bara gerilimi değeri 800 V olarak alınmıştır. Optimizasyonlarda koşturulan benzetişimlerde kısım 2.3.1’de açıklandığı üzere batarya SoC değeri %50 olarak alınmıştır. UC SoC değeri %80 olarak alınmıştır. Şekil 3.7 ile verilen EYS yapısına göre batarya %20 ile %80 SoC değeri arasında çalıştırılmıştır. Aynı yapıya göre UC’ler %10 ile %97 SoC değerleri arasında çalıştırılmıştır. Benzetişimlerde geri kazanılan enerji değerine bakılmaksızın sadece SoC durumlarına göre batarya veya UC’ye aktarılmıştır. Ancak bu EYS yapısı boyutsal optimizasyondan sonra GA ile optimize edilecektir. İkinci kısımdaki optimizasyon parametleri çalışmanın ileri ki aşamalarında detaylandırılacaktır.

Optimizasyonların durma kriteri olarak üç parametre girilmiştir. Bunlar maksimum jenerasyon sayısına ulaşma (100), 1000 saniye boyunca bulunan en iyi amaç fonksiyonu sonucunun değişmemesi ve 50 jenerasyon boyunca bulunan en iyi amaç fonksiyonu sonucunun değişmemesidir.

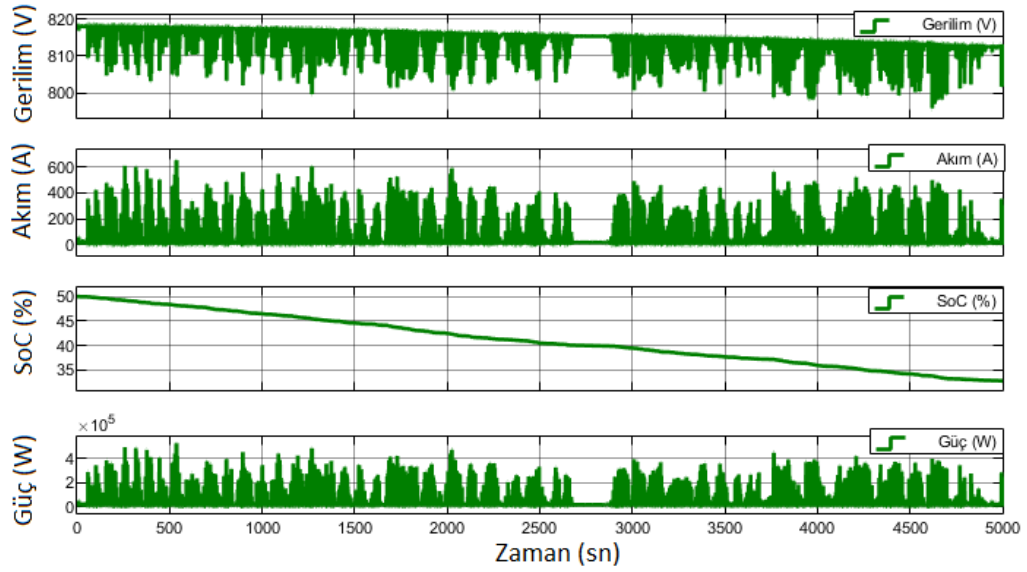
4.2.1 Sadece batarya kullanılan model

Bu ilk senaryoda enerji depolama sistemi olarak sadece 505,512 kWh’lik LFP batarya kullanılmıştır. Bara gerilimi 800 V olarak kabul edilmiştir. Buna göre sistemde kullanılan bataryanın seri ve paralel hücre sayısı Çizelge 4.4 ile verilmiştir.

Çizelge 4.4 Enerji depolama sistemi olarak sadece batarya kullanılan senaryonun seri ve paralel hücre sayısı.

Sabit	Açıklama
$N_{S_{bat}}$	236
$N_{p_{bat}}$	14

Şekil 4.5 ile enerji depolama sistemi olarak sadece bataryanın kullanıldığı yapıdaki batarya gerilimi, akımı, SoC’si ve güç değişimi verilmiştir. Benzetişim sonucunda sadece batarya kullanılan yapıda elektrikli otobüsün tek yönde 113,3 kWh enerji talebi bulunmaktadır. Bu değer denklem 5.4’teki ömür fonksiyonuna göre hesaplandığında bataryanın kullanım ömrü 4,2 yıl olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5 Enerji depolama sistemi olarak sadece batarya kullanılan sistemin tek yön seferindeki batarya gerilimi, akımı, SoC'ı ve gücü değişimi.

Bundan sonraki optimizasyon sonuçlarında minimum maliyet, minimum ağırlık ve maksimum batarya ömrü referans alınarak bataryanın ömrünün 4,2 yıldan fazla olması üzerine nihai topoloji kararı verilecektir. Sadece batarya kullanılan yapıda maliyet 999.691,28 ₺ ve ağırlık 3.270,96 kg olarak elde edilmiştir.

4.2.2 Batarya ve UC'nin baraya direkt bağlandığı model

İkinci senaryoda pasif HESS yapısı kullanılmıştır. Batarya ve UC baraya direkt olarak bağlıdır. Bu konfigürasyonun entegrasyonu kolay olmasına rağmen EDS elemanlarının seri hücre sayısını belli bir değerde tuttuğu için maliyet yükselir. Bu nedenle batarya ve UC terminal gerilimi bara gerilimi olan 800 V olarak alınmıştır. Batarya ve UC seri hücre sayısı Çizelge 4.5 ile verildiği gibi benzetişime bir sabit olarak eklenmiştir. Bu senaryoda batarya ve UC'nin enerji kapasitesinin belirlenmesi için paralel hücre sayıları optimizasyon değişkeni olarak alınmıştır.

Çizelge 4.5 Enerji depolama sistemi olarak pasif HESS yapısı kullanılan senaryonun seri ve paralel hücre sayısı.

Sabit	Açıklama
NS_{bat}	236
NS_{UC}	296

EK (d)'de MATLAB'de oluşturulan GA kodu yer almaktadır. Bu kısımda amaç fonksiyonları, sabitler ve eşitlikler tanımlanmıştır. Optimizasyonun her adımında oluşturulan Np_{bat} ve Np_{UC} değerine göre her adımda benzetişim koşturularak o adımdaki batarya ve UC kurulu enerji değerine göre sistemden talep edilen toplam enerji hesaplanır. Hesaplanan bu toplam enerji yeniden GA koduna getirilerek batarya ömrünün hesaplandığı amaç fonksiyonunda kullanılır. EK (e)'de optimizasyonda kullanılan kısıtların belirtildiği kod yer almaktadır. EK (d) ve EK (e) kodları oluşturulduktan sonra GA toolbox'ında bu kodlar tanımlanır.

Ayrıca optimize edilecek parametrelerin maksimum ve minimum değerleri girilir. Batarya ve UC'nin bara gerilimi 800 V olduğu için ikisinden de sırasıyla minimum bir paralel hücre kullanılan durumda 36 kWh batarya ve 666 W UC enerji kapasitesi olur.

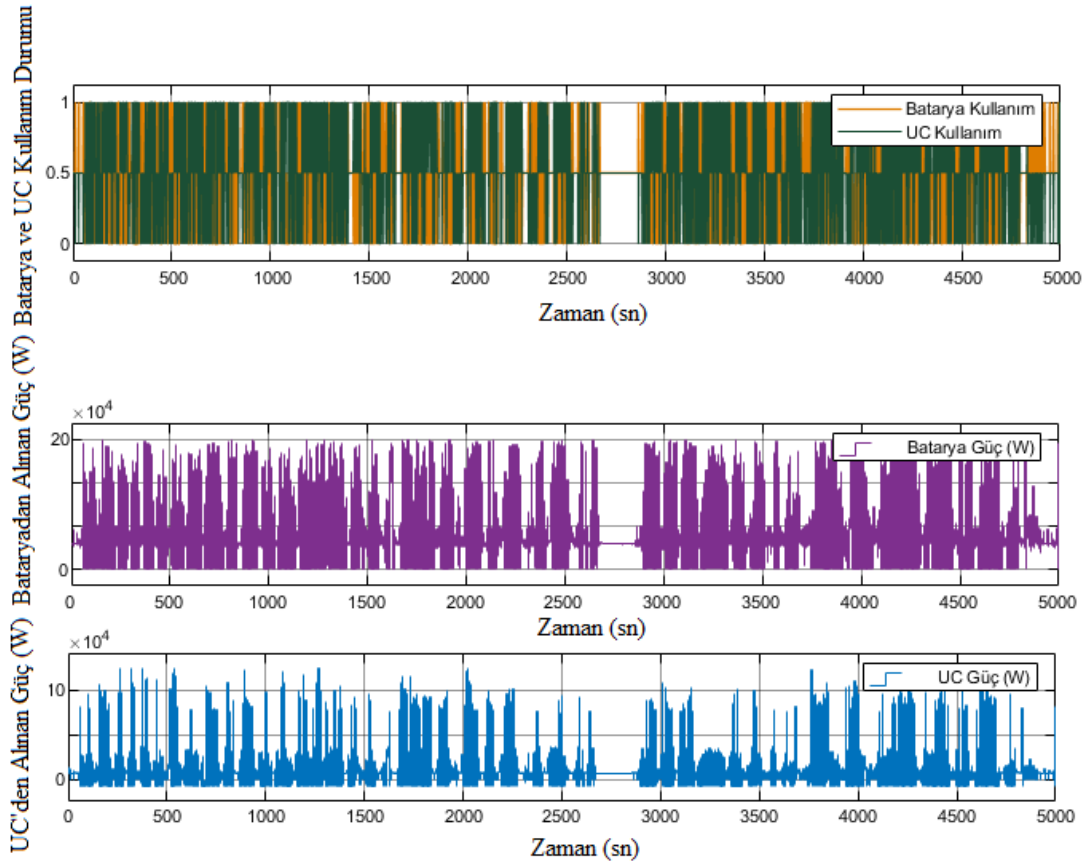
Çizelge 4.6 Maksimum ve minimum paralel hücre limitleri.

Sabit	Açıklama
Np_{batmin}	1
Np_{batmax}	14
Np_{UCmin}	1
Np_{UCmax}	50

Bataryanın enerji kapasitesi maksimum 500 kWh olarak alındığında paralel hücre sayısı limiti maksimum 14 olarak alınmıştır. UC hücre maliyetinin yüksek olmasından dolayı kullanılabilecek maksimum UC enerji kapasitesi 90 kWh ile sınırlandırılmıştır. Bu şekilde maksimum UC paralel hücre sayısı 50 olarak alınmıştır.

Optimizasyon, girilen maksimum jenerasyon sayısına ulaşılması limitine göre sonlanmıştır. Şekil 4.6 ile optimizasyon sonucu elde edilen parametrelere göre talep gücünün karşılanmasında batarya ve UC'nin kullanım durumu verilmiştir.

Çizelge 4.7 ve EK (L) ile verilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde sisteme 10,8 kWh'lık UC eklenmesiyle birlikte ek olarak 779.800 ₺'lik masrafla batarya ömrünün 0,8 yıl arttığı görülmektedir. Ayrıca sistemin ağırlığı 672,04 kg artmaktadır.



Şekil 4.6 Pasif HESS yapısı kullanılan sistemdeki benzetişim sonucu.

Çizelge 4.7 Pasif HESS yapısı optimizasyon sonuçları.

Parametre	Değer	Birim
Np_{bat}	13	-
Np_{UC}	6	-
E_{bat}	469,4	kWh
E_{UC}	10,8	kWh
Maliyet	1.779.800	₺
Batarya Ömrü	5	yıl
Ağırlık	3.943	kg

4.2.3 Bataryanın baraya direkt bağlandığı ve UC'nin baraya dc/dc çevirici ile bağlandığı model

Üçüncü senaryoda yarı aktif HESS yapısı kullanılmıştır. Batarya baraya direkt olarak bağlıyken ve UC baraya DC/DC çevirici ile bağlıdır. Bu nedenle batarya gerilimi bara gerilimi olan 800 V olarak alınırken UC gerilimi seri hücre sayısına bağlı bir

değişken olarak alınmıştır. Böylece UC gerilimi bara geriliminden düşük olabilir. Böylece UC boyutu ve maliyeti düşürülebilir.

Bu senaryoda batarya ve UC'nin enerji kapasitesinin belirlenmesi için UC seri ve paralel hücre sayısı ile batarya paralel hücre sayısı optimizasyon değişkeni olarak alınmıştır. EK (f)'de MATLAB'de oluşturulan GA kodu yer almaktadır. Bu kısımdaki optimizasyonda da önceki kısımdakine benzer şekilde amaç fonksiyonunun oluşturulduğu kod, kısıtların tanımlandığı kod, benzetişim ve GA optimizasyon eklentisi birlikte çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. EK (g)'de optimizasyonda kullanılan kısıtların belirtildiği kod yer almaktadır.

Batarya'nın bara gerilimi 800 V olduğu için minimum bir paralel hücre kullanılan durumda 36 kWh batarya enerji kapasitesi olur.

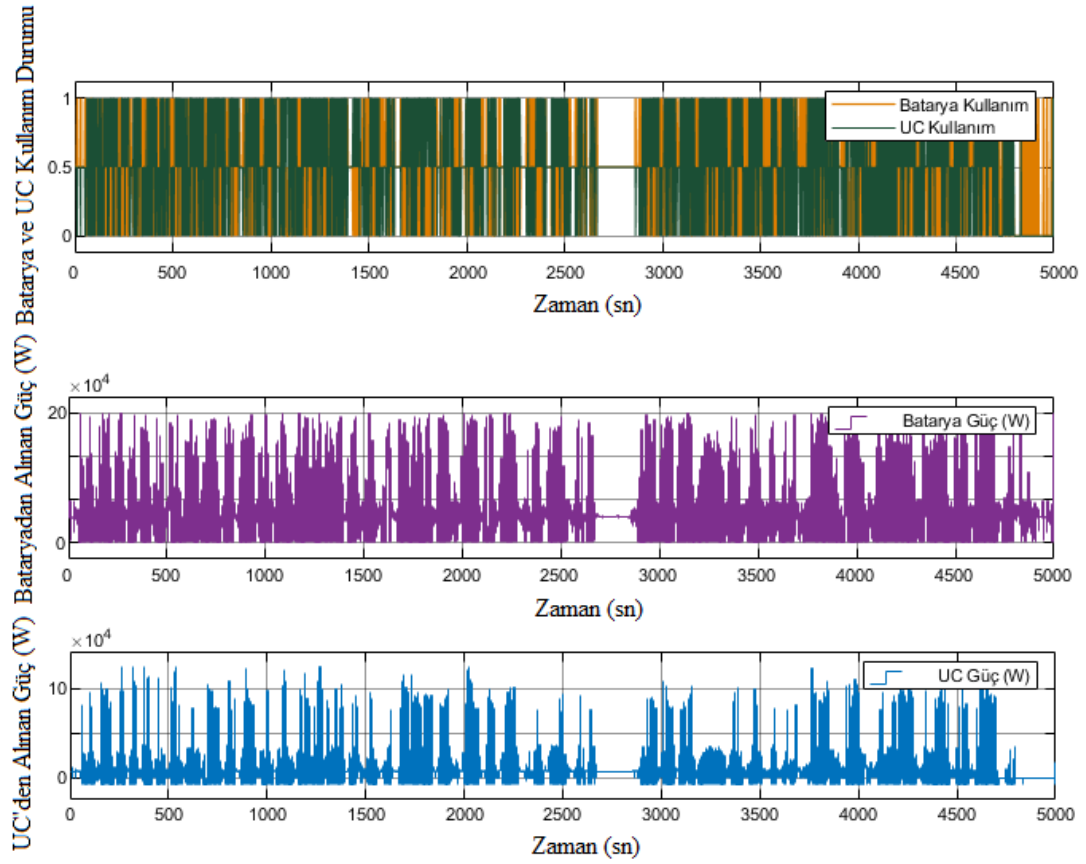
Çizelge 4.8 Maksimum ve Minimum Hücre Limitleri.

Sabit	Açıklama
N_{sUCmax}	296
N_{sUCmin}	37
$N_{pbatmin}$	1
$N_{pbatmax}$	14
N_{pUCmin}	1
N_{pUCmax}	200

Çizelge 4.8 ile optimizasyon parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri verilmiştir. UC'nin terminal gerilimini minimum 100 V ve maksimum 800 V olarak alındığı için 37 ile 296 seri hücre limitleri girilmiştir. UC'nin maksimum güç kapasitesi 45 kW olarak alındığı için maksimum paralel hücre sayısı 200 alınmıştır.

Şekil 4.7 ile optimizasyon sonucu elde edilen parametreler benzetişime girildiğinde talep gücünün karşılanmasında batarya ve UC'nin kullanım durumu ve sisteme verdikleri güç değerleri verilmiştir..

Çizelge 4.9 ve EK (M) ile verilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde sisteme 8,365 kWh'lik UC eklenmesiyle birlikte ek olarak 597.870 ₺'lik masrafla batarya ömrünün yaklaşık 1,72 yıl arttığı görülmektedir. Ayrıca sistemin ağırlığı da 468,63 kg artmaktadır.



Şekil 4.7 Birinci yarı aktif HESS yapısı kullanılan sistemdeki benzetişim sonucu.

Çizelge 4.9 Yarı Aktif HESS (1) Yapısı Optimizasyon Sonuçları.

Parametre	Değer	Birim
$N_{S_{UC}}$	153	-
$N_{p_{bat}}$	13	-
$N_{p_{UC}}$	9	-
E_{bat}	469,4	kWh
E_{UC}	8,365	kWh
Maliyet	1.597.870	₺
Batarya Ömrü	5,922	yıl
Ağırlık	3.739,59	kg

4.2.4 Bataryanın baraya dc/dc çevirici ile bağlandığı ve UC'nin baraya direkt bağlandığı model

Dördüncü senaryoda yine yarı aktif HESS yapısı kullanılmıştır. UC baraya direkt olarak bağlıken ve batarya baraya dc/dc çevirici ile bağlıdır. Bu nedenle UC gerilimi bara gerilimi olan 800 V olarak alınırken batarya gerilimi seri hücre sayısına

bağlı bir değişken olarak alınmıştır. Bu konfigürasyonda batarya baraya bir dc/dc dönüştürücü ile bağlandığı için düşük batarya gerilimi seçilebilmektedir.

Bu senaryoda batarya ve UC'nin enerji kapasitesinin belirlenmesi için batarya seri ve paralel hücre sayısı ile UC paralel hücre sayısı optimizasyon değişkeni olarak alınmıştır. EK (i)'de MATLAB'de oluşturulan GA kodu yer almaktadır. Bu kısımdaki optimizasyonda da önceki kısımdakine benzer şekilde amaç fonksiyonunun oluşturulduğu kod, kısıtların tanımlandığı kod, benzetişim ve GA optimizasyon eklentisi birlikte çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. EK (h)'de optimizasyonda kullanılan kısıtların belirtildiği kod yer almaktadır.

UC'nin bara gerilimi 800 V olduğu için minimum bir paralel hücre kullanılan durumda 666 Wh UC enerji kapasitesi olur.

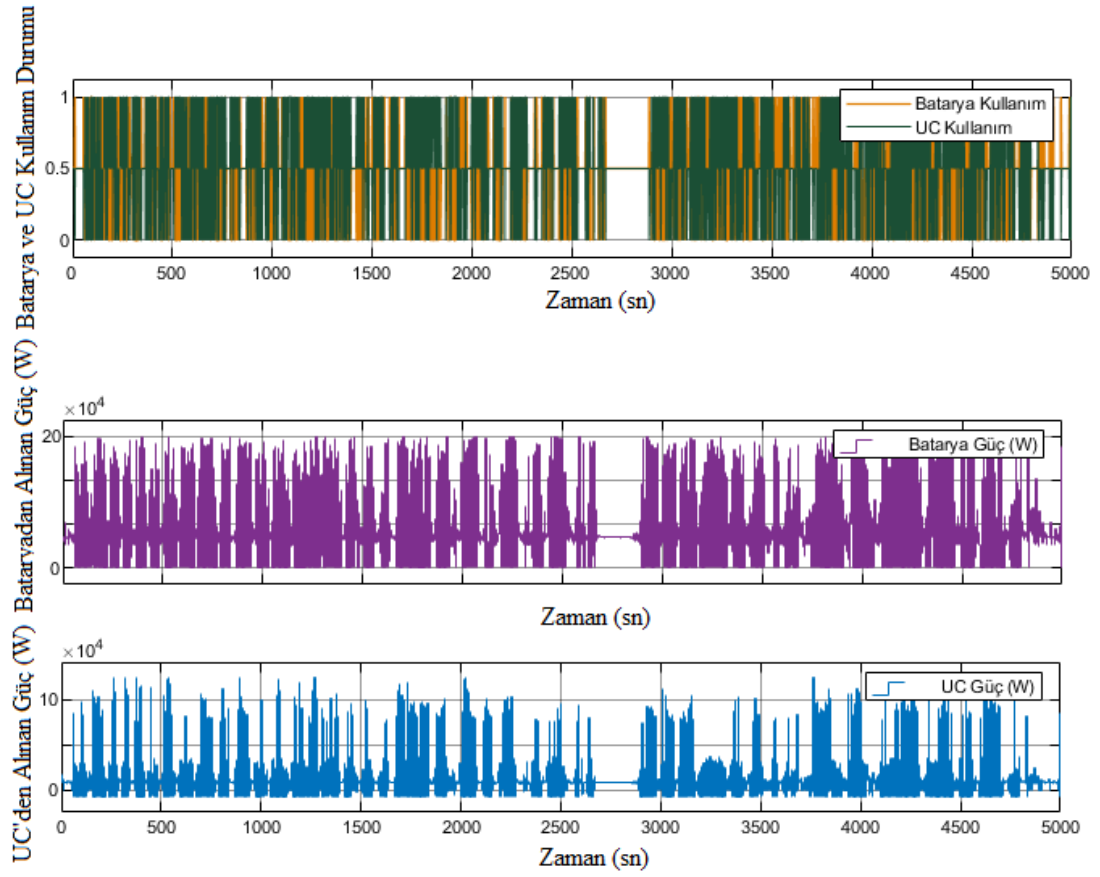
Çizelge 4.10 Maksimum ve Minimum Hücre Limitleri.

Sabit	Açıklama
$N_{sbatmax}$	236
$N_{sbatmin}$	60
$N_{pbatmin}$	1
$N_{pbatmax}$	55
N_{pUCmin}	1
N_{pUCmax}	28

Çizelge 4.10 ile optimizasyon parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri verilmiştir. Bataryanın terminal gerilimini minimum 200 V ve maksimum 800 V olarak alındığı için 60 ile 236 seri hücre limitleri girilmiştir. UC'nin maksimum güç kapasitesi 50 kW olarak alındığı için maksimum paralel hücre sayısı 28 alınmıştır.

Şekil 4.8 ile optimizasyon sonucu elde edilen parametreler benzetişime girildiğinde talep gücünün karşılanmasında batarya ve UC'nin kullanım durumu ve sisteme verdikleri güç değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.11 ve EK (N) ile verilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde sisteme 14,368 kWh'lik UC eklenmesiyle birlikte ek olarak 1.097.704 ₺'lik masrafla batarya ömrünün 1,63 yıl arttığı görülmektedir. Ayrıca sistemin ağırlığı 1.083,94 kg gibi bir değerle önemli ölçüde artmaktadır.



Şekil 4.8 İkinci yarı aktif HESS yapısı kullanılan sistemdeki benzetişim sonucu.

Çizelge 4.11 Yarı Aktif HESS (2) Yapısı Optimizasyon Sonuçları.

Parametre	Değer	Birim
$N_{s_{bat}}$	187	-
$N_{p_{bat}}$	17	-
$N_{p_{UC}}$	8	-
E_{bat}	486,387	kWh
E_{UC}	14,368	kWh
Maliyet	2.097.704,5	₺
Batarya Ömrü	5,83	yıl
Ağırlık	4.354,9	kg

4.2.5 Batarya ve UC'nin baraya dc/dc çevirici ile bağlandığı model

Beşinci senaryoda tam aktif HESS yapısı kullanılmıştır. UC ve batarya baraya dc/dc çevirici ile bağlıdır. Bu nedenle UC ve batarya gerilimi seri hücre sayısına bağlı bir değişken olarak alınmıştır. Bu konfigürasyonda UC ve bataryanın gerilimi bara

geriliminden farklı değer seçilerek boyut ve maliyet optimizasyonu yapılabilir. Ancak iki EDS elemanı için de çevirici kullanıldığı için maliyet artmaktadır.

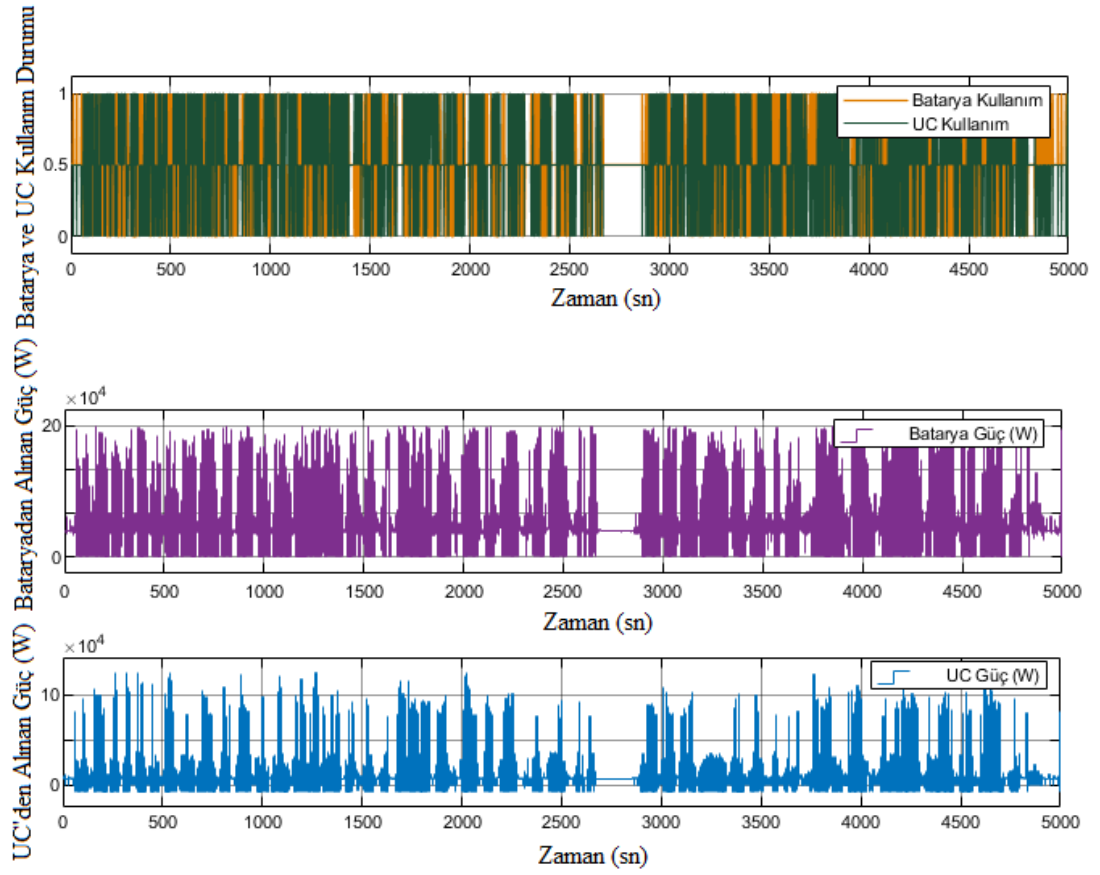
Bu senaryoda batarya ve UC'nin enerji kapasitesinin belirlenmesi için batarya ve UC'nin seri ve paralel hücre sayıları optimizasyon değişkeni olarak alınmıştır. EK (j)'de MATLAB'de oluşturulan GA kodu yer almaktadır. Bu kısımdaki optimizasyonda da önceki kısımdakine benzer şekilde amaç fonksiyonunun oluşturulduğu kod, kısıtların tanımlandığı kod, benzetişim ve GA optimizasyon eklentisi birlikte çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. EK (k)'de optimizasyonda kullanılan kısıtların belirtildiği kod yer almaktadır.

Çizelge 4.12 Maksimum ve minimum hücre limitleri.

Sabit	Açıklama
$N_{sbatmax}$	236
$N_{sbatmin}$	60
N_{sUCmax}	296
N_{sUCmin}	37
$N_{pbatmin}$	10
$N_{pbatmax}$	55
N_{pUCmin}	5
N_{pUCmax}	200

Çizelge 4.12 ile optimizasyon parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri verilmiştir. UC'nin minimum güç kapasitesi 1 kW olarak alındığı için minimum paralel hücre sayısı 5 alınmıştır.

Çizelge 4.13 ve EK (O) ile optimizasyon sonuçları incelendiğinde sisteme 11,372 kWh'lik UC eklenmesiyle birlikte ek olarak 851.209 ₺'lik masrafla batarya ömrünün 1,5 yıl arttığı görülmektedir. Ayrıca sistemin ağırlığı 760,64 kg gibi yüksek bir değerde artmaktadır.



Şekil 4.9 Tam aktif HESS yapısı kullanılan sistemdeki benzetişim sonucu.

Çizelge 4.13 Tam Aktif HESS Yapısı Optimizasyon Sonuçları.

Parametre	Değer	Birim
$N_{s_{bat}}$	222	
$N_{p_{bat}}$	14	-
$N_{s_{UC}}$	208	-
$N_{p_{UC}}$	9	-
E_{bat}	475,524	kWh
E_{UC}	11,372	kWh
Maliyet	1.851.209	₺
Batarya Ömrü	5,7	yıl
Ağırlık	4.031,6	kg

4.3 HESS Sisteminin Enerji Yönetimi Optimizasyonu

Bölüm 4.2 ile verilen farklı HESS yapılarının optimizasyon sonuçları ve karşılaştırmaları Çizelge 4.14 ile verilmiştir.

Çizelge 4.14 Farklı HESS yapılarının sonuçlarının karşılaştırılması.

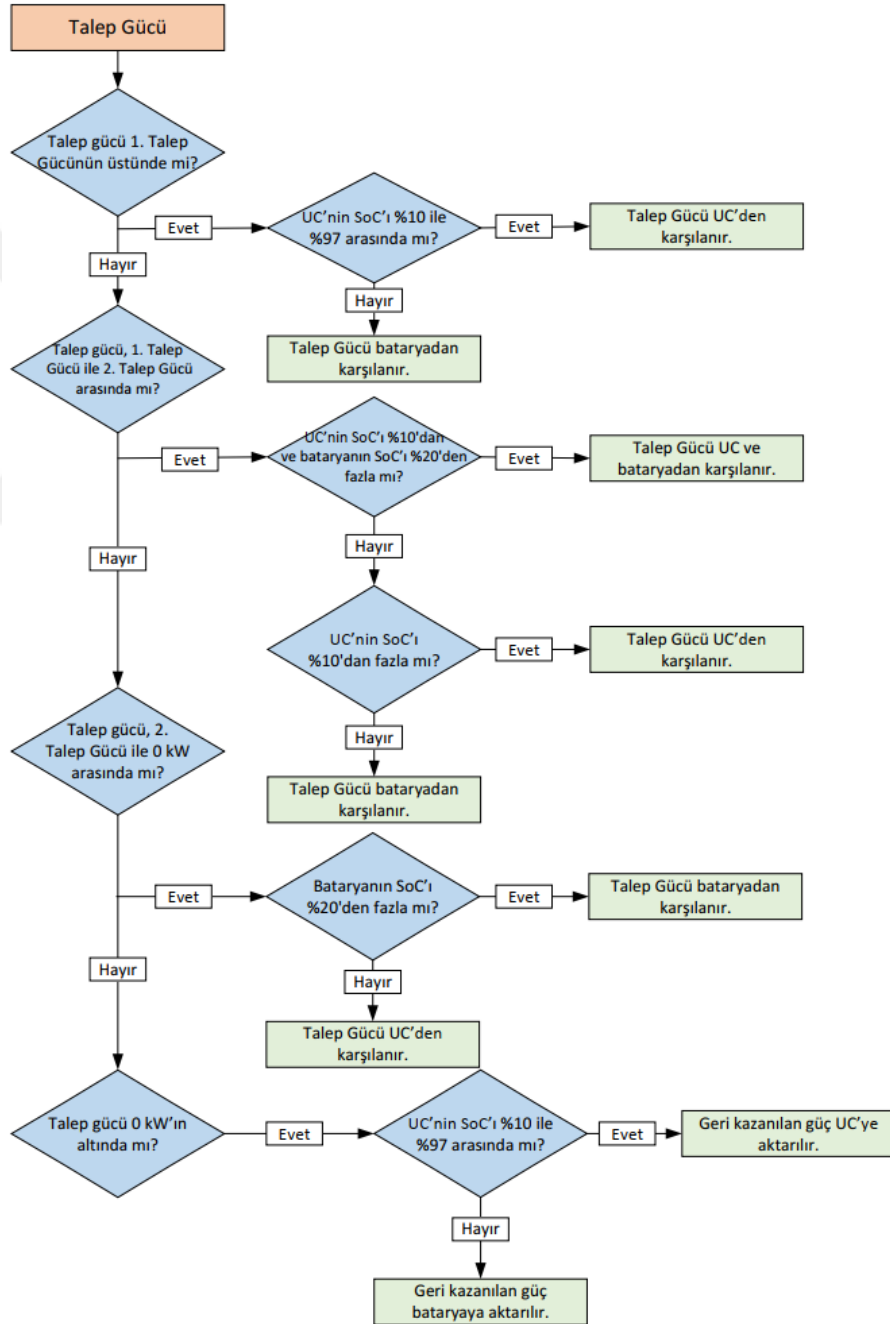
Parametre	1. Senaryo	2. Senaryo	3. Senaryo	4. Senaryo	5. Senaryo
$N_{s_{bat}}$	236	236	236	187	222
$N_{p_{bat}}$	14	13	13	17	14
$N_{s_{UC}}$	-	296	153	296	208
$N_{p_{UC}}$	-	6	9	8	9
E_{bat} [kWh]	475,524	469,4	469,4	486,387	475,524
E_{UC} kWh]	11,372	10,8	8,365	14,368	11,372
Maliyet [₺]	999.691,28	1.779.800	1.597.870	2.097.704,5	1.851.209
Batarya Ömrü [yıl]	4,2	5	5,92	5,83	5,7
Ağırlık [kg]	3.270,96	3.943	3.739,59	4.354,9	4.031,6

Çizelge 4.14 incelendiğinde sadece batarya kullanılan sisteme göre HESS yapısı kullanılan bütün sistemlerde maliyet artmıştır. Aynı zamanda yine bütün HESS yapılarında batarya kullanımı UC ile azaldığı için batarya ömrü de artmaktadır. UC hücrelerinin ağırlığı batarya hücrelerine göre daha ağır olduğu için HESS yapıları kullanılan sistemlerde ağırlık da daha fazladır. Maliyet, batarya ömrü ve ağırlık açısından HESS yapıları karşılaştırıldığında bataryanın DC baraya direkt bağlandığı ve UC'nin bir dc/dc çevirici ile bağlandığı 3. senaryonun daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bu yapı kullanıldığında 598.178 ₺'lik bir ek maliyetle batarya ömrünün yaklaşık 1,72 yıl arttırıldığı görülmektedir. Çalışmanın bundan sonraki kısmına 3. senaryo ile devam edilecektir.

Farklı HESS yapılarının boyutsal olarak optimizasyonları yapılırken şartların eşit şekilde karşılaştırılması için her durumda EYS olarak Şekil 3.7 ile verilen sistem kullanılmıştır. Çalışmanın devamında boyutsal optimizasyon olarak en iyi sonuç veren 3. senaryodaki boyutlar kullanılarak Genetik Algoritma ile enerji yönetimi optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmanın bu kısmında sadece batarya ömrü denklem 5.4'e göre optimize edilmiştir. Bu kısımda 2 adet talep gücü değeri optimizasyon parametresi olarak alınmıştır.

Birinci Talep Gücü değeri en yüksek talep gücü değeridir. Bu değer ve üstündeki değerler için talep gücü öncelikle UC tarafından karşılanır. Bu şekilde hızlı şekilde dolup boşalan UC'ye yüksek güçler öncelikli olarak gönderilir ve bu yüksek değerler için batarya kullanılmayarak ömrü iyileştirilir. İkinci Talep Gücü, birinci Talep Gücü ile sıfır değeri arasındaki bir değerdir. Bu talep gücü ve üst değerler için birinci talep

gücüne kadar talep edilen güç öncelikle UC ve bataryadan birlikte karşılanır. İkinci Talep Gücüyle sıfır değeri arasında talep edilen güç değeri öncelikle bataryadan sağlanır. Bu değer belirlenerek elektrikli otobüsün nominal çalışma durumunda hangi enerji depolama sisteminden güç alacağı belirlenir. Geri kazanılan güç değerleri için yine UC'nin çabuk dolup boşalma özelliğinden dolayı mümkün olduğunda öncelikle onun kullanılmasına karar verilmiştir. Böylece UC'nin SoC değeri uygun olduğu müddetçe öncelikle geri kazanılan güç UC'ye aktarılır. Bu şekilde bataryaya sürekli bir güç aktarımı olmadığı için ömrü iyileştirilmiş olur.

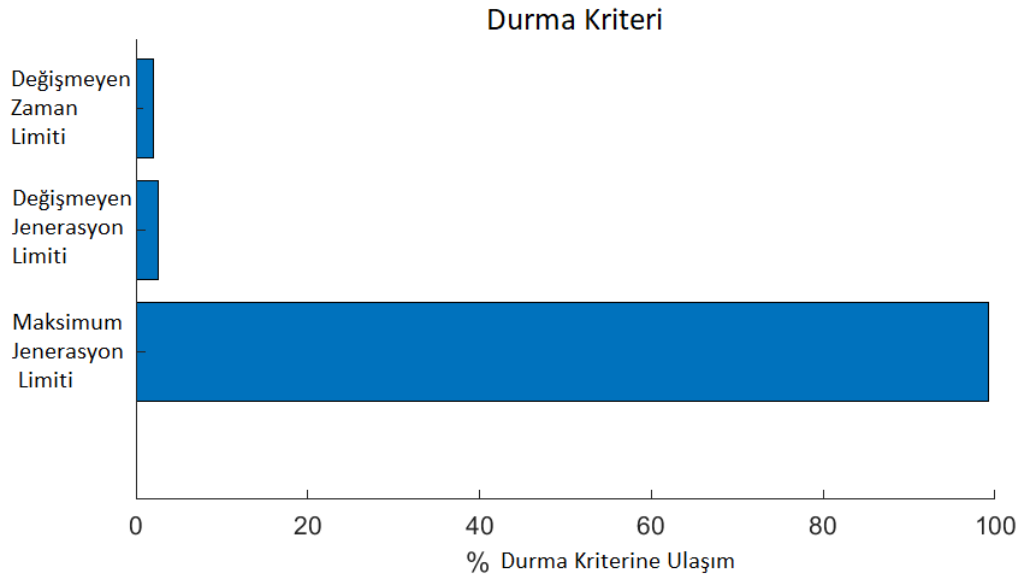


Şekil 4.10 Batarya ömrünün optimize edildiği EYS yapısı.

Şekil 4.10 ile verilen EYS yapısındaki 1. Talep Gücü ve 2. Talep Gücü değerleri, amaç fonksiyonu olarak batarya ömrünün minimize edilmesi koşulu alınarak optimize edilmiştir. Optimizasyonun durma koşulu olarak Bölüm 4.2’de verilen üç koşul kullanılmıştır. Optimizasyon yapılırken bataryanın da UC’nin de SoC değeri %50 koşulunda başlamıştır. Optimizasyon tek yönlük otobüs seferi için yapılmıştır.

Çizelge 4.15 Talep Gücü Optimizasyonu.

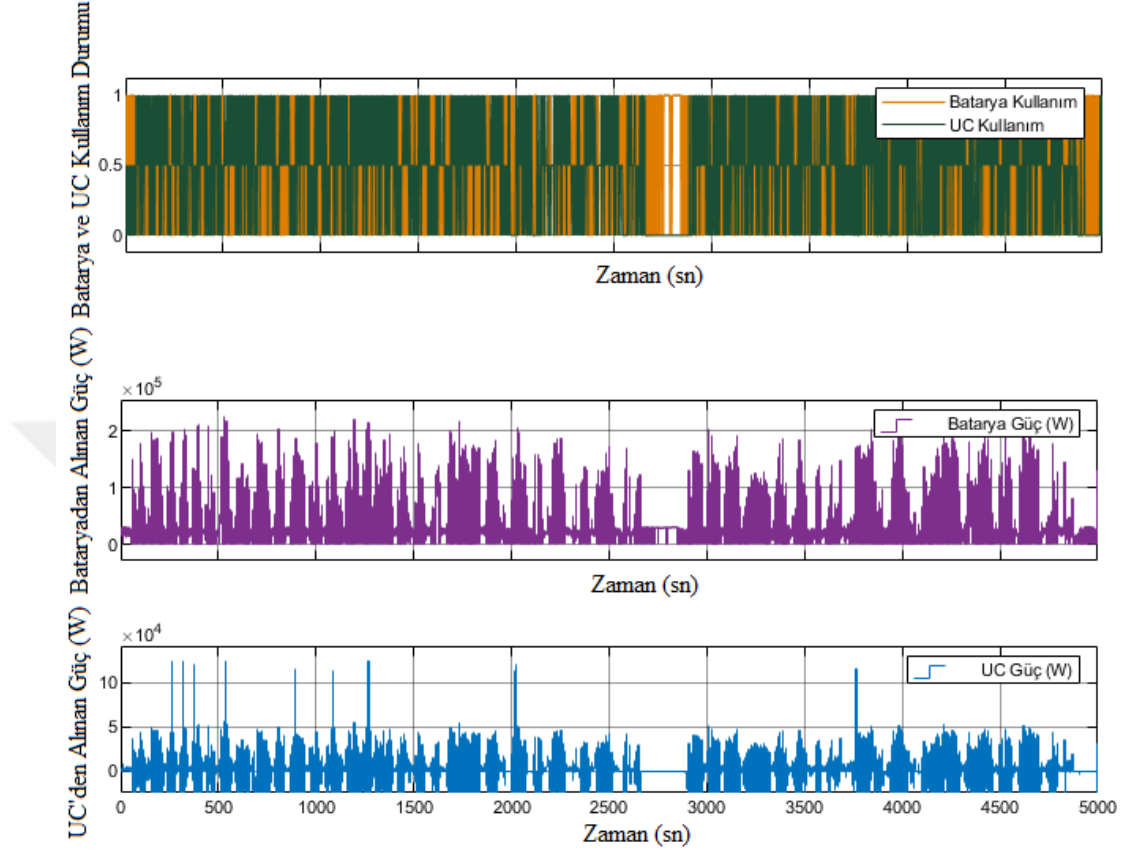
Parametre	Değer	Birim
P_{1min}	200	kW
P_{1max}	500	kW
P_{2min}	30	kW
P_{2max}	60	kW
P_1	453,5	kW
P_2	36,2	kW
Ömür	6,75	yıl



Şekil 4.11 Optimizasyon sonucunun durma kriteri sonucu grafiği.

Şekil 4.11 ile optimizasyon sonucunun hangi durma kriterine bittiğinin bilgisi verilmektedir. Şekle göre maksimum jenerasyon sayısına ulaşılmasıyla birlikte optimizasyon tamamlanmıştır. Çizelge 4.15 ile optimizasyon parametrelerinin sınırları ve sonuçları verilmiştir. Sınır değerleri mevcut benzetişimde bazı değerler girilerek elde edilen sonuçlara göre belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde bataryanın ve UC’nin talep gücü öncelikle karşıladığı talep gücü değerlerinin

değişmesiyle birlikte bataryadan tek yönde talep edilen güç değerinin azalarak batarya ömrünün arttığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre elde edilen HESS yapısı koşturularak Şekil 4.12-Şekil 4.14 ile verilen sonuçlar elde edilmiştir.

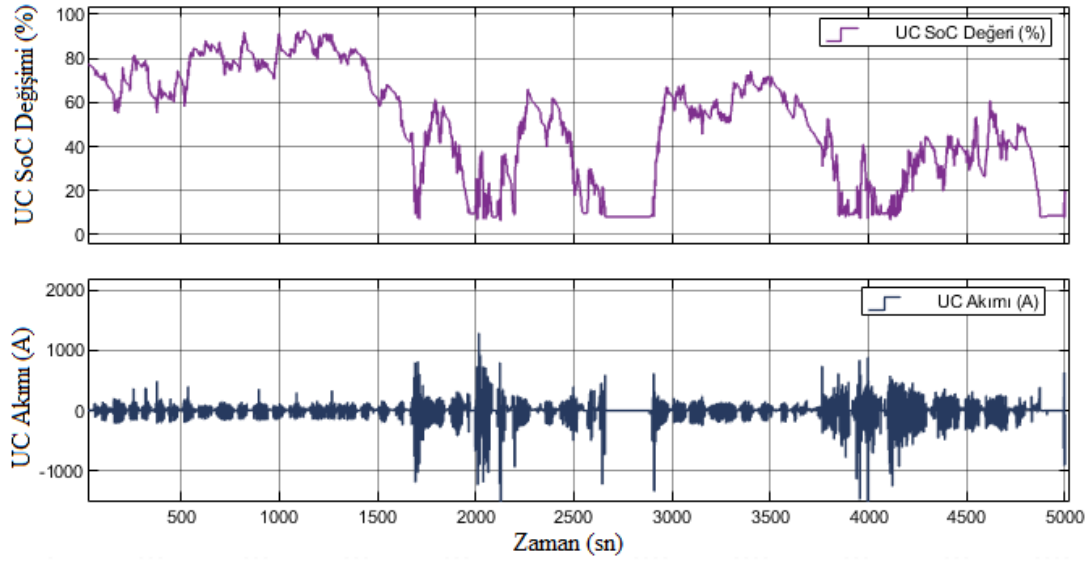


Şekil 4.12 Talep edilen güce göre batarya ve UC kullanımı.

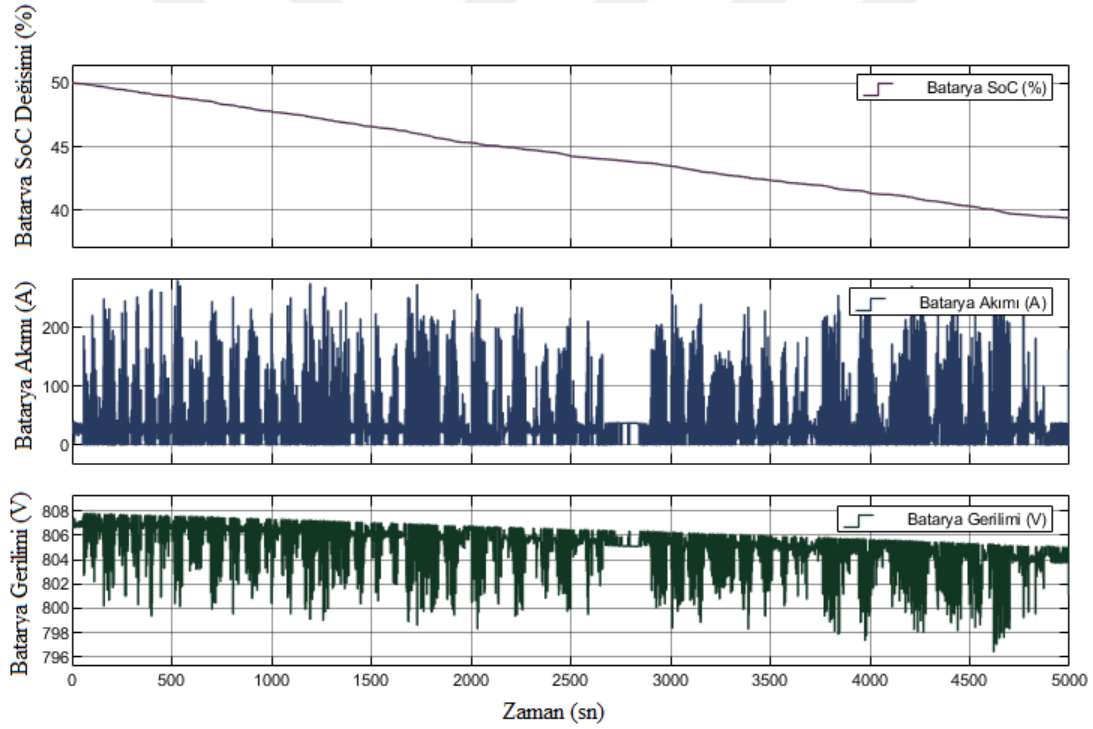
Şekil 4.12 ile batarya ve UC'nin farklı talep güçlerindeki kullanımları verilmiştir. Şekilde bataryanın kullanımı ve UC kullanımı değerlerinin 1 değerinde olması ilgili talep gücün o enerji depolama komponentinden tek başına sağlandığını belirtir. Batarya ve UC kullanımı değerlerinin 0,5 değerinde olması ise ilgili talep gücün aynı andan batarya ve UC'den karşılandığını belirtmektedir.

Şekil 4.13 ile nihai tasarımdaki UC'nin SoC ve akım sonuçları verilmiştir. Şekil incelendiğinde EYS'de belirlendiği gibi yüksek akım değerlerinde ve geri kazanılan güç değerlerinde UC kullanılmaktadır. Tek yön için %50 SoC ile çalışmaya başlayan UC değeri yaklaşık %27 değerlerine düşmektedir.

Batarya ve UC akımlarının verildiği grafiklerde eksi (-) değerler EDS elemanının şarj, artı (+) değerler EDS elemanının deşarj olduğunu belirtmektedir.



Şekil 4.13 Nihai tasarımda UC SoC ve akım grafikleri.



Şekil 4.14 Nihai tasarımda batarya uç gerilimi, SoC ve akım grafikleri.

Şekil 4.14 ile nihai tasarımdaki bataryanın uç gerilimi, SoC'ı ve akımı verilmiştir. Şekil incelendiğinde Şekil 4.5 ile verilen, sadece batarya kullanılan sisteme göre bataryadan daha az güç harcandığı görülmektedir. Bu şekilde boyutsal ve EYS optimizasyonu yapılan HESS yapısı kullanılarak 598.178 ₺'lik ek maliyetle bataryanın ömrü 2,55 yıl arttırılmıştır.

4.4 EDS Olarak Sadece Bataryanın ve Optimize Edilen HESS'in Kullanıldığı Yapıların Maliyet Karşılaştırılması

EDS olarak sadece batarya yerine HESS sisteminin kullanılmasındaki en önemli nedenlerden birisi UC'nin belirli çalıştırma durumlarında sistemin yük gereksinimini karşılayarak bataryanın kullanımının azaltılmasıdır. UC'lerde elektrotlar arasında kimyasal bir değişim olmadığı için ömürleri uzundur ve güç yoğunlukları fazladır. Bu nedenle kısım 4.3'te belirtildiği gibi UC yüksek güç yoğunluğu taleplerinde ve geri kazanımlı frenlemede etkin olarak kullanılmıştır. Ayrıca UC'nin SoC'ının uygun değerlerde olduğu sürece sistemin güç talebi UC tarafından sağlanarak bataryanın sistemde kullanılma durumu azaltılmıştır. Bu şekilde batarya HESS sisteminde verimli bir şekilde kullanılmış ve ömrü arttırılmıştır. Böylelikle otobüslerde EDS olarak sadece batarya kullanılan sisteme göre uzun vadede batarya değişim sayısı da azalmıştır.

Çalışmanın bu kısmında EDS olarak sadece bataryanın kullanıldığı ve optimize edilen HESS'in kullanıldığı yapıların karşılaştırılması yapılmıştır. Çizelge 4.16 ile uzun vadede bu iki farklı EDS sisteminin maliyet açısından karşılaştırılması verilmiştir. Şehir içinde kullanılan otobüslerin ömrü, düzenli bakımlarının yapılması takdirde 23 yıla kadar uzayabilmektedir [79]. Bu çalışmadaki maliyet hesapları yapılırken otobüslerin EDS yapıları dışındaki diğer tüm sistemleri aynı kabul edildiği için bu yapıların EDS dışındaki maliyetleri karşılaştırılmamıştır. EDS maliyetleri uzun vadede otobüslerin EDS dışındaki ömürleri olan 23 yıla göre karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.16 EDS olarak bataryanın ve optimize edilen HESS'in karşılaştırılması.

Karşılaştırılan Parametre	Sadece Batarya [₺]	Optimize Edilen HESS [₺]
Bir Otobüs için Yatırım Maliyeti	999.691,96	1.597.870,80
Bir Otobüs için Batarya Değişim Sayısı	5	3
Bir Otobüs için UC Değişim Sayısı	-	0
Bir Otobüs için Batarya Değişim Maliyeti	4.998.459,8	2.784.854,28
Bir Otobüs için Toplam Maliyet	5.998.151,76	4.382.725,08
Tüm Otobüs Filosu için Toplam Maliyet	89.972.276,4	65.740.876,2

Çizelge 4.16’de EDS olarak sadece bataryanın kullanıldığı ve optimize edilen HESS’in kullanıldığı metrobüs hattının, uzun vadeli kullanımındaki EDS sistemi değişim durumları ve maliyetleri verilmiştir. Çizelgede otobüslerin EDS dışındaki değişim maliyetleri sabit kabul edildiği için karşılaştırılmaya eklenmemiştir. Ayrıca UC değişimi gereksinimi için UC ömrü, batarya ömrü hesabında kullanılan denklem 5.4’e göre hesaplanmıştır. Otobüsün EDS yapısında optimize edilen HESS sistemi kullanıldığında UC ömrü 38 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu hesaba göre belirtilen uzun vadeli çalıştırmada UC değişimi gereksinimi bulunmamaktadır. Otobüs filosunda bulunan bir otobüs için ve tüm filodaki otobüsler için ayrı ayrı 23 yıllık metrobüs hattı çalıştırılmasındaki EDS sistemi maliyetleri verilmiştir.

Çizelge incelendiğinde öncelikle bir otobüs için çalışmanın öncesinde de verilen EDS yatırım maliyetleri verilmiştir. Bu maliyetler karşılaştırıldığında EDS olarak sadece batarya kullanılan sistem daha ucuz olmasına rağmen optimize edilen HESS yapısında batarya ömrü 2,55 yıl daha fazladır. Bu nedenle çizelgedeki gibi bu uzun vadeli çalıştırmada optimize edilen HESS’te batarya değişimi sadece 3 defa olurken sadece batarya kullanılan yapıda batarya değişimi 5 defa yapılır. Bu şekilde uzun vadeli çalıştırmada sadece batarya kullanılan yapıdaki toplam maliyet optimize edilen HESS yapısı kullanılan yapıya göre 1.615.426,68 ₺ ile %37 daha maliyetlidir. Bu oran metrobüs filosunda bulunan tüm otobüslere uygulandığında uzun vadede EDS olarak sadece batarya kullanılan sistem yerine optimize edilen HESS yapısı kullanıldığında 24.231.400,2 ₺ kar elde edilmektedir. Böylelikle tüm otobüslerin EDS maliyeti %27 daha ucuz olmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında elektrikli otobüslerde enerji depolama sistemi olarak kullanılan bataryalar yerine, batarya ve UC'nin birlikte kullanıldığı bir HESS yapısının boyutsal ve işletim olarak optimizasyon çalışması verilmiştir. Öncelikle mevcut durumda kullanılan elektrikli otobüs sistemleri ele alınarak tezin amacı doğrultusunda geniş kapsamlı literatür araştırması gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilerleyen kısımlarında bir elektrikli otobüs için MATLAB/Simulink ortamında boyutsal dinamik model oluşturulmuştur. Daha sonra çalışmada kullanılan optimizasyon yöntemi olan genetik algoritma tanımlanmış ve açıklanan farklı senaryolar için dinamik modelin de kullanıldığı bir şekilde optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde öncelikle boyutsal optimizasyonu yapılan ve sonrasında optimal çözüm ile EYS optimizasyonu yapılan HESS sisteminin sonuçları verilmiştir. Boyutsal optimizasyondaki sonuçlar maliyet, batarya ömrü ve ağırlık açısından Çizelge 4.14 ile verildiği gibi karşılaştırıldıklarında, bataryanın DC baraya direkt bağlandığı ve UC'nin baraya bir dc/dc dönüştürücü üzerinden bağlandığı HESS yapısının optimal çözüm olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın sonraki aşamasında bu HESS yapısında kullanılan enerji yönetiminin optimizasyonu genetik algoritma ile yapılmıştır. Hangi güç talebinde hangi enerji depolama sisteminin kullanılacağı esas alınarak, talep gücü değerleri optimizasyon parametresi olarak alınmış ve Çizelge 4.15 ile verilen sonuçlar elde edilmiştir. HESS sisteminde bulunan UC, güç yoğunluğunun yüksek olması özelliği nedeniyle yüksek güç yoğunluğu taleplerinde ve geri kazanımlı frenlemelerde etkin bir şekilde kullanılmıştır. EYS optimizasyonu ile birlikte sadece batarya kullanılan EDS yapısına göre EDS sistemine UC eklenerek bataryanın ömrü artırılmıştır. Bu şekilde boyutsal ve EYS optimizasyonu yapılan HESS yapısı kullanılarak EDS olarak sadece bataryanın kullanıldığı yapıya göre 598.178 ₺'lik ek maliyetle bataryanın ömrü yaklaşık 2,55 yıl arttırılmıştır. Bu şekilde uzun vadede bir otobüs için EDS olarak sadece batarya yerine optimize edilen HESS'in kullanılmasıyla birlikte EDS sistemi

%27 daha ucuza mal olmaktadır. EDS olarak HESS sisteminin kullanımıyla birlikte 1 otobüs için 1.615.426,68 ₺ kar elde edilir. Bu oran metrobüs hattında bulunan bütün otobüslere uygulandığında ise uzun vadede otobüslerin EDS sistemi maliyeti 24.231.400,2 ₺ azaltılabilmektedir.

Gelecekte yapılan bu çalışmayı geliştirme adına EDS olarak batarya ve UC'nin dışında yakıt pilleri de kullanılabilir. Bu şekilde sistemin talep edeceği gücün optimal karşılanabilmesi için en uygun EDS elemanı seçilebilir. Ayrıca tez çalışmasında kullanılan LPF tip batarya yerine farklı batarya kimyalarının da bir optimizasyon aşaması olarak eklendiği bir çalışma yapılabilir. Bunun dışında yapılan bu tez çalışmasını gerçekliğe daha da yaklaştırılması adına kullanılan EDS elemanlarının yaşlanma durumları da hesaba katılabilir. Bu şekilde otobüsün kullanılacağı hattın yıllık sıcaklık değerleri ele alınarak optimizasyonda sıcaklığın da dinamik bir değer olarak alınması sağlanabilir. Bunun yanında otobüsün genel yüklerinin de sabit bir değer yerine gerçek değerlere bağlı dinamik bir değer olarak alınması sonuçları gerçeğe yaklaştırabilir. Ayrıca yapılan benzetişim koşturmalarında gerçek zamanlı benzetişimler yapılarak EDS elemanlarının tüm ömürlerinin benzetişim sonuçları elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **İşcanoğlu, Y.** (2021). Cost-oriented optimization of battery pack sizing and electrical design of the battery system for electrified bus rapid transit systems (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Wang, H., Wang, T., Xie, X., Ling, Z., Gao, G., & Dong, X.,** (2018). Optimal capacity configuration of a hybrid energy storage system for an isolated microgrid using quantum-behaved particle swarm optimization, *Energies* 11,no:2 Çin.
- [3] **Oman, H.** (2002). Electric car progress, *IEEE AESS Systems Magazine*, Haziran.
- [4] **Bayraç, H.** (2010). Enerji kullanımının küresel ısınmaya etkisi ve önleyici politikalar, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi , 11 (2) , 229-259.
- [5] **International Energy Agency** (2021). *Key World Energy Statistics 2021*.
- [6] **EVs Are Still 45% More Expensive To Make Than Combustion-Engined Cars:** <https://insideevs.com/news/444542/evs-45-percent-more-expensive-make-ice/>, erişim tarihi 13.05.2022
- [7] **Ostadi, A., & Kazerani, M.** (2014). A comparative analysis of optimal sizing of battery-only, ultracapacitor-only, and battery-ultracapacitor hybrid energy storage systems for a city bus, 2014 *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- [8] **Kivekäs, K., Lajunen, A., Vepsäläinen, J., & Tammi, K.** (2018). City bus powertrain comparison: driving cycle variation and passenger load sensitivity analysis, *Energies*, Temmuz 2018.
- [9] **Yılmaz, Ç.** (2018). Economic evaluation of urban electric bus charge stations: case of eindhoven, the Netherlands (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **Ali, M., Zafar, A., Nengroo, S., Hussain, S., Alvi, M., & Kim, H.** (2019). Towards a smarter battery management system for electric vehicle applications: a critical review of lithium-ion battery state of charge estimation, *Energies*, Ocak 2019.
- [11] **Zhang, Y., Meng, D., Zhou, M., & Li, S.** (2016). energy management of an electric city bus with battery/ultra-capacitor HESS, 2016 *IEEE Vehicle*

Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016, ss. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2016.7791685.

- [12] **Cao, J., & Emadi, A.** (2012). A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no.1, ss. 122-132, Ocak 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2151206.
- [13] **Chuan, Y., Chris M., & Mengyang Z.** (2012). Comparative study of a passive hybrid energy storage system using lithium ion battery and ultracapacitor, *World Electric Vehicle Journal* 5, no. 1: 83-90. <https://doi.org/10.3390/wevj5010083>
- [14] **Moshirvaziri, M.** (2015). Ultracapacitor/battery hybrid energy storage system with real-time power-mix control validated experimentally in a custom electric vehicle, *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2015, ss. 1331-1336, doi:10.1109/APEC.2015.7104520.
- [15] **Porru, M., Serpi, A., Marongiu, I., & Damiano, A.** (2015). A novel hybrid energy storage system for electric vehicles, *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2015,ss. 003732-003737, doi: 10.1109/IECON.2015.7392682.
- [16] **Amin, T.** (2015). Energy storage system using battery and ultracapacitor on mobile charging station for electric vehicle. *Energy Procedia*, ss. 429-437. 10.1016/j.egypro.2015.03.274.
- [17] **Correa, F., Eckert, J., Santiciolli, F., Silva, L., Costa E., & Dedini, F.** (2017). Electric vehicle battery-ultracapacitor energy system optimization, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2017, ss. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2017.8330866.
- [18] **Bai. Z., Yan. Z., Wu. X., Xu. J., & Cao. B.** (2019). H_{∞} control for battery/supercapacitor hybrid energy storage system used in electric vehicles, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 20, No. 6, ss. 1287–1296 (2019) doi: 10.1007/s12239–019–0120–x.
- [19] **Yu. H., Castelli-Dezza. F., Cheli. F., Tang. X., Hu. X., & Lin. X.** (2021). Dimensioning and power management of hybrid energy storage systems for electric vehicles with multiple optimization criteria, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 5, ss. 5545-5556, Mayıs 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3030822.
- [20] **Jaarsveld. M., & Gouws. R.** (2020). An active hybrid energy storage system utilising a fuzzy logic rule-based control strategy. *World Electr. Veh. J.* 2020, 11(2), <https://doi.org/10.3390/wevj11020034>.

- [21] **Göhlich, D., Fay, T., Jefferies, D., Lauth, E., Kunith, A., & Zhang, X.** (2018). Design of urban electric bus systems. *Design Science*, 4, E15. doi:10.1017/dsj.2018.10.
- [22] **Xie, S., Hu, X., Xin, Z., & Brighton, J.** (2019). Pontryagin's minimum principle based model predictive control of energy management for a plug-in hybrid electric bus. *Applied Energy*, Yayın 236, 2019, ss. 893-905, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.032>.
- [23] İstanbul Ulaşım: <https://www.iETT.istanbul/tr/main/pages/istanbulda-toplu-ulasim/95>, erişim tarihi: 13.05.2022.
- [24] **Kavalchuk, I., Nguyễn, I., & Alex, S.** (2016). real-time energy consumption optimisation strategies for electric vehicles on-board systems, *FISITA World Congress 2016*.
- [25] Elektrikli otobüs: <http://www.sahakk.sakarya.edu.tr/hybridbus/about.html>, erişim tarihi: 14.05.2022.
- [26] **Liu, J. & Peng, H.** (2008), Modeling and control of a power-split hybrid vehicle, *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, vol. 16, no. 6, ss. 1242-1251, Kasım 2008, doi: 10.1109/TCST.2008.919447.
- [27] **Clark, N., Zhen, F., Wayne, S., & Schiavone, J.** (2009). Assessment of Hybrid-Electric Transit Bus Technology (Rapor No. 132). Washington: Transit Cooperative Research Program Raporu.
- [28] Elektrikli otobüs: <https://www.openpr.com/news/1974605/electric-bus-market-in-depth-business-strategies>, erişim tarihi: 13.05.2022.
- [29] Solaris Urbino 18: https://www.solarisbus.com/public/assets/content/pojazdy/2021/2021/EN_Zeroemisyjne_1920_x_1080.pdf, erişim tarihi: 13.05.2022.
- [30] The BYD K11: https://en.byd.com/wp-content/uploads/2019/07/k11-cut-sheet_final_digital.pdf, erişim tarihi: 13.05.2022.
- [31] Mercedes-Benz, The new eCitaro: https://www.mercedes-benz-bus.com/en_DE/buy/services-online/download-technical-brochures.html#content/headline_840766654_c, erişim tarihi: 13.05.2022
- [32] Ebusco 3.0: https://www.ebusco.com/wp-content/uploads/Trifold-Ebusco_3.0_2021_digital.pdf, erişim tarihi: 13.05.2022.
- [33] Volvo 7900 Electric Articulated: <https://www.volvobuses.com/en-en/news/2019/oct/volvo-buses-launches-new-electric-articulated-bus.html>, erişim tarihi: 13.05.2022.

- [34] Proterra, ZX5 40-Foot Bus: https://www.proterra.com/wp_content/uploads/2022/04/SPEC_40_001A_Q2_2022_V4_4.5.22-2.pdf, erişim tarihi: 13.05.2022.
- [35] Eurabus 3.0: <https://www.eurabus.com/#features>, erişim tarihi: 13.05.2022.
- [36] Temsa MD9: <https://www.temsa.com/tr/tr/sehir-ici/md9-electricity>, erişim tarihi: 13.05.2022.
- [37] Heuliez GX 337 E, https://www.heuliezbus.com/fr/vue/produits/bus/GX-ELEC/Brochure_GXELEC.pdf, erişim tarihi: 13.05.2022.
- [38] Yutong E15, <https://en.yutong.com/products/E15-europe.shtml1>, erişim tarihi: 13.05.2022.
- [39] **Mars, R., Bouzidi, B., & Yangui, A.** (2016). On the comparison of two hybrid energy storage systems: Parallel connection of battery-RC ultracapacitor/- multibranch ultracapacitor circuits, *2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies*, 2016, ss. 1-8, doi: 10.1109/EVER.2016.7476418.
- [40] **Thounthong, P., Chunkag, V., Sethakul, P., Davat, B., & Hinaje, M.** (2009). Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, ss. 3892-3904, Ekim 2009, doi: 10.1109/TVT.2009.2028571.
- [41] Metrobüs Hattı: <https://www.iETT.istanbul/tr/main/pages/metrobus-hatlari/90>, erişim tarihi: 15.08.2021.
- [42] **Kaymaz, H.** (2018). Hibrit ve elektrikli metrobüs araçlar için sürüş çevrimi oluşturulması. (Doktora Tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [43] **Lukic, S., Cao, J., Bansal, R., Rodriguez, F., & Emadi, A.** (2009). Energy storage systems for automotive applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, ss. 2258-2267, Haziran 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.918390.
- [44] **Ribeiro, P., Johnson, B., Crow, M., Arsoy, A., & Liu, Y.** (2001). Energy storage systems for advanced power applications, *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 12, ss. 1744-1756, Aralık 2001, doi: 10.1109/5.975900.
- [45] **Casals, C., Rodríguez, M., Corchero, C., & Carrillo, R.** (2019). evaluation of the end-of-life of electric vehicle batteries according to the state-of-health, *World Electr. Veh. J.* 2019, 10(4), <https://doi.org/10.3390/wevj10040063>

- [46] SuperLIB Project Office – Cell Specification with Cell Data, https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20140122_144927_31958_SUPERLIB_Deliverable__Cell_Specification_with_Cell_Data.pdf, erişim tarihi: 17.01.2021.
- [47] Maxwell Ultrakapasite: <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/cells/>, erişim tarihi: 19.02.2021.
- [48] Li-ion Batarya: <https://www.indiamart.com/proddetail/lithium->, erişim tarihi: 14.04.2022.
- [49] **IRENA**, Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030, Ekim 2017.
- [50] **Lastra, A.P. (2016)**. Hybrid energy storage system (HESS) in electric vehicle (EV) (Yüksek Lisans Tezi), Warsaw University of Technology, Polonya, 2016.
- [51] **Shen, J. (2016)**. Energy management of a battery-ultracapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles (Doktora Tezi). Maryland Üniversitesi, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Departmanı, ABD, 2016.
- [52] **Song, J., Li, J., Hou, J., Hofmann, H., Ouyang, M., & Du, J. (2018)** The battery-supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicle applications: a case study, *Energy*, (Vol. 154, pp.433-441), Çin, 2018.
- [53] **Hasan, M. M., Avramis, N., Ranta, M., Saez-De-ibarra, A., Baghdadi, M. E., & Hegazy, O. (2021)**. Multi-objective energy management and charging strategy for electric bus fleets in cities using various ECO strategies. *Sustainability*, 13(14), doi: <https://doi.org/10.3390/su13147865>.
- [54] **Jadhav, C. R., Chorage, R. P. (2020)**. Modification in commercial bus model to overcome aerodynamic drag effect by using CFD analysis, *Results in Engineering*, Vol. 6, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100091>.
- [55] Mercedes Conecto: https://www.mercedes-benz-bus.com/tr_TR/models/conecto/facts/technical-data.html, erişim tarihi: 17.02.2021.
- [56] **Evtimov, I., Ivanov, R., & Sapundjiev, M. (2017)**. Energy consumption of auxiliary systems of electric cars. *MATEC Web of Conferences*, 2017, 133, 06002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713306002>.
- [57] SuperLIB Project Office – Cell Specification with Cell Data, Available: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20140122_144927_31958_SUPERLIB_Deliverable__Cell_Specification_with_Cell_Data.pdf, Access date: September 2020.

- [58] AVX SSC Ultrakapasite: <https://datasheets.kyocera-avx.com/AVX-SCC.pdf>, erişim tarihi: 15.05.2022.
- [59] LPF Batarya: <https://ubetterbattery.en.made-in-china.com/product/vsIJyiBDyWkj/China-3-2V-45ah-Prismatic-Battery-LiFePO4-Battery-for-Energy-Storage.html>, erişim tarihi: 15.05.2022.
- [60] GDCPH UC: https://tr.aliexpress.com/item/1005001781024926.html?spm=a2g0o.search0304.0.0.1a061b5ehwqO2f&algo_pvid=6381d32c-5588-4e3b-b49b-1571958fb85b&algo_exp_id=6381d32c-5588-4e3b-b49b1571958fb85b8&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000017545551782%22%7D&pdp_npi=2%40dis%21TRY%21%21479.43%21%21%21%21%21%400b0a555416521101099684554e2596%2112000017545551782%21sea, erişim tarihi: 16.05.2022.
- [61] Mercedes Benz E-citaro: https://www.mercedes-benz-bus.com/en_DE/models/ecitaro/facts/technical-data.html, erişim tarihi: 16.05.2022.
- [62] BYD 18.75m eBus: <https://bydeurope.com/pdp-bus-model-18>, erişim tarihi: 14.05.2022.
- [63] **Akyün, G.** (2020). Design and optimization of battery pack of electric buses in public transportation, İstanbul Teknik Üniversitesi (Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, 2020.
- [64] Batarya Modeli https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/battery.html?searchHighlight=simulink%20battery&s_tid=srchtitle_simulink%20battery_3, erişim tarihi: 17.05.2022.
- [65] Ultrakapasite Modeli: https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/supercapacitor.html?searchHighlight=supercapacitor&s_tid=srchtitle_supercapacitor_1, erişim tarihi: 17.05.2022.
- [66] **Salimi, S., Mawlana, M., & Hammad, A.** (2015). Performance analysis of simulation-based multiobjective optimization using high performance computing. *Conference: 2nd International conference on Civil, Building, Engineering Informatics*, 2015.
- [67] **Jain, M., Desai C., & Williamson, S. S.** (2009). Genetic algorithm based optimal powertrain component sizing and control strategy design for a fuel cell hybrid electric bus, *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009, ss. 980-985, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289740.
- [68] **M, Melanie.** (1998). An introduction to genetic algorithms, ISBN: 9780262631853, The MIT Press, Mart 1998.
- [69] Generik Algoritma: <https://www.slideshare.net/ismailAKBUDAK/evrimsel-algoritmalar-genetik-algoritma-ve-genetik-programlama>, erişim tarihi: 18.07.2022.

- [70] **Rajabi, M., Bohloli, B., & Ahangar, E.** (2010). Intelligent approaches for prediction of compressional, shear and stoneley wave velocities from conventional well log data: a case study from the sarvak carbonate reservoir in the abadan plain (Southwestern Iran), *Computers & Geosciences*, Vol. 36, pp. 647-664, Mayıs 2010. doi: 10.1016/j.cageo.2009.09.008.
- [71] Introduction to Genetic Algorithm & their application in data science, <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2017/07/introduction-to-genetic-algorithm/>, erişim tarihi: 18.07.2022.
- [72] Genetik Algoritma: http://kergun.baun.edu.tr/20172018Guz/YZ_Sunumlar/Genetik_Algoritmalar_Busra_Guracar.pdf, erişim tarihi: 17.07.2022.
- [73] **Chahar, V., Katoch, S., & Chauhan, S.** (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. multimedia tools and applications. *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 80, doi: 80.10.1007/s11042-020-10139-6.
- [74] **Deep, M., Mukhopadhyay, Balitanas, M., Alisherov, F., Jeon, S., & Bhattacharyya, D.** (2009). Genetic algorithm: a tutorial review. international journal of of grid and distributed computing. *International Journal of off Grid and Distributed Computing*, Vol. 2, Ekim 2009.
- [75] Genetik Algoritma: <https://becominghuman.ai/understanding-genetic-algorithms-a-use-case-in-organizational-field-2087c30fb61e>, erişim tarihi: 18.07.2022.
- [76] **A, Tanweer., Qamar, S., Dixit, A., & Benaida, M.** (2020). Genetic algorithm:reviews, implementations, and applications, *International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP)*, 2020.doi: 10.36227/techrxiv.12657173.
- [77] **Olszewski, M.** (2007). DC-DC converter for fuel cell and hybrid vehicles, *Oak Ridge National Laboratory*, 2007.
- [78] The BYD K11: https://en.byd.com/wp-content/uploads/2019/07/k11-cut-sheet_final_digital.pdf, erişim tarihi 12.12.2022.
- [79] Otobüs ömrü: <https://www.liveabout.com/buses-and-other-transit-lifetime-2798844>, erişim tarihi: 24.12.2022.



EKLER

EK A

```
function pedalpozisyon = pedalpozisyon(oncekihiz, sonrakihiiz)
if oncekihiz > sonrakihiiz %fren
    pedalpozisyon = -1;
else %ivme
    pedalpozisyon = 1;
end
end
```

EK B

```
function verim = verim(hiz,moment)
verim=ones(1,length(hiz));
for n=1:length(hiz)
if hiz(n)>=10000
    if 30<=moment(n)
        verim(n)=0.94;
    elseif moment(n)<=180 && 30>moment(n)
        verim=0.96;
    elseif moment(n)<=230 && 180>moment(n)
        verim=0.95;
    elseif moment(n)<=260 && 230>moment(n)
        verim=0.94;
    end
elseif hiz(n)>=8000 && hiz(n)<10000
    if 30<=moment(n)
        verim(n)=0.94;
    elseif moment(n)>30 && 60>=moment(n)
        verim=0.95;
    elseif moment(n)>60 && 200>=moment(n)
        verim=0.96;
    elseif moment(n)>200 && 300>=moment(n)
        verim=0.95;
    elseif moment(n)>300 && 350>=moment(n)
        verim=0.94;
    end
elseif hiz(n)>=6000 && hiz(n)<8000
    if 60>=moment(n)
        verim(n)=0.95;
    elseif moment(n)>60 && 180>=moment(n)
        verim=0.96;
    elseif moment(n)>180 && 300>=moment(n)
        verim=0.95;
    elseif moment(n)>300 && 400>=moment(n)
        verim=0.94;
    end
elseif hiz(n)>=4000 && hiz(n)<6000
    if 30>=moment(n)
        verim(n)=0.93;
    elseif moment(n)>30 && 250>=moment(n)
        verim=0.95;
    elseif moment(n)>250 && 330>=moment(n)
```

```

        verim=0.94;
    elseif moment(n)>330 && 400>=moment(n)
        verim=0.93;
    end
elseif hiz(n)>=2000 && hiz(n)<4000
    if 20>=moment(n)
        verim(n)=0.91;
    elseif moment(n)>20 && 200>=moment(n)
        verim=0.94;
    elseif moment(n)>200 && 260>=moment(n)
        verim=0.93;
    elseif moment(n)>260 && 330>=moment(n)
        verim=0.91;
    elseif moment(n)>330 && 350>=moment(n)
        verim=0.90;
    elseif moment(n)>350 && 380>=moment(n)
        verim=0.89;
    elseif moment(n)>380 && 400>=moment(n)
        verim=0.88;
    end
elseif hiz(n)>=1000 && hiz(n)<2000
    if 20>=moment(n)
        verim(n)=0.91;
    elseif moment(n)>20 && 100>=moment(n)
        verim=0.93;
    elseif moment(n)>100 && 130>=moment(n)
        verim=0.92;
    elseif moment(n)>130 && 170>=moment(n)
        verim=0.91;
    elseif moment(n)>170 && 250>=moment(n)
        verim=0.89;
    elseif moment(n)>250 && 300>=moment(n)
        verim=0.86;
    elseif moment(n)>300 && 400>=moment(n)
        verim=0.83;
    end
elseif hiz(n)>=500 && hiz(n)<1000
    if 100>=moment(n)
        verim(n)=0.90;
    elseif moment(n)>100 && 170>=moment(n)
        verim=0.87;
    end
else
    verim = 1;
end
end
end
end

```

EK C

```

function [batarya, UC] = HESS(talep_guc, SOC_Bat, SOC_UC)
batarya = 1;
UC = 1;
    if talep_guc >= 300000
        if SOC_UC >= 10 && SOC_UC <=97
            batarya = 0;
            UC = 1;
        else if SOC_Bat >= 20
            batarya = 1;
            UC = 0;
        else

```



```

        batarya = 0;
        UC = 0;
    end
end
end
if 50000 < talep_guc && talep_guc < 300000
    if SOC_Bat >= 20 && SOC_UC >= 10
        batarya = 0.5;
        UC = 0.5;
    else if SOC_Bat <= 20 && SOC_UC >= 10
        batarya = 0;
        UC = 1;
    else
        batarya = 0;
        UC = 0;
    end
end
end
if 0 < talep_guc && talep_guc <= 50000
    if SOC_Bat >= 20
        batarya = 1;
        UC = 0;
    else if SOC_UC >= 10
        batarya = 0;
        UC = 1;
    else
        batarya = 0;
        UC = 0;
    end
end
end
if talep_guc <= 0
    if SOC_UC <= 97
        batarya = 0;
        UC = 1;
    else
        batarya = 1;
        UC = 0;
    end
end
end
end

```

EK D

```

function Output = Multiobjectives3(Input)
Np_bat = Input(1);
Np_UC = Input(2);
sim('MODEL_12_05_2022.slx')
Ebats = ans.Ebats;
EUCs = ans.EUCs;
%Sabitler
Ns_bat = 236;
Ns_UC = 296;
Bat_maliyet= 302.57;
UC_maliyet= 479.43;
IUC_hucre = 2.25;
VUC_hucre = 2.7;
Ibat_hucre = 45;
Vbat_hucre = 3.4;
Bat_agirlik = 0.99;

```

```

UC_agirlik = 0.51;
Cev_maliyet = 1.125;
EUC = Np_UC*Ns_UC*IUC_hucre*VUC_hucre;
Ebat = Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre;
tgun=365;
tsefer=10;
cycle=10000;
Esefer= Ebats + EUCs ;
%Amaç Fonksiyonları
F1 = ((-1)*(Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre*cycle)/((Esefer-
EUC)*tgun*tsefer));
F2 = Bat_maliyet*Ns_bat*Np_bat+UC_maliyet*Ns_UC*Np_UC;
F3 = Bat_agirlik*Ns_bat*Np_bat+UC_agirlik*Ns_UC*Np_UC;
Output = [F1 F2 F3] ;
end

```

EKE

```

function [c,ceq] = conss3(Input)
%Değişkenler
Np_bat = Input(1);
Np_UC = Input(2);
sim('MODEL_12_05_2022.slx')
Ebats = ans.Ebats;
EUCs = ans.EUCs;
Esefer= Ebats + EUCs ;
%Sabitler
Ns_bat = 234;
Ns_UC = 296;
Vbat_hucre = 3.4;
VUC_hucre = 2.7;
Ibat_hucre = 45;
Ebat = Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre;
IUC_hucre = 2.25;
Etoplam = 500000;
tgun=365;
tsefer=10;
cycle=10000;
%Kısıtlamalar
c=Esefer-Ebat;
ceq=Etoplam-
((Vbat_hucre*Ibat_hucre*Ns_bat*Np_bat)+(VUC_hucre*IUC_hucre*Ns_UC*Np_UC));
end

```

EKF

```

function Output = Multiobjectives1(Input)
Np_bat = Input(1);
Ns_UC = Input(2);
Np_UC = Input(3);
%Sabitler
Ns_bat = 236;
Bat_maliyet=302.57;
UC_maliyet=479.43;
IUC_hucre = 2.25;
VUC_hucre = 2.7;
Ibat_hucre = 45;
Vbat_hucre = 3.4;
Bat_agirlik=0.99;
UC_agirlik=0.51;
Cev_maliyet=1.125;
EUC = Np_UC*Ns_UC*IUC_hucre*VUC_hucre;

```

```

Ebat = Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre;
tgun=365;
tsefer=10;
cycle=10000;
sim('MODEL.slx')
Ebats = ans.Ebats;
EUCs = ans.EUCs;
Esefer= Ebats + EUCs ;
%Amaç Fonksiyonları
F1 = ((-1)*(Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre*cycle))/((Esefer-
EUCs)*tgun*tsefer);
F2 = Bat_maliyet*Ns_bat*Np_bat+UC_maliyet*Ns_UC*Np_UC+EUC*Cev_maliyet;
F3 = Bat_agirlik*Ns_bat*Np_bat+UC_agirlik*Ns_UC*Np_UC;
Output = [F1 F2 F3] ;
end

```

EK G

```

function [c,ceq] = conss1(Input)
Np_bat = Input(1);
Ns_UC = Input(2);
Np_UC = Input(3);
%Sabitler
Ns_bat = 236;
Vbat_hucre = 3.4;
VUC_hucre = 2.7;
Ibat_hucre = 45;
Ebat = Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre;
IUC_hucre = 2.25;
Etoplam = 500000;
tgun=365;
tsefer=10;
cycle=10000;
sim('MODEL.slx')
Ebats = ans.Ebats;
EUCs = ans.EUCs;
Esefer= Ebats + EUCs ;
%Kısıtlamalar
c=Esefer-Ebat;
ceq=Etoplam-
((Vbat_hucre*Ibat_hucre*Ns_bat*Np_bat)+(VUC_hucre*IUC_hucre*Ns_UC*Np_UC));
end

```

EK H

```

function [c,ceq] = conss4(Input)
sim('MODEL.slx')
%Değişkenler
Ns_bat = Input(1);
Np_bat = Input(2);
Np_UC = Input(3);
Ns_bats = Ns_bat;
Np_bats = Np_bat;
Np_UCs = Np_UC;
Ebats = ans.Ebats;
EUCs = ans.EUCs;
%Sabitler
Ns_UC = 296;
Vbat_hucre = 3.4;
VUC_hucre = 2.7;
Ibat_hucre = 45;
Ebat = Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre;

```

```

IUC_hucre = 2.25;
Etoplam = 500000;
Esefer= Ebats + EUCs ;
%Kısıtlamalar
c=Esefer-Ebat;
ceq=Etoplam-
((Vbat_hucre*Ibat_hucre*Ns_bat*Np_bat)+(VUC_hucre*IUC_hucre*Ns_UC*Np_UC));
end

```

EK I

```

function Output = Multiobjectives4(Input)
sim('MODEL.slx')
%Değişkenler
Ns_bat = Input(1);
Np_bat = Input(2);
Np_UC = Input(3);
Ns_bats = Ns_bat;
Np_bats = Np_bat;
Np_UCs = Np_UC;
Ebats = ans.Ebats;
EUCs = ans.EUCs;
%Sabitler
Ns_UC = 296;
Bat_maliyet=302.57;
UC_maliyet=479.43;
IUC_hucre = 2.25;
VUC_hucre = 2.7;
Ibat_hucre = 45;
Vbat_hucre = 3.4;
Bat_agirlik=0.99;
UC_agirlik=0.51;
Cev_maliyet=1.125;
EUC = Np_UC*Ns_UC*IUC_hucre*VUC_hucre;
Ebat = Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre;
tgun=365;
tsefer=10;
cycle=10000;
Esefer= Ebats + EUCs ;
%Amaç Fonksiyonları
F1 = ((-1)*(Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre*cycle))/((Esefer-
EUC)*tgun*tsefer);
F2 = Bat_maliyet*Ns_bat*Np_bat+Ebat*Cev_maliyet+UC_maliyet*Ns_UC*Np_UC;
F3 = Bat_agirlik*Ns_bat*Np_bat+UC_agirlik*Ns_UC*Np_UC;
Output = [F1 F2 F3] ;
end

```

EK J

```

function Output = Multiobjectives2(Input)
sim('MODEL_2.slx')
Ns_bat = Input(1);
Np_bat = Input(2);
Ns_UC = Input(3);
Np_UC = Input(4);
Np_bats = Np_bat;
Ns_UCs = Ns_UC;
Np_UCs = Np_UC;
Ns_bats = Ns_bat;

Ebats = ans.Ebats;

```

```

EUCs = ans.EUCs;
%Sabitler
Bat_maliyet=302.57;
UC_maliyet=479.43;
IUC_hucre = 2.25;
VUC_hucre = 2.7;
Ibat_hucre = 45;
Vbat_hucre = 3.4;
Bat_agirlik=0.99;
UC_agirlik=0.51;
Cev_maliyet=1.125;
EUC = Np_UC*Ns_UC*IUC_hucre*VUC_hucre;
Ebat = Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre;
tgun=365;
tsefer=10;
cycle=10000;
Esefer= Ebats + EUCs ;
%Amaç Fonksiyonları
F1 = ((-1)*(Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre*cycle))/((Esefer-
EUC)*tgun*tsefer);
F2 =
Bat_maliyet*Ns_bat*Np_bat+Ebat*Cev_maliyet+UC_maliyet*Ns_UC*Np_UC+EUC*Cev_ma
liyet;
F3 = Bat_agirlik*Ns_bat*Np_bat+UC_agirlik*Ns_UC*Np_UC;
Output = [F1 F2 F3] ;
end

```

EKK

```

function [c,ceq] = conss2(Input)
sim('MODEL_2.slx')
%Değişkenler
Ns_bat = Input(1);
Np_bat = Input(2);
Ns_UC = Input(3);
Np_UC = Input(4);
Np_bats = Np_bat;
Ns_UCs = Ns_UC;
Np_UCs = Np_UC;
Ns_bats = Ns_bat;
Ebats = ans.Ebats;
EUCs = ans.EUCs;
Esefer= Ebats + EUCs ;
%Sabitler
Vbat_hucre = 3.4;
VUC_hucre = 2.7;
Ibat_hucre = 45;
Ebat = Np_bat*Ns_bat*Ibat_hucre*Vbat_hucre;
IUC_hucre = 2.25;
Etoplam = 500000;
tgun=365;
tsefer=10;
cycle=10000;
%Kısıtlamalar
c=Esefer-Ebat;
ceq=Etoplam-
((Vbat_hucre*Ibat_hucre*Ns_bat*Np_bat)+(VUC_hucre*IUC_hucre*Ns_UC*Np_UC));
end

```

EK L

Solver: **gamultiobj - Multiobjective optimization using Genetic Algorithm**

Problem

Fitness function: **@Multiobjectives3**

Number of variables: **2**

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: **[1 1]** Upper: **[14 50]**

Nonlinear constraint function: **@conss3**

Run solver and view results

☐ Use random states from previous run

Start **Pause** **Stop**

Current iteration: **100** **Clear Results**

Optimization terminated: Stop requested
Constraints are not satisfied within constraint tolerance.

Optimization running.
Warning: Discontinuities detected within algebraic loop(s), may have trouble solving
Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.

▲▼

Pareto front - function values and decision variables

Index ↕	x1	x2				
1	13,619	6,126				

EK M

Solver: **gamultiobj - Multiobjective optimization using Genetic Algorithm**

Problem

Fitness function: **@Multiobjectives1**

Number of variables: **3**

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: **[1 37 1]** Upper: **[14 296 200]**

Nonlinear constraint function: **@conss1**

Run solver and view results

☐ Use random states from previous run

Start **Pause** **Stop**

Current iteration: **100** **Clear Results**

Optimization terminated: Stop requested
Constraints are not satisfied within constraint tolerance.

Optimization running.
Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.

▲▼

Pareto front - function values and decision variables

Index ↕	x1	x2	x3			
1	13,128	153,224	9,531			

EK N

Solver: **gamultiobj - Multiobjective optimization using Genetic Algorithm**

Problem

Fitness function: **@Multiobjectives4**

Number of variables: **3**

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: **[60 1 1]** Upper: **[236 55 28]**

Nonlinear constraint function: **@conss4**

Run solver and view results

☐ Use random states from previous run

Start **Pause** **Stop**

Current iteration: **100** **Clear Results**

Optimization terminated: Stop requested
Constraints are not satisfied within constraint tolerance.

Optimization running.
Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.

▲▼

Pareto front - function values and decision variables

Index ↕	x1	x2	x3			
1	187,273	17,329	8,223			

EK O

Solver: **gamultiobj - Multiobjective optimization using Genetic Algorithm**

Problem

Fitness function: **@Multiobjectives2**

Number of variables: **4**

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: **[60 37 10 5]** Upper: **[236 296 55 200]**

Nonlinear constraint function: **@conss2**

Run solver and view results

☐ Use random states from previous run

Start **Pause** **Stop**

Current iteration: **100** **Clear Results**

Optimization terminated: Stop requested
Constraints are not satisfied within constraint tolerance.

Optimization running.
Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.

▲▼

Pareto front - function values and decision variables

Index ↕	x1	x2	x3	x4		
1	222,198	14,226	208,022	9,147		



BASIC CHARACTERIZATION OF THE EB HE CELL

CONFIDENTIAL until public release by the SuperLIB project consortium

Annex B Specifications for HE cells (fall 2011).

	EB Energy cell (current product)	Power cell (Koe 11.05.12)
Cell type (product code, cell chemistry)	EB45E LFP	EB40P LFP
Nominal discharge voltage (V) at C/5	3.2V	3.2V
Nominal capacity (Ah) at C/5	45 Ah	40 Ah
Energy density (Wh/kg)	145 Wh/kg	130 Wh/kg
Internal impedance (DQR)	< 2 mOhm	< 1 mOhm
Max allowed cell temperature during cycling	60°C (recommended below 45 °C)	60°C (recommended below 45 °C)
Min allowed cell temperature during cycling*	-20°C (recommended above 0 °C)	-25°C (recommended above 0 °C)
Cycle life**	> 3000 cycles	> 3000 cycles
Storage life**	5 years	5 years
Width	165 mm	165 mm
Height	275 mm	275 mm
Thickness	13 mm	13 mm
Weight	990 g	940-980 g
Recommended discharge C-rate/current (A)	Max. 1C / 42 A	Max. 3C / 120A
Discharge cut-off voltage (V)	2.5 V	2.0V
Recommended charge C-rate/current (A)	Max. 0.5C / 21 A	Max. 1C / 40 A
Charge cut-off voltage (V)	3.65 V	3.65 V
Depth of discharge/charge	100 %	100 %
Max. continuous discharge C-rate/current (A)	3C / 146 A	6C / 240A
Discharge cut-off voltage	2.5 V	2.0V
Max. continuous charge C-rate/current (A)	1C / 42 A	2C / 80 A
Charge cut-off voltage	3.65 V	3.65 V
Depth of discharge/charge	90 %	90 %
Max discharge peak pulse C-rate/current (A) at 10 s	4C / 168 A	15C / 600 A
Max discharge peak pulse C-rate/current (A) at 30 s	4C / 168 A	10C / 400A
Max charge peak pulse C-rate/current (A) at 10 s	2C / 84 A	3C / 120 A
Max charge peak pulse C-rate/current (A) at 30 s	2C / 84 A	3C / 120 A
Discharge cut-off voltage (V)	2.5 V	2.0 V
*On request low temperature performance can be improved, this will however have effect on high temperature performance		
** Storing and using cells in elevated temperatures will have negative effect on the life time		

The prototype cell, Koe 11.05.12 was made in the EB Varkaus factory to be tested in the project. It shows more power capabilities but still is a HE type cell. The active surface was increased with over 10% compared production 1.3 cell. 100 1.3 Production cells and 90 prototype cells were delivered for testing at VUB.

SCC Series

High Capacitance Cylindrical SuperCapacitors

RATING & PART NUMBER REFERENCE

Part Number	Diameter (mm)	Length (mm)	Rated Capacitance (F)	Capacitance Tolerance	Rated Voltage (V)	Rated Temperature (°C)	DCL Max @ 72 Hrs (μA)	ESR Max @ 1000 Hz (mΩ)	ESR Max @ DC (mΩ)	Peak Current (A)	Power Density (W/kg)	Max Energy (Wh)	Energy Density (Wh/kg)
Radial Lead													
SCCQ15B125SRB	6.3	15	1.2	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	6	240	620	0.93	1933	0.0012	1.66
SCCR20B335PRB	8	20	3.3	+100%/-0%	2.7/2.3*	65/85*	12	95	290	2.28	2080	0.0033	2.30
SCCR25B505PRB	8	25	5	+100%/-0%	2.7/2.3*	65/85*	15	85	220	3.21	2339	0.0051	2.98
SCCS20B505PRB	10	20	5	+100%/-0%	2.7/2.3*	65/85*	15	70	180	3.55	2314	0.0051	2.41
SCCS25B705PRB	10	25	7	+100%/-0%	2.7/2.3*	65/85*	20	60	150	4.61	2243	0.0071	2.73
SCCS30B126SRB	10	30	12	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	30	50	75	8.53	3812	0.0122	3.97
SCCT30B156SRB	12.5	30	15	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	50	35	80	9.20	2430	0.0152	3.38
SCCT30B186SRB	12.5	30	18	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	55	40	60	11.68	3378	0.0182	4.93
SCCT35B226SRB	12.5	35	22	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	58	34	58	13.05	2631	0.0223	3.89
SCCU25B256SRB	16	25	25	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	60	27	50	15.00	2397	0.0253	3.47
SCCU30B356SRB	16	30	35	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	70	20	40	19.69	2514	0.0354	4.07
SCCT47B406SRB	12.5	47	40	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	75	19	29	25.00	4022	0.0405	5.40
SCCV40B506SRB	18	40	50	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	75	18	20	33.75	3365	0.0506	3.89
SCCV60B107SRB	18	60	100	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	260	15	18	48.21	2430	0.1013	5.06
Solder Pin Lead													
SCCW45B107SSB	22	45	100	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	260	8	12	61.36	3391	0.1013	4.71
SCCX50B207SSB	30	50	200	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	600	6	9	96.43	2461	0.2025	5.13
SCCY62B307SSB	35	62	300	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	650	6	9	109.46	1262	0.3038	3.94
SCCY68B407SSB	35	68	400	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	1000	4	5	180.00	2046	0.4050	4.74
Snap-In													
SCCY60B407SNB	35	60	400	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	1000	4	5	180.00	2430	0.4050	5.63
Cylindrical Lug Lead													
SCCZ1EB308SCB	60	138	3000	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	5200	0.2	0.29	2165.78	6033	3.0375	6.08
Cylindrical Screw Lead													
SCCZ1EB308SWB	60	138	3000	+30%/-10%	2.7/2.3*	65/85*	5200	0.2	0.29	2165.78	6033	3.0375	6.08

*With appropriate voltage derating operating temperature can be extended to 85°C

QUALIFICATION TEST SUMMARY

Test	Test Method	Parameter	Limits
Life Cycle	Capacitors are cycled between rated voltage and half-rated voltage under constant current at +25°C for 500,000 cycles	Capacitance ESR Appearance	≤30% of spec value ≤200% of spec value No remarkable defects
High Temperature Load Life	Temperature: +65°C Voltage: Rated Voltage Test Duration: 1,000 hours	Capacitance ESR Appearance	≤30% of spec value ≤200% of spec value No remarkable defects
Storage Temperature Characteristics	Storage Duration: 2 years No Load Temperature: +35°C	Capacitance ESR Appearance	≤30% of spec value ≤200% of spec value No remarkable defects
Vibration Resistance	Amplitude: 1.5mm Frequency: 10 ~ 55Hz Direction: X, Y, Z for 2 hours each	Capacitance ESR Appearance	≤30% of spec value ≤200% of spec value No remarkable defects
Humidity	Voltage: Rated Voltage RH: 90% Temperature: +60°C Test Duration: 1,000 hours	Capacitance ESR Appearance	≤30% of spec value ≤200% of spec value No remarkable defects

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Seda Savaş

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2020'den beri Baykar Teknoloji firmasında elektronik donanım tasarım mühendisi olarak çalışmaktadır.