



# Şehir İçi Kullanımlar İçin Yüksek Verimli Elektrikli Araç Prototip Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

**Program Kodu: 2539**

**Proje No: 114E023**

Proje Yürütücüsü:

**Yrd. Doç. Dr. Selim KÖROĞLU**

Araştırmacılar:

Yrd. Doç. Dr. Selami KESLER

Yrd. Doç. Dr. Erkan ÖZTÜRK

Yrd. Doç. Dr. İsmail NAKİR

Yrd. Doç. Dr. Hakan KAHVECİ

Bursiyerler:

Mustafa TÜMBEK

Akif DEMİRÇALI

Onur BÜYÜKGÜMÜŞ

Ekim 2016

DENİZLİ



## ÖNSÖZ

Bilindiği üzere, enerji tüketiminin en yoğun olduğu sahalardan birisi de, ulaşım sektörüdür. Bu sektörde yoğun bir şekilde fosil yakıtlara dayalı enerji tüketimi söz konusudur. Son yıllarda, sektördeki fosil yakıt bağımlılığının giderilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması noktasında hibrid veya tümü elektrikli araçların geliştirilmesine yönelik faaliyetler her geçen gün artmaktadır.

Bu proje çalışmasında, tamamen elektrikle çalışan şehir içi kullanıma yönelik bir araç prototipi tasarlanmıştır. Çalışma, TÜBİTAK ve FWO tarafından yapılan ikili anlaşma kapsamında ana katılımcılar olarak Ghent Üniversitesi (Belçika) ve Pamukkale Üniversitesi (Türkiye) arasında sağlanan işbirliği ile gerçekleştirilmiştir. Her iki proje ekibinin kendine has yönleri ve konu hakkındaki birikimleriyle ticari değeri de olabilecek bir elektrikli araç konsepti geliştirmiş ve proje sonunda her iki ekip karşılıklı etkileşim ve paylaşımlarla ciddi akademik kazanımlar elde etmiştir.

114E023 nolu ve “Şehir İçi Kullanımlar İçin Yüksek Verimli Elektrikli Araç Prototipi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi” başlıklı bu proje, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ile Belçika Flaman Bölgesi Araştırma Kuruluşu (The Research Foundation-Flanders FWO) ikili işbirliği kapsamında (2539) tarafından desteklenmiştir. Projeye vermiş olduğu desteklerden ötürü TÜBİTAK ve FWO'ya teşekkürü borç biliriz. Proje çalışmaları boyunca, yüksek performans ve katkılarından dolayı araştırmacı Yrd. Doç. Dr. Selami KESLER, Yrd. Doç. Dr. Erkan ÖZTÜRK, Yrd. Doç. Dr. İsmail NAKİR, Yrd. Doç. Dr. Hakan KAHVECİ'ye, proje bursiyerlerimizden Arş. Gör. Akif DEMİRÇALI, Arş. Gör. Mustafa TÜMBEK ve Onur BÜYÜKGÜMÜŞ'e teşekkür ederim. Tez çalışmalarıyla projede yer alan lisan üstü öğrencilerimizden Erkan KARAKAŞ, Arda KILIÇ, Veli YENİL ve Nazım YILDIZ'a ve Pamukkale Üniversitesi üyelerinden emeği geçen bölüm üyeleri ve öğrencilerimize teşekkür ederim.

Ayrıca projenin Belçika ayağı yürütücüsü olan Prof. Dr. Peter SERGEANT öncülüğünde önemli katkı ve desteklerini gördüğümüz, karşılıklı ikili işbirliği ziyaretlerinde yapmış olduğumuz faydalı çalıştay ve bilimsel işbirliği nedeniyle Ghent üniversitesi ekibine proje ekibim adına şükranlarımı sunarım.



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ .....	x
SİMGE LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Projenin Amacı.....	1
1.2 Literatür Özeti.....	2
2. BATARYA, BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ VE ULTRAKAPASİTOR .....	11
2.1 Batarya.....	11
2.2 Batarya Yönetim Sistemi Tasarım ve İmalatı .....	13
2.2.1 BMS Mini Modül Tasarımı .....	13
2.2.1.1 BMS Mini Modül Üretimi.....	15
2.2.1.2 BMS Mini Modül Test ve Montaj.....	16
2.2.2 BMS Ana Modül Tasarımı .....	16
2.2.2.1 BMS Ana Modül Üretimi .....	19
2.2.2.2 BMS Ana Modül Test İşlemleri ve Ekran Görüntüleme .....	20
2.3 Ultrakapasitör .....	22
2.3.1 Ultrakapasitör Yüksek Gerilim Koruma Devresi .....	25
2.3.2 İmal Edilen Ultrakapasitör Modülü .....	25
3. MAKSİMUM GÜÇ TAKİP SİSTEMİ VE FOTOVOLTAİK MODÜLLER .....	27
3.1 Maksimum Güç Takip Sistemi .....	27
3.2 Fotovoltaik Paneller (PV).....	34
4. ŞARJ ÜNİTESİ TASARIMI .....	36
4.1 Dahili Şarj Sistemi .....	36
4.2 Dahili Şarj Sistemi Devre Tasarımı:.....	37
4.2.1 Dönüştürücü.....	37
4.2.2 Trafo tasarımı.....	38
4.2.3 Çıkış Doğrultucusu ve Filtre .....	39
4.2.4 Güç Devresi Tasarımı .....	40
4.2.5 Kontrol Entegre Devresi ve Güç Kaynağı .....	41



4.2.6	Akım ve Gerilim Geri Besleme Devresi .....	42
4.2.7	Giriş Doğrultucusu, Filtresi ve Kondansatör Şarj Devresi .....	43
4.3	Simülasyon Çalışmaları.....	43
4.4	Baskı Devre Çalışmaları.....	45
4.5	Üretim Çalışmaları .....	45
5.	MOTOR SEÇİMİ, GÜÇ ELEKTRONİĞİ VE KONTROL DEVRELERİ .....	47
5.1	ALATAY-EV’de Kullanılan Motorlar .....	47
5.2	Evirici (invertör) Tasarım ve İmalatı .....	48
5.3	Ultrakapasitör-Batarya Bağlantı Konvertörü .....	54
5.3.1	Kritik Devre Elemanların Belirlenmesi ve Özel Tasarımı Yapılan Elemanlar ....	55
5.3.2	Tam Köprü DC-DC Konvertör Devre Fonksiyonları .....	59
5.3.3	DC-DC Konvertör Testleri .....	62
5.4	Araç Motorlarının Doğrudan Moment Kontrolü .....	64
5.4.1	Fırçasız DC Motorun Matematiksel Modeli .....	64
5.4.2	BLDC Motorun İki Faz İletimde Doğrudan Moment Kontrolü .....	70
5.4.2.1	Elektromanyetik Moment Hesabı.....	71
5.4.2.2	Anahtarlama Tablosundan Uygun Gerilim Vektörü Seçimi .....	72
5.4.2.3	İki Faz İletimde BLDC Motorun Doğrudan Moment Kontrolünün Benzetimi 74	
5.4.3	BLDC Motorun Üç Faz İletimde Doğrudan Moment Kontrolü.....	78
5.4.3.1	Faz-Faz Arası Clarke ve Park Dönüşümleri.....	78
5.4.3.2	Elektromanyetik Moment Hesabı.....	79
5.4.3.3	Stator Akısı Kontrolü .....	80
5.4.3.4	Alçak Geçiren Filtre Kullanarak Stator Akısının Tahmini.....	81
5.4.3.5	Akı Dönüşünün Kontrolü ve Gerilim Vektörü Seçimi.....	84
5.4.3.6	Rotor Konumunun Tahmini .....	84
5.4.3.7	Üç Faz İletim Modunda BLDCM-DTC Çalışma Benzetimi .....	85
5.4.4	Doğrudan Moment Kontrolünde Uygulama Sonuçları.....	89
5.5	Araç Dinamikleri ve Elektronik Diferansiyel .....	89
5.6	Enerji Geri Kazanımlı-Rejeneratif Çalışma .....	94
5.6.1	Enerji Geri Kazanımında Ultrakapasitör Davranışı .....	98
5.7	Motorların Yüklenme Testleri.....	100
6.	ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ .....	105
6.1	Enerji Yönetim Sistemine Genel Bir Bakış.....	105



6.2	Enerji Yönetim Sisteminin Oluşturulması.....	107
6.3	Enerji Yönetim Sisteminin Modellenmesi.....	109
6.4	Benzetim Sonuçları ve Değerlendirmeler .....	114
6.5	Sonuçlar.....	118
7.	ELEKTRİKLİ ARAÇ PROTOTİP SİSTEM TASARIMI .....	120
7.1	Şase Tipi Seçimi .....	120
7.2	Araç Güç Tahmini .....	120
7.3	Devrilme Analizi .....	121
7.4	Şase tasarımı ve gerilme analizi.....	122
7.5	Tasarlanan Şasenin İmal Edilmesi .....	125
7.6	Askı Donanım Sistemlerinin Tasarımı .....	125
7.7	Direksiyon Sistemi ve Ön Düzen Ayarları .....	127
7.8	Fren Sistemi.....	128
7.9	Kabuk Tasarımı ve İmalatı.....	130
7.10	Araç Aerodinamik Analizi .....	132
7.11	Maliyet Analizi .....	133
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER .....	135
	KAYNAKLAR .....	144
	EKLER .....	151
	Ek 1 Proje deney düzeneği .....	152
	Ek 2 Proje çalışması kapsamında tamamlanan lisansüstü tezlerin listesi.....	153
	Ek 3 Proje çalışmalarından üretilen yayınların listesi .....	154
	Ek 4 ALATAY-EV isimli aracın teknik özellikleri.....	155
	Ek 5 ALATAY-EV elektrik bağlantı şeması.....	156
	Ek 6 ALATAY-EV yerleşim düzeni .....	157
	Ek 7 ALATAY-EV'ye Tübitak tarafından birincilik ödülü.....	158
	Ek 8 Basında biz.....	159



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 LiFePO <sub>4</sub> batarya hücrelerine ait örnek bir resim .....	11
Şekil 2.2 LiFePO <sub>4</sub> batarya için batarya açık devre gerilimi-batarya SOC ilişkisi. ....	12
Şekil 2.3 Sıcaklık düzeltme terimi- $\Delta E(T)$ .....	13
Şekil 2.4 BMS mini modül devre şemaları; a) mikro denetleyici, b) gerilim regülatörü, c) RGB led, d) seri haberleşme giriş, e) seri haberleşme çıkış, g)sıcaklık sensörü-1, f) sıcaklık sensörü-2, i) hücre balans işlemi-1, h) hücre balans işlemi-2, j) gerilim okuma-1, k) gerilim okuma -2.....	13
Şekil 2.5 Tasarımı gerçekleştirilen; a) PCB çizimleri, b) PCB imalatı, c) BMS mini modül.....	15
Şekil 2.6 Batarya üzerine gerileştirme işlemi tamamlanan mini modüllere ait resim.....	16
Şekil 2.7 Tasarlanan BMS ana modüldeki devre şemaları.....	17
Şekil 2.8 BMS ana modül baskı devre çizimi a) ön yüz, b) arka yüz .....	19
Şekil 2.9 BMS ana modül PCB kartı .....	19
Şekil 2.10 Gerçekleştirilen BMS ana modüllü a)ön yüz, b) arka yüz .....	20
Şekil 2.11 BMS modülü setup ekranı.....	20
Şekil 2.12 BMS ana modül görüntüleme ekranları .....	21
Şekil 2.13Tasım ve imalatı tamamlanmış batarya sistemi .....	21
Şekil 2.14 BCAP0650 ultrakapasitör hücresine ait örnek bir resim. ....	22
Şekil 2.15 Ultrakapasitör eşdeğer devresi.....	23
Şekil 2.16 BCAP650P ultrakapasitörler için sıcaklığa bağlı göreceli ESR grafiği. ....	24
Şekil 2.17 Ultrakapasitör hücrelerini aşırı gerilimlerden korumak için tasarlanan devre şeması .....	25
Şekil 2.18 Ultrakapasitör hücrelerini aşırı gerilimlerden korumak için geliştirilen devre ve ultrakapasitör üzerindeki montajlanmış durumu.....	26
Şekil 2.19 Ultrakapasitör hücrelerini montajlı hali ve koruma kutusu.....	26
Şekil 3.1 MGTS algoritmasının akış şeması .....	28
Şekil 3.2 MGTS algoritmasının MATLAB/Stateflow'da hazırlanmış akış şeması.....	29
Şekil 3.3 MGTS kontrol diyagramı .....	30
Şekil 3.4 Prototip MGTS devresi.....	31
Şekil 3.5 MGTS bağlı panele ait akım ve gerilim grafikleri .....	31
Şekil 3.6 İkincil MGTS'nin devre şeması.....	32
Şekil 3.7 İkincil MGTS'nin fotoğrafı .....	33
Şekil 3.8 Sistemin beslenmesi için oluşturulan güç kaynağı .....	33
Şekil 3.9 Aracın tavanına yerleştirilecek olan a) PV'nin boyutları ve b) oluşturulan PV .....	34
Şekil 3.10 PV+MGTS benzetimine ait MATLAB/Simulink'te oluşturulan blok şema .....	35
Şekil 4.1 Mean Well PB360 serisi batarya şarj cihazı .....	36
Şekil 4.2 Tasarlanan dahili şarj devresi ana blok şeması.....	37
Şekil 4.3 Tasarlanan trafo sarım şeması .....	38
Şekil 4.4 Üretimi tamamlanmış trafo .....	39
Şekil 4.5 Çıkış doğrultucusu ve filtre.....	39
Şekil 4.6 Çıkış filtre bobini .....	40
Şekil 4.7 Güç ve mosfet sürücü devresi.....	40
Şekil 4.8 Kontrol entegre devresi ve güç kaynağı .....	41
Şekil 4.9 Akım ve gerilim geri besleme devresi.....	42
Şekil 4.10 Giriş doğrultucusu, filtre ve kondansatör şarj devresi .....	43
Şekil 4.11 Sırasıyla Mosfet'in birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü koladaki kontrol sinyalleri.44	
Şekil 4.12 Simülasyonu yapılan dönüştürücü devresine ait a) çıkış gerilimi b) çıkış akımı ....	44
Şekil 4.13 Simülasyonu yapılan dönüştürücü devresine ait a) giriş akımı, b) gerilimi, c) çıkış akımı, d) çıkış gerilimi dalga formları .....	45
Şekil 4.14 Şarj ünitesi baskı devre çizimi.....	45
Şekil 4.15 Uygulama devresi gerçekleştirilen şarj devresi ana kartının a) baskı devre üstten görünümü b) baskı devre alttan görünümü .....	46
Şekil 4.16 Uygulama devresi şarj cihazının kutu içerisindeki nihai hali .....	46

Şekil 5.1 Dıştan rotorlu BLDC senkron motor.....	48
Şekil 5.2 Üç faz invertör genel şeması.....	49
Şekil 5.3 IPM Blok.....	49
Şekil 5.4 DC/DC Dönüştürücü (12-15V).....	50
Şekil 5.5 Sürücüye ait ölü zaman ve alarm kontrol devresi.....	50
Şekil 5.6 Buck Dönüştürücü Devresi (5V).....	51
Şekil 5.7 Invertör devresinde kullanılan a) Akım sensörü LEM LA-55P b) gerilim sensörü AMC1200.....	51
Şekil 5.8 İşlemcinin (STM32F407VGT6) devre üzerinde yerleşimi.....	52
Şekil 5.9 Elektrikli araç ALATAY-EV için tasarlanan sürücünün farklı perspektiflerden resimleri.....	53
Şekil 5.10 Ultrakapasitörden batarya bağlantısı sağlayan DC-DC konvertör prensip şeması.....	55
Şekil 5.11 PWM Kontrolcü bağlantı yapısı şematığı.....	57
Şekil 5.12 DC-DC konvertörün otomatik kontrolünü sağlayan LM5045 devre yapısı.....	58
Şekil 5.13 Tip-2 PI kontrolcü yapısı.....	59
Şekil 5.14 Kontrolsüz sistemin açık çevrim frekans cevabı.....	60
Şekil 5.15 Sistemin açık ve kapalı çevrim frekans cevapları (kırmızı: açık çevrim, yeşil: kompanze edilmiş sistemin açık çevrim cevabı, mavi: Tip-2 kontrolcü frekans cevabı).....	60
Şekil 5.16 Tam Köprü DC-DC Konverterin son durumu.....	61
Şekil 5.17 Batarya bağlantı konvertörünün farklı yük ve farklı giriş gerilim seviyelerinde test sonuçları (Mavi: Konvertörün çıkış gerilimi, Turuncu: Konvertör yük akımı).....	63
Şekil 5.18 BLDC sürücüsü ve eşdeğer devresi.....	64
Şekil 5.19 BLDC sürücüsü ve motor indirgenmiş eşdeğer devresi.....	65
Şekil 5.20 Motorun bir fazında endüklenen gerilim dalga formu.....	66
Şekil 5.21 a) SMSM için anahtarlama vektörleri b) BLDCM için anahtarlama vektörleri.....	70
Şekil 5.22 Gerilim vektörleri konumları.....	73
Şekil 5.23 Hız sensörsüz iki faz iletim modunda BLDCM-DTC blok diyagramı.....	74
Şekil 5.24 Hız sensörlü iki faz iletim modunda BLDCM-DTC blok diyagramı.....	74
Şekil 5.25 İki faz iletim modunda BLDCM-DTC Matlab/Simulink benzetimi.....	75
Şekil 5.26 Alfa-beta eksenli stator akı yörüngesi.....	76
Şekil 5.27 Motorun hız cevabı.....	76
Şekil 5.28 Motorun moment cevabı.....	76
Şekil 5.29 Alfa-beta eksenli stator akı yörüngesi.....	77
Şekil 5.30 Motor faz akımı.....	77
Şekil 5.31 Sektörel olarak rotor konum değişimi.....	77
Şekil 5.32 Gelişmiş stator akı tahmin edici blok şeması.....	82
Şekil 5.33 Kompanze edilmiş ve kompanze edilmemiş stator akıları.....	83
Şekil 5.34 Üç faz iletim modunda BLDCM-DTC çalışmasına ilişkin blok diyagram.....	85
Şekil 5.35 Üç faz iletim modunda BLDCM-DTC benzetimi için simulink blok diyagramı.....	86
Şekil 5.36 Stator akısı yörüngesi.....	87
Şekil 5.37 Motor hız cevabı.....	87
Şekil 5.38 Motor moment cevabı ( $T_{ref}=1.0N.m$ $T_y=0.5N.m$ ).....	87
Şekil 5.39 Motor faz akımı.....	88
Şekil 5.40 Stator d-eksenli akım bileşeni.....	88
Şekil 5.41 Alfa-beta ekseninde stator akıları.....	88
Şekil 5.42 İki faz iletim modunda BLDCM-DTC için motor faz akımı.....	89
Şekil 5.43 Üç faz iletim modunda BLDCM-DTC için motor faz akımı.....	89
Şekil 5.44 Elektrikli araç için sürüş kontrol sistemi genel yapısı.....	90
Şekil 5.45 Çift motor ve çift invertörlü elektronik diferansiyel uygulaması blok şeması (Hartani vd. 2009).....	91
Şekil 5.46 Klasik Ackerman model tanımı.....	92
Şekil 5.47 Klasik Ackerman modeline göre farklı tekerler için referans hızların elde edilmesi.....	92
Şekil 5.48 Elektronik diferansiyel uygulaması için Matlab/Simulink benzetim alt modeli.....	93



Şekil 5.49 Elektronik diferansiyel Matlab/Simulink benzetim modelinde sağ-sol teker hızı ...	93
Şekil 5.50 Direksiyon açısı sensörü ve çıkış karakteristiği .....	94
Şekil 5.51 Rejeneratif çalışmada sürücü invertörlerin boost konverter olarak çalıştırılması ...	95
Şekil 5.52 Motor sürücülerinin regeneratif fren modunda boost konverter olarak çalıştırılmasına yönelik akım, gerilim ve anahtar kapı işaretleri dalga formu .....	95
Şekil 5.53 Önerilen boost çalışma modunda bir inverter için Simulink benzetim modeli .....	96
Şekil 5.54 Rejeneratif çalışmada PWM duty oranına ve motor hızına göre gerilim ayarı (benzetim sonucu) .....	97
Şekil 5.55 Motor devrine göre inverterden alınan gerilim seviyesi (deneysel sonuç) .....	97
Şekil 5.56 Değişken motor devrine göre ultrakapasitörün 80 V gerilim seviyesine şarj edilmesi için duty kontrol oranının değişimi (deneysel sonuç) .....	98
Şekil 5.57 Rejeneratif çalışma modunda ultrakapasitörün startup şarjı (mavi: UK gerilimi, turuncu: inverter çıkış gerilimi, motor devri 2000 rpm) .....	99
Şekil 5.58 Rejeneratif çalışma modunda ultrakapasitörün 65 V şarj seviyesine setlenmesi (mavi: UK gerilimi, turuncu: inverter çıkış gerilimi, motor devri 1000 rpm) .....	99
Şekil 5.59 Ultrakapasitörün sıfır gerilim seviyesinden başlayarak değişken motor devrine göre şarj edilmesi .....	100
Şekil 5.60 Motor yükleme deney seti .....	101
Şekil 5.61 Elektrikli araç sürüş sisteminin verim ve yüklenme test şeması .....	101
Şekil 5.62 Elektrikli aracın hareket sisteminin mekanik olarak boşta çalıştırılması .....	102
Şekil 5.63 Motor sürücü invertörlerinin sistem çıkış gücüne göre verim değişimi .....	102
Şekil 5.64 Motor veriminin devrine göre verim değişimi .....	103
Şekil 5.65 Sistem yüklenmesine göre motor verim değişimi .....	103
Şekil 5.66 Araç hareket sisteminin çıkış gücüne göre toplam verim değişimi .....	104
Şekil 6.1 Elektrikli araçlarda kullanılan güç yönetim yöntemlerinin gruplandırılması .....	106
Şekil 6.2 Elektrikli araç enerji yönetim sistemi prensip şeması .....	107
Şekil 6.3 Genel güç paylaşım şeması .....	109
Şekil 6.4 Modifiye edilmiş NEDC hız profili .....	110
Şekil 6.5 Tasarlanan aracın modifiye edilmiş sürüş profilindeki anlık güç ihtiyacı değişimi grafiği .....	111
Şekil 6.6 Tasarlanan aracın modifiye edilmiş sürüş profilindeki anlık tork ihtiyacı .....	112
Şekil 6.7 Batarya için hesaplanan verimlilik haritaları a) -20 °C, b) 20 °C .....	114
Şekil 6.8 Ultrakapasitör için hesaplanan verimlilik haritaları a) -20 °C, b) 20 °C .....	114
Şekil 6.9 Motor ve 1/6.94 oranındaki vites kutusunun verimlilik haritası a) -20 °C ortam sıcaklığı, b) 20 °C ortam sıcaklığı. (Şekilde belirtilen hız ve torklar motor şaftındaki değerlerdir.) .....	115
Şekil 6.10 İnvvertörün hesaplanan verimlilik haritası a) -20 °C, b) 20 °C .....	116
Şekil 6.11 ECE-15 sürüş profili boyunca aracın toplam ve bileşenlerin ayrı ayrı kayıpları a) -20 °C, b) 20 °C .....	116
Şekil 6.12 ECE-15 sürüş profilinde oluşan toplam kayıplar .....	117
Şekil 6.13 Batarya ve Ultrakapasitörün SOC değerleri a)-20 °C, b) 20 °C .....	117
Şekil 6.14 Sıcaklığa bağlı ortalama kayıplar .....	117
Şekil 7.1 Taşıt üzerine etki eden kuvvetler .....	121
Şekil 7.2 Ağırlık merkezi ve devrilme analizi .....	122
Şekil 7.3 Ana şase ve ana boyutlar .....	123
Şekil 7.4 Ana şasenin statik gerilme analiz sonuçları .....	123
Şekil 7.5 Ana şasenin 2,5 emniyet katsayılı statik gerilme analiz sonuçları .....	124
Şekil 7.6 Ana şasenin 2,5 emniyet katsayılı burulma analizi sonuçları .....	124
Şekil 7.7 Gerçekleştirilen şasi imalatı .....	125
Şekil 7.8 Askı sisteminde kullanılan parçalarının statik analiz sonuçları .....	126
Şekil 7.9 Tasarım ve imalat sonrası askı sistemi .....	126
Şekil 7.10 Ön düzen geometrisine ait boyutlandırılmalar .....	127
Şekil 7.11 Direksiyon sistemine ait ana boyutlar ve Akerman açısı .....	128
Şekil 7.12 Ön ile arka askı donanım ve direksiyon sistemi .....	128





Şekil 7.13 Ön ve arka tekerlere etki eden statik yükler.....	129
Şekil 7.14 İmalatı gerçekleştirilen araç prototipi. ....	129
Şekil 7.15 Kabuk tasarımı çalışması.....	130
Şekil 7.16 Cam elyaf kabuk kalıbı imalat aşamaları.....	131
Şekil 7.17 İmal edilen kalıp ve cam elyaf kabuk.....	131
Şekil 7.18 Boyama işleminden sonraki prototip aracın görünümü.....	132
Şekil 7.19 Aerodinamik analizden elde edilen sonuçlar .....	133
Şekil 7.20 Prototip imalatı gerçekleştirilmiş ALATAY-EV isimli aracın son hali.....	134



## TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Projede kullanılan WN36AH LiFePO4 bataryanın bazı teknik özellikleri.....	11
Tablo 2.2 Projede kullanılan BCAP0650 ultrakapasitörüne ait bazı teknik özellikleri.....	22
Tablo 4.1 Dahili şarj sistemi tasarımına ait teknik tasarım özellikleri .....	38
Tablo 5.1 Projede kullanılan dış rotorlu BLDC senkron motor etiket değerleri .....	48
Tablo 5.2 İki faz iletim modunda gerilim anahtarlama vektörleri .....	72
Tablo 5.3 Üç faz iletim modunda anahtarlama vektör tablosu .....	84
Tablo 5.4 Açık sensörünün teknik özellikleri .....	94
Tablo 6.1 Araca ilişkin benzetim çalışmalarında kullanılan parametre ve eşik değerler .....	113
Tablo 6.2 Farklı sıcaklıklardaki ortalama güç kayıpları.....	118
Tablo 6.3 Farklı sıcaklık değerleri için gerekli enerji ve toplam verimlilik değerleri. ....	118
Tablo 7.1 Prototip aracın tahmini boyut aralıkları.....	121
Tablo 7.2 Prototip aracın boyutları.....	132
Tablo 7.3 Araç prototipinin imalatında kullanılan malzeme ve yapılan işlemlere ait yaklaşık maliyet.....	134



## KISALTMA LİSTESİ

<b>AC</b>	Alternatif Akım
<b>ADC</b>	Analog dijital çevirici
<b>BLDC</b>	Fırçasız doğru akım motoru
<b>BMS</b>	Batarya yönetim sistemi
<b>DC</b>	Doğru akım
<b>DSP</b>	Sayısal işaret işleyici
<b>DTC</b>	Doğrudan moment kontrol
<b>EMK</b>	Elektromotor Kuvvet
<b>EMI</b>	Elektromanyetik girişim
<b>EMS</b>	Enerji yönetim sistemi
<b>EMU</b>	Elektromanyetik uyumluluk
<b>EV</b>	Elektrikli araç
<b>FWO</b>	The Research Foundation-Flanders
<b>IC</b>	Kademeli iletkenlik
<b>IGBT</b>	İzole Kapılı Bipolar Transistör
<b>IPM</b>	Akıllı güç modülü
<b>LP</b>	Alçak Geçiren Filtre
<b>MGTS</b>	Maksimum güç takip sistemi
<b>NEDC</b>	Yeni Avrupa sürüş profili
<b>PMSM</b>	Sabit mıknatıslı senkron motor
<b>PI</b>	Oransal-İntegral
<b>PV</b>	Fotovoltaik panel
<b>PWM</b>	Darbe genişlik modülasyonu
<b>SOC</b>	Şarj doluluk oranı
<b>SMSM</b>	Sabit Mıknatıslı Senkron Motor
<b>SVPWM</b>	Uzay Vektör PWM
<b>TUBİTAK</b>	Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu
<b>UC</b>	Ultrakapasitör
<b>VSI</b>	Gerilim Beslemeli Evirici



## SİMGE LİSTESİ

$i_a, i_b, i_c$	Stator faz akımları (A)
$V_a, V_b, V_c$	Stator faz gerilimleri (V)
$E_a, E_b, E_c$	Faz-nötr arası endüklenen gerilimler (V)
$R_a, R_b, R_c$	Stator faz dirençleri ( $\Omega$ )
$R$	Stator faz direnci ( $\Omega$ )
$V_{dc}$	DC bara gerilimi (V)
$k_e$	Endüklenen gerilim katsayısı
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	$\alpha\beta$ düzleminde stator akımları (A)
$i_{sD}, i_{sQ}$	$\alpha\beta$ düzleminde stator akımları (A)
$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$	$\alpha\beta$ düzleminde stator gerilimleri (V)
$\varphi_{s\alpha}, \varphi_{s\beta}$	$\alpha\beta$ düzleminde stator akıları (Wb)
$\varphi_{r\alpha}, \varphi_{r\beta}$	$\alpha\beta$ düzleminde rotor akıları (Wb)
$i_{sd}, i_{sq}$	Rotor referans düzleminde (dq) stator akımları (A)
$L_{ds}, L_{qs}$	Rotor referans düzleminde (dq) stator endüktansları (H)
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Rotor referans düzleminde (dq) stator akıları (Wb)
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Rotor referans düzleminde (dq) rotor akıları (Wb)
$k_d, k_q$	Rotor referans düzleminde (dq) zıt emk sabiti
$\varphi_M$	Rotor manyetik akısı (Wb)
$\varphi_s$	Stator manyetik akısı (Wb)
$T_e^*$	Elektromanyetik moment (N.m)
$T_e$	Referans Moment (N.m)
$T_L$	Yük momenti (N.m)
$T_s$	Örnekleme periyodu
$V_k$	Aktif gerilim vektörü
$V_0, V_7$	Sıfır gerilim vektörleri
$w_{re}, w_{rm}$	Elektriksel ve mekanik açısal hız (rad/s)
$\theta_m$	Rotor mekanik açısı (rad)
$\theta_e$	Rotor elektriksel açısı (rad)
$\theta_s$	Stator Akısı Uzay Vektörünün Açısı (rad)
$B_m$	Sürtünme katsayısı (Nm/rad/s)
$J$	Eylemsizlik momenti ( $\text{kgm}^2$ )
$P$	Çift kutup sayısı
$\delta$	Yük açısı
$\Delta\Psi_s$	Stator akısı hatası
$\Delta T_e$	Moment hatası
VOC	Batarya açık devre gerilimini (V)
Zeq	Batarya eşdeğer iç empedansını (ohm)
$\Delta E(T)$	Sıcaklığa bağlı batarya potansiyeli düzeltme katsayısı ( $C^0$ )
Vbat	Batarya gerilimi (V)
ESR	Eşdeğer seri direnç (ohm)
TCF	Sıcaklık düzeltme katsayısı
T	Sıcaklık ( $C^0$ )
$V_o$	Çıkış gerilimi (V)
D	Doluluk-boşuk oranı (Duty Cycle)
$L_o$	Çıkış endüktans değeri (H)
$C_o$	Çıkış kapasite (F)
R	Çıkış yükü (ohm)



## ÖZET

### Şehir İçi Kullanımlar İçin Yüksek Verimli Elektrikli Araç Prototipi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

Enerji tüketiminin en yoğun olduğu sahalardan birisi olan ulaşım sektöründe yoğun bir şekilde fosil yakıt tüketimi söz konusudur. Son yıllarda, sektördeki fosil yakıt bağımlılığının giderilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması noktasında elektrikli araçlar konusundaki gelişmeler önemli bir ivme kazanmıştır. Bu amaca yönelik olarak batarya beslemeli (tamamen elektrikli) veya hibrid araçlar kullanılmaktadır.

Bu projede fosil yakıt tüketimi olmayan, enerji depolama birimi olarak batarya ve ultrakapasitörlerin kullanıldığı, fotovoltaik panel vasıtasıyla da yenilenebilir enerjiyi kullanılabilir hale getiren, bir elektrikli araç geliştirilmiştir. Çalışma, TÜBİTAK ve FWO tarafından yapılan ikili anlaşma kapsamında ana katılımcılar olarak Ghent Üniversitesi (Belçika) ve Pamukkale Üniversitesi (Türkiye) arasında sağlanan işbirliği ile gerçekleştirilmiştir.

Projede, tamamen elektrikle çalışan şehir içi kullanıma yönelik bir araç prototipi tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. İlk olarak aracın boyutlandırılması (toplam uzunluk, genişlik, yükseklik vb.), toplam ağırlığı, maksimum hızı, sınıfı (şehir ve banliyö), tekerlek sayısı ve gücüne ilişkin teknik bilgiler belirlenmiştir. Sonrasında belirlenen özelliklere göre şasi-gövde tasarım ve analizleri yapılmış, ihtiyaç duyulan güç ve tork değerlerine sahip uygun motorlar seçilmiştir. Seçilen motora ait ihtiyaç duyulan güç elektroniği evirici/çeviricileri, motor kontrol sistemleri ve elektronik diferansiyel uygulaması araç için belirlenen teknik özelliklere göre tasarlanmıştır. Aynı süreçte aracın istenilen menzile sahip olması için ihtiyaç duyulan batarya, ultrakapasitör ve fotovoltaik panel boyutlandırmaları gerçekleştirilmiştir. Bu noktadan hareketle dahili şarj sistemi, batarya yönetim sistemi, ultrakapasitör koruma ve deşarj üniteleri ve güneş paneli için güç elektroniği düzenekleri geliştirilmiştir. Son olarak; motor, güneş paneli, batarya sistemi ve ultrakapasitör ünitesi arasındaki yük akışını düzenleyen bir kontrol sistemi tasarlanmıştır.

Projenin sonunda, tüm sistem Alalay-EV ismi verilen prototip araç üzerinde birleştirilmiş ve test edilmiştir. Alalay-EV, 2016 yılında 12. si düzenlenen TÜBİTAK Alternatif Enerjili Elektrikli Araç Yarışması'nda 'Yerli Ürün Teşvik' kategorisinde araçtaki altı yerli ürün bileşenin beşinin yerli olması nedeniyle birincilik elde etmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli araç, batarya yönetim sistemi, enerji yönetimi, güç elektroniği, motor sürücü tasarımı



## ABSTRACT

### A Prototype Design and Implementation of City Type Electric Vehicle With High Efficiency

In the transportation sector there is intense fossil fuel consumption, where the energy consumption cost much. In recent years, improvements made in the development of electric vehicles have been accelerated to reduce the dependence to fossil fuels in the industry and reduce carbon emissions. For this purpose, battery-powered (fully electric) or hybrid vehicles are used.

In this project, an electric vehicle has been developed that has no fossil fuel consumption and uses batteries and ultracapacitors as energy storage units, and renewable energy through photovoltaic panels. The study has been implemented by the collaboration of main participants, University of Ghent (Belgium) and Pamukkale University (Turkey), according to agreement signed between TÜBİTAK and FWO.

In the project, a fully electric vehicle prototype was designed and realized for the urban use. First, technical information about the dimensioning of the vehicle (total length, width, height, etc.), total weight, maximum speed, class (city and suburbs), number of wheels and power are determined. Subsequently, chassis-body design and analysis were performed according to the specified characteristics, and appropriate motors with required power and torque values were selected. The required power electronic inverter/converter, motor control systems and electronic differential application is designed according to the technical specifications for the selected motors. In the same period, battery, ultracapacitor and photovoltaic panel dimensions required for the vehicle to have desired range have been realized. From this point, embedded charging system, battery management system, ultracapacitor protection and discharge units and power electronic devices for photovoltaic panel have been developed. Finally, a control system was designed to regulate the flow of power between the motor, solar panel, and battery system and ultracapacitor unit.

At the end of the project, the entire system was assembled and tested on the prototype vehicle named as Alalay-EV. Alalay-EV won the first prize in the "Domestic Product Award" category in TÜBİTAK Alternative Energy Electric Vehicle Competition organized for 12th time in the year of 2016 because five of the six domestic product components are domestic.

**Keywords:** Electric vehicle, battery management system, energy management, power electronic, inverter design



## 1. GİRİŞ

Günümüzde fosil yakıt kaynaklarının azalması, enerji talebinin artması ve küresel ısınma gibi çevresel faktörlerin de etkisiyle alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır. Aynı zamanda var olan enerji kaynaklarının en verimli şekilde kullanılması da daha önemli hale gelmiştir. Bilindiği üzere, enerji tüketiminin en yoğun olduğu sahalardan birisi de ulaşım sektörüdür. Bu sektörde yoğun şekilde fosil yakıtlara dayalı enerji tüketimi söz konusudur.

Ülkemizde konvansiyonel araç üretimi konusunda kaçırılan fırsatın elektrikli araçlarda yaşanmaması için konuya oldukça yoğun bir ilgi vardır. Hatta ülkemizin öncelikli alanları içerisine yer almakta ve ilgili kurumlar tarafından birçok proje ve araştırma desteği verilmektedir. Bu anlamda, Pamukkale Üniversitesi öncülüğünde oluşturulan proje ekibi TÜBİTAK tarafından desteklenen “Şehir içi kullanımlar için yüksek verimli elektrikli araç prototipi tasarımı ve gerçekleştirilmesi” projesi ile alana dahil olmuştur. Gerçekleştirilen projede, tamamen elektrikle çalışan şehiriçi kullanıma yönelik bir araç prototipi tasarlanmıştır. Proje, TÜBİTAK ve FWO tarafından yapılan ikili anlaşma kapsamında ana katılımcılar olarak Pamukkale Üniversitesi (Türkiye) ve Ghent Üniversitesi (Belçika) işbirliğiyle gerçekleştirilmiştir.

### 1.1 Projenin Amacı

Proje kapsamında, şehir içi ulaşımaya yönelik yüksek verimli elektrikli araç tasarımının verimli bir şekilde gerçekleşmesi hedeflenmiştir. Araçta ana enerji kaynağı olarak batarya kullanılmaktadır. Kalkış ve ani hızlanmalarda motorların güç talebi artmaktadır. Bu ani güç talebinin karşılanması ve frenleme sırasında oluşacak enerji üretimlerinin hızlı bir şekilde geri kazanılması için ultrakapasitörler kullanılmaktadır. İlave olarak, araç üzerine fotovoltaik panel yerleştirilmek suretiyle yenilenebilir ek bir enerji kaynağından faydalanılmaktadır.

Bu noktada projenin amacı ve hedefleri aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir;

- Ulusal ve Uluslararası işbirliği geliştirmek.
- Şehir içi ulaşımaya yönelik içerisinde fosil yakıt tüketmeyen bir elektrikli araç prototipinin gerçekleştirilmeyişle, sıfır/sıfıra yakın emisyonlu (özellikle yoğun şehir içi trafiği dikkate alındığında) şehir içi kullanıma uygun çevre dostu araç konseptinin oluşturmak.
- Aracın enerji ihtiyacını optimum bir şekilde karşılayabilmek için, batarya ve ultrakapasitör üniteleri hibrid bir yapıda çalıştırmak. Özellikle, frenleme ve rejeneratif modda generator özelliği gösteren motorun üreteceği enerji, kullanılacak anahtarlama





düzeneği, güç seviye takip sistemi ve optimum güç yönetim algoritması yardımıyla hızlı deşarj özeliğine sahip ultrakapasitör elemanına aktarmak ve böylece atıl durumdaki enerji geri kazanılarak sistem verimini artırmak.

- Ayrıca araç üzerine fotovoltaik panel yerleştirilerek, araç menzilin artırılması sağlamak. Fotovoltaik panel sistemi için maksimum güç takip sistemi tasarlayarak güneş enerjisinden en yüksek düzeyde faydalanmak.
- Motor, fotovoltaik panel, batarya sistemi ve ultrakapasitör üniteleri arasında yük akışını düzenleyen ve enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan bir enerji yönetim sistemi tasarlamak.
- Araç sürüş sistemi; arka çift tekere akuple edilmiş iki kalıcı mıknatıslı fırçasız senkron DC motor (PM-BLDCM), hız regülatörü, her iki motora bağlı çift yönlü DC/AC invertörden oluşmaktadır. Sistem elektronik diferansiyel sahiptir. Dolayısıyla, mekanik diferansiyel ağırlığından kurtulan aracın verimi iyileşmektedir. Elektronik diferansiyel kullanımıyla sürüş konfor ve güvenliğinin artırılması hedeflenmiştir.
- Araç, EMU açısından değerlendirilmiş ve elektronik devreler arasında oluşabilecek elektromanyetik girişimlerin önlenmesine yönelik önlemler önemli ölçüde alınmıştır.
- Sistemde kullanılacak elektronik kartlar ve kontrol ünitelerinin birçoğu yerli imkânlarla tasarlanıp ve gerçekleştirilmiştir. Bu nokta da, ülkemize katma değer sağlayacak unsurların geliştirilmesinde yerli tasarım ve üretimler amaçlanmıştır.

## 1.2 Literatür Özeti

Literatürde, elektrikli araçlar üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Emadi vd. (2005) yaptıkları çalışmada, hibrid elektrikli ve yakıt pilli araçların güç sistem mimarisi ve yapılandırmaları üzerine topolojileri gözden geçirmiştir. De Lucena (2011) yaptığı çalışmada, elektrikli ve içten yanmalı motorlara sahip araçları karşılaştırmıştır. Çalışmaya göre; içten yanmalı motorların enerji verimliliği %30 iken, elektrikli motorlarda bu oran %85 olarak gözlemlenmiştir. Aynı zamanda elektrikli araçların, sıfır/sıfıra yakın gaz emisyon değerleri, gürültüsüz ve rejeneratif frenleme gibi önemli üstünlüklerini not etmiştir.

Bataryalar elektrikli ve hibrid araçların ana enerjilendirme kaynağı olup onların performansı araç satışlarını da ciddi oranda etkilemektedir. Bu yüzden üreticiler hem batarya hem de batarya yönetim sistemleri üzerindeki çalışmalarını devam ettirmektedir. Bu konuda devrim yaratacak teknolojiler üzerinde arayışlar sürmektedir (Xing vd. 2011). Elektrikli araçlarda yüksek performans oluşturabilmek için gerekli en önemli parça, batarya sistemidir. Batarya seçiminde; yüksek enerji yoğunluğu, yüksek çıkış gücü, uzun ömür, yüksek şarj-deşarj



verimliliği, düşük ve yüksek sıcaklık değerleri arasında geniş kullanım alanı, düşük iç deşarj, uygun yük karakteristiği, düşük iç direnç, hafıza etkisinin olmaması, hızlı şarj, yüksek derecede güvenlik, döngüsel kullanımda yüksek güvenilirlik, düşük maliyet ve geri dönüşüm proseslerine tabi tutulabilme gibi pek çok faktörün varlığı Affani vd. (2005) çalışmalarında belirtilmiştir. Li-ion bataryalar hafif olmaları, enerji yoğunluklarının yüksek olması ve hafıza etkisinin olmaması nedeniyle tercih edilmektedirler. Ayrıca ultrakapasitörlerin şarj ve deşarj edilebilmeleri bataryalara göre daha hızlıdır. Bu nedenle elektrikli araçta faydalı frenleme ile açığa çıkan ani gücü depolamak üzere ultrakapasitörler kullanılabilir.

Bir bataryanın güvenli, sağlıklı, uzun ömürlü vb. durumda şarj edilebilmesi için bataryanın şarj durumu, sıcaklığı, gerilimi, akımı gibi bilgilere ölçülür. Bu bilgiler mikroişlemci ve sensörlerden batarya yönetim sistemi (BMS) tarafından değerlendirilerek batarya hücrelerinin dengeli bir şekilde şarj edilmesi sağlanır. Aynı zamanda BMS devresi şarj sırasında oluşabilecek batarya içi veya batarya dışı hatalara karşı da koruma sağlar, hatanın tipini belirler ve gerekirse şarjı durdurur. Böylelikle batarya şarj durumunu en iyi şekilde belirlenerek bataryanın aşırı şarj ve deşarj olması da engellenir (Satılmış ve Meşe 2011). Öyle ki; BMS'ler bataryalar için fonksiyonel bir cihaz olup gerçek zamanlı çalışma özelliğiyle koruma, akım, gerilim, sıcaklık ölçümü ve hücre gerilimlerinin dengelenmesinde kullanılan önemli bir sistemdir (Barreras vd. 2015; Andrea 2010). BMS'ler, bataryaların daha verimli, güvenli ve bataryanın mevcut durumunun gözlenmesi için batarya ile çalışan endüstriyel, ticari cihaz ve sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu amaçla Chatzakis vd. (2013) yaptıkları çalışmada var olan BMS tekniklerini açıklamış ve güvenilir genelleştirilmiş yeni bir BMS tasarım yöntemi önermişlerdir. Xing vd. (2011) elektrikli ve hibrid araçlarda ki batarya yönetim sistemleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada batarya teknolojilerindeki son gelişmeleri gözden geçirilerek BMS sistemlerindeki zorluklar sunulmuş ve buna karşı olası çözüm önerileri verilmiştir. Gold (1997) çalışmasında BMS'leri farklı işlevsellik özelliklerine göre kategorize etmiştir.

Araç için diğer bir yardımcı enerjilendirme kaynağı ise araç üzerine uygun bir şekilde yerleştirilecek PV panellerdir. Fotovoltaik sistemler direkt olarak yüke veya bataryaya bağlı olmaları durumunda, ilgili yük veya batarya geriliminde çalışmaya zorlanırlar. Fotovoltaik yapılardan yüke veya bataryaya maksimum güç aktarımı yapabilmek için panel gerilimini yük veya batarya profilinden bağımsızlaştıracak sistemlere ihtiyaç duyulur. Panelleri yük veya batarya gerilimlerinden bağımsız kılan bu kontrollü arabirime Maksimum Güç Takip Sistemi (MGTS) denir. Fotovoltaik yapılarda sistemin maksimum güç noktasında çalışmasını engelleyen ışınım ve hücre sıcaklığından sonra üçüncü temel faktörümüz yük profilidir. Her ne kadar fotovoltaik sistemler doğrudan yüke bağlanmasa da genelde bağlı oldukları bir



depolama sistemi veya evirici bulunmaktadır. Bu durumda çalışma, ilgili depolama ünitesi veya eviricinin kendi karakteristikleri ile PV yapının karakteristiğinin kesişiminde gerçekleşir. Bu kesişim noktası da her zaman sistemin maksimum güç noktası olmamaktadır (Batchheller 1993; Mesenger ve Ventre 2005). Fotovoltaik sistemlerde ayrıca burada ayrıntılı olarak bahsedilmeyen yaşlanmaya ve kısmi gölgelenmeye bağlı enerji kayıpları oluşmaktadır. Bu kayıpları azaltmak için PV güneş panellerinden maksimum güç aktarımı yapmak üzere yapısında kontrol edilebilir bir DC-DC dönüştürücü barındıran elektronik devrelere ihtiyaç duyulur (Nakir 2007). Fotovoltaik panel sistemi için tasarlanan maksimum güç takip izleme düzeneği yardımıyla maksimum enerji batarya sistemine aktarılmaktadır. Böylece, hem aracın menzili hem de aracın toplam enerji verimliliği artırılabilir.

Bir elektrikli aracın performansı önemli ölçüde motor ve sürücü tipine de bağlıdır. Örneğin; PMSM motor ve sürücüleri, DC motor, indüksiyon motoru, senkron relüktans motor ve anahtarlamalı relüktans motor ve sürücü tipleriyle karşılaştırıldığında, PM BLDC motor sürücüleri yüksek güç yoğunluğuna ve yüksek verimliliğe sahip oldukları Hegazy vd. (2011) tarafından bildirilmiştir. Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan motor tipleri seçilmesine ilişkin rehber niteliğinde önemli çalışmalar sunulmuştur (Xue vd. 2008; Chau ve Li 2014). Bu çalışmalarda indüksiyon motor (IM), sabit mıknatıslı senkron motor (PMSM) ve anahtarlamalı relüktans motorlar (SMR) birbirleriyle kıyaslanmış avantaj ve dezavantajları ortaya konmuştur. Xue vd. (2008), PMSM motorun; IM ve SRM'ye kıyasla daha yüksek verimliliğe sahip olduğunu göstermiş ve büyük sabit güç gerekmeyen durumlarda tercih edilen bir seçim olacağını ifade etmiştir. Aynı zamanda sabit mıknatıslı motorlar sınırlı alan uygulamalarında tasarımda büyük esneklik gösterirler. Bu yüzden tekerlek içi motor olarak kullanımı oldukça uygundur. Pellegrino vd. (2012), aynı boyutlardaki bir sabit mıknatıslı motorun yüzey mıknatıslı veya iç gömülü mıknatıslı olmaları durumunda göre karşılaştırmalı bir çalışma yapmıştır. Yüksek hızlarda yüzey mıknatıslı motorlarda kayıpların daha fazla olduğunu tespit etmiş. Hofman vd. (2015) üç tekerli ve tek kişilik hafif bir araç modeli üzerinde çalışmışlardır. Aracın tahrikinde dış rotorlu sabit mıknatıslı senkron motor kullanılmış ve motorlar bir dişli kutusu üzerinden öne tekerlere bağlanmıştır. Araç için motor, sürücü, dişli sistemi için verim analizleri yapılarak dış rotor yarıçapı, dişli oranı ve kutup çiftleri ve stator yivlerinin sürüş sistemi verimliliği üzerine etkilerini incelemişlerdir. İç ve dış rotorlu sabit mıknatıslı (PM) motorlarda yüzey montajlı mıknatıslar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır (Tarimer ve Ocak 2009). Dış rotorlu PM makinin, düşük toplam ağırlık, maliyet ve kurulum kolaylığı nedeniyle tercih edileceğini göstermiştir. Bu nedenle bu projede de, dış rotorlu yüzey mıknatıslı bir PMSM seçilmiştir.



Fırçalı doğru akım motorunun aksine, fırçasız doğru akım motorunun komütasyonu elektronik olarak kontrol edilir. Bu nedenle, rotor pozisyonu statora gömülü hall-effect sensörleri ile belirlendiği Gamozo-Real vd. (2010) tarafından not edilmiştir. Ancak Belçika proje ekibinden Sergeant vd. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı bir yöntem olarak gömülü sensör kullanmak yerine motorun kaçak alanlarından konum bilgisi alan yeni bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde sensörler motorun dışına uygun bir şekilde yerleştirilmiş ve algılama motorun kaçak akılarından yararlanarak yine hall sensörler aracılığıyla yapılmıştır. Böylelikle hall sensörleri motorun yüksek sıcaklığına maruz kalmamaktadır ve arızalanmaları durumunda sensör değişimleri oldukça kolaydır.

Elektrikli araçlarda konforlu bir seyahat için motor sürücülerinin birim basamak cevapları (hız ve moment) önem arz etmektedir. İstenen hızlara en kısa sürede ulaşılırken, değişik yük durumlarında (farklı yol zemini, yokuş tırmanış gibi) hem hız hemde moment cevabı da oldukça hızlı olmalıdır. Literatürde, fırçasız DC motorların hız ve moment kontrolleri için birçok teknik önerilmiştir. Bu teknikler geleneksel kontrol Abidin vd. (2011), Ramesh vd. (2011) ve doğrudan moment kontrolü Tabbache vd. (2011), Öztürk ve Toliyat (2007) olmak üzere iki ana sınıfa ayrılabilir. Geleneksel yöntemlerde DC hat akımı ile orantılı olduğu varsayılan moment kontrolü akım üzerinden dolaylı kontrol edilir. Doğrudan moment kontrolü ise gerilim vektörleri yardımıyla direk sağlanır. Böylelikle daha hızlı bir yanıt elde edilir.

Araçta birden fazla enerji depolama ortamı olmasından dolayı yük akışını düzenleyen ve enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan bir enerji yönetim sistemi bu araç tasarımının en önemli unsurlarındandır. Literatürde elektrikli araçlar için güç yönetim sistemi konusunda çok sayıda nitelikli çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda güç yönetimini maksimum verim ile gerçekleştirmek için çok çeşitli yöntemler önerilmiş ve denenmiştir. Bu çalışmaların genelinde kontrolü ve yönetimi daha zor olan hibrid elektrikli araçların güç yönetimi konusu ele alınmıştır (Panday ve Bansal 2014; Zhang vd. 2014; Pisu ve Rizzoni 2007). Bunun yanı sıra birden çok enerji depolama biriminin bulunduğu durumlar için elektrikli araçlarda güç yönetim sistemlerini konu alan çalışmalar mevcuttur (Tie ve Tan 2012; Long vd. 2014). Bu çalışmalarda kural tabanlı, bulanık mantık tabanlı ve optimizasyon tabanlı yönetim sistemleri geliştirilmiş ve hepsinde herhangi bir kontrol stratejisi bulunmayan duruma göre ciddi gelişme kaydedilmiştir. Ayrıca, araç için bir güç yönetim sisteminin bulunması, araçtaki enerji depolama birimleri üzerinde bulunan stresi azaltır ve uzun ömürlü kullanılmasına imkan tanır (Masjosthusmann vd. 2012).

Elektrikli araçlar üzerine yapılan çalışmalar son zamanlarda temel olarak iki ana başlık üzerine yoğunlaşmıştır. Bunlar sırasıyla, araç menzilini uzatmak için enerji yönetimi üzerine yapılan çalışmalar ki temel esas olarak araç ağırlığını azaltmak, batarya yönetimini daha



etkin hale getirmek, ağırlığı dikkate alınmak koşuluyla ultrakapasitör-batarya-motorlar arasındaki enerji akışını yönetmek, faydalı frenleme enerjisinden faydalanmak, daha etkin ve yapay zeka tabanlı kontrol metotları ile daha verimli sürüş sağlamak üzerine kurulmuştur. Diğeri ise araç hızına ve dinamiğine göre sürüş ve manevra kararlılığını, hatta güvenliğini sağlamak üzerinedir. Özellikle ticari boyutta ele alınan modellerde araç menzilinın kısa oluşu kontrol yönteminden ziyade daha verimli motorlar kullanımı ve etkin enerji yönetimini öne çıkartmıştır. Hatta fosil yakıtlı ve elektrik enerjili hibrid araçlar ülke yönetimlerinden gereken vergi indirimi desteğini yeterince alamadığından bütün çalışmalar tekrar sırf elektrik motorlu araçlara yönelmiştir. Şehir içi dolaşım araçlarında ise daha hafif araçların modellenmesi ve sürüş güvenliğinin artırılması daha baskındır. Bu konular üzerine uzun zamandır özel konferanslar düzenlenmekte ve konu odaklı dergiler yaygınlaşmaktadır.

Araçları yol menzilini artırmak için faydalı fren enerjisini kullanmak üzere ya doğrudan bataryaya enerji akışı sağlanmakta ya da araçtan daha iyi dinamik cevaplar alabilmek için bu enerji akışı ultrakapasitörler (süper kapasitörler) üzerinden yapılmaktadır (Qu ve Liang 2011). Bu aşamada özellikle enerji yönetiminde motorların kontrol yöntemini de dikkate alan uzman yaklaşımlar ile ilgili bir çalışma Qin (2015) tarafından sunulmuştur. Son yıllarda fosil yakıtlı motor barındırmayan araçlarda ultrakapasitör kullanımı da hibrid araç olarak nitelendirilse de bu sadece enerji depolama ve kullanma biçiminin birden çok kaynak üzerinden yapıldığı anlamına gelmektedir. Shao vd. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, hibrid enerji depolama sistemi üzerine her iki depolama kaynağının aktif kullanımı teorik model, deneysel çalışma ile gösterilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu yaklaşımların bir diğeri hedefi de batarya ömrünün uzatılması ve şarj-deşarj güvenliğinin sağlanması olmuştur. Burada da yine bulanık mantık tabanlı ve sistem parametrelerine daha az duyarlı yöntemler tercih edilmektedir (Li vd. 2011; Rangarajua vd. 2015; Maia vd. 2015). Her biçimde enerji tüketiminin asıl kaynağı motorlar olduğundan elektrikli araçlar için daha hafif ve daha verimli olarak tasarlanan kalıcı mıknatıslı senkron motorların fırçasız doğru akım tabanlı kontrolü ve bu motorları enerji tüketiminin tahmin edilmesi üzerine önce benzetim çalışmaları sonra da deneysel çalışmalar başarılı sonuçlar vermiştir (Hasnira ve Istaridi 2014).

Bir diğeri göz önüne alınması gereken konu da belli bir yüklenme için tasarlanmış elektrikli araçların yol performanslarının farklı yükler ve farklı sürüş parkurları için test edilmesi ve sürüş menzilini artırmak için yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılmasıdır (Schuller vd. 2015; Sanfélix vd. 2015; Rothganga vd. 2015). Yapılan bu çalışmalarda özellikle araç üzerine montaj edilen fotovoltaik panellerinden sürüş öncesi elde edilecek enerji depolama ve sürüş sırasında kullanım yeterliliği değerlendirilmiştir. Genellikle bu panellerin kapladığı yüzeyin sınırlı olması nedeniyle elde edilen enerjinin sürüş sırasında hareket amaçlı motorlar



haricinde kontrol, gösterge ve sistem soğutma ünitelerinde kullanılmasının daha faydalı olduğu vurgulanmıştır. Araçta kullanılan enerjinin en verimli hale getirilmesini hedefleyen çalışmalar sadece hibrid enerji kaynaklarının yönetimini değil motor kullanımında ve sürücü sistem ünitelerinde meydana gelen kayıpları en aza indirmeyi de hedeflemektedirler. Bu nedenle gerek sürücü devrede kullanılan yarı iletkenlerin anahtarlama kayıpları gerekse meydana gelen kaçakların en aza indirilmesi, hatta bu kayıpların mümkünse temel enerji kaynağı olan bataryadan karşılanmaması sistem verimini çok olmasa da önemli ölçüde etkilemektedir (Miliani vd. 2014). Bu amaçla hibrid enerji depolama sistemli araçlarda ultrakapasitöre aktarılması gereken faydalı fren enerjisinin akış yönünde en az sayıda doğru akım (DA) çeviricisi kullanmak gerekmektedir.

Table 1.1 Küçük ticari elektrikli araçları karşılaştırılması

Araç	Cree SAM	Tazzari zero	Renault Twizy 80
Tekerlek	Üç Teker (2 ön, 1 arka)	Dört teker (2 ön, 2 arka)	Dört teker (2 ön, 2 arka)
Motor	BLDC 15 kW tahrik erka teker	Asenkron motor 15 kW tahrik arka teker	Asenkron motor 14 kW tahrik arka teker
Güç aktarımı	Zincir (5.54 : 1)	Otomatik şanzıman	Tek hızlı şanzıman
Batarya	Lead-Tin 168 V - 3.53 kWh	Lithium-ion 220 V - 12.3 kWh	Lithium-ion 220 V - 6.1 kWh
Batarya ağırlığı	140 kg	142 kg	100 kg
Enerji tüketimi	5 kWh/100 km	13.5 kWh/100 km	6 kWh/100 km
Maksimum hız	85 km/h	100 km/h	80 km/h
Menzil	50 - 70 km	140 km	100 km
Toplam Ağırlık	545 kg	542 kg	473 kg
Boyutlar (l,h,b)	3160, 1580, 1550 mm	2880, 1425, 1560 mm	2337, 1454,1234 mm
Fiyat	8500 euro + 100 euro Batarya için kira/ay	14900 euro + 3900 euro Batarya paketi 150 km	7690 euro + 62 euro Batarya için kira/ay
Bilgi	<a href="http://www.cree.ch">www.cree.ch</a>	<a href="http://www.tazzari-zero.com">www.tazzari-zero.com</a>	<a href="http://www.renault.be">www.renault.be</a>



Tahmin edileceği üzere araçtaki enerji tüketimi önemli ölçüde araç kütlesine bağlıdır. Enerji tüketimini azaltmak için aracın ultra hafif olması gerekir. Tablo 1.1'de şehir içi konseptinde üç farklı küçük ticari aracın bazı özellikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Bu elektrikli araçlar klasik bir binek otomobilinden çok daha küçük olmaları nedeniyle klasik araçlara göre daha hafif olmaktadır. Bununla birlikte, küçük boyutlar göz önüne alındığında, hala oldukça yüksek ağırlığa sahiptirler (Hofman vd. 2016). Aynı zamanda yüksek batarya ağırlıkları sürüş menzili azaltmaktadır. Ağırlık minimizasyonu ve optimum motor gücü seçimi ve optimum enerji yönetimi araç menzili artırabilir.

Elektrikli araçların ağırlığını azaltmak için öngörülen yöntemlerden birisi de mekanik diferansiyel yerine sisteme ek bir ağırlık katmadan motorların elektronik diferansiyel kontrollü olarak sürülmesini sağlamaktır. Bu yöntemde, esas alınan düz yol sürücü hız referansına sağ ve sol tekerler için dönüş yönüne göre farklı bir hız ya da moment referansı vermektir. Zira, araç sola dönerken iç teker dönüş çapı dış teker dönüş çapına göre daha az olup kat edilmesi gereken yollar her bir teker için farklıdır. Aynı zamanda sola dönüş yapan araç için ağırlık ve yüklenme sağ tarafa daha baskın yöneleceği için tekerlere aktarılması gereken momentlerde birbirinden farklıdır. Bu amaçla, düz yolda her iki tekerin moment ve hız referansı aynı iken dönüş yönüne göre her bir teker motor kontrolörüne farklı hız ve moment referanslarının uygulanmasında bu çalışma kapsamında klasik Ackermann modelinin kullanılması hedeflenmiştir.

Elektrikli aracın yol sürüş güvenliğinde direksiyon açısını, düz yol gerçek hızını, fren ya da ivmelenme referansını dikkate alarak motor akımlarını da denetleyen elektronik diferansiyel uygulaması aracın güvenlik performansını özellikle izin verilen yüksek hızlarda önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir (Chen vd. 2013). Araçta dört teker ve dört motor kullanılmasını öngören çalışmaların hedefi dört tekerin ivmelenme ve bağımsız frenlemesini sürüş kararlılığı ve güvenliği için ele alınmasıdır (Pan ve Song 2014).

Uyarlanabilir ve yapay zeka tabanlı elektronik diferansiyel uygulamaları özellikle doğrudan moment kontrolünü yada alan yönlendirmeli vektör kontrolünü esas almaktadır. Bu çalışmalarda, araçta en az iki motor kullanıldığı için, her bir motorun moment kontrolü araç yol kararlılığı ve güvenliğine dayalı olarak birbirinden bağımsız olarak yapılabilmektedir (Tabbache vd. 2011; Hartani vd. 2009; Sakhalkar 2014). Ancak, kullanılan motorların parametrelerine ve araç dinamiklerine aşırı bağımlı olma konusu hem sensörlü hem de sensörsüz (kestirim tabanlı) kontrol yöntemlerinin daha kararlı ve dayanıklı uygulanabilirliğini sorgulanabilir kıldığından her geçen gün yeni çalışmalar yayınlanmaktadır (Febin Daya vd. 2015).





Projede ayrıca elektromanyetik uyumluluk açısından da değerlendirilmiş ve olası problemlere yönelik gerekli iyileştirme çalışmaları da yapılmıştır. Elektrikli araçların işletim karakteristiklerinden dolayı (yüksek akımlı, yüksek gerilimli işletme, ayrıca akım ve gerilim kaynaklı transientler) araçta elektromanyetik girişim (EMI) problemlerine neden olmaktadır. Literatürde bu konuda yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda, elektrikli sürüş sistemlerinin geleneksel araçlara entegre edilmesi halinde oluşabilecek elektromanyetik uyumluluk (EMU) problemlerine değinilmiştir (Weber vd. 2003; Guttowski 2003). Motor sürüş devrelerinde 150 kHz ile 30 MHz aralığında oluşan istenmeyen akım sinyalleri EMI gürültü olarak tanımlanır. Bu problemlerin çözümü için güç elektroniği devrelerinde EMI filtreler tasarlanmış, aracın kontrol haberleşme sistemleri için izalasyonlu CAN-BUS kullanılmış, araç içerisindeki güç ve kontrol kabloları alüminyum şasi içerisinden ayrı yerlerden geçirilmek suretiyle dolaylı olarak pasif ekranlama sağlanmıştır.

Bu projede, şehir içi ulaşımaya yönelik yüksek verimli elektrikli aracın tasarlanarak ve güvenli sürüş yöntemlerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Tasarlanan elektrikli araca ait genel blok şeması Şekil 1.1'de verilmiştir. Araçta ana enerji kaynağı olarak batarya kullanılacak ve aynı zamanda bu batarya grubu şebekeden şarj edilebilmektedir. Kalkış ve ani hızlanmalarda motorların güç talebi artmaktadır. Bu ani güç talebinin karşılanması ve frenleme sırasında oluşacak enerji üretimlerinin hızlı bir şekilde geri kazanılması için ultrakapasitörler kullanılmaktadır. İlave olarak, araç üzerine fotovoltaik panel yerleştirilmiş olup fotovoltaik panel sistemi için tasarlanan maksimum güç takip izleme düzeneği yardımıyla maksimum enerji batarya sistemine aktarılmaktadır. Böylece, hem aracın menzili hem de aracın toplam enerji verimliliği artırılması hedeflenmektedir. Araçta birden fazla enerji depolama ortamı olmasından dolayı yük akışını düzenleyen ve enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan bir enerji yönetim sistemi bu araç tasarımının en önemli unsurlarındandır. Aracın tahriki, tekerleklerinde bulunan iki adet bağımsız BLDC motor tarafından sağlanmaktadır. Araç sürüş konforu ve güvenliği için elektronik diferansiyel kullanımını gerektirmektedir. Projede ayrıca elektromanyetik uyumluluk açısından da değerlendirilmiş ve olası problemlere yönelik gerekli iyileştirme ve önlemler alınmaya çalışılmıştır.

Proje ile aşağıdaki bilimsel soruların çözümü hedeflenmiştir;

- Motor/generatör tasarımı, güç elektroniği devreleri ve kontrol yöntemiyle yüksek verimli bir araç tasarlanması,
- Aracın beslenmesinde fotovoltaik panel, batarya ve ultrakapasitörden oluşan güç ünitelerinin optimum kullanımıyla aracın sürüş verimliliğinin artırılması,
- Sürüş kontrol sisteminde elektronik diferansiyel algoritması kullanımıyla hem sürüş konforunun hem de sürüş güvenliğinin artırılması,

- Güç elektroniği devreleri kaynaklı manyetik girişim problemlerinin azaltılması.

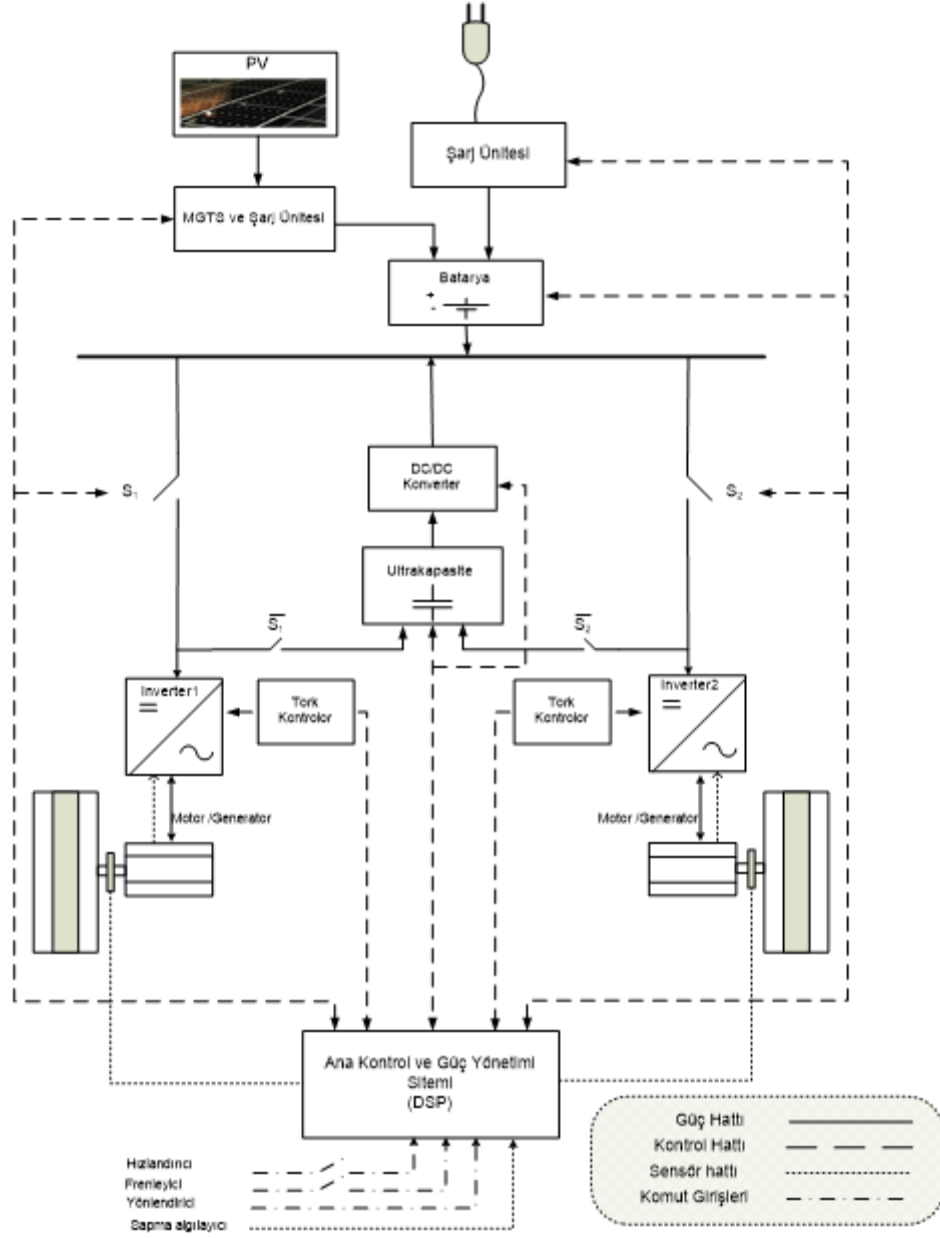


Figure 1.1 Elektrikli aracın genel şeması

## 2. BATARYA, BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ VE ULTRAKAPASİTOR

### 2.1 Batarya

Elektrikli araçta ana güç kaynağı batarya ünitesidir. Günümüzde elektrikli araç uygulamalarında genelde li-ion tabanlı bataryalar kullanılmaktadır. Li-ion bataryalar; hafif olmaları, enerji yoğunluklarının yüksek olması ve hafıza etkisinin olmaması nedeniyle tercih edilmektedir. Tasarlanacak elektrikli araçta da bu sayılan üstün özelliklerin yanında güvenlik açısından da tercih edilen bir batarya olan WN36AH LiFePO<sub>4</sub> enerji depolama ünitesi olarak tercih edilmiş ve alım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Batarya hücresinin teknik özellikleri Tablo 2.1'de, kullanılan hücreye ait örnek bir resim Şekil 2.1'de verilmiştir. Batarya besleme ünitesi 32 adet hücrenin seri bağlanması ile oluşturulmuş ve DC bara gerilimiz yaklaşık 100 V olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.1 Projede kullanılan WN36AH LiFePO<sub>4</sub> bataryanın bazı teknik özellikleri.

<b>Nominal gerilim</b>	3,2 V
<b>Nominal kapasite</b>	36 A
<b>Max. Hücre gerilimi</b>	3,8 V
<b>Min. Hücre gerilimi</b>	2,5 V
<b>Operasyon gerilim aralığı</b>	2,8 - 3,7 V
<b>İç direnci</b>	<2 mΩ
<b>Çevrim ömrü</b>	>2000
<b>Boyut (genişlik, uzunluk, yükseklik) (mm)</b>	36x130x155
<b>Ağırlık</b>	1,3 kg

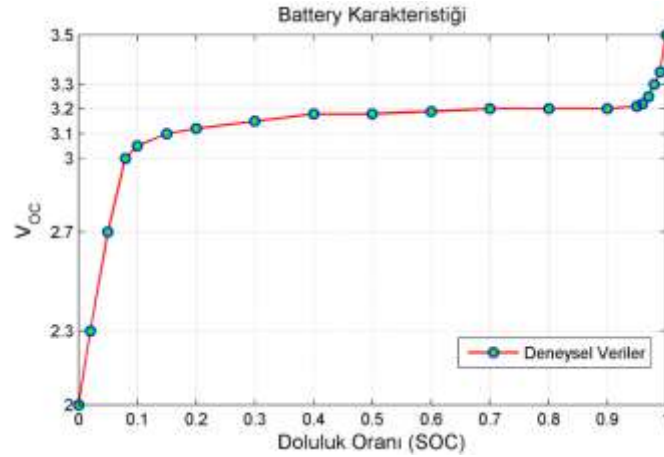


Şekil 2.1 LiFePO<sub>4</sub> batarya hücrelerine ait örnek bir resim

Batarya modeli, referans (Erdinc vd. 2009), (Gao vd. 2002), (Chen ve Mora, 2006), ve (Lo, 2013)'deki çalışmalar ve tasarlanan araçta kullanılan bataryalar dikkate alınarak oluşturulmuştur. Sözü edilen çalışmalarda belirtildiği gibi batarya açık devre gerilimi sıcaklığa bağlı bir şekilde aşağıdaki denklemdeki gibi bulunur. Thevenin eşdeğer devresi kullanılarak oluşturulan bu denklemde  $V_{OC}$  batarya açık devre gerilimini,  $Z_{eq}$  batarya eşdeğer iç empedansını,  $\Delta E(T)$  ise sıcaklığa bağlı batarya potansiyeli düzeltme katsayısıdır.

$$V_{bat} = V_{OC} - i_{bat} * Z_{eq} + \Delta E(T) \quad (2.1)$$

Denklemde yer alan batarya açık devre gerilimi bataryanın SOC'ına son derece bağımlı bir değerdir. Bu sebeple her batarya türü için deneysel olarak belirlenmiş denklemlerle ya da elde edilmiş tablolar kullanılarak modellenmelidir. Araç için kullanılan bataryalara ilişkin model oluşturulurken bataryanın kullanım kılavuzunda verilen batarya SOC'una bağlı olarak verilen  $V_{OC}$  grafiği kullanılarak interpolasyon yapılmıştır. Batarya karakteristiğine ilişkin deneysel olarak ölçülen değerler ve  $V_{OC}$ -SOC ilişkisi Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

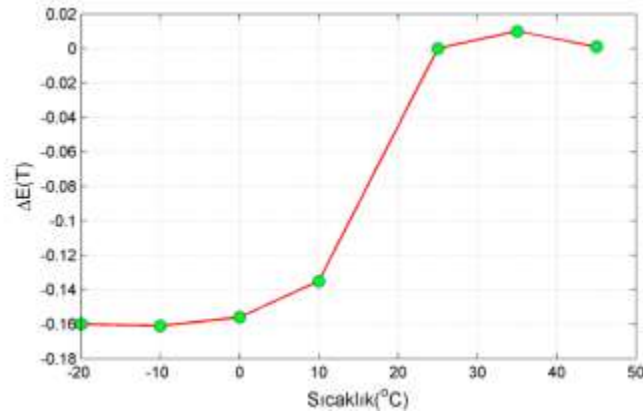


Şekil 2.2 LiFePO<sub>4</sub> batarya için batarya açık devre gerilimi-batarya SOC ilişkisi.

Denklem 1'de yer alan  $\Delta E(T)$  batarya potansiyel düzeltme terimidir ve referans Gao vd. (2002)'de belirtildiği gibi sıcaklığın batarya çıkış gerilimi üzerindeki etkilerini yansıtır ve bataryaya özel bir değerdir.  $\Delta E(T)$ 'nin LiFePO<sub>4</sub> türü bataryalar için sergilediği davranış Lo (2013)'de anlatılmış ve Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

Ayrıca bataryanın SOC değişimi de denklem (2.2)'deki gibi ifade edilir.

$$SOC = SOC_{başlangıç} - \int i_{Bat} dt \quad (2.2)$$



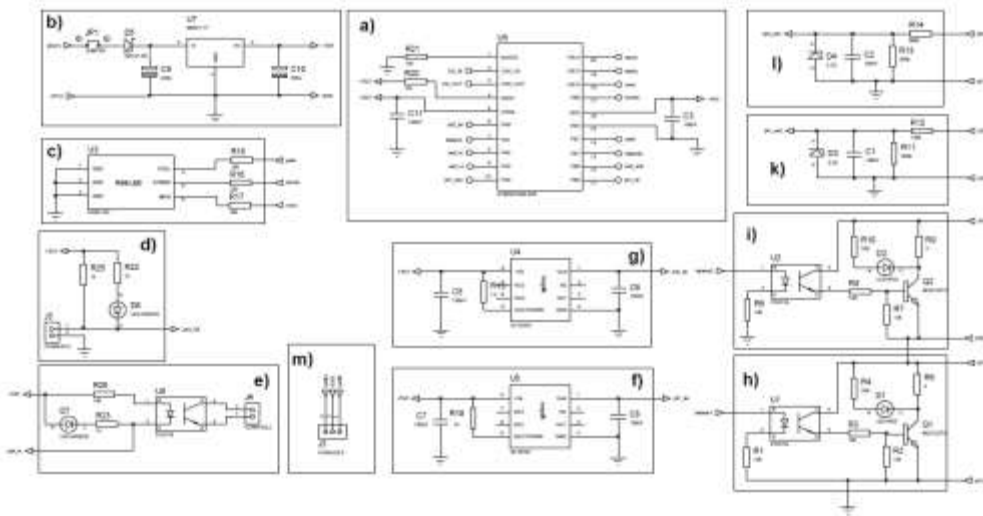
Şekil 2.3 Sıcaklık düzeltme terimi-  $\Delta E(T)$

## 2.2 Batarya Yönetim Sistemi Tasarım ve İmalatı

Bu iş paketi kapsamında araçta kullanılacak LiFePO<sub>4</sub> batarya grubu için BMS tasarımı yapılmış ve gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen BMS gerekli testlerden geçirilmiş ve kullanıma hazır haldedir. Tasarıma ilişkin ayrıntılar alt başlıklar halinde aşağıda verilmiştir.

### 2.2.1 BMS Mini Modül Tasarımı

Batarya hücreleri üzerine monte edilerek, bu hücreler için balans ve görüntüleme işlemi yapacak bir devre tasarlandı. BMS mini modül iki adet hücre üzerine bağlanabiliyor ve bu hücrelerin gerilim ve sıcaklık değerlerini okuyarak BMS ana modüle gönderiyor. Bağlı olduğu hücreler üzerinde gerilim balans işlemi yapabiliyor. BMS mini modül tasarıma ait devreler Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 BMS mini modül devre şemaları; a) mikro denetleyici, b) gerilim regülatörü, c) RGB led, d) seri haberleşme giriş, e) seri haberleşme çıkış, g) sıcaklık sensörü-1, f) sıcaklık sensörü-2, i) hücre balans işlemi-1, h) hücre balans işlemi-2, j) gerilim okuma-1, k) gerilim okuma-2



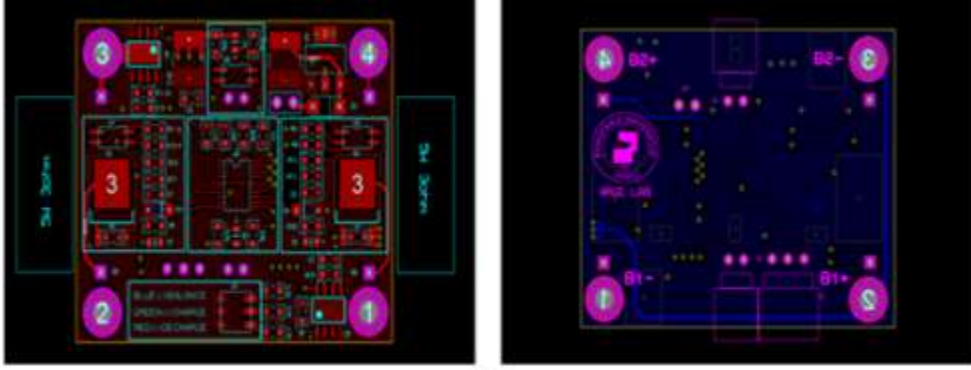
Bu devrelere ait kısa açıklamalar aşağıda özetlenmiştir.

- *Mikrodenetleyici:* Devre üzerinde ST ARM Cortex M0 mikrodenetleyici kullanıldı. Mikrodenetleyici 12 bit Analog-dijital dönüştürücü (ADC), darbe modülasyonu (PWM), seri haberleşme protokolü (UART) donanımlarına sahiptir.
- *Gerilim Regülatörü:* Gerilim regülatörü devresi mikrodenetleyici ve sıcaklık sensörleri için gerekli olan 3.3 V besleme gerilimini sağlıyor. Devrede ams1117 (U7) gerilim regülatörü kullanıldı. Modul ile hücrelerin arasına JP1 jumperi eklendi.
- *RGB Led:* BMS mini modül üzerine bir adet RGB led yerleştirildi. RGB led bacakları mikrodenetleyicinin giriş-çıkış portlarına bağlandı. RGB led ile hücre durumları (sarj, desarj, balans) devre üzerinde gösterilebiliyor.
- *Seri Haberleşme Giriş ve Çıkış:* BMS mini modüller ve BMS ana modül arasında veri alışverişini sağlamak için mikrodenetleyicinin seri haberleşme donanımı (UART) kullanıldı. Modüller arası elektriksel etkileşim olmaması için her modülün veri gönderme kısmına (tx) optokuplör devresi eklenerek modüller birbirinden izole edildi.
- *Sıcaklık Sensörü-1 ve Sıcaklık Sensörü-2:* Hücre sıcaklıklarını okuyabilmek için devre üzerine iki adet tmp36 sıcaklık sensörü yerleştirildi. Tmp36 sıcaklık sensörü bir sıcaklık-analog dönüştürücü olarak çalışıyor. Tmp36 sıcaklık sensörünün analog çıkışı mikrodenetleyicinin analog-dijital dönüştürme donanım bacağına bağlanarak hücrelerin sıcaklık değerleri ölçülebiliyor.
- *Hücre Balans İşlemi-1 ve Hücre Balans İşlemi-2:* Batarya grubundaki hücreler üzerinde değişik nedenlerden dolayı gerilim farklılıkları oluşabilir. BMS mini modülü üzerindeki izole balans devreleri ile bağlı buldukları hücreler için balans işlemini gerçekleştirebilir. Diğer hücelere göre yüksek gerilime sahip olan hücre, desarj direnci (R5) ve (R9) ile gerilim seviyesi diğer hücelere eşit olana kadar desarj edilir. Devre üzerindeki optokuplör (U1) ve (U2) ile mikrodenetleyici ve hücreler, balans işlemi sırasında birbirinden izole edilir. Balans1 ve balans2 bacakları mikro denetleyicinin PWM donanım bacaklarına bağlanarak balans akımı kontrol edilebilir (0-2A). Balans devresi üzerindeki led ile balans işlemi modül üzerinden görülebilir.
- *Gerilim Okuma-1 ve Gerilim Okuma-2:* Hücre gerilim okuma devresinde önce hücre gerilimi gerilim bölücü devre ile mikrodenetleyicinin okuyabileceği seviyeye indirilir. Daha sonra pil\_adc bacakları mikrodenetleyicinin analog-dijital dönüştürme donanım bacaklarına bağlanarak hücrelerin gerilim seviyesi ölçülebilir. Mikrodenetleyici 12bit adc çözünürlüğüne sahiptir. Bu sayede 10mV çözünürlükte gerilim bilgisi okunabilmektedir.

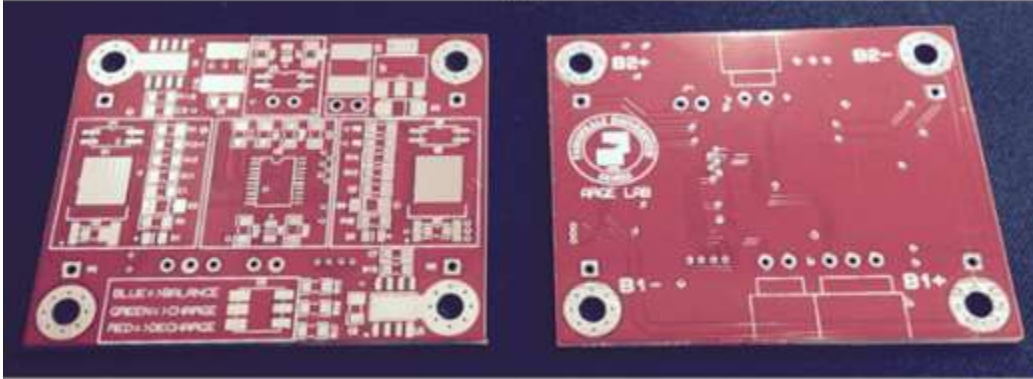


### 2.2.1.1 BMS Mini Modül Üretimi

BMS mini modül baskı devre çizimi yapıldı (Şekil 2.5 (a)). BMS mini modül devre boyutu (5cm x 4cm) olacak şekilde tasarlandı. Bu sayede devre iki adet hücre üzerine yerleştirilebiliyor. Devre çift yönlü ve smd malzemeler kullanılacak şekilde çizildi ve üretildi (Şekil 2.5 (b)). BMS mini modül malzemeleri temin edilerek devre üzerine yerleştirildi ve lehimlendi örnek bir mini BMS modülü Şekil 2.5 (c)'de gösterilmiştir. Toplam onaltı adet BMS mini modül üretilmiştir.



(a)



(b)



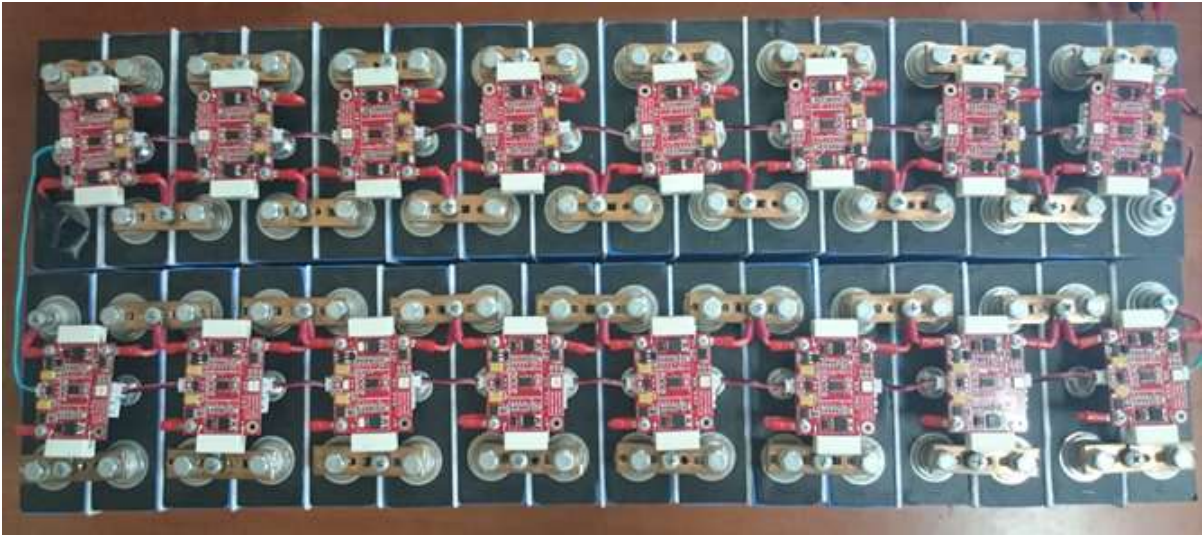
(c)

Şekil 2.5 Tasarımı gerçekleştirilen; a) PCB çizimleri, b) PCB imalatı, c) BMS mini modül



### 2.2.1.2 BMS Mini Modül Test ve Montaj

Üretilen BMS mini modüller için öncelikle kısa devre testleri yapıldı. Mikrodenetleyici yazılımı yüklenerek modül için gerilim-sıcaklık okuma, balans işlemi ve haberleşme testleri yapıldı. Güç kaynağı ile yapılan testlerden sonra mini modüller hücrelerin üzerine yerleştirildi. BMS mini modüller kablo pabuçları ve 0.75'lik kablolar ile hücrelere monte edildi. Mini modüller arası haberleşme kabloları takıldı. Hücreler ile tekrar gerilim –sıcaklık okuma, balans işlemi ve haberleşme testleri yapıldı. Bütün hücreler seri olarak birbirine bağlandı ve üzerine BMS mini modüller yerleştirildi. Batarya üzerine yerleştirme işlemi tamamlanan mini modüllere ait resim Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Batarya üzerine yerleştirme işlemi tamamlanan mini modüllere ait resim

### 2.2.2 BMS Ana Modül Tasarımı

BMS mini modüllerden gelen bilgileri okuyup değerlendirecek, bu bilgileri TFT ekranda gösterecek ve BMS işlemlerine karar verecek bir ana modül kartı tasarlandı. Devrede 100 pin ST ARM Cortex M4 mikrodnetleyici kullanıldı. BMS ana modül kartı tüm BMS mini modül kartlarla haberleşebiliyor. Tüm hücre sıcaklık ve gerilim değerlerini TFT ekranda grafiksel olarak gösterebiliyor. Tasarlanan BMS ana modüldeki devrelere ait şemalar Şekil 2.7'de verilmiştir.





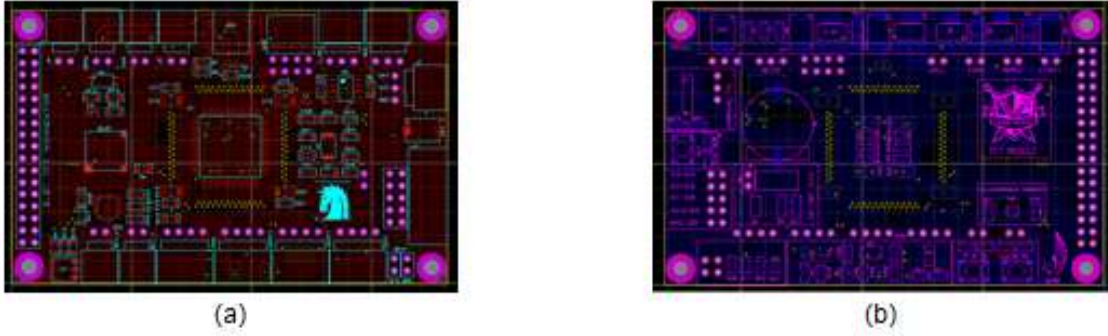
Tasarlanan BMS ana modüldeki devre elemanlarına ait kısa açıklamalar aşağıda özetlenmiştir.

- *Gerilim Regülatörü:* Gerilim regülatörü mikrodenetleyici ve sensörler için gerekli olan 5 V ve 3.3 V gerilimlerini üretiyor. Devre 12 V (J4) gerilim ile çalışıyor. Devre üzerinde ams1117 (5 V) ve ams1117 (3.3 V) gerilim regülatörleri var.
- *Haberleşme:* BMS ana modül, BMS mini modüller ile bağlantı kurarak tüm hücrelerin gerilim-sıcaklık bilgilerine ulaşip BMS komutlarını modüllere gönderebiliyor. Tx pinindeki optokuplör sayesinde veri alışverişi izole ediliyor.
- *Sıcaklık Sensörü:* BMS ana modül üzerindeki sıcaklık sensörü ile modul sıcaklığını ölçebiliyoruz. Tmp36 sıcaklık sensörü (U6) devrede sıcaklık-analog dönüştürücü olarak çalışıyor. Sensör çıkışı mikrodenetleyicinin analog-dijital dönüştürme bacağına bağlanıyor.
- *Sarj Kontrol:* Aşırı gerilim koruması ve hücrelerin balanslı olarak şarj olabilmesi için şarj röle kontrol devresi ile BMS ana modül, sarj işlemini başlatıp durdurabiliyor. Role açma-kapama işlemi sırasında mikrodenetleyicinin etkilenmemesi için devre optokuplör ile izole ediliyor. E11 bacağı mikrodenetleyicinin giriş-çıkış bacaklarından birine bağlanıyor.
- *Can Haberleşme:* Devre üzerindeki mcp2551 can entegresi sayesinde BMS ana modül diğer cihazlarla (monitör, PC, mikrokontroler) can haberleşme protokolü üzerinden haberleşebiliyor.
- *Gerçek Zamanlı Saat Entegresi (Ds1307):* Ds1307 rtc entegresi ile BMS ana modül sarj, desarj, balans gibi işlemlerin sürelerini ölçebiliyor. Gerçek zamanlı örnekler alıp kayıt yapabiliyor. Ds1307 entegresi mikrodenetleyici ile i2c haberleşme protokolü üzerinden haberleşiyor. Ana modül üzerindeki harici pil ile enerji kesilse dahi saat bilgisi silinmiyor.
- *Rf Haberleşme:* Rf haberleşme desteği ile BMS'ye ait hücre bilgileri (gerilim-sıcaklık-durum) araç dışına kablosuz olarak da gönderilebiliyor. Haberleşmede nRF24I01+ modülleri kullanıldı. Modüller mikrodenetleyici ile SPI haberleşme protokolü üzerinden haberleşiyor.
- *Hareket Sensörü:* Mpu-9160 hareket sensörü ile araç hareket halinde mi yoksa duruyor mu tahmin edilebiliyor. Uzun süre hareketsiz kalan araçta BMS modülleri uyku moduna geçerek haberleşme sinyallerini yavaşlatıyor. Bu sayede enerji tasarrufu sağlanmış oluyor.
- *Fan Kontrol ve Akım Okuma:* Yapılacak olan BMS kutusu için soğutma işlemi 12

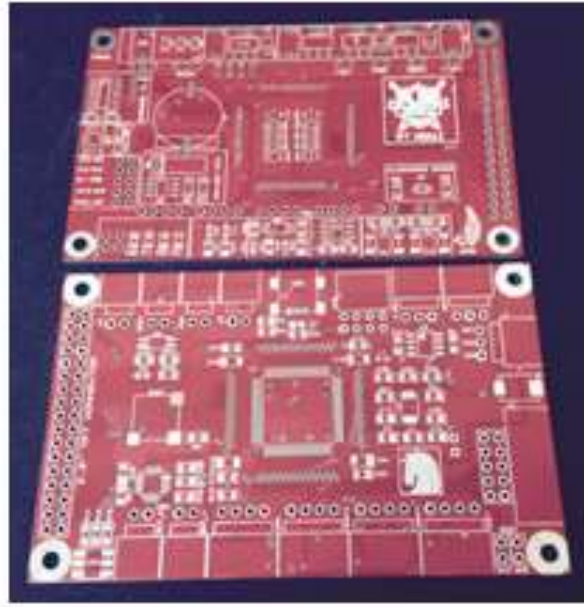
V fanlar ile sağlanacaktır. Fan kontrol devresi ile soğutma fanları istendiği zaman manuel veya sıcaklık kontrolü için otomatik olarak yapılabilir. Akım okuma sensörü olarak wcs1500 kullanıldı. Akım sensörü akım-analog dönüştürücü olarak çalışıyor ve mikrodenetleyicinin analog-dijital dönüştürücü bacağına bağlanıyor.

### 2.2.2.1 BMS Ana Modül Üretimi

Tasarımı gerçekleştirilen BMS ana modülü için ilk olarak baskı devre çizimi yapıldı (Şekil 2.8). Devre çift yönlü ve smd malzemeler kullanılacak şekilde çizildi ve üretildi (Şekil 2.9). BMS ana modül malzemeleri temin edilerek devre üzerine yerleştirildi ve lehimlendi. Gerçekleştirilen BMS ana modülünün ön ve arkadan gösterilimi Şekil 2.10'da verilmiştir.

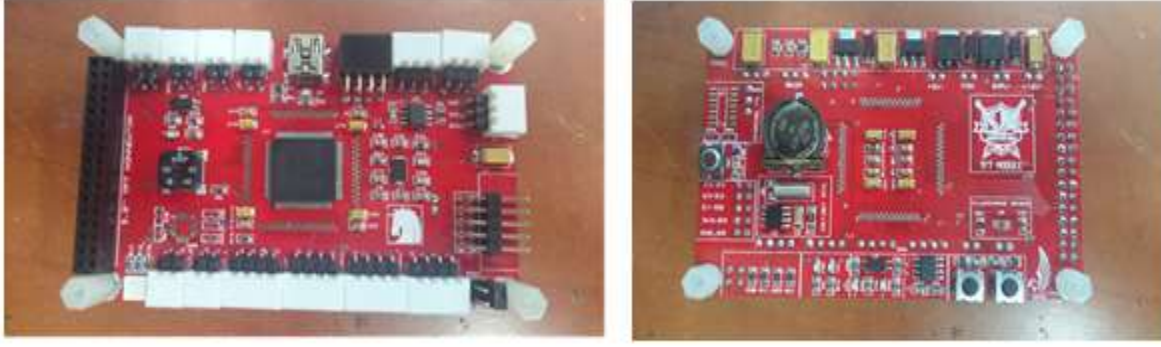


Şekil 2.8 BMS ana modül baskı devre çizimi a) ön yüz, b) arka yüz



Şekil 2.9 BMS ana modül PCB kartı





Şekil 2.10 Gerçekleştirilen BMS ana modüllü a)ön yüz, b) arka yüz

### 2.2.2.2 BMS Ana Modül Test İşlemleri ve Ekran Görüntüleme

Tasarımı ve gerçekleştirilmesi tamamlanan BMS ana modül sistem üzerinden devreye bağlanmış ve BMS mini modül ile olan haberleşme ve bilgi görüntüleme testleri yapılmıştır. Tüm tasarım test işlemlerinden başarı ile geçmiş ve çalışır haldedir. Tasarımın önemli özelliklerinden birisi farklı özelliklerde batarya gruplarında kullanılma özelliğidir. Bu amaçla oluşturulmuş Setup ekranı üzerinden batarya hücrelerine ait özellikler girilebilmektedir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 BMS modülü setup ekranı

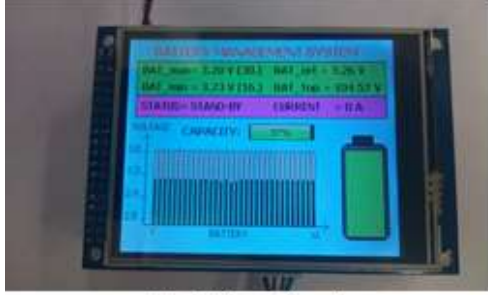
Ayrıca oluşturulmuş grafik ekranları üzerinden bataryaya ait birçok bilgi (nominal gerilim, batarya kapasitesi, sıcaklık değerleri vb.) ve durum okunabilmektedir. Şekil 2.12’de BMS modülüne ait bazı ekran görüntüleri verilmiştir.



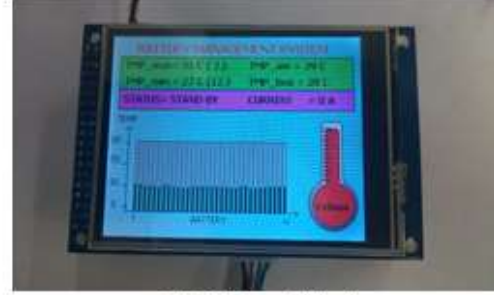
(a) BMS başlangıç ekranı



(b) BMS balans ekranı



(c) BMS gerilim ekranı



(d) BMS sıcaklık ekranı

Şekil 2.12 BMS ana modül görüntüleme ekranları

Tasarlanan sisteme ilişkin montajı yapılmış, alüminyum kutusu içiresine alınmış ve tamamlanmış haldeki batarya sistemi Şekil 2.13’de verilmiştir.



Şekil 2.13 Tasarım ve imalatı tamamlanmış batarya sistemi

### 2.3 Ultrakapasitör

Ultrakapasitörler (diğer adıyla süper kapasitörler) elektrikli araçta ikinci bir enerji depolama ünitesi olarak yer almakta olan bir bileşendir. Bu bileşen geliştirilmekte olan elektrikli araçta, faydalı frenleme ile açığa çıkan ani gücü depolamak üzere kullanılmıştır. Ultrakapasitörler ticari olarak modüler veya hücre olarak temin edilebilmektedir. Modüler olarak temin edilen yapılar standart bir gerilim ve sığa değerinde sahip olmaktadır. Maliyet açısından da pahalı olan bu modüller yerine projemizde hücre biçimindeki Ultrakapasitörler tercih edilmiştir. Böylece gerilim değeri ve sığa tasarım sonucunda proje ekibince tespit edilmiştir. Hücre boyutundaki Ultrakapasitörler içerisinde birleştirilmiş ve her hücrenin maksimum gerilim seviyesini aşmaması için aşırı gerilim koruma devresi yapılmıştır. Sonuçta, 81 Volt nominal gerilimli 21,67 Farad'lık ve aşağıda teknik değerleri verilen bir Ultrakapasitör bloğu oluşturulmuştur. Batarya hücresine ait teknik özellikleri Tablo 2.2'de, örnek bir resim ise Şekil 2.14'de, verilmiştir.

Tablo 2.2 Projede kullanılan BCAP0650 ultrakapasitörüne ait bazı teknik özellikleri.

<b>Nominal kapasite</b>	650 F
<b>Nominal hücre gerilim</b>	2,7 V
<b>Max. Hücre gerilimi</b>	2,85 V
<b>İç direnci</b>	0,8 mΩ
<b>Kapsite test akımı</b>	65 A
<b>Maksimum akım</b>	680 A
<b>Çalışma sıcaklık değerleri (Min. - Max.)</b>	-40 C <sup>0</sup> , 70 C <sup>0</sup>
<b>Çevrim ömrü</b>	>10.000
<b>Boyut (çap, uzunluk) (mm)</b>	51,5x60,4
<b>Ağırlık</b>	0,160 kg

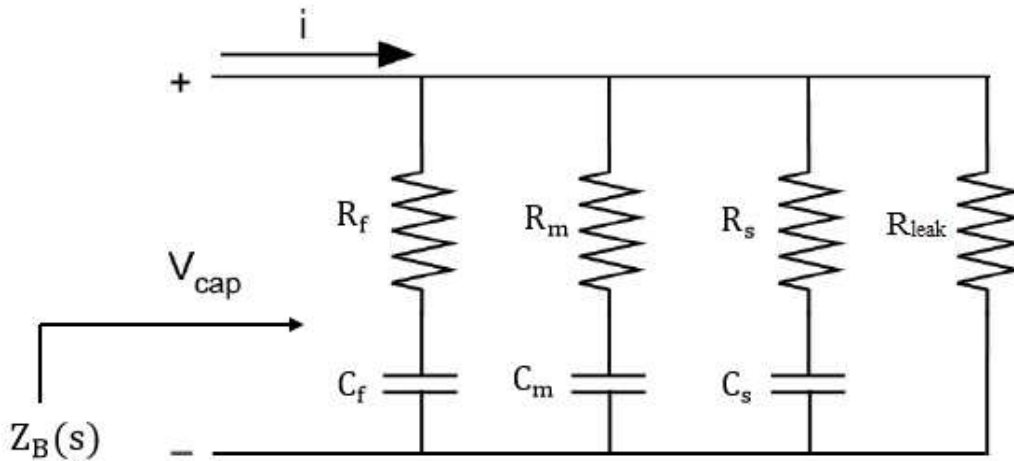


Şekil 2.14 BCAP0650 ultrakapasitör hücresine ait örnek bir resim.



Ultrakapasitör modülünün oluşturulmasında BCAP0650 P270 K049 tip ultrakapasitörden 30 adet hücre kullanılmıştır. Tüm hücrelerin seri bağlanması durumunda modülün sığası 21,67 F ve modülün toplam enerjisi 71088,44 (Joule)  $W_s = \frac{1}{2} .C.V^2 = 19,75$  Wh olmaktadır. Modülün rejeneratif moda alabileceği enerji miktarı ( $\frac{1}{4}V$  den  $V$ 'ye kadar ) 66645,41 (Joule)  $W_s = 18,51$  Wh olarak hesaplanmaktadır. Modülün seri direnci 24 m $\Omega$  ve toplam hücre ağırlığı 4,8 kg olmaktadır.

Tasarlanan araçta kullanılan ultrakapasitörlere ilişkin model referans Vural vd. (2009), Zubieta ve Bonert (2000), Shi ve Crow (2008) ve ultrakapasitörlerin kullanım kılavuzları (Ultracapacitor Product Guide) kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde kullanılan eşdeğer devre Şekil 2.15'de gösterilmiştir. Kullanım kılavuzu kullanılarak bu devrede yer alan değerlerin bulunması için gerekli olan denklemler de Tablo 2.3'de yer almaktadır (Shi ve Crow 2008). Kullanılan eşdeğer devredeki  $R_f$  ve  $C_f$  elemanlarından oluşan ilk dal "hızlı-terim dalı" olarak adlandırılır. Bu dal ultrakapasitörün birkaç saniyelik kısa zaman aralıklarındaki şarj ve deşarj davranışlarını temsil eder. İkinci dal ise  $R_m$  ve  $C_m$  elemanlarından oluşur ve "orta-terim dalı" olarak adlandırılır. Benzer şekilde bu dal da ultrakapasitörün birkaç dakikalık sürelerdeki karakteristiğine karşılık gelir.  $R_s$  ve  $C_s$  elemanlarından oluşan son dala ise "kısa-terim dalı" adı verilir. Bu dal da 10 dakikadan daha uzun sürelerdeki ultrakapasitörün uzun dönem karakteristiklerini temsil eder. Bu dallara paralel olarak yer alan son eleman  $R_{leak}$  ise kaçak direnci olarak isimlendirilir ve ultrakapasitörün haftalar mertebesindeki zamanlarda meydana gelen kaçaklarını modele dahil eder.



Şekil 2.15 Ultrakapasitör eşdeğer devresi.

Tablo 2.3 Ultrakapasitörün kullanım kılavuzundan eşdeğer devre parametrelerini elde etmek için gerekli olan denklemler.

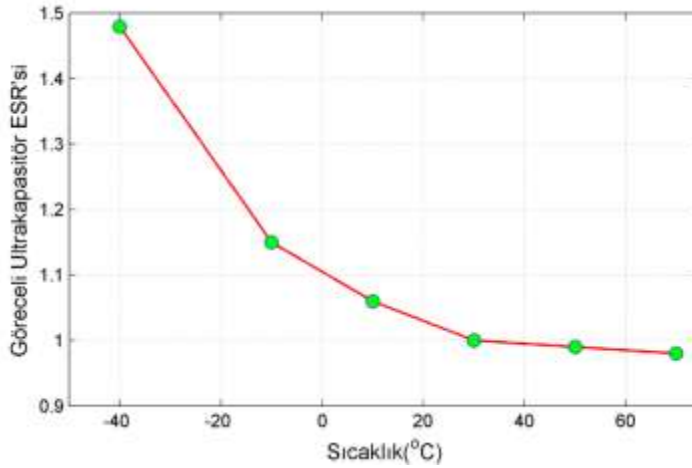
$R_f = \frac{2}{3} ESR$	$R_m = \frac{2}{3} \varphi^{-(2k-1)} ESR$	$R_s = \frac{2}{3} \varphi^{-(2k+1)} ESR$
$C_f = 1.05 C_0$	$C_m = 1.05 \varphi^{+(2j+1)} C_0$	$C_s = 1.05 \varphi^{+(2j-1)} C_0$
$\tau_f = \frac{2.1}{3} C_0 ESR$	$\tau_m = \frac{2.1}{3} \varphi^{+2(1+j-k)} C_0 ESR$	$\tau_s = \frac{2.1}{3}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

Tablo 2.3'de eşdeğer devre parametrelerini hesaplariken  $C_0$  ve ESR değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.  $C_0$  değeri kullanılan ultrakapasitörün kullanım kılavuzundan bulunabilir. Eşdeğer seri direnç (ESR) ise sıcaklığa bir hayli bağımlı bir değerdir. Bu sebeple sıcaklık düzeltme katsayısı (TCF) ile her sıcaklık için ayrı bir değer bulunmalıdır [Vural vd. 2009].

$$ESR(T) = TCF * ESR_{datasheet} \quad (2.3)$$

$$TCF(T) = -4.791 * 10^{-7} * T^3 + 8.54 * 10^{-5} * T^2 - 5.463 * 10^{-3} * T + 1.105 \quad (2.4)$$

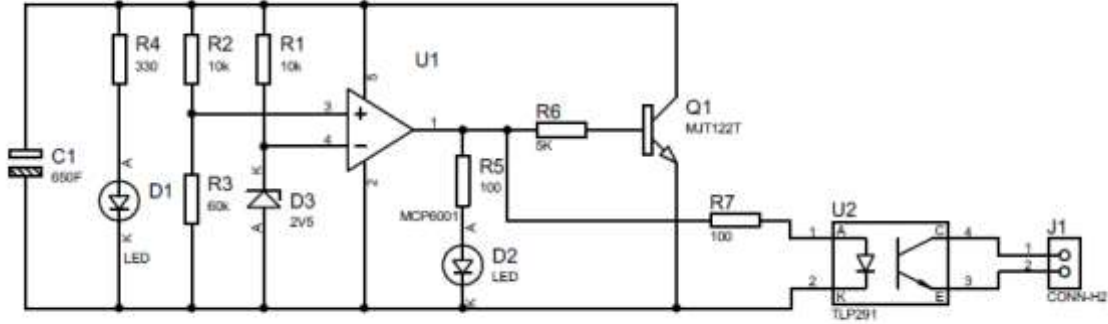
Burada  $T$  sıcaklık değeridir ( $^{\circ}C$ ). TCF denklemindeki katsayılar BCAP650P ultrakapasitörler için verilen kullanma kılavuzunda yer alan göreceli direnç değeri kullanılarak elde edilmiştir (Vural vd. 2009), (Ultracapacitor Product Guide). Böylelikle sıcaklığa bağlı ESR değeri denklem 2.3 ve 2.4 kullanılarak Şekil 2.16'daki gibi bulunmuş olur.



Şekil 2.16 BCAP650P ultrakapasitörler için sıcaklığa bağlı göreceli ESR grafiği.

### 2.3.1 Ultrakapasitör Yüksek Gerilim Koruma Devresi

Bilindiği gibi ultrakapasitörlerin BMS kadar karmaşık bir yönetim sistemine ihtiyacı olmasa da hücrelerin zarar görmemesi için aşırı gerilimlere karşı korunmaları gerekmektedir. Bu amaçla araçta kullanılacak Ultrakapasitörleri aşırı gerilimlerden korumak üzere Şekil 2.17'de devre şeması verilen bir koruma sistemi tasarlanmıştır.

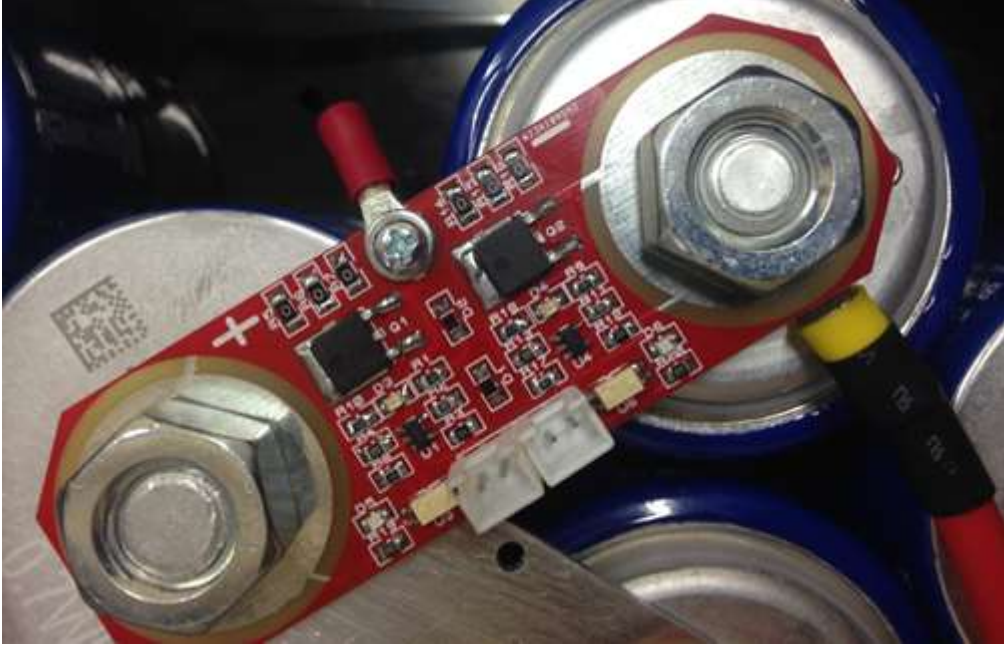


Şekil 2.17 Ultrakapasitör hücrelerini aşırı gerilimlerden korumak için tasarlanan devre şeması

Şekil 2.17'de gösterilen devrede voltaj referansı olarak 2.5V zener diyot kullanıldı. Ultrakapasitör gerilimi katalogta belirtilen üst sınır olan 2.8 V'a ulaştığında R2 ve R3 gerilim bölücü dirençlerinde 2.5 V'a düşürülüyor. Mcp6001 opamp ile giriş voltajı ile D3 zener diyot üzerindeki voltaj karşılaştırılıyor. Ultrakapasitör gerilim değeri 2.8V'u geçtiğinde Q1 transistörü anahtarlanarak ultrakapasitör gerilimi 2.8V sınırında durduruluyor. Gerilim seviyesi 2.8V olduğunda tlp291 opto izolatör ile ultrakapasitör sarj devresine uyarı sinyali gönderiliyor.

### 2.3.2 İmal Edilen Ultrakapasitör Modülü

Ultrakapasitör hücrelerini aşırı gerilimlerden korumak için geliştirilen devre ve ultrakapasitör üzerindeki montajlanmış durumu Şekil 2.18'de gösterilmiştir. Şekil 2.19'da da 30 tane Ultrakapasitör hücrelerinin araç üzerinde bir arada durmasını ve korunmasını sağlayan koruma kutusu görülebilir. Bu koruma kutusu sayesinde ultrakapasitörler de batarya hücreleri gibi araçta meydana gelebilecek olası dış etkilerden korunmuş olacaktır. Ayrıca hücrelerde meydana gelebilecek istenmeyen bir durum olduğunda aracın ve sürücünün olası zararlardan mümkün olduğunca az etkilenmesini sağlayacaktır.



Şekil 2.18 Ultrakapasitör hücrelerini aşırı gerilimlerden korumak için geliştirilen devre ve ultrakapasitör üzerindeki montajlanmış durumu



Şekil 2.19 Ultrakapasitör hücrelerini montajlı hali ve koruma kutusu



### 3. MAKSİMUM GÜÇ TAKİP SİSTEMİ VE FOTOVOLTAİK MODÜLLER

#### 3.1 Maksimum Güç Takip Sistemi

Fotovoltaik güneş enerji üretim sistemleri lineer olmayan bir elektriksel karakteristiğe sahiptir. Bu karakteristik üzerinde yüke, dönüştürücüye veya bataryaya sadece bir noktada maksimum güç transferi yapılabilir. Bu çalışma noktasına Maksimum Güç Noktası (MGN) denir (Messenger ve Ventre 2005). PV'lerde elektriksel karakteristik hücre sıcaklığı ve ışınım gibi çevresel şartların değişmesi ile değişmektedir. Şartlara bağlı olarak değişen bu karakteristik üzerinde maksimum güç noktasının yeri de değişmektedir. PV'lerden maksimum güç transferi yapabilmek için bu maksimum güç noktasının takibi gerekmektedir. Ayrıca PV sistemler direkt olarak yüke veya bataryaya bağlı olmaları durumunda, ilgili yük veya batarya geriliminde çalışmaya zorlanırlar. Fotovoltaik yapılardan yüke veya bataryaya maksimum güç aktarımı yapabilmek için panel gerilimini yük veya batarya profilinden bağımsızlaştıracak sistemlere ihtiyaç duyulur. Panelleri yük veya batarya gerilimlerinden bağımsız kılan bu kontrollü arabirime Maksimum Güç Takip Sistemi (MGTS) denir (Batchheller 1993).

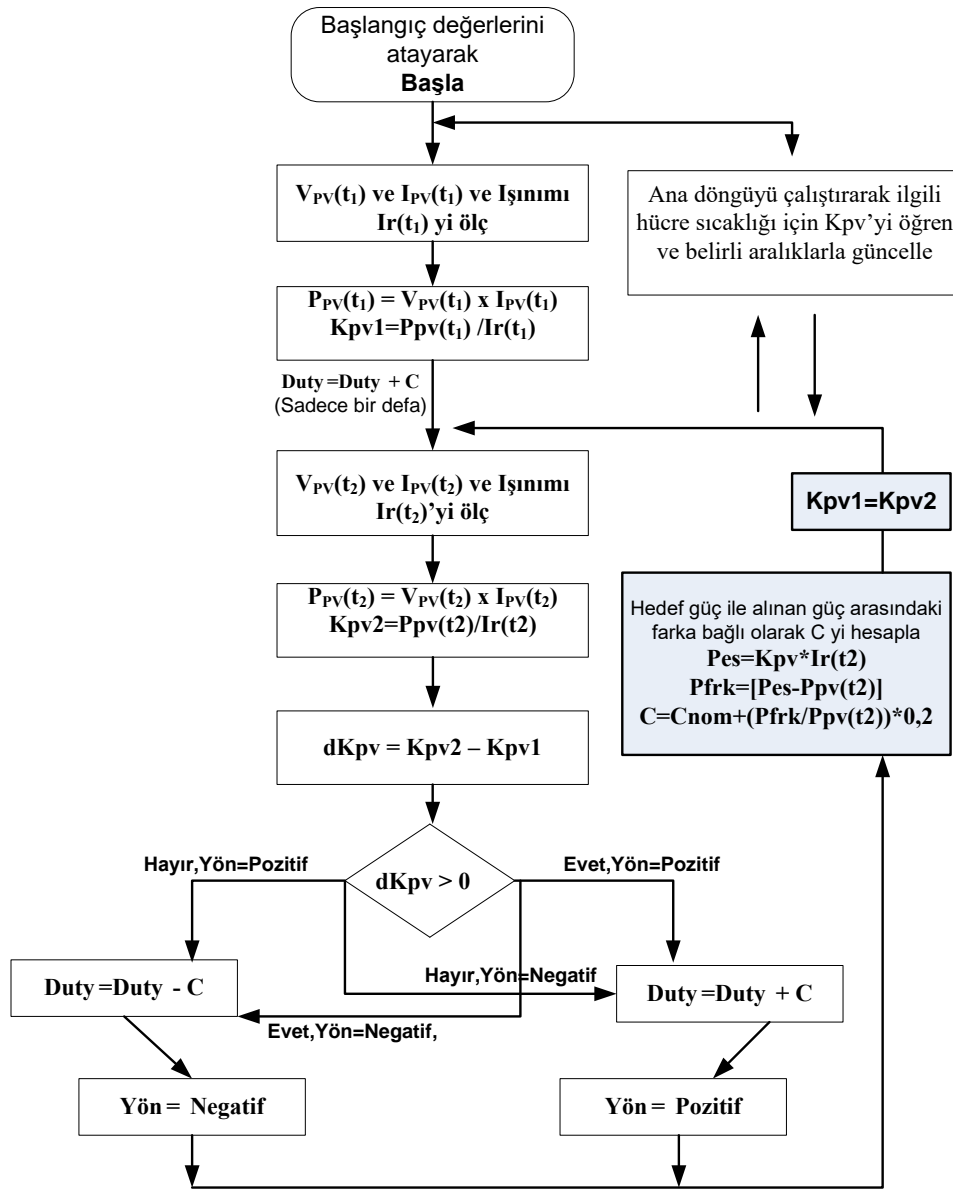
Fotovoltaik yapılarda sistemin maksimum güç noktasında çalışmasını engelleyen ışınım ve hücre sıcaklığından sonra üçüncü temel faktörümüz yük profilidir. Her ne kadar fotovoltaik sistemler doğrudan yüke bağlanmasa da genelde bağlı oldukları bir depolama sistemi veya evirici bulunmaktadır. Bu durumda çalışma, ilgili depolama ünitesi veya eviricinin kendi karakteristikleri ile PV yapının karakteristiğinin kesişiminde gerçekleşir. Bu kesişim noktası da her zaman sistemin maksimum güç noktası olmamaktadır. Fotovoltaik sistemlerde, yukarıda bahsedilen uyumsuzluklar nedeniyle oluşan kayıpları azaltmak için PV güneş panellerinden maksimum güç aktarımı yapmak üzere yapısında kontrol edilebilir bir DC-DC dönüştürücü barındıran elektronik devrelere ihtiyaç duyulur. Fotovoltaik panelleri yük veya batarya gerilimlerinden bağımsız kılan bu kontrollü arabirime "Maksimum Güç Takip Sistemi (MGTS -Maximum Power Point Tracker, MPPT)" denir (Nakir 2007).

MGTS'ler donanım ve yazılım olmak üzere iki bileşenlerine sahiptir. MGTS yazılımları maksimum güç takibini gerçekleştirmek üzere belirli bir algoritmayı uygulamak üzere tasarlanmıştır. MGTS'lerde bu işlevi yerine getirebilecek birçok algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmaların performans değerlendirmelerinde bulunan Hussein vd. IC (Incremental Conductance) algoritmasının özellikle değişken hava koşulları altında iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Ayrıca Hohm ve Ropp (2000) ile Hua ve Shen (1998) yaptıkları karşılaştırmalı deneylerde en yüksek verimliliği IC algoritmasının sağladığını ortaya koymuştur.

Yukarıda da bahsedildiği gibi yapılan çalışmalarda sabit konumlandırılmış (hareketsiz) PV yapılar için IC algoritmasının en iyi performans sonuçlarını verdiği görülmüştür. Elektrikli

otomobil gibi hareketli yapılarda ise çevresel şartlardaki değişimler çok hızlı olduğundan algoritmaların performans değerlendirmeleri ayrıca ele alınmıştır.

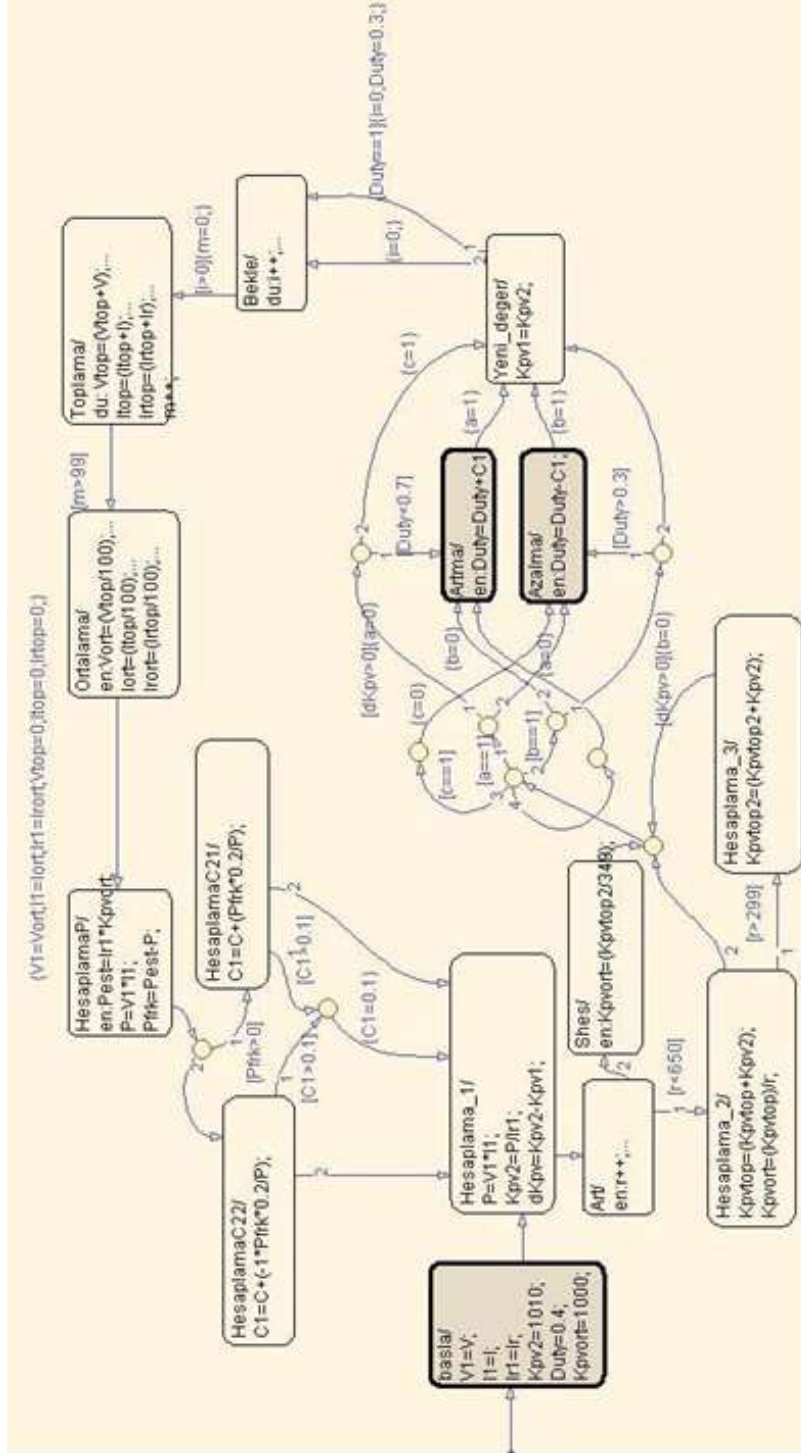
Elektrikli otomobiller için yapılan bu çalışmalarda, Pandey vd. (2008) elektrikli araç gibi uygulamalarda gölgelenme etkileri söz konusu olduğundan Delta P&O veya Hibrid algoritmanın enerji verimliliği yönüyle bu araçlar için daha uygun olduğunu belirtmiştir. Haseo ve Fujisawa (2008) ise gerçek bir test ortamında yaptığı deneylerde maksimum güç takibinde PCM (Power comparing Method)'lerin HCM (Hill Climbing Method)'lerden daha iyi olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca Nakir elektrikli araç gibi hareketli bir yapıyı simule eden bir test ortamında yaptığı çalışmalarda ortaya koyduğu yeni algoritmasının IC algoritmasından daha performanslı olduğunu belirtmiştir (Nakir 2012).



Şekil 3.1 MGTS algoritmasının akış şeması



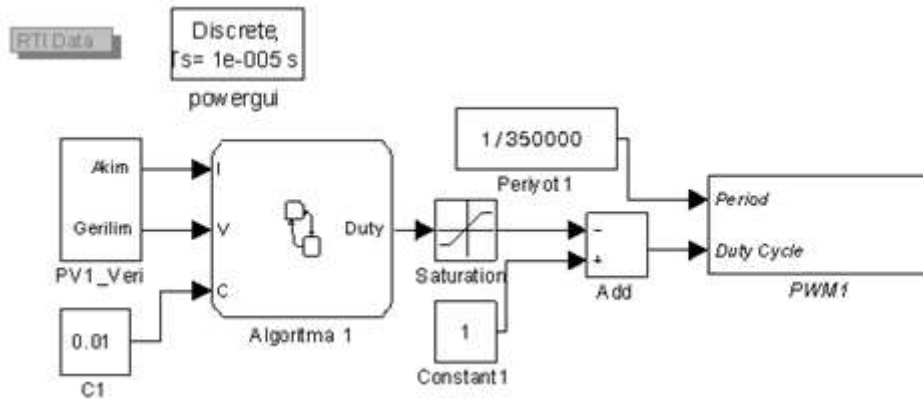
Proje kapsamında geliştirilmekte olan elektrikli aracın üst kısımlarına yerleştirilecek olan PV modüllerden elde edilecek gücü bataryaya aktarmak üzere bir MGTS tasarlanmıştır. Bu sayede PV modüller araçta bir enerji destek ünitesi olarak yer alabilmektedir. Tasarlanan MGTS devresi için geliştirilmiş olan bir algoritma proje öncesinde mevcuttu. Bu algoritmaya ait akış şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.2 MGTS algoritmasının MATLAB/Stateflow'da hazırlanmış akış şeması

Araçta kullanılacak MGTS tasarlanmadan önce prototip bir MGTS tasarlanmış ve yukarıda verilen algoritmayı uygulayabilmek üzere MATLAB/Stateflow'da akış şemaları düzenlenmiş ve yine algoritmayı gerçek ortamda çalıştırabilmek üzere bir elektronik devre tasarlanmıştır. MGTS algoritmasına ait MATLAB/Stateflow'da hazırlanmış akış şeması Şekil 3.2'de verilmiştir.

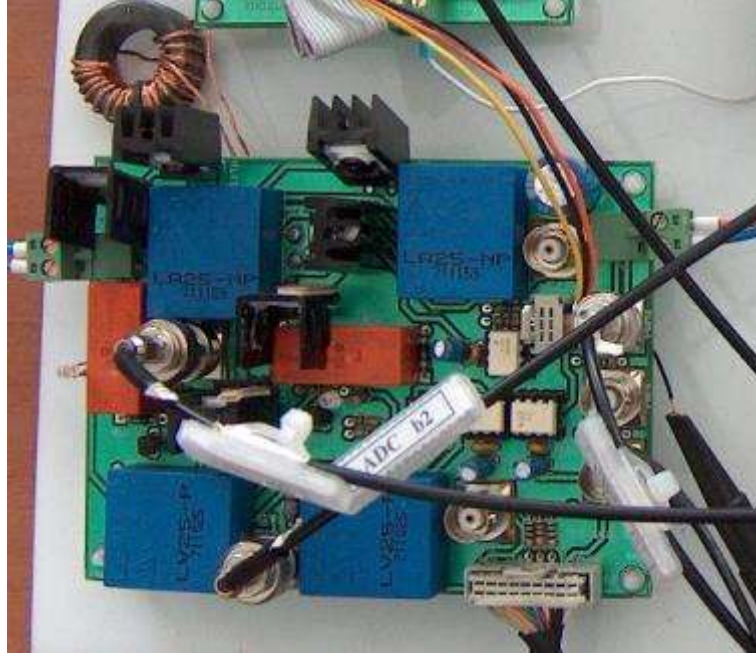
Yazılımsal olarak yukarıda gösterilen şemayı işletmek üzere kontrolör olarak dSpace Micro Autobox kullanılmıştır. MGTS için algoritma yazılımları Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuştur. MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan kontrol diyagramı Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3 MGTS kontrol diyagramı

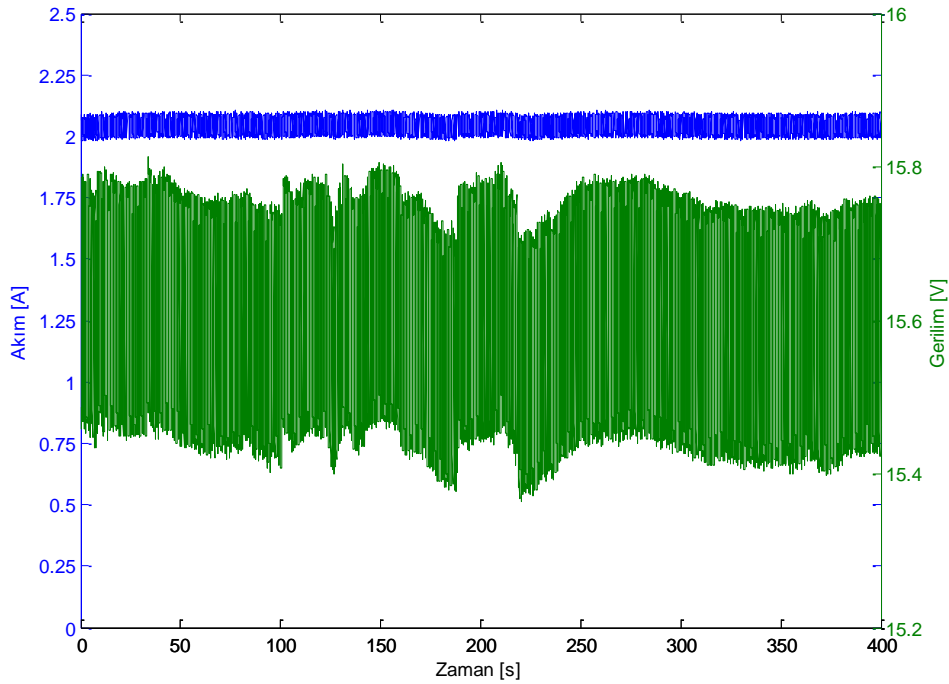
Yukarıda verilen kontrol diyagramında elde edilen PWM sinyallerini DC/DC dönüştürücüde kullanabilmek ve yine kontrol sistemine gerekli olan akım, gerilim verilerini iletmek üzere prototip bir devre geliştirilmiştir. Bu devrede PV gerilimi batarya geriliminden daima düşük olduğundan, devredeki DC/DC dönüştürücü yükseltici tip seçilmiştir. Devredeki elektronik anahtarlar da sistemin 40 V- 50 V seviyelerinde gerilim, maksimum 3 A seviyelerinde akım ve 35 kHz gibi anahtarlama frekansına sahip olmasından ötürü MOSFET olarak tercih edilmiştir. Kullanılan MOSFET'lerin iletim kayıplarının sistem verimliliğini en az oranda etkilemesi için Rds (on) değeri düşük olan MOSFET'ler arasından bir seçim yapılmıştır. Bunun için firmaların kataloglarında 50 V seviyelerinde düşük gerilimli 150 A seviyelerinde yüksek akımlı MOSFET'ler içerisinde bir seçim yapılmış IXTP182N055T kodlu MOSFET devrede elektronik anahtar olarak tercih edilmiştir. MOSFET'leri 35 kHz'de sürmek üzere FOD3180 kodlu MOSFET sürücüler seçilmiştir. Yükseltici (Boost) tipte DC/DC dönüştürücü için gerekli endüktans elemanı da "Power Electronics Expert" adlı bilgisayar programı yardımıyla 520 µH olarak seçilerek verilen devrenin şematik tasarımı Altium Designer Programında yapılmıştır. Tasarlanan devreye ait fotoğraf Şekil 3.4'te verilmiştir.





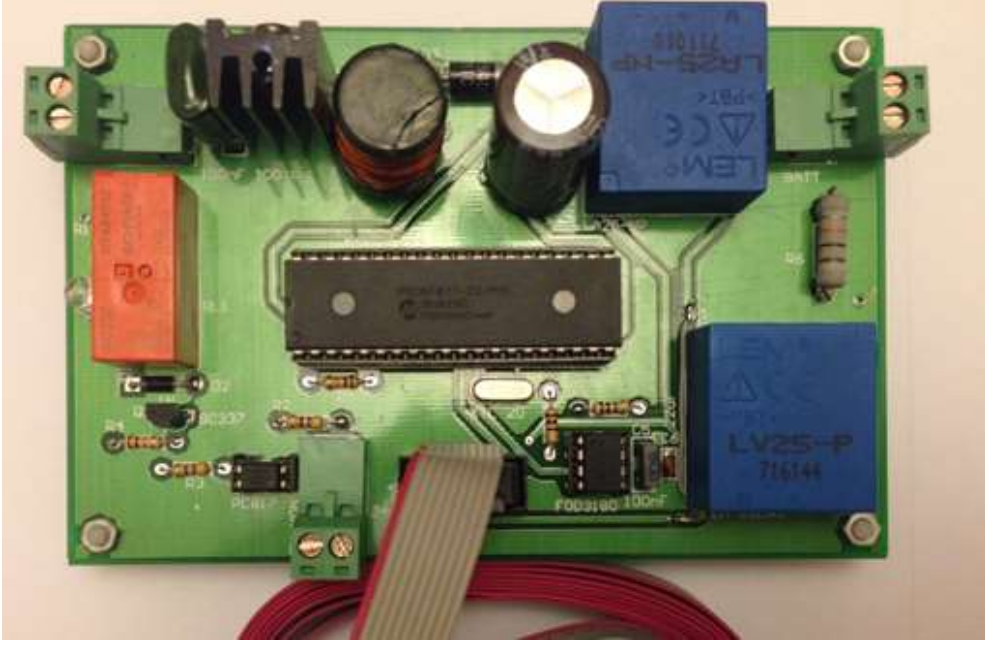
Şekil 3.4 Prototip MGTS devresi

MGTS'ye ait tüm bileşenleri denemek üzere 50 Wp değerine sahip bir PV panel ile deneyler yapılmıştır. Yapılan bu deneyler ışığında bazı modifikasyonlar yapılmış ve sonunda tüm bileşenleri çalışan bir MGTS ortaya konulmuştur. Bu MGTS'ye ait deney sonucu elde edilen PV akım ve gerilim grafiği Şekil 3.5'de verilmiştir.



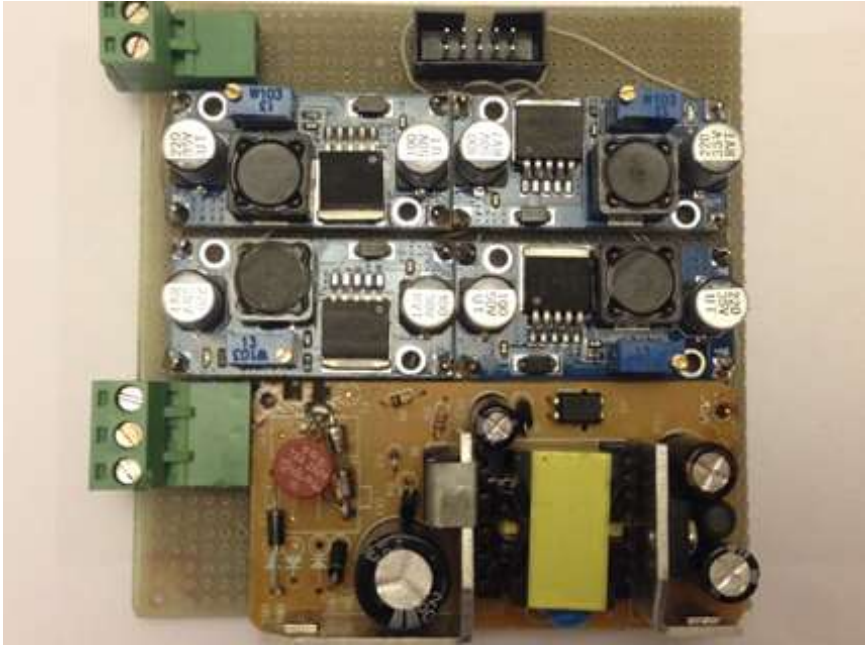
Şekil 3.5 MGTS bağlı panele ait akım ve gerilim grafikleri





Şekil 3.7 İkincil MGTS'nin fotoğrafı

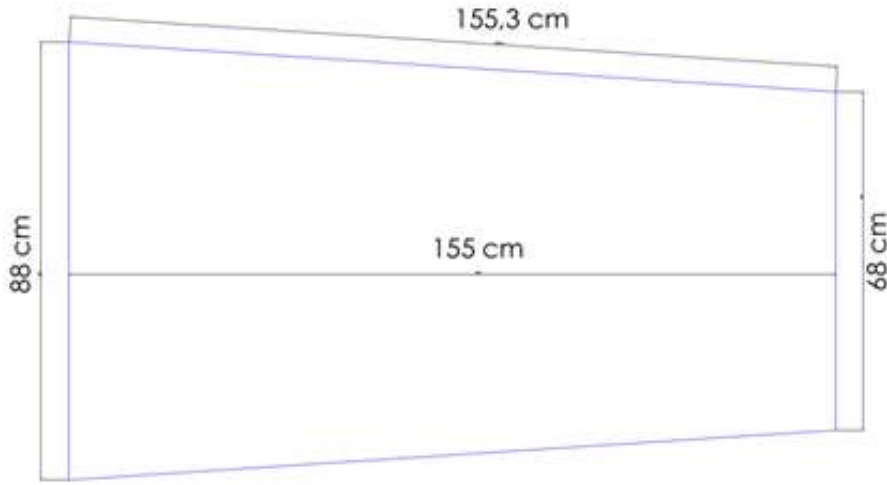
Ayrıca ikincil MGTS'nin araç üzerinde çalışabilmesi için farklı gerilimde DC kaynaklara ihtiyaç duyduğundan bir adet çoklu gerilime sahip DC/DC dönüştürücü yapılmıştır. Bu dönüştürücüde biri izole olmak 4 farklı gerilime (+5, +15, +12, 12, -15) dönüşüm +12 V ve batarya geriliminden (96V-116V) sağlanmaktadır. Bu dönüştürücüye ait fotoğraf Şekil 3.8'de verilmiştir.



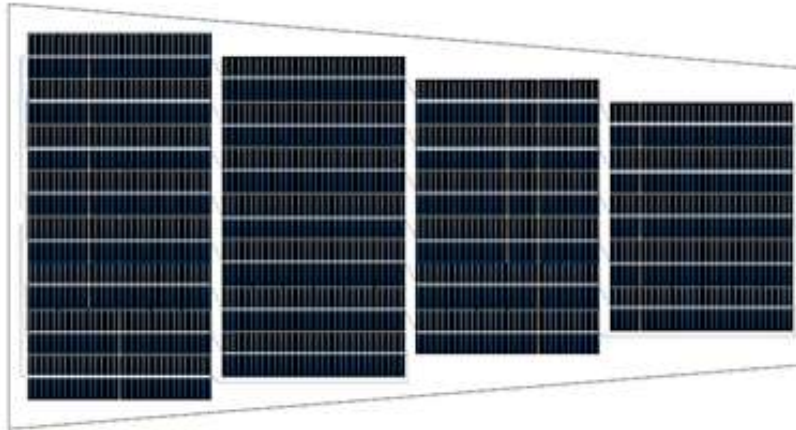
Şekil 3.8 Sistemin beslenmesi için oluşturulan güç kaynağı

### 3.2 Fotovoltaik Paneller (PV)

Fotovoltaik (PV) güneş panelleri elektrikli araçta bir enerji destek ünitesi olarak yer almıştır. Bu paneller aracın üst kısımlarına yerleştirilmiştir. Böylece aracın gün içerisinde yavaş bir şekilde bataryasını doldurabilmesi ve menzilin artırılması sağlanmıştır. Geliştirilmiş olan araca ek enerji kazandırmak için aracın üzerine yerleştirilecek olan fotovoltaik panellerin boyutları aracın boyutları netleştikten sonra belirlenmiştir. Aracın özellikle tavanında yer alacak PV'nin laminasyon tasarımı yapılmış, sonuçta boyutları ve yerleştirme düzeni Şekil 3.9'da verilen bir panel üretimi yaptırılmıştır. Oluşturulan panelin teknik özellikleri;  $V_{mpp}= 75.4V$ ,  $I_{mpp}=1.4 A$ ,  $P_{mpp}= 105 W$ ,  $V_{oc}= 88.14V$  ve  $I_{sc}=1.42A$  olarak özetlenebilir.



(a)



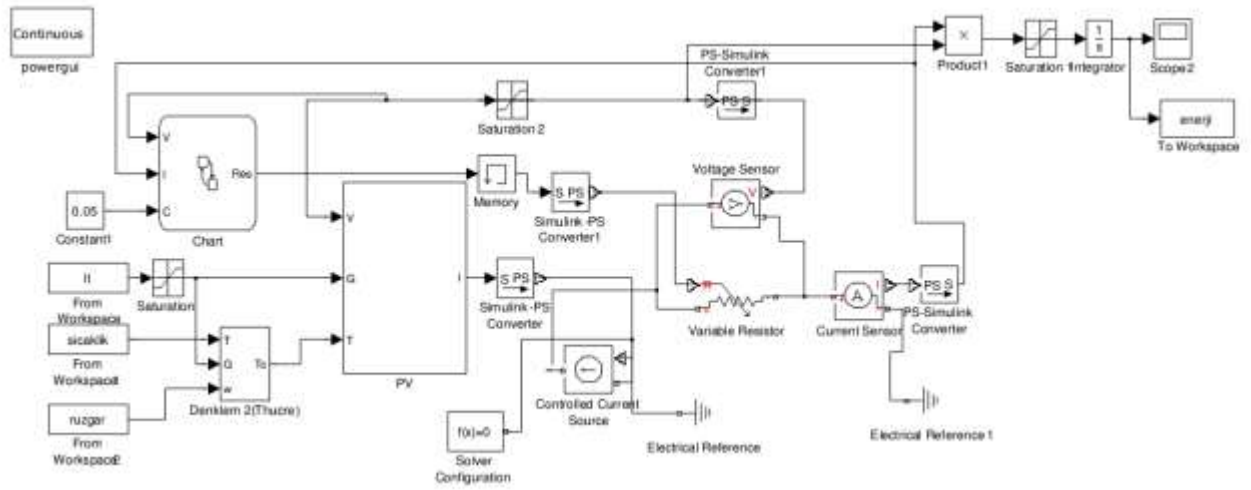
(b)

Şekil 3.9 Aracın tavanına yerleştirilecek olan a) PV'nin boyutları ve b) oluşturulan PV

Aracın tavanına yerleştirilmesi planlanan bu PV için 140 adet hücre birbirine seri bağlanmış, böylece aynı güç için akım seviyesi düşürülmüş ve gerilim seviyesi artırılmıştır. Sonuç olarak, MGTS'nin daha az kayıpla güç dönüşümünü sağlamasına imkan tanınmıştır. Normalde PV

laminasyonunda kullanılan hücrelerin güç değerleri 4,8 W seviyelerinde olmasına karşın bizim tasarımımızda kullanılan hücrelerin ortalama gücü 1,6 W seviyelerinde seçilmiştir. Bunun için hücreler lazerle 3 parçaya ayrılmış ve parçaların hepsi birbirine seri bağlanarak kullanılmıştır. Ayrıca laminasyonda kullanılan cam yüzey 2 mm seviyesinde seçilerek panelin, dolayısıyla da aracın ağırlığı düşürülmüştür.

PV'ye ait fiziki tasarımdan sonra ilgili PV'nin güç yönetimindeki davranışını gözlemleyebilmek üzere PV+MGTS'nin davranışını ortaya koyan bir MATLAB/Simulink benzetimi oluşturulmuştur. İlgili benzetim hem PV, hem de MGTS'nin birlikte çalışmasını gösteren tümleşik bir benzetimdir. Bu benzetimin blok şeması Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 PV+MGTS benzetimine ait MATLAB/Simulink'te oluşturulan blok şema

Bu benzetim modeli mono kristal ve poli kristal silikon PV yapıları için ayrı ayrı test edilmiş ve gerçeğe uygunluğu doğrulanmıştır. Bu modelin en önemli avantajı katalog bilgilerine sahip olduğunuz herhangi bir PV'ye uyarlanabiliyor oluşudur. Uygulamada karşılaşılan en büyük problem ise araç üzerindeki ilgili panele gelen ışınımın her zaman net olarak hesaplanamıyor oluşudur.



#### 4. ŞARJ ÜNİTESİ TASARIMI

Proje geliştirme aşamasında LiFePO<sub>4</sub> (96 Volt, 36 Ah) bataryalarını şarj edilmesi işleminde bölümümüz envanterinde bulunan Megan Wall PB360 serisi ticari batarya şarj cihazı kullanılmıştır. Bu cihazlar 48 V'luk şarj aletleri olup iki cihazı seri bağlanmasıyla şarj işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Bu amaçla kullanılan şarj cihazının resmi Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu cihaza ait teknik özellikleri kısaca şu şekilde özetlenebilir. Çıkış özellikleri; ayarlanabilir gerilim aralığı 52-58,6 V, tavsiye edilen batarya şarj kapasitesi 20-65 Ah, çıkış akımı 6,25 A vb. Cihaz için giriş parametreler; besleme gerilimi 220 V, frekansı 50 Hz, güç faktörü >0,65, verim %87, şebekeden çekilen akım tam yükte 3,5 A olarak özetlenebilir. Ayrıca cihazın kısa devre, aşırı gerilim, aşırı sıcaklık ve ters kutup koruma yapabilmektedir.

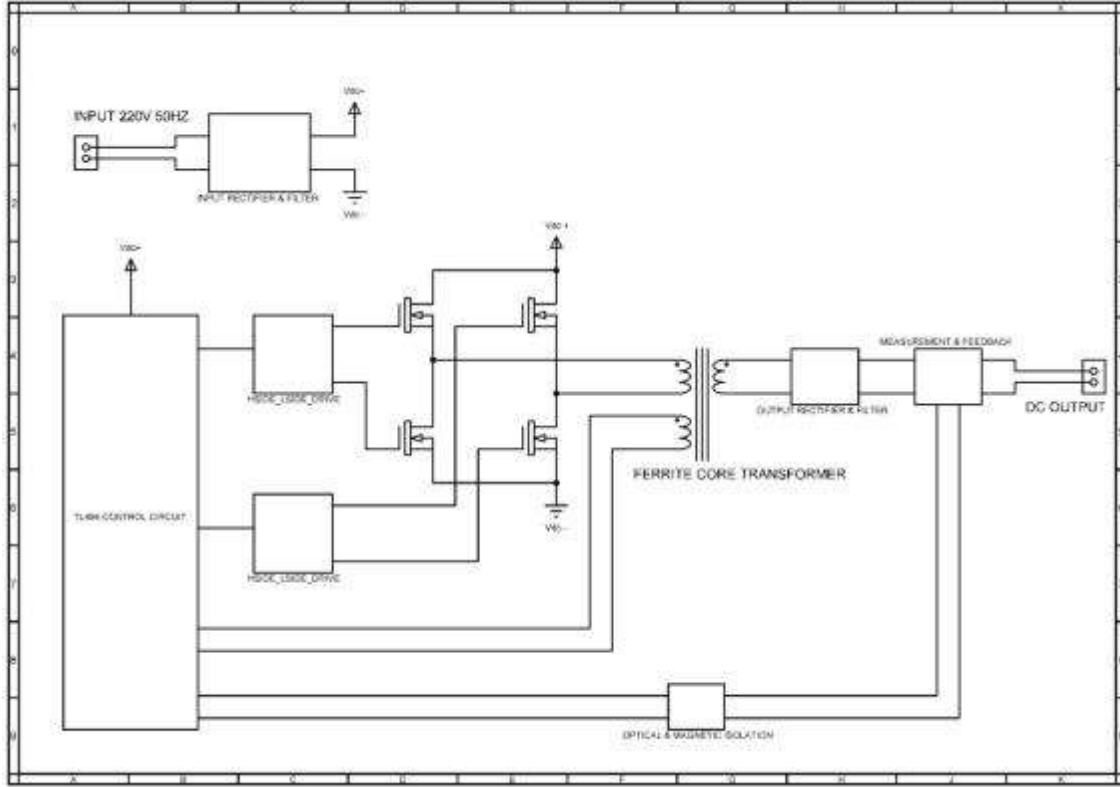


Şekil 4.1 Mean Well PB360 serisi batarya şarj cihazı

##### 4.1 Dahili Şarj Sistemi

Proje kapsamında dahili şarj devresi 96 Volt DC gerilime sahip olan LiFePO<sub>4</sub> batarya grubunu şarj edecek şekilde planlanmıştır. Bu amaçla 1.1kW güç kapasitesine sahip çıkış gerilim 110 Volt DC olacak şekilde bir tasarım ele alınmıştır. Şarj devresi 10 A çıkış akımı vermektedir. Devre 230V 50Hz şebeke geriliminde çalışmaktadır. Şarj elemanı ferit nüveli trafosu sürmek için tam köprü güç devresi kullanılmaktadır. Devrenin akım ve gerilim çıkışları yalıtımlı devrelerle takip edilmekte ve ölçülmektedir. ACS712 entegre devresi çıkış akımını ölçümlmek için ve TLP 281 entegre devresi çıkış gerilimini yalıtımlı bir şekilde ölçümlmek için kullanılmıştır. Yalıtımlı bir şekilde ölçümlenen akım ve gerilim dataları kontrol devresine aktararak şarj edilen pilin zarar görmesi engellenmektedir. Tam köprü trafo devresinin kontrolü için TL494 entegresi kullanılmıştır. Tam köprü güç katında ihtiyaç olan yalıtımlı gerilim kaynakları için bootstrap yönteminden faydalanılmıştır. Bootstrap tekniği ve ölü zaman üretimi için (tam köprü devresinde üst kol ile alt kolun aynı anda iletme geçerek kısa devre olmasını engellemek için) IR21084 özelleştirilmiş entegre devresi kullanılmıştır. Şarj ünitesinde kullanılan trafo 100kHz hızında Darbe Genlik Modülasyonu sinyaliyle sürülmüştür.

Şarj ünitesi şebeke gerilimine ilk bağlandığında (giriş kondansatörü boş iken) giriş kondansatörünü yavaşça dolduracak şekilde özelleştirilmiş bir devre kullanılmıştır. Tasarlanan dahili şarj ünitesinin ana şeması Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Tasarlanan dahili şarj devresi ana blok şeması

## 4.2 Dahili Şarj Sistemi Devre Tasarımı:

### 4.2.1 Dönüştürücü

Şarj devresi 230 V, 50 Hz alternatif akım şebeke gerilimiyle besleneceği için öncelikle bu şebeke gerilimi doğrultulup filtrelenerek doğru akım gerilime dönüştürülecektir. Doğrultulup filtrelenen şebeke gerilimi yaklaşık olarak bize 320 V doğru akım gerilimi verecektir. Fakat bu gerilim aküleri doldurmak için yok yüksektir. Aküler maksimum 114 V gerilimde şarj edildiğinden 320 V'luk doğru akım gerilimini düşürmek gerekmektedir. Bu sebeple şarj devresinde dönüştürücü kullanılmaktadır.

Dahili şarj sistemi tasarımına ait teknik özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir. Dönüştürücüye ait tasarım özellikleri bu tabloda ki değerlere göre belirlenmiştir. Bilindiği üzere anahtarlama frekansının uygun seçimi cihaz boyutlarını küçülmektedir. Bu nedenle anahtarlama frekansının 100 kHz seçilmesiyle dönüştürücü devresinde kullanılacak eleman boyutları daha da küçülmektedir.

Tablo 4.1 Dahili şarj sistemi tasarımına ait teknik tasarım özellikleri

Özellik	Değer
Alternatif Akım Giriş Gerilimi	230 V (50 Hz)
Çıkış Gücü	1100 W
Çıkış Gerilimi	110 V
Çıkış Akımı	10 A
En Az Doğru Akım Giriş Gerilimi	200 V
En Çok Doğru Akım Giriş Gerilimi	375 V
Dönüştürücü Anahtarlama Frekansı	100 kHz
Dönüştürücünün Tahmin Edilen Verimi	% 90
Çıkış Gerilim Salınımı	% 3
Çıkış Akım Salınımı	% 12
Darbe Genlik Modülasyonu En çok İş Oranı	% 45
Kontrol Devresi Gerilimi	15 V

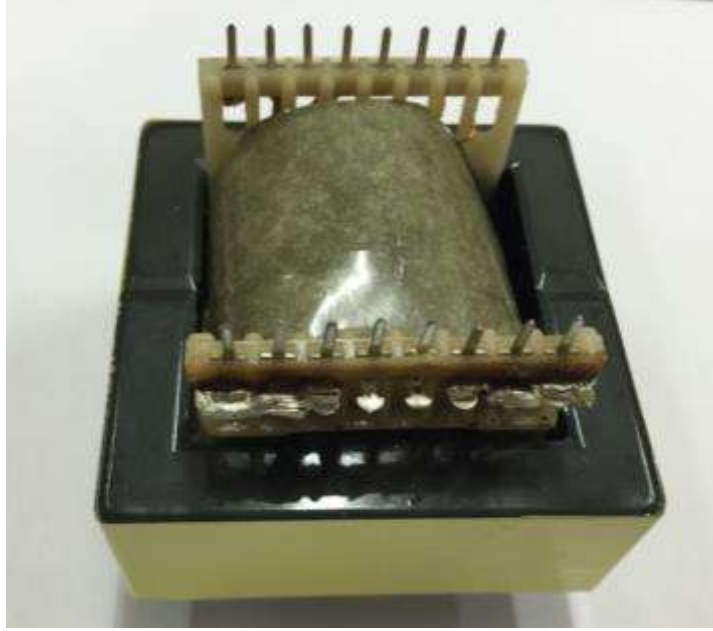
#### 4.2.2 Trafo tasarımı

Tablo 4.1’de belirtilen özellikler dikkate alınarak şarj devresinde kullanılacak trafo tasarımı yapılabilmektedir. Bu tasarıma uygun Ferrit Nüve modeli EE65/27 olarak seçilmiştir. Bu trafo 1 giriş 2 çıkış sarımına sahiptir. Çıkış sarımlarından ilki bataryaları şarj edecektir. Trafodan aktarılan gücün büyük bir çoğunluğu ilk sarımdan geçecektir. İkinci sarım kontrol devrelerinin beslemesinde kullanılacaktır. Hesaplamalar sonucu ilk sarım 19 tur, ikinci sarım 15 tur üçüncü sarım ise 2 tur olarak sarılmıştır. Tasarımı yapılan trafoya ait sarım şeması Şekil 4.3’de üretimi tamamlanan trafo ise Şekil 4.4’de verilmiştir. Ayrıca akım gücüne göre her bir sarımdaki bakır kalınlığı hesap edilmiştir.



Şekil 4.3 Tasarlanan trafo sarım şeması

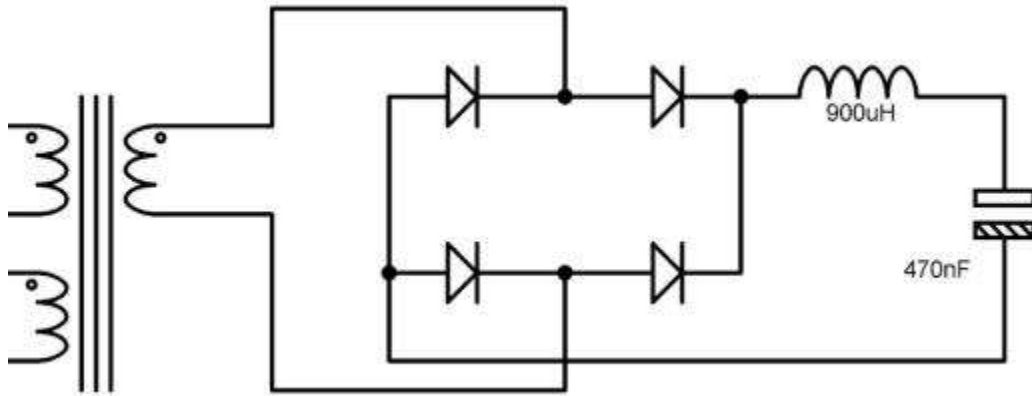




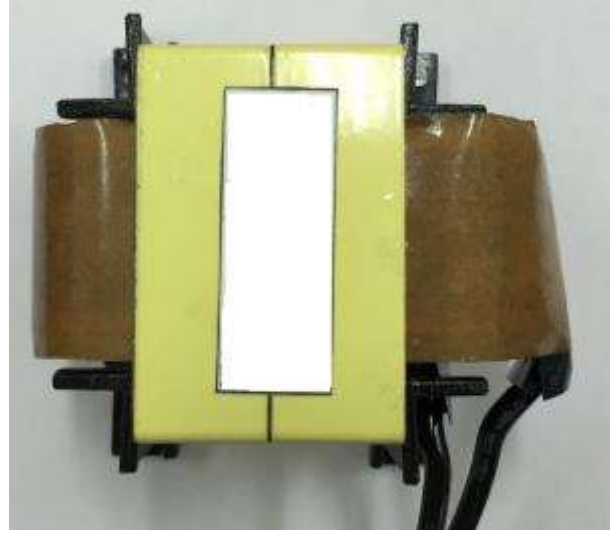
Şekil 4.4 Üretimi tamamlanmış trafo

#### 4.2.3 Çıkış Doğrultucusu ve Filtre

Tasarlanan dahili şarj devresi ana blok şemasında (Şekil 4.1) görülen trafonun AC gerilime sahip çıkışı doğrultulup filtrelenmektedir. Doğrultulma işlemi için çok hızlı diyotlar kullanılmaktadır. Doğrultma işleminden sonra çıkış gerilimini filtrelemek için bir bobin ve kondansatörden faydalanılmıştır. Dönüştürücü özelliklerinden çok hızlı diyotlar 200 V 15 A seçilmiştir. Sabit akım modu ve %12 akım salınımı göz önüne alındığında çıkış filtresindeki bobin 900uH, %3 gerilim salınımı için çıkış kondansatöründe 470nF olarak hesaplanmıştır. Çıkış doğrultucusu ve filtreye ait blok şema Şekil 4.5’de imalatı gerçekleştirilen çıkış filtre bobini ise Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



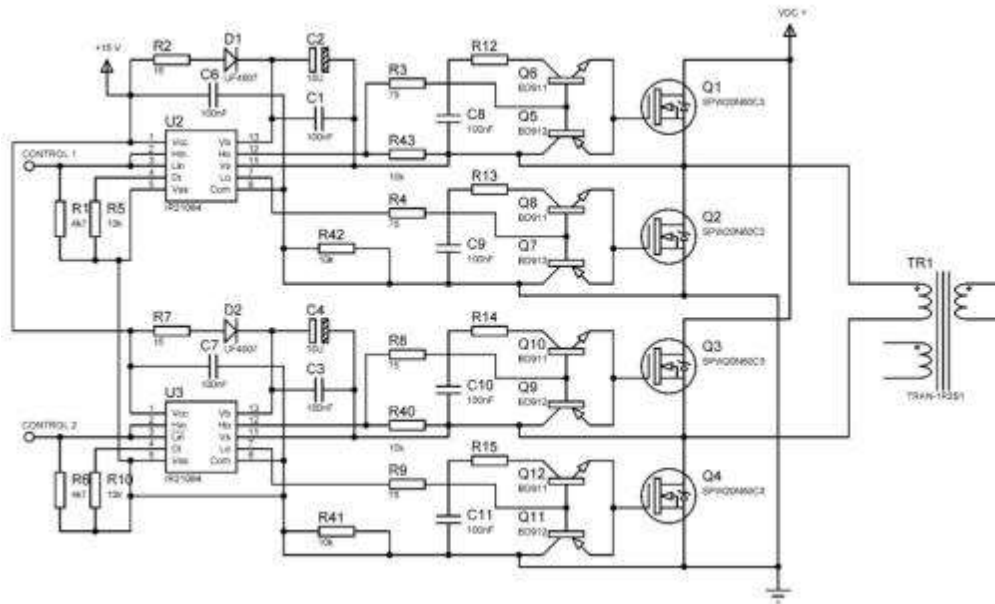
Şekil 4.5 Çıkış doğrultucusu ve filtre



Şekil 4.6 Çıkış filtre bobini

#### 4.2.4 Güç Devresi Tasarımı

Dönüştürücü 100 kHz gibi yüksek hızlı anahtarlama frekansı ile çalışacağı için bu yüksek hızlı frekansta çalışmaya en uygun eleman Mosfet'tir. Ayrıca bu dönüştürücüde Tam Köprü sürme devresi kullanıldığı için anahtarlama elemanları yüksek gerilim stresine maruz kalmamaktadır. Bundan ötürü 600 V'luk Mosfetler bu devrede kullanılabilir ideal elemanlardır. Hesaplamalar sonucunda dönüştürücü tam güçte çalışırken anahtarlama elemanının üzerinden 8 A akmaktadır. SPW20N60C3 Mosfet elemanı tam köprü sürücü devrenin ihtiyaçlarını karşılamaktadır.

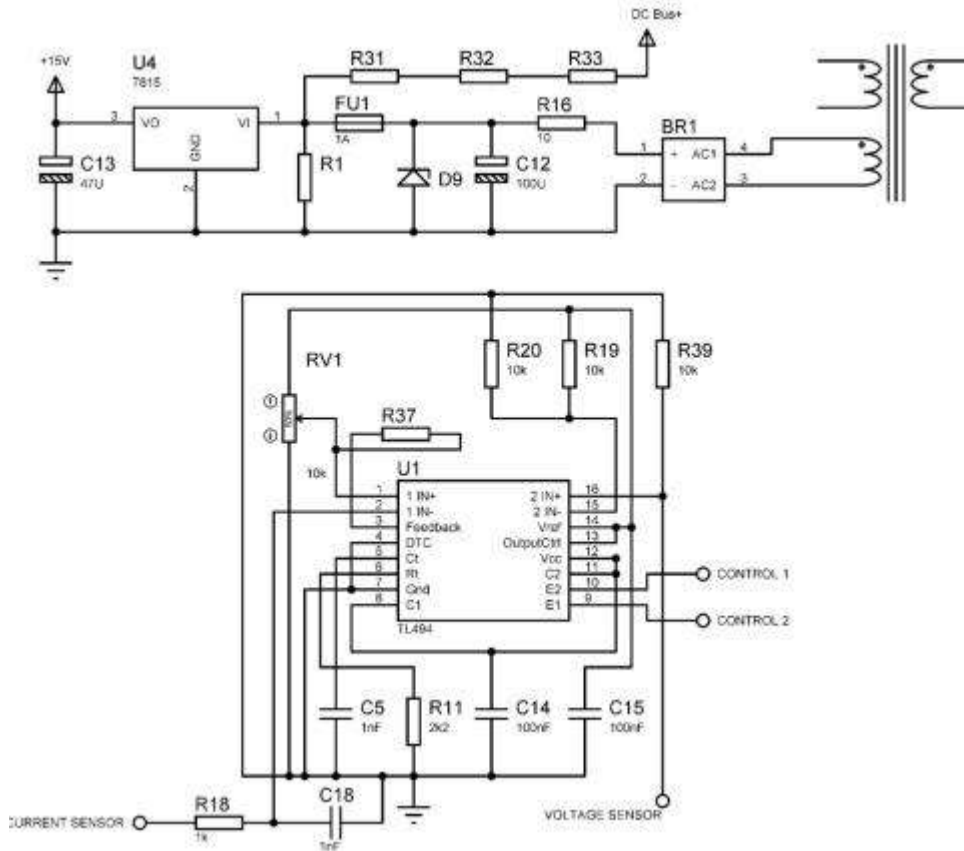


Şekil 4.7 Güç ve mosfet sürücü devresi

Tam köprü devreyi kontrol etmek için iki adet yarım köprü yüksek alçak Mosfet sürme entegre devresi IR21084 kullanılmıştır. IR21084 bootstrap tekniği ile çalışmakta ayrıca çok kullanışlı olan ayarlanabilir ölü zaman süresine sahiptir. Güzel özelliklerinin yanı sıra entegre devre Mosfet'leri yeterince hızlı sürememektedir. Bu sebeple IR21084'ün çıkışları totem pole transistör devresiyle güçlendirilmiştir. Güç ve sürücü devresi şeması Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Bu şemaya ek olarak her bir Mosfet için bastırma devresi eklenmiştir.

#### 4.2.5 Kontrol Entegre Devresi ve Güç Kaynağı

Dönüştürücüde 100 kHz anahtarlama sinyali üretmek, çıkış gerilimini ve akımını kontrol etmek için TL494 entegre devresi kullanılmıştır. TL494 az harici devre elemanı ile kullanılabilen basit bir entegre devredir. 300 kHz'e kadar anahtarlama sinyalleri üretebilmesi ve 2 ayrı hata tespitine yarayan 2 ayrı giriş hata kuvvetlendiricisine sahip olması bu entegre devreyi çok kullanışlı kılmaktadır.



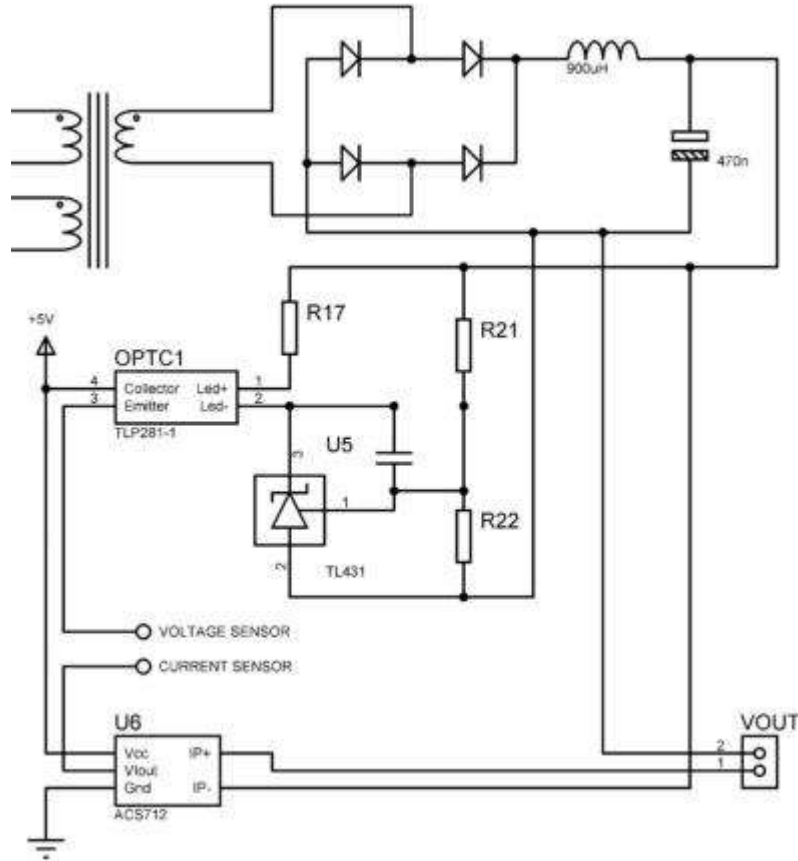
Şekil 4.8 Kontrol entegre devresi ve güç kaynağı

TL494 kontrol entegre devresi 15V gerilim kaynağıyla çalışmaktadır. İlk çalışma gücünü DC baradan karşılayan TL494 kontrol devresi, daha sonra kullandığı gücünü trafonun düşük güçlü ikinci çıkış sargısından sağlamaktadır. TL494 kontrol entegre devresi ve güç kaynağına ait şema Şekil 4.8'de verilmiştir.

#### 4.2.6 Akım ve Gerilim Geri Besleme Devresi

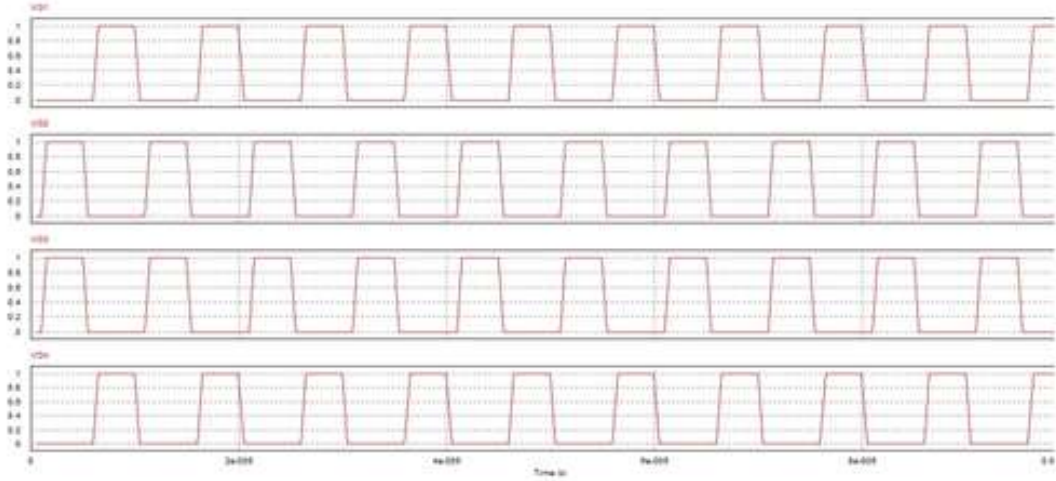
Bu devrede akım ve gerilim geri beslemelerinin her ikisi yalıtımlı bir şekilde TL494 kontrol devresine ulaşmaktadır. Gerilim geri beslemesi optik, akım geri beslemesi ise manyetik olarak çıkış devresinden yalıtılmıştır.

Çıkış akımını ölçülemek için ACS712 alan etkili entegre devre sensörü kullanılmıştır. Dönüştürücünün çıkışından akan akıma göre ACS712 devresi analog gerilim sinyali üretmektedir. ACS712 devresinin ürettiği gerilim sinyali TL494 kontrol devresinde referans akımıyla karşılaştırılmaktadır. Referans akım değerine bağlı olarak TL494 devresindeki kontrol sinyalleri değişmekte ve dönüştürücünün çıkış akımı ayarlanabilmektedir. Çıkış gerilimi TL431 ayarlanabilir şönt düzenleyici entegre devresiyle ölçülünerek optik yalıtım sağlayan TLP281 entegre devresiyle TL494 kontrol devresine aktarılmaktadır. TL431 entegre devresi bünyesinde barındırdığı referans gerilimiyle, gerilim bölücü dirençler kullanılarak üretilen çıkış gerilim sinyalini karşılaştırmaktadır. Karşılaştırma sonucunda üretilen sinyal optik yalıtım entegresi TLP281 ile TL494 kontrol devresine ulaştırılır. Akım ve gerilim geri besleme devresinin şeması Şekil 4.9'da verilmiştir.

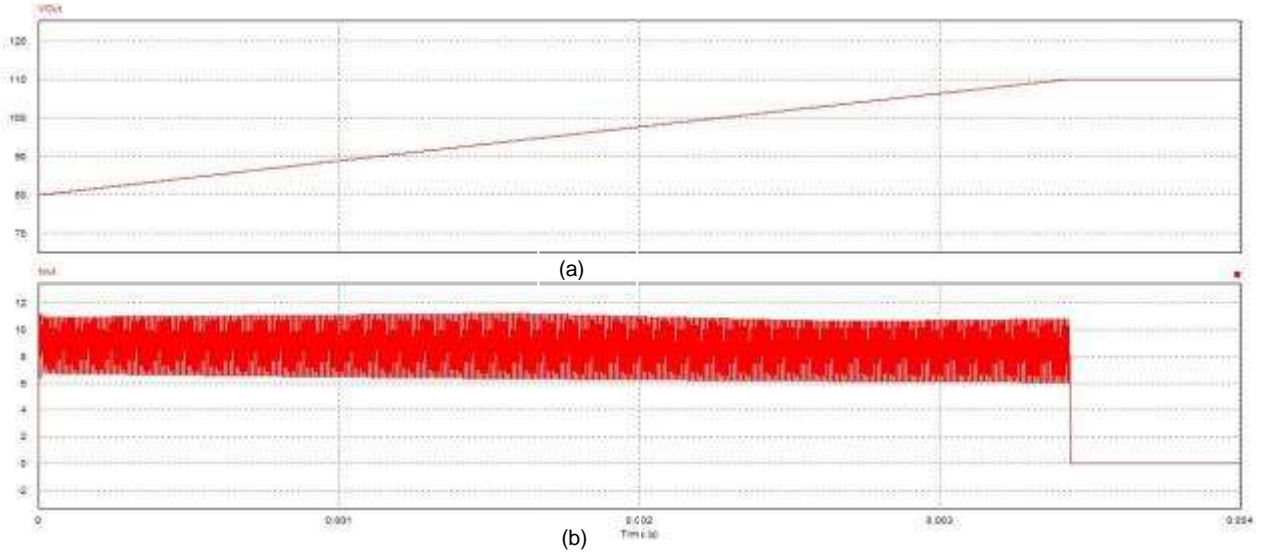


Şekil 4.9 Akım ve gerilim geri besleme devresi





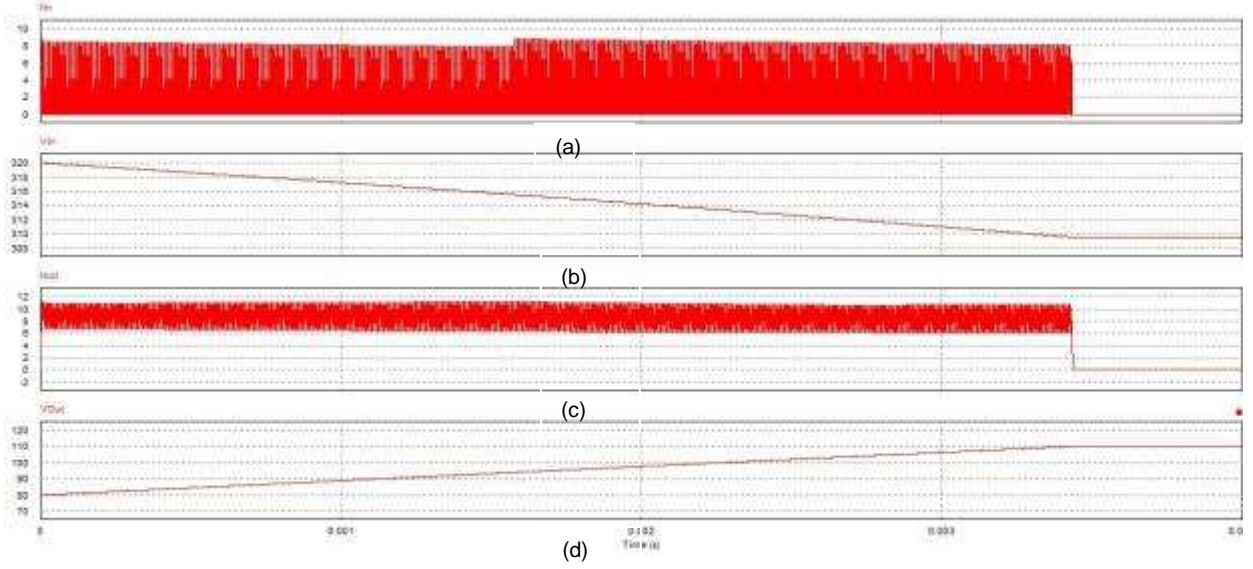
Şekil 4.11 Sırasıyla Mosfet'in birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü koladaki kontrol sinyalleri Simülasyonu yapılan dönüştürücü devresinin ait çıkış gerilim ve akım grafikleri Şekil 4.12'de verilmiştir. Batarya boş iken üzerinde var olan 80 V değerindeki gerilim simülasyona başlangıç değeri olarak dahil edilmiştir. Simülasyon sonucu hesaplanan değerlerle uyushmaktadır. Dönüştürücünün simüle edilen çıkış değerleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.12 Simülasyonu yapılan dönüştürücü devresine ait a) çıkış gerilimi b) çıkış akımı

Dönüştürücü DC bara gerilimi ve akımı, çıkış akımı ve gerilim dalga formları Şekil 4.13'de beraber ayrı ayrı verilmiştir. Bu simülasyonda giriş kondansatörünün gerilim değeri şebeke geriliminin tepe değeri olan 320 Volttan başlayacak şekilde ayarlanmıştır. Simülasyonlardan görüleceği üzere teorik hesaplamalar simülasyon değerleriyle uyushmaktadır.

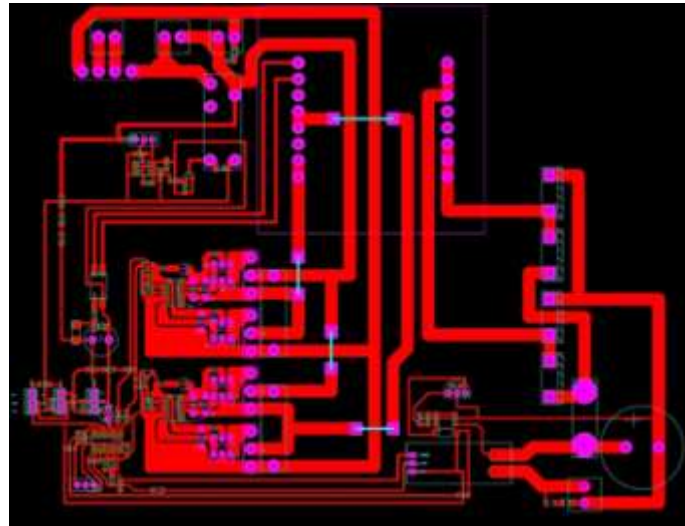




Şekil 4.13 Simülasyonu yapılan dönüştürücü devresine ait a) giriş akımı, b) gerilimi, c) çıkış akımı, d) çıkış gerilimi dalga formları

#### 4.4 Baskı Devre Çalışmaları

Şarj cihazının baskı devre çalışmaları Proteus Ares Baskı Devre Tasarım programıyla tasarlanmıştır. Şarj cihazının devresi için tasarımı tamamlanan PCB çizimi Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Şarj ünitesi baskı devre çizimi

#### 4.5 Üretim Çalışmaları

Baskı Devre tasarımı tamamlandıktan sonra baskı devre imalatına geçilmiştir. Baskı devre imalatı bittikten sonra devre elemanları baskı devreye monte edilmiştir. Baskı devrenin bitmiş ve elemanları monte edilmiş hali Şekil 4.15'de alttan ve üstten hali verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.15 Uygulama devresi gerçekleştirilen şarj devresi ana kartının a) baskı devre üstten görünümü b) baskı devre alttan görünümü



Şekil 4.16 Uygulama devresi şarj cihazının kutu içerisindeki nihai hali





## 5. MOTOR SEÇİMİ, GÜÇ ELEKTRONİĞİ VE KONTROL DEVRELERİ

Proje kapsamında tasarım ve gerçekleştirilmesi yapılan elektrikli aracımız **ALATAY-EV** ismini almıştır. Araç şehir içi konseptine göre tasarlanmış iki kişilik bir araçtır. Bir birinden bağımsız dört tekerlekten oluşan araçta iki adet motor kullanılmış ve motorlar arka tekerleklere bağlıdır. Yani arkadan itişli olacak şekilde düzenlenmiştir. Bu bölüm içerisinde; kullanılan motor ve özellikleri, inserte tasarımı, motor kontrol, sürüş yöntemi ve elektronik diferansiyel verilecektir.

Tasalanmış inserttir doğrudan moment kontrolü yöntemi ile kontrol edilecektir. Bir çeşit vektör kontrolü olan bu yöntem AC asenkron, sabit mıknatıslı senkron motorlar ve fırçasız dc motorların kontrolünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Alan yönlendirme felsefesine dayalı kontrol sistemlerinin geliştirilmesi yönünde bir eğilim olduğu sıralarda, doğrudan moment kontrollü sürücüler ile ilgili ilk çalışmalar Japonya'da Takahashi- Noguchi ve Almanya'da Depenbrock tarafından yapılmıştır (Takahashi ve Noguchi 1986; Depenbrock 1987; Depenbrock 1988). Bu çalışmalar, DA motoruna benzeşimden ve koordinat dönüşümünden öteye fikirler sunmaktaydı. Bu araştırmacılar akımları ayrıştırarak kontrol momenti kontrol etmek yerine, bang-bang kontrolü önermişlerdi ki bu tür kontrolörler yarı iletken güç anahtarlarının inverterdeki aç-kapa tarzı çalışmasına oldukça uyumlu görülmüştür. Bu kontrol stratejisi genel olarak "Doğrudan Moment Kontrolü" olarak isimlendirilerek günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiş ve iyileştirilmiştir.

DTC sisteminin temel prensibi, stator akısı ve momentin referans değerleri ile gerçek değerlerin karşılaştırılması ile elde edilen hata değerlerinin histerisiz denetleyicilerde kullanılması ile eviricinin optimum anahtarlama durumlarının belirlenmesine dayanır. DTC sisteminin en önemli dezavantajları, yüksek akı ve moment salınımı, düşük hızlarda moment denetiminin zorlaşması ve değişken anahtarlama frekanslarında çalışması olarak sıralanabilir (Depenbrock 1987).

### 5.1 ALATAY-EV'de Kullanılan Motorlar

Bu proje kapsamında aracın sürüşü için iki adet arka tekerleklere bağlanacak motor kullanılmıştır. Bu iki motor dıştan rotorlu BLDC motor olup, her birinin nominal gücü 2kW, pik gücü 3kw, redüktör öncesi motor hızı 8000 rpm, yaklaşık verim %91'ler civarındadır. Motorlar istenilen 96 V gerilim seviyesi modifiye ettirilip TORCMAN firmasından satın alınmıştır. Projede kullanılan dış rotorlu BLDC senkron motorun etiket değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Her bir motor 96 V nominal gerilime ve 1/16 dişli aktarım oranına sahiptir. Böylelikle araç için gerekli torkun elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu motorların tercih edilme sebeplerinden birisi diğer elektrikli araç motorları ile karşılaştırıldığında ağırlıklarının oldukça

hafif olmasıdır. Şekil 5.1’de dıştan rotorlu BLDC motorlara bir resim sunulmuştur. Aynı zamanda proje ortağımız olan Belçika ekibi de kendi proje uygulamalarında benzer motorlardan kullanmıştır. Elektrikli araç uygulamalarında, dış rotorlu sabit mıknatıslı elektrik motorları, düşük toplam ağırlık, maliyet ve kurulum kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedirler. Bu üstünlüklerinden dolayı projede, dış rotorlu yüzey mıknatıslı bir BLDC seçilmiştir.

Tablo 5.1 Projede kullanılan dış rotorlu BLDC senkron motor etiket değerleri

<b>Üretici firma</b>	Torcman / Almanya
<b>Motor tipi</b>	Torcman NT 765-16
<b>Nominal gerilim</b>	96 V
<b>Nominal güç</b>	2 kW
<b>Pik gücü</b>	3kW
<b>Nominal motor-hızı</b>	6-8000 rpm
<b>Dişli dönüştürme oranı</b>	16
<b>Verim</b>	91%
<b>Ağırlık</b>	2585 gr
<b>Koruma sınıfı</b>	IP65



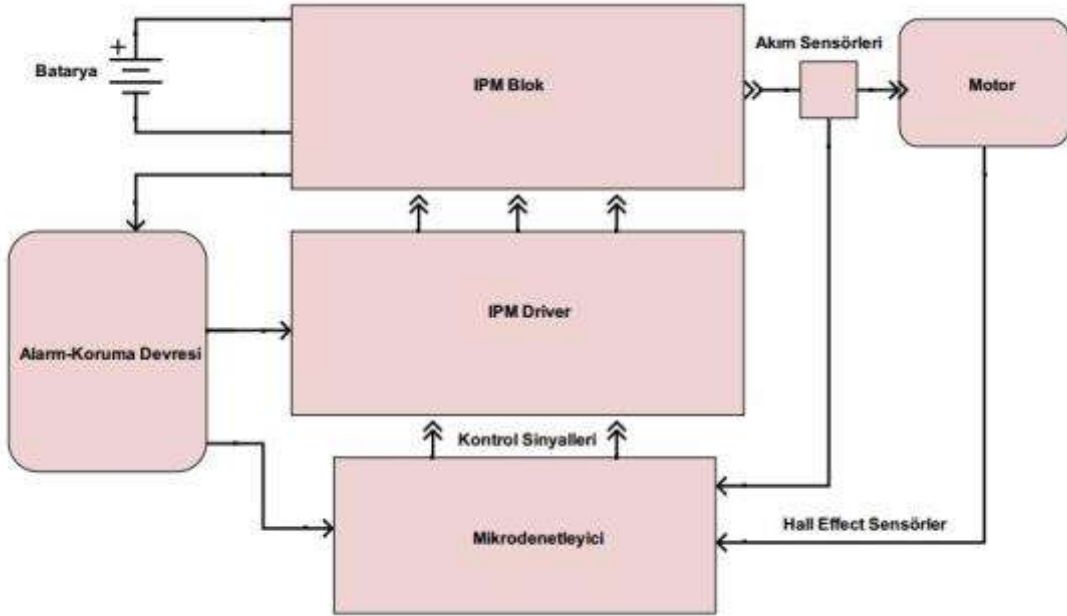
Şekil 5.1 Dıştan rotorlu BLDC senkron motor.

## 5.2 Evirici (invertör) Tasarım ve İmalatı

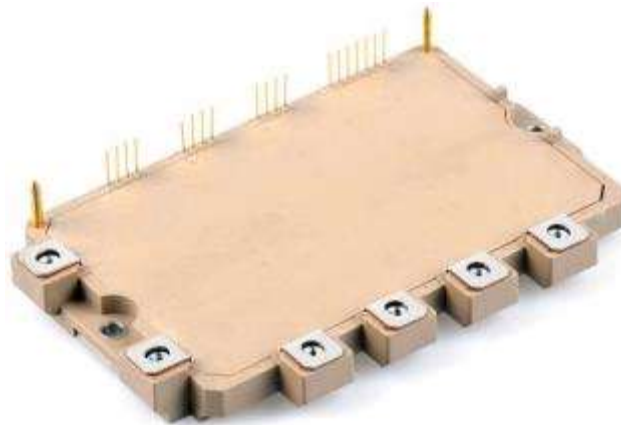
İnvertörler, doğru akım enerjisini alternatif akım enerjisine dönüştüren güç elektroniği devreleridir. İnvertörlerin üreteceği dalganın biçimi ve frekansı kullanılan yarıiletken elemanın (tristör, transistör, Mosfet, IGBT) karakteristiklerine, iletim ve tıkama sürelerine bağlıdır. İnvertörlerde dalga biçimlendirme temel ilke, tristör, transistör, Mosfet veya IGBT gibi anahtarlama elemanlarının iletim ve tıkama sürelerinin uygun bir biçimde belirlenmesidir. Bu

belirleme ile birlikte elemanların anahtarlama sırası da çok önemlidir. İntvertörler uygulamadaki besleme özelliklerine göre akım beslemeli ve gerilim beslemeli olarak iki grupta toplanırlar. Akım beslemeli ya da gerilim beslemeli invertörler arasında yapılacak seçim yükün özelliklerine göre değişir.

Fırçasız doğru akım motorlarının kontrolü için üç faz H köprüsü tipi bir invertöre ihtiyaç duyulmaktadır. İntvertörün genel şeması Şekil 6.2'de verilmiştir. Bu invertör için anahtarlama elemanı olarak Mosfet veya IGBT kullanılabilir. Bu tip yarı iletkenleri anahtarlama için özel sürücü devrelere ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada anahtarlama elemanları olarak IGBT yarıiletkenler içeren IPM (Intelligent Power Module) seçilmiş ve buna göre bir sürücü devre tasarımı yapılmıştır. İntvertörde kullanılan IPM bloğun resmi Şekil 5.3'de görülmektedir.



Şekil 5.2 Üç faz invertör genel şeması



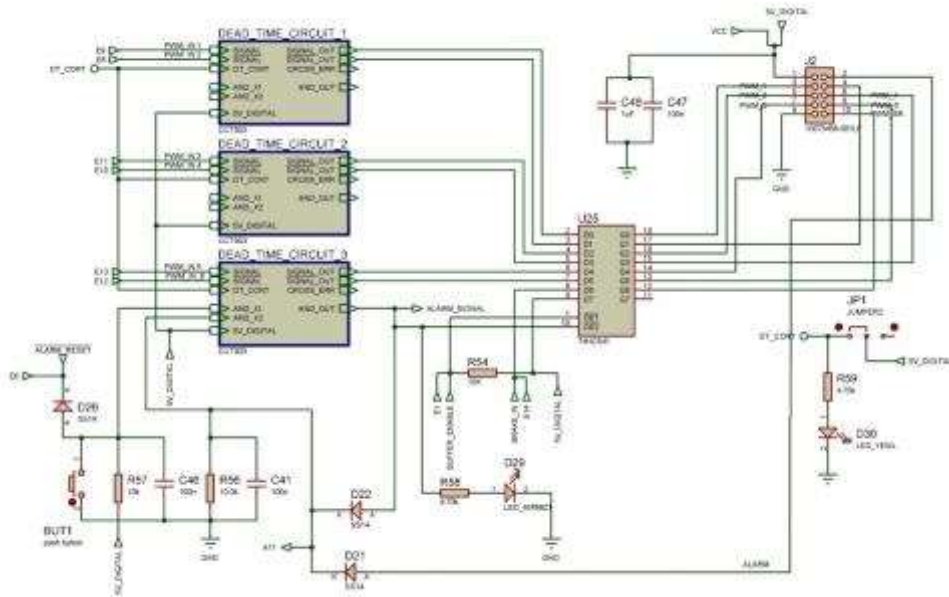
Şekil 5.3 IPM Blok

Sistem bir elektrikli araç üzerinde kullanılacağı için DC kaynak bir batarya sistemi olarak seçilmiştir. Kullanılan anahtarlama elemanları bataryaların maksimum gerilimine ve motorun gücüne dayanacak özellikte seçilmiştir. Kullanım kolaylıkları ve dahili koruma gibi özelliklerinden dolayı IPM bloklar yüksek güvenilirlik gereken uygulamalarda sıkça tercih edilmektedirler. Sürücü devresinde Fuji Electric firmasının 7MBP50VDA120-50 kodlu ürünü kullanılmıştır.

IPM bloğu sürmek için izole gerilim kaynakları kullanılmıştır. İzole kaynakların elde edilmesi için flyback, forward veya push-pull gibi konvertör yapıları kullanılabilir. Fakat bunlar zaman ve maliyet açısından bu projede kullanılmaya uygun bulunmamıştır. Bunların yerine piyasada hazır ürün olarak rahatlıkla bulunabilen dc-dc konvertörler seçilmiştir. Burada konvertör olarak Murata firmasının CRV1S1215SC kodlu ürünü kullanılmıştır. Bu konvertörler 12V giriş 15V çıkış olacak şekilde seçilmiştir. Bu şekilde IPM' in ihtiyacı olan gerilim seviyeleri karşılanmış olur. Kullanılan 12-15 V'luk DC/DC dönüştürücünün resmi Şekil 5.4'de verilmiştir.



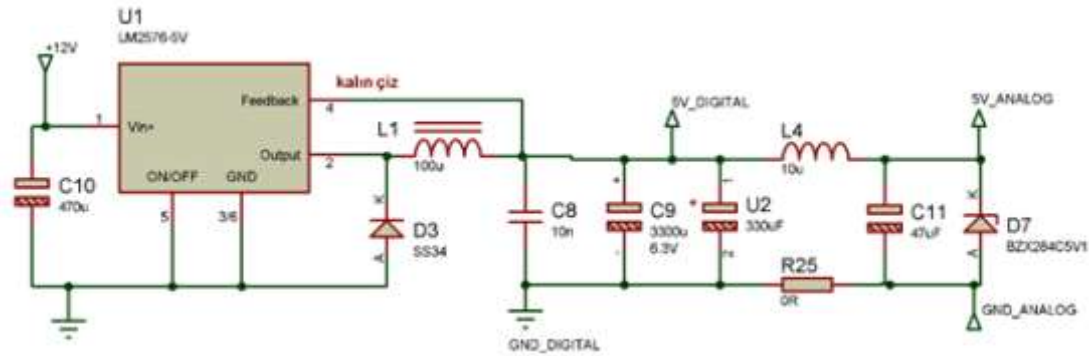
Şekil 5.4 DC/DC Dönüştürücü (12-15V)



Şekil 5.5 Sürücüye ait ölü zaman ve alarm kontrol devresi

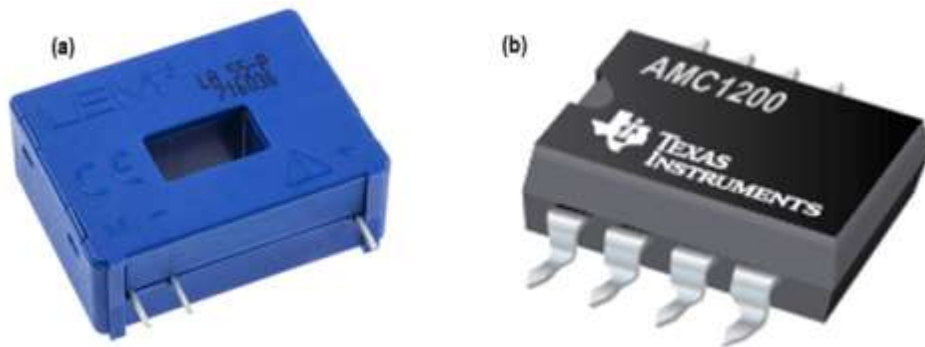
IPM bloкта meydana gelebilecek herhangi bir hata anında sistemin korunması gerekmektedir. Bu durum için alarm kontrol devreleri tasarlanmıştır. Bu devre, hata oluştuğu anda IPM bloğa giden sinyalleri keser ve işlemciye bir sinyal gönderir. Böylece hem IPM hatalardan korunmuş olur hem de işlemci hata durumundan haberdar olur. Sürücüyü ait ölü zaman ve alarm kontrol devresi Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Ayrıca bu devre buffer yapısı da içerdiğinden yazılımsal olarak aktif edilmedikçe sinyaller IPM bloğa ulaşamaz bu da ekstra bir güvenlik önlemi olarak sisteme eklenmiştir.

Devredeki analog ve dijital entegrelerin beslenmesi için 5V çıkışlı buck tipi bir çevirici tasarlanmıştır. Burada analog ve dijital ground noktaları birbirinden ayrılarak entegrelerin birbirini etkileme düzeyi en aza indirilmiştir. Devredeki entegrelerin analog ve dijital beslemesi için gerekli olan 5V'luk beslemeyi sağlayan Buck dönüştürücü devresi Şekil 5.6'da sunulmuştur.



Şekil 5.6 Buck Dönüştürücü Devresi (5V)

Doğrudan moment kontrolün gerçekleştirilmesi için motor faz akımlarının ve DC bara geriliminin bilinmesi gereklidir. Bu amaçla devrede akım sensörü olarak iki adet LEM LA-55P ve gerilim sensörü olarak TI AMC1200 malzemeleri kullanılmıştır. Kullanılan akım ve gerilim sensörleri örnekleri Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7 İnvörtör devresinde kullanılan a) Akım sensörü LEM LA-55P b) gerilim sensörü AMC1200



Fırçasız motorların kontrolü basit mikro denetleyiciler ile yapılabilir. Fakat doğrudan moment kontrol gibi yüksek yoğunluklu matematiksel modeller içeren vektörel kontrol yöntemleri için basit denetleyiciler yetersiz kalır. Bu nedenle yüksek hızlı ve düşük maliyetli ARM tipi mikro denetleyici bu proje için seçilmiştir. Kullanılan ARM çekirdeğine sahip mikro denetleyici STM firmasının STM32F407VGT6 isimli ürünüdür. Bu mikro denetleyici 32 bit işlem kabiliyeti ,168 MHz işlemci hızı,12 bit ADC çözünürlüğü, DSP desteği ve SPI, I2C, USART ve CAN gibi sıkça kullanılan haberleşme protokollerini tek bir çekirdekte topladığı için sürücü devreye eklenmiştir. Kullanılan işlemcinin devre üzerine montajı tamamlanmış hali Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8 İşlemcinin (STM32F407VGT6) devre üzerinde yerleşimi

Devre üzerinde diğer sürücü ve ana kontrol kartı ile haberleşmeyi sağlamak amacıyla CAN BUS haberleşme ara yüzü bulunmaktadır. Bu ara yüz, sürücü kartı ile hedef cihaz arasında elektriksel izolasyon sağlar. Bu amaçla 5V-5V izole dönüştürücü bu devreye eklenmiştir. Böylelikle CAN BUS hattındaki sinyaller hem izole edilmiş hem de EMI etkilerden en az etkilenecek biçime getirilmiştir. Tüm tasarımları ve imalatı tamamlanan sürücü imal edilmiştir. İmalatı tamamlanan invertöre ait örnek resimler (üsten, soldan ve sağdan) Şekil 5.9'da verilmiştir. Tasarlanan sürücü sisteminden her motor için birer adet olmak üzere toplam iki adet üretilmiştir. Hazırlanan bu sürücüler DTC kontrole uygun bir şekilde yapılmıştır.



Şekil 5.9 Elektrikli araç ALATAY-EV için tasarlanan sürücünün farklı perspektiflerden resimleri





### 5.3 Ultrakapasitör-Batarya Bağlantı Konvertörü

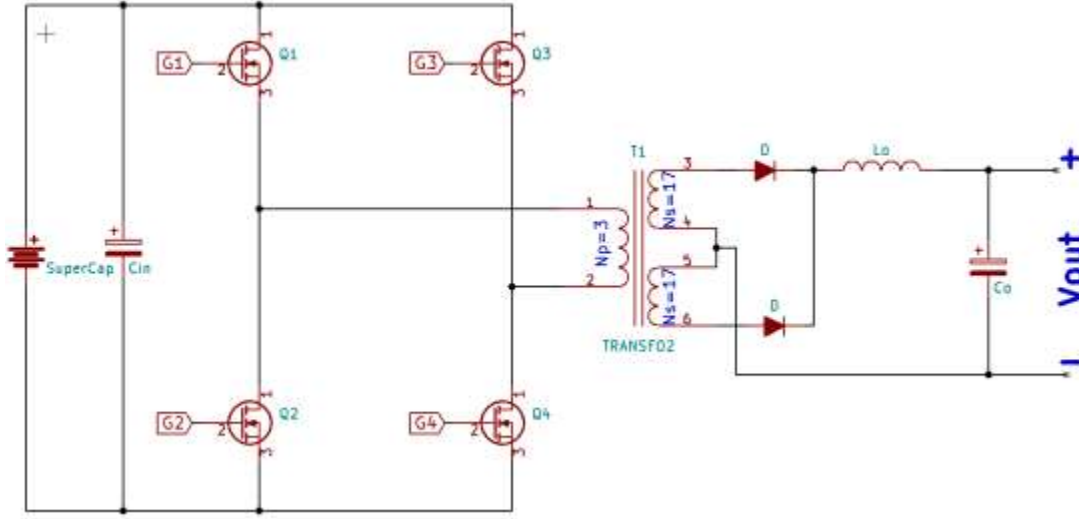
Bu proje kapsamında, elektrik araçlarının güç geri kazanımı-rejeneratör modunda çalışması durumunda üretilen enerjinin ultrakapasitelerde depo edilmesi işlemi için ayrı bir konvertöre ihtiyaç duyulmamıştır. Proje önerisinde sunulan aradevre konvertörlerinin tasarımı ve kontrolü maliyeti artıracak ve verimi düşüreceği için motorların sürülmesinde kullanılmak üzere tasarlanan invertörlerin bir doğru akım konvertörü gibi çalışmasını sağlayacak yeni bir methodun uygulanması amacıyla projede değişiklik yapılmıştır. Bu nedenle, ultrakapasitörün şarj edilmesinde gereken gerilim seviyesi motorların rejenetaif modda hangi hızda olursa olsun uygun gerilim seviyesini üretmek üzere boost (artıran tip) konvertör mantığında kontrolü sağlanmıştır. Ultrakapasitörün mevcut gerilim seviyesini ve şarj olması gereken gerilim seviyesini algılayan bir kontrol ile invertörler yazılımı değiştirilmiş ve gereken gerilim seviyesi ve güç geri kazanımı sağlanmıştır. Bu çalışma moduna ilişkin ayrıntılar ilerleyen bölümlerde ele alınmıştır.

Diğer taraftan, ultrakapasitörde depolanan enerjinin batarya bağlantısını sağlamak ve ihtiyaç halinde pik akımları desteklemek üzere değişen batarya gerilim seviyesine göre çıkış üreten bir doğru akım konvertörüne (DC-DC Konvertör) ihtiyaç duyulmuştur. Bu konvertör sadece ultrakapasitörden bataryaya doğru enerji akışına izin vermektedir. Dolayısıyla, bataryadan enerji depolamasının önüne geçilmiştir.

Konvertörün tasarımında en önemli parametre değişken gerilim ve güç aktarım seviyesidir. Kullanılan motorların, araç seyir halinde iken jeneratör moduna geçmeyeceği, ancak frenleme ve boşta salınması durumunda tekerlerden yani araç eylemsizliğinden gelen enerjinin uygun gerilim ve akım seviyesinde kontrollü olarak ultrakapasitöre aktarılması planlanmıştır. Bu nedenle, tasarımı yapılan konvertörün maksimum 1 kW güç aktarabileceği esasına göre tasarım yapılmıştır. Giriş ve çıkış geriliminin sürekli değişken olacağı göz önüne alınarak konvertör kontrolü buna göre yapılmıştır.

mekte olup buradaki enerjinin akülere basılma ihtiyacı bulunmaktadır. Bu amaç doğrultusunda istenilen 1kW çıkış gücü dikkate alındığında fullbridge topolojisi seçilmiş olup gerekli çalışmalar yapılmıştır. Şekil 5.10'da bu konvertöre ilişkin prensip devre şeması verilmiştir. Burada, planlanan güç aktarımına izin veren transformator ve diğer elemanların seçimi önem arzettiği gibi özellikle değişken giriş-çıkış gerilim seviyesini sınırlı akım ile sağlayan anahtarlama sistemi daha da önem arz etmektedir. Zira, şarj seviyesi algılanan ultra kapasitör gerilim seviyesinin çıkışa bağlı olan bataryanın gerilim seviyesine uygun hale getirmesi gerekmektedir. Hatta, gerilim seviyesi zayıflamış olan bataryanın ultrakapasitörden beslenmesi de diğer bir kontrol seçeneğidir. Bu amaçla, sabit 110V çıkış veren, giriş gerilimi

25V~80V aralığında değiş bir sistem için tam köprü yalıtımlı (izolasyonlu) DC-DC konvertör maksimum 1 kW olarak tasarlanmıştır.



Şekil 5.10 Ultrakapasitörden batarya bağlantısı sağlayan DC-DC konvertör prensip şeması

Tam köprü konvertörde kullanılan yarıiletken anahtarların sürülmesinde kullanılan PWM kontrolcüsünün sahip olduğu korumaların dışında yayılan kontrol işleminde ek güvenlik fonksiyonları da göz önüne alınmıştır. Bunlar; çıkış akımının sınırlandırılması, sıcaklığa bağlı güç aktarımının sınırlandırılması, histerisiz kontrollü fanın devreye alınıp-çıkartılması gibi.

### 5.3.1 Kritik Devre Elemanların Belirlenmesi ve Özel Tasarımı Yapılan Elemanlar

Güç aktarımın temel devre elemanı, yüksek anahtarlama frekansı ve güç seviyesine uygun *transformatörün tasarımıdır*. Bu amaçla, aşağıda sıralanan kriterler göz önüne alınmıştır:

Giriş-Çıkış Gerilim Aralığı :  $25V < V_{in} < 80$

Çıkış Gerilimi Maksimum Seviyesi :  $V_{out} = 110V$

Maksimum Çıkış Gücü :  $P_{out} = 1kW$

Anahtarlama Frekansı :  $F_s = 66kHz$

Bac :  $0.05T$

Bu kriterler altında trafo tasarımı yapıldığında gerekli olan  $K_g$  değeri  $2.078 \text{ cm}^5$  elde edilir. Endüstriyel olarak üretimi bulunan EE65/32/27-3C90 nüvesi tasarıma uygun değerleri sağlamakta olduğundan seçilen bu nüve kullanılmıştır. Minimum giriş ve maksimum çıkış gerilim seviyesi göz önüne alınarak yapılacak kontrole uygun olarak transformatörün primer ve seconder sarım sayıları sırasıyla 3 ve 17 olarak belirlenmiştir. Bu dönüştürme oranı dikkate alınarak konvertörün kontrolünde duty cycle için sınırlar belirlenmiş olmaktadır.



Konvertör devresinin en önemli diğer elemanları *çıkış bobini ve kondansatörünün* belirlenmesi için, bobin tasarımında, bobin uç geriliminden başlanarak devre analizi yapılmıştır. Bu amaçla kesikli zaman analizinde (5.1) bağıntısının kontrol sırasında yön değiştirmesi, çıkış gerilimin üretilmesinde temel değişken olmaktadır. Ancak, tasarım yapılırken seçilen çıkış kondansatörünün ESR değeri dikkate alınmalıdır. Aksi halde çıkış kondansatörleri üzerindeki dalgalanma akımından dolayı üreticinin belirtmiş olduğu sıcaklık limitlerinin üzerine çıkılması kaçınılmaz olacaktır.

$$V_L = L \times \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (5.1)$$

Bobin tasarımı için kitap seviyesinde bile oldukça fazla literatür bulunmaktadır. Devre analizine uygun olarak kritik endüktans değeri bulunduğundan sonra çıkış kondansatörünün bulunması, hesaplanan kritik endüktans değerinin kabul edilebilir endüktans dalgalanma oranına göre bir miktar artırılarak dalgalanma akımı istenen seviyede tutulabilir. Kondansatör değerinin hesaplanmasında bu değer önemlidir. Bir başka göz önüne alınması gereken husus da çıkış kondansatör adedi yükseltilecek ESR değerinin düşürülmesidir. Bu amaçla, 0.03V çıkış gerilim dalgalanması ve 0.3A dalgalanma akımı için sırasıyla çıkış kondansatör değeri 8uF ve çıkış endüktans değeri 2mH olarak belirlenmiştir.

*Anahtarlama elemanlarının* seçilmesinde hızlı anahtarlama elverişli ve anahtarlama kayıpları en az olan MOSFET yapısı tercih edilmiştir. Mosfetler giriş geriliminin en yüksek olduğu değer olan 80 V gerilimine uygun olarak belirlenmiştir. Kaçak endüktans ve Mosfet Cds kapasiteleri nedeniyle oluşacak olan yüksek frekanslı rezonanslar dikkate alındığından kırılma gerilimi 80 V üzerinde olan Mosfet seçimi yapılmıştır. Ayrıca Vds gerilimi arttıkça Rds\_on direncinin artacağı dikkate alınarak 150 V'luk Fairchild firmasının FDP083N15A Mosfeti seçilmiştir. FDP083N15A Mosfetinin karakteristik parametreleri aşağıdaki gibidir:

Rds(ON) = 6.85 mOhm, Vgs = 10 V, Id = 10 A, Qgate = 64.5 C, Tr = 58 ns, Tf = 26 ns, TO220 paket kılıf.

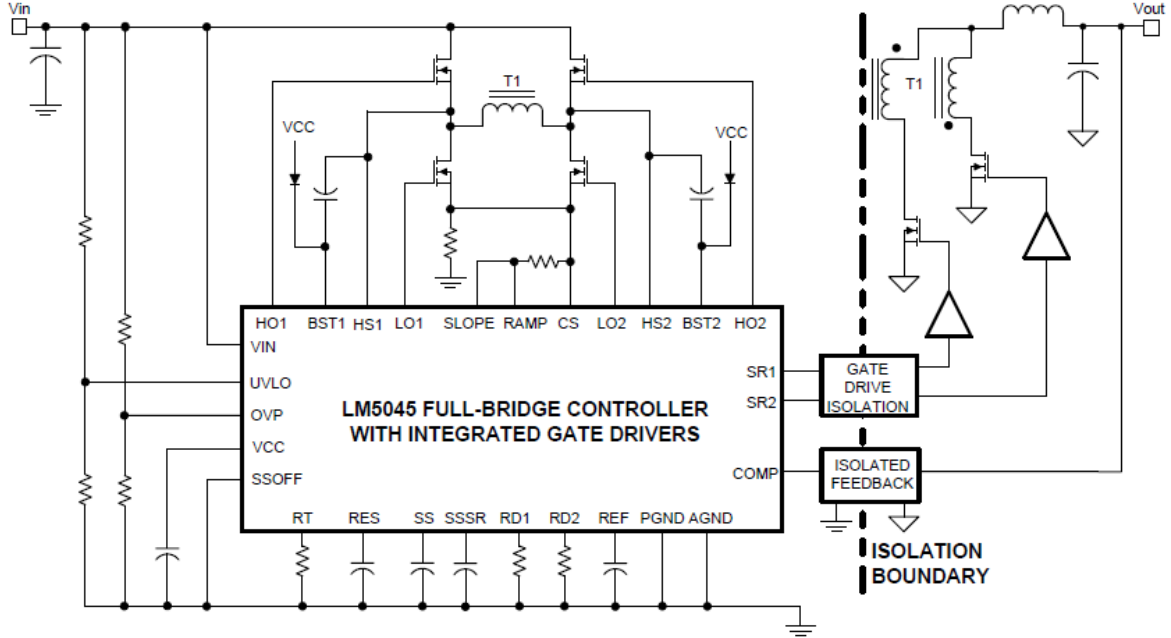
Konvertör verimini büyük ölçüde etkilemekte olan *doğrultma elemanlarının, hızlı diyotların*, 10 A ve altındaki uygulamalarda kullanılması devre karmaşıklığını azalttığı için tercih edilmektedir. Diyotların belirlenmesinde; diyotların maruz kalacağı en yüksek ters gerilime dayabilmesi, üzerinden en yüksek akım geçerken Vf gerilim düşümlerinin mümkün mertebe en düşük seviyede olması ve ters toparlanma süresinin kısa olması dikkate alınmıştır. Bu amaçla, Fairchild RURP15100\_F085 TO220 kılıflı diyotları kullanılmıştır. RURP15100\_F085 diyodunun öne çıkan özellikleri aşağıdaki gibidir:

Trr < 200 ns (ters toparlanma süresi), Vds = 1000 V, VF = 1.8V @ IF = 15A

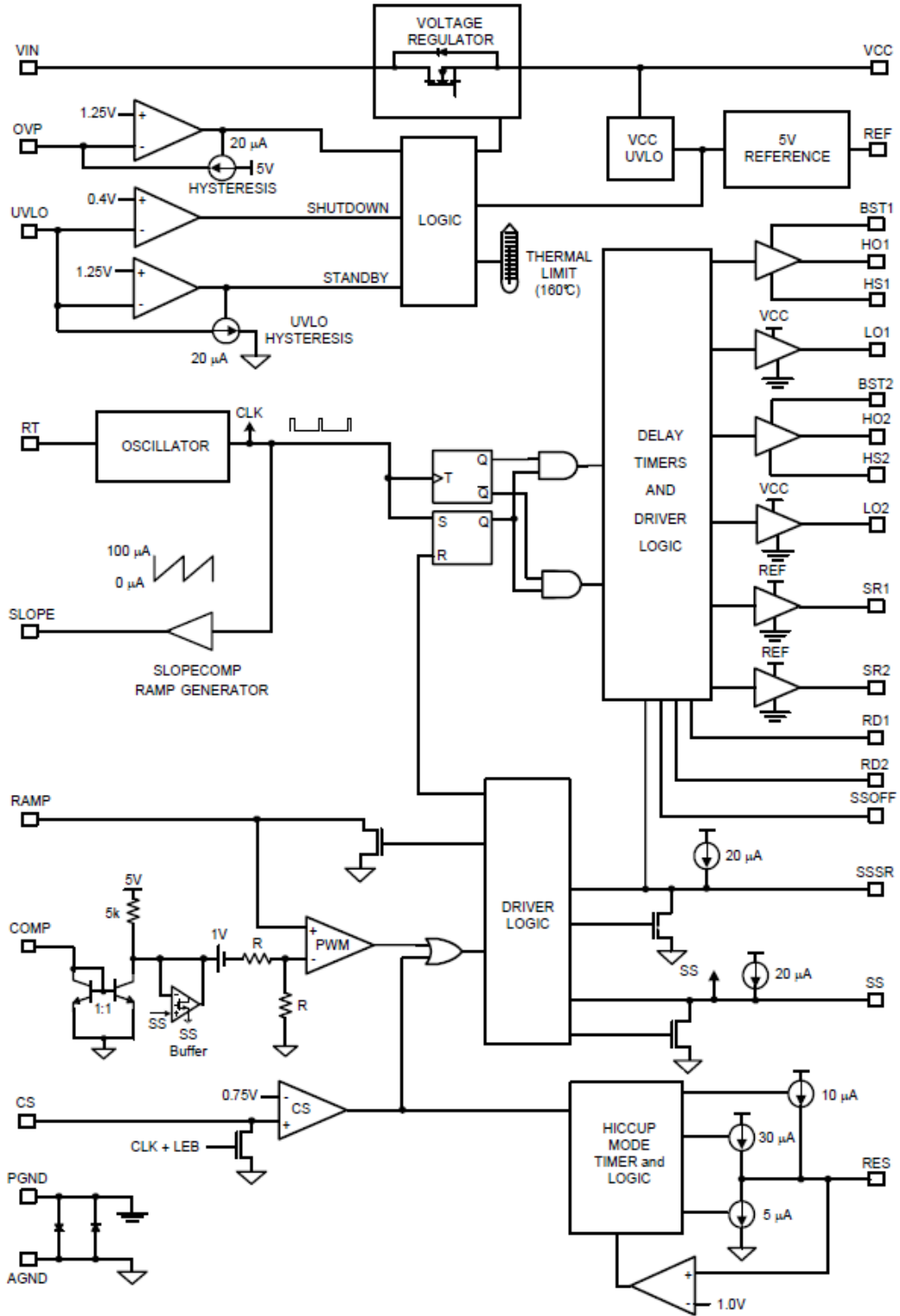
Tam köprü konvertör devre topolojisinde diyotlarının dayanması gereken ters gerilim değeri (5.2) kriter bağıntısına uygun olmalıdır.

$$VR > 2 \times V_{IN,MAX} \times \frac{Ns}{Np} \quad (5.2)$$

Bağlantı şematiği Şekil 5.11’de verilen ve entegre modül olarak satışa sunulmuş olan kontrollü PWM üretici (PWM kontrolcü olarak anılacak) Texas Instrument firmasının LM5045 etiketli elemanı bu çalışmada kullanılmıştır. Seçilen bu modül; yüksek gerilimli başlatma regülatörüne sahip olup bu sayede 100 V giriş gerilimine kadar ek bir tedbir alınmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Düşük gerilim koruma fonksiyonu (UVLO) ve yüksek gerilim koruma fonksiyonuna da (OVP) sahip olan bu modül, sayısal bir işlemci kullanılmadan da devrede yapılandırılabilir. İstenen otomatik kontrol analog olarak sağlanabilmektedir. Diğer taraftan, seçilen bu modül çıkış doğrultma elemanlarının herhangi bir anahtarlama elemanı seçilmesi durumunda iki adet senkron doğrultma sürücü çıkışı da sağlamaktadır. Ayrıca, seçilebilir gerilim ve akım modlu çalışma fonksiyonlarına da sahiptir. 2 A kapasiteli kapı (gate) sürüş gücü sağlamaktadır. Konvertör çıkış biriminde aşırı akım ya da kısa devre olması durumunda koruma sağladığından devre tasarım yapısını da basitleştirmektedir. Seçilen PWM kontrolcüsünün ayrıntılı iç yapısı Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.11 PWM Kontrolcü bağlantı yapısı şematiği



Şekil 5.12 DC-DC konvertörün otomatik kontrolünü sağlayan LM5045 devre yapısı

### 5.3.2 Tam Köprü DC-DC Konvertör Devre Fonksiyonları

Prensip şeması Şekil 5.10'da verilen tam köprü DC-DC konvertörün transfer fonksiyonu (5.3) bağıntısı olarak elde edilmiştir.

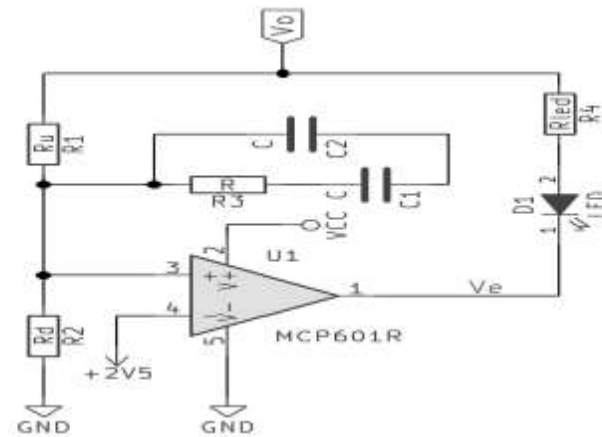
$$G_{vd}(s) = \frac{V_o/D}{s^2 \times L_o \times C_o + s \times \frac{L_o}{R} + 1} \quad (5.3)$$

Burada,  $V_o$ : çıkış gerilimi,  $D$ : doluluk-boşuk oranı(Duty Cycle),  $L_o$ : çıkış endüktans değeri,  $C_o$ : çıkış kapasite değeri ve  $R$ : çıkış yüküdür.

Tasarımı yapılan DC-DC konvertörün kontrolünde önemli parametrelerden birisi anahtarlama frekansına göre kesim ve köşe frekansının belirlenmesidir. Buna göre, İstenen faz marjı belirlenir. Belirlenen faz marjı, seçilen köşe frekansında gerekli faz arttımını sağlayacak şekilde kutup ve sıfır yerleşimi yapılır. Giriş gerilim değişimlerinden ve yükte meydana gelen değişimler sonucu regülasyonda bozulmaların olmaması için düşük frekanslardaki kazanç yüksek tutulmaya çalışılmıştır. Bu bilgiler tüm anahtarlama güç kaynakları topolojileri için geçerli olup kontrol edilecek sistemlerin açık çevrim frekans cevapları da dikkate alınarak hesaplanır, yorumlanır. Bu amaçla, TL431 ile Tip-2 PI kontrolcü yapısı kullanılarak kompanzator tasarımı yapılmıştır. Tip-2 kontrolcü devresi Şekil 5.13'de verilmiş olup transfer fonksiyonu (5.4) bağıntısıyla elde edilmiştir.

$$G_c(s) = \frac{VE(s)}{VO(s)} = -\frac{1}{s/w_0} \times \frac{1+s/w_z}{1+s/w_p} \quad (5.4)$$

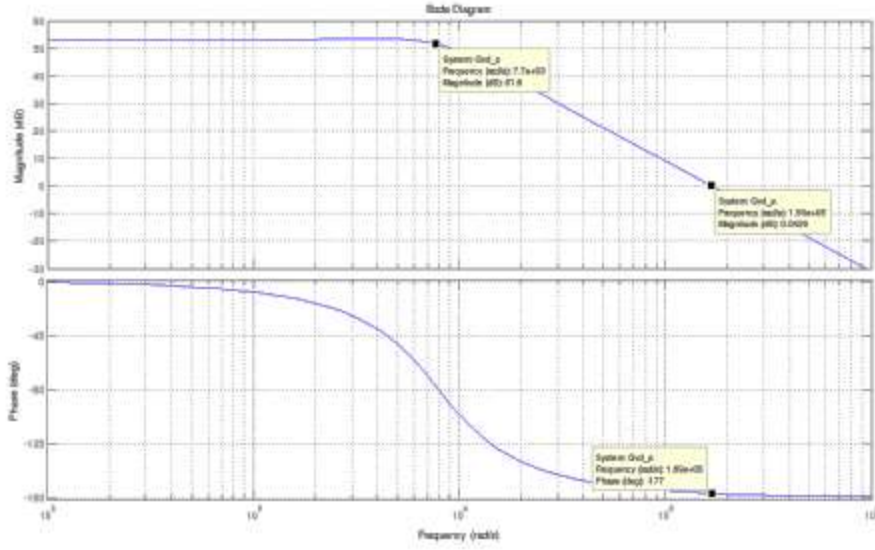
Burada;  $w_0$ :  $1/(R_1 \cdot C_1)$ ,  $w_z$ :  $1/(R_3 \cdot C_1)$  ve  $w_p$ :  $1/(R_3 \cdot C_2)$  olarak elde edilebilir.



Şekil 5.13 Tip-2 PI kontrolcü yapısı

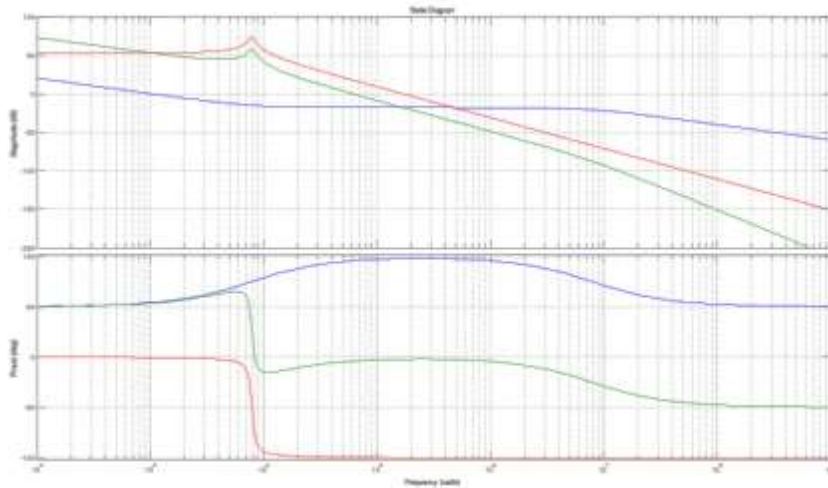


Kontrolcü (denetleyici) kullanılmadığı durumda açık çevrim transfer fonksiyonunun frekans cevabı Şekil 5.14'te verilmiştir.



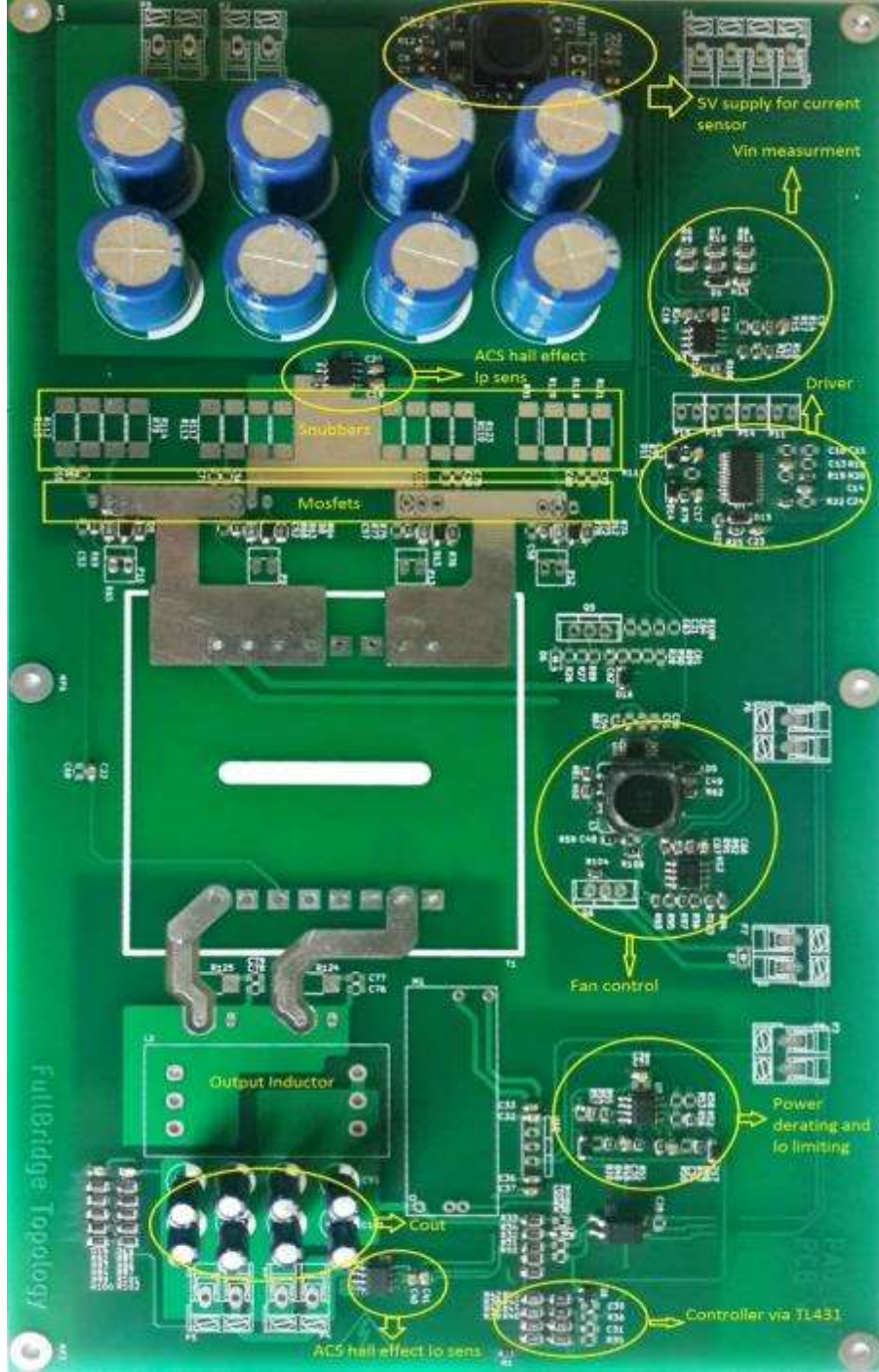
Şekil 5.14 Kontrolsüz sistemin açık çevrim frekans cevabı

Geçici durumlarda aşımaların az olması için faz marjı değeri 75 °C olarak belirlenmiştir. Köşe frekansı ise 15 kHz seçilmiştir. Bu durumu sağlayan kontrolcü parametreleri; R1: 21 kOhm, R2: 500 Ohm, R3:2k7 Ohm, C1: 47 nF, C2: 47 pF ve Rled: 3k3 Ohm olarak belirlenmiştir. Buna göre sistemin kontrollü ve kontrolsüz olarak elde edilen frekans cevapları karşılaştırmalı olarak Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15 Sistemin açık ve kapalı çevrim frekans cevapları (kırmızı: açık çevrim, yeşil: kompanse edilmiş sistemin açık çevrim cevabı, mavi: Tip-2 kontrolcü frekans cevabı )

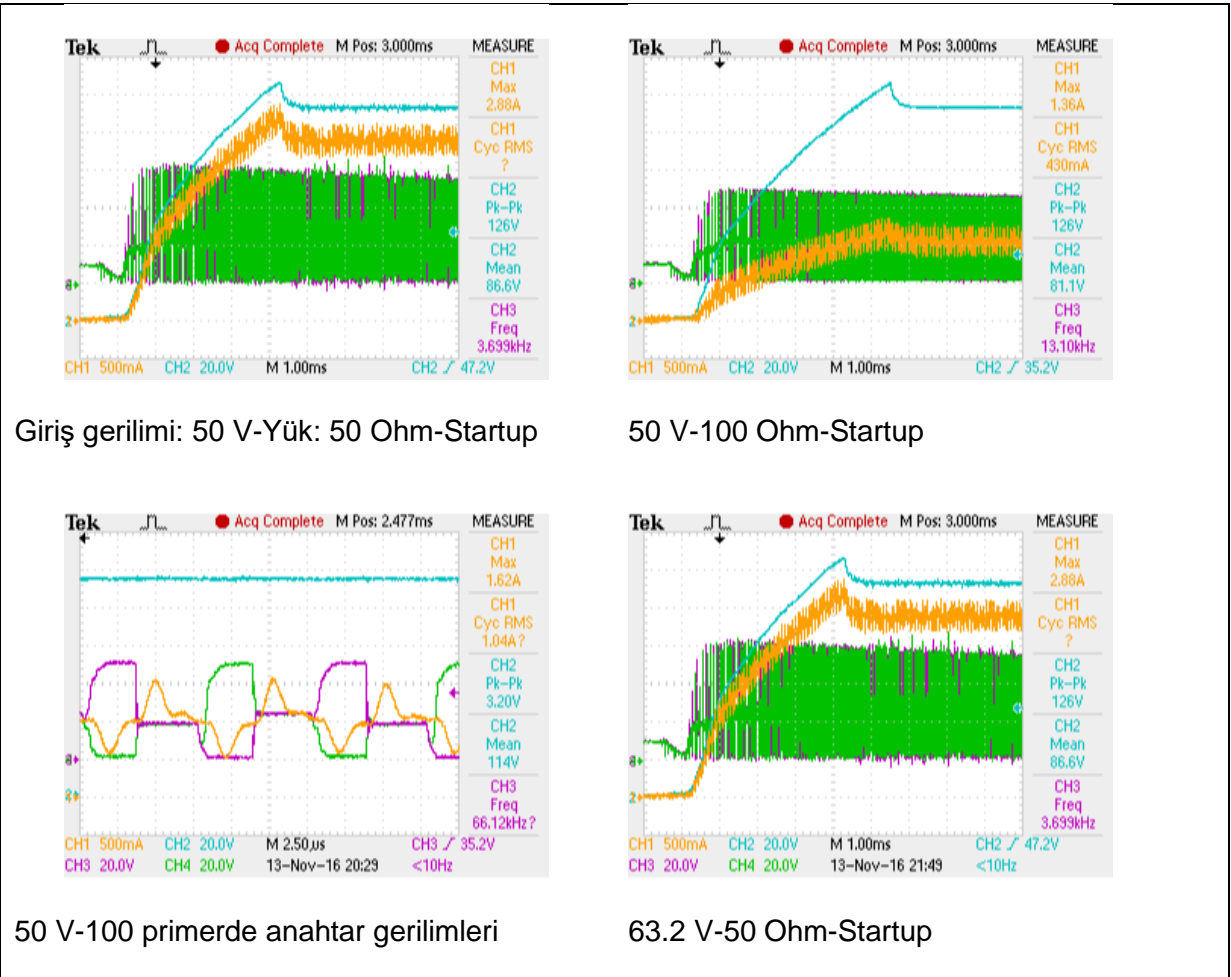
Tasarım analizi ve devre parametrelerinin belirlendiği DC-DC tam köprü konvertörün tamamlanmış ve kart dizgisi yapılmı durumu Şekil 5.16'da verilmiştir. Kartın üstten görünümünde sadece uç bağlantıları görülen MOSFET ve transformatör görünmemektedir. Soğutucu ve eleman yerleşimi göz önüne alınarak bu elemanlar kartın arka yüzüne yerleştirilmiştir. Sistem açıklamaları şekil üzerinde yapılmıştır.

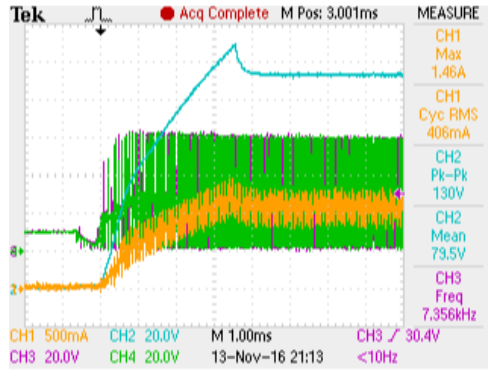


Şekil 5.16 Tam Köprü DC-DC Konverterin son durumu

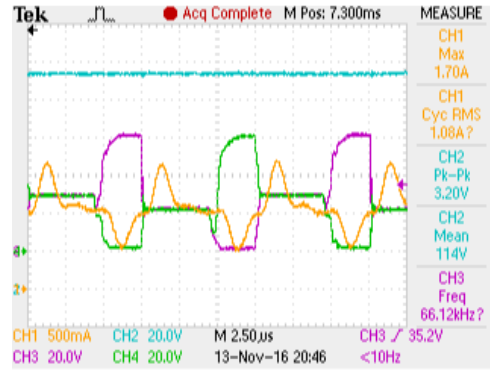
### 5.3.3 DC-DC Konvertör Testleri

Ultrakapasitörün bataryaya bağlantısını sağlayan DC-DC konvertörün testleri farklı yük ve farklı giriş gerilimlerinde yapılmıştır. Bu amaçla, çıkış yükü olarak “güvenli yük değeri” olarak 50 Ohm ve 100 Ohm değerleri seçilerek testlere başlanmıştır. Bu testlerde ultrakapasitörün farklı gerilim seviyelerindeki şarj durumu esas alınarak konvertörün çıkış davranışı incelenmiştir. Konvertör üzerinden deşarj olan kapasitör davranışı da bu testlerde gözlenmiştir. Şekil 5.17 grubunda osiloskop çıktıları için etiketlemede; mavi-konvertör çıkış gerilimi yükselmesi, turuncu-çıkış akımı değişimi, diğerleri yüksek frekanslı anahtarlama için transformatör primerinde yer alan anahtarlama gerilimleridir.

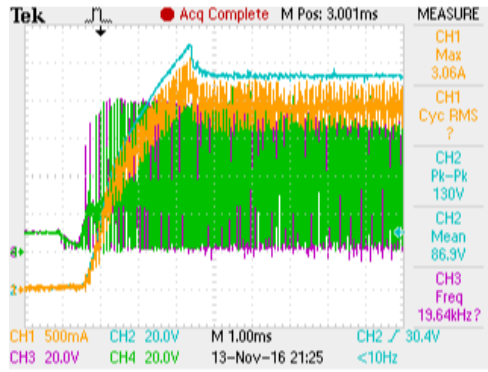




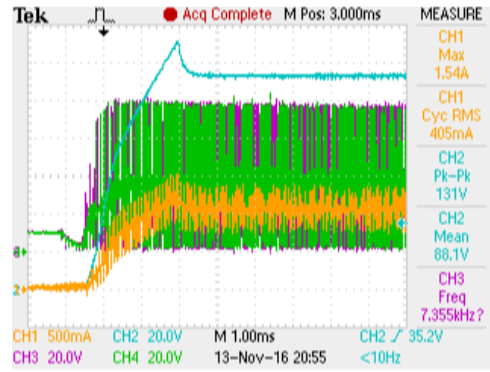
63.2 V-100 Ohm-Startup



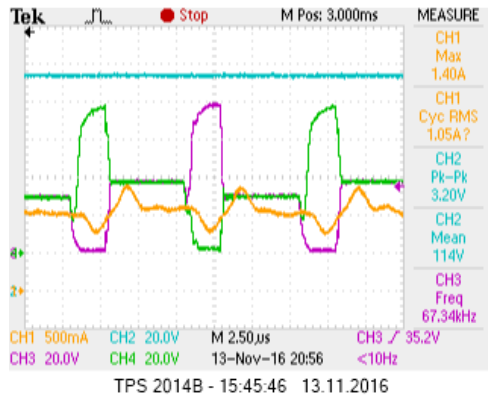
63.2 V-100 primerde anahtar gerilimleri



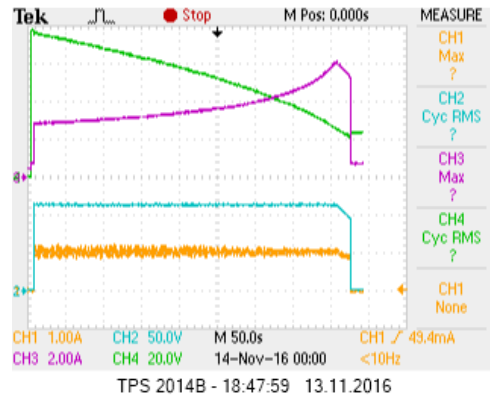
80 V-50 Ohm-Startup



80 V-100 Ohm-Startup



80 V-100 primerde anahtar gerilimleri



Konvertör üzerinden ultrakapasitör deşarjı:

Yeşil: konv giriş gerilimi, kırmızı giriş akımı,  
Mavi: Çıkış gerilimi, turuncu: çıkış akımı

Şekil 5.17 Batarya bağlantı konvertörünün farklı yük ve farklı giriş gerilim seviyelerinde test sonuçları (Mavi: Konvertörün çıkış gerilimi, Turuncu: Konvertör yük akımı)

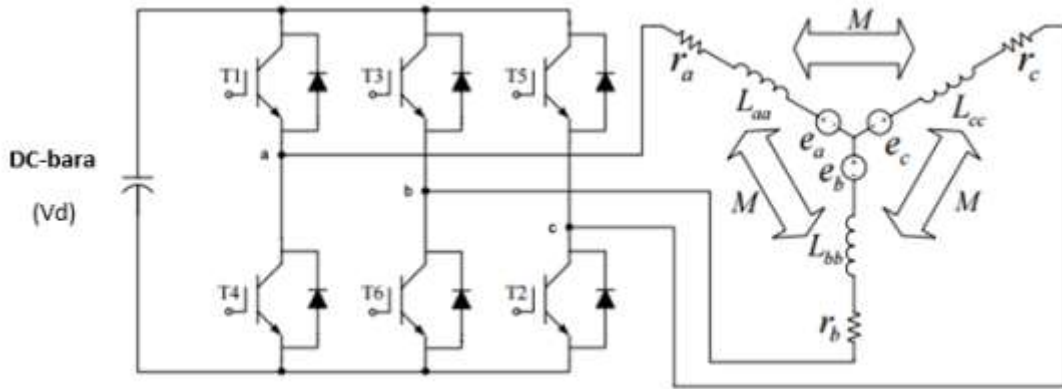
## 5.4 Araç Motorlarının Doğrudan Moment Kontrolü

Son zamanlarda fırçasız doğru akım motorlarının (BLDC) kontrol sistemlerinde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi olan doğrudan moment kontrolünün BLDC'lere uygulanabilirliği yapılan çalışmalarda görülmüştür. Doğrudan moment kontrolü ile motorun değişken yüklerle vereceği tepki en iyi duruma getirilmeye çalışılır. Elektrikli araçlar için çok önemli bir konu olan moment ve akının birlikte kontrol edilmesi, hızlı moment cevabı, yüksek performans gibi özellikler doğrudan moment kontrolü metodu ile sağlanabilmektedir.

### 5.4.1 Fırçasız DC Motorun Matematiksel Modeli

Fırçasız DC motorun faz değişkenlerine bağlı olarak matematiksel modeli oluşturulurken bazı kabullenmeler yapılacaktır. Bu kabullenmeler aşağıda sıralanmıştır:

- Motor doyumda çalışmamaktadır.
- Stator sargıları yıldız olarak, her sargıya ait direnç, endüktans, özendüktans, ortak endüktans değerleri sabit ve eşit kabul edilecektir.
- Tüm sargılarda endüklenen gerilimler ideal yamuk (trapezoidal) dalga formunda olacaktır.
- Evirici üzerindeki anahtarlar ideal kabul edilecektir.
- Demir ve histerezis kayıpları ihmal edilecektir.



Şekil 5.18 BLDC sürücüsü ve eşdeğer devresi

Üç fazlı fırçasız doğru akım motoruna ilişkin eşdeğer devre yapısı DC bara gerilimi ve evirici güç anahtarlarını da kapsayacak şekilde Şekil 5.16'da verilmiştir. Yukarıda verilen kabuller ve Şekil 5.18'den yola çıkarak BLDC'nin matematiksel modeli aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{cb} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (5.5)$$



Burada  $L_{xy}$  formunda gösterilen endüktanslar ortak endüktans ifadeleridir. Fırçasız DC motor genel olarak yüzey montajlı rotor ve toplu sargılı stator sargılarına sahiptirler. Bu tarz yapıda relüktans değişimi olmadığından endüktans değişimi olmayacaktır ayrıca faz sargıları dengeli olduğunda faz direnç değerleri de birbirine eşit olacaktır.

Eğer motor çıkık kutuplu değilse bu durumda;

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L \quad (5.6)$$

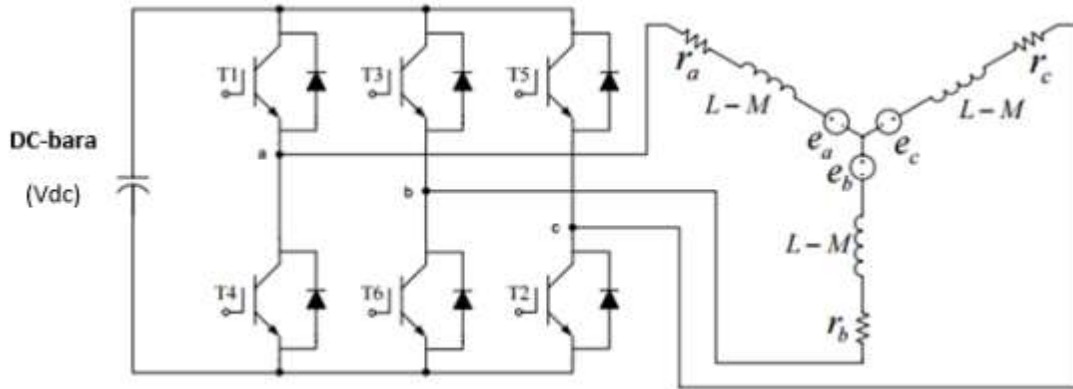
$$L_{ab} = L_{ba} = L_{bc} = L_{cb} = L_{ca} = L_{ac} = M \quad (5.7)$$

$$r_a = r_b = r_c = r_s \quad (5.8)$$

olarak alınabilir. Bu durumda matematiksel model düzenlenerek indirgenmiş matris formunda aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Fırçasız DC motor eşitlikleri düzenlendikten sonra motor modeli Şekil 2.19'daki gibi gösterilebilir.



Şekil 5.19 BLDC sürücüsü ve motor indirgenmiş eşdeğer devresi

Motor miline aktarılan güç ( $P_\zeta$ ) fazlardan elde edilen güçlerin ( $P_a, P_b, P_c$ ) toplamına eşittir.

$$P_\zeta = P_a + P_b + P_c = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (5.10)$$

Üretilen elektromanyetik moment ( $T_e$ ) ise;

$$P_\zeta = T_e \omega_m \quad (5.11)$$



$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (5.12)$$

Burada;

$e_a$  : A fazında endüklenen zıt emk gerilimi

$e_b$  : B fazında endüklenen zıt emk gerilimi

$e_c$  : C fazında endüklenen zıt emk gerilimi

$i_a$  : Stator A fazı akımı

$i_b$  : Stator B fazı akımı

$i_c$  : Stator C fazı akımı

$\omega_m$  : Mekanik olarak rotorun açısal hızı

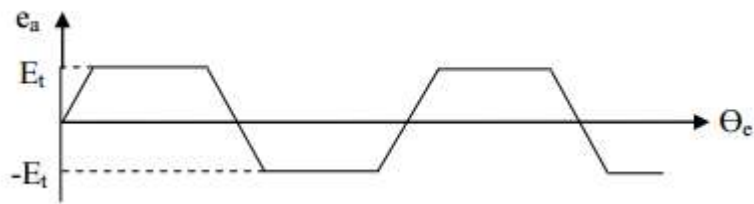
$\omega_e$  : Rotor elektriksel açısal hızı  $\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m$

P: Kutup sayısı

Motorun hareketinin dinamik denklemi;

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (5.13)$$

ile verilir. Burada  $T_L$  yük momentini, J eylemsizlik momentini ve B sürtünme katsayısıdır.



Şekil 5.20 Motorun bir fazında endüklenen gerilim dalga formu

Fırçasız DC motorun her fazında endüklenen gerilimi, Şekil 5.20'de görüldüğü gibi, trapezoidal şekildedir. Bu gerilimlerin tepe değerleri  $E_a = E_b = E_c = E_t$  olmak üzere sargı başına sarım sayısı  $N$ , sargı lineer hızı  $v$ , bir sarımın uzunluğu  $l$  olmak üzere;

$$E_t = (Bvl)N \quad (5.14)$$

yazılabilir. Manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ) sürekli mıknatıslardan sağlanır ve sabittir. Buradaki lineer hız yerine açısal hız da kullanılabilir.



$$E_t = (Bvl)N = N(Blrw_m) = k_e w_m \quad (5.15)$$

yazılabilir. Burada  $k_e$  zıt emk sabitidir. Şekil 5.18'den görüldüğü gibi rotorun elektriksel konumuna ( $\theta_e$ ) bağlı olarak endüklenen gerilimin değeri değişir. Bu değişim denklem (5.16)'daki matris fonksiyonlarıyla temsil edilebilir.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = E_t \begin{bmatrix} f_a(\theta_e) \\ f_b(\theta_e) \\ f_c(\theta_e) \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

$$f_a(\theta_e) = \begin{cases} \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta_e & , \quad \left(0 < \theta_e \leq \frac{\pi}{6}\right) \\ 1 & , \quad \left(\frac{\pi}{6} < \theta_e \leq \frac{5\pi}{6}\right) \\ -\left(\frac{6}{\pi}\right)\theta_e + 6 & , \quad \left(\frac{5\pi}{6} < \theta_e \leq \frac{7\pi}{6}\right) \\ -1 & , \quad \left(\frac{7\pi}{6} < \theta_e \leq \frac{11\pi}{6}\right) \\ \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta_e - 12 & , \quad \left(\frac{11\pi}{6} < \theta_e \leq 2\pi\right) \end{cases} \quad (5.17)$$

$$f_b(\theta_e) = \begin{cases} -1 & , \quad \left(0 < \theta_e \leq \frac{\pi}{2}\right) \\ \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta_e - 4 & , \quad \left(\frac{\pi}{2} < \theta_e \leq \frac{5\pi}{6}\right) \\ 1 & , \quad \left(\frac{5\pi}{6} < \theta_e \leq \frac{9\pi}{6}\right) \\ -\left(\frac{6}{\pi}\right)\theta_e + 10 & , \quad \left(\frac{9\pi}{6} < \theta_e \leq \frac{11\pi}{6}\right) \\ 1 & , \quad \left(\frac{11\pi}{6} < \theta_e \leq 2\pi\right) \end{cases} \quad (5.18)$$

$$f_c(\theta_e) = \begin{cases} 1 & , \quad \left(0 < \theta_e \leq \frac{\pi}{6}\right) \\ -\left(\frac{6}{\pi}\right)\theta_e + 2 & , \quad \left(\frac{\pi}{6} < \theta_e \leq \frac{\pi}{2}\right) \\ -1 & , \quad \left(\frac{\pi}{2} < \theta_e \leq \frac{7\pi}{6}\right) \\ \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta_e - 8 & , \quad \left(\frac{7\pi}{6} < \theta_e \leq \frac{9\pi}{6}\right) \\ 1 & , \quad \left(\frac{9\pi}{6} < \theta_e \leq 2\pi\right) \end{cases} \quad (5.19)$$

Tepe değer ve trapezoidal şekil fonksiyonuna göre her faza ait endüklenen gerilimler tekrar yazılırsa,

$$e_a = f_a(\theta_e)k_e w_m \quad (5.20)$$

$$e_b = f_b(\theta_e)k_e w_m \quad (5.21)$$



$$e_c = f_c(\theta_e)k_e w_m \quad (5.22)$$

Bu son bağıntıya bağlı moment ifadesi denklem (5.23)'deki gibi elde edilir.

$$T_e = k_e [f_a(\theta_e)i_a + f_b(\theta_e)i_b + f_c(\theta_e)i_c] \quad (5.23)$$

Fırçasız DC motor iki faz iletim modunda çalışırken bir faz boşta olduğundan iletim durumundaki iki fazdan eşit akım akar. Endüklenen gerilimler ile faz akımları aynı işaretli olacağından moment ifadesi denklem (5.24)'deki gibi sadeleştirilebilir. Bu eşitlikte momentin, kaynaktan çekilen akımla doğru orantılı olduğu görülür.

$$T_e = 2k_e i \quad (5.24)$$

Moment kestirimi, momentin kaynaktan çekilen akımla doğru orantılı olduğu kabul edilerek yapılabilir. Fakat bu eşitlikte endüklenen gerilimler ideal trapezoidal değilse momentte düşük frekanslı dalgalanmalar meydana gelir. Bu nedenle hassas uygulamalarda bu kestirim doğru sonucu vermeyecektir.

Fırçasız DC motorlarda senkron hızda dönen (d-q) referans düzleminde eksenlerin karşılıklı etkileri ihmal edilirse üretilen elektromanyetik moment ifadesi genel olarak;

$$T_e = \frac{3P}{4} \left[ \left( \frac{dL_{ds}}{d\theta_e} i_{sd} + \frac{d\varphi_{rd}}{d\theta_e} - \varphi_{sq} \right) i_{sd} + \left( \frac{dL_{qs}}{d\theta_e} i_{sq} + \frac{d\varphi_{rq}}{d\theta_e} - \varphi_{sd} \right) i_{sq} \right] \quad (5.25)$$

verilebilir.

Burada stator d ve q eksenli akımları;

$$\varphi_{sd} = L_{ds} i_{sd} + \varphi_{rd} \quad (5.26)$$

$$\varphi_{sq} = L_{qs} i_{sq} + \varphi_{rq} \quad (5.27)$$

şeklinde elde edilir. P,  $\theta_e$ ,  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $L_{ds}$ ,  $L_{qs}$ ,  $\varphi_{rd}$ ,  $\varphi_{rq}$  sırasıyla kutup sayısı, elektriksel rotor açısı, dönen referans düzleminde (d-q) stator akımları, stator sargı endüktansları ve rotor akılarıdır.

$$T_e = \frac{3P}{4} \left[ \left( \frac{d\varphi_{rd}}{d\theta_e} - \varphi_{sq} \right) i_{sd} + \left( \frac{d\varphi_{rq}}{d\theta_e} + \varphi_{rd} \right) i_{sq} + (L_{ds} - L_{qs}) i_{sd} i_{sq} \right] \quad (5.28)$$

Stator akısı, sabit mıknatısların sinüzoidal olarak değişmesi durumunda  $\varphi_{rd} = \varphi_m$  ve  $\varphi_{rq} = 0$  olacaktır. Burada  $\varphi_m$  rotor akısının maksimum değeridir. Dolayısıyla  $d\varphi_{rd}/d\theta_e = d\varphi_{rq}/d\theta_e = 0$  'dır. Sonuç olarak yuvarlak rotorlu ya da çıkık kutuplu SMSM ve BLDC 'ler (sinüzoidal zıt emk'ya sahip ise) için elektromanyetik moment hesabı aşağıdaki denklem haline dönüştürülebilir.



$$T_e = \frac{3P}{4} (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) = \frac{3P}{4} (\varphi_{sa} i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} i_{sa}) \quad (5.29)$$

Burada  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $\varphi_{sd}$ ,  $\varphi_{sq}$ ,  $i_{sa}$ ,  $i_{s\beta}$ ,  $\varphi_{sa}$ ,  $\varphi_{s\beta}$  senkron hızda dönen ve duran eksen takımında stator akımları ve akılarıdır. Soldaki eşitlik senkron referans düzlemde, sağ taraftaki eşitlik ise stator düzleminde elektromanyetik moment eşitliği olarak verilmiştir.

Yuvarlak kutuplu ve yüzey montajlı mıknatıslardan oluşan rotor durumunda d ve q eksenini endüktansları ( $L_{ds}$  ve  $L_{qs}$ ) eşit olarak kabul edilir. Eğer sabit mıknatısların değişimi sinüzoidal değilse  $d\varphi_{rd}/d\theta_e \neq d\varphi_{rq}/d\theta_e \neq 0$  olur. Bu durum fırçasız DC motorlar için geçerlidir. Denklem (5.28)'daki ifade fırçasız DC motorlar için yeniden düzenlenirse üretilen momentin ifadesi;

$$T_e = \frac{3P}{4} \left[ \left( \frac{d\varphi_{rd}}{d\theta_e} - \varphi_{sq} \right) i_{sd} + \left( \frac{d\varphi_{rq}}{d\theta_e} + \varphi_{rd} \right) i_{sq} + (L_{ds} - L_{qs}) i_{sd} i_{sq} \right] \quad (5.30)$$

$$T_e = \frac{3P}{4} \left[ \left( \frac{d\varphi_{rd}}{d\theta_e} - \varphi_{sq} \right) i_{sd} + \left( \frac{d\varphi_{rq}}{d\theta_e} + \varphi_{rd} \right) i_{sq} \right] \quad (5.31)$$

şeklinde elde edilir.

Duran referans düzlemdeki ( $\alpha - \beta$  eksen sistemi) rotor akıları ( $\varphi_{ra} - \varphi_{r\beta}$ ) ve stator akımları ( $i_{sa} - i_{s\beta}$ ) senkron hızda dönen eksen sistemindeki akılar ( $\varphi_{rd} - \varphi_{rq}$ ), stator akımları ( $i_{sd}$  ve  $i_{sq}$ ) ve rotor açısı ( $\theta_e$ ) cinsinden;

$$\varphi_{ra} = \varphi_{rd} \cos \theta_e - \varphi_{rq} \sin \theta_e \quad (5.32)$$

$$i_{sa} = i_{sd} \sin \theta_e + i_{sq} \cos \theta_e \quad (5.33)$$

$$i_{s\beta} = i_{sd} \cos \theta_e - i_{sq} \sin \theta_e \quad (5.34)$$

bağıntıları ile yazılabilir. Bu bağıntılar düzenlenerek denklem (5.31)'de kullanılırsa üretilen momentin duran eksen sistemindeki ifadesi elde edilir.

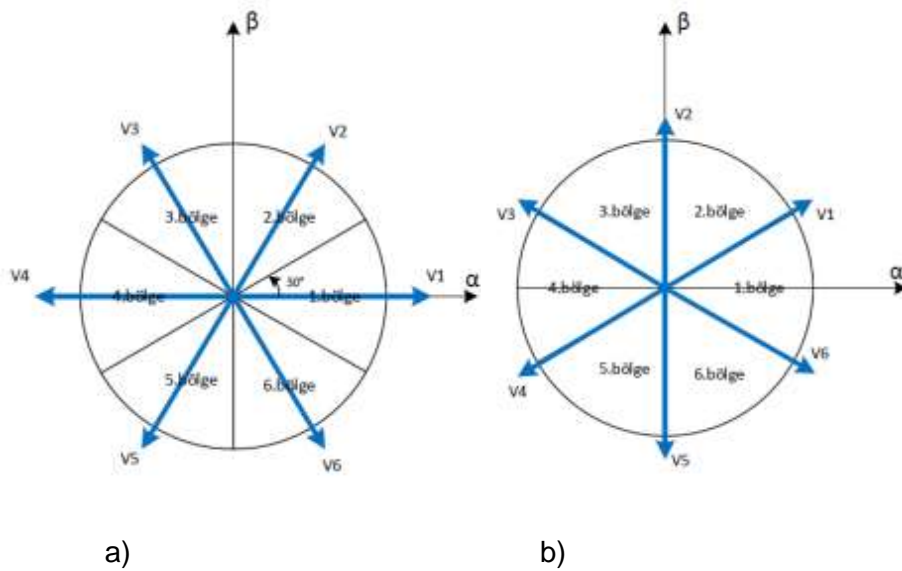
$$T_e = \frac{3P}{2} \left[ \frac{d\varphi_{ra}}{d\theta_e} i_{sa} + \frac{d\varphi_{r\beta}}{d\theta_e} i_{s\beta} \right] \quad (5.35)$$

Burada  $\frac{d\varphi_{ra}}{d\theta_e} = \frac{e_a}{\omega_e}$  ve  $\frac{d\varphi_{r\beta}}{d\theta_e} = \frac{e_\beta}{\omega_e}$  olarak ifade edilebilir. Denklem (5.35)'deki bağıntıdan görüldüğü gibi hala rotor konumuna bağlı ifadeler vardır. Bu yüzden momentin hesaplanması için yüksek maliyetli sensörler ya da faz akımına bağlı yoğun işlemler ile rotor konumunun tam olarak belirlenmesi gerekir.

## 5.4.2 BLDC Motorun İki Faz İletimde Doğrudan Moment Kontrolü

Fırçasız doğru akım motorlarının iki faz veya üç faz iletim modunda doğrudan moment kontrolü yapılabilir. BLDC motorların doğrudan moment kontrolü (DTC ya da DMK) klasik sürekli mıknatıslı senkron motorlara (SMSM) göre biraz farklıdır. Şekil 5.21'de a) SMSM için anahtarlama vektörleri b) BLDCM için anahtarlama vektörleri gösterilmiştir. Bu farklılıkları kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- SMSM'lerde herhangi bir anda fazların üçüde iletimdedir, fakat BLDC motorlarda  $120^\circ$  derece iletim modunda komutasyon anları dışında sadece iki faz iletimdedir. Boştaki faza bağlı evirici bacağındaki alt ve üst anahtarlar kesimdedir. Bu yüzden SMSM'lerde anahtarlama gerilim vektörleri 3 basamaklı olarak temsil edilirken, BLDC'lerde anahtarlama gerilim vektörleri 6'lı lojik ifadeler ile oluşturulur.
- BLDC motorlarda gerilim vektörleri, SMSM'lere göre  $\alpha\beta$  düzleminde  $30^\circ$  derece kayık vaziyettedir. BLDC'lerde aktif gerilim uzay vektörleri, vektör çemberinde her sektör çizgisinin üzerindeyken, SMSM'lerde iki sektör çizgisinin tam ortasında yer alır.
- BLDC motorlarda stator akısının değişimi sinüzoidal olmadığı için moment hesabında rotor konumuna bağlı ifadeler vardır ( $d\psi_{rd}/d\theta_e \neq 0$ ,  $d\psi_{rq}/d\theta_e \neq 0$ ). Buna karşın SMSM'lerde moment tahmini duran eksen ( $\alpha\beta$ ) düzleminde yapılabilir. Rotor konumuna bağlı ifadeler moment eşitliğinde yer almaz.



Şekil 5.21 a) SMSM için anahtarlama vektörleri b) BLDCM için anahtarlama vektörleri

### 5.4.2.1 Elektromanyetik Moment Hesabı

Yuvarlak kutuplu yüzey montajlı BLDC motorlar için ister iki faz iletim modunda olsun, ister üç faz iletim modunda olsun duran eksen takımında elektromanyetik moment ifadesi (5.36) bağıntısıyla gibi ifade edilebilir.

$$T_{em} = \frac{3P}{2} \left[ \frac{e_a}{w_e} i_{s\alpha} + \frac{e_\beta}{w_e} i_{s\beta} \right] = \frac{3P}{2} [k_a(\theta_e) i_{s\alpha} + k_\beta(\theta_e) i_{s\beta}] \quad (5.36)$$

Burada,  $w_e$  rotor elektriksel hızı,  $k_a(\theta_e)$ ,  $k_\beta(\theta_e)$ ,  $e_a$ ,  $e_\beta$  sırasıyla duran eksen takımında elektriksel rotor pozisyonuna göre zıt emk sabitleri ve motor zıt emk'larıdır.

İkinci taraftaki eşitlik paydasında rotor hız bilgisi içermez dolayısıyla sıfır hız bölgesinde herhangi bir problem olmadan moment hesabı yapılabilir. Bu yüzden ikinci taraftaki eşitlik daha iyi sonuç verir.

Denklem (5.36) ya göre faz-nötr zıt emk değerinin bilinmesine gerek yoktur. Eğer motorda nötr noktası erişilebilir değilse, faz-nötr zıt emk bilgisi doğrudan ölçüm yapılarak elde edilemez. Bunun yerine faz-faz arası zıt emk dalga şekilleri ( $e_{ab}, e_{bc}, e_{ca}$ ) kullanılabilir. Bunun için faz-faz arası clarke dönüşümü kullanılır.

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} \quad (5.38)$$

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} \quad (5.39)$$

Denklem (5.38)'de verilen makine denklemlerinde  $V_{s\alpha}, V_{s\beta}, R_s, L_s$  sırasıyla  $\alpha\beta$  ekseninde stator gerilimleri, stator direnci ve endüktansdır.

$$\varphi_{s\alpha} - L_s i_{s\alpha} = \varphi_{r\alpha} \quad (5.40)$$

$$\varphi_{s\beta} - L_s i_{s\beta} = \varphi_{r\beta} \quad (5.41)$$

Burada  $\varphi_{s\alpha}$  ve  $\varphi_{s\beta}$  sırasıyla  $\alpha$  ve  $\beta$  eksen stator akılarıdır. Denklem (5.40) ve (5.41) kullanılarak DTC-BLDC sürücüsü için sabit moment bölgesinde stator akısı referansı ( $|\varphi_s(\theta_e)|^*$ ) DTC-SMSM sürücülerindekine benzer şekilde;

$$|\varphi_s(\theta_e)|^* = |\varphi_r(\theta_e)|^* = \sqrt{\varphi_{r\alpha}(\theta_e)^2 + \varphi_{r\beta}(\theta_e)^2} \quad (5.42)$$

olarak bulunur.



Klasik iki faz iletimde yarı kare dalga akım kontrol metodunda stator akısı boştaki faz ve boşluk diyodu etkisiyle altıgendir. Stator akısında her 60°'de bir keskin akı düşüşü meydana gelir. Bu düşüşün oranının belirlenebilmesi de çok zordur. Bahsedilen bu durum iki faz iletimde DTC'de de oluşur. Dolayısıyla iki faz iletim modunda BLDC'nin stator akısının genliğinin kontrolünü yapmak zordur.

#### 5.4.2.2 Anahtarlama Tablosundan Uygun Gerilim Vektörü Seçimi

BLDC'nin iki faz iletim modunda gerilim vektörü tablosu için literatürde farklı çalışmalar yapılmıştır. Stator akısının ve momentin eş zamanlı olarak kontrol edildiği ve sıfır gerilim vektörlerinin de yer aldığı anahtarlama tablosu da kısmen doğru olarak geliştirilmiştir. Stator akısı kontrolünün iptal edilerek sıfır gerilim vektörlerinin kullanılmadığı anahtarlama tabloları da vardır. Bu çalışmada kullanılan ve doğrulanan anahtarlama yani gerilim vektörü seçim tablosu Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2 İki faz iletim modunda gerilim anahtarlama vektörleri

Moment Hatası ( $\tau$ )	Stator Akısı Bölgesi ( $\theta$ )						
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	
1	$\mathbf{V}_2(001001)$	$\mathbf{V}_3(011000)$	$\mathbf{V}_4(010010)$	$\mathbf{V}_5(000110)$	$\mathbf{V}_6(100100)$	$\mathbf{V}_1(100001)$	
-1	$\mathbf{V}_5(000110)$	$\mathbf{V}_6(100100)$	$\mathbf{V}_1(100001)$	$\mathbf{V}_2(001001)$	$\mathbf{V}_3(011000)$	$\mathbf{V}_4(010010)$	

Tablo 5.2'de verilen bu anahtarlama tablosuna göre stator akısı referansı sıfır olarak kabul edilir. Sistemde sadece moment kontrolü vardır. Eğer gerçek moment referans momentten küçükse, histeresiz kontrolör çıkışı 1 olur ve stator akısının bulunduğu bölgeye göre momenti arttıracak gerilim vektörü seçilir. Eğer gerçek moment referans momentten büyükse, histeresiz karşılaştırıcı çıkışı -1 olur ve stator akısının konumuna göre momenti azaltacak gerilim vektörü eviriciye uygulanır. Gerilim vektörlerinin üç fazlı evirici sistemindeki konumları Şekil 5.22'de gösterilmiştir.

DC bara gerilimine ve evirici anahtarlama konumlarına bağlı olarak  $\alpha\beta$  düzleminde aktif gerilim vektörleri çıkışları aşağıdaki gibi belirlenir:

$$V_1(100001) \Rightarrow V_{1\alpha} = \frac{\sqrt{3}V_{dc}}{2}, V_{1\beta} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (5.42)$$

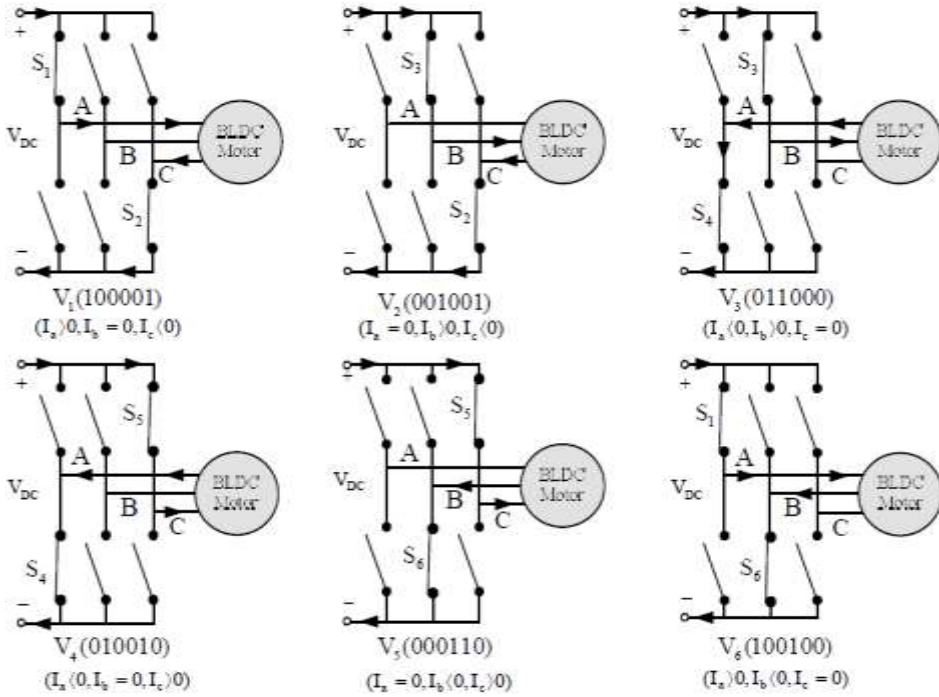
$$V_2(001001) \Rightarrow V_{2\alpha} = 0, V_{2\beta} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (5.43)$$

$$V_3(011000) \Rightarrow V_{3\alpha} = -\frac{\sqrt{3}V_{dc}}{2}, V_{3\beta} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (5.44)$$

$$V_4(010010) \Rightarrow V_{4\alpha} = -\frac{\sqrt{3}V_{dc}}{2}, V_{4\beta} = -\frac{V_{dc}}{2} \quad (5.45)$$

$$V_5(000110) \Rightarrow V_{5\alpha} = 0, V_{5\beta} = -\frac{V_{dc}}{2} \quad (5.46)$$

$$V_6(100100) \Rightarrow V_{6\alpha} = \frac{\sqrt{3}V_{dc}}{2}, V_{6\beta} = -\frac{V_{dc}}{2} \quad (5.47)$$



Şekil 5.22 Gerilim vektörleri konumları

İnvertörde (sürücüde-eviricide) anahtarlama konumuna bağlı olarak  $V_{s\alpha}$ ,  $V_{s\beta}$  çıkış gerilimleri denklem (5.47) ve (5.48)'deki gibi genelleştirilmiş haliyle yazılabilir.

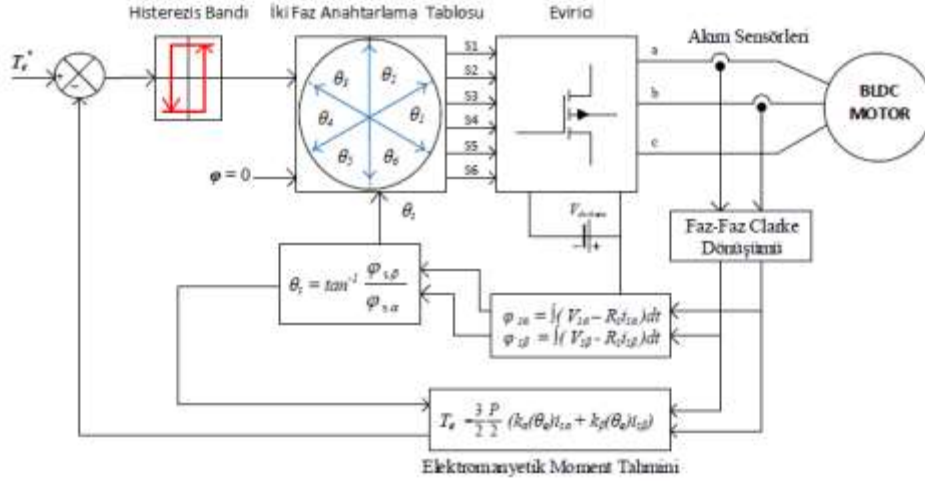
$$V_{x\alpha} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{dc} [S_1(S_6 + S_4) - S_2(S_3 + S_5)] \quad (5.47)$$

$$V_{x\beta} = \frac{V_{dc}}{2} [S_6(S_1 + S_3) + S_2(S_3 - S_5) - S_4(S_5 + S_1)] \quad (5.48)$$

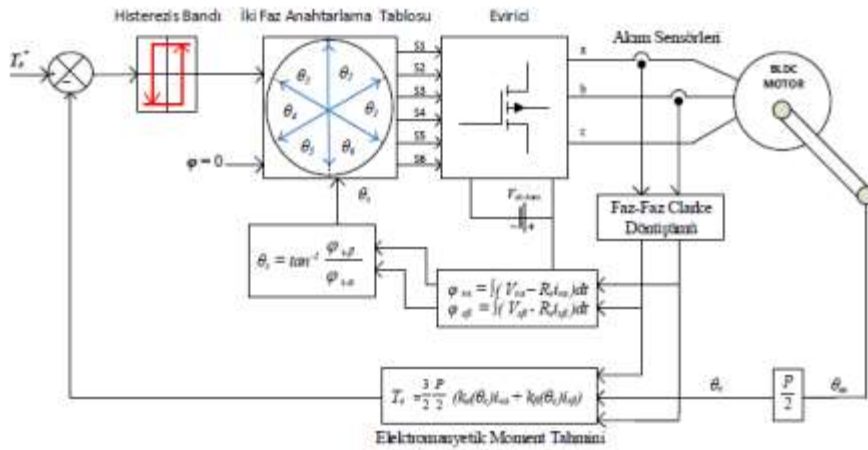
İki faz iletim modunda DTC çalışmasında dikkat edilmesi gereken bir nokta da motorun faz endüktansdır. Eğer motorun faz endüktansı çok düşükse moment ve akımda meydana gelen

harmonikler çok fazla olur. Bu yüzden DTC metodu için makinenin endüktansının yüksek seçilmesi gerekir. Aksi takdirde moment salınımını azaltmak için çok düşük örnekleme sürelerine ve çok hızlı işlem yapan DSP'lere ihtiyaç duyulacaktır.

BLDCM'nin iki faz iletimde doğrudan moment kontrol diyagramı hız sensörlü ve hız sensörsüz çalışma durumuna göre Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'de gösterilmiştir.



Şekil 5.23 Hız sensörsüz iki faz iletim modunda BLDCM-DTC blok diyagramı



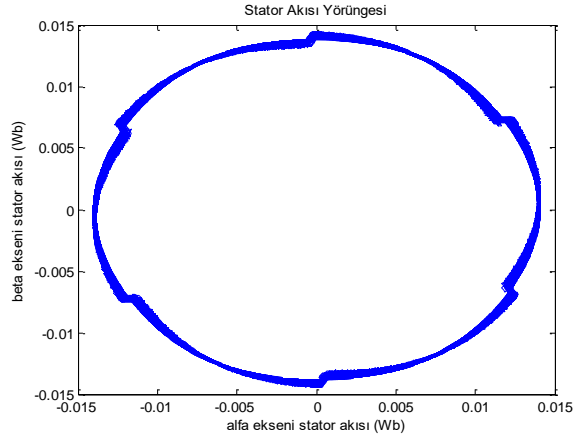
Şekil 5.24 Hız sensörlü iki faz iletim modunda BLDCM-DTC blok diyagramı

### 5.4.2.3 İki Faz İletimde BLDC Motorun Doğrudan Moment Kontrolünün Benzetimi

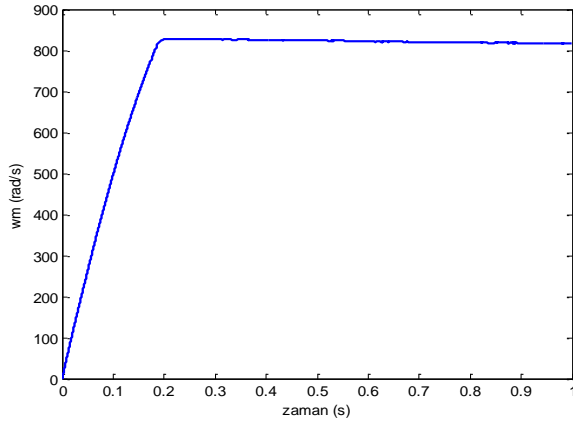
BLDC'nin iki fazlı doğrudan moment kontrolü benzetimi (simülasyonu) Matlab-Simulink programı ile gerçekleştirilmiştir. Benzetim simulink şeması Şekil 5.25'te verilmiştir. Benzetimde yer alan evirici ve BLDC motorun modellenmesinde Matlab'in SimPower Systems toolbox'ında yer alan hazır bloklardan faydalanılmıştır. Örnekleme zamanı 10µs



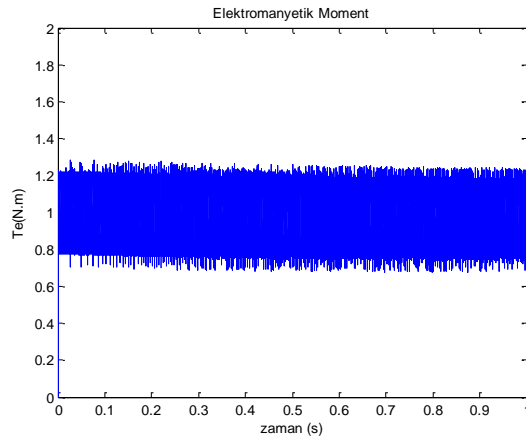
Benzetim modelinden elde edilen sonuçlar için; ilk durumda motor yüksüz olarak test edilmiştir Benzetim çalışmasında moment referansı 1 Nm olarak girilmiştir. Elde edilen akım, hız ve moment cevabı, sırasıyla, Şekil 5.26, 5.27 ve 5.28'de verilmiştir.



Şekil 5.26 Alfa-beta eksenli stator akı yörüngesi

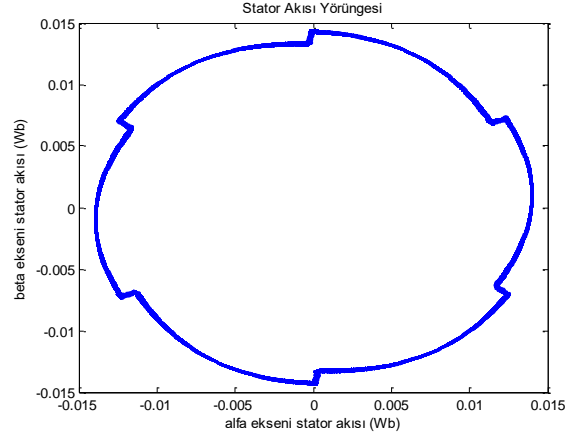


Şekil 5.27 Motorun hız cevabı

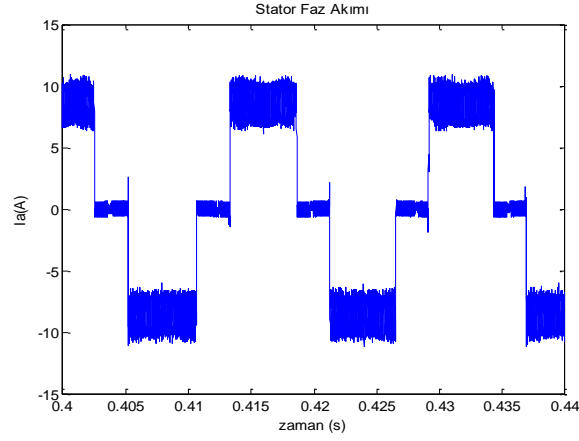


Şekil 5.28 Motorun moment cevabı

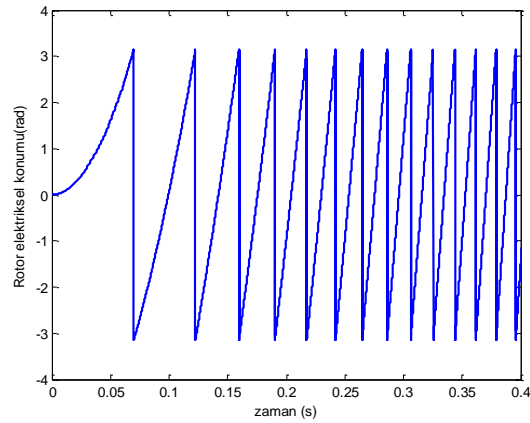
İkinci durumda, moment referansı 1Nm için ve yük 0.95 Nm girilerek motorun tepkisi incelenmiştir. Elde edilen akım, moment ve stator akısı bileşenleri, sırasıyla, Şekil 5.29, 5.30 ve 5.31'de verilmiştir.



Şekil 5.29 Alfa-beta eksenli stator akı yörüngesi



Şekil 5.30 Motor faz akımı



Şekil 5.31 Sektörel olarak rotor konum değişimi



Benzetim sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Özellikle, BLDCM için DTC uygulamasının çok bilinen ve uygulanabilen bir yöntem olmadığı göz önüne alındığında, elde edilen bulgular önemlidir. Daha sonraki bölümlerde verilecek deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu da anlaşılmıştır.

### 5.4.3 BLDC Motorun Üç Faz İletimde Doğrudan Moment Kontrolü

Proje çalışmasının bu bölümünde, BLDC motorun üç faz iletim modunda hız sensörsüz doğrudan moment kontrolü ve dolaylı akı kontrolü incelenmiştir. Çalışmada, üç faz bileşenlerin (abc) iki faz rotor düzlemine (dq) dönüştürülmesi işlemi 2x2 Faz-Faz arası Park dönüşümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, elektromanyetik moment tahmini için ölçülen üç faz zıt emk değerleri yerine rotor konumuna bağlı zıt emk sabitleri ( $k_d(\theta)$  ve  $k_q(\theta)$ ) kullanılmıştır. Üç faz iletim modda çalışmada kullanılan anahtarlama tablosu ve moment hesabı iki faz iletim moduna göre farklıdır. BLDCM'ların üç faz iletim modunda DTC çalışması klasik SMSM'nin doğrudan moment kontrolüne oldukça benzerdir.

#### 5.4.3.1 Faz-Faz Arası Clarke ve Park Dönüşümleri

Faz-faz arası Clarke dönüşümü için orijinal Clarke dönüşümünden farklı olarak iki giriş değişkeni (ba – ca) gerekir. Bu giriş değişkenleri abc düzleminden aşağıdaki gibi elde edilir (Öztürk 2008).

Simetrik, üç fazlı makinada;  $i_\alpha$  ve  $i_\beta$  ile gerçek üç fazlı stator akımları arasında aşağıdaki gibi ilişki vardır.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

Veya dengesiz sistemler için sıfır bileşenler ihmal edilmediği zaman;

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_{s0} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix} \quad (5.50)$$

şeklinde. Burada k dönüştürme sabitidir. Değişen güç için  $2/3$  ve değişmeyen güç için  $\sqrt{2/3}$ 'tür.



$i_\alpha$  ve  $i_\beta$  akım ifadeleri aşağıdaki gibi genişletilerek yazılabilir.

$$i_\alpha = \frac{2i_a - i_b - i_c}{3} = \frac{i_a - i_b + i_a - i_c}{3} = \frac{-i_{ba} - i_{ca}}{3} \quad (5.51)$$

$$i_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}(i_b - i_c) = \frac{\sqrt{3}}{3}(i_b - i_a + i_a - i_c) = \frac{\sqrt{3}}{3}(i_{ba} - i_{ca}) \quad (5.52)$$

Burada  $i_{ba} = i_b - i_a$  ve  $i_{ca} = i_c - i_a$  olarak alınmıştır. Elde edilen bu eşitlikler matris formunda düzenlenirse 2x2'lik Faz-Faz arası Clarke dönüşüm matrisi elde edilmiş olur.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

2x2 Faz-Faz arası Park dönüşümü de matris formunda bazı trigonometrik işlemler sonucu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta - \frac{\pi}{6}) & -\sin(\theta + \frac{\pi}{6}) \\ -\cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ba} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

#### 5.4.3.2 Elektromanyetik Moment Hesabı

Stator akılarının ve endüktanslarının rotor konumuna bağlı ifadeler içermesi nedeniyle klasik stator eksen takımında yapılan moment tahmini BLDC motorlar için geçerli değildir. Bunun için dq referans düzleminde zıt emk sabitlerine ve stator akımlarına bağlı yeni bir moment tahmini yapılması gerekir.

Moment tahmini BLDCM'un üç faz iletimde doğrudan moment kontrolünün en önemli kısmıdır. Bunun için ilk olarak motorun zıt emk dalga şekli ( $e_{ba}, e_{ca}$ ) off-line olarak elde edilir ve ba-ca referans düzlemi zıt emk sabitlerine ( $k_{ba}, k_{ca}$ ) dönüştürülür. Ardından Faz-Faz arası Park dönüşümü yapılarak elektriksel rotor konumuna bağlı dq referans düzlemi zıt emk sabitlerine ( $k_d(\theta_e), k_q(\theta_e)$ ) dönüşüm işlemi gerçekleştirilir. Elde edilen zıt emk sabitlerinin elektriksel rotor açısına bağlı değerleri kontrol programında bir periyotluk tablo oluşturularak moment hesabında kullanılır.

Elektromanyetik moment hesabı için (5.55) bağıntısı kullanılmıştır.



$$T_{em} = \frac{3P}{2} [k_d(\theta_e)i_{ds}^r + k_q(\theta_e)i_{qs}^r] \quad (5.55)$$

Burada, P kutup sayısı,  $k_d$ ,  $k_q$ ,  $i_d$ ,  $i_q$  rotor pozisyonuna bağlı zıt emk sabitleri ve rotor referans düzleminde yazılmış stator akımlarıdır.

### 5.4.3.3 Stator Akısı Kontrolü

BLDCM'nin stator gerilimi eşitlikleri  $\alpha\beta$  referans düzleminde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} \quad (5.56)$$

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} \quad (5.57)$$

$$\varphi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + \varphi_{r\alpha} \quad (5.58)$$

$$\varphi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + \varphi_{r\beta} \quad (5.59)$$

Burada,  $\varphi_{r\alpha}$ ,  $\varphi_{r\beta}$  rotor akıları, zıt emk dalga şeklinden dolayı senkron motorlardan farklı olarak sinuzoidal olarak değişim göstermezler. Ayrıca, BLDC motorlarda stator akısının yörüngesi zıt emk'nın trapezoidal olmasından dolayı SMSM'lerdeki gibi tam yuvarlak değildir. Dolayısıyla, BLDC motorların stator akı kontrolünü yapması zordur. Rotor pozisyonuna bağlı rotor akısı değişimini göz önünde bulundurmamak gerekir. Bunun yerine stator akısının genliğinin kontrolü sabit moment bölgesinde  $i_{ds}$  akımı sıfır tutularak yapılabilir. Alan zayıflatma bölgesinde çalışılacaksa  $i_{ds}$  akımı maksimum momenti elde etmek için biraz azaltılabilir.

Stator akısı tahmini;

$$\varphi_{s\alpha} = \int (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \quad (5.60)$$

$$\varphi_{s\beta} = \int (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \quad (5.61)$$

eşitlikleri ile bulunur.  $V_{s\alpha}$  ve  $V_{s\beta}$  stator akısının bulunduğu sektöre göre DC bara geriliminden faydalanılarak hesaplanır. Bir kontrol periyodu süresince motora 6 anahtarlama vektöründen uygun olan biri uygulanarak kontrol gerçekleştirilir.

$$\varphi_{s\alpha} = V_{s\alpha} t - R_s \int i_{s\alpha} dt + \varphi_{s\alpha}(0) \quad (5.62)$$



$$\varphi_{s\beta} = V_{s\beta}t - R_s \int i_{s\beta} dt + \varphi_{s\beta}(0) \quad (5.63)$$

$\varphi_{s\alpha}(0)$  ve  $\varphi_{s\beta}(0)$  stator akıları başlangıç değerleridir. Motorun faz-faz arası zıt emk sabiti (kLL) biliniyorsa ve motor sıfır pozisyonuna getirilirse  $\varphi_{s\alpha}(0) = 2k_{LL}\pi/\sqrt{3}$  ve  $\varphi_{s\beta}(0) = 0$  olarak hesaplanır.

#### 5.4.3.4 Alçak Geçiren Filtre Kullanarak Stator Akısının Tahmini

Doğrudan moment kontrollü bir sürücünün tüm hız bölgelerinde kararlı olarak çalışabilmesi için akının doğru tahmin edilmesi çok önemlidir. DTC sürücüsünün performansı, büyük ölçüde stator akısı uzay vektörünün doğru tahmin edilmesine bağlıdır. Akım ve gerilim ölçümünde meydana gelen hatalar, sensörlerdeki faz gecikmesi, dönüştürme kazancındaki hatalar v.b. integral işleminde hataya neden olur. Özellikle çok düşük frekanslarda, stator geriliminin düşük olması, stator direncinin değerinin değişmesi ve yarıiletken elemanlar üzerindeki gerilim düşümlerinden dolayı integral hatası artar. İntegralin pratik olarak gerçekleştirilmesinde, akı konumunda büyük hataya yol açan kaymanın kompanze edilmesi önemli bir etkidir.

DTC'de stator akısı tahmini gerilim modeline dayalı olarak yapılıyorsa düşük hızlarda problemler oluşur. Bu problemin çözümü için düşük hızlarda akım modeline dayalı olarak stator akısı tahmini yapılabilir. Ancak akım modelinin rotor parametrelerine bağımlı olması ve rotor konumu bilgisi için hız algılayıcısı gerektirmesi sürücü güvenilirliğini azalttığı için endüstriyel uygulamalarda çok istenmez. Gerilim modeline dayalı tahmin işleminde, herhangi bir gürültü veya akımda meydana gelen küçük bir dc kayma integratörü doyuma götürebilir. Bunun için saf integratör yerine alçak geçiren filtreler kullanılır. Fakat alçak geçiren filtreler, faz ve genlik hataları nedeniyle özellikle kesim frekansına yakın noktalarda sürücü performansını düşürmektedir.

Saf integratörden kaynaklanan başlangıç değeri ve dc kayma problemlerinin önlenmesi için en bilinen yöntem saf integratör yerine alçak geçiren filtre kullanmaktır. Alçak geçiren filtrenin matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\varphi_{s\alpha} = \frac{1}{s + w_c} (E_{s\alpha}) \quad (5.64)$$

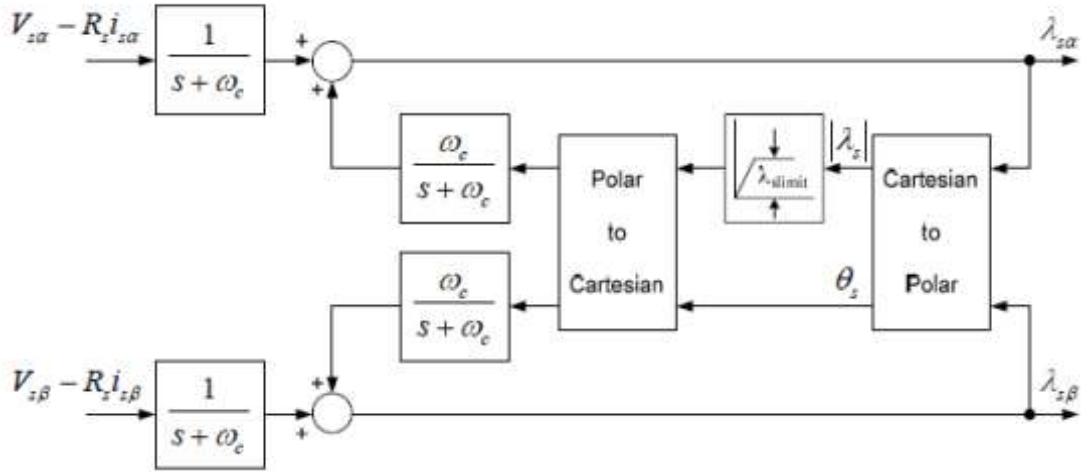
$$\varphi_{s\beta} = \frac{1}{s + w_c} (E_{s\beta}) \quad (5.65)$$

Bu eşitlikler, ayrı zamanlı olarak aşağıdaki biçimiyle düzenlenebilir:

$$\varphi_{s\alpha} = \frac{1}{1 + \Delta t_s w_c} (\Delta t_s E_{s\alpha}(k) + \varphi_{s\alpha}(k-1)) \quad (5.66)$$

$$\varphi_{s\beta} = \frac{1}{1 + \Delta t_s w_c} (\Delta t_s E_{s\beta}(k) + \varphi_{s\beta}(k-1)) \quad (5.67)$$

Filtrenin kesim frekansı çok küçük seçilirse saf integratör çalışmasına yaklaşılar ve dc kayma önlenemez, eğer kesim frekansı çalışma frekansından yüksek seçilirse dc kayma azalır ancak faz ve genlik hatalarına neden olur. Stator akısında da bozulmalar gerçekleşir. Dolayısıyla kesim frekansı çalışma frekansıyla uyumlu seçilmelidir. Alçak geçiren filtrenin genlik ve faz hatalarının kompanzasyonu sağlanarak DTC sürücüsünün kararlı rejimde performansı iyileştirilebilir. Bunun için Şekil xxx'deki gelişmiş filtre kullanılabilir.



Şekil 5.32 Gelişmiş stator akı tahmin edici blok şeması

Şekil 5.32'de verilen faz ve genlik kompanzasyonu yapılmış gelişmiş akı tahmin edicinin matematiksel ifadesi (5.68) bağıntısıyla elde edilir.

$$\varphi_s = \frac{1}{s + w_c} E_s + \varphi_s^{lim} \frac{w_c}{s + w_c} \quad (5.68)$$

Bu eşitlik iki kısma ayrılarak incelenirse;

$$\varphi_s = \varphi_s^{FF} + \varphi_s^{com} \quad (5.69)$$

Burada  $\varphi_s^{FF}$  alçak geçiren filtre çıkışıdır ve ayrık zamanda düzenlenirse;

$$\frac{\varphi_s^{FF}(k) - \varphi_s^{FF}(k-1)}{\Delta t_s} + \varphi_s^{FF}(k) * w_c = E_s(k) \quad (5.70)$$

$$\varphi_s^{FF}(k) = \frac{1}{1 + \Delta t_s w_c} (\Delta t_s E_s(k) + \varphi_s(k-1)) \quad (5.71)$$

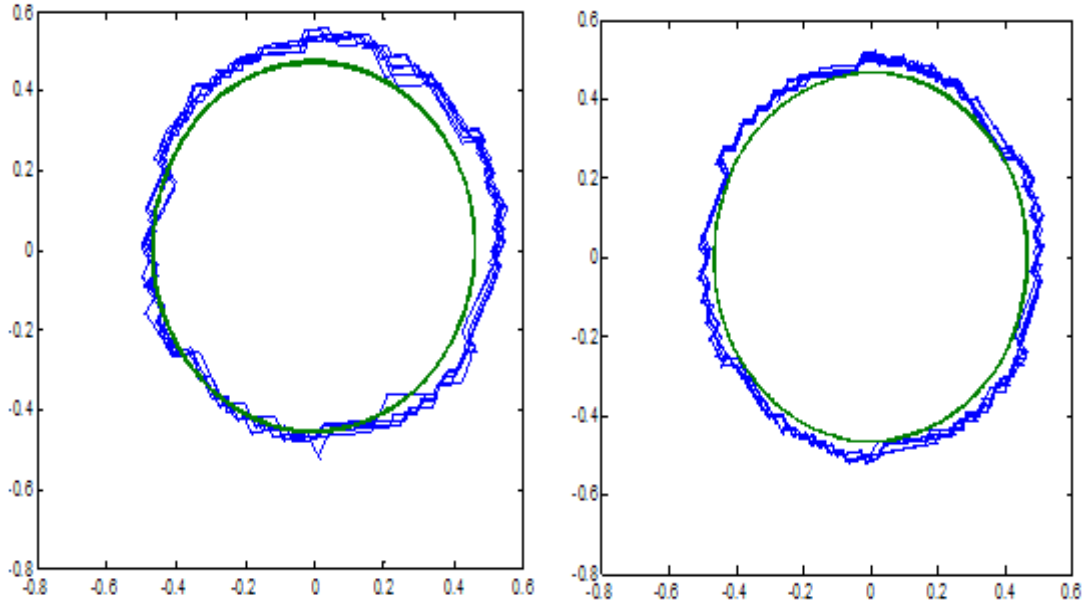
Benzer şekilde eşitliğin ikinci tarafındaki  $\varphi_s^{com}$  çıkıştaki faz ve genlik hatasını kompanse eden geri besleme sinyalidir.

$$\varphi_s^{com}(k) = \frac{1}{1 + \Delta t_s w_c} (\varphi_s^{com}(k-1) + \Delta t_s w_c \varphi_s^{lim}(k)) \quad (5.72)$$

Burada,  $\varphi_s^{lim}$ , integral işleminin çıkışının stator akısının referans değerini aşmasını önlemek için kullanılır.

Uygulamada alçak geçiren filtrenin kesim frekansı ( $w_c$ ) çalışma frekansı ( $w_c$ )'nin yaklaşık olarak 0.1 - 0.5 katı olacak şekilde belirlenir/ belirlenmiştir. Bunun için stator akısının ortalama frekansının hesaplanması gerekir.

Saf integratör kullanılarak yapılan stator akısı tahmininde, ölçülen akıma çok küçük bir süre uygulanan dc hatanın stator akısında oluşturduğu kayma Şekil 5.33'de verildiği şekliyle çok net olarak görülmektedir. Filtrenin uygulanması sonucu stator akısındaki düzelme görülmektedir. Simulasyonda filtrenin kesim frekansı ( $w_c$ ) 20 rad/s seçilmiştir.



Şekil 5.33 Kompanse edilmiş ve kompanse edilmemiş stator akıları



### 5.4.3.5 Akı Dönüşünün Kontrolü ve Gerilim Vektörü Seçimi

Stator akısının açısı, uygun anahtarlama vektörünün seçilmesi açısından önem arz eder. Stator akısının açısının bulunduğu bölge aşağıdaki bağıntı ile belirlenir.

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}} \quad (5.73)$$

Stator akısının genliğinin ve dönüşünün kontrolü için kullanılan anahtarlama tablosu Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3 Üç faz iletim modunda anahtarlama vektör tablosu

$\varphi$	$\tau$	Stator Akısı Bölgesi $\theta$					
		$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	$\theta(4)$	$\theta(5)$	$\theta(6)$
$\varphi = 1$	$\tau = 1$	V2(110)	V3(010)	V4(011)	V5(001)	V6(101)	V1(100)
	$\tau = -1$	V6(101)	V1(100)	V2(110)	V3(010)	V4(011)	V5(001)
$\varphi = -1$	$\tau = 1$	V3(010)	V4(011)	V5(001)	V6(101)	V1(100)	V2(110)
	$\tau = -1$	V5(001)	V6(101)	V1(100)	V2(110)	V3(010)	V4(011)

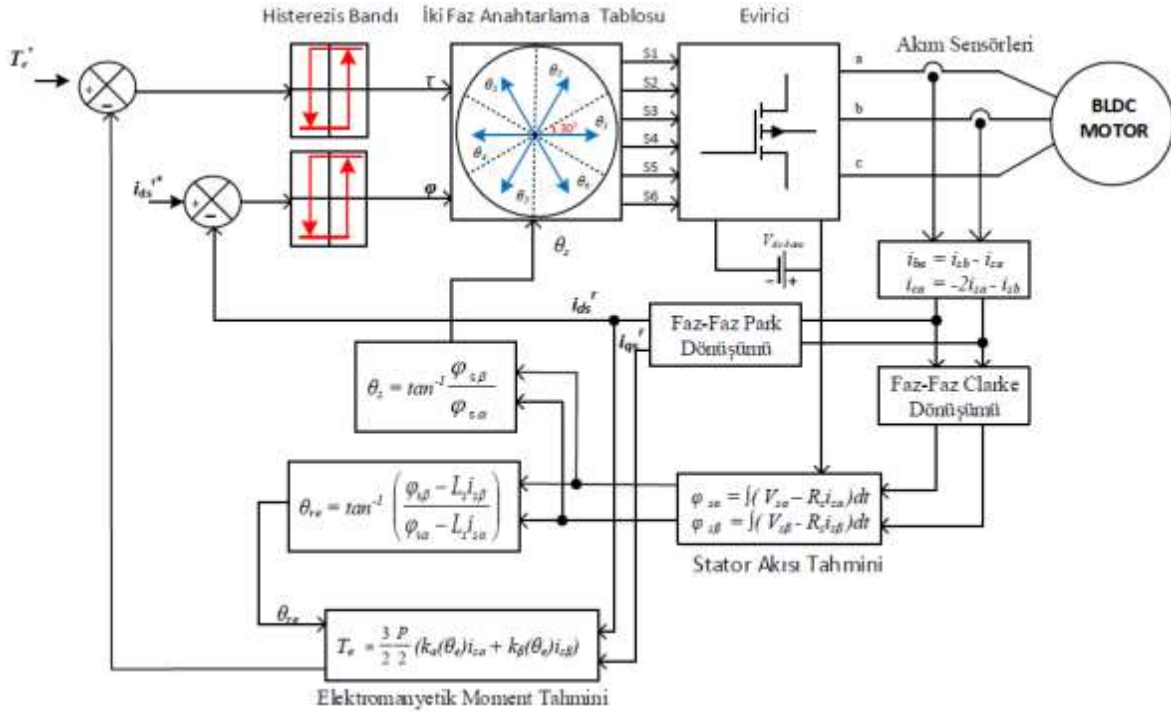
Anahtarlama tablosu yorumlandığında, vektörlerin seçimi için 3 değişkene bağlılık vardır. Bunlar akı ve moment histerezis band çıkışından gelen bilgi, diğeri ise stator akısı uzay vektörünün açısıdır. Akı ve moment histerezis karşılaştırıcı çıkışı 1 veya -1 değerlerini alabilir. Eğer referans akı gerçek değerden büyük ise karşılaştırıcı çıkışı 1 değerinin alır, küçükse -1 değerini alır. Aynı durum moment karşılaştırıcısı içinde geçerlidir. Stator akısı açısı ise bulunan bölgeyi belirler.

### 5.4.3.6 Rotor Konumunun Tahmini

Elektromanyetik moment hesabında, kontrol algoritmasında oluşturulan rotor konumuna bağlı zıt emk sabiti değerlerinin tablodan doğru olarak seçilmesi için rotor konumunun doğru tahmin edilmesi gerekir. Rotor konumu (5.74)'deki bağıntıyla hesaplanır.

$$\theta_{re} = \tan^{-1} \frac{\varphi_{s\beta} - L_s i_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha} - L_s i_{s\alpha}} \quad (5.74)$$

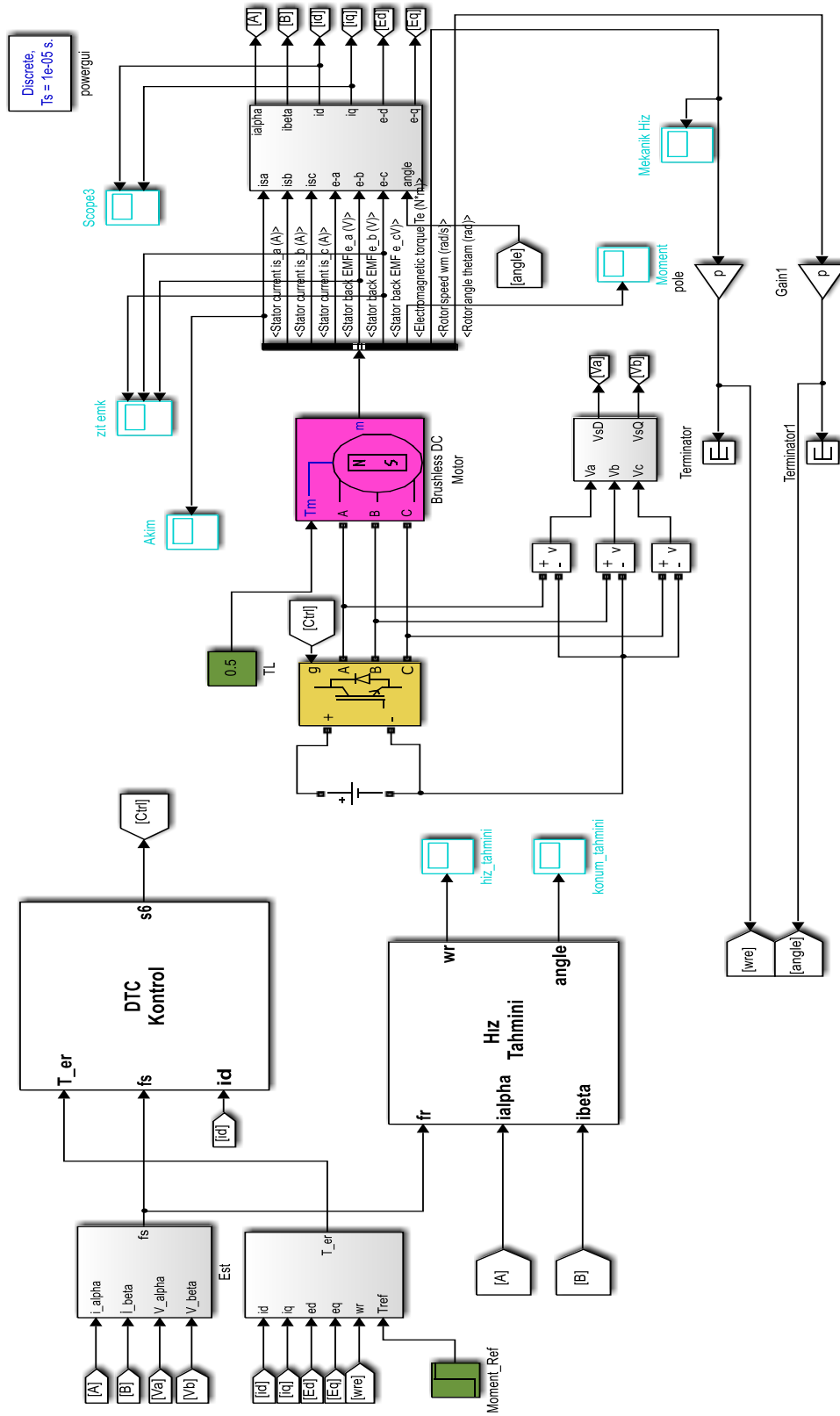
BLDCM'nin üç faz iletim modunda sensörsüz DTC çalışmasına ilişkin blok diyagramı Şekil 5.34'te ilkesel olarak verilmiştir.



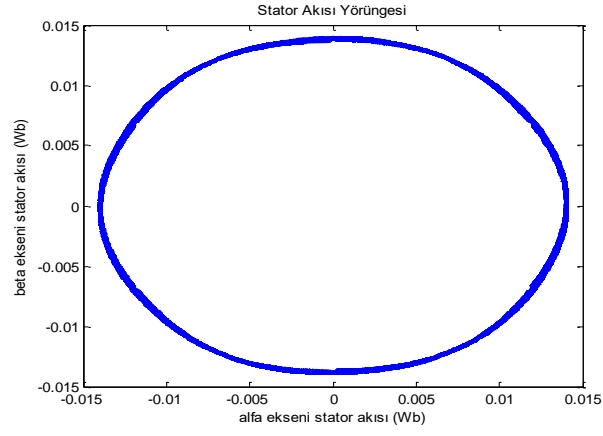
Şekil 5.34 Üç faz iletim modunda BLDCM-DTC çalışmasına ilişkin blok diyagram

#### 5.4.3.7 Üç Faz İletim Modunda BLDCM-DTC Çalışma Benzetimi

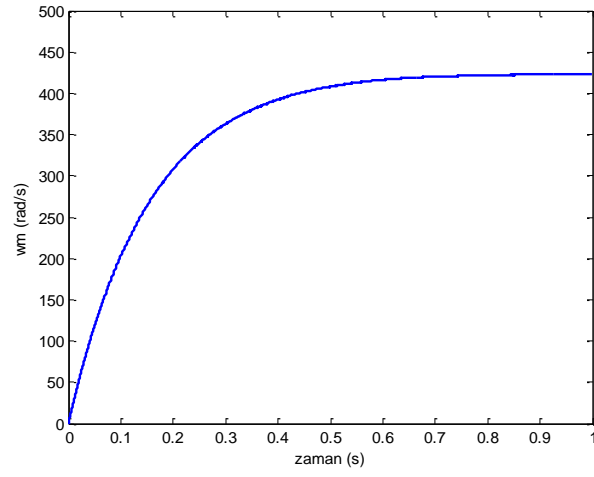
BLDCM için üç faz iletim modlu doğrudan moment kontrol benzetimi de Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetimde örnekleme zamanı  $10\mu s$  olarak alınmıştır. Kullanılan motorun faz endüktansının çok düşük olması sebebiyle moment ve akımda meydana gelen salınımların azaltılması için düşük örnekleme zamanı kullanılmıştır. Stator akısı kontrolü yapılmamıştır, sadece moment kontrollü olarak motor kontrol edilmiştir. Benzetimde kullanılan moment ve akım histeresiz bantı iki seviyelidir. Moment için bant genişliği  $0.01Nm$ , stator akısı için bant genişliği  $0.001Wb$  alınmıştır. Benzetim modeli blok şeması Şekil 5.35’de verilmiştir. Simulasyon sonuçları; stator akısı yörüngesi, motor hız cevabı, motor moment cevabı, motor faz akımı, stator d-ekseni akım bileşeni, alfa-beta ekseninde stator akıları sırasıyla Şekil 5.36 – Şekil 5.41’de verilmiştir.



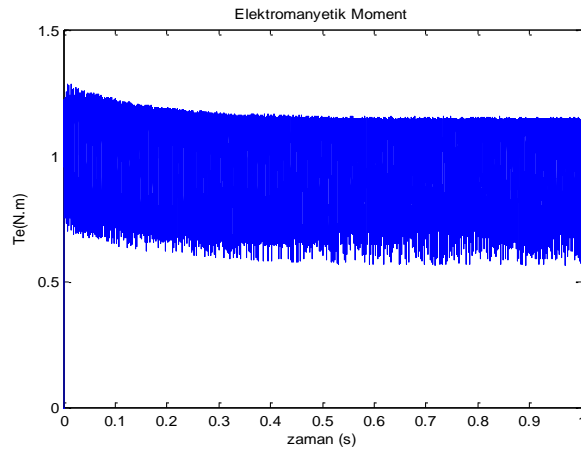
Şekil 5.35 Üç faz iletim modunda BLDCM-DTC benzetimi için simulink blok diyagramı



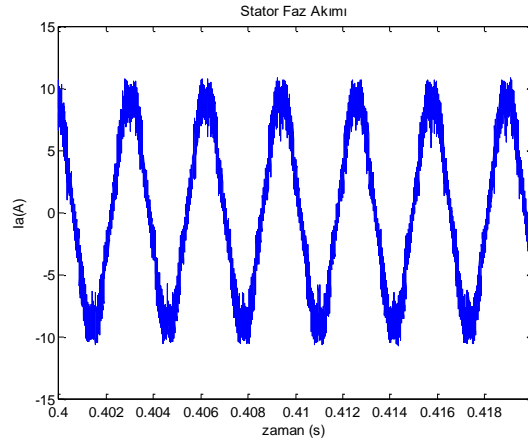
Şekil 5.36 Stator akısı yörüngesi



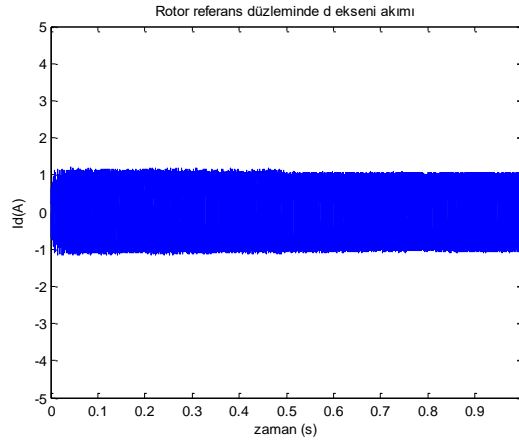
Şekil 5.37 Motor hız cevabı



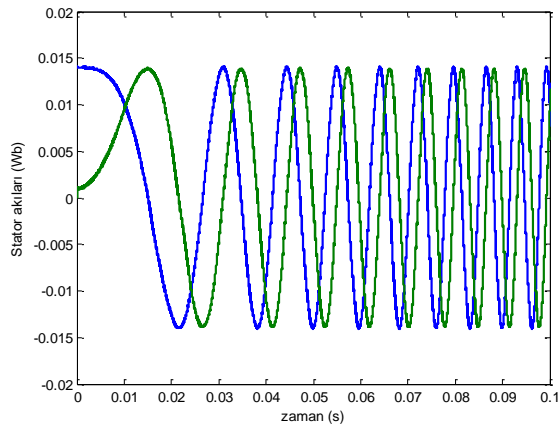
Şekil 5.38 Motor moment cevabı ( $T_{ref}=1.0N.m$   $T_y=0.5N.m$ )



Şekil 5.39 Motor faz akımı



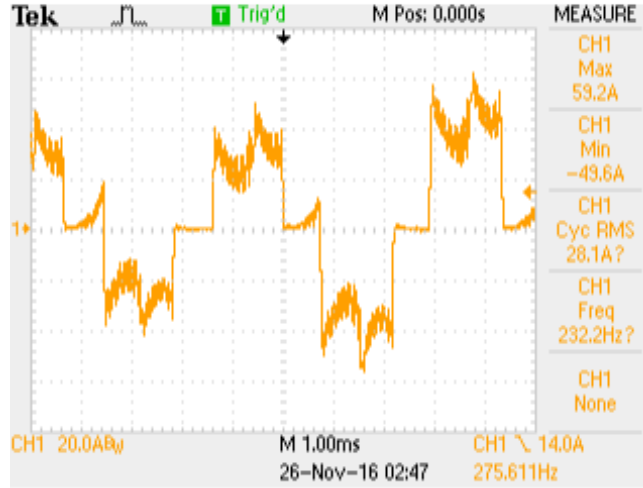
Şekil 5.40 Stator d-ekseni akım bileşeni



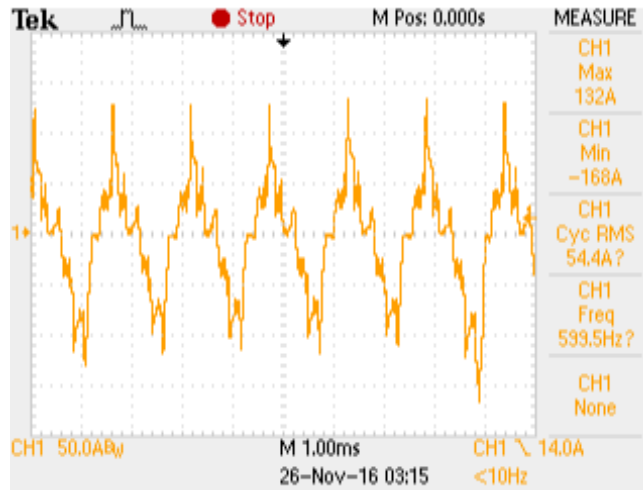
Şekil 5.41 Alfa-beta ekseninde stator akıları

#### 5.4.4 Doğrudan Moment Kontrolünde Uygulama Sonuçları

Yapılan benzetim çalışmalarının validasyonu için iki faz iletim modu ve üç faz iletim modunda motor faz akımlarının gözlenmesi yeterli olacaktır. BLDCM-DTC için iki faz iletim modunda motor faz akımı Şekil 5.42'de, üç faz iletim modunda motor faz akımı ise Şekil 5.43'de verilmiştir. Diğer taraftan, devam eden bölümlerde zaten ilgili test sonuçlarına yer verilmiştir.



Şekil 5.42 İki faz iletim modunda BLDCM-DTC için motor faz akımı



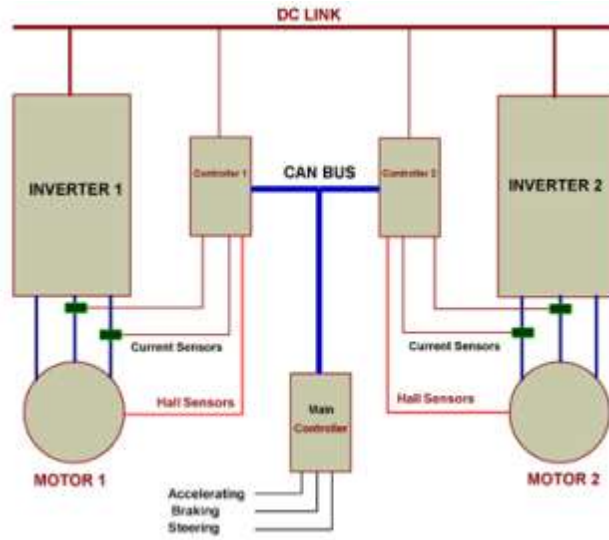
Şekil 5.43 Üç faz iletim modunda BLDCM-DTC için motor faz akımı

#### 5.5 Araç Dinamikleri ve Elektronik Diferansiyel

Bir taşıtın performansının yanı sıra, onun ivmelenme, frenleme ve dönme hareketlerindeki kabiliyeti de oldukça önemlidir. Taşıt veriminin artırılması aşamasında motor, güç aktarma ve aerodinamik yapısının iyileştirilmesinin yanında taşıtın dinamik karakteristiklerinin de



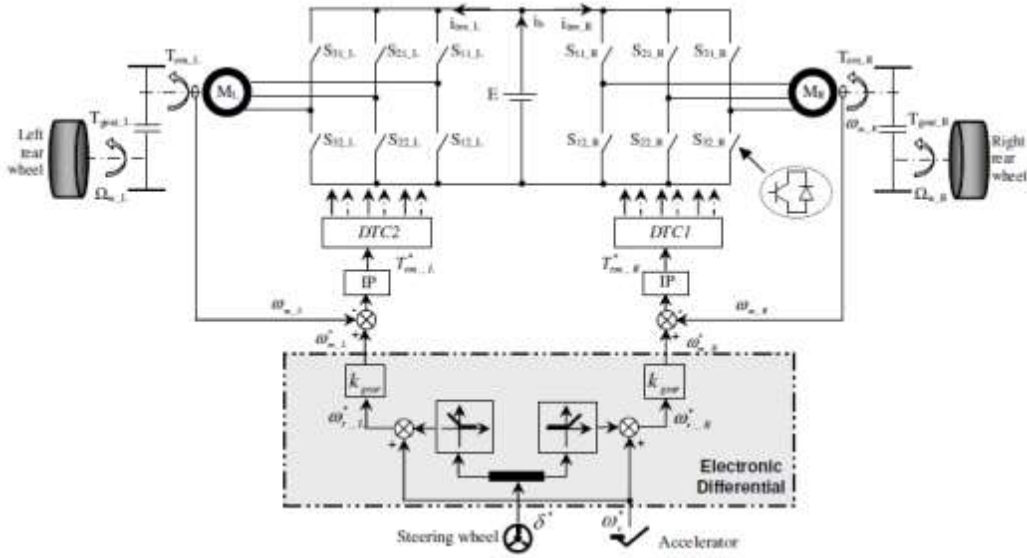
iyileştirilmesi gerekli bir işlemdir. Taşıtın yola tutunması, doğrultusunu koruması ve dönüşlerde savrulmaması için ön düzen ayarlarının dinamik karakteristiklerine bağlı olarak belirlenmesi gereklidir. Taşıtın yol ile temasını sağlayan tekerleklerin konumunun ve taşıtın hareketi esnasındaki pozisyonunun tam olarak belirlenmesi taşıtın dinamik karakteristiklerini ve taşıt verimini iyileştireceği gibi sürüş güvenliği ile sürüş konforu açısından da önem arz etmektedir. Şekil 5.44'de ilkesel olarak projede tasarımı planlanan araç için iki motorlu iki sürücülü (invertörlü) CAN protokollü haberleşme yapan bir sürüş sistemi verilmiştir. Bu ilkesel yapı göz önüne alınarak sürüş dinamikleri ve çift motor kullanıldığı için elektronik diferansiyel analizi yapılmıştır.



Şekil 5.44 Elektrikli araç için sürüş kontrol sistemi genel yapısı

Proje kapsamında, geleneksel araçlarda tekerleklerin farklı çaplı dönüş açılarında tekerleklere farklı hız ve tork sağlayan mekanik diferansiyel yerine maliyet ve hafiflik açısından elektronik diferansiyel tasarımı ve uygulaması ön görülmüştür. Bu sistemde direksiyon açısına bağlı olarak tahrik tekerleklerindeki moment ve hız farklılıkları hesaplanarak bu veriler motorların kontrolünde girdi olarak kullanılmaktadır. Viraj boyunca hareket eden araçta ön tekerlerin uygun açılarla yönlendirilmiş olması gerekmektedir. Aksi halde savrulma, tekerlerin aşınması ve kararsız sürüş gibi olumsuz etkiler ortaya çıkmaktadır. Bu yapıda viraja girildiğinde ön tekerler birbirine paralel değildir. Viraj içinde kalan teker dıştaki tekere göre biraz daha fazla dönmektedir. Böylece tekerlerin gereken dairesel yol boyunca hareketleri sağlanmış ve yüksek hızlarda da geometriden kaynaklanan sorun çözülmüştür. Dönüş yarıçapına bağlı olarak tekerlek açıları ve ilgili tekerlek hızları yaklaşık olarak tespit edilmektedir. Kontrol sisteminde teker açılarının ölçülmesi ve ona bağlı olarak hız karakteristiklerinin belirlenmesinde direksiyon açısından faydalanılmaktadır.

Projenin süresince, benzetim modellerinin oluşturulması tamamlanmıştır. Elektronik diferansiyel uygulaması için ilkesel blok şeması kontrol modeli Şekil 5.45'te verilmiştir. Burada, her bir motor sürücüsünün aracın sağa veya sola dönüşünde farklı referans alması gerektiğinden, araç kullanıcısının düz yol için karar verdiği hıza göre direksiyon açısı dikkate alınarak aracın yolda savrulmadan dönüş açısını takip etmesi sağlanmaktadır. Her bir tahrik motoru için bağımsız olarak elektronik diferansiyele uygun doğrudan moment kontrolü ve hız kontrolü birlikte gerçekleştirilmektedir.

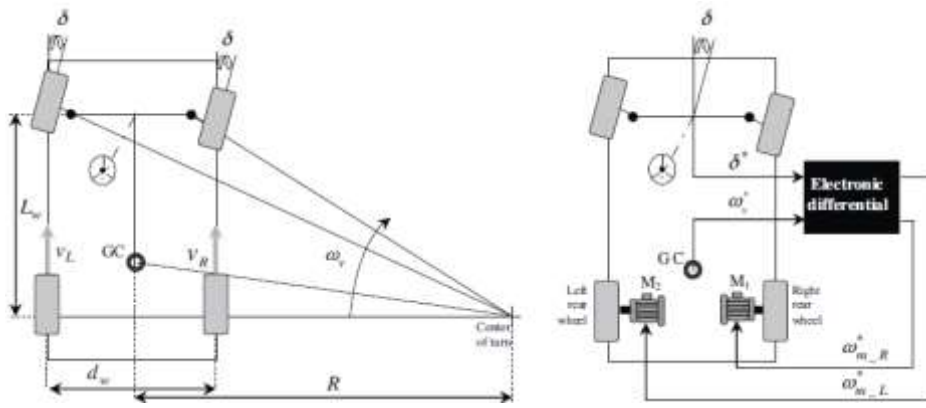


Şekil 5.45 Çift motor ve çift invertörlü elektronik diferansiyel uygulaması blok şeması (Hartani vd. 2009)

Elektronik diferansiyel uygulamasında, özellikle, tasarımı gerçekleştirilen aracın ağırlığı da önemli ölçüde azaltılmaktadır. Zira, mekanik diferansiyellerde, hem aks bağlantısı hem ayna dişliler hem de diğer diferansiyel dişliler, mekanik kutusuyla birlikte, önemli bir ağırlık teşkil etmektedir. Literatürde an yaygın kullanılan model olan klasik Ackerman modeli bu projede de tercih edilmiş olup sistem modeli ilkesel tanımları model denklemleriyle birlikte sırasıyla Şekil 5.46 ve Şekil 5.47'da verilmiştir. Bu modele uygun olarak gerçekleştirilen Matlab/Simulink benzetim modeli Şekil 5.48'de sunulmuştur.

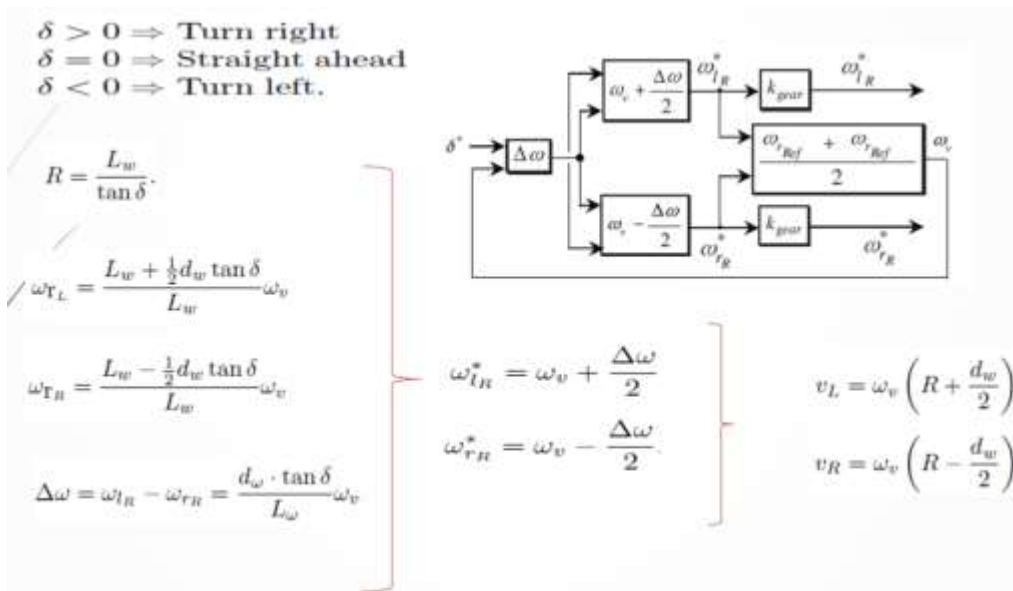
Şekil 5.46'den de görüldüğü gibi, farklı tekerler için farklı referans hız ve momentlerin oluşturulmasında; ön-arka tekerler arasındaki mesafe, direksiyon dönüş açısı, aynı aksa bağlı tekerler arası mesafe ve aracın düz yol için verilen hız bilgisi (ivmelenme veya frenleme için verilen kullanıcı kararı) kullanılmaktadır. Ancak, literatürde yer alan klasik Ackerman modelinde geribesleme olmadığından verilen diferansiyel hızın tekerleklerde gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilmemektedir. Proje kapsamında bu durum dikkate alınarak bizzat tekerleklerde gerçekleşen hız bilgisi ile referans arasındaki hata en aza indirilecek şekilde

DTC algoritmasının optimizasyonu yapmıştır. Klasik Ackerman modelinin doğrulanmasına yönelik uygun Matlab/Simulink benzetimi alt modeli Şekil 5.48'de BLDC motor için yapılmış olup motor davranışı verilen 20 rad/s lik düz yol hızı için farklı direksiyon açıları (sağa farklı farklı dereceler ve sola farklı farklı derecelerde) test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.49'da sunulmuş olup gerekli açıklamalar şekil üzerinde yapılmıştır. Burada, motor davranışının başlangıç hızından (sıfırdan) verilen referans hıza kadar oldukça sorunsuz olduğu da görülmektedir. Sağa dönüşlerde, sağ teker daha küçük yarıçaplı bir dönüş yapması gerektiğinden daha uzun yol alması gereken dış tekerle (sol tekerle) göre yavaşlatılmıştır. Sola dönüşlerde de bunun tersi gerçekleşmiştir.

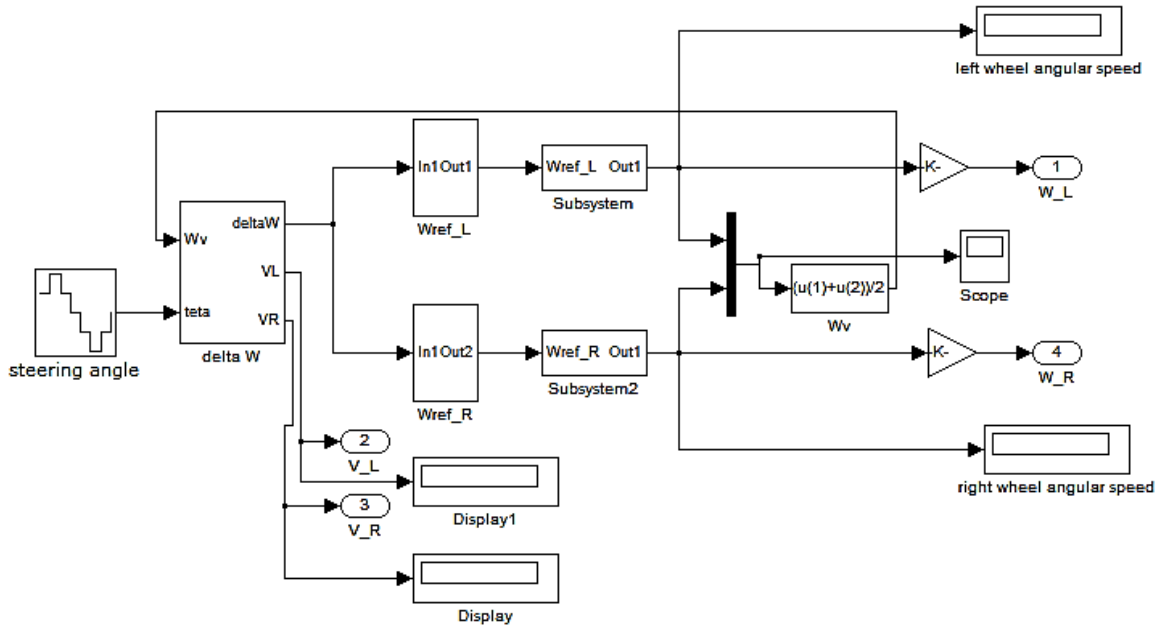


Şekil 5.46 Klasik Ackerman model tanımı

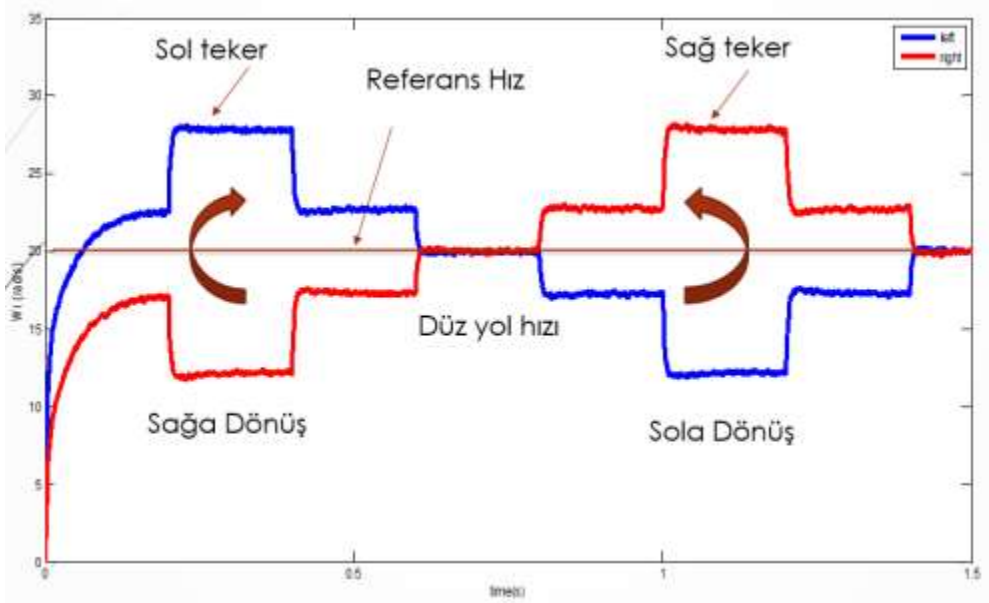
Burada,  $L_w$  : Ön-Arka teker merkezleri arasındaki mesafe (wheelbase),  $\delta$ :Direksiyon açısı (the steering angle),  $d_w$  : Aynı aksa bağlı tekerler arasındaki mesafe,  $\omega_L$  ve  $\omega_R$  : sırasıyla, sol ve sağ teker için verilecek referans hız (sağlanması gereken hız).



Şekil 5.47 Klasik Ackerman modeline göre farklı tekerler için referans hızların elde edilmesi



Şekil 5.48 Elektronik diferansiyel uygulaması için Matlab/Simulink benzetim alt modeli



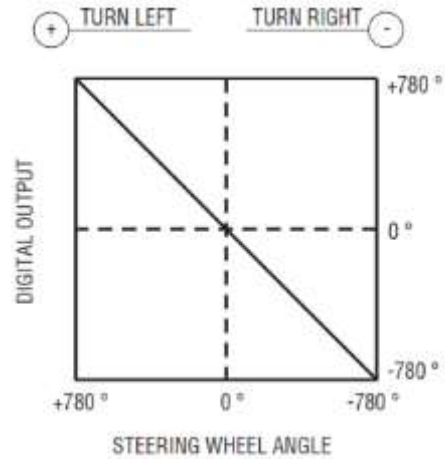
Şekil 5.49 Elektronik diferansiyel Matlab/Simulink benzetim modelinde sağ-sol teker hızı

Benzetim ve yazımları tamamlanan elektronik diferansiyel sisteminin araç üzerinde test edilmiştir. Uygulamada en önemli kısımlardan birisi araç teker açılarının uygun bir şekilde tespit edilmesidir. Bunun için en iyi çözüm direksiyon açısının doğru bir şekilde tespit edilmesidir. Bu amaçla direksiyon miline akupla edilen bir hız sensöründen yararlanılmıştır. Araç direksiyon açısını algılamak üzere direksiyon mili üzerine monte edilmektedir. Uygulanmak üzere direksiyon açısı tespit sensörü araca akuple edilebilecek hale getirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan açı sensörünün teknik özellikleri Tablo 5.4'de, açı sensörü ve onun çıkış karakteristiğini gösteren bir resim ise Şekil 5.x50'de verilmiştir. Direksiyon sensörü sağa

ve sola dönüşleri 0.1 duyarlıkla  $-780^{\circ}$  ile  $780^{\circ}$  aralığında algılamakata ve one göre çıkış vermektedir. Çıkış değeri CAN-BUS haberleşmesi üzerinden araç teker hızlarının kontrolü için referans değer olarak işlemciye aktarılmaktadır. Bu referans değer gör sağ ve sol motor hızları ayarlanmaktadır.

Tablo 5.4 Açı sensörünün teknik özellikleri

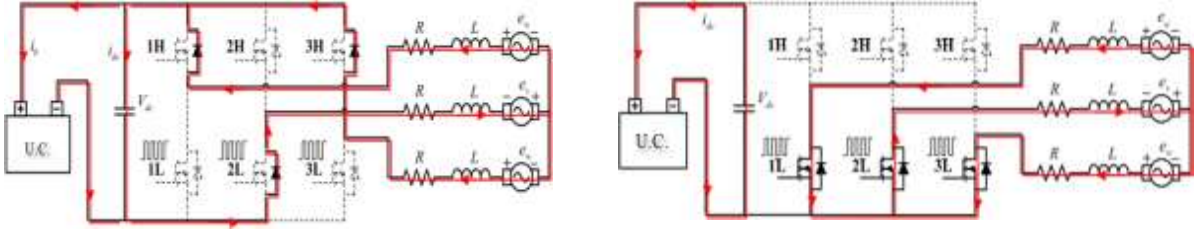
Tanım	Değer	Birim
Ölçüm aralığı	-780 and 780	Derece
Duyarlılık	0.1	Derece
Veri iletişim hızı	500	Kbit/s
Veri hızı	10	ms



Şekil 5.50 Direksiyon açı sensörü ve çıkış karakteristiği

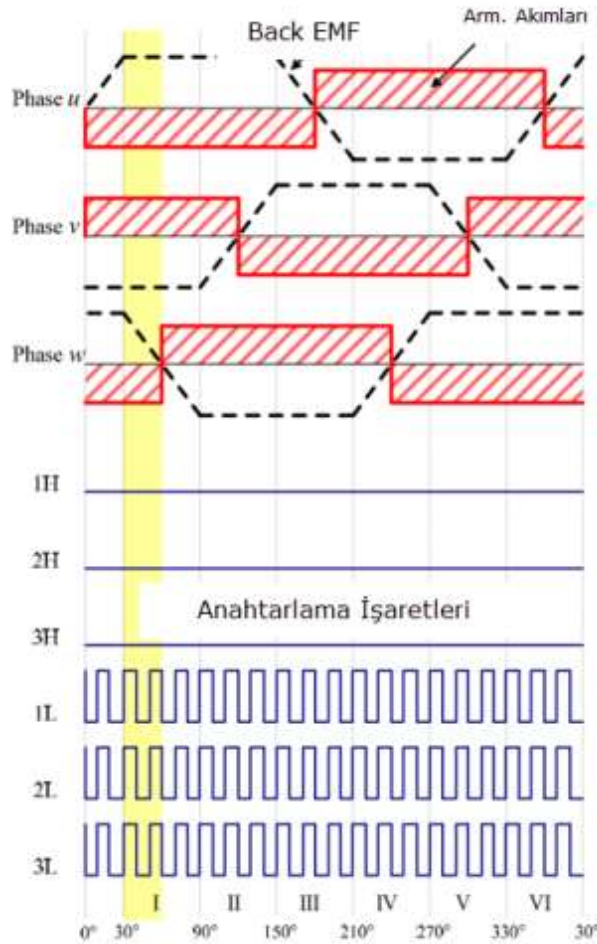
## 5.6 Enerji Geri Kazanımlı-Rejeneratif Çalışma

Proje önerisinde, motorların boştaki salınımı veya dinamik frenleme çalışmasında elde edilecek güç-enerji geri kazanımı için ayrı ayrı konvertörler planlanmıştır. Ancak, yapılan arge çalışmalarında görüldü ki; motor sürücülerini rejeneratif modda birer boost tipi dc-dc konvertör olarak kullanılabilir. Bu amaçla proje önerisinin bu kısmı revize edilerek aşağıda tanımlanan modelle güç geri kazanımında elde edilen enerji uygun seviye gerilim ve sınırlandırılabilir bir akımla ultrakapasitöre aktarılmıştır.



Şekil 5.51 Rejeneratif çalışmada sürücü invertörlerin boost konverter olarak çalıştırılması

Şekil 5.51'de gösterilen devre modelinde; alt kol anahtarlar her 30 derecede bir PWM darbe ile iletime sokulurken, üst kol anahtarları daima kesimde (OFF konumunda) tutulmaktadır. Alt kol anahtarlar ve üst kol anahtar diyotları, sistemi tamamen artıran tip (boost type) konvertör modeline dönüştürmektedir. Motor faz zıt EMK'larına göre alt kol anahtarlama PWM işaretleri Şekil 5.52'de gösterilmiştir.



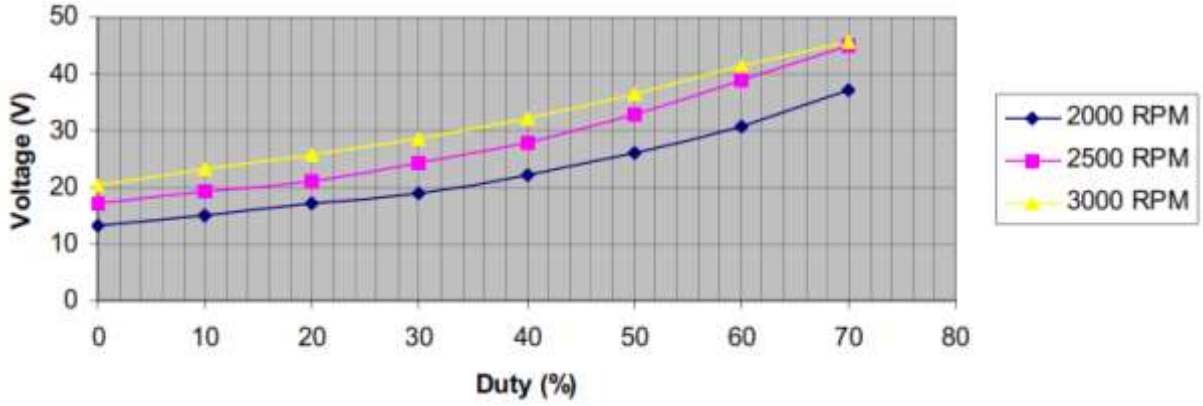
Şekil 5.52 Motor sürücülerinin regeneratif fren modunda boost konverter olarak çalıştırılmasına yönelik akım, gerilim ve anahtar kapı işaretleri dalga formu

Bir ve iki anahtarlı boost konverter modelinde rotor konum bilgisi gerekli olmasına rağmen proje kapsamında gerçekleştirilecek olan üç anahtarlı boost konverter modelinde rotor konum bilgisine gerek olmadığı gibi bütün anahtarlar her 30 derecede bir tekrarlanan PWM



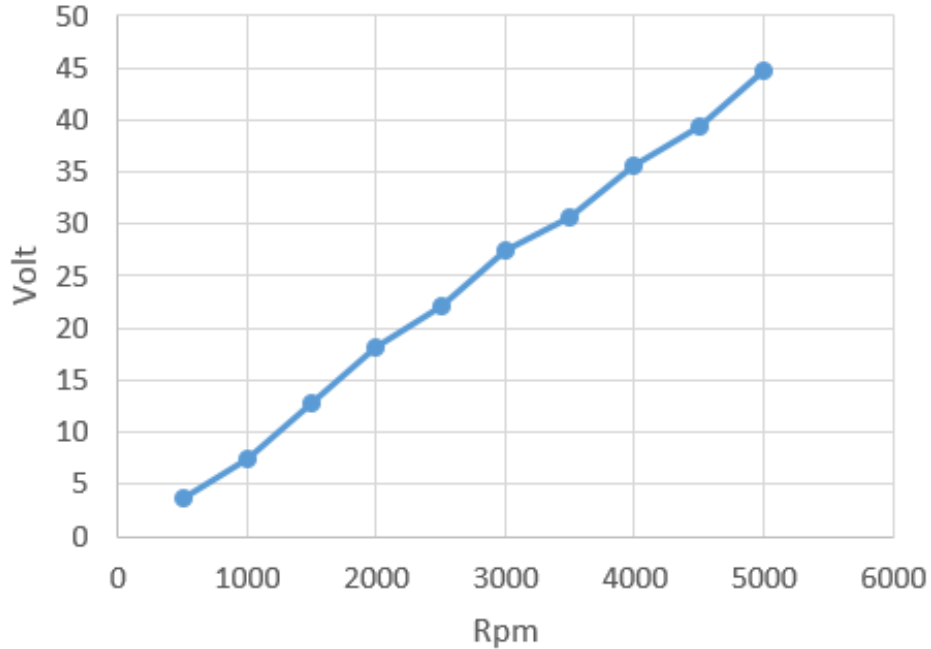




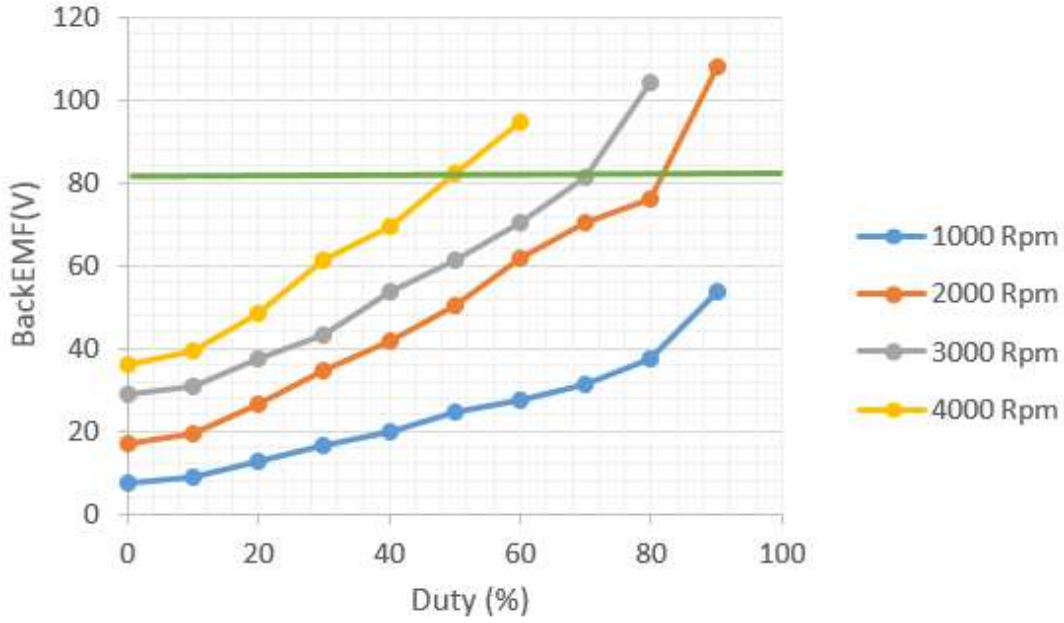


Şekil 5.54 Rejeneratif çalışmada PWM duty oranına ve motor hızına göre gerilim ayarı (benzetim sonucu)

Boost konverter olarak çalıştırılan inverterler üzerinden farklı hızlarda yükseltilecek gerilim seviyelerinin PWM işaretinde duty oranına göre ayarlanmasında elde edilen sonuç Şekil 5.54'te gösterilmiştir. Motor devri arttıkça saf üretilen gerilim de yükselmektedir. Ancak, ultrakapasitörün 80 V a şarj edilebilmesi için her motor devrinde bu gerilim seviyesinin ayarlanabilir ve kontrol edilebilir şekilde yükseltilmesi gerekmektedir. Verilen bu şekilde de olumlu bir sonuç alındığı görülmektedir. Sistem ilkesel olarak çalışmaktadır.



Şekil 5.55 Motor devrine göre inverterden alınan gerilim seviyesi (deneysel sonuç)



Şekil 5.56 Değişken motor devrine göre ultrakapasitörün 80 V gerilim seviyesine şarj edilmesi için duty kontrol oranının değişimi (deneysel sonuç)

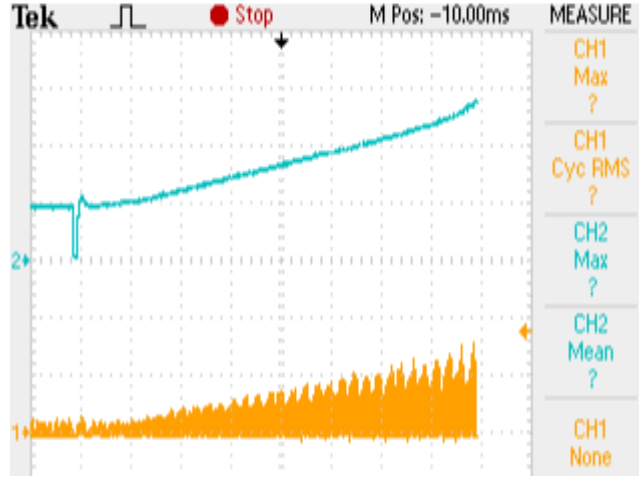
Yapılan deneysel çalışmalarda da oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Motor sürücülerinin ileri-geri sürüş kontrol yazılımına gaz pedalı ve fren pedalı algısına bağlı olarak motor sürücü invertörlerinin boost modlu konverter davranış yazılımı da eklenmiştir. Böylece, laboratuvar ortamında da bu testler rahatlıkla yapılabilmektedir. Öncelikle, motor hızına göre rejeneratif olarak üretilen gerilim ölçümleri yapılmıştır. Bu çalışmaya ilişkin elde edilen deneysel sonuç Şekil 5.55'te verilmiştir. Burada, motor devrine göre üretilen gerilim seviyesinin doğrusal değişimi görülmektedir. Bu çalışmayı müteakiben, ultrakapasitör bağlantısı yapılmış biçimde ve ultrakapasitör çıkışındaki konverter çıkışına 100 Ohm yük bağlanarak ultrakapasitörün rejeneratif mod şarj durumu analiz edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar birleşik olarak Şekil 5.56'da verilmiştir.

Yapılan uygulama çalışmasında, benzetim sonuçlarına göre çok daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Daha küçük duty oranlarında daha yüksek gerilim seviyeleri elde edilmiştir. Benzetim modelinde kullanılan motor Matlab toolboxında yer alan standart bir motor olup projede kullanılan gerçek motorlardan farklılık göstermektedir.

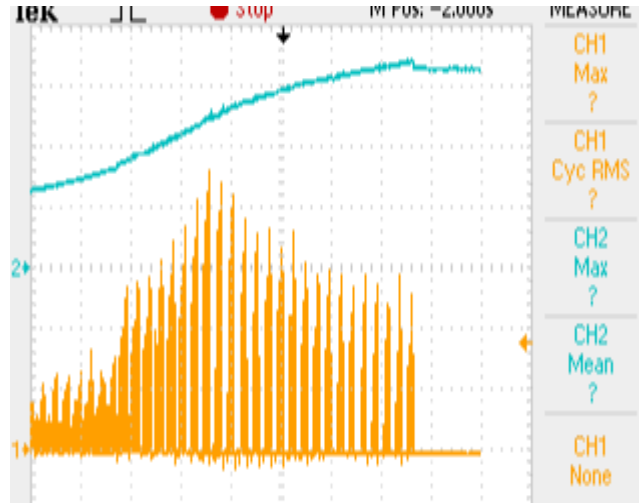
### 5.6.1 Enerji Geri Kazanımında Ultrakapasitör Davranışı

Motor sürüş seyrinde duruma göre tekerlerden araç eylemsizlik enerjisi ultrakapasitöre alınmıştır. Bunun için motor sürücü invertörleri bu çalışma modunu gaz ve fren pedalı seyrini algılayarak boost modlu konverter çalışmasına geçmektedir. Şekil 5.57'de motor devri 2000 rpm iken normalde motor faz çıkışında 14-15 V mertebeleri görülmesi gerekirken, ultrakapasitöre bağlı motor sürücü invertörü boost modlu çalışmada ultrakapasitörü şarj

etmek üzere üretilen gerilimi yükseltmektedir. Bu çalışmada kritik olan en düşük motor devirleri göz önüne alınmıştır. Zira, yüksek devirlerde şarj geriliminin yükseltilmesi daha kolay olmaktadır.



Şekil 5.57 Rejeneratif çalışma modunda ultrakapasitörün startup şarjı (mavi: UK gerilimi, turuncu: inverter çıkış gerilimi, motor devri 2000 rpm)



Şekil 5.58 Rejeneratif çalışma modunda ultrakapasitörün 65 V şarj seviyesine setlenmesi (mavi: UK gerilimi, turuncu: inverter çıkış gerilimi, motor devri 1000 rpm)

Motor devri 1000 rpm iken ultrakapasitörün 65 V a şarj edilmesinde, ultrakapasitörün batarya bağlantısını sağlayan dc-dc konvertör çıkışında temsilen 100 ohm değerinde tüketici yük bulunmaktadır. Böylece, ultra kapasitör bir taraftan şarj edilirken dc-dc konverter üzerinden de enerjisini transfer etmektedir. Konverter çıkışında 100 ohm'luk kapasitörü bir taraftan boşaltan yük bulunmaktadır. Mavi etiket ultrakapasitör gerilimini, turuncu etiket boost modlu invertörden alınan gerilim değişimini göstermektedir. Bu çalışmada, ultrakapasitör gerilimi yükselirken invertörün boost duty oranı azalmaktadır. Böylece ultrakapasitör gerilim

seviyeseine göre invertör çıkış gerilimi kontrol edilebilmektedir. Motor devrinin 1000 rpm'den 2000 rpm'e geçişi sırasında ultrakapasitörün sıfır gerilimden başlayarak şarj edilmesine uygun olarak inverter boost gerilim çıkışının değişimi Şekil 5.58'de gösterilmiştir. Burada, ultra kapasitörün şarj dinamiği oldukça net olarak görülmektedir. Ultrakapasitörün sıfır gerilim seviyesinden başlayarak değişken motor devrine göre şarj edilmesi Şekil 5.59'da verilmiştir.



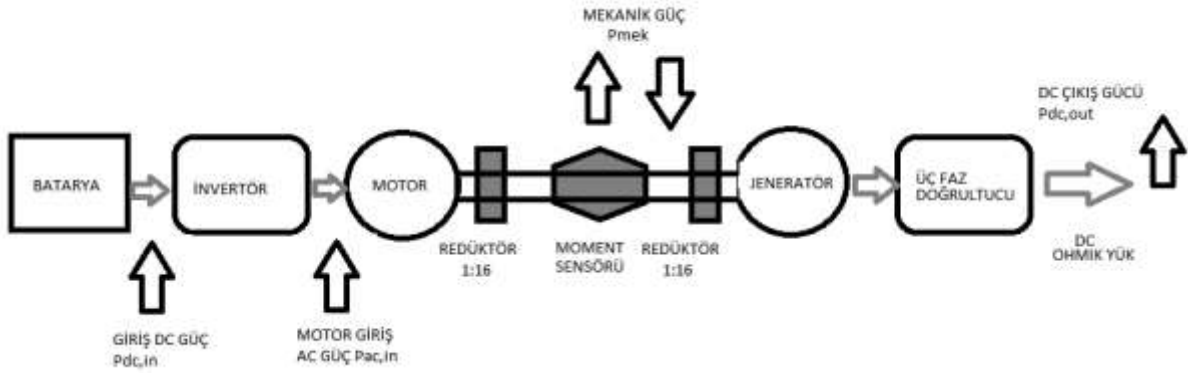
Şekil 5.59 Ultrakapasitörün sıfır gerilim seviyesinden başlayarak değişken motor devrine göre şarj edilmesi

## 5.7 Motorların Yükleme Testleri

Proje çalışması için yurt dışından ithal edilen BLDC motorların test edilmesi için özel bir düzenek yapılmıştır. Bu düzende, motorlardan birisi tasarımı yapılan invertör ile sürülürken aynı mile kuplaj edilmiş diğer motor jeneratör olarak yüklenmiştir. Mil üzerine her iki motor arasında moment sensörü ve hız algılayıcısı bulunmaktadır. Proje ekibince tasarlanıp geliştirilen motor yükleme test düzeneği Şekil 5.60'da verilmiştir. Hız değişimi ayrıca optik enkoder ile de doğrulanmıştır. Burada yapılan çalışmanın amacı, sistemin bir bütün olarak nominal güç sınırında ve daha fazlasında test edilerek birim verimlerinin gerçek zamanlı olarak elde edilmesidir. Zira, üreticiler satışa sundukları motorların verimlerini en düşük sıcaklık, en düşük anahtarlama frekansında sürüş ve nominal (etiket-anma-rated) yüklenme için vermektedirler. Fakat, sürüş esnasında her bir sistem parçası; ortam ve çalışma sıcaklığından, yüklenme seviyesinden ve sürücü sistem anahtarlama frekansından etkilenmektedir. Bu amaçla, Şekil 5.61'de verilen uygulama set, kurulmuş ve gösterildiği biçimiyle güç ölçümleri yapılarak sistemin gerçek verim testleri farklı motor devri ve farklı yük durumlarına göre gerçekleştirilmiştir.



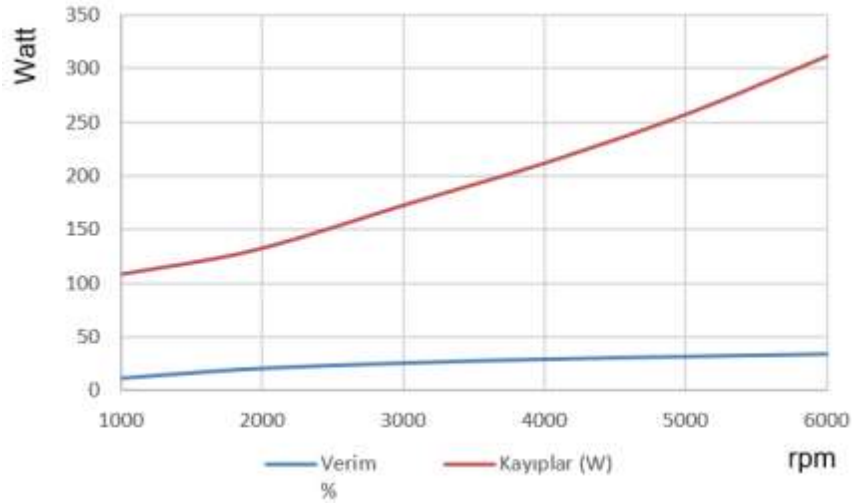
Şekil 5.60 Motor yükleme deney seti



Şekil 5.61 Elektrikli araç sürüş sisteminin verim ve yüklenme test şeması

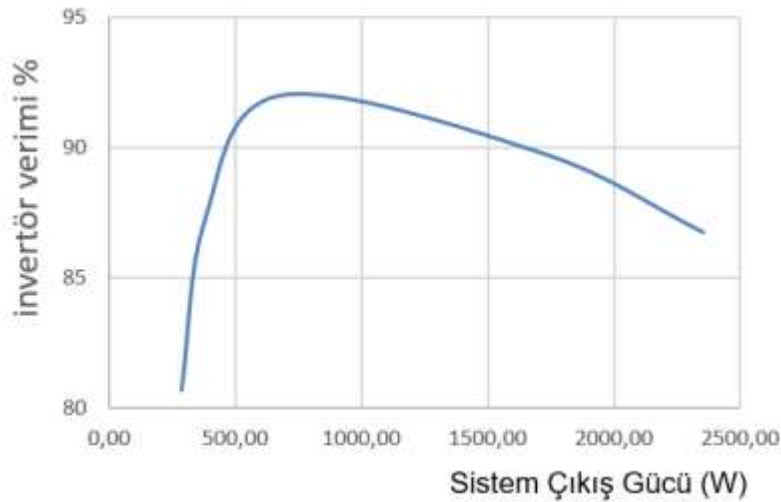
Yapılan test çalışmalarında, motorların miline kuplaj edilmiş olan dişli sistemi 1:16 oranlı tork dönüşümü yapmaktadır. Böylece yüksek devirli bu motorlardan araç tekerlerine ve doğrusal hızına uygun düşük hızları elde etmek mümkün olduğu gibi üretilen düşük tork değerleri aynı dişli sistemi üzerinden yükseltmektedir. Ancak, mekanik olarak bu dişli sisteminin kayıpları göz ardı edilemez. Bu dişli takımının verimi her iki motorda da test edilememiştir. Zira, motorlar üreticiden dişli kutusuna kuplaj edilmiş olarak kullanıcıya servis edilmektedir.

Yapılan test çalışmasında, öncelikle sistem boşta ve farklı devirlerde çalıştırılarak mekanik bağlantı sistemlerinin ve anahtarlama kayıplarının nasıl değiştiği gözlenmiştir. Buna ilişkin test sonucu Şekil 5.62'de grafik olarak sunulmuştur. Burada, motor devri arttıkça, mekanik kuplaj sisteminin, redüktörlerin ve invertörün kayıpları gittikçe artmaktadır. Bununla birlikte, güç katsayısındaki düzelmeye bağlı olarak verimde yavaş seyirli bir artış gözlenmiştir. Sistem mekanik olarak haricen yüklenmediği sürece, kendi başına boşta sürülürken sistem veriminin %50'nin altında olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir.



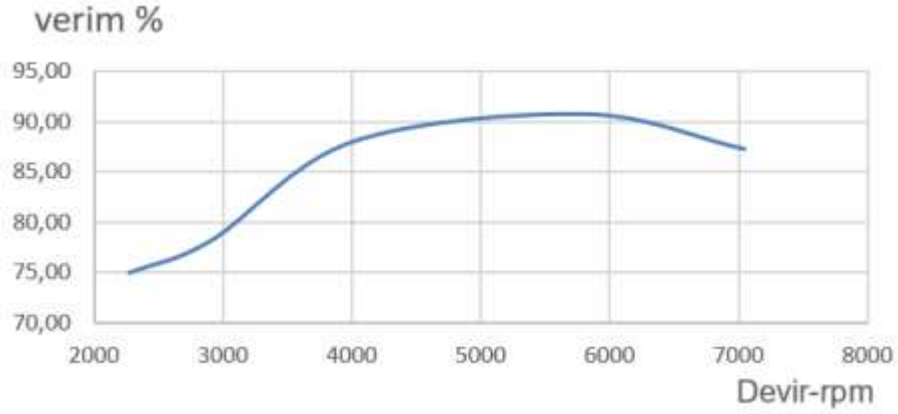
Şekil 5.62 Elektrikli aracın hareket sisteminin mekanik olarak boşta çalıştırılması

Sisteme mekanik hareket veren birinci motoru beslemesi yani sürücü invertörün verimi de test edilmiş olup invertör girişinde DC kaynak gücüne göre motora uygulan AC giriş gücü arasındaki ilişki olarak değerlendirilen bu verim değişimi Şekil 5.63'de verilmiştir. Burada, invertörün anma yükünde %89 civarında bir verime sahip olduğu, tam yüke yakın bölgelerde %90'ları geçtiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuç tasarım parametrelerine uygun olarak değerlendirilmiştir.



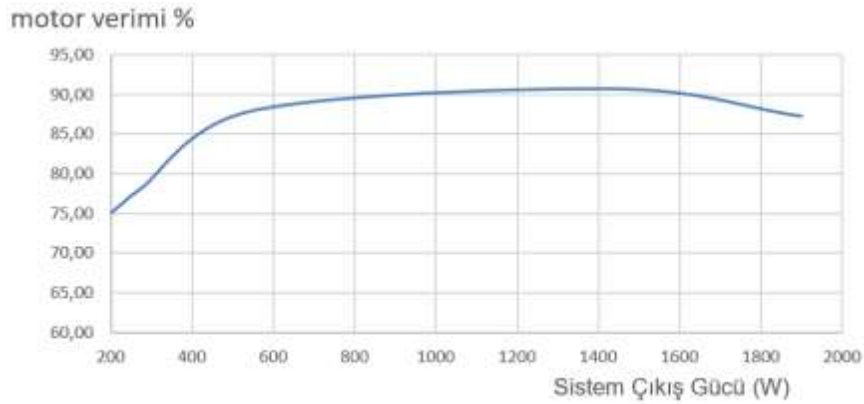
Şekil 5.63 Motor sürücü invertörlerinin sistem çıkış gücüne göre verim değişimi

Diğer taraftan, motorların hem hız değişimine hem de yük değişimine göre verim testleri yapılmıştır. Öncelikle, değişken devirlerde üretilen çıkış gücüne göre motor verim değişimi Şekil 5.64'de verilmiştir. Burada, motor devrinin 5000-6000 rpm arasında iken en yüksek verime ulaştığı gözlenmiştir. Ancak değişken hız sürüşünde farklı yüklenmeler olacağından ortalama motor veriminin %88'ler civarında kaldığı görülmektedir.



Şekil 5.64 Motor veriminin devrine göre verim değişimi

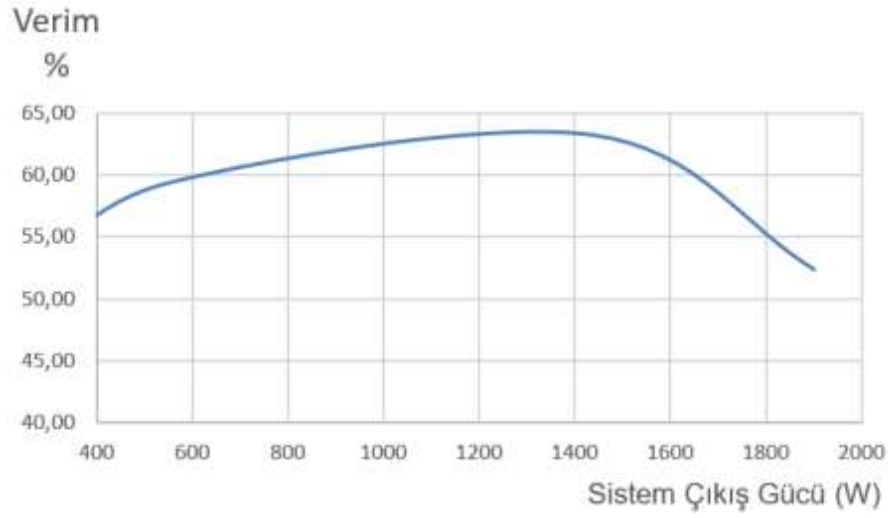
Motorların tam yük değeri 2 KW olarak servis edildiği göz önüne alınırsa, Şekil 5.64'de olduğu gibi çıkış gücüne göre motor veriminin değişken yükler için ortalama %88-%90 arasında kalacağı Şekil 5.65'ten görülebilir.



Şekil 5.65 Sistem yüklenmesine göre motor verim değişimi

Yapılan ölçümlere göre sistemin verimini etkileyen birimlerin, sırasıyla, iki adet motor, iki adet redüktör, iki adet sürücü invertör, bağlantı elemanları, kuplaj ve rulmanlar olduğu göz önüne alınırsa, en yüksek verim bandında çalışmalarını kaydıyla ki bu oran %90'lar olarak kabul edilirse, toplam sistem veriminin %65'ler seviyesinde olması beklentisiyle yapılan bu tasarımda deneysel olarak elde edilen sonuçlar da bunu teyid etmiştir. Toplam sistem veriminin çıkış gücüne göre değişimi Şekil 5.66'da verilmiştir





Şekil 5.66 Araç hareket sisteminin çıkış gücüne göre toplam verim değişimi

İnvertörlerin %90, motorların redüktör çıkışıyla %88 verimle tam yük bandına yakın çalıştığı dikkate alınırsa toplam sistem verimi %62,7 olarak beklenir ki bu da Şekil 5.66'da oldukça net olarak teyid edilmiş olmaktadır. Teorik olarak elde edilen toplam sistem verimine göre bu oranın düşük olduğu düşünülebilir. Ancak, fiziksel modelde var olmasına rağmen teorik sistemde yer alan değişkenler nedeniyle ideal sisteme yakın davranış analizi yapıldığı söylenebilir. Ayrıca deneysel çalışmalar 70-77 °C sistem çalışma sıcaklığında yapılmıştır. Bu da dikkate alındığında tasarımı tamamlanan sistemin toplam veriminin oldukça yüksek olduğu kabul edilebilir.



## 6. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ

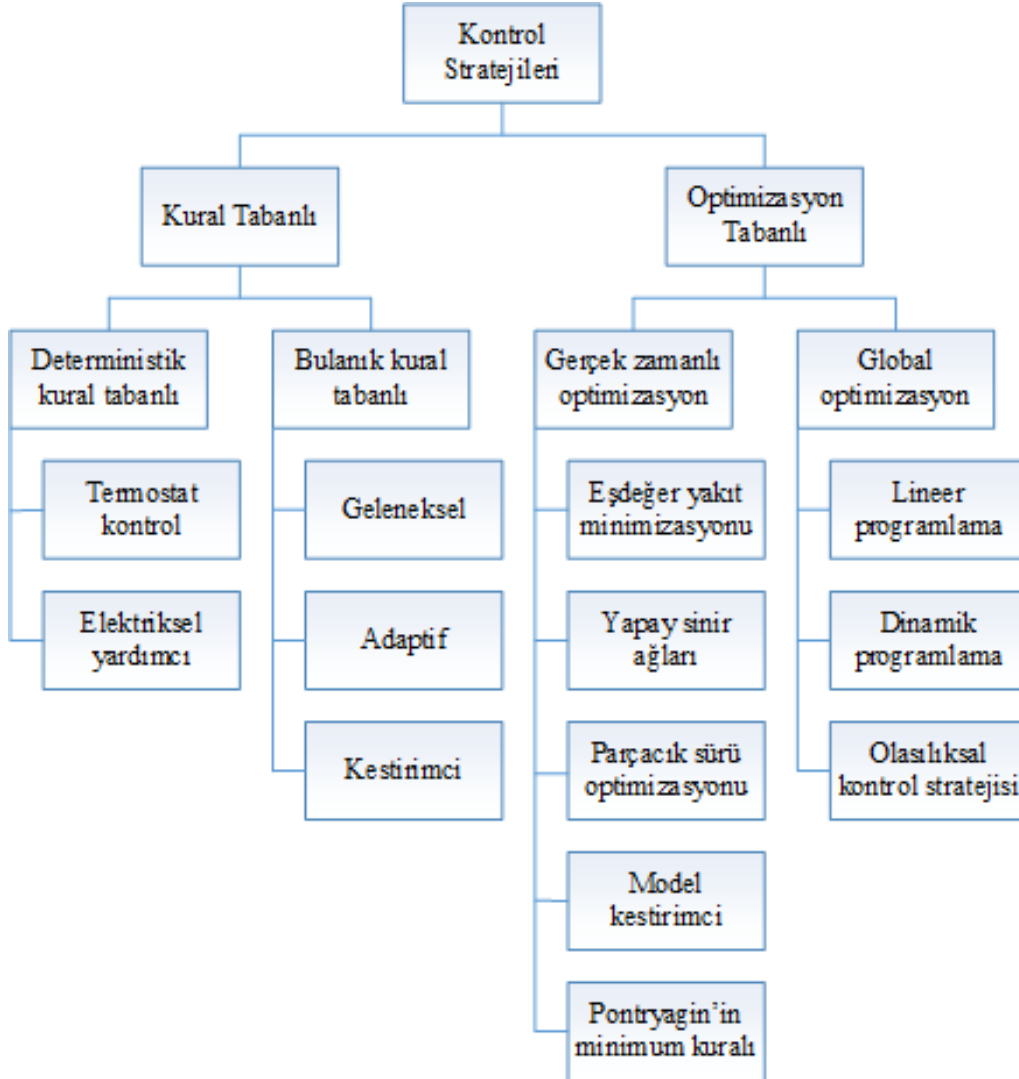
### 6.1 Enerji Yönetim Sistemine Genel Bir Bakış

Güç dönüştürücülerinde ve kontrol tekniklerinde son yıllarda meydana gelen gelişmeler elektrikli araçların yeniden popülerlik kazanmasını sağlamıştır. Yaşanan bu gelişmelere rağmen elektrikli araçların kullanımını sınırlandıran ve yaygınlaşmasını engelleyen sorunları halen mevcuttur. Bu sorunlardan bir tanesi de birden fazla enerji depolama biriminin bir arada kullanılması ve bu kaynaklarının yönetiminin zorluğudur. Elektrikli araçlarda kullanılacak enerji kaynaklarının yüksek enerji yoğunluğuna, yüksek güç yoğunluğuna, uzun çalışma ömrüne ve güvenli bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Batarya, ultrakapasitör, yakıt hücresi, volan ve fotovoltaik panel gibi enerji kaynaklarını incelediğimizde hiçbiri bu günkü teknoloji ile elektrikli aracın her türlü kullanım koşullarında tüm enerji ve güç ihtiyacını karşılayabilecek durumda değildir. Bu sebeple elektrikli araçlarda birden fazla enerji kaynağının kullanılması genel geçer bir çözüm olmuştur. Bu durumda da bu enerji kaynaklarının en uygun şekilde nasıl yönetileceği sorusu ortaya çıkmaktadır.

Literatürde elektrikli araçlar için güç yönetim sistemi konusunda çok sayıda nitelikli çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda güç yönetimini maksimum verim ile gerçekleştirmek için çok çeşitli yöntemler önerilmiş ve denenmiştir. Bu çalışmaların genelinde kontrolü ve yönetimi daha zor olan hibrid elektrikli araçların güç yönetimi konusu ele alınmıştır. Bunun yanı sıra birden çok enerji depolama biriminin bulunduğu durumlar için elektrikli araçlarda güç yönetim sistemlerini konu alan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda kural tabanlı, bulanık mantık tabanlı ve optimizasyon tabanlı yönetim sistemleri geliştirilmiş ve hepsinde herhangi bir kontrol stratejisi bulunmayan duruma göre ciddi gelişme kaydedilmiştir. Ayrıca, araç için bir güç yönetim sisteminin bulunması, araçtaki enerji depolama birimleri üzerinde bulunan stresi azaltır ve uzun ömürlü kullanılmasına imkan tanır. Maksimum verim için güç yönetim sisteminin gerçekleştirilmesi için kullanılan yöntemler genel olarak Şekil 6.1'deki gibi gruplandırılabilir.

Maksimum verim ile güç yönetimini gerçekleştirmeyi amaçlayan kural tabanlı yöntemler genellikle belirli bir sürüş çevrimi üzerinde uzman görüşüne ya da matematiksel veya sezgisel bilgi birikimine dayalı kontrol yöntemleridir. Deterministik ve bulanık kural tabanlı olarak iki alt gruba ayrılabilir. Deterministik kontrol yönteminde belirli sürüş profilleri için önceden bazı senaryolar belirlenir ve aracın o anki durumuna göre önceden belirlenmiş görevler gerçekleştirilir. Bu yöntemde optimum bir kontrol söz konusu değildir. Bulanık kural tabanlı kontrol yöntemlerinde ise aracın o anki kontrolünde belirleyici etken araç dinamiklerinin çeşitli üyelik fonksiyonları ile bir araya getirilmesidir. Bulanık mantık tabanlı bu

yaklaşımın sağladığı en büyük avantaj hatalı ölçüm verilerine toleranslı olunması ve kararlı bir güç akışının gerçekleştirilmiş olmasıdır. Ayrıca bulanık mantığın yapısı gereği lineer olmayan araç dinamiklerinin kontrol yöntemine dahil edilmesi daha kolaydır ve tasarımda esneklik sağlar.



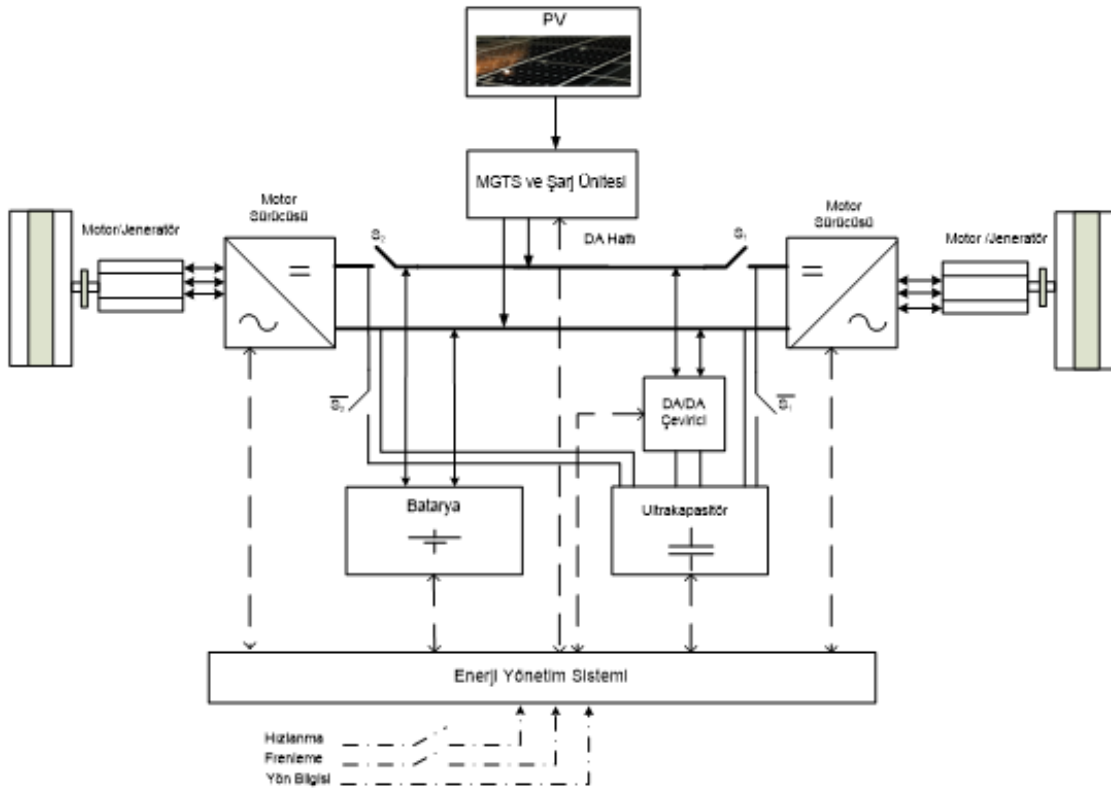
Şekil 6.1 Elektrikli araçlarda kullanılan güç yönetim yöntemlerinin gruplandırılması

Optimizasyon tabanlı güç yönetim stratejilerinde kontrol algoritması sistemin belirlenen maliyet fonksiyonuna göre optimize edilir. Bu sayede güç yönetimi en uygun şekilde gerçekleştirilmiş olur. Fakat, optimizasyon tabanlı kontrol yöntemleri gürültüye ve parametre değişimlerine karşı çok hassastır. Bu yüzden, tasarım aşamasında sistemin bileşenlerinin bütün statik ve dinamik davranışları göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun yanı sıra, bütün detayları model içinde barındırmak çok fazla bir işlem yükü getireceği için bazı varsayımlar ve sadeleştirmeler yapmak gerekebilir. Global optimizasyon tabanlı güç yönetim yöntemleri işlem fazlalığı dolayısıyla gerçek zamanlı uygulanamazlar. Bu yöntemler, yalnızca tasarım aşamasında güç yönetiminin en ideal hangi noktalarda çalıştığını görmek ve gerçek zamanlı

uygulamalarda bu sonuçlara mümkün olduğunca ne kadar yaklaşılabileceğini tahmin etmek için kullanılırlar.

## 6.2 Enerji Yönetim Sisteminin Oluşturulması

Literatürde yapılan güncel çalışmalar ağırlıklı olarak optimizasyon tabanlı kontrol yöntemleri üzerinedir [Sabri vd. (2016)], [Castaings vd. (2016)]. Batarya ve ultrakapasitör arasındaki güç paylaşımını model tahmin edici yaklaşımla gerçekleştirmeyi amaçlayan çalışmalar da literatürde kendine yer bulmuştur [Meyer vd. (2016), Yu vd. (2015)]. Fakat bu gerçekleştirilen yöntemlerin en önemli dezavantajı gerçek zamanlı uygulama için çok işlem yükü getirmeleri ve bu sebeple bazı durumlarda uygulanmalarının mümkün olmamasıdır. Güç yönetimini gerçek zamanlı olarak optimize edebilmek için son yıllarda sezgisel optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı çalışmaların arttığı görülmektedir [Chen vd. (2015), Trovao and Antunes(2015)]. Bu sebeple bu projede de bu yöndeki yöntemlerin kullanımına ağırlık verilmiştir.



Şekil 6.2 Elektrikli araç enerji yönetim sistemi prensip şeması

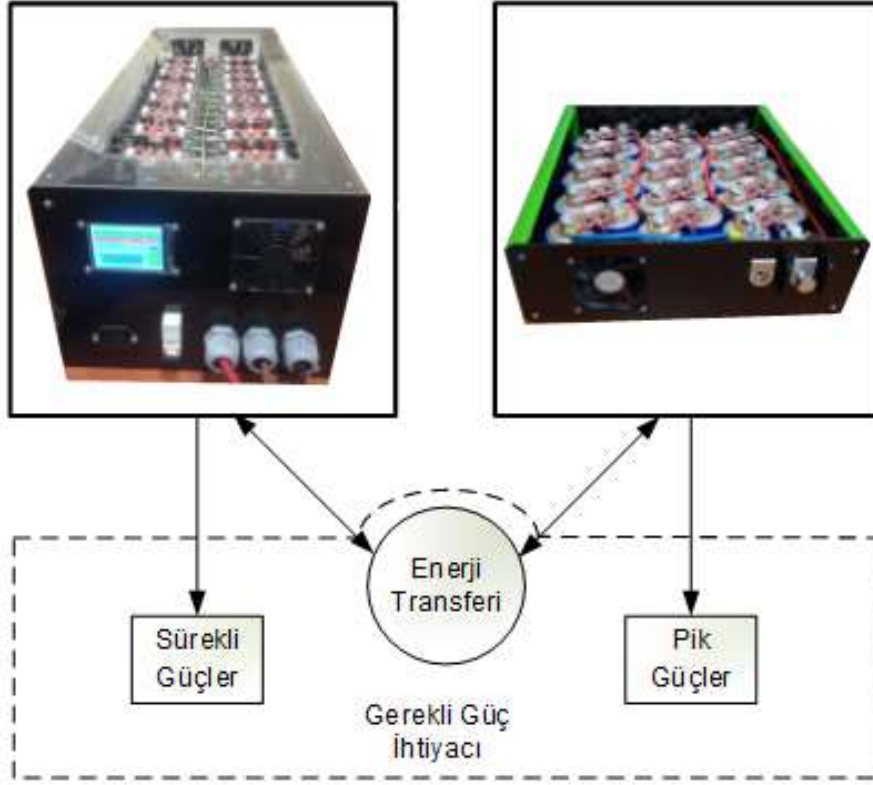
Güç yönetim sistemi; iyi bir sürüş için, minimum enerji tüketimini sağlayacak şekilde batarya, ultrakapasitör ve fotovoltaik panel sistemi arasındaki güç akışını kontrol etmektedir. Güç yönetimi, Şekil 6.2'de görülen DSP tabanlı kontrol sistemi tarafından sağlanmaktadır. Bilindiği gibi elektrikli araçtaki ana enerji kaynağı yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle



bataryadır. Güç yoğunluğunun yüksek olması sebebiyle de ultrakapasitör frenleme anında oluşan enerjini geri kazanılmasında ve aracın ani hızlanması gereken durumlarda kullanılmaktadır. Güç yönetim sisteminin amacı bu iki enerji depolama birimi arasındaki güç paylaşımını en uygun şekilde yapmak olarak tasarlanmıştır. Fotovoltaik panelin uygun güneş ışınımı olduğu zamanlarda ve araç park halinde iken bataryayı şarj etmesi planlanmıştır. Çünkü yapılan benzetim ve uygulama çalışmalarında güneş ışınımını tahmin etmek ve sisteme dahil etmek oldukça zordur. Yerleştirilen panelin sağlayacağı anlık güç miktarı da düşünüldüğünde anlık güç paylaşımı benzetim ve uygulama çalışmalarının yalnızca batarya ve ultrakapasitör arasında yapılması daha uygundur.

Araçta güç yönetim sistemini gerçekleştirmek amacıyla gerçek zamanlı optimizasyon tabanlı yönetim sistemleri kategorisinde yer alan parçacık sürü optimizasyonu ile güç yönetiminin gerçekleştirilmesi yöntemi seçilmiş ve benzetim çalışmaları tamamlanmıştır. Parçacık sürü optimizasyonu yöntemi temel olarak kuş ve balık sürülerinin yiyecek ararken sergiledikleri davranışlardan esinlenilmiş bir sezgisel optimizasyon yöntemidir. [Kennedy and Eberhart (1995)]. Bu yöntemde temel amaç gerekli güç ihtiyacının tüm sürüş profili boyunca enerji kaynaklarının hangisinden sağlamanın ve rejeneratif frenleme enerjisinin hangi kaynaklara yönlendirmenin daha uygun olacağını belirlenmesidir. Bu yönetim gerçekleştirilirken göz önünde bulundurulması gereken bazı koşullar karşımıza çıkmaktadır. Bu koşullardan en önemlileri bataryanın ve ultrakapasitörün zarar görmeden çalışabilmeleri için gerekli olan maksimum ve minimum doluluk oranlarıdır. Batarya veya ultrakapasitörün türüne göre değişen bu sınırlara enerji depolama birimlerinin kalıcı bir hasara uğramaması, daha uzun çalışma ömrüne sahip olması ve çalışma verimlerinde kayıp oluşmaması için son derece önem gösterilmelidir. Güç yönetiminde parçacık sürü optimizasyonu yöntemi ile en uygun çözüm bulunurken bu kısıtlar yöntemde Travao vd. (2013) tarafından gerçekleştirildiği gibi arama uzayının bu kısıtlara göre sınırlandırılması ile dahil edilmiştir. Burada asıl amaç güç paylaşımı yapılırken enerji depolama birimlerinin o andaki durumlarının sisteme dahil edilmesidir.

Şekil 6.3'den de görüldüğü gibi gerekli olan sürekli gücü batarya sağlamakta, pik güçleri ise ultrakapasitör sağlamaktadır. Burada güç yönetiminin sağladığı fayda gerekli olduğu koşullarda batarya ve ultrakapasitör arasında güç değişiminin yapılabilmesidir. Örneğin, araç tarafından talep edilen güç sıfırsa ya da bataryanın sağlayabileceği enerjiden düşükse ultrakapasitörün doluluk oranının durumuna göre ultrakapasitöre batarya tarafından takviye edilerek, daha sonra aracın ani hızlanma ihtiyaçlarının karşılanması sağlanabilir.



Şekil 6.3 Genel güç paylaşım şeması

### 6.3 Enerji Yönetim Sisteminin Modellenmesi

Tasarlanan güç yönetim sistemi araç üzerinde uygulanmadan önce MATLAB ortamında benzetim çalışmaları yapılmış ve ortaya çıkan sonuçlara göre sistemde iyileştirmeler yapılmıştır.

Elektrikli araçlarda talep edilen güç ve enerji depolama birimlerinden sağlanan güç denklem (6.1)'de belirtildiği gibi sürekli birbirine eşit olmalıdır.

$$P_{Talep}(t) = P_{bat}(t) + P_{UC}(t) \quad \forall t \quad (6.1)$$

Güçlerin bu eşitliği aşağıdaki gibi minimum ve maksimum şarj ve deşarj güçleri açısından belirli kısıtlara sahiptir:

$$P_{bat,min} \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat,max} \quad \forall t \quad (6.2)$$

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

Burada minimum ve maksimum güçler denklem (3)'teki gibi ifade edilir.

$$P_{i,min} \leq 0 \leq P_{i,max} \quad i \in \{bat, UC\} \quad (6.3)$$

Güç yönetim sisteminin en aza indirmeye çalışacağı hedef fonksiyon ise denklem (6.4)'te verilmiştir.

$$J = \min \sum_{k=1}^{k=N} \{P_{dem}(k) - (w_{Bat}(k) * P_{Bat,max}(k) + w_{UC}(k) * P_{UC,max}(k))\} \quad (6.4)$$

Burada  $N$  seçilen sürüş profilinin süresini,  $w_{Bat}$  ve  $w_{UC}$  ise sırasıyla batarya ve ultrakapasitörün ağırlık faktörlerini ifade etmektedir. Ayrıca bu ağırlık faktörleri de denklem (5)'teki gibi kısıtlamalara sahiptir.

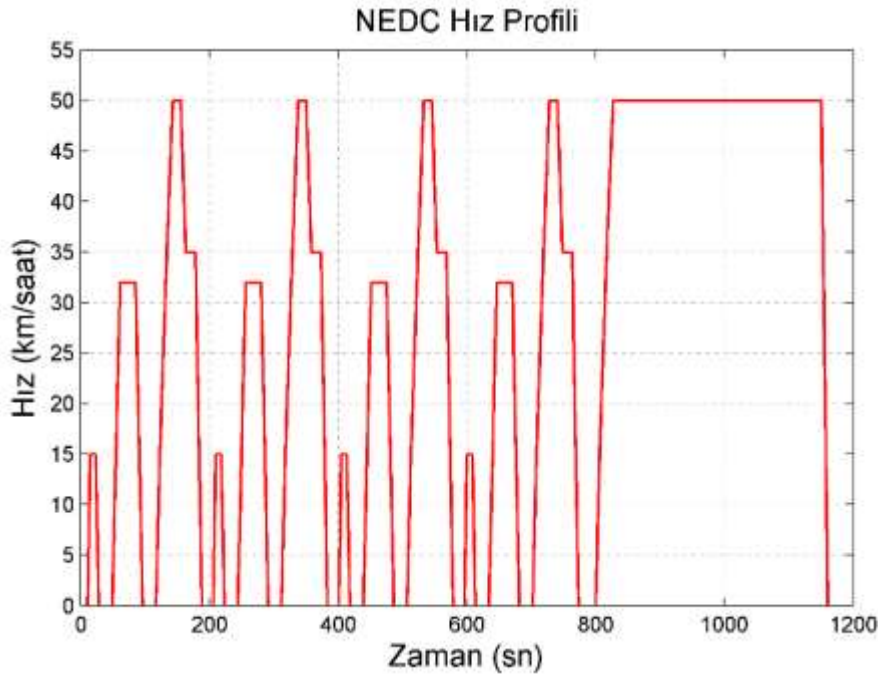
$$w_{Bat}, w_{UC} \in [-1,1]$$

$$P_{Bat}(t) = w_{Bat}(t) * P_{Bat,max}(t) \quad (6.5)$$

$$P_{UC}(t) = w_{UC}(t) * P_{UC,max}(t)$$

Burada amaç bu ağırlık faktörlerini en uygun şekilde belirleyerek batarya ve ultrakapasitör arasında optimum güç paylaşımını sağlamaktır. Bu projede yapılan çalışmalarda belirtilen ağırlık katsayılarının belirlenmesi ve optimizasyonu için Parçacık Sürüş Optimizasyonu (PSO) yöntemi kullanılmıştır.

Benzetim çalışmalarında güç yönetiminin nasıl gerçekleştiğini göstermek amacıyla standart sürüş profillerinden NEDC (New European Drive Cycle) sürüş profili kullanılmıştır. Tasarlanan aracın şehir içi kullanımda olacağı planlanarak sürüş profilinin maksimum hızı 50 km/s olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Oluşan yeni sürüş profili Şekil 6.4'te görülebilir.



Şekil 6.4 Modifiye edilmiş NEDC hız profili

Bu sürüş profiline ait aracın anlık güç ihtiyacı denklem (6.6) ve (6.7)'ye göre hesaplanmış ve Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Burada ihtiyaç duyulan güç ivmelenme, sürtünme ve tırmanma için gerekli olan kuvvetleri yenmek için gerekli olan kuvvetten hesaplanmıştır. Bu denklemlerin

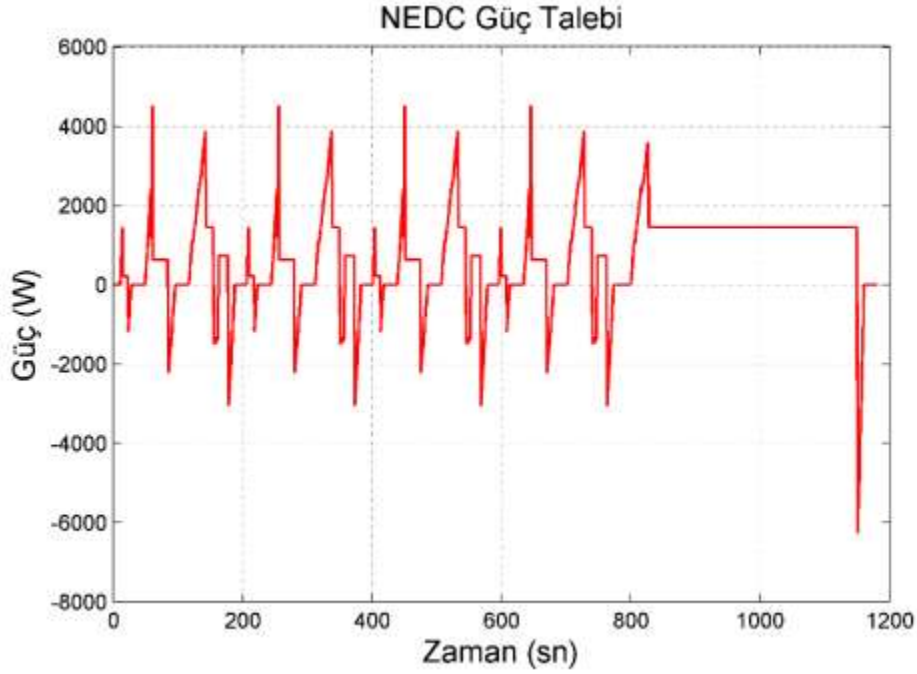


hesaplanmasında kullanılan parametre ve katsayılar Tablo 6.1'den bulunabilir.

$$F_{NEDC} = m \cdot a + \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot V_{NEDC}^2 + K_r \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (6.6)$$

$$P_{NEDC} = F_{NEDC} \cdot V_{NEDC} \quad (6.7)$$

Burada  $V_{NEDC}$  ilgili sürüş profilinde giden aracın anlık hızını ifade etmektedir.

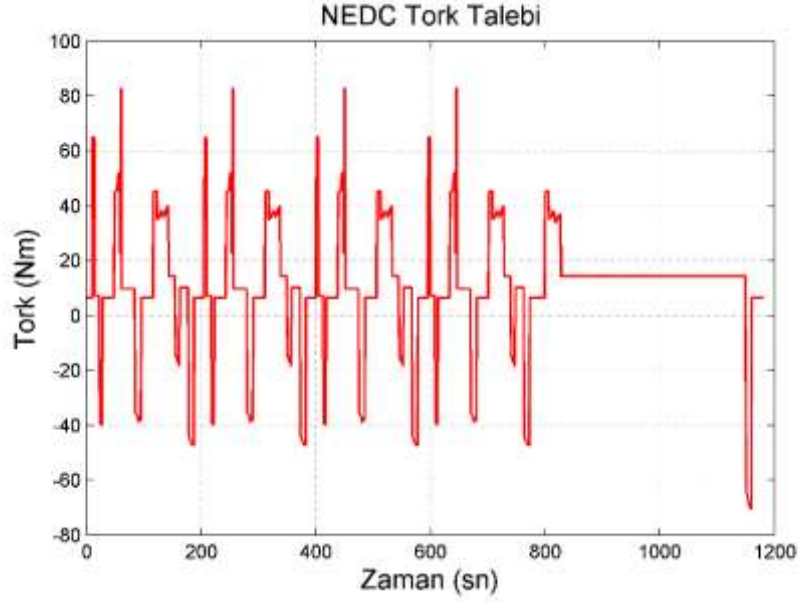


Şekil 6.5 Tasarlanan aracın modifiye edilmiş sürüş profilindeki anlık güç ihtiyacı değişimi grafiği

Aracın modifiye edilmiş NEDC sürüş profilini tamamlayabilmesi için teorik olarak gerekli olan enerji denklem (6.8)'deki gibi hesaplanır.

$$E_{NEDC} = \sum_{t=0}^{t=N} P_{NEDC} * \Delta t \quad (6.8)$$

Denklemden,  $N$  sürüş profilindeki toplam adım sayısını ve  $\Delta t$  de saniye biriminde adım aralığını ifade etmektedir. Tasarlanan araç için bu değer ( $E_{NEDC}$ ) 211.81 Wh olarak bulunmuştur.



Şekil 6.6 Tasarlanan aracın modifiye edilmiş sürüş profilindeki anlık tork ihtiyacı

Sürüş profiline ait anlık tork ihtiyacı her bir motor için denklem (9)'a göre hesaplanmış ve Şekil 6.6'da gösterilmiştir.

$$T_{NEDC} = F_{NEDC} \cdot r_{teker} / 2 \quad (6.9)$$

Burada,  $r_{teker}$  kullanılan tekerleklerin yarıçapını ifade etmektedir ve 0.278 metredir.

Araç bileşenlerinin toplam kayıpları NEDC sürüş profili için hesaplanan teorik güç ihtiyacına eklenerek batarya ve ultrakapasitörden talep edilen güç denklem (6.10)'daki gibi bulunmuş olur.

$$P_{Talep} = P_{NEDC} + P_{demir} + P_{bakır} + P_{invertör} + P_{Bat\_Kayıp} + P_{UC\_Kayıp} \quad (6.10)$$

Burada amaç talep edilen bu güç ile sağlanacak olan gücü sürekli dengede tutmaya çalışmaktır. Aracın toplam ortalama verimi de denklem (6.8)'deki NEDC sürüş profilinin ihtiyaç duyduğu teorik enerji ihtiyacının ( $E_{NEDC}$ ), denklem (6.11)'deki talep edilen güçlerin tüm sürüş profili boyunca toplanması ile bulunan toplam enerjiye bölünmesi ile bulunur.

$$E_{NEDC,tot} = \sum_{t=0}^{t=N} P_{Demand} * \Delta t \quad (6.11)$$

Benzetim çalışmasının gerçekleştirilmesi aşamasında batarya ve ultrakapasitör zarar görmesini engellemek için bazı eşik değerler belirlenmesi gerekir. Bu amaçla, batarya ve ultrakapasitörün doluluk oranlarına ve çalışma gerilimlerine ilişkin bazı eşik değerler belirlenmiştir ve Tablo 6.1'de verilmiştir. Ayrıca araca ilişkin parametre ve sabitler detaylı bir şekilde bu tabloda sunulmuştur.

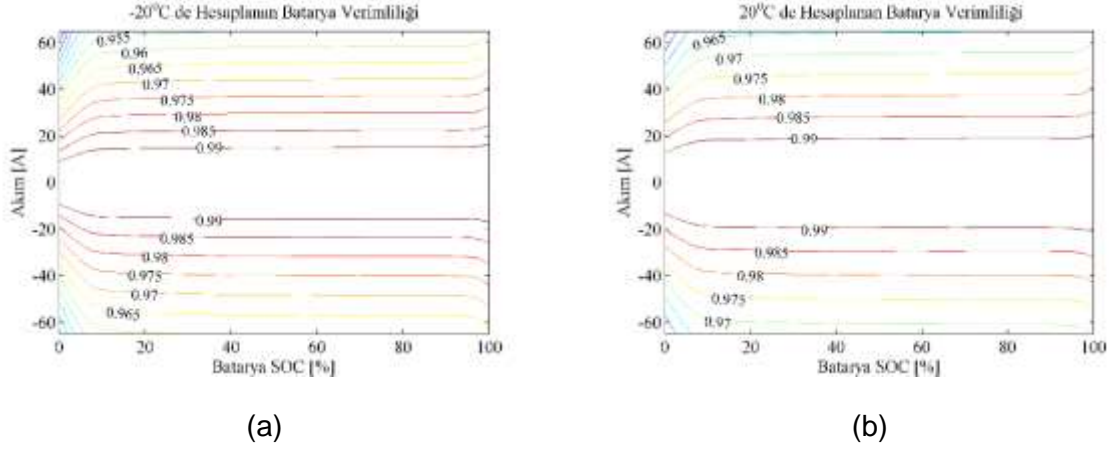
Tablo 6.1 Araca ilişkin benzetim çalışmalarında kullanılan parametre ve eşik değerler

İsim	Değer	Birim
Ağırlık ( $m$ )	400	kg
Yerçekimi ivmesi ( $g$ )	9.81	$m/s^2$
Tekerlerdeki sürtünme katsayısı ( $Kr$ )	0.012	
Tırmanma açısı ( $\theta$ )	20	Derece
Havanın kütle yoğunluğu ( $\rho$ )	1.2	$kg/m^3$
Havanın sürtünme katsayısı ( $C_d$ )	0.3	
Aracın ön yüzey alanı ( $A$ )	1.64	$m^2$
Batarya hücresi sayısı	32	
Batarya hücresi nominal gerilimi	3.2	V
Batarya hücresi gerilim aralığı	2.8-3.7	V
Batarya hücresi nominal kapasitesi	36	Ah
Batarya nominal deşarj akımı	10.8	A
Batarya SOC aralığı	35-95	%
UC hücre sayısı	30	
UC hücre nominal gerilimi	2.7	V
UC hücre gerilim aralığı	0-2.85	V
UC hücre nominal kapasitesi	0.244	Ah
UC SOC aralığı	30-85	%

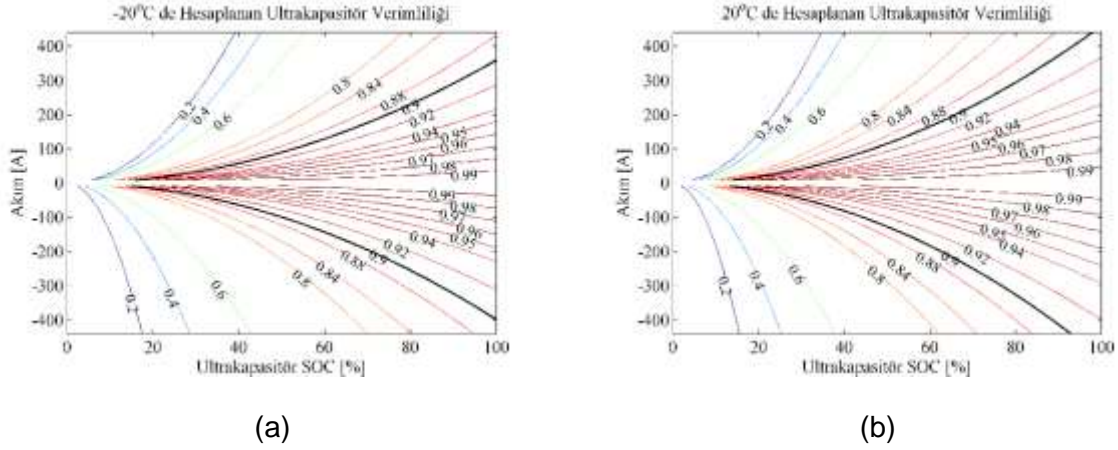
Benzetim çalışmalarında ortam sıcaklığının aracın bileşenleri ve toplam verimliliği üzerinde etkileri olacağı düşünülerek aracın içerisinde bulunabileceği farklı sıcaklık durumları göz önünde bulundurulmuştur. Genel olarak soğuk ve normal sıcaklığı temsil etmesi açısından -20°C ve +20°C sıcaklıkları için elde edilen grafikler ve sonuçlar sunulmuştur. Benzetimde doğru sonucu elde edebilmek için motorun sıcaklığı daima ortam sıcaklığından 80°C fazla seçilmiştir. Böylelikle motor sıcaklığı -20°C ve +20°C'de sırasıyla 60°C ve 100°C olmuştur.

#### 6.4 Benzetim Sonuçları ve Değerlendirmeler

Araçta kullanılan batarya ve UC için benzetim modelleri oluşturulmuştur. Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de oluşturulan bu modellere ilişkin verimlilik haritaları  $-20^{\circ}\text{C}$  ve  $+20^{\circ}\text{C}$  için verilmiştir.



Şekil 6.7 Batarya için hesaplanan verimlilik haritaları a)  $-20^{\circ}\text{C}$ , b)  $20^{\circ}\text{C}$



Şekil 6.8 Ultrakapasitör için hesaplanan verimlilik haritaları a)  $-20^{\circ}\text{C}$ , b)  $20^{\circ}\text{C}$

Şekil 6.9 araçta kullanılan motorlar için test edilen sıcaklıklardaki verimlilik haritalarındaki ilginç farklılıkları göstermektedir. Şeklin büyük çoğunluğunda verimlilik artan sıcaklıkla birlikte düşmektedir. Bunun sebebi çalışma alanının çoğunluğunda bakır kayıplarının baskın olmasıdır ve bakır kayıpları da  $40^{\circ}\text{C}$  sıcaklık artışında yaklaşık % 16 artmaktadır. Fakat yüksek hız ve düşük tork bölgelerinde tam tersi bir davranış ortaya çıkmış ve verimliliğin sıcaklık artışı ile birlikte arttığı görülmektedir.

Benzer şekilde Şekil 6.10'da da  $-20^{\circ}\text{C}$  ve  $+20^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığına ait invertörün verimlilik haritası verilmiştir. Şekilden açıkça görülecektir ki invertörün verimi sıcaklık artışı ile birlikte düşüş göstermektedir.

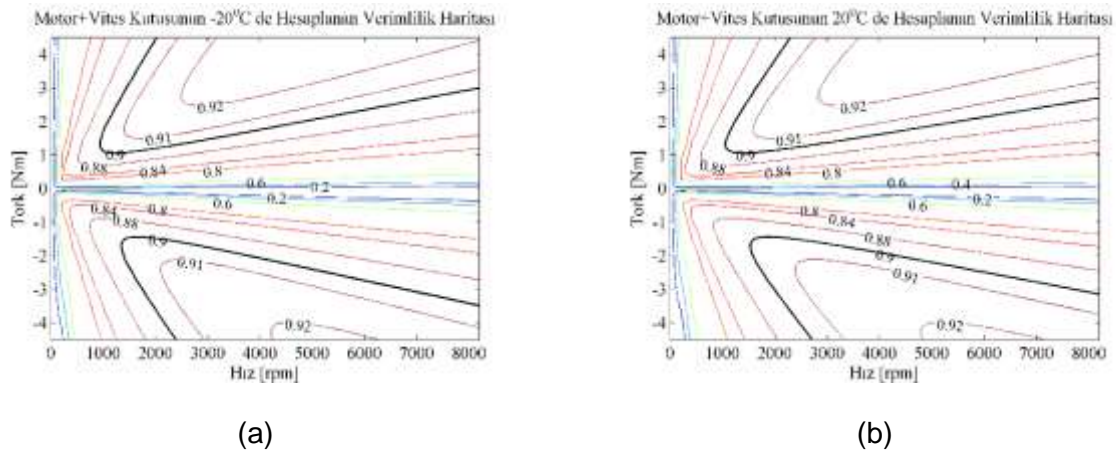
Şekil 6.10'da incelenen kayıp türlerinin sürüş profili boyunca her iki ortam sıcaklığında nasıl

bir davranış sergiledikleri gösterilmiştir. Bu şekilde sadece Şekil 6.4'te gösterilen sürüş profilinin ECE-15 diye isimlendirilen ilk 195 saniyelik kısmı gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere toplam kayıpların büyük bölümü motor demir kayıplarından oluşmaktadır. Motordaki demir kayıpları özellikle yüksek hızlarda toplam kayıpların büyük bir kısmını teşkil etmektedir. Düşük hızlarda ve ani tork artışının olduğu zamanlarda ise motor bakır kayıpları ve invertör kayıpları baskın olmaktadır.

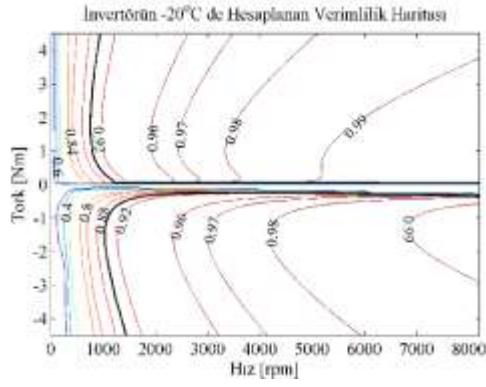
Şekil 6.11 a) ve b) karşılaştırıldığında, sıcaklık artışı ile birlikte toplam kayıpların yüksek ve sabit hızlarda düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi demir kayıplarının yüksek hızlarda baskın olması ve demir kayıplarının da sıcaklığın  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye artması ile birlikte düşüş göstermesidir. Benzer şekilde düşük hızlardaki toplam kayıplar sıcaklık artışı ile birlikte artış göstermiştir. Çünkü düşük hızlarda bakır kayıpları baskındır ve demir kayıplarının aksine bakır kayıplar sıcaklık artışı ile birlikte artmaktadır.

Şekil 6.11 a) ve b)'de gösterilen farklı sıcaklıklardaki toplam kayıplar Şekil 6.12'de bir arada sunulmuştur. Bu şekilden de açıkça görülebileceği gibi düşük hızlardaki toplam kayıplar sıcaklık artışı ile birlikte düşmektedir. Yüksek hızlarda ise demir kayıplarının baskın olması nedeniyle artmaktadır.

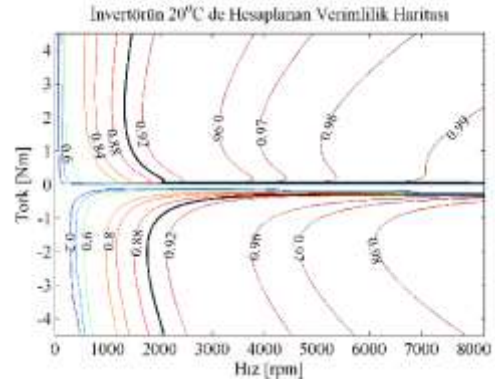
Batarya ve ultrakapasitörün SOC değerlerinin sürüş profili boyunca değişimi Şekil 6.13'de gösterilmiştir. Şekilden de kolayca fark edileceği üzere iki ortam sıcaklığı arasında çok küçük değişiklikler meydana gelmiştir. Bunun sebebi her iki sıcaklık durumunda da bu iki enerji depolama biriminden talep edilen gücün neredeyse aynı olmasıdır.



Şekil 6.9 Motor ve 1/6.94 oranındaki vites kutusunun verimlilik haritası a)  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığı, b)  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığı. (Şekilde belirtilen hız ve torklar motor şaftındaki değerlerdir.).

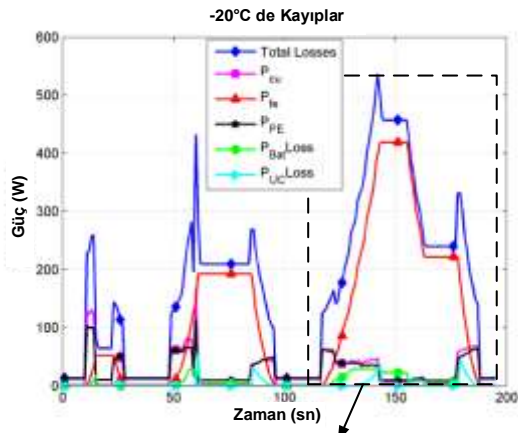


(a)

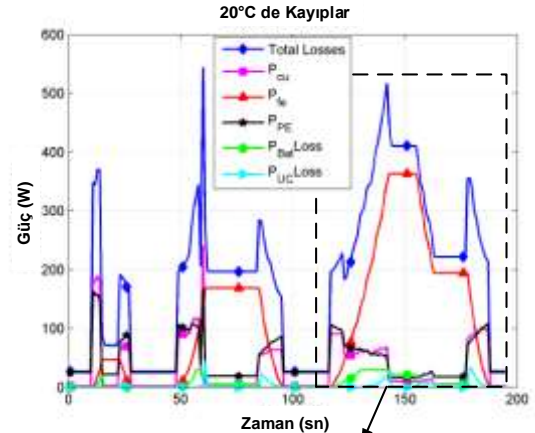


(b)

Şekil 6.10 İnvertörün hesaplanan verimlilik haritası a) -20 °C, b) 20 °C



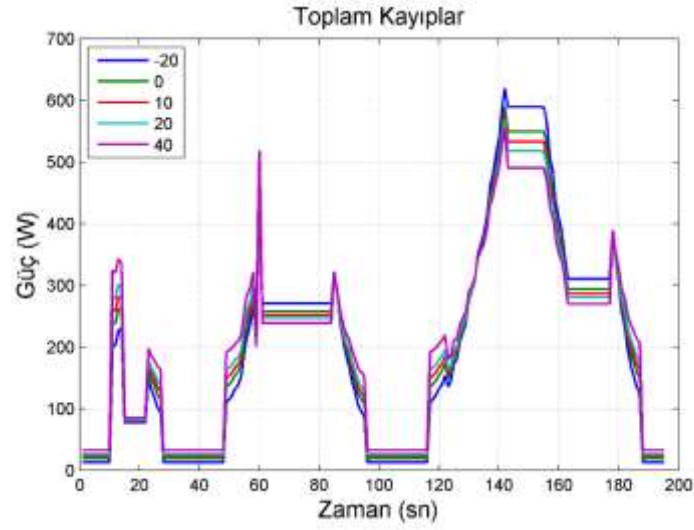
(a)



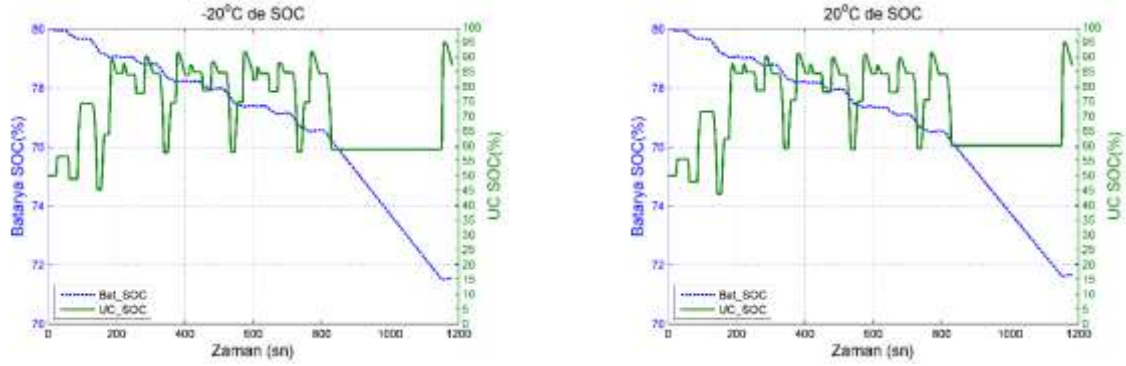
(b)

Şekil 6.11 ECE-15 sürüş profili boyunca aracın toplam ve bileşenlerin ayrı ayrı kayıpları a) -20 °C, b) 20 °C





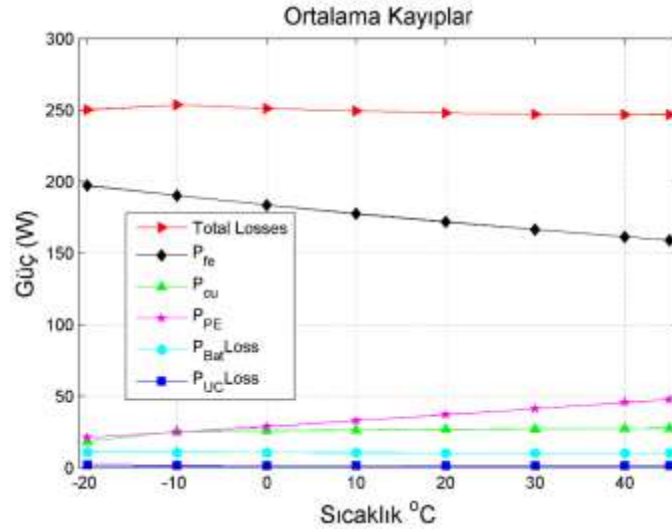
Şekil 6.12 ECE-15 sürüş profilinde oluşan toplam kayıplar



(a)

(b)

Şekil 6.13 Batarya ve Ultrakapasitörün SOC değerleri a)-20 °C, b) 20 °C



Şekil 6.14 Sıcaklığa bağlı ortalama kayıplar



Tablo 6.2 Farklı sıcaklıklardaki ortalama güç kayıpları.

	-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	45 °C
<b>Ortalama Toplam Güç Kaybı</b>	250.12	253.64	251.12	249.39	247.93	247.12	246.81	246.72
<b>Ortalama Motor Demir Kayıpları</b>	197.36	190.28	183.72	177.61	171.90	166.56	161.55	159.15
<b>Ortalama Motor Bakır Kayıpları</b>	18.49	25.63	26.07	26.49	26.89	27.27	27.64	27.81
<b>Ortalama İnvörtör Kayıpları</b>	21.34	25.03	28.88	33.01	37.15	41.38	45.70	47.86
<b>Ortalama Batarya Kayıpları</b>	10.93	10.87	10.78	10.69	10.49	10.45	10.47	10.45
<b>Ortalama Ultrakapasitör Kayıpları</b>	2.00	1.82	1.68	1.58	1.50	1.46	1.45	1.44

Tablo 6.3 Farklı sıcaklık değerleri için gerekli enerji ve toplam verimlilik değerleri.

	-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	45 °C
<b>NEDC ve Kayıplar için Toplam Talep Edilen Enerji [Wh]</b>	293.80	294.95	294.13	293.56	293.08	292.81	292.71	292.68
<b>NEDC için Gerekli [Wh]</b>	211.81	211.81	211.81	211.81	211.81	211.81	211.81	211.81
<b>Verim [%]</b>	72.09	%71.81	%72.01	%72.15	%72.27	%72.34	%72.36	%72.37

## 6.5 Sonuçlar

Farklı sıcaklık değerleri için ortalama güç kayıpları Tablo 2'de verilmiş ve aynı zamanda Şekil 6.14'de gösterilmiştir. Bu değerlerden şu sonuçlar çıkarılabilir;

- Ortalama motor demir kayıpları, batarya kayıpları ve ultrakapasitör kayıpları artan sıcaklıkla birlikte azalma eğilimindedir.
- Ortalama motor bakır kayıpları ve invörtör kayıpları artan sıcaklıkla birlikte artma



eğilimindedir.

- Birbirine ters olan bu iki eğilim inceleme yapılan aralıkta toplam kayıpların az bir değişim göstermesine sebep olmaktadır.

Bu çıkarımları destekleyici sonuçlar Tablo 6.3'den de görülebilmektedir. Görüleceği üzere farklı sıcaklık değerleri için gerekli olan enerji neredeyse aynıdır. Bu da verimin bütün sıcaklıklarda yaklaşık sabit bir değerde kalmasına sebep olmaktadır.



## 7. ELEKTRİKLİ ARAÇ PROTOTİP SİSTEM TASARIMI

Taşıt performansı ve verimliliği, taşıta hareket enerjisini sağlayan motor ve güç aktarma elemanlarının yanı sıra taşıtın şasesi, kaportanın aerodinamik yapısı, ağırlığı, lastiklerdeki sürtünme ve ön düzen ayarları gibi faktörlere de bağlıdır. Elektrikli taşıtlarda enerji depolama amacı ile kullanılan bataryaların içten yanmalı motorlara kıyasla daha düşük enerji/ağırlık oranına sahip olması daha hafif şase tasarımlarını gerektirmektedir. Taşıtın karoseri aksamının, en düşük hava sürtünmesini sağlayacak düzeyde aerodinamik olarak tasarlanması yine enerji verimliliğini arttıracak bir diğer unsurdur. Taşıt ile yol arasındaki yeterli teması sağlayacak, yuvarlanma sürtünmelerini azaltacak ve motorun verimli çalışma bölgesine uygun lastik boyutlarının seçiminin yanında lastiklerin yol ile temas açıları da verimlilik açısından önemlidir. Bunlarla birlikte, üretilecek olan şase; aracın diğer ekipmanlarını, yolcu ve yükleri barındıracak ve taşıyabilecek kapasitede boyutlandırılmalıdır. Şasenin boyut ve dayanım kriterleri yolcu güvenliği açısından da yeterli düzeyde olmalıdır.

### 7.1 Şase Tipi Seçimi

Şase tasarımının ilk aşamasında aracın taşıyacağı tahmini yük değeri belirlenmiştir. Araçta kullanılacak diğer donanımların ve yolcuların belirli veya tahmini ağırlıkları ile araç üzerindeki konumları dikkate alınarak şase tasarımı için uygun kriterler incelenmiştir. Aracın yüklü ağırlığının 400 kg civarında olması beklenmektedir. Taşıyıcı sistemler ile şasenin toplamda 110 kg'lık bir ağırlığa sahip olması gerekli görülmüştür. Bu ağırlığın sağlanabilmesi için yaklaşık 50 kg'lık bir ana şaseye ihtiyaç vardır. Bu kriterler ve projedeki diğer öncelikler dikkate alındığında, uygun bütçeli, düşük ağırlıklı, kısa sürede tasarlanabilecek ve tasarım serbestliği sunan bir şase için farklı şase tipleri incelenmiş ve omurga şasenin istenilen düzeyde olduğu görülmüştür. Uzay şasenin imalat zorluğu ile tasarım serbestliğini kısıtlaması, merdiven şasenin ağırlığı ile özellikle torsiyonel gerilmelere karşı düşük dayanımı ve monokok gövdenin ise tasarımının maliyetli, üretiminin zor ve zaman alıcı olması bu tiplerin dezavantajlarıdır.

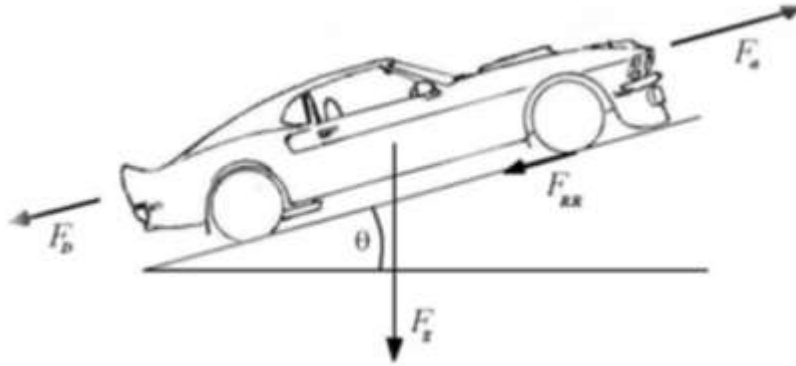
### 7.2 Araç Güç Tahmini

Aracın toplam ağırlığı dikkate alınarak, % 5 (2.86°) eğime sahip bir yolda sabit hızla hareket edebilmesi için toplamda 3.72 kW lik bir güce ihtiyaç olduğu belirlenmiştir. Şekil 7.1'de araç üzerine etki eden kuvvetler ve taşıtı hareket ettirmek için gerekli kuvvetler görülmektedir. Yuvarlanma direnci ve aerodinamik kuvvetler ihmal edilerek aracı hareket ettirmek için gerekli kuvvet;

$$F = ma + mg\sin\theta \quad (8.1)$$

$$P = F \cdot v \quad (8.2)$$

P = Fveşitliğinden gerekli güç değeri 3,72 kW olarak belirlenmiş ve aerodinamik ve yuvarlanma sürtünmelerini de karşılayabilmesi için yaklaşık 4 kW'lık bir sisteme ihtiyacın olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 7.1 Taşıt üzerine etki eden kuvvetler

### 7.3 Devrilme Analizi

Aracın dönüş esnasında devrilmesinin önüne geçilebilmek için; aks mesafesi, aks genişliği ve ağırlık merkezi gibi ana boyutlarının incelenerek uygun değerlere getirilmesi gereklidir. Bununla birlikte boyutların artırılması aracın ağırlığında olumsuz etkilere sebep olacaktır. Tablo 7.1'de prototip üretimi yapılacak aracın tahmini boyut aralıkları verilmiştir. Boyut aralıklarının belirlenmesinde benzer tasarım verilerinden yararlanılmıştır.

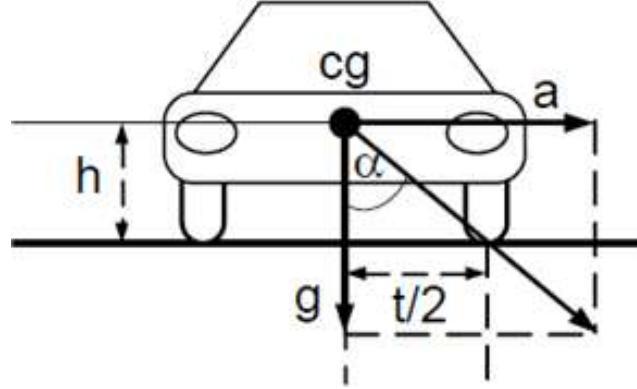
Tablo 7.1 Prototip aracın tahmini boyut aralıkları

MESAFE	DEĞER	
Akslar arası	1,4-1,8 m	
Aks genişliği	0,8-1,1 m	
Ağırlık merkezi	Zeminden	0,3-0,6 m
	Arka akstan	0,5-0,8 m
Araç uzunluğu	2,0-2,4 m	
Araç genişliği	1,0-1,3 m	
Araç yüksekliği	1,3-1,6 m	
Dönüş yarıçapı	6,7-10 m	

Şekil 7.2'de taşıtın devrilme sınırlarının belirlenmesinde kullanılan şematik ve semboller verilmiştir. Taşıtın yanal ivmesi ( $a$ ) hızın karesi ile doğru orantılı ve dönüş yarıçapıyla ters orantılıdır. Devrilme analizinde yanal ivmeyi, ağırlık merkezinin konumunu ve taşıtın ağırlığını

$$m \frac{v^2}{r} h = mg \frac{t}{2} \quad (8.3)$$

eşitliği kullanılarak aks genişliği (t) belirlenmiştir.

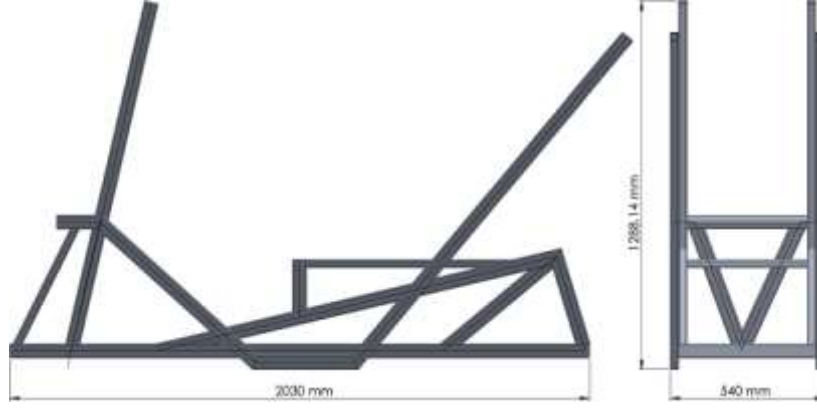


Şekil 7.2 Ağırlık merkezi ve devrilme analizi

Tablo 7.1’de verilen aralıklar dikkate alınarak aracın 15 m yarıçaplı bir virajı 45 km/h hızla dönebilmesi için ağırlık merkezinin zeminden yüksekliği 0,45 m olarak alındığında minimum aks genişliği 0,95 m olarak belirlenmiştir. Aks genişliği değeri, araç üzerinde kullanılan ekipman ve tasarım aşamasında belirlenen malzeme boyutlarından kaynaklı olarak 1,015 m’ye çıkartılmıştır. Araç tahrikinin arkadan yapılıyor olması sebebiyle ağırlık merkezinin bir miktar arka aksa yakın olmasının avantajları söz konusudur. Akslar arası mesafesi 1,7 m olarak belirlenen aracın ağırlık merkezinin araç merkezinden 0,1 m kadar arka aksa yaklaştırılması uygun olacaktır. Takribi araç uzunluk, genişlik ve yükseklik değerleri sırasıyla 2,3 m, 1,2 m ve 1,55 m olarak değerlendirilmektedir.

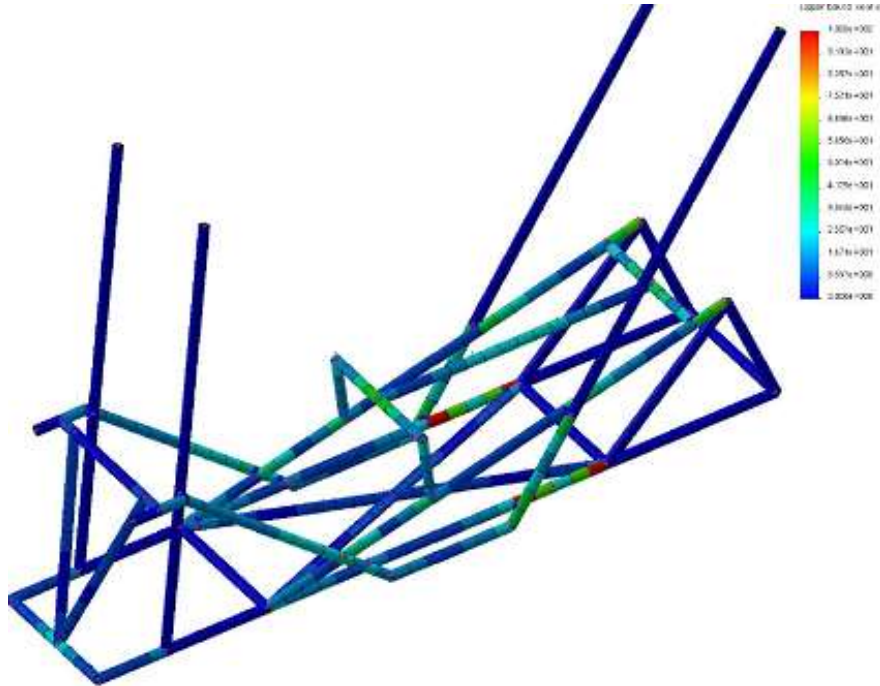
#### 7.4 Şase tasarımı ve gerilme analizi

Ana boyutların ve şase tipinin belirlenmesini takiben şase tasarımına geçilmiştir. Araç şaselerinde farklı malzemeler kullanılmakla birlikte omurga şase ve uzay şase uygulamalarında yaygın olarak 4130-CrMo çelik ve 6063-T6 alüminyum malzemeler kullanılmaktadır. Farklı kompozit malzemelerden üretimlerin de bulunmasının yanında maliyet ve üretim zorluğu açısından alüminyumun (6063-T6) kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, çeliğe (4130-CrMo) göre şase ağırlığında % 28 civarında bir azalmanın sağlanabileceği görülmüştür. Araç şase tasarım aşamasında, statik yükleme ve torsiyonel gerilme analizleri de dikkate alınarak en az ağırlık ile en uygun kullanım alanı değerleri için optimum boyutlandırmalar yapılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen ana şase ve boyutları Şekil 7.3’te verilmiştir.

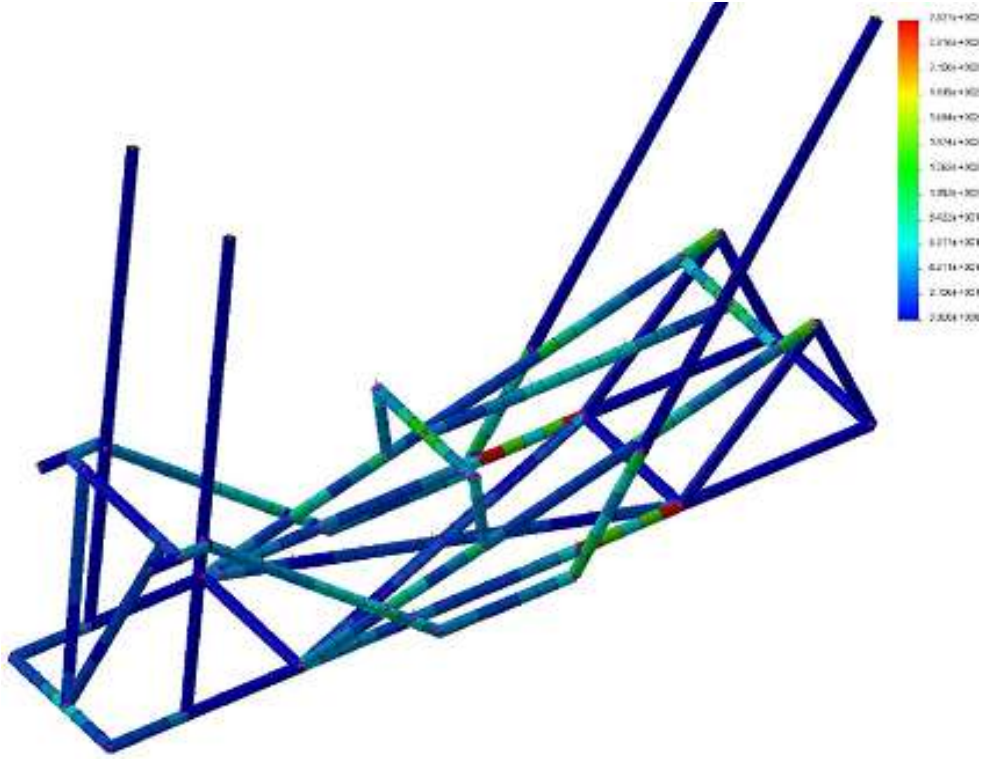


Şekil 7.3 Ana şase ve ana boyutlar

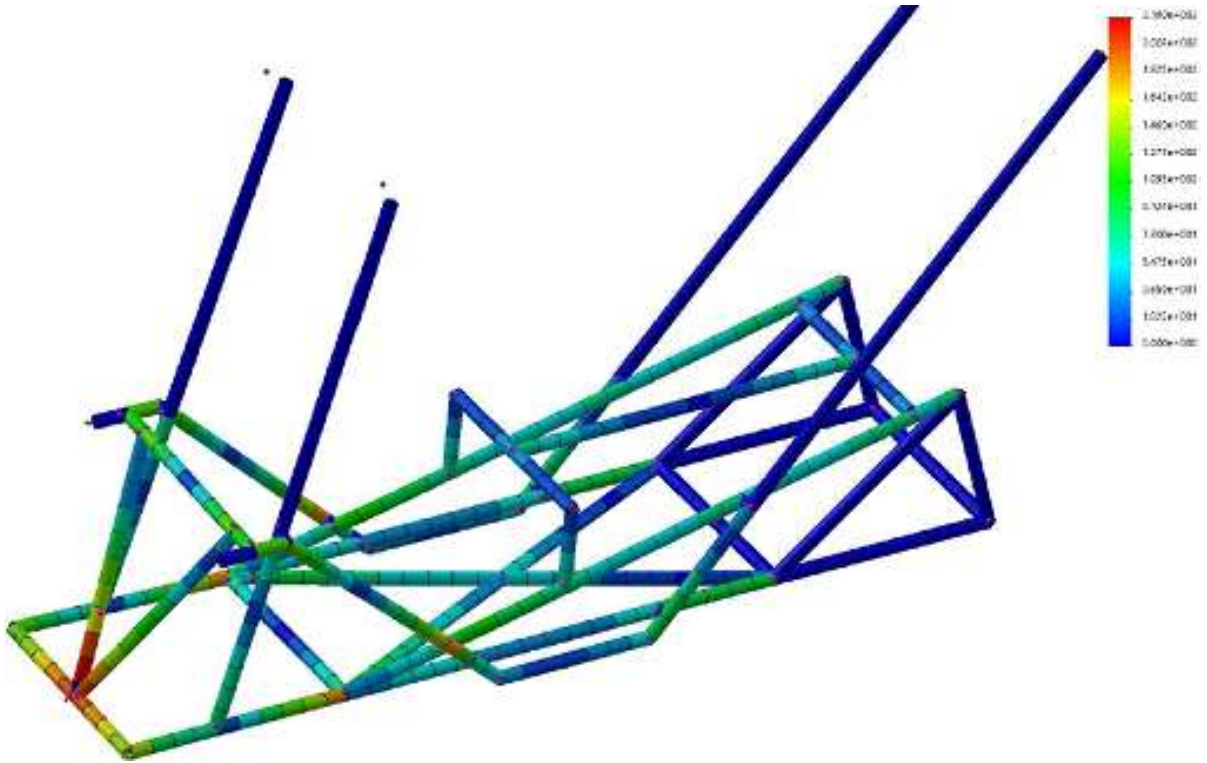
Ana şasenin statik ve torsiyonal gerilme analizleri SOLIDWORK programı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.4'de şasenin emniyet katsayısı olmaksızın statik yükler altındaki gerilme analizi sonuçları görülmektedir. Analizde şaseye etki eden yüklerin değerleri ve konumları, ekipmanların ve yolcuların tahmini ağırlıkları ile konumları dikkate alınarak belirlenmiştir. Hiçbir emniyet değeri kullanılmaksızın yapılan bu analiz sonucunda en büyük gerilmelerin şasenin orta bölgesinde yoğunlaştığı ve maksimum değerinin ( $100 \text{ N/mm}^2$ ) kullanılan malzemenin akma sınırını ( $257 \text{ N/mm}^2$ ) aşmadığı görülmüştür. Bu sonuçlar yaklaşık olarak 2,5 emniyet katsayısına müsaade edebileceğini göstermektedir. Bu emniyet katsayısı ile elde edilen sonuçlar Şekil 7.5'de verilmiş olup maksimum gerilmenin yine aynı bölgelerde ve  $252 \text{ N/mm}^2$  değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.4 Ana şasenin statik gerilme analiz sonuçları



Şekil 7.5 Ana şasesenin 2,5 emniyet katsayılı statik gerilme analiz sonuçları



Şekil 7.6 Ana şasesenin 2,5 emniyet katsayılı burulma analizi sonuçları



Şekil 7.6'da ana şasenin burulma analizi sonuçları görülmektedir. Arka aks eksenleri sabit tutularak şasenin simetri ekseninin ön kısmını kestiği bölgeden 3000 N.m'lik bit momente maruz bırakılan şasede maksimum 219 N/mm<sup>2</sup>'lik bir gerilmenin söz konusu olduğu ve bu değer in sınırları aşmadığı gözlemlenmiştir.

### 7.5 Tasarlanan Şasenin İmal Edilmesi

Tasarım ve analiz sonuçları dikkate alınarak imalatı gerçekleştirilen ana şasenin toplam ağırlığı yaklaşık 40 kg olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar imalatı gerçekleştirilen ana şasenin istenilen özellikleri barındırdığını göstermektedir. Gerçekleştirilen şasi imalatına ait örnek resimler Şekil 7.7'de gösterilmiştir. 6063 T6 alüminyum kullanılan şasenin parçaları alüminyum kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynak bölgeleri olabildiğince birbirinden uzaklaştırılarak bu bölgelerde oluşabilecek gerilmelerden kaynaklı deformasyonların önüne geçilmiştir. İmal edilen omurga tipi ana şasenin boyutları tasarım değerleri ile uyushmaktadır.

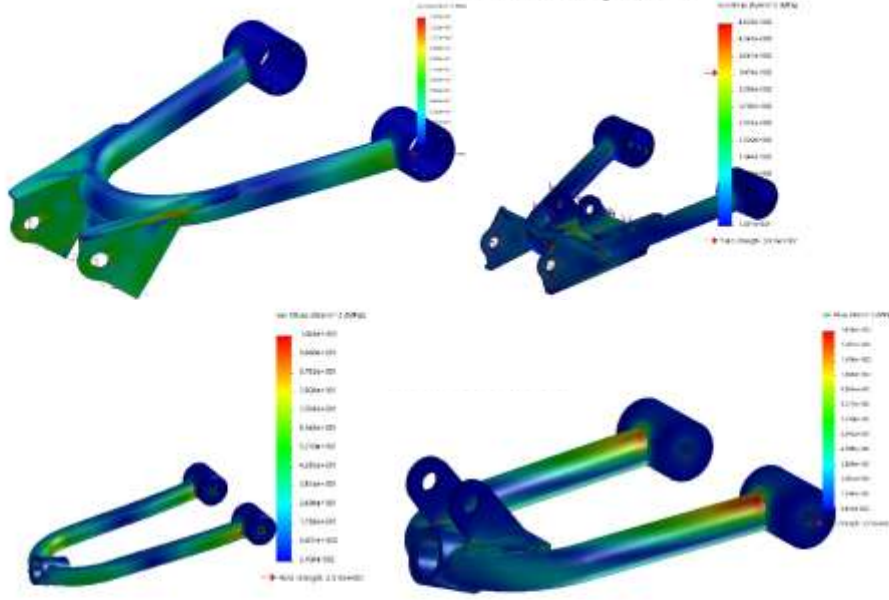
Bağlantı noktaları ve ön düzen açıları da dikkate alınarak oluşturulan şase tasarımı ile karşılaştırıldığında, bağlantı noktaları ile açılarda %5 nin altında bir hassasiyetin sağlandığı görülmüştür.



Şekil 7.7 Gerçekleştirilen şasi imalatı

### 7.6 Askı Donanım Sistemlerinin Tasarımı

Taşıt ve ana şase boyutlarına uygun olarak ön ve arka askı sistemleri için boyutlar belirlenerek statik analizleri yapılmıştır. Statik analizler dikkate alınarak uygun kesit alanları belirlenmiş ve malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. Projedeki maddi desteğin yeterli olmaması askı sistemlerinin imal yöntemi ile oluşturulmasına müsaade etmemiştir. Bu nedenle tasarım parametrelerine uygun piyasadan temin edilen askı sistemi parçaları kullanılmıştır. Temin edilen parçalar tasarıma uygun boyutlara getirilerek bu parçaların uygunluğu analizler ile kontrol edilmiştir. Askı donanım sistemindeki tüm parçalara etki eden kuvvet ve momentler dikkate alınarak gerçekleştirilen statik analiz sonuçları Şekil 7.8'de görülmektedir.



Şekil 7.8 Askı sisteminde kullanılan parçalarının statik analiz sonuçları

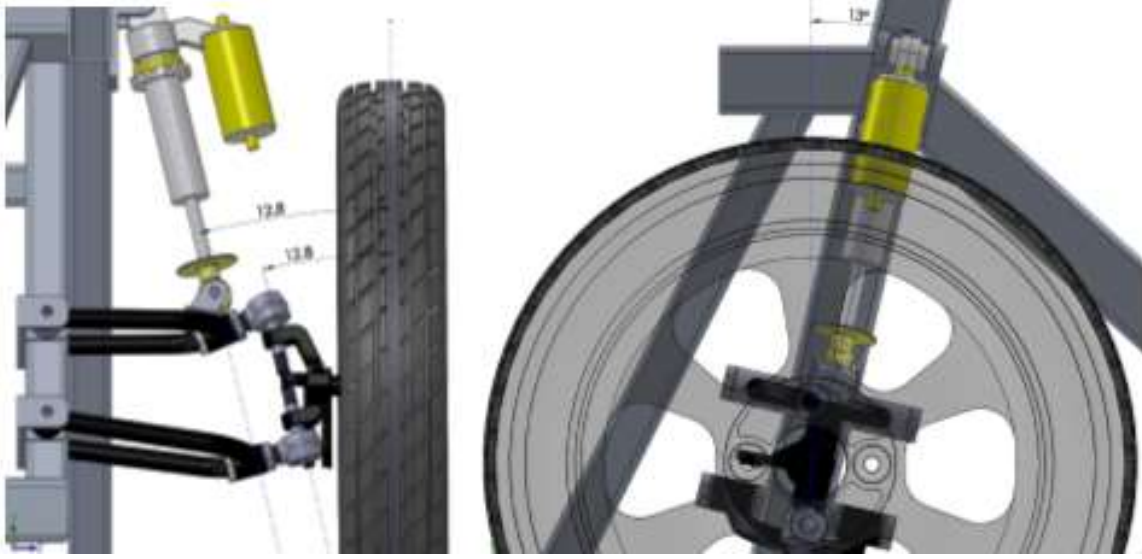
Askı sistemi parçalarının taşıt şasesi ile uyumu üç boyutlu çizimler üzerinden kontrol edilmiş ve imalatı gerçekleştirilen şase üzerine montajı gerçekleştirilmiştir. Tasarım ve imalat sonucunda elde edilen askı sistemlerinin uyumu Şekil 7.9'da görülmektedir. Ölçümler sonucunda genel olarak imal edilen askı donanım parçalarının tasarımıyla belirlenen boyutlar içerisinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.9 Tasarım ve imalat sonrası askı sistemi

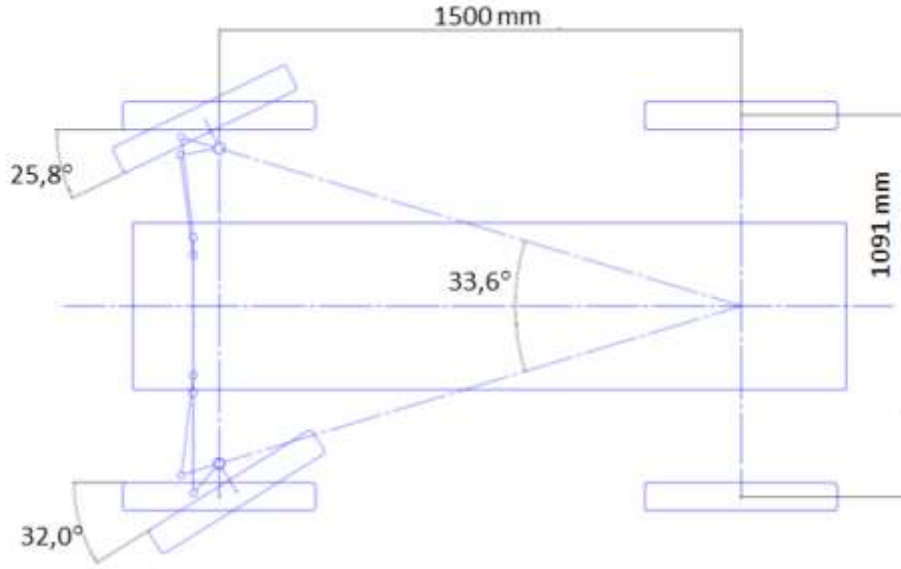
## 7.7 Direksiyon Sistemi ve Ön Düzen Ayarları

Hareket kabiliyetinin ve verimliliğinin artırılması için ön düzen sistemlerinin taşıt boyutları ile uyumu önemlidir. Askı donanım sisteminde kullanılan parçalar ve taşıtın ana boyutları dikkate alınarak ön düzen geometrisi oluşturulmuştur. Şekil 7.10'da ön düzen geometrisinin tasarım boyutlandırılmaları görülmektedir.



Şekil 7.10 Ön düzen geometrisine ait boyutlandırılmalar

Ön düzen geometrisine uygun direksiyon sistemi parçalarının boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Direksiyon sistemi ön-aks ekseninin önüne konumlandırılmış ve direksiyon sisteminin rot bağlantıları Akerman açıları dikkate alınarak uygun konumlarda yerleştirilmiştir. Şekil 7.11'de direksiyon sistemi tasarımına ait ana boyutlar ve Akerman açıları mevcuttur. Tasarımın mevcut askı donanım sistemine uyarlanması esnasında karşılaşılan bir miktar boyutsal hatalar Akerman açısında toplamda 2°'lik bir sapma meydana getirmiş olsa da taşıtın testleri sonucunda hareket kabiliyetine büyük bir etkisinin olmadığı görülmüştür. İç ve dış tekerleklerin maksimum dönüş açıları sırasıyla 32,0° ve 28,5° olarak belirlenmiştir. Bu dönüş açılarına göre tasarım sonucunda elde edilen 8 m dönüş yarıçapının montaj işlemleri sonucunda elde edildiği görülmüştür. Dönüş yarıçapı Tablo 1.1'de verilen tahmini boyutlar içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.11 Direksiyon sistemine ait ana boyutlar ve Akerman açısı

Tasarımı yapılan direksiyon sistemi boyutlarına uygun bir kramayer-pinyon tipi direksiyon kutusu seçilerek alım yoluyla tedarik edilmiştir. Suzuki/Carry marka-model bir taşıtın direksiyon dişli kutusu taşıt üzerinde kullanılmıştır. Direksiyon sistemi için gerekli diğer parçalar alım yoluyla tedarik edilmiş ve uygun boyutlarda dönüşümü sağlanarak kullanılmıştır. Şekil 7.12'de ön ve arka askı donanım ile direksiyon sistemlerine ait resimler verilmiştir.



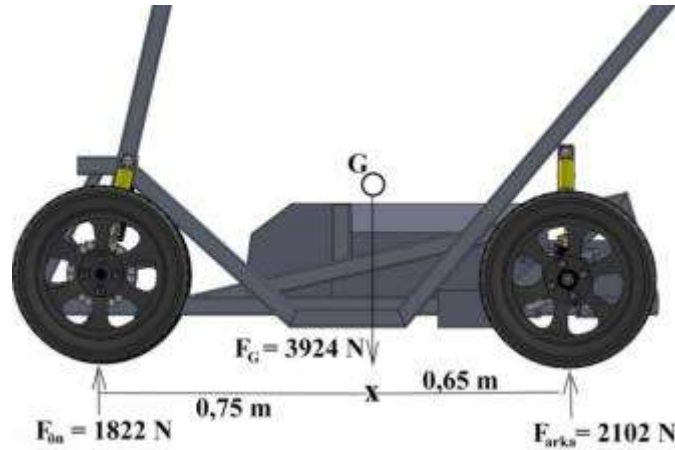
Şekil 7.12 Ön ile arka askı donanım ve direksiyon sistemi

## 7.8 Fren Sistemi

Taşıtın güvenli bir şekilde durdurulması için fren sisteminin tasarımı yapılmış ve elde edilen sonuçlara uygun değerlere sahip fren sistemi parçaları piyasadan belirlenerek tedarik edilmiştir. Toplam taşıt ağırlığı (400 kg), maksimum taşıt hızı (70 km/h) ve %33 eğimde iniş esnasında taşıta etki eden kuvvetler dikkate alınarak fren sistemi parametreleri belirlenmiştir. Bu şartlar altında taşıtın frenleme yapabilmesi için taşıta etki eden toplam frenleme kuvvetinin minimum 3230N olması gerekmektedir. Taşıtın güvenliği esas alınarak, belirlenen değerlerin %30 üzerinde (4200N) frenleme kabiliyetine sahip donanımlar kullanılmıştır.

Herhangi bir taşıt tekerleğinde kilitlenme olmaması için taşıt tekerlerine binen yük dağılımları belirlenmiştir. Şekil 7.13'te taşıtın ağırlık merkezi ve ön ve arka akslardaki tekerlere etki eden yüklerin dağılımları görülmektedir. Taşıt tahriki arkada olmasından dolayı ağırlık merkezi arkaya daha yakındır ve arka aks ile mesafesi 0,65 m olarak belirlenmiştir. Bu ağırlık merkezine göre taşıt ön ve arka tekerlekleri üzerindeki yük dağılımları sırasıyla 1822 N ve 2102 N dur. Arka tekerleklere binen yükün fazla olması bu tekerleklerde kayma olmaksızın frenleme kabiliyetini arttıracak için arka fren merkez silindirinin yüzey alanı yük dağılım oranı dikkate alınarak 1,15 oranında daha büyük seçilmiştir.

Şekil 7.14'te askı donanım ve tekerler ile fren ve direksiyon sistemlerinin ana şase üzerine montaj edilmiş hali görülmektedir. Tasarımın bu aşamasına kadar gelinen süreçte, aracın prototip tasarımı için projeden sağlanan maddi destek miktarı tamamen harcanmıştır. Taşıtın kabuk imalatı ve diğer ekipmanların tedariki farklı projeler kapsamında değerlendirilerek sağlanabilmektedir.



Şekil 7.13 Ön ve arka tekerlere etki eden statik yükler



Şekil 7.14 İmalatı gerçekleştirilen araç prototipi.



## 7.9 Kabuk Tasarımı ve İmalatı

Elde edilen prototip şaseye uygun kabuk tasarımının ilk aşamasında, şehir içi kullanıma yönelik farklı tasarımlar incelenmiştir. Bu tasarımlardan faydalı görülen örnekler seçilerek tasarım şekillendirilmesinde kullanılmıştır. Şekil 7.15'de bu çalışmada yapılan kabuk tasarımı görülmektedir. Tasarlanan kabuğun boyutlarının kontrolü çizim programı yardımıyla ana şase ile uyumu kontrol edilmiştir.



Şekil 7.15 Kabuk tasarımı çalışması

Kabuk tasarımını takiben kabuğu imalatı için çalışmalara başlanmıştır. Şehir içi kullanım amaçlı tasarlanan taşıtın enerji verimliliği kapsamında hafifliği önem arz etmektedir. Bu amaçla kabuk malzemesi olarak farklı malzemeler üzerine araştırmalar yapılmıştır. Alüminyumun kompozit levhaların ağırlığı ve istenilen formun verilememesi nedeniyle karbon ve cam elyaf malzemelerin kullanımı ön plana çıkmıştır. Karbon elyafın yüksek maliyeti ile kalıba döküm işleminde el yatırma tekniğinin yetersizliği ve uygun teçhizatların olmayışı sebebiyle cam elyaf kumaş kullanımına karar kılınmıştır.

El ile yatırma tekniğinde döküm cam elyafın daha kullanışlı olmasına rağmen, gerilmelere mukavemetinin daha yüksek olması ve bu nedenle daha az reçine gereksinimi kumaş tipi cam elyafın tercih edilmesinde önemli bir faktördür. 450 gr/m<sup>2</sup> yoğunluğa sahip cam elyaf kumaşın dört kat polyester reçine emdirilerek uygulanması halinde 8,2 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip kabuğun kütlesinin 25 kg civarında olması beklenmiştir. İmalat aşamasından sonra kabuk üzerine yapılan macun ve boya işlemlerinden sonra 31 kg'lık bir ağırlıkta olduğu gözlemlenmiştir.

Kabuğun dökümünün gerçekleştirileceği kalıp yapımında 6 mm ahşap yonga levhalar ile 32 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu XPS set köpük kullanılmıştır. Lazer kesim cihazında işlenerek elde edilen

ahşap levhaların arası köpük malzemesi ile doldurulmuş ve kalıp yüzeyin kalitesinin artırılması için üst kısmı çelik macun ile kaplanmıştır. Şekil 7.16'da kalıp imalatının farklı evrelerine ait resimler görülmektedir. Kalıp yüzeyi pürüzsüzlüğü zımparalanarak artırılan kalıba astar boya ve PVA kalıp ayırıcısı uygulandıktan sonra döküm işlemine geçilmiştir. Döküm aşamasında ilk kat cam elyaf kalıp yüzeyine serilerek polyester esaslı reçine fırça ve rulo yardımıyla kumaşa yedirilmiş ve kuruması için 2 saat beklenmiştir. Diğer katlar arasında yine aynı süre beklenerek dört kat cam elyaf takviyesi yapılmıştır. Şekil 8.17'de imal edilen kalıp ve kalıptan ayrılan kabuk resimleri görülmektedir.



Şekil 7.16 Cam elyaf kabuk kalıbı imalat aşamaları



Şekil 7.17 İmal edilen kalıp ve cam elyaf kabuk.

Kalıptan ayrılan kabuğun şase ile bağlantısı perçin ile sağlanmıştır. Perçinleme işleminden sonra yüzey pürüzlülüğü macun ile azaltılmış ve boyama işlemine alınmıştır. Şekil 7.18'de boyama işleminden çıkarılmış prototip çalışmasının resmi görülmektedir. Prototip imalatın sonucunda elde edilen ürüne ait boyutsal bilgiler Tablo 7.2'de sunulmuştur.

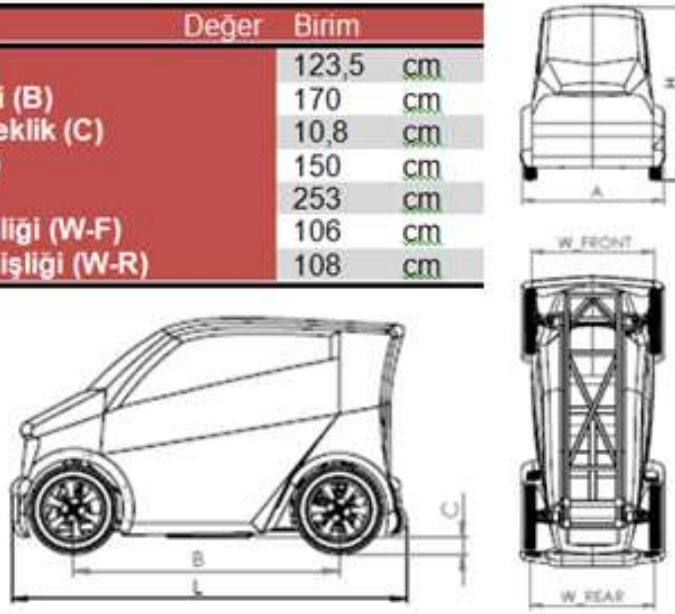




Şekil 7.18 Boyama işleminden sonraki prototip aracın görünümü

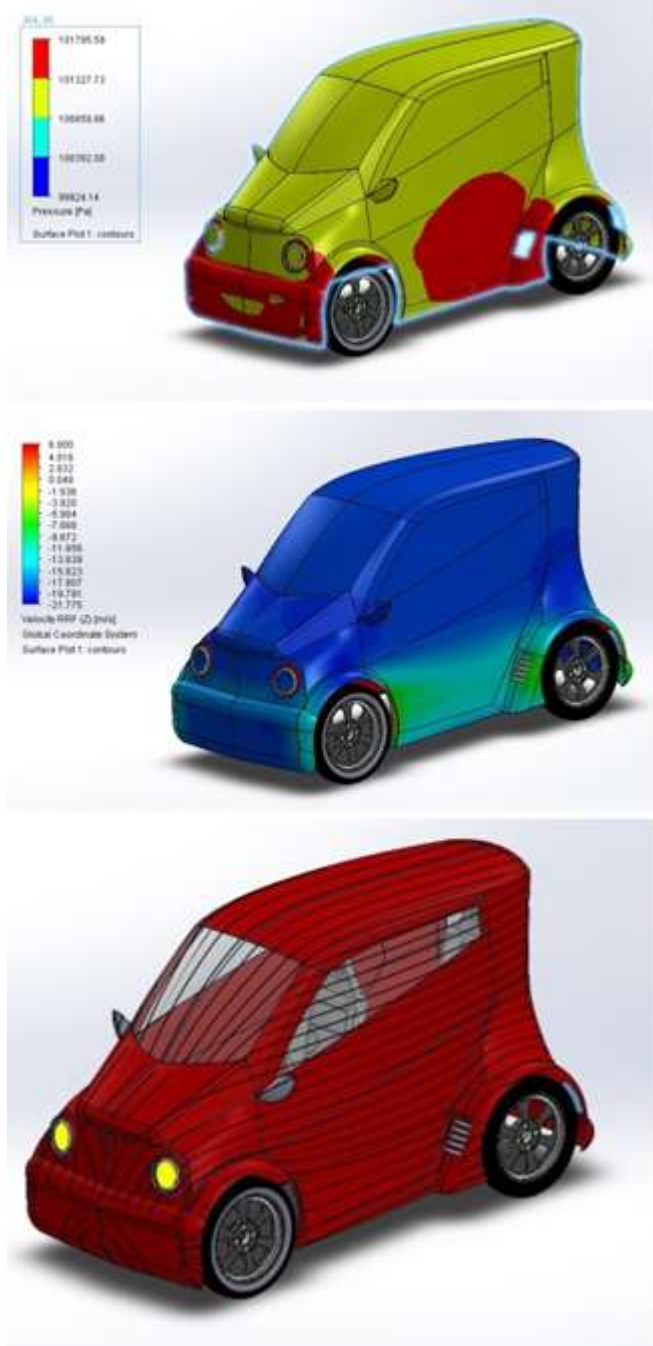
Tablo 7.2 Prototip aracın boyutları

Boyut	Değer	Birim
Genişlik (A)	123,5	cm
Aks mesafesi (B)	170	cm
Yerden yükseklik (C)	10,8	
Yükseklik (H)	150	cm
Uzunluk (L)	253	cm
Ön aks genişliği (W-F)	106	cm
Arka aks genişliği (W-R)	108	cm



### 7.10 Araç Aerodinamik Analizi

Aerodinamik analiz SlodiWorks-Flow Analysis programı üzerinde gerçekleştirilmiştir. 70 km/h akış hızının taşıt yüzeyi üzerinde etkisi incelenmiş elde edilen sonuçlar Şekil 7.19'da verilmiştir. Taşıtın ön ızgara bölgesinin kapalı olması ve arka çamurluk bölgelerindeki çıkıntıların basınç artışında önemli olduğu görülmüştür. Bununla birlikte akım çizgileri incelendiğinde yüzey akışın ön ve yan bölgelerde aşırı türbülansa sebep olmadığı görülmektedir.



Şekil 7.19 Aerodinamik analizden elde edilen sonuçlar

### 7.11 Maliyet Analizi

Tasarım ve imalatı gerçekleştirilen elektrikli araç ALATAY-EV ismiyle lanse edilmiştir. Aracın tamamlanmış haline atı nihai resim Şekil 8.20'de verilmiştir. Araç prototipinin oluşturulması sürecinde yapılan harcamalara ait bir döküm ise Tablo 7.3'te görülmektedir. Anlaşılacağı üzere bu maliyet sadece mekanik oluşturmayı içermektedir. Aksesuar ve elektrik elektronik donanım için yapılan harcamalar bunun içerisine dahil değildir.



Şekil 7.20 Prototip imalatı gerçekleştirilmiş ALATAY-EV isimli aracın son hali

Tablo 7.3 Araç prototipinin imalatında kullanılan malzeme ve yapılan işlemlere ait yaklaşık maliyet

İşlem ve Malzeme	Miktar	Yaklaşık fiyatlandırma (TL)
Şase malzemesi (Alüminyum 6063-T6)	40 kg	5000,00 TL
Şase imalatı	1 Adet	6000,00 TL
Direksiyon sistemi	1 Adet	1000,00 TL
Aski donanım sistemi	4 Adet	3000,00 TL
Fren sistemi	1 Adet	1500,00 TL
Cam Elyaf Kumaş (450 gr/m <sup>2</sup> )	40 m <sup>2</sup>	1500,00 TL
Polyester reçine	20 kg	1500,00 TL
Döküm malzemeleri	1 Takım	2000,00 TL
Ahşap yonga levha (6mm)	30 m <sup>2</sup>	5000,00 TL
XPS köpük (32 dansite)	15 m <sup>3</sup>	1000,00 TL
Boyama		5000,00 TL
Trim işlemleri		2000,00 TL
	<b>TOPLAM:</b>	<b>34500,00 TL</b>



## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bilindiği üzere, enerji tüketiminin en yoğun olduğu sahalardan birisi de ulaşım sektörüdür. Bu sektörde yoğun bir şekilde fosil yakıtlara dayalı enerji tüketimi söz konusudur. Son yıllarda, sektördeki fosil yakıt bağımlılığının giderilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması noktasında hibrid veya tümü elektrikli araçların geliştirilmesine yönelik faaliyetler her geçen gün artmaktadır.

Çalışma, TÜBİTAK ve FWO tarafından yapılan ikili anlaşma kapsamında ana katılımcılar olarak Ghent Üniversitesi (Belçika) ve Pamukkale Üniversitesi (Türkiye) arasında sağlanan gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen bu projede, şehir içi ulaşımaya yönelik yüksek verimli elektrikli araç tasarlanmıştır. Araçta ana enerji kaynağı olarak batarya kullanılmıştır. Aynı zamanda bu batarya grubu şebekeden şarj edilebilmektedir. Kalkış ve ani hızlanmalarda motorların güç talebi artmaktadır. Bu ani güç talebinin karşılanması ve frenleme sırasında oluşacak enerji üretimlerinin hızlı bir şekilde geri kazanılması için ultrakapasitörler kullanılmaktadır. İlave olarak, araç üzerine fotovoltaik panel yerleştirilmiş olup fotovoltaik panel sistemi için tasarlanan maksimum güç takip izleme düzeneği yardımıyla maksimum enerji batarya sistemine aktarılmaktadır. Böylece, hem aracın menzili hem de aracın toplam enerji verimliliği artırılması sağlanmaktadır. Araçta birden fazla enerji depolama ortamı olmasından dolayı yük akışını düzenleyen ve enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan bir enerji yönetim sistemi tasarım ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Aracın tahriki, tekerleklerinde bulunan iki adet bağımsız BLDC motor tarafından sağlanmaktadır. Araç sürüş konforu ve güvenliği için elektronik diferansiyel kullanımını gerektirmektedir. Bu amaçla sisteme elektronik diferansiyel entegre edilmiştir.

Proje ile aşağıdaki bilimsel soruların çözümü hedeflenmiştir;

- Elektrikli araç için güç elektroniği devreleri, kontrol yöntemleri, kompakt tasarım ve enerji yönetim sistemeleri yardımıyla yüksek verimli bir araç tasarlanması,
- Aracın beslenmesinde fotovoltaik panel, batarya ve ultrakapasitörden oluşan güç ünitelerinin optimum kullanımıyla aracın sürüş verimliliğinin artırılması,
- Sürüş kontrol sisteminde elektronik diferansiyel kullanımıyla hem sürüş konforunun hem de sürüş güvenliğinin artırılması,
- Güç elektroniği devreleri kaynaklı manyetik girişim problemlerinin azaltılması.



Bu projede, fotovoltaik panel, hibrid batarya sisteminden enerjilendirilen (batarya/ ultrakapasitör) ve aralarında optimum yük paylaşımı sağlayan yüksek verimli bir elektrikli araç prototipi çalışılmıştır. Proje süresince elde edilen çıktılar, proje önerisinde belirtilen ve hedeflenen çıktılar ile birlikte karşılaştırılmalı olarak aşağıda özetlenmiştir.

- Elektrikli aracın enerjilendirilmesinde ana besleme kaynağı olarak  $\text{LiFePO}_4$  batarya kullanılmıştır. Batarya modülünün oluşturulmasında için 36Ah kapasiteli, 32 adet  $\text{LiFePO}_4$  batarya hücresi seri bağlanmıştır. Bu şekilde 102.4 V'luk DC gerilim bara gerilimi seviyesine ulaşılmıştır. Batarya ünitelerinin sağlıklı, güvenli ve uzun ömürlü olarak kullanılabilmesinde BMS önemli bir yer tutmaktadırlar. Bu nedenle proje kapsamında ana ve uydu denetleyici kart tasarımı yapılarak bir BMS oluşturulmuştur. BMS devreleri batarya hücrelerine üzerine yerleştirilmiş ve hücreler arası iletişim seri bağlı UART haberleşme protokolü üzerinden sağlanmıştır. Böylece uzun kablolamadan kurtarılmış. Bu haberleşme yöntemi ile bütün batarya verileri sorunsuz bir şekilde ana denetleyici modüle iletebilmiştir. Gerilim dengeleme devresi için 5W taş direnç kullanılarak 2A e kadar gerilim dengeleme işlemi yapılabilmektedir. Dengeleme işleminde PWM donanımı ile balans akımı 0A-2A arasında ayarlanabilmektedir. Sıcaklığın artması durumunda veya hassas dengeleme işlemi PWM sinyallerin ayarlanması ile dengeleme akımı kontrol edilebilmektedir. BMS sistemiyle batarya hücrelerinin dengelenmesi, sıcaklık, gerilim ve şarjlılık gibi durumlar kontrol edilebilmektedir. Aynı zamanda tüm bu bilgiler araç üzerindeki ön panele aktarılıp gözlenebilmektedir.
- Kalkış ve hızlanmalarda motorların ani güç talebinin karşılanması ve frenleme enerjisinin geri kazanılmasında uygun karakteristikleri nedeniyle ultrakapasitör tercih edilmiştir. Ultrakapasitör ünitesinin oluşturulması için hazır modüller tercih edilmemiş. Bunun yerine hücre şeklinde temin edilen ultrakapasitör elemanlarından projede belirtilen güç ve gerilim aralığı için uygun modül oluşturulmuştur. Bu modül 30 adet 650 F'lık ultrakapasitör elemanın seri bağlanmasıyla oluşturulmuş ve nominal uç gerilimi 81 V'tur. Ultrakapasitörler bataryalar kadar karmaşık bir yönetim sistemine ihtiyaç duymasalarda hücrelerin zarar görmemesi için aşırı gerilimlere karşı korunmaları gerekmektedir. Bu amaçla araçta kullanılacak ultrakapasitörleri aşırı gerilimlerden korunması için koruma devreleri tasarlanmış ve araçta kullanılmak üzere tüm sistem modül haline getirilmiştir.
- Araçta ayrıca yardımcı besleme kaynağı olarak güneş panellerinden yararlanılmıştır. Proje kapsamında PV panel elektrikli aracın üst kısımlarına yerleştirilecek şekilde tasarlanmıştır. PV modüllerden elde edilecek gücü bataryaya aktarmak üzere bir MGTS tasarlanmıştır. Tasarlanan MGTS devresi için ayrıntıları ilgili bölümde verilen



ve araştırmacılarımızdan Dr. İsmail NAKİR tarafından geliştirilmiş olan bir algoritma kullanılmıştır. Bu algoritma özellikle hareketli sistemlerde maksimum güç takibini sağlamaya yöneliktir.

- Projede batarya ünitesinin şarj edilmesi dahili bir şarj cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu amaçla 1.1kW güç kapatesine sahip çıkış gerilim 110 Volt DC olacak şekilde bir tasarım ele alınmıştır. şarj devresi 10 A ıkış akımı verecek şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Elektrikli araç uygulamalarında, dış rotorlu sabit mıknatıslı elektrik motorları, dışük toplam ağırlık, maliyet ve kurulum kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedirler. Bu projede araç tahrik sisteminde, dış rotorlu yüzey mıknatıslı bir BLDC kullanılmıştır. Bu motorlarda ihtiyaç duyulan tork ihtiyacı için redüktör kullanılmış ve dönüştürme oranı 1/16'dır. Her bir motor 2 kW gücünde olup ağırlıkları redüktör dahil yaklaşık 2,6 kg civarındadır. Aynı güçte tipik bir hub motor yaklaşık 15 kg civarında olabilmektedir. Bu açıdan karşılaştırıldığında araçtaki motor ağırlıkları 5-6 kat civarından azaltılmış olmaktadır.
- Elektrikli araçlarda en önemli parçalardan biriside sürücü (inverter) sistemleridir. Proje kapsamında tüm tasarımı proje personeli ve öğrencilerimiz tarafından yapılan iki adet invertör geliştirilmiştir. Tasarlanan inverterler fırçasız DC motorun sürülmesi için kullanıma uygun gerilim beslemeli üç fazlı köprü inverter yapısındadır. Ayrıca tasarımı gerçekleştirilen invertöre sıcaklık, yüksek akım, yüksek gerilim ve kısa devre koruma gibi özelliklerde eklenmiştir. Araç üzerinde test edilen invertörler modüler yapıda olup elektrikli araç uygulamaları için oldukça uygundur.
- Bu proje kapsamında, elektrik araçlarının güç geri kazanımı rejenerator modunda çalışması durumunda üretilen enerjinin ultrakapasitelerde depo edilmesi işlemi için ayrı bir konvertöre ihtiyaç duyulmamıştır. Proje önerisinde sunulan ara devre konvertörlerinin tasarımı ve kontrolü maliyeti artıracak ve verimi dışüreceği için motorların sürülmesinde kullanılmak üzere tasarlanan invertörlerin bir doğru akım konvertörü gibi çalışmasını sağlayacak yeni bir yöntemin uygulanması amacıyla projede değişiklik yapılmıştır. Bu nedenle, ultrakapasitörün şarj edilmesinde gereken gerilim seviyesi motorların rejenetaif modda hangi hızda olursa olsun uygun gerilim seviyesini üretmek üzere boost (artıran tip) konvertör mantığında kontrolü sağlanmıştır. Ultrakapasitörün mevcut gerilim seviyesini ve şarj olması gereken gerilim seviyesini algılayan bir kontrol ile invertörler yazılımı değiştirilmiş ve gereken gerilim seviyesi ve güç geri kazanımı sağlanmıştır. Diğer taraftan, ultrakapasitörde depolanan enerjinin batarya bağlantısını sağlamak ve ihtiyaç halinde pik akımları desteklemek üzere değişen batarya gerilim seviyesine göre çıkış üreten bir doğru





akım konvertörüne (DC-DC Konvertör) ihtiyaç duyulmuştur. Bu konvertör sadece ultrakapasitörden bataryaya doğru enerji akışına izin vermektedir. Dolayısıyla, bataryadan enerji depolamasının önüne geçilmiştir. Bu amaç için uygun bir DC/DC konvertör tasarımı yapılmıştır. Ultrakapasitörden bataryaya enerji akışını düzenleyen DC-DC konvertörün testleri farklı yük ve farklı giriş gerilimlerinde yapılmış ve enerji akışı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

- Son zamanlarda BLDC motor kontrol sistemlerinde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi olan doğrudan moment kontrolünün BLDC'lere uygulanabilirliği yapılan çalışmalarda görülmüştür. Doğrudan moment kontrolü ile motorun değişken yüklerle vereceği tepki en iyi duruma getirilmeye çalışılır. Elektrikli araçlar için çok önemli bir konu olan moment ve akının birlikte kontrol edilmesi, hızlı moment cevabı, yüksek performans gibi özellikler doğrudan moment kontrolü metodu ile sağlanabilmektedir. Benzetim sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Özellikle, BLDC için DTC uygulamasının çok bilinen ve uygulanabilen bir yöntem olmadığı göz önüne alındığında, elde edilen bulgular önemlidir.
- Proje kapsamında, geleneksel araçlarda tekerleklerin farklı çaplı dönüş açılarında tekerleklere farklı hız ve tork sağlayan mekanik diferansiyel yerine maliyet ve hafiflik açısından elektronik diferansiyel tasarımı ve uygulaması ön görülmüştü. Bu sistemde direksiyon açısına bağlı olarak tahrik tekerleklerindeki moment ve hız farklılıkları hesaplanarak bu veriler motorların kontrolünde girdi olarak kullanılmaktadır. Literatürde en yaygın kullanılan model olan klasik Ackerman modeli bu projede tercih edilmiştir. Viraj boyunca hareket eden araçta ön tekerleklerin uygun açılarla yönlendirilmiş olması gerekmektedir. Kontrol sisteminde teker açılarının ölçülmesi ve ona bağlı olarak hız karakteristiklerinin belirlenmesinde direksiyon açısından faydalanılmaktadır. Proje süresince, benzetim modellerinin oluşturulması tamamlanmıştır. Burada, her bir motor sürücüsünün aracın sağa veya sola dönüşünde farklı referans alması gerektiğinden, araç kullanıcısının düz yol için karar verdiği hıza göre direksiyon açısı dikkate alınarak aracın yolda savrulmadan dönüş açısını takip etmesi sağlanmaktadır. Her bir tahrik motoru için bağımsız olarak elektronik diferansiyelle uygun doğrudan moment kontrolü ve hız kontrolü birlikte gerçekleştirilmektedir. Benzetim ve yazımlıları tamamlanan elektronik diferansiyel sisteminin araç üzerinde test edilmiştir.
- Proje önerisinde, motorların boşta salınımı veya dinamik frenleme çalışmasında elde edilecek güç-enerji geri kazanımı için ayrı ayrı konvertörler planlanmıştır. Ancak, yapılan ar-ge çalışmalarında görüldü ki; motor sürücüleri rejeneratif modda birer boost tipi dc-dc konvertör olarak kullanılabilir. Bu amaçla proje önerisinin bu





kısmı revize edilmiştir. Bu amaçla rejenaratif çalışmada sürücü inverterleri belirlenen uygun sürüş tekniğiyle boost converter olarak çalıştırılmıştır. Bu şekilde frenleme enerjisi UC depolanabilmektedir. Boost konverter olarak çalıştırılan inverterler üzerinden farklı hızlarda yükseltilecek gerilim seviyelerinin PWM işaretinde duty oranına göre ayarlanmaktadır. Motor devri arttıkça saf üretilen gerilim de yükselmektedir. Ancak, ultrakapasitörün 80 V'a şarj edilebilmesi için her motor devrinde bu gerilim seviyesinin ayarlanabilir ve kontrol edilebilir şekilde yükseltilmesi gerekmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarla simülasyon sonuçları ile oldukça uyumludur.

- Projede sistem veriminin deneysel olarak ölçülüp doğrulanması için bir yükleme test düzeneği oluşturulmuştur. Bu test düzeneği yardımıyla güç ölçümleri yapılarak sistemin gerçek verim testleri farklı motor devri ve farklı yük durumlarına göre gerçekleştirilmiştir. Yapılan test çalışmasında, öncelikle sistem boşta ve farklı devirlerde çalıştırılarak mekanik bağlantı sistemlerinin ve anahtarlama kayıplarının nasıl değiştiği gözlenmiştir. Motor devri arttıkça, mekanik kuplaj sisteminin, redüktörlerin ve invertörün kayıpları gittikçe artmaktadır. Bununla birlikte, güç katsayısındaki düzelmeye bağlı olarak verimde yavaş seyirli bir artış gözlenmiştir. Sistem mekanik olarak haricen yüklenmediği sürece, kendi başına boşta sürülürken sistem veriminin %50'nin altında olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Motor sürüş sisteminde kullanılan invertörün anma yükünde %89 civarında bir verime sahip olduğu, tam yüke yakın bölgelerde %90'ları geçtiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuç tasarım parametrelerine uygun olarak değerlendirilmiştir. Diğer taraftan, motorların hem hız değişimine hem de yük değişimine göre verim testleri yapılmıştır. Motor devrinin 5000-6000 rpm arasında iken en yüksek verime ulaştığı gözlenmiştir. Ancak değişken hız sürüşünde farklı yüklenmeler olacağından ortalama motor veriminin %88'ler civarında kaldığı görülmektedir. Motorların değişken yükler için verimleri incelenmiş, çıkış gücüne göre motor veriminin değişken yükler için ortalama %88-%90 arasında kalacağı görülmüştür. Yapılan ölçümlere göre sistemin verimini etkileyen birimlerin, sırasıyla, iki adet motor, iki adet redüktör, iki adet sürücü invertör, bağlantı elemanları, kuplaj ve rulmanlar olduğu göz önüne alınırsa, en yüksek verim bandında çalışmaları kaydıyla ki bu oran %90'lar olarak kabul edilirse, toplam sistem veriminin %65'ler seviyesinde olması beklentisiyle yapılan bu tasarımda deneysel olarak elde edilen sonuçlar da bunu teyid etmiştir. İnvvertörlerin %90, motorların redüktör çıkışıyla %88 verimle tam yük bandına yakın çalıştığı dikkate alınırsa toplam sistem verimi %62,7 olarak belirlenmektedir. Teorik olarak elde edilen toplam sistem verimine göre bu oranın düşük olduğu düşünülebilir. Ancak, fiziksel modelde var olmasına rağmen



teorik sistemde yer alman değişkenler nedeniyle ideal sisteme yakın davranış analizi yapıldığı söylenebilir. Ayrıca deneysel çalışmalar 70-77 °C sistem çalışma sıcaklığında yapılmıştır. Bu da dikkate alındığında tasarımı tamamlanan sistemin toplam veriminin oldukça yüksek olduğu kabul edilebilir.

- Enerji yönetim sistemi elektrikli aracı besleyen güç kaynakları ve elektriksel yük olan motor arasındaki güç paylaşımının yönetilme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bu proje çıktılarından birisi olan EMS sistemi için motor, fotovoltaik panel, batarya sistemi ve ultra-kapasitör üniteleri arasında yük akışını düzenleyen ve enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan bir enerji yönetim sistemi ele alınmıştır. Araçta güç yönetim sistemini gerçekleştirmek amacıyla gerçek zamanlı optimizasyon tabanlı yönetim sistemleri kategorisinde yer alan parçacık sürü optimizasyonu ile güç yönetiminin gerçekleştirilmesi yöntemi seçilmiş ve benzetim çalışmaları tamamlanmıştır. Bu yöntemde temel amaç gerekli güç ihtiyacının sürüş profili boyunca enerji kaynaklarının hangisinden sağlamalı ve rejeneratif frenleme enerjisinin hangi kaynaklara yönlendirmenin daha uygun olacağını belirlenmesidir. Aynı zamanda güç paylaşımı yapılırken enerji depolama birimlerinin o andaki durumlarının sisteme dahil edilmesinin gerekliliğidir. Proje çalışmasında yapılan simülasyon çalışmalarında güç kaynağı olarak batarya ve ultrakapitör dikkate alınmıştır. Aracın sürüş profile göre ihtiyaç duyduğu sürekli güç batarya tarafından, pik güçleri ise ultrakapitör sağlamaktadır. Burada güç yönetiminin sağladığı fayda gerekli olduğu koşullarda batarya ve ultrakapitör arasında güç değişiminin yapılabilmesidir. Örneğin, araç tarafından talep edilen güç sıfır ya da bataryanın sağlayabileceği enerjiden düşükse ultrakapitörün doluluk oranının durumuna göre ultrakapitöre batarya tarafından takviye edilerek, daha sonra aracın ani hızlanma ihtiyaçlarının karşılanması sağlanabilir. Ayrıca Belçika'lı ortaklarımızla birlikte çalıştığımız bu iş paketinde sıcaklığın enerji yönetim sistemlerinde etkisi incelenmiş ve buna göre verimlilik analizleri yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada ortalama olarak motor demir kayıpları, batarya kayıpları ve ultrakapitör kayıpları artan sıcaklıkla birlikte azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Yine ortalama olarak motordaki bakır kayıpları ve invertör kayıpları artan sıcaklıkla birlikte artma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Birbirine ters olan bu iki eğilim toplam kayıp açısından değerlendirildiğinde inceleme yapılan aralıkta az bir değişim etkisi göstermektedir. Dolayısıyla farklı sıcaklık değerleri için gerekli olan enerji bu sistem için neredeyse aynıdır. Bu da verimin bütün sıcaklıklarda yaklaşık sabit bir değerde kalmasına sebep olmaktadır.



- Proje önerisinde incelenecek konular arasında elektromanyetik uyumluluk (EMU) da gösterilmişti. Araç, EMU açısından değerlendirilecek ve elektronik devreler arasında oluşabilecek elektromanyetik girişimlerin önlenmesine yönelik çalışmalar yapılacağı belirtilmişti. Hatta bu amaç için sorumlu bazı proje araştırmacıları tarafından aktif filtre tasarlanması planlanmış ve bu doğrultuda ön çalışmalar yapılmıştı. Ancak proje ikinci gelişme raporu sonrası ön görülmeyen bazı durumlar nedeniyle ilgili personelin projeden ayrılması söz konusu olmuştur. 2. Gelişme raporuna kadar yapılan çalışmalar ilgili raporda verilmişti. Buna rağmen kalan proje ekibi istenen düzeyde olmasada olası EMU problemlerinin üstesinden gelmek üzere bir dizi önlemler almıştır. Öncelikle araçta pasif ekranlama çözümleri ele alınmıştır. Bu amaç için araç kablolama sistemlerinde güç ve kontrol kabloları bir birinden ayrılmıştır. Aracın 3 mm kalınlığındaki alüminyum profilden yapılan şasisi bu kablolar için kablo kanalı olarak değerlendirilmiştir. Güç kabloları ayrı profil içerisinden, kontrol ve haberleşme kabloları ise bir başka profilden yürütülmüştür. Bunun yanında ana güç kaynağı olan batarya sistemi aracın alt bölgesine yerleştirilmiştir. Bataryayı dış etkenlerden korumak ve bataryada yaşanacak olumsuz bir durumun araca sirayetini önlemek için batarya hücreleri 1 mm kalınlığındaki özel tasarlanmış alüminyum kutu içine alınmıştır. Bu koruma kutusu aynı zamanda pasif ekranlama görevi görmektedir. Bu şekilde araç için önemli ölçüde etkin bir ekranlama sağlanmıştır. Ayrıca invertör ve konvertör gibi güç elektroniği devrelerinde EMI filtreler kullanılmış ve önemli ölçüde girişimler engellenmiştir. Bunlara ilave olarak araç üzerinden EMI'lerden çok fazla etkilenmeyen ve konvansiyonel araçlarda da sıklıkla kullanılan CAN-BUS haberleşme protokolü tercih edilmiştir. Kontrol ve ölçme düzenekleri arasındaki haberleşme ızalasyonlu CAN-BUS sistemiyle sağlanmıştır. Sonuç olarak bir değerlendirme yapılırsa ele alınan bu önleyici çözümler yardımıyla araçta önemli bir EMU problemi yaşanmamıştır.
- Elektrikli aracın prototip üretimyle ilgili tüm tasarım, analiz ve üretim ayrıntılarıyla Bölüm 7'de verilmiştir. Aracın şase, askı donanım, direksiyon, fren, kapak, aerodinamik, vb. tasarım, analiz ve üretimi proje ekibince yapılmıştır. Bu anlamda şehir içi ulaşıma yönelik içerisinde fosil yakıt tüketmeyen bir elektrikli araç prototipinin gerçekleştirilmiş, sıfır veya sıfıra yakın emisyonlu (özellikle yoğun şehir içi trafiği dikkate alındığında) şehir içi kullanıma uygun çevre dostu araç konsepti oluşturulmuştur.
- Proje süresince 1 toplantı ve 3 ikili işbirliği ziyareti gerçekleştirilmiştir. Toplantı etkinliği Kasım 2014 tarihinde Yıldız Teknik Üniversitesinde yapılmıştır. Toplantıda; proje



çalışmasındaki tasarım kriterleri, iş paketlerinin yeniden değerlendirilmesi ve yurtdışı seyahat öncesi hazırlıklar görüşülmüştür. İkili işbirliği ziyaretlerinden ilki Kasım 2014 Ghent Üniversitesi Belçika'ya yapılmıştır. Belirlenen program kapsamında bir seminer organizasyonu düzenlenmiş ve karşılıklı sunumlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca laboratuvar gezileri yapılmış, projenin mevcut durumu tartışılmış, karşılıklı bilgi alış veriş gerçekleştirilmiştir. Seminer organizasyonunda karşılıklı olarak toplam 17 sunum yapılmıştır. İkinci işbirliği ziyareti Belçika ekibi tarafından Eylül 2015 Pamukkale Üniversitesine yapılmıştır. Benzer şekilde ajanda takviminde ki program kapsamında Türkiye'de bir seminer organizasyonu düzenlenmiş ve belirtilen konularda Belçika'lı proje katılımcıları ve Türk proje ekibi katılımcılarından oluşan ekip karşılıklı sunumlar gerçekleştirilmiştir. Toplam 13 sunum yapılmıştır. Ayrıca yine bu program kapsamında laboratuvar gezileri yapılmış, projenin mevcut durumu tartışılmış, karşılıklı bilgi alış veriş gerçekleştirilmiştir. Son ve üçüncü işbirliği ziyareti Mayıs 2016'da yine Ghent Üniversitesi Belçika'ya yapılmıştır. Belirlenen program kapsamında bir seminer organizasyonu düzenlenmiş ve karşılıklı sunumlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca laboratuvar gezileri yapılmış, projenin mevcut durumu tartışılmış, karşılıklı bilgi alış veriş gerçekleştirilmiştir. Seminer organizasyonunda karşılıklı olarak toplam 15 sunum yapılmıştır. Uluslararası işbirliği sayesinde bilgi transferi gerçekleşmiş, araştırmacılar birbirlerinin araştırma ve geliştirme potansiyelleri hakkında fikir sahibi olmuşlardır.

- Proje süresince şimdiye kadar 2 SCI makale, 2 uluslararası bildiri yayını yapılmıştır. hazırlık aşamasında ve planlanan birçok çalışma daha mevcuttur.

Tüm bu sistemlerin birlikte çalışması ve bir araç prototipi üzerinde test edilmesi, ayrıca çalışma sürecinin uluslararası ve ulusal işbirliği ile gerçekleştirilmesi projenin en büyük kazanımlarındandır. Proje sonunda şehir içi kullanıma uygun yüksek verimli elektrikli araçların geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalara önemli bir katkı sağlandığı değerlendirilmektedir.

Projeyle ilgili olarak gelecek çalışmalar için öneri ve planlarımız şu şekilde aktarabiliriz. Bilindiği üzere ülkemizin öncelikli alanları içerisinde otomotiv teknolojileri ve özellikle elektrikli araçlar yer almaktadır. Bu alanda ülke bilimsel ve teknolojik araştırma gücüne, bilim insanı yetiştirilmesi ve yeni yetenekler kazanılmasına önemli ölçüde ihtiyaç duymaktadır. Bu amaçla özellikle üniversiteler bazında elektrikli araçlar konusunun tema olarak seçilip aktif tutulması sağlanmalıdır. Proje vesilesiyle önemli altayapı sağladığımız bu alan yeni proje ve çalışmalarla desteklenerek, lisans ve lisansüstü çalışmalarla sürdürülebilir bir yapı haline getirilecektir. Özellikle yerli teknolojilerin geliştirilmesi ve ürünlerin ticari boyuta taşınması



gerekmektedir. Bu anlamada önemli deneyim kazandıığımız inventör, batarya yönetim sistemi, enerji yönetim sistemleri ve kontrol algoritmaların gerçek uygulamalara adaptasyonu ve entegre edilmesi yolunda çalışmalar planlanacaktır.

Elektrikli araçlar için en önemli unsurlarda biriside elektirik motorlarıdır. Proje kapsamında zaman ve maddi yetersizlikler nedeniyle ele alamadığımız tek konu nerdeyse motorlardır. Önümüzdeki süreç için panlanması yapılan bu konu, yeni projelerin üretilmesiyle ele alınacak ve elektrikli araçlar için yüksek verimli motorlar üzerinde çalışmalar yapılacaktır.

Önemli bir proje çıktımız olan enerji yönetim sistemi tasarımı simülasyon bazında çalışmış ve üzerine lisansüstü çalışmalarımız devam etmektedir. Yine süreç içerisinde geliştirilmeye ihtiyaç duyulan yol, araç ve sürüş profiline uygun gerçek zamanlı enerji yönetim sistemleri algortimaları gelecek için çalışması gereken en önemli sistemler arasındadır.



## KAYNAKLAR

- Abidin, M. F. Z., Ishak, D., Hassan, A. H. A. 2011. "A Comparative Study of PI, Fuzzy and Hybrid PI Fuzzy Controller for Speed Control of Brushless DC Motor Drive", Proceeding of ICCAIE'11, Penang, Malaysia, 4-7 December, 189-194.
- Affanni, A., Bellini, A., Franceschini, G., Guglielmi, P., Tassoni, C. 2005. "Battery choice and management for new-generation electric vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52 (5), 1343-1349.
- Andrea, D. 2010. Sayfa 22–110. Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs (1. Basım). London, UK: Artech House.
- Barreras, J. V., Swierczynski, M. J., Schaltz, E., Andreasen, S. J., Fleischer, C., Sauer, D. U., Christensen, A. E. 2015. "Functional Analysis of Battery Management Systems using Multi-Cell HIL Simulator", International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte-Carlo, Monaco, 31 March-2 April 2015.
- Batchheller, P. 1993. "Microprocessor controlled maximum power point tracker for photovoltaic system", Ms Thesis, Devry Institute of Technology.
- Castangs, A., Lhomme, W., Trigui, R., Bouscayrol, A. 2016. "Comparison of energy management strategies of a battery/ supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints", Applied Energy, 163, 190-200.
- Chatzakis, J., Kalaitzakis, K., Voulgaris, N. C., Manias, S. N. 2003. "Designing a New Generalized Battery Management System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 50 (5), 990-999.
- Chau, K. T., Li, W. 2014. "Overview of electric machines for electric and hybrid", International Journal of Vehicle Design, 64 (1), 46-71.
- Chen, M., Mora, G. A. R. 2006. "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance", IEEE Transactions on Energy Conversion, 21, 504-511.
- Chen, Y., Hedrick, J. K., Guo, K. 2013. "A novel direct yaw moment controller for in-wheel motor electric vehicles", Vehicle System Dynamics, 51 (6), 925-942.
- Chen, S., Hung, Y., Wu, C., Huang, S. 2015. "Optimal energy management of a hybrid electric powertrain system using improved particle swarm optimization", Applied Energy, 160, 132-145.
- De Lucena, S. E. 2011. "A Survey on Electric and Hybrid Electric Vehicle Technology, Electric Vehicles - The Benefits and Barriers", Seref Soylu (Ed.), ISBN: 978-953-307-287-6,



InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-the-benefits-and-barriers/a-survey-on-electric-and-hybrid-electric-vehicle-technology>

Depenbrock, M. 1987. "Direct self-control of the flux and rotary moment of a rotaryfield machine", U.S. Patent 4 678 248, Jul. 7.

Depenbrock, M. 1988. "Direct self control of inverter-fed induction machines", IEEE Trans. Power Electron, 3, 420-429.

Emadi, A., Rajashekara, K., Williamson, S. S., Lukic, S. M. 2005. "Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations", IEEE Transactions on Vehicular Technology, 54 (3), 763-770.

Erdinc, O., Vural, B., Uzunoglu, M. 2009. "A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading", 2009 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italy, 383-386.

Febin Daya, J. L., Sanjeevikumar, P., Blaabjerg, F., Wheeler, P. W., Ojo, J. O. 2015. "Implementation of Wavelet-Based Robust Differential Control for Electric Vehicle Application", IEEE Transactions on Power Electronics, 30 (12), 6510-6513.

Gamazo-Real, J. C., Vazquez-Sanchez, E., Gomez-Gi, J. 2010. "Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends", Sensors, 10 (7), 6901-6947.

Gao, L., Liu, S., Dougal, R. A. 2002. "Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 25, 495-505.

Gold, S. 1997. "A PSPICE Macromodel for Lithium-Ion Batteries", In Proceedings of IEEE the Twelfth Annual Battery Conference on Applications and Advances, Long Beach, CA, USA, 14–17 January, 215-222.

Guttowski, S., Weber, S., Hoene, E., John, W., Reichl, H. 2003. "EMC issues in cars with electric drives", IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC 2003), 1 (2), 777-782.

Hartani, K., Bourahla, M., Miloud, Y., Sekour M. 2009. "Electronic Differential with Direct Torque Fuzzy Control for Vehicle Propulsion System", Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 17 (1), 21-37.

Haseo, Y. ve Fujisawa, T. 2008. "Evaluation on Tracking Capability of MPPT for Running Solarcar" International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Korea, 2933-2936.





- Hasnira, H., Istardi, D. 2014. "Energy Estimation on BLDC Electric Vehicle using MATLAB", *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 1, 485-489.
- Hegazy, O., Van Mierlo, J., Lataire, P. 2011. "Control and Analysis of an Integrated Bidirectional DC/AC and DC/DC Converters for Plug-In Hybrid Electric Vehicle Applications", *Journal of Power Electronics*, 11 (4), 408-417.
- Hofman, I., Sergeant, P., Bossche, A. V. d., Koroglu, S., Kesler, S. 2015. "Integrated Model of Power Electronics, Electric Motor, and Gearbox for a Light EV", *Journal of Power Electronics*, 15 (6), 1640-1653.
- Hofman, I., Sergeant, P., Bossche, A.V.d., Koroglu, S. and Kesler, S. 2016 "Optimal design and implementation of a drivetrain for an ultra-light electric vehicle", *International Journal of Vehicle Design*, 72 (3), 262-283.
- Hohm, D.P. ve Ropp, M.E. 2000. "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms Using an Experimental, Programmable, Maximum Power Point Tracking Test Bed" *Photovoltaic Specialist Conference*, Anchorage, 1699-1702.
- Hua, C., ve Shen, C. 1998. "Comparative Study of Peak Power Tracking Techniques for Solar Storage System", *13th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, California, 685-697.
- Hussein, K.H., Muta, I., Hoshino, T. ve Osakada M. 1995. "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions", *IEEE Proc. Generation Transmission Distrib.* 142 (1), 59–64.
- Kennedy, J., Eberhart, R. 1995. "Particle swarm optimization", *Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 4, 1942-1948.
- Li, S. G., Sharkh, S. M., Walsh, F. C., Zhang, C. N. 2011. "Energy and Battery Management of a Plug-In Series Hybrid Electric Vehicle Using Fuzzy Logic", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60 (8), 3571-3585.
- Lo, J. 2013. "Effect of temperature on lithium-iron phosphate battery performance and plug-in hybrid electric vehicle range", M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering, University Waterloo, Waterloo, ON, Canada.
- Long, B., Lim, S. T., Bai, Z. F., Ryu, J. H., Chong, K. T. 2014. "Energy Management and Control of Electric Vehicles, Using Hybrid Power Source in Regenerative Braking Operation", *Energies*, 7 (7), 4300-4315.
- Maia, R., Silva, M., Araújo, R., Nunes, U. 2015. "Electrical vehicle modeling: A fuzzy logic model for regenerative braking", *Expert Systems with Applications*, 42 (22), 8504-8519.



Masjosthusmann, C., Kohler, U., Decius, N., Buker, U. 2012. "A Vehicle Energy Management System for a Battery Electric Vehicle", 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 9-12 October, Seoul, Korea.

Maxwell Technologies, "Ultracapacitor Product Guide". [http://www.maxwell.com/images/documents/PG\\_boostcap\\_product\\_guide.pdf](http://www.maxwell.com/images/documents/PG_boostcap_product_guide.pdf), Son erişim tarihi: 18 Kasım 2016.

Messenger, R., Ventre, J. 2005. Photovoltaic systems engineering (2. Basım). Boca Raton: CRC Press.

Meyer, R. T., DeCarlo, R. A., Pekarek, S. 2016. "Hybrid model predictive power management of a battery-supercapacitor electric vehicle", Asian Journal of Control, 18 (1), 150-165.

Miliani, E. H. 2014. "Leakage current and commutation losses reduction in electric drives for Hybrid Electric Vehicle", Journal of Power Sources, 255, 266-273.

Nakir, İ. 2007. "Fotovoltaik Güneş Panellerinde GTS ve MGTS kullanarak verimliliğin artırılması", YL Tezi, YTÜ Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Nakir, İ., 2012. "Ulaşım araçlarında fotovoltaik yapılar için uygun bir maksimum güç takip algoritması ile verimliliğin artırılması", Dr. Tezi, YTÜ Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ozturk, S. B., Toliyat, H. A. 2007. "Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Non-sinusoidal Back-EMF", IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Antalya, Turkey, 165-171.

Pan, H., Song, R. S. 2014. "The Control Strategy and Experimental Analysis of Electronic Differential Steering for Four Independent Drive Hub Motor Electric Vehicle", Advanced Materials Research, 1030-1032, 1550-1553.

Panday, A., Bansal, H. O. 2014. "A Review of Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicle", International Journal of Vehicular Technology, 2014, 1-19.

Pandey, A., Dasgupta N., ve Mukerjee, A. K. 2008. "High-Performance Algorithms for Drift Avoidance and Fast Tracking in Solar MPPT System", IEEE Transactions on Energy Conversion, 23 (2), 681-689.

Pellegrino, G., Vagati, A., Guglielmi, P., Boazzo, B. 2012. "Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59 (2), 803-811.

Pisu, P., Rizzoni, G. 2007. "A Comparative Study of Supervisory Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 15 (3), 506-



518.

Qin, L. 2015. "Particle Swarm Optimization Algorithm for Regenerative Braking Fuzzy Control of Electric Vehicle", International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy (ICISMME 2015), 11-13 April, Chongqing, China, 739-743.

Qu, J. Y., Liang, L. Y. 2011. "Modeling and Simulation for Super Capacitor Braking Energy Recovery Process of Micro EV", Advanced Materials Research, 383-390, 7390-7395.

Ramesh, M. V., Amarnath, J., Kamakshaiah, S., Rao, G. S. 2011. "Speed Control Of Brushless Dc Motor By Using Fuzzy Logic PI Controller", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 6, 33-40.

Rangarajua, S., Vroey, L. D., Messagie, M., Mertens, J., Mierlo J. V. 2015. "Impacts of electricity mix, charging profile, and driving behavior on the emissions performance of battery electric vehicles: A Belgian case study", Applied Energy, 148, 496-505.

Rothganga, S., Baumhöfer, T., Hoek, H. v., Lange, T., Doncker, R. W. D., Sauer, D. U. 2015. "Modular battery design for reliable, flexible and multi-technology energy storage systems", Applied Energy, 137, 931-937.

Sakhalkar, S., Dhillon, P., Kumar, P., Bakshi, S. et al. 2014. "Implementation of an Electronic Differential Using Torque Vectoring", SAE Technical Paper 2014-01-1776.

Sanf lix, J., Messagie, M., Omar, N., Mierlo, J. V., Hennige, V. 2015. "Environmental performance of advanced hybrid energy storage systems for electric vehicle applications", Applied Energy, 137, 925-930.

Sabri, M. F. M., Danapalasingam, K. A., Rahmat, M. F. 2016. "A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1433-1442.

Satılmış, O., Meşe, E. 2011. "Elektrikli ve Hibrid Elektrikli Araçlar İçin Batarya Şarj Cihazları", Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, 5-7 Ekim, Elazığ, Türkiye, 137-142.

Schuller, A., Flath, C. M., Gottwalt, S. 2015. "Quantifying load flexibility of electric vehicles for renewable energy integration", Applied Energy, 151, 335-344.

Sergeant, P., Hofman I., Bossche A. V. D. 2013. "Magnetic stray field based position detection in BLDC outer rotor permanent magnet synchronous machines", International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 27 (3), 544-554.

Shi, L., Crow, M. L. 2008. "Comparison of ultracapacitor electric circuit models", 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in



the 21st Century, Pittsburgh, PA, 1-6.

Tabbache, B., , Kheloui, A., Benbouzid, M. E. H. 2011. "An Adaptive Electric Differential for Electric Vehicles Motion Stabilization", IEEE Transactions on Vehicular Technology, 60 (1), 104-110.

Takahashi, I. ve Noguchi T. 1986. "A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction machine", IEEE Trans. Ind. Appl., IA-22, 820-827.

Tarimer, I., Ocak, C. 2009. "Performance comparison of internal and external rotor structured wind generators mounted from same permanent magnets on same geometry", Elektronika Ir Elektrotehnika, 92 (4), 65-70.

Tie, S. F., Tan, C. W. 2012. "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20 (2013), 82-102.

Trovao, J. P., Antunes, C. H. 2015. "A comparative analysis of meta-heuristic methods for power management of a dual energy storage system for electric vehicles", Energy Conversion and Management, 95 (2015), 281-296.

Trovao, J. P., Pereirinha, P. G., Jorge, H. M., Antunes, C. H. 2013. "A multi-level energy management system for multi-source electric vehicles - An integrated rule-based meta-heuristic approach", Applied Energy, 105, 304-318.

Vural, B., Uzunoglu, M., Erdinc, O., Onar, O. C. 2009. "A dynamic ultra-Capacitor model for vehicular applications", 2009 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italy, 595-598.

Weber, S., Guttowski, S., Hoene, E., John, W., Reichl, H. 2003. "EMI coupling from automotive traction systems", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 1-2, 11-16 May, Istanbul, Turkey, 591-594.

Xing, Y., Ma, E. W. M., Tsui, K. L., Pecht, M. 2011. "Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles", Energies, 4, 1840-1857.

Xue, X. D., Cheng, K. W. E., Cheung, N. C. 2008. "Selection of electric motor drives for electric vehicles", AUPEC '08 Power Engineering Conference, December, Sydney, Australia, 1-6.

Yu, K., Yang, H., Kawable, T., Tan, X. 2015. "Model predictive control of a power-split hybrid electric vehicle system with slope preview", Artif Life Robotics, 20, 305-314.

Zhang, Y., Zhou, M., Lu, D. 2014. "Fuzzy Logic Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles", Vehicle Engineering, 2, 1-7.



Zubieta, L., Bonert, R. 2000. "Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, 36 (1), 199-205.



## **EKLER**

Ek -1 Deneysel test düzeneği

Ek-2 Proje alışması kapsamında tamamlanan lisansüstü tezlerin listesi

Ek-3 Proje çalışmalarından üretilen yayınların listesi

Ek-4 ALATAY-EV isimli aracın teknik özellikleri

Ek-5 ALATAY-EV elektrik bağlantı şeması

Ek-6 ALATAY-EV yerleşim düzeni

Ek-7 ALATAY-EV'ye Tübitak tarafından birincilik ödülü

Ek-8 Basında biz

## Ek 1 Deneysel test düzeneği







## **Ek 2 Proje çalışması kapsamında tamamlanan lisansüstü tezlerin listesi**

### **Yüksek Lisans Tezi**

Karakaş, E. 2016, “Elektrikli araçlar için fırçasız doğru akım motorlarının sensörsüz doğrudan moment kontrolünün güç geri kazanımlı olarak gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, FBE, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Yenil, V. 2016, “Sensörsüz doğrudan moment kontrollü fırçasız DC motor sürücüsünde moment ve akı dalgalanmalarının azaltılması”, Yüksek Lisans Tezi, FBE, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

\*\*Tamamlanan yüksek lisans tezleri proje konusuyla ilgili olarak araştırmacılarımızdan Yrd. Doç. Dr. Selami KESLER’in danışmanlığında yürütülmüştür.



### **Ek 3 Proje çalışmalarından üretilen yayınların listesi**

#### **Uluslararası makale (SCI)**

Hofman, I., Sergeant, P., Bossche, A. V. d., Koroglu, S., Kesler, S. 2015. “Integrated model of power electronics, electric motor, and gearbox for a light EV”, Journal of Power Electronics, 15 (6), 1640-1653.

Hofman, I., Sergeant, P., Bossche, A.V.d., Koroglu, S. and Kesler, S. 2016 ‘Optimal design and implementation of a drivetrain for an ultra-light electric vehicle’, International Journal of Vehicle Design, 72 (3), 262-283.

#### **Uluslararası Konferans**

Kesler, S., Karakas, E., Koroglu, S., Tümbek, M., Demircali, A. 2016. “Verification of electrical specification and parameters of the PMSM with high accuracy by FEM models”, 1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences, Afyon, Turkey, 21-22 April, 1031-1035.

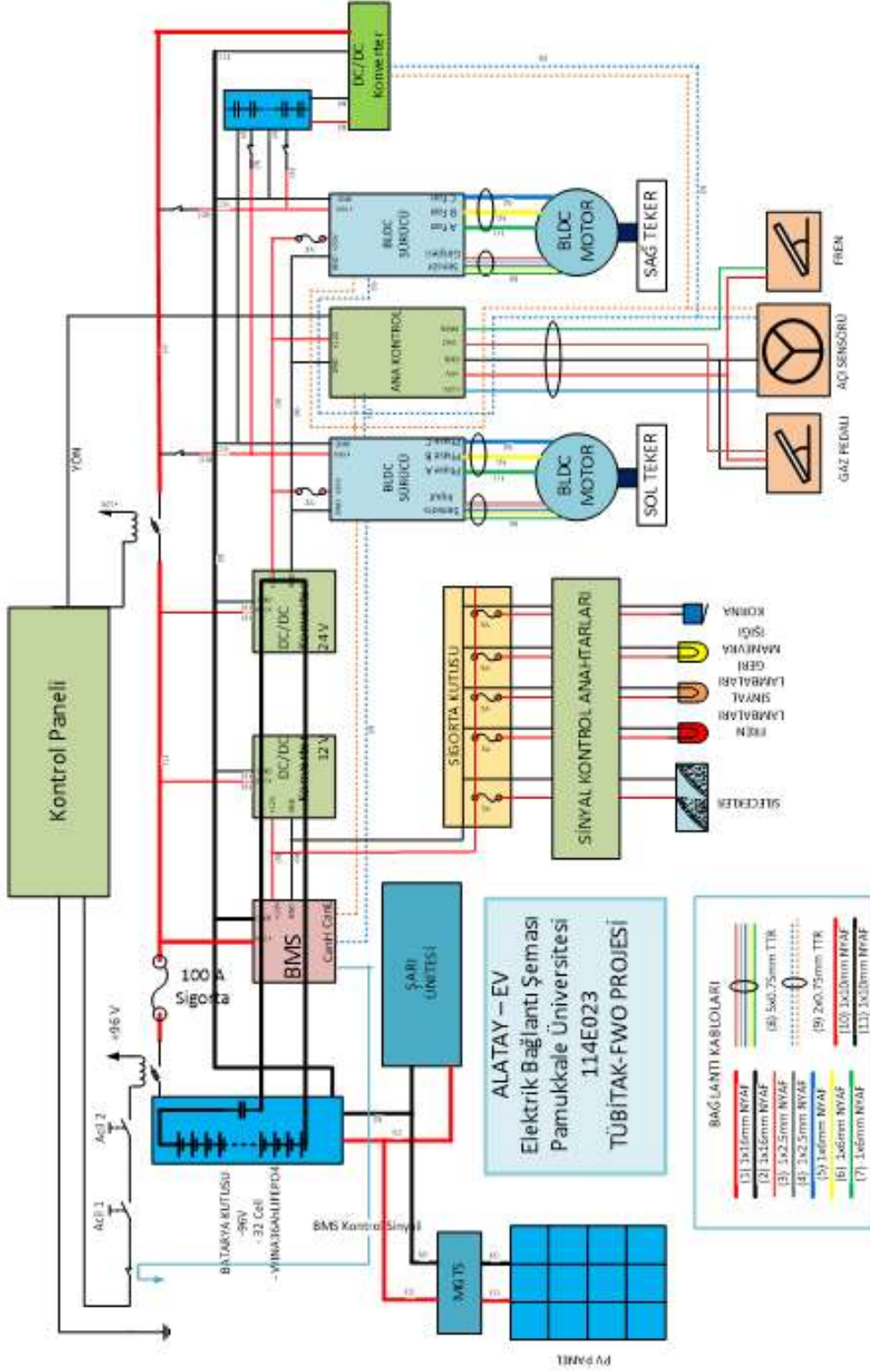
Koroglu, S., Demircali, A., Kesler, S., Sergeant, P., Oztürk, E., Tümbek, M. 2016. “Energy management system for battery/ultracapacitor electric vehicle with particle swarm optimization”, International Conference on Recent Advances in Electrical Systems (ICRAES'16), Hammamet, Tunus, 20-22 December, (sunulacak).



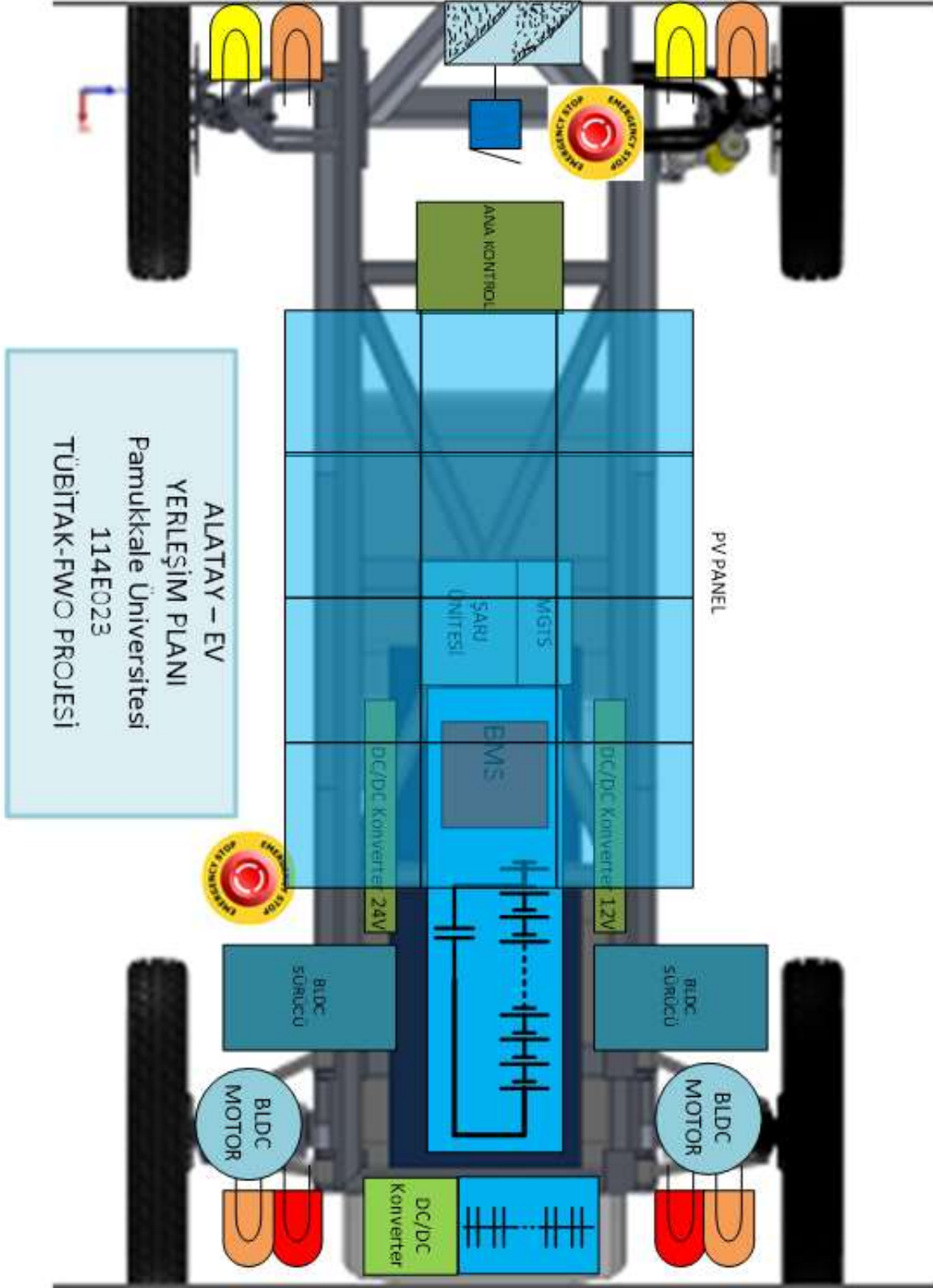
#### Ek 4 ALATAY-EV isimli aracın teknik özellikleri

Araç İsmi	Alatay-EV	
Proje Yöneticisi	Yrd. Doç. Dr. Selim KÖROĞLU	
Özellik	Birim	Değer
Uzunluk	mm	2500
En	mm	1200
Yükseklik	mm	1490
Tekerlek sayısı	#	4
Şase	malzeme	Alüminyum 6063 T6
Kaporta	material	Cam elyaf
Fren sistemi	Hidrolik disk, ön, arka, el freni	Ön ve arka bağımsız hidrolik disk sistemi
Ön tekerlek çapı	mm	550
Ön tekerlek eni	mm	110
Arka tekerlek çapı	mm	550
Arka tekerlek eni	mm	110
Motor	türü	Dış rotorlu BLDC motor
Motor gücü	kW	2x2=4 kW
Motor verimi	%	88 %
Sürücüsüz ağırlık	kg	280
Batarya	türü	LiFePO4
Batarya nominal gerilimi	V	96 V
Batarya maksimum gerilimi	V	114 V
Batarya nominal enerjisi	Wh	3456
Ultrakapasitör	türü	BCAP650P
Ultrakapasitör nominal gerilimi	V	81
Ultrakapasitör maksimum gerilimi	V	85,5
Ultrakapasitör Nominal Kapasitesi	Farad	21,67

## Ek 5 ALATAY-EV elektrik bağlantı şeması



## Ek 6 ALATAY-EV yerleşim düzeni



## Ek 7 ALATAY-EV'ye Tübitak tarafından birincilik ödülü

Proje kapsamında çalışılan araca üniversitemiz öğrencileride dahil edilerek TÜBİTAK tarafından 1-7 Ağustos 2016 tarihinde düzenlenen “Efficiency Challenge Electric Vehicle” etkinliğine, Electromobile (Batarya Elektrik Enerjili Araç) kategorisinde katılım sağlanmıştır. ALATAY-EV isimli araçla “Yerli Ürün Teşvik Kategorisinde” birincilik ödülü elde edilmiştir.







## Alatay'a TÜBİTAK'tan ödül

DENİZLİ'deki Pamukkale Üniversitesi (PAÜ) Mühendislik Fakültesi'nin öğretim üyeleri ve öğrencilerin içinde bulunduğu bir ekip tarafından 1.5 yılda tasarlanarak yapılan elektrikli araç 'Alatay', TÜBİTAK'ın düzenlediği Alternatif Enerjili Elektrikli Araç Yarışması Yerli Ürün Teşvik kategorisinde birinci oldu.

Yrd. Doç. Dr. Selim Koroğlu danışmanlığında oluşturulan 25 kişilik ekip, motoru dışında tamamı yerli üretim olan elektrikli otomobili üretmeyi başardı. Otomobilde kullanılan yazılımlar da öğrenciler tarafından geliştirildi.

Mühendislik Fakültesi öğretim üyesi ve proje danışmanı Yrd. Doç. Dr.

Selim Koroğlu, elektrikli otomobili 1.5 yıl içinde ürettiklerini söyledi.

Koroğlu, "Konvansiyonel araçlarda kaçırdığımız ivmeyi elektrikli araçlarda yakalamak istedik. Bu nedenle proje ekibi oluşturduk, projemiz TÜBİTAK'tan da destek gördü. Bunun için öğrencilerin de içinde olduğu bir ekip oluşturduk. Öğrenciler çok değerli ürünler ortaya çıkarıyor. Tasarıladıkları ürünler endüstriyel boyuta taşınabilecek türlerdir. Öğrencilerin tasarladıklarını yaptığımız araç üzerinde de test ettik. Katıldığımız yarışmada birinci olduk. Aynı ekip, önümüzdeki yıl daha iddialı bir şekilde bu yarışmaya damga vuracaktır" açıklaması yaptı.



Fotoğraf: Ramazan ÇETİN (DHA)

Saatte 80 kilometre hız yapabilen Alatay, bir batarya ile 400 kilometre yol yapabiliyor. Her türlü güvenlik önleminin alındığı aracın toplam ağırlığı ise 450 kilogram.



### Öğrencilerin aracı birinci seçildi

80 kilometre hız yapan 450 kilo ağırlığındaki aracı Erkan Karakaş liderliğinde 25 mühendis yaptı.

Denizli Pamukkale Üniversitesi öğretim üyeleri ve öğrencileri, 1.5 yılda tasarlayıp Alatay adını verdikleri elektrikli bir araç üretti.

TÜBİTAK'ın Alternatif Enerjili Elektrikli Araç Yarışması'nda birinci olan Alatay, yerli ürün teşviki almaya hak kazandı. 9'da







## Elektrikli "Alatay" a TÜBİTAK ödülü

**Pamukkale Üniversitesi** Mühendislik Fakültesi'nin öğretim üyeleri ve öğrencilerin içinde bulunduğu bir ekip tarafından 1.5 yılda tasarlanarak yapılan elektrikli araç "Alatay", TÜBİTAK'ın düzenlediği Alternatif Enerjili Elektrikli Araç Yarışması Yerli Ürün Teşvik kategorisinde birinci oldu.



## Elektrikli otomobile TÜBİTAK'tan ödül



Denizli'deki **Pamukkale Üniversitesi (PAÜ)** Mühendislik Fakültesi'nin öğretim üyeleri ve öğrencilerinin içinde bulunduğu bir ekip tarafından 1.5 yılda tasarlanarak yapılan elektrikli araç "Alatay", TÜBİTAK'ın düzenlediği Alternatif Enerjili Elektrikli

Araç Yarışması Yerli Ürün Teşvik kategorisinde birinci oldu. Mühendislik Fakültesi öğretim üyesi ve proje danışmanı Yrd. Doç. Dr. Selim Köroğlu, elektrikli otomobili 1.5 yıl içinde motoru dışından her parçasının yerli üretim olduğunu belirtti.

Proje de yer alan Yrd. Doç. Dr. Selami Kesler, elektrikli otomobili teknik kısmı hakkında bilgiler verdi. Kesler, otomobili 80 kilometreye kadar hız yaptığını, 400 kilometreye kadar da menafatı yaptığını belirtti.



## Güncel HOC PAÜ'NÜN YERLİ OTOMOBİLİ BİRİNCİ OLDU

TÜBİTAK'ın 12. sini düzenlediği Alternatif Enerjili Elektrikli Araç Yarışmasına katılan Pamukkale Üniversitesi, ALATAY-EV adını verdikleri araç ile birinciliği elde etti.

Pamukkale Üniversitesi'nin ilk kez katıldığı yarışma 1-7 Ağustos tarihleri arasında Kocaeli Körfez Pistinde yapıldı. Pamukkale Üniversitesi ATAY 2016 takımı, Electromobile 2016 kategorisinde ALATAY-EV aracı ile "Yerli Ürün Tevik" kategorisinde, araçtaki altı yerli ürün bileşeninden beşini kendisi tasarlayarak birincilik ödülü elde etti ve büyük bir başarıya imza attı. Yrd. Doç. Dr. Selim Köroğlu danışmanlığında oluşturulan proje takımında, danışman yardımcılıklarını Yrd. Doç. Dr. Selami Kesler, Yrd. Doç. Dr. Erkan Öztürk ve Yrd. Doç. Dr. Öner Can üstlendi. Takım kaptanı Erkan Karakaş liderliğinde farklı disiplinlerden oluşan 25'e yakın mühendis ve mül-

hendis adayı, projeye ekibinde yer aldı.

Pamukkale Üniversitesi'nin elektrikli araç konusundaki araştırmalara dahil olduğunu belirten Proje Danışmanı Yrd. Doç. Dr. Selim Köroğlu, "Günümüzde fosil yakıt kaynaklarının azalması, enerji talebinin artması ve küresel ısınma gibi çevresel faktörlerin de etkisiyle alternatif enerji kaynaklarına ve var olan enerji kaynaklarının en verimli şekilde kullanılmasına olan talep artmaktadır. Bilindiği üzere, enerji tüketiminin en yoğun olduğu sektörlerden birisi de, ulaşım sektörüdür. Bu sektörde yoğun bir şekilde fosil yakıtlara dayalı enerji tüketimi söz konusudur. Son yıllarda,

sektördeki fosil yakıt bağımlılığının giderilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması noktasında hibrid veya tümi elektrikli araçların geliştirilmesi yönelik faaliyetler her geçen gün artmaktadır. Ülkemizde de konvansiyonel araç üretimi konusunda kaçırılan fırsatın elektrikli araçlarda da kaçırılmaması için konuya oldukça yoğun bir ilgi var. Bizde bu yönde araştırmalar yapıyoruz. Güçlü bir proje ekibi ile çalışmalarımızı sürdürüldük. İlk kez katıldığımız yarışmada araçtaki altı yerli ürün bileşeninden beşini biz tasarladık ve birincilik ödülünü elde ettik" dedi. HADER MERKEZİ



## PAÜ'nün yerli otomobili birinci oldu

Haber MERKEZİ PAÜ'nün bu yıl ilk kez katıldığı TÜBİTAK Alternatif Enerji Elektrikli Araç Yarışmasına bu yıl 12'sini düzenlediği PAÜ Ekibinin, ALATAY-EV isimli elektrikli araçla yarışması, Kocaeli Körfez Pistinde gerçekleştirildi. Danışmanlığını Yrd. Doç. Dr. Selim Köroğlu'nun, danışman yardımcılığını Yrd. Doç. Dr. Selami Kesler, Yrd. Doç. Dr. Erkan Öztürk ve Yrd. Doç. Dr. Öner Can'ın yaptığı takım kapta Erkan Karakaş liderliğinde farklı disiplinlerden oluşan 25'e yakın mühendis ve mühendis adayının da görev aldığı PAÜ'nün ATAY20 Takımı, 47 takımından katılan 11. sınıfta yarışmada "ALATAY-EV" ile birinciliği elde etti.

Pamukkale Üniversitesi mühendis ve mühendis adaylarının ortak projesi "ALATAY-EV" isimli elektrikli araç, TÜBİTAK'ın düzenlediği yarışmada da "Yerli Ürün Tevik" kategorisinde birincilik oldu.

Proje Danışmanı Yardımcısı Doç. Dr. Selim Köroğlu, günümüzde fosil yakıt kaynaklarının azalması, enerji talebinin artması ve küresel ısınma gibi çevresel faktörlerin de etkisiyle alternatif enerji kaynaklarına ve var olan enerji kaynaklarının en verimli şekilde kullanılmasına olan talebin artması gerektiğini, "Son yıllarda, ulaşımda fosil yakıt bağımlılığının giderilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması noktasında hibrid veya tümi elektrikli araçların geliştirilmesi yönelik faaliyetler her geçen gün artmaktadır. Ülkemizde de konvansiyonel araç üretimi konusunda kaçırılan fırsatın elektrikli araçlarda da kaçırılmaması için konuya oldukça yoğun bir ilgi var. Bizde bu yönde araştırmalar yapıyoruz. Güçlü bir proje ekibi ile çalışmalarımızı sürdürüldük. İlk kez katıldığımız yarışmada araçtaki altı yerli ürün bileşeninden beşini biz tasarladık ve birincilik ödülünü elde ettik" dedi. HADER MERKEZİ



## Güncel HOC PAÜ'NÜN YERLİ OTOMOBİLİ BİRİNCİ OLDU

TÜBİTAK'ın 12. sini düzenlediği Alternatif Enerjili Elektrikli Araç Yarışmasına katılan Pamukkale Üniversitesi, ALATAY-EV adını verdikleri araç ile birinciliği elde etti.

Pamukkale Üniversitesi'nin ilk kez katıldığı yarışma 1-7 Ağustos tarihleri arasında Kocaeli Körfez Pistinde yapıldı. Pamukkale Üniversitesi ATAY 2016 takımı, Electromobile 2016 kategorisinde ALATAY-EV aracı ile "Yerli Ürün Tevik" kategorisinde, araçtaki altı yerli ürün bileşeninden beşini kendisi tasarlayarak birincilik ödülü elde etti ve büyük bir başarıya imza attı. Yrd. Doç. Dr. Selim Köroğlu danışmanlığında oluşturulan proje takımında, danışman yardımcılıklarını Yrd. Doç. Dr. Selami Kesler, Yrd. Doç. Dr. Erkan Öztürk ve Yrd. Doç. Dr. Öner Can üstlendi. Takım kaptanı Erkan Karakaş liderliğinde farklı disiplinlerden oluşan 25'e yakın mühendis ve mül-

hendis adayı, projeye ekibinde yer aldı.

Pamukkale Üniversitesi'nin elektrikli araç konusundaki araştırmalara dahil olduğunu belirten Proje Danışmanı Yrd. Doç. Dr. Selim Köroğlu, "Günümüzde fosil yakıt kaynaklarının azalması, enerji talebinin artması ve küresel ısınma gibi çevresel faktörlerin de etkisiyle alternatif enerji kaynaklarına ve var olan enerji kaynaklarının en verimli şekilde kullanılmasına olan talep artmaktadır. Bilindiği üzere, enerji tüketiminin en yoğun olduğu sektörlerden birisi de, ulaşım sektörüdür. Bu sektörde yoğun bir şekilde fosil yakıtlara dayalı enerji tüketimi söz konusudur. Son yıllarda,

sektördeki fosil yakıt bağımlılığının giderilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması noktasında hibrid veya tümi elektrikli araçların geliştirilmesi yönelik faaliyetler her geçen gün artmaktadır. Ülkemizde de konvansiyonel araç üretimi konusunda kaçırılan fırsatın elektrikli araçlarda da kaçırılmaması için konuya oldukça yoğun bir ilgi var. Bizde bu yönde araştırmalar yapıyoruz. Güçlü bir proje ekibi ile çalışmalarımızı sürdürüldük. İlk kez katıldığımız yarışmada araçtaki altı yerli ürün bileşeninden beşini biz tasarladık ve birincilik ödülünü elde ettik" dedi. HADER MERKEZİ





## PAÜ'nün 'ALATAY-EV' otomobili birinci oldu

PAÜ'nün bu yıl ilk kez katıldığı TÜBİTAK'ın Alternatif Enerjili Elektrikli Araç Yarışması'nın bu yıl 12'ncisi düzenlendi. PAÜ Ekibinin, ALATAYEV isimli elektrikli araçla katıldığı yarışma, Kocaeli Körfez Pisti'nde gerçekleştirildi. Pamukkale Üniversitesi mühendis ve mühendis adaylarının ortak projesi "ALATAY-EV" adlı elektrikli araç, TÜBİTAK'ın düzenlediği yarışma da "Yerli Ürün Teşvik" kategorisinde birinci oldu. **■9'da**



**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. SELİM KÖROĞLU
Proje No:	114E023
Proje Başlığı:	Şehirçi Kullanımlar İçin Yüksek Verimli Elektrikli Araç Prototip Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi
Proje Türü:	Uluslararası
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	İSMAIL NAKİR, ERKAN ÖZTÜRK, SELAMİ KESLER, HAKAN KAHVECİ, KAYHAN GÜLEZ
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	PAMUKKALE Ü. MÜHENDİSLİK F. ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2014 - 01/10/2016
Onaylanan Bütçe:	223380.0
Harcanan Bütçe:	155386.02
Öz:	<p>Enerji tüketiminin en yoğun olduğu sahalardan birisi olan ulaşım sektöründe yoğun bir şekilde fosil yakıt tüketimi söz konusudur. Son yıllarda, sektördeki fosil yakıt bağımlılığının giderilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması noktasında elektrikli araçlar konusundaki gelişmeler önemli bir ivme kazanmıştır. Bu amaca yönelik olarak batarya beslemeli (tamamen elektrikli) veya hibrid araçlar kullanılmaktadır.</p> <p>Bu projede fosil yakıt tüketimi olmayan, enerji depolama birimi olarak batarya ve ultrakapasitörlerin kullanıldığı, fotovoltaiik panel vasıtasıyla da yenilenebilir enerjiyi kullanılabilir hale getiren, bir elektrikli araç geliştirilmiştir. Çalışma, TÜBİTAK ve FWO tarafından yapılan ikili anlaşma kapsamında ana katılımcılar olarak Ghent Üniversitesi (Belçika) ve Pamukkale Üniversitesi (Türkiye) arasında sağlanan işbirliği ile gerçekleştirilmiştir.</p> <p>Projede, tamamen elektrikle çalışan şehir içi kullanıma yönelik bir araç prototipi tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. İlk olarak aracın boyutlandırılması (toplam uzunluk, genişlik, yükseklik vb.), toplam ağırlığı, maksimum hızı, sınıfı (şehir ve banliyö), tekerlek sayısı ve gücüne ilişkin teknik bilgiler belirlenmiştir. Sonrasında belirlenen özelliklere göre şasi-gövde tasarım ve analizleri yapılmış, ihtiyaç duyulan güç ve tork değerlerine sahip uygun motorlar seçilmiştir. Seçilen motora ait ihtiyaç duyulan güç elektroniği evirici/çeviricileri, motor kontrol sistemleri ve elektronik diferansiyel uygulaması araç için belirlenen teknik özelliklere göre tasarlanmıştır. Aynı süreçte aracın istenilen menzile sahip olması için ihtiyaç duyulan batarya, ultrakapasitör ve fotovoltaiik panel boyutlandırmaları gerçekleştirilmiştir. Bu noktadan hareketle dahili şarj sistemi, batarya yönetim sistemi, ultrakapasitör koruma ve deşarj üniteleri ve güneş paneli için güç elektroniği düzenekleri geliştirilmiştir. Son olarak; motor, güneş paneli, batarya sistemi ve ultrakapasitör ünitesi arasındaki yük akışını düzenleyen bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. Projenin sonunda, tüm sistem Alalay-EV ismi verilen prototip araç üzerinde birleştirilmiş ve test edilmiştir. Alalay-EV, 2016 yılında 12. si düzenlenen TÜBİTAK Alternatif Enerjili Elektrikli Araç Yarışması'nda `Yerli Ürün Teşvik? kategorisinde araçtaki altı yerli ürün bileşenin beşinin yerli olması nedeniyle birincilik elde etmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Elektrikli araç, batarya yönetim sistemi, enerji yönetimi, güç elektroniği, motor sürücü tasarımı
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Integrated Model of Power Electronics, Electric Motor, and Gearbox for a Light EV (Makale - İndekli Makale), 2- Optimal design and implementation of a drivetrainfor an ultra-light electric vehicle (Makale - Diğer Hakemli Makale), 3- Verification of electrical specification and parameters of the PMSM with high accuracy by FEM models (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),