

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN AKILLI BATARYA YÖNETİM SİSTEMİNİN
TASARIMI VE UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ

İsmail Can DİKMEN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Teoman KARADAĞ

HAZİRAN 2022

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN AKILLI BATARYA YÖNETİM SİSTEMİNİN
TASARIMI VE UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ

**İsmail Can DİKMEN
(23616150003)**

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Teoman KARADAĞ

HAZİRAN 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren Sayın Prof. Dr. Tahmuraz ABBASOV'a ve danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Teoman KARADAĞ'a,

Tez çalıőmam için laboratuvar imkânlarından faydalanmama izin veren, bilgi ve tecrübesi ile bana her zaman destek olan Sayın Prof. Dr. Serdar ALTIN'a,

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi doktora çalıőmalarım süresince de beni her zaman destekleyen aileme,

Tezin uygulama aşamasında vermiş oldukları maddi ve manevi destekten dolayı, TÜBİTAK ve İnönü Üniversitesi BAP birimine;

Teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “*Elektrikli araçlar için akıllı batarya yönetim sisteminin tasarımı ve uygulaması*” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada, yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

İsmail Can DİKMEN



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	viii
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Türkiye Perspektifinden Elektrikli Araçlar.....	3
1.2 Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi	8
1.2.1 Elektrik enerjisi depolama sistemlerinin tarihsel gelişimi.....	9
1.2.2 Elektrik motoru ve elektrikli araçların tarihsel gelişimi.....	14
1.3 Elektrikli Araçlara Genel Bakış.....	16
1.3.1 Tam elektrikli araçlar	17
1.3.2 Hibrit elektrikli araçlar	19
1.3.3 Şarjlı hibrit elektrikli araçlar	21
1.3.4 Yakıt hücreli elektrikli araçlar.....	21
2. TEMEL KAVRAMLAR VE TANIMLAR.....	28
2.1 Batarya Yönetim Sistemi (BYS)	28
2.2 Elektrikli Araçlarda BYS.....	31
2.2.1 BYS temel fonksiyonları	32
2.2.1.1 Batarya parametrelerini algılama.....	32
2.2.1.2 Batarya durumlarının kestirimi.....	33
2.2.1.3 Araç üstü arıza tespiti	34
2.2.1.4 Batarya güvenliği kontrolü ve alarmı	35
2.2.1.5 Dengeleme	35
2.2.1.6 Şarj kontrolü	36
2.2.1.7 Termal yönetim	36
2.2.1.8 İletişim	36
2.2.2 BYS topolojileri.....	37
2.2.2.1 Merkezi topoloji	37
2.2.2.2 Merkezi olmayan topoloji.....	37
2.2.2.3 Dağıtık topoloji.....	38
2.2.2.4 Modüler topoloji.....	38
2.3 BYS uygulamaları	39
2.3.1 Elektrikli raylı sistemlerde BYS.....	39
2.3.2 Elektrikli deniz araçlarında BYS	41
2.3.3 Diğer uygulamalar ve yöntemler	43
3. MATERYAL VE METOT	44
3.1 Geliştirilen BYS'nin Topolojisi.....	44
3.2 ALTIUM İle Elektronik Devre Kartı Tasarım.....	44
3.3 Programlanabilir DC Yük.....	46
3.3.1 Donanım	46
3.3.2 DC yük için LabVIEW'de geliştirilen yazılım.....	46
3.4 Kullanılan Piller.....	48
3.4.1 Nikel kadmiyum piller (NiCd)	48
3.4.2 Nikel-metal hidrit piller (NiMH).....	48
3.4.3 Lityum nikel kobalt alüminyum oksit piller (NCA).....	49

3.4.4 Lityum demir fosfat piller (LFP)	49
3.4.5 Lityum titanyum oksit piller (LTO)	50
3.4.6 Lityum sülfür piller (LiS – Simülasyon)	51
3.5 Pil Matematiksel Modeli.....	52
3.6 İstatistiksel Analiz	53
3.6.1 tTest	53
3.6.2 Kruskal-Wallis H testi	54
3.6.3 Conover testi.....	54
3.7 Tez Çalışmasında Kullanılan Makine Öğrenmesi Algoritmaları	55
3.7.1 Yapay sinir ağı.....	55
3.7.2 Çok sınıflı destek vektör makinesi	56
3.7.3 Sınıflandırma ağacı.....	57
3.8 Ateş Böceği Optimizasyon Algoritması	57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	58
4.1 Geliştirilen Pil Kimyasını Belirleme (PKB) Algoritmasının Temeli	58
4.2 Simülasyon	58
4.3 PKB Algoritması	60
4.3.1 PKB Algoritması Ver.1	61
4.3.1.1 Deneysel Çalışma	62
4.3.1.2 Yapay Sinir Ağının Tasarımı.....	66
4.3.2 PKB Algoritması Ver.2	69
4.3.2.1 Ayrıştırma Fonksiyonu.....	69
4.3.3 PKB Algoritması Ver.3	73
4.4 Geliştirilen Batarya Yönetim Sistemi (E-Cameleon)	82
4.4.1 Donanım	82
4.4.1.1 Ana kart 1. sürüm	83
4.4.1.2 Ana kart 2. sürüm	83
4.4.1.3 Ana kart 3. sürüm	84
4.4.1.4 Yardımcı kart 1. sürüm.....	87
4.4.1.5 Yardımcı kart 2. sürüm.....	87
4.4.1.6 Yardımcı kart 3. sürüm.....	88
4.4.2 Yazılım	91
4.4.2.1 Ana kart yazılımı	91
4.4.2.2 Arayüz yazılımı	92
4.5 BYS Fonksiyonlarının Yıllar İçerisindeki Değişimi ve Geliştirilen BYS (E-Cameleon) ile kıyaslanması	104
4.6 Anahtarlamalı BYS Simülasyonu.....	106
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR.....	114
ÖZGEÇMİŞ	127

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1: Türkiye'de satılan tam elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar.....	7
Çizelge 1.2: Türkiye'de trafiğe kayıtlı araçların yakıt türlerine göre sayıları	7
Çizelge 3.1: Çalışmada kullanılan pillerin teknik özellikleri.....	50
Çizelge 3.2: ATmega2560 mikro kontrolör teknik özellikleri.....	65
Çizelge 4.1: Hesaplanan t-Değerleri	70
Çizelge 4.2: Akım-Gerilim veri istatistikleri	78
Çizelge 4.3: BYS fonksiyonlarının karşılaştırması.....	105



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: IEEE veri tabanında yer alan yayın sayıları.....	1
Şekil 1.2: Science Direct veri tabanında yer alan yayın sayıları.....	2
Şekil 1.3: Web of Science veri tabanında yeralan yayın sayıları.....	2
Şekil 1.4: Scopus veri tabanında yer alan yayın sayıları.....	3
Şekil 1.5: 1888 yılında The Engineer dergisinde yayınlanan ve Padişah II. Abdülhamid için üretilen elektrikli aracı anlatan makale.....	5
Şekil 1.6: 1895 yılında Autocar dergisinde yayınlanan ve Padişah II. Abdülhamid için üretilen elektrikli aracı anlatan makale.....	6
Şekil 1.7: Elektrikli araçların sınıflandırması.	17
Şekil 1.8: Tam elektrikli araç.....	18
Şekil 1.9: Hibrit elektrikli araç.....	20
Şekil 1.10: Şarjlı hibrit elektrikli araç.....	21
Şekil 1.11: Yakıt hücreli elektrikli araç.....	22
Şekil 1.12: Tez projelendirme silsilesi.....	27
Şekil 2.1: Hücre, grup ve batarya kavramları.....	28
Şekil 2.2: Örnek li-ion pilin optimal çalışma zarfı.....	29
Şekil 2.3: BYS yayın sayıları.....	30
Şekil 2.4: Merkezi batarya yönetim sistemi topolojisi.....	37
Şekil 2.5: Merkezi olmayan batarya yönetim sistemi topolojisi.....	38
Şekil 2.6: Dağıtık batarya yönetim sistemi topolojisi.....	38
Şekil 2.7: Modüler batarya yönetim sistemi topolojisi.....	39
Şekil 3.1: Geliştirilen BYS için tercih edilen topoloji.....	44
Şekil 3.2: Yardımcı kart tasarımının örnek kart çizimi ve 3D görünümü.....	45
Şekil 3.3: Yardımcı kart tasarımının örnek şematik çizimi.....	45
Şekil 3.4: Programlanabilir DC yük.....	46
Şekil 3.5: LabVIEW’de geliştirilen yazılım arayüzü.....	47
Şekil 3.6: LabVIEW’de geliştirilen yazılım.....	47
Şekil 3.7: Çalışmada kullanılan piller.....	51
Şekil 3.8: Lityum sülfür pil MATLAB ve SIMULINK simülasyonu.....	52
Şekil 3.9: Pil eşdeğer devre modeli.....	52
Şekil 3.10: Pil matematiksel modelinin Simulink diyagramı.....	53
Şekil 4.1: Birinci simülasyonun genel görünümü.....	59
Şekil 4.2: Simülasyon algoritması ve detayı.....	60
Şekil 4.3: PKB Algoritması Ver.1 deneysel çalışmada kullanılan piller.....	63
Şekil 4.4: Ölçülen terminal gerilimi ve eşlikeden akım değerleri.....	64
Şekil 4.5: Deneysel çalışma düzeneği.....	65
Şekil 4.6: Tasarlanan yapay sinir ağı.....	67
Şekil 4.7: PKB algoritmasının sadece yapay sinir ağı ile kullanımını sonucunu gösteren hata matrisi.....	68
Şekil 4.8: BattIdent izometrik görüntüsü.....	69
Şekil 4.9: Ayırıştırma fonksiyonunun etkisi.....	72
Şekil 4.10: PKB algoritmasının ayırıştırma fonksiyonu ile işlenmiş veriyi kullanan yapay sinir ağı uygulaması sonucunu gösteren hata matrisi.....	73
Şekil 4.11: PKB Algoritması Ver.3 çalışmasında kullanılan fiziksel piller.....	74
Şekil 4.12: PKB Algoritması Ver.3 çalışmasının iş akış diyagramı.....	75
Şekil 4.13: LiS pillerin PKB algoritmasında kullanılan veri üretici simülasyonu....	76
Şekil 4.14: Ayırıştırma fonksiyonu kullanılmadan beş farklı kimyaya sahip pilin akım-gerilim verileri.....	77

Şekil 4.15: PKB algoritmasında kullanılan veri çerçevesi formatı	77
Şekil 4.16: Ateş böceği optimizasyon algoritmasının maliyet fonksiyonu yakınsama grafiği.....	79
Şekil 4.17: Ayrıştırma fonksiyonu ile işlenmiş beş farklı kimyaya sahip pilin akım-gerilim verileri	80
Şekil 4.18: Karar ağacı ve destek vektör makinesi algoritmalarının hata matrisleri	81
Şekil 4.19: Karar ağacı algoritmasının sınıflandırma alanları	81
Şekil 4.20: Karar ağacı algoritmasının dal-düğüm modeli	82
Şekil 4.21: Ana kart 1.sürüm devre kartının dizgili ve dizgisiz görünümü	83
Şekil 4.22: Ana kart 2.sürüm devre kartının dizgili ve dizgisiz görünümü	83
Şekil 4.23: Ana kart CPU1 devre şeması	84
Şekil 4.24: Galvanik izolasyonlu SPI iletişim devresi seması	85
Şekil 4.25: Ana kart CPU2 devre şeması	85
Şekil 4.26: Ana kart CPU programlama ve haberleşme USB devresi şeması	86
Şekil 4.27: Ana kart ve 3D görünümü	86
Şekil 4.28: Yardımcı kart 1. sürüm	87
Şekil 4.29: Yardımcı kart 2. sürüm	87
Şekil 4.30: Yardımcı kart 3.sürümün BYS entegre devre şeması.....	89
Şekil 4.31: Yardımcı kart 3.sürümün galvanik izolasyonlu SPI iletişim devre şeması	89
Şekil 4.32: Yardımcı kart 3.sürümün dengeleme ışıklı gösterge devre şeması	89
Şekil 4.33: 12'lik yardımcı kart 3. sürüm 3D görünümü ve üretilen prototip	90
Şekil 4.34: 18'lik yardımcı kart 3. sürüm 3D görünümü ve üretilen prototip	90
Şekil 4.35: BYS arayüz yazılımı giriş sayfası.....	94
Şekil 4.36: BYS arayüz yazılımı özet sayfası	95
Şekil 4.37: BYS arayüz yazılımı bağlı batarya sayfası	95
Şekil 4.38: BYS arayüz yazılımı iletişim sayfası.....	96
Şekil 4.39: BYS arayüz yazılımı bağlantı sayfası	97
Şekil 4.40: BYS arayüz yazılımı şarj/deşarj sayfası	97
Şekil 4.41: BYS arayüz yazılımı tanılama sayfası	98
Şekil 4.42: Anahtarlamalı BYS simülasyon çalışması.....	106
Şekil 4.43: Araç bloğu içerisindeki mekanik donanım ve soğutma sistemi	107
Şekil 4.44: WLTP sürüş çevrimi.....	107
Şekil 4.45: Motor sıcaklığının bir döngüdeki değişimi.....	108
Şekil 4.46: Batarya anahtarlama lojiği.....	109
Şekil 4.47: Batarya kontrol sinyali.....	110

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

°C	: Santigrat derece
μ	: Mikro
A	: Amper
AC	: Alternatif akım
Ah	: Amper saat
ANOVA	: Varyans analizi
BYS	: Batarya yönetim sistemi
CAN	: Kontrolör alan ağı
CC	: Sabit akım
CP	: Sabit güç
CPU	: Merkezi işlem birimi
CR	: Sabit direnç
CV	: Sabit gerilim
ÇSDVM	: Çok sınıflı destek vektör makinesi
DC	: Doğru akım
DVM	: Destek vektör makinesi
g	: Gram
GPIO	: Genel maksat giriş çıkış
GWh	: Gigawatt saat
HEA	: Hibrit elektrikli araç
HO	: Hibritleşme oranı
HV	: Yüksek gerilim
Hz	: Hertz
I²C	: Inter-integrated circuit
IEEE	: The institute of electrical and electronics engineers
İYM	: İçten yanmalı motor

KB	: Kilobayt
Kg	: Kilogram
LFP	: Lityum demir fosfat
LiS	: Lityum sülfür
LTO	: Lityum titanyum oksit
mAh	: Mili amper saat
n	: Veri sayısı
NCA	: Lityum nikel kobalt alüminyum oksit
NiCd	: Nikel kadmiyum
NiMH	: Nikel-metal hidrit
OCV	: Açık devre voltajı
OPEC	: Organization of petroleum exporting countries
PCB	: Baskılı devre kartı
PKB	: Pil kimyasını belirleme
PSO	: Parçacık sürüsü optimizasyonu
RUL	: Remaining useful life
SoC	: State of charge (Şarj durumu)
SoE	: State of energy
SoH	: State of health
SPI	: Serial peripheral interface
ŞHEA	: Şarjlı hibrit elektrikli araç
TEA	: Tam elektrikli araç
TÜİK	: Türkiye istatistik kurumu
UPS	: Kesintisiz güç kaynağı
USB	: Evrensel seri haberleşme (Universal serial bus)
V	: Volt
VRLA	: Valve-regulated lead acid

YHEA	: Yakıt hücreli elektrikli araç
YSA	: Yapay sinir ağı
yy.	: Yüzyıl
η_e	: Coulomb verimliliği
C_{nom}	: Bataryanın nominal kapasitesi
C_{end}	: Bataryanın sistem gereksinimlerini karşılayamadığı kapasite
E_{nom}	: Bataryanın nominal enerjisi
β	: Batarya ömrü sonunda ulaşılacak şarj/deşarj döngü sayısı
α	: Mevcut şarj/deşarj döngü sayısı
μ_i	: Ortalama değer
σ_i	: Varyans
N_w	: Toplam ağırlık sayısı
N_i	: Giriş katmanı nöron sayısı
N_H	: Gizli katman nöron sayısı
N_o	: Çıkış katmanı nöron sayısı
ε	: Öteleme katsayısı
η	: Ölçek büyütme faktörü
ρ	: Önem faktörü
β	: Ölçek küçültme faktörü
n_{max}	: Maksimum çerçeve uzunluğu

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN AKILLI BATARYA YÖNETİM SİSTEMİNİN TASARIMI VE UYGULAMASI

İSMAİL CAN DİKMEN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

128+XII sayfa

2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Teoman KARADAĞ

Doktora tez çalışmasında, farklı kimyalara sahip bataryaların üstün özelliklerinin bir arada kullanılarak, elektrikli araçlar için batarya kimyasını tanıyıp, uygun yönetim parametrelerini otomatik olarak uygulayabilen akıllı bir batarya yönetim sisteminin özgün donanım ve yazılım tasarımı, geliştirilmesi ayrıca prototip üretimleri yapılmıştır. Literatürde elektrikli araçlarda kullanılan pillerin kimyaları incelendiğinde; bunların nikel kadmiyum (NiCd), nikel-metal hidrit (NiMH), lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA), lityum demir fosfat (LFP), lityum titanyum oksit (LTO) ve lityum sülfür (LiS) olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle pil kimyasını belirleme algoritması, üretilen elektronik devre kartlarının donanım parametreleri ve yazılımlar bu pil kimyaları temel alınarak geliştirilmiştir. Batarya kimyasının elektronik olarak belirlenebilmesi için, istatistiksel analiz temelli bir yaklaşım izlenerek geliştirilen algoritma sayesinde, beş farklı batarya kimyasının birkaç saniye içerisinde %100 doğrulukla belirlenmesi sağlanmıştır. Bataryanın kimyasını tespit edebilen donanım ve yazılım aynı zamanda uygun yönetim parametrelerini otomatik olarak ayarlayabilmekte; bu sayede çoklu kimyalı batarya yönetimini desteklemektedir. Farklı batarya kimyalarının üstün özelliklerinin bir arada kullanımına olanak veren bir yapıya sahip olmasının yanı sıra, bu özelliklerden en uygun anda faydalanabilmek için tasarlanan bir anahtarlama mekanizmasının etkinliği de yapılan simülasyon çalışması ile ortaya koyulmuştur. Tüm bu özellikler, geliştirilen özgün yazılımı ve donanımı sayesinde kullanıcı dostu dokunmatik bir ekran üzerinden kontrol edilebilmektedir. Çalışma üç aşamada icra edilmiştir. Birinci aşama TÜBİTAK 1512 programı çerçevesinde desteklenmiş, donanım ve yazılımın birinci sürümleri geliştirilmiştir. İkinci aşamada İnönü Üniversitesi BAP Birimi tarafından Öncelikli Alan projesi kapsamında desteklenmiş, donanım ve yazılımın ikinci sürümleri geliştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise yine BAP Doktora Tez projesi kapsamında desteklenmiş, donanım ve yazılımın üçüncü ve son sürümleri geliştirilmiştir. Geliştirilen batarya yönetim sistemi, literatürde yer alan diğer batarya yönetim sistemleri ile fonksiyon temelli olarak karşılaştırmalı sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, Batarya yönetim sistemi, Makine öğrenmesi, Pil kimyasını belirleme, Çoklu kimyalı batarya yönetim sistemi, İkinci hayat uygulamaları, Pil geri dönüşümü.

ABSTRACT

PhD. Thesis

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN INTELLIGENT BATTERY MANAGEMENT SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES

İSMAIL CAN DİKMEN

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Electrical Electronics Engineering

128+XII pages

2022

Supervisor: Asst. Prof. Teoman KARADAĞ

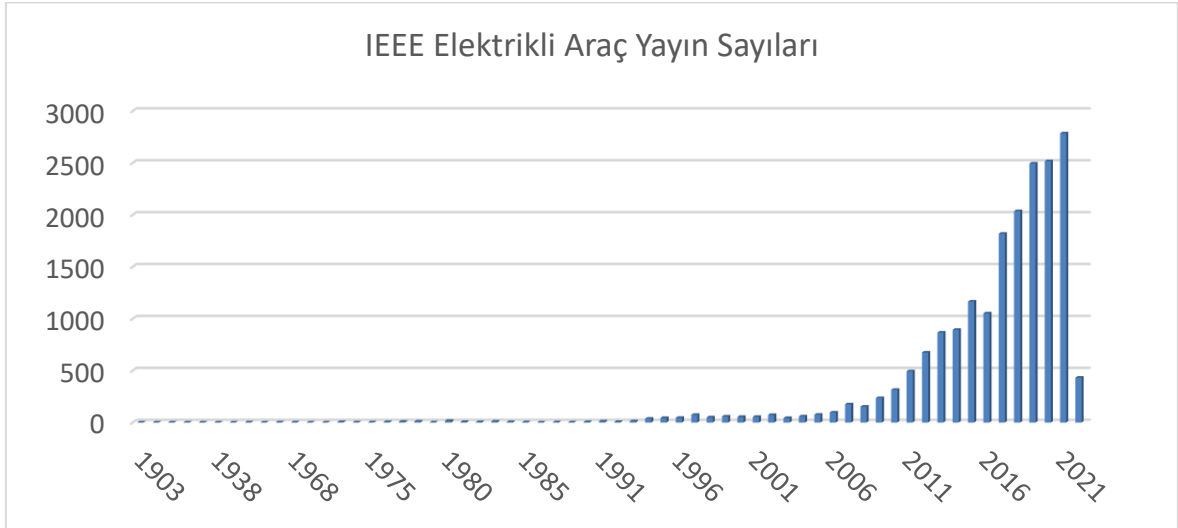
In this thesis, unique hardware/software design, development, and prototyping of a new generation intelligent battery management system for electric vehicles were carried out. The system can determine the battery chemistry and automatically apply the appropriate management parameters aiming to take advantage of the superior properties of different batteries chemistries in conjunction. When the battery chemistries used in electric vehicles is examined in the literature; these were determined to be NiCd, NiMH, NCA, LFP, LTO and LiS. Therefore, battery chemical composition determination algorithm, software and hardware parameters of prototype electronic circuit boards have been determined based on these battery chemistries. Thanks to the algorithm developed by following a statistical analysis-based approach to determine the battery chemical composition, five different battery chemistries have been identified with 100% accuracy within a few seconds. The hardware and software, which can determine the chemical composition of the battery, can also automatically adjust the appropriate management parameters; in this way, it supports multi-chemistry battery management. In addition to allowing the use of superior features of different battery chemistries together, the effectiveness of a switching mechanism designed to benefit from these features at the most appropriate time has also been demonstrated by the simulation study. All these features can be controlled via a user-friendly touch screen, thanks to the original software and hardware developed. The dissertation study was carried out in three stages. The first phase was supported within the framework of the TÜBİTAK 1512 program. In the second stage, it was supported by the BAP Unit of İnönü University within the scope of the Priority Area project. In the third stage, it was supported within the scope of the BAP Doctoral Thesis project and at each stage, the first, second and third versions of the hardware and software were developed, respectively. The developed battery management system is presented in comparison with other battery management systems in the literature based on its functions.

Keywords: Electric vehicles, Battery management system, Machine learning, Battery chemical composition determination, Multi-chemistry battery management system, Second life applications, Battery recycling.

1. GİRİŞ

Elektrikli araçlar ile ilgili çalışmaların başlangıcı 1800'lü yıllara kadar uzanmaktadır. O günden bu güne kadar da insanların ilgisini çeken bir teknoloji olmaya devam etmektedir. Günümüzde de oldukça popüler olan elektrikli araçlar konusunda çok sayıda akademik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara bakıldığında 1990 yılından önce akademik anlamda kayda değer pek fazla çalışma olmadığı görülmektedir. Örnek olarak, IEEE veri tabanında 1990 öncesinde yayınlanmış sadece 55 bildiri, 32 makale ve 7 dergi makalesi yer almaktadır. 1990-2022 yılları arasında ise 23701 akademik yayın yapılmıştır. Sadece akademik yayınlardaki bu sayı artışı bile bu teknolojinin hayatımıza nasıl hızlı girdiğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

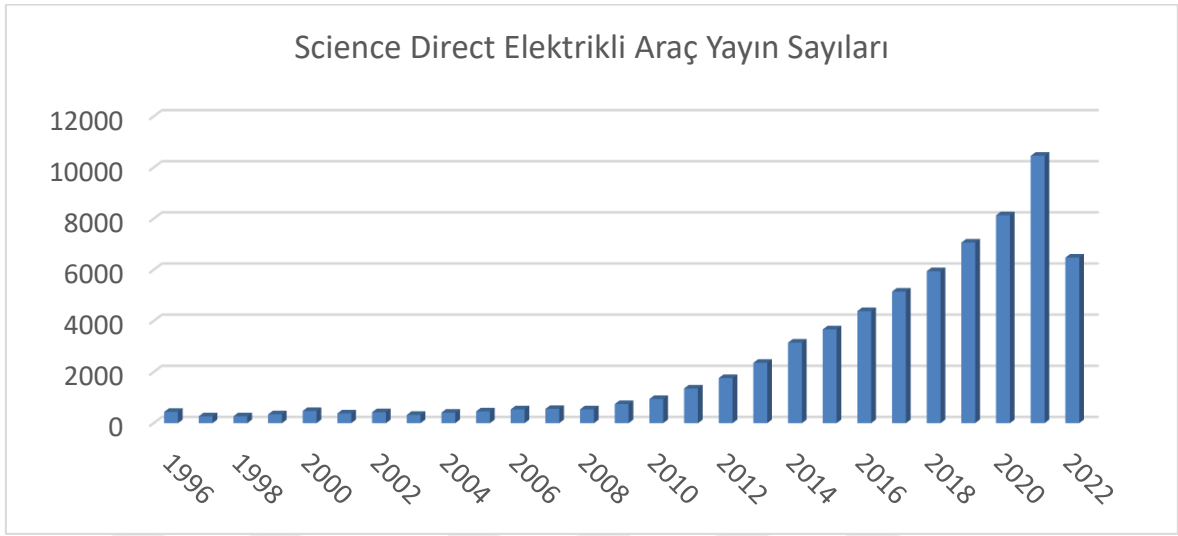
Bu yayınların yıllara göre dağılımı Şekil 1.1'de sunulmuştur. Bu teknoloji her ne kadar çok sayıda bileşenden meydana gelmekteyse de en önemli teknik problemler enerji depolama birimi olan bataryalar konusundadır. Bu nedenle, doğrudan elektrikli araçların enerji depolama sistemi, yönetimi ve optimizasyonu üzerinde yapılan yayınlar elektrikli araçlar konusunda yapılan yayınların %86,5'lik kısmını oluşturmaktadır.



Şekil 1.1: IEEE veri tabanında yer alan yayın sayıları.

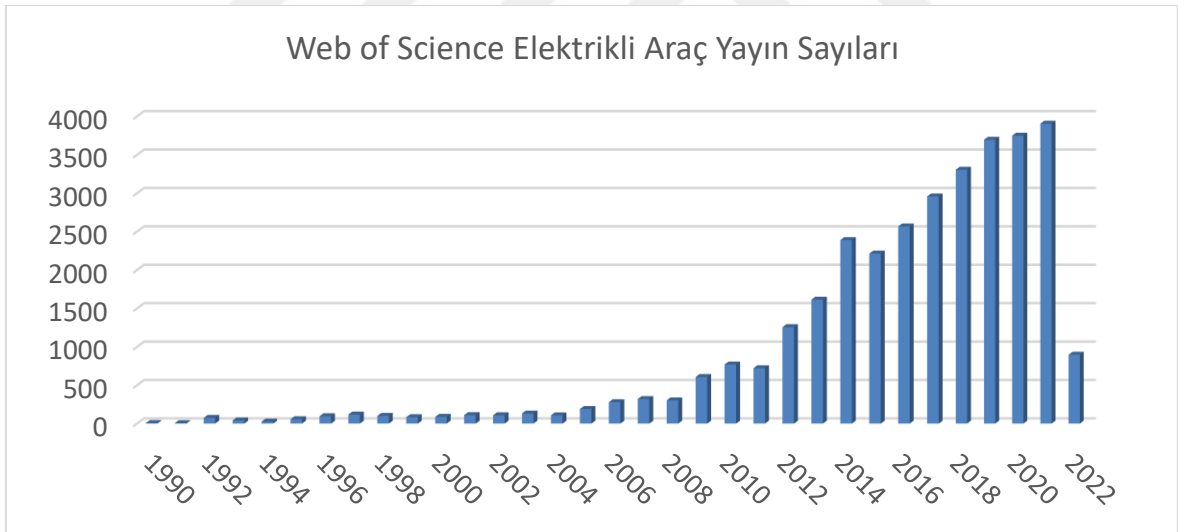
Science Direct veri tabanında yer alan “Elektrikli Araçlar” ile ilgili 68754 yayının %15,1'i SoC (Şarj durumu - ŞD) Hesaplanması / SoC Kestirimi hakkında ve %2,8'i doğrudan BYS hakkında iken %73,1 gibi ezici bir çoğunluğu bataryaların Performansı / Termal Yönetimi /

Modellenmesi / Lityum teknolojisi hakkındadır. Bu çalışmaların yıllara göre dağılımı Şekil 1.2’de sunulmuştur.



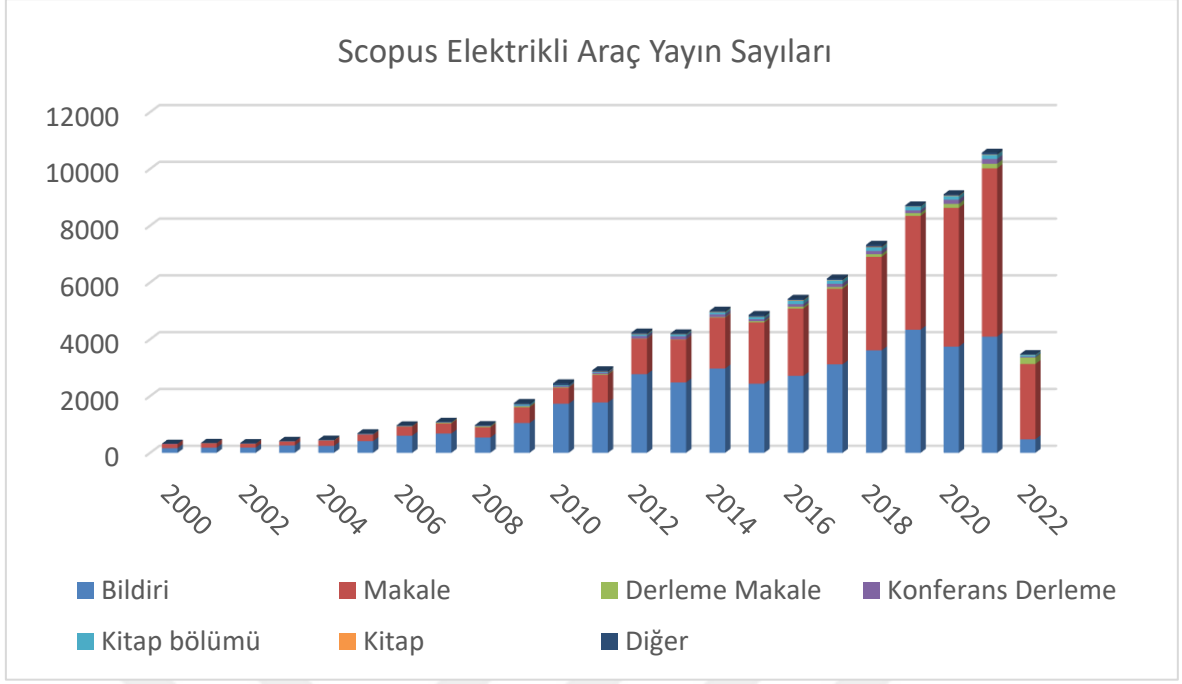
Şekil 1.2: Science Direct veri tabanında yer alan yayın sayıları.

Web of Science veri tabanında da 2009 yılından itibaren elektrikli araçlar konusunda yapılan yayınlarda ciddi bir artış gözlenmektedir. İlgili yayın sayıları Şekil 1.3’de sunulmuştur.



Şekil 1.3: Web of Science veri tabanında yer alan yayın sayıları.

En fazla yayın sayısı 86499 ile Scopus veri tabanında yer almaktadır. En geniş veri tabanı olması münasebetiyle, genel bir fikir vermesi bakımından bu yayınların sayılarıyla birlikte bildiri, makale, derleme makale, konferans derleme, kitap bölümü ve kitap olarak kategorileri Şekil 1.4’de detaylı olarak sunulmuştur. Yayın kategorilerinin dağılımı diğer veri tabanlarında da hemen hemen aynıdır.



Şekil 1.4: Scopus veri tabanında yer alan yayın sayıları.

Elektrikli araçlar konusunda tüm bu veri tabanları incelendiğinde, 1990’dan başlayan fakat özellikle 2000 yılı sonrasında eksponansiyel olarak artan bir akademik ilgi açıkça görülmektedir.

1.1 Türkiye Perspektifinden Elektrikli Araçlar

Ülkemizin elektrikli tahrikli ilk araçla tanışması 19 yy. sonuna rast gelmektedir. İngiliz mühendis Magnus Volk elektrik tahrikli araçlar üzerinde çalışmalar yapmaktaydı.1887 yılında Immisch & Co. Şirketine katılarak burada Osmanlı padişahı için bir elektrikli araç yapmıştır (Volk, 1971). Bu araç 34. Osmanlı Padişahı II. Abdülhamid için özel olarak yapılmıştır ve döneminde saygın mühendislik dergilerinde yer bulmuştur.

Şekil 1.5’de 1888 yılında The Engineer dergisinde yer alan makale, Şekil 1.6’da ise 1895 yılında AutoCar dergisinde yer alan makale gösterilmektedir. Araç saatte 10 mil sürat ile 50 mil menzile sahiptir. 20 Ah, 48 V, 24 hücreden oluşan yaklaşık 350 kg ağırlığında bir bataryaya ve 1 beygir gücünde elektrik motoruna sahiptir (“An Electric Dog-Cart,” 1888)(“British Autocars for the Sultan of Turkey,” 1895).

Elektrikli araçların geliştirilmesi sürecinde önce dünya savaşları ardından da fosil yakıtlı motor teknolojisindeki gelişmeler neticesinde Türkiye’de ve dünyada elektrikli araçlar uzun bir duraksama dönemine girmişti.

1973 yılında OPEC (Organization of Petroleum Exporting Countries - Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü) tarafından uygulamaya koyulan ambargo sebebiyle dünya çapında bir petrol krizi yaşamıştır. Bu kriz ile birlikte özellikle gelişmiş ülkelerde alternatif yakıtlı araç teknolojileri yeniden popülerlik kazanmış ve bu konuya yatırım yapan, araştırma geliştirme faaliyetlerine destek veren devlet ve kurumlar sayıca artmıştır.

Bu atılımın meyveleri kısa sürede toplanmaya başlamıştır. Fakat o dönemdeki teknoloji ile hızı saatte 75 km'yi geçemeyen ve 45 km gibi menzile sahip araçlar geliştirilebilmiş ve prototipler üretilmiştir. Geliştirilen bu elektrikli araç teknolojisinin içten yanmalı motor teknolojisi karşısında rekabet gücü oldukça sınırlı olmuştur. Petrol krizi bitimiyle birlikte bu atılım da zaman içerisinde sönümlenmiştir.

Bu noktada elektrikli araç teknolojisine göre çok daha köklü bir geçmişi olduğu ve tarihi süreç içerisinde, özellikle 1900'lerin başında, tercih elektrikli araçlardan yana kullanılmış olsaydı; bugün çok daha az çevresel problem ile karşı karşıya kalacağımız rahatlıkla söylenebilir.

1996 yılında ilk seri üretim tam elektrikli araç olan General Motors EV1 aracı, hemen ardından 1997 yılında ilk seri üretim hibrit elektrikli araç olan Toyota Prius piyasaya sürülmüştür. General Motors'un EV1'i piyasadan ani çekilişiyle EV1 Türkiye'de pazar bulamadan sonlandırıldı.

Prius ise 2004 yılında Türkiye pazarına çıktı. Her ne kadar 2003 yılında kurulan TESLA firmasının, 2008 yılında ürettiği Roadster tam elektrikli aracı tam elektrikli araçlara olan bakış açısını değiştirmiş ve tüm dünyayı etkilemiş olsa da Türkiye'de resmi olarak satışa çıkmamıştır.

Türkiye'de elektrikli araçlara yönelik ilgi cep telefonu, bilgisayar gibi yeni teknolojilerde olduğu gibi gecikmeli olarak artmaktadır. Buna devletin elektrikli araçlara teşvik uygulamaması ve şarj istasyonu sayısının yetersizliği de eklenince ülkemizde elektrikli araçların satışı oldukça sınırlı kalmıştır.

2022 yılı Nisan ayı itibarıyla Türkiye'de yollarda bulunan tam elektrikli ve hibrit elektrikli araçların marka ve modelleri Çizelge 1.1'de; Trafiğe kayıtlı araçların yakıt türlerine göre dağılımlarını gösteren TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) verileri Çizelge 1.1:'de sunulmuştur.

ELECTRIC DOG CART.

MESSRS. IMMISCH AND CO., LONDON ENGINEERS.



AN ELECTRIC DOG-CART.

TRIAL was made on Wednesday at the skating rink, St. Paul's-road, Camden Town, of an electric dog-cart, built by Messrs. Immisch and Co. In appearance the vehicle does not differ from an ordinary four-wheeled dog-cart with the shafts removed, and in this respect the design is perhaps open to criticism, as something might have been done to take off the uncompromising squareness presented by the splash-board, and so give the appearance of a carriage specially adapted for the new mode of propulsion. The motor, which is placed in the centre of the body of the vehicle, is of Messrs. Immisch and Co.'s 1-horse power type, a current of 20 amperes with an electromotive force of 48 volts being used. Motion is communicated to one of the hind wheels by means of a small pinion on the main shaft of the motor working into a pitch chain, which passes over a series of L-shaped plates attached at intervals to the inner face of the rim of the wheel, so as to constitute in effect a driving pulley for the pitched chain to act upon. It was stated that the motor could be reversed so as to back the vehicle. The power is stored in twenty-four small accumulators of special type, occupying the space under the seats, and said to be sufficient to propel the vehicle at a speed of about ten miles per hour for five hours; but at the trial nothing more than a few runs round the rink was attempted, sufficient to afford the visitors present the opportunity of having a ride, and no great speed could be attained, on account of the confined space and the consequent necessity for frequent sharp turns. The steering is effected by a shaft projecting through the footboard, and furnished with a hand-wheel. On the lower end of the shaft is a pinion, which takes into a ring of teeth on the fore carriage. The brake is actuated by a lever, placed in a convenient position for the driver's foot, and the switch for turning on the power is attached to the splash-board. The total weight of the vehicle, all complete, is about 11 cwt., the accumulators weighing about 7 cwt. The carriage appeared to run very smoothly, and to be under perfect control, although the operation of lacing was not shown during the time of our visit.

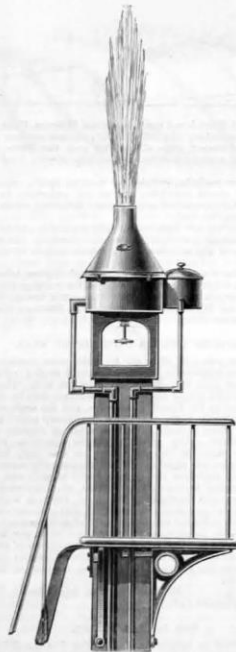
THE JUPITER LIGHT.

The accompanying engraving illustrates a new "industrial" light now being introduced by the Harlan, Star, Lewis, and Sinclair Company, Cannon-street. It is intended to answer the same purpose as the well-known Lucigen.

The principal feature of the Jupiter lamp is the mode of vaporising the oil and preventing its escape in the form of spray, at the same time producing complete combustion, and giving a powerful and brilliant light. The lamp is lighted and controlled in the following manner:—A small quantity of spirit is poured on the surface of the heavy oil contained in the well of the lamp. This well is connected with the tank or reservoir of oil, which gives an uninterrupted supply; a light is then applied and the radiating covers put on. The compressed air is then turned on, which, passing by means of a small jet through the centre of the flame and over the surface of the oil in the well, assumes a high temperature, and also produces an induced current, which raises the gas of the heated oil, and at the same time draws in the necessary supply of air to complete perfect combustion and produce a brilliant light.

It is claimed that this invention completely overcomes the defects of other systems, for the reason that as there is com-

plete combustion, no oil can possibly pass away in the form of spray, which in practice has been found to be a very serious matter, as oil spray has in a gale of wind been known to be carried many hundreds of yards, and damaging all property that came within its reach.



THE JUPITER LIGHT.

The power required to work the Jupiter consists of a compressor and receiver, 2-H.P. being sufficient to provide compressed air for lights equal to 10,000 candle power. The oil used for giving this brilliant light consists of common creosote

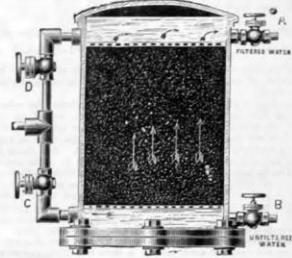
oil, crude petroleum, or any other heavy hydrocarbons, which can be purchased at a very low price.

The photometric power of the Jupiter varies as required from 100 candle power to 2500 candle power. The consumption of oil ranges from half to two gallons per hour.

THE MANUFACTURERS' FILTER.

To meet the requirements of many manufacturers who require large quantities of filtered water, Messrs. Slack and Brownlow Manchester, have numerous experiments on a large scale, extending over a long time, and have adopted the form of filter shown by the annexed engraving, for purifying dirty river and canal water for bleachers, dyers, cotton spinners, and in manufactories where a plentiful supply of pure water for steam boilers and works is of the greatest importance. The construction of this filter is simple, and the carbon may be cleaned periodically by employing the reverse action with which each filter is fitted. The outer case is made of cast iron lined with vitrified enamel, so that the water can receive no contamination from any crude metallic surface; the carbon is contained between two perforated plates similarly protected by enamel, and the whole bolted together, as shown.

Unfiltered water enters from the main at C, and ascending through the carbon into the filtered water chamber, is drawn off filtered from the tap A. When unfiltered water is required for special purposes it can be drawn from the tap B, thus saving the filter, as far as possible, from unnecessary use. The tap D is used only for cleansing. By closing taps C and A, and opening



taps D and B, the action of the filter is reversed; thus, to a large extent, flushing impurities collected on the under surface of the carbon. The carbon used in these filters is granulated and compressed, and is graduated as to grade so that the finest layers of the carbon are towards the centre. In this way the carbon acts most efficiently whether the water passes upwards or downwards. The coarser outer layers act mechanically, as well as to some extent chemically, and remove the greater part of the impurities from the water, leaving the fine carbon clean for a long time to do only the final filtration. The holes in the perforated plates at the top and the bottom are not made nearer to the outside than from 1 in. to 2 1/2 in., according to the size of the filter; and Messrs. Slack and Brownlow's very extensive experience has proved that this arrangement of carbon in the filter acts with complete success. The engraving shows the construction of the smaller and medium sizes, but the very large filters are made up much on the same system.

FOUNDRY PLANT FOR NEW SOUTH WALES.

WITH the engravings on pages 219 and 222 we commence the publication of engravings of a set of foundry plant, designed for the naval station of the New South Wales Government by Sir John Fowler, K.C.M.G., M. Inst. C.E., and Mr. J. V. Baldry, M. Inst. C.E., and constructed by Messrs. Thwaites Brothers, Bradford. The engravings of the cupolas on page 219 will be supplemented by others, which will be accompanied by particulars of all. These engravings will constitute the most complete examples of the best modern foundry plant ever published. Fig. 1 shows the arrangement of three Stewart's "Raspal" cupolas, size 1, 10, and 5. Fig. 2 is a wrought iron hand jib crane up to five tons. Fig. 3 is the crab in the hoisting stage. Fig. 4 is a 12-horse engine for driving the loam mill. Fig. 5 is the blowing machinery, and Fig. 6 is a loam carriage.

CENTRAL INSTITUTION FOR TECHNICAL EDUCATION.—The Session of the Central Institution of the City and Guilds of London Institute will commence on October 2nd. The Clothworkers, Skinners, Mitchell, and Institute's Scholarship will be completed for at an examination held on September 25th to 28th. The courses of instruction include lectures on mathematics, engineering, chemistry, and physics, and laboratory and workshop practice.

A REMARKABLE ENGINE DRIVER.—Mr. Edward McKew, sen., engine driver, who has been superannuated by the London, Brighton, and South Coast Railway Company, and just presented with a testimonial by his fellow-workmen on that line, gives the following account of his railway career, which has been of remarkable length, and interspersed with some historical incidents. He states that he was born in February, 1827, and started railway work in November, 1840, as a cleaner upon the Eastern Counties Railway, being then thirteen years of age. At the age of nineteen he was promoted to the post of fireman. He was fireman to the engine which took the train having on it the papers containing the account of the repeal of the Corn Laws in 1846, from Bishopsgate Station to Ely. The engine was No. 35; it was one of Stephenson's; and the distance was seventy-two miles. They stopped four times, once to take in coke, and completed the journey in 1 hour 25 min. In 1849 he was promoted to be driver, and remained upon the Eastern Counties Railway until the great strike in 1850. He was out of work for eight months before he obtained employment on the London, Brighton, and South Coast line as fireman, which position he held until June, 1856, when he was again promoted to the position of driver. He was driver of the first engine which ran over Grosvenor Bridge, and also of the first booked train which started from Victoria Station. He had opened the direct line from Balham to East Croydon, and also was driver of the first train from Addison-road to Clapham Junction. He considered he was one of the oldest engine drivers in the kingdom. He was superannuated by the Brighton Company in February of the present year, and although he was only sixty-one years of age last February, he had had upwards of forty-seven years' railway work.

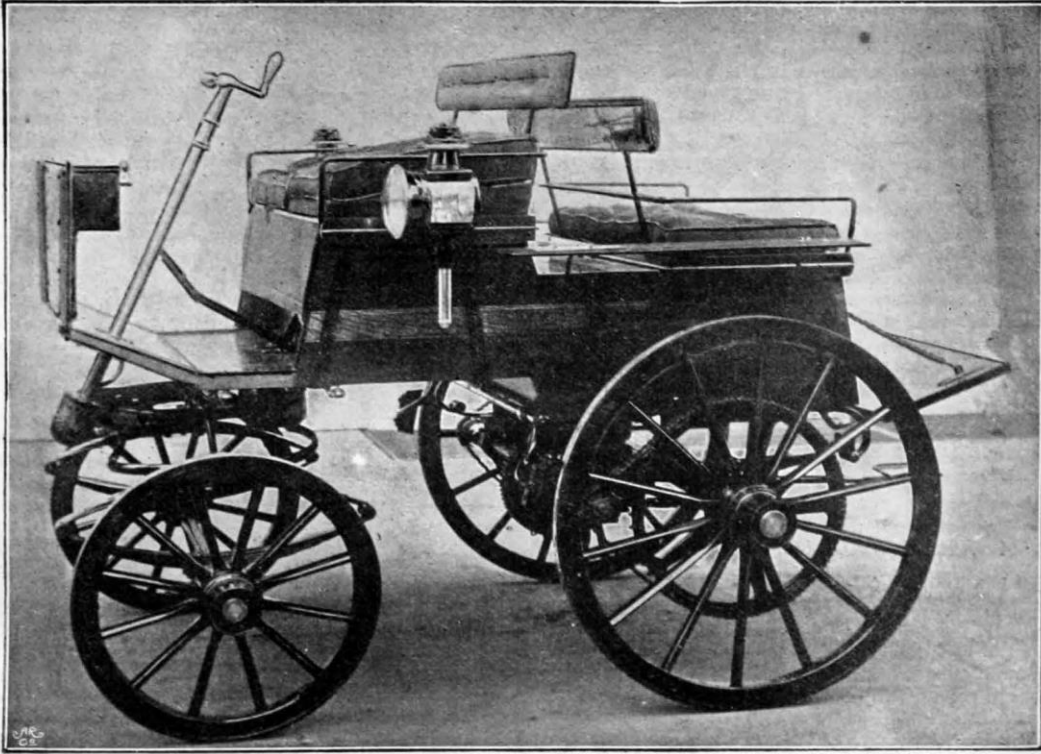
Şekil 1.5: 1888 yılında The Engineer dergisinde yayımlanan ve Padişah II. Abdülhamid için üretilen elektrikli aracı anlatan makale.

BRITISH AUTOCARS FOR THE SULTAN OF TURKEY.

Although prohibited by the absurdity of the existing enactment from doing a trade in our own country, it is pleasing to note that the inventive ingenuity of British engineers has met with an appreciative response abroad, and, stranger than all this, that this appreciative response should come from a potentate who at the present moment all England is reviling. A short time since the Acme and Immisch Electric Works, Ltd., of Ferdinand Street, Chalk Farm, who, as many of our readers are doubtless aware, are large manufacturing electrical engineers and contractors, produced a practical electric motor for autocar propulsion, and supplied

A strong cast iron light frame is suspended from the under side of the cart to which the motor is bolted, and the motor shaft fitted with a raw hide or fibre pinion, gearing into a cast iron spur wheel, running on the counter-shaft, in phosphor bronze lined bearings on the frame. The counter-shaft is divided with a gear wheel on the outside end of each, these gear wheels in their turn driving the carriage by means of a chain on each side, running on to the gear wheels upon the axle. The two counter-shafts run in the same straight line, and are connected by differential gearing, enabling the wheels to accommodate themselves to the varying bends and curvature of the road.

On the four-wheeled carriage the same arrange-



ELECTRIC CARRIAGE (ACME & IMMISCH ELECTRIC WORKS, LTD.)

carriages fitted with this power to H.I.M. the Sultan of Turkey, as well as the Maharajah of Mysore and other Eastern potentates. The two illustrations which we give in the present issue are taken from photographs of the carriages supplied to the Sultan. The dogcart was built by a leading firm of coachbuilders to the specific order of his Imperial Majesty, whilst the axle and rear wheels were specially constructed by the Acme & Immisch Co. for driving from the motor by means of spur and chain gearing. The battery in this carriage is placed beneath the seat, and is entirely hidden from view, the motor being of the Immisch type, generally used on the firm's well-known electric launches, and capable of developing up to two h.p.

ment is adopted, but a special steering gear is used, consisting of a rack fitted radially to the fore carriage, and actuated by a worm wheel and spindle, with a handle at the top, thus placing it under the firm and easy control of the driver. A special starting and reversing switch is fitted, and the total weight of the dogcart, motor, gearing, accumulators, etc., complete, is about one ton, the battery alone weighing some 10½ cwt. This, doubtless, is where improvement is necessary if electric autocars are to come within the range of practical commerce. The speed obtained on the level averages five to six miles per hour, and one charge of the accumulators lasts from three to four hours.

Şekil 1.6: 1895 yılında Autocar dergisinde yayınlanan ve Padişah II. Abdülhamid için üretilen elektrikli aracı anlatan makale.

Çizelge 1.1: Türkiye'de satılan tam elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar.

Türkiye’de Satılan Tam Elektrikli Araçlar	Türkiye’de Satılan Hibrit Araçlar
Elektrikli Smart EQ Smart ForTwo	Toyota Corolla Hibrit
Elektrikli Smart EQ Smart ForFour	Toyota C-HR Hibrit
Jaguar i-Pace	Toyota RAV4 Hibrit
Mini Cooper SE	Land Rover RR Plug-in Hibrit
Renault Twizy	Toyota Yaris Hibrit
Renault Zoe	Lexus ES Hibrit
Porsche Taycan	Volvo XC90 T8 Plug-in Hibrit
BMW i3 – BMW i3s	Mercedes-Benz GLC350e Plug-in Hibrit
BMW iX3	Lexus RX Hibrit
BMW iX xDrive40	BMW i8 Plug-in Hibrit
XEV IEV7S	Lexus LC Hibrit
Mercedes Benz EQA, EQC, EQS	
DFSK Seres 3	
Hyundai KONA	
VW ID3	
Fiat 500e	
MG ZS EV	
Skywell ETS Pre plus	
Volvo XC40 Recharge	
Honda e	
Audi eTron GT Quattro	

Çizelge 1.2: Türkiye'de trafiğe kayıtlı araçların yakıt türlerine göre sayıları.

Yıl	Toplam	Benzin	%	Dizel	%	LPG	%	Elektrikli/ Hibrit⁽²⁾	%	Bilinmeyen⁽³⁾	%
2004	5 400 440	4 062 486	75,2	252 629	4,7	793 081	14,7	-	-	292 244	5,4
2005	5 772 745	3 883 101	67,3	394 617	6,8	1 259 327	21,8	-	-	235 700	4,1
2006	6 140 992	3 838 598	62,5	583 794	9,5	1 522 790	24,8	-	-	195 810	3,2
2007	6 472 156	3 714 973	57,4	763 946	11,8	1 826 126	28,2	-	-	167 111	2,6
2008	6 796 629	3 531 763	52,0	947 727	13,9	2 214 661	32,6	-	-	102 478	1,5
2009	7 093 964	3 373 875	47,6	1 111 822	15,7	2 525 449	35,6	-	-	82 818	1,2
2010	7 544 871	3 191 964	42,3	1 381 631	18,3	2 900 034	38,4	-	-	71 242	0,9
2011	8 113 111	3 036 129	37,4	1 756 034	21,6	3 259 288	40,2	47	0,0	61 613	0,8
2012	8 648 875	2 929 216	33,9	2 101 206	24,3	3 569 143	41,3	228	0,0	49 082	0,6
2013	9 283 923	2 888 610	31,1	2 497 209	26,9	3 852 336	41,5	436	0,0	45 332	0,5
2014	9 857 915	2 855 078	29,0	2 882 885	29,2	4 076 730	41,4	525	0,0	42 697	0,4
2015	10 589 337	2 927 720	27,6	3 345 951	31,6	4 272 044	40,3	889	0,0	42 733	0,4
2016	11 317 998	3 031 744	26,8	3 803 772	33,6	4 439 631	39,2	1 160	0,0	41 691	0,4
2017	12 035 978	3 120 407	25,9	4 256 305	35,4	4 616 842	38,4	1 685	0,0	40 739	0,3
2018	12 398 190	3 089 626	24,9	4 568 665	36,8	4 695 717	37,9	5 367	0,0	38 815	0,3
2019	12 503 049	3 020 017	24,2	4 769 714	38,1	4 661 707	37,3	15 053	0,1	36 558	0,3
2020	13 099 041	3 201 894	24,4	5 014 356	38,3	4 810 018	36,7	36 487	0,3	36 286	0,3
2021	13 706 065	3 495 172	25,5	5 158 803	37,6	4 923 275	35,9	92 949	0,7	35 866	0,3

(1) TÜİK, Motorlu Kara Taşıtları, Aralık 2021.

(2) Elektrikli, benzin-elektrik ve dizel-elektrik otomobilleri kapsamaktadır.

(3) Yakıt türü bilinmeyenler, ruhsat işlemlerinde yakıt türü boş bırakılan veya sehven hatalı veri girişi yapılan otomobilleri kapsamaktadır.

1.2 Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi

İnsanoğlu zaman içinde belirginleşen ve temel bir ihtiyaç haline gelen ulaşım ihtiyacı için çeşitli yöntem ve teknolojiler geliştirmiştir. Hayvanları evcilleştirerek başlayan yolculuk, günümüzde uzayın kapılarını aralamaya kadar varmıştır. Ulaşım için kullanılan, kendi kendine hareket etme kabiliyetine sahip ilk araçlar buharlı araçlardır.

Tarihte kendinden tahrikli ilk aracın 1769'da Fransız mühendis ve tamirci Nicolas Joseph Cugnot tarafından icat edilen bir askeri traktör olduğu kabul edilmektedir (Manwaring, 1966). Bu araçlar kömür veya odun yakılarak ısıtılan su kazanından elde edilen buharın mekanik aparatlar marifetiyle araç tekerleklerinin döndürülmesi esasına dayanmaktaydı. Temel olarak ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülmekteydi.

Elektrikli araçların gerçekleştirilebilmesi için önemli bir parametre de elektrik enerjisinin depolanmasıdır. Yani elektrikli bir araç yapabilmek için temel olarak elektrik enerjisini depolamak ve depolanan bu elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirmek gerekmektedir.

Buharlı motorların gözde olduğu 19 yy. ortalarında gelişen elektromanyetizma teknolojisi sayesinde ilk elektrik motorları ortaya çıkmıştır. 20 yy. süresince ve günümüzde ulaşım ihtiyacımız çok büyük oranda içten yanmalı motor teknolojisine dayanmaktadır. İçten yanmalı motorların birincil enerji kaynağı olarak buharın yerini almasına rağmen, elektrikle çalışan araçlar benzin veya dizel yakıt ile çalışan araçlardan çok daha önce üretilmiştir (Morimoto, 2009).

Elektrikli araçlar üzerine de pek çok çalışma yapılmış olmasına rağmen 19 yy. içerisinde yeni petrol kaynaklarının bulunması ve petrol fiyatlarının ucuzlaması temel sebep olmak üzere muhtelif nedenlerle elektrikli araçlar 20 yy. başlarında popüleritelerini kaybetmişlerdir. Uzun menzilleri ve kolay tekrar dolumu sayesinde içten yanmalı motorlarla donatılmış araçlar elektrikli araçlara göre daha büyük ilgi görmüştür ve talep yaratmıştır.

19 yy. 'da teknik gelişmeler konusunda elektrikli araçlar benzinli araçlara göre oldukça ilerideydi. "La Jamais Contente" isimli araç 1899 yılında "Compagnie Internationale des transports automobiles électriques" firması tarafından üretilmiştir ve dakikada 1 mil rekorunu kırmıştır. Aynı zamanda 106 km/saat sürate erişerek dünyada 100 km/saat limitini geçen ilk kara aracı olmuştur (Larminie & Lowry, 2003).

Elektrikli araçlar her ne kadar 100 yıl boyunca teknik anlamda görece geri kalmış ve ilgi görmemiş olsa da kara hız rekorlarını kırmaya 2004 yılından itibaren devam etmişlerdir. Bu

kapsamda Ohio State Üniversitesi öğrencileri tarafından geliştirilen ve 19 Eylül 2016 tarihinde 549.43 km/saat ile rekor kıran “Buckeye Bullet 3” aracı sayılabilir.

2010 yılında Venturi firmasının geliştirdiği “Venturi Jamais Contente” aracı 1 km’lik pist üzerinde her iki yönde de ortalama 495 km/saat sürata ulaşarak bir başka rekor kırmıştır. Bu gibi gelişmeler teknik anlamda elektrikli araçların ulaştığı noktayı göstermesinin yanında bu araçlara olan ilginin de artmasına yol açmaktadır.

Dünyanın ilk seri üretim otomobili olan Ford Model T (1908-1927), nispeten kısa bir süre içinde piyasaya sürülmüştür. O zamanki rakiplerine göre sağlam ve ucuz olduğu için büyük ilgi görmüş ve hızla piyasaya hâkim olmuştur (Callihan, 2010).

İlk seri üretim elektrikli araba ise “General Motors” firmasının ürettiği EV1 modelidir (Johnson, 1999). 1996 – 1999 yılları arasında 1117 adet üretilmiştir. Geliştirme çalışmaları çok daha önce başlamasına rağmen içten yanmalı motorlara göre seri üretime geçişleri doksan yıl sonra olabilmektedir. Bu bağlamda elektrikli araçların zorlu bir geliştirme sürecinden geçtikleri söylenebilir.

Günümüzde elektrikli araçlar oldukça popüler bir hale gelmiştir. Her geçen gün dünya açında elektrikli araç pazarı büyümektedir. Tahminlere göre elektrikli kara, deniz ve hava araçları pazarı 2041 yılına kadar toplam 2,3 trilyon dolarlık bir büyüklüğe erişecektir (Luke Gear et al., 2019).

Elektrikli araç, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirerek bir kaynağa bağlı olmaksızın, kendinden tahrikli hareket etme kabiliyetine sahip araçlara verilen genel bir isimdir. Bu araçlar konusunda yapılan çalışmalar 19 yy. ortalarına kadar gitmektedir. İlk elektrikli araçlar basit bir yapıya sahip olup bir araç şasisine monte edilmiş doğru akım elektrik motoru ve pillerden meydana gelmekteydi.

Elektrik enerjisini depolayabilen sistemler ve elektrik motoru; elektrikli araçların geliştirilmesi amacıyla birbirini bütünleyen teknolojilerdir. Bu teknolojilerden elektrik enerjisini depolayabilen sistemlerin geliştirilmesi elektrik motorundan çok daha eski tarihlere uzanmaktadır. Bilimsel anlamda bu teknolojinin başlangıcı olarak Leyden kavanozunu gösterilebilir.

1.2.1 Elektrik enerjisi depolama sistemlerinin tarihsel gelişimi

Bilimsel anlamda elektrik enerjisi depolama sistemleri teknolojisinin başlangıcı olarak Leyden kavanozunu gösterilebilir. Takiben bu konudaki en büyük adımlardan birincisi olan

kimyasal pilleri ve ardında da ikinci en büyük adım olan şarj edilebilen piller gelmektedir. Sonraki çalışmalar bu teknolojilerin geliştirilerek daha fazla enerjinin daha küçük bir hacimde güvenli bir biçimde depolanabilmesi hususuna odaklanmaktadır.

18. yüzyılda kondansatörün atası olarak kabul edilen ve elektrik enerjisini elektrik alan formunda depolayabilen Leyden kavanozu ile başlayan vizyoner çalışmalar kimyasal pillerin icadı ile sonlanmıştır.

Leyden kavanozu, alman mucit Ewald Georg von Kleist tarafından 1745’de icat edilmiştir. Fakat eş zamanlı olarak 1746 yılında Hollandalı fizikçi Pieter van Musschenbroek tarafından tamamen tesadüfen bulunmuş bir icattır. İsmi de mucidin çalıştığı Leiden üniversitesinden almıştır (Duff et al., 1916; Dummer, 1983).

1799 yılında Alessandro Volta tarafından icat edilen ve istikrarlı olarak gerilim ve akım sağlayabilen tarihteki ilk pildir. O dönemde Volta, Padua üniversitesinde ders vermekteydi. Bir yandan da deneysel çalışmalarını yürütürken, Luigi Galvani ile düştüğü anlaşmazlık onun bu pili icat etme konusunda ilham kaynağı olmuştur.

Metal plakalar arasına salamuraya veya sirkeye batırılmış kumaş parçaları ile bir düzenek inşa edilmiştir. Pek çok maden ile yaptığı deneyler sırasında bakır ve çinko plakalar ile yaptığı deneyde başarılı olmuştur. Aslında bulduğu şey günümüz pillerinin de temel çalışma prensibi olan iyonların bir elektrolit vasıtasıyla iletimiydi (Volta & Banks, 1800).

19 yüzyılda elektrik enerjisinin kimyasal olarak depolanması konusunda en önemli çalışmalar John Frederic Daniell, Gaston Planté ve Josiah Latimer Clark yapılmıştır. Bu dönemdeki en büyük teknik problem olan yeniden şarj edilebilme problemine ise Gaston Planté tarafından kalıcı bir çözüm getirilmiştir. Günümüzde halen kullanılmakta olan kurşun asit pillerin teknik temelleri bu dönemde atılmıştır.

Daniell hücresi, 1836’da İngiliz kimyager ve meteorolog John Frederic Daniell tarafından icat edilen bir tür elektrokimyasal pildir. Sülfürik asit ve çinko elektrot ile doldurulmuş sırsız bir toprak kap içine daldırılan bir bakır kaptan ve bunların arasını dolduran bakır sülfat çözeltisinden meydana gelmektedir (Costa & Porto, 2021).

John Frederic Daniell, Volta pilinin hidrojen kabarcığı sorununa bir çözüm arıyordu ve ilk elektrolitin yarattığı hidrojeni tüketmek için ikinci bir elektrolit kullanma fikrini buldu. Bu gelişme, daha önce pil araştırmalarının ilk aşamalarında kullanılmış olan teknoloji üzerinde önemli bir ilerleme sağlamaktaydı. Daniell hücresi elektrikli telgraflarda kullanımı popüler olan bir elektrokimyasal pildir (Jayson, 2014).

Daniell hücresi aynı zamanda Uluslararası Birimler Sistemi'nin elektromotor kuvvet birimi olan voltun modern tanımının yapılmasında çok önemli bir rol üstlenmiştir. 1881 Uluslararası Elektrikçiler Konferansı'nda elektrik birimlerinin tanımlanmasında, Daniell hücresinin elektromotor kuvvetinin 1.0 volt olarak kabul edilmiştir. Gelecek yıllarda Clark hücresi ile bu tanım güncellenmiştir.

Fransız fizikçi Gaston Planté tarihte üretilen ilk şarj edilebilir pili 1859 yılında duyurmuştur (Gladstone & Tribe, 1882; Henderson, 1977; Kurzweil, 2010) Planté'nin pil tasarımında kauçuk bir şeritle ayrılmış iki adet elektrot bulunmaktadır. Bunlardan ilki kurşun bir anot (negatif elektrot) ve bir kurşun dioksit katot (pozitif elektrot). Katoda oksidasyon ile anot tarafından kaybedilen elektronları iletmek için elektrolit, yani elektron taşıyıcı medya olarak sülfürik asit çözeltisi kullanılmıştır.

Bu tasarım ile yaklaşık 2V'luk bir gerilim üretebilen pil hücreleri yapmayı başarmıştır. Bu bir Daniell pilinin üretebildiği gerilimin yaklaşık iki katıydı ve hücreleri bir seri halinde birleştirerek gerilim kapasitesini daha da artırmayı başarmıştır.

Hatta Planté, 1860 yılında Fransız Bilimler Akademisi için birbirine seri bağlı dokuz hücreden oluşan bir pil paketi sunduğu bilinmektedir. Fakat günümüzün yaygın olarak kullanılan kurşun-asit akülerin toplam voltajı bilindiği gibi 12V'tur ve birbirine seri bağlanmış altı hücreden oluşmaktadır.

1873 yılında İngiliz mühendis Josiah Latimer Clark tarafından geliştirilen Clark hücresi, çok kararlı bir gerilim sağlayan kimyasal bir pil hücresidir. Uluslararası Elektrik Kongresi, 1893'te Clark hücresinin 15 °C'deki gerilim çıkışını 1,434 volt olarak tanımlamıştır ve bu spesifikasyon 1894'te Amerika Birleşik Devletleri'nde yasalaştırılarak mevzuata dâhil edilmiş; yani standart haline getirilmiştir (Glazebrook & Skinner, 1892).

İsveçli bilim insanı Waldemar Ernst Jungner tekrar şarj edilebilen Gümüş-Kadmiyum ve Nikel-Kadmiyum pilleri 1899 yılında icat etmiştir. Gümüş ve nikelin yüksek maliyetleri sebebiyle bunlara alternatif olabilecek ucuz bir çözüm olan Alkaline Nikel-Demir pilleri icat etmiştir ve bu pil için 1899 yılında patent başvurusunda bulunmuştur.

Tarihte bu tip piller Edison hücresi/pili olarak bilinirler. Ancak bu durum önce Edison bulduğu için değildir. Aslında Edison Nikel-Demir pil için 1901'de patent almıştır.

O zamana kadar Jungner aküsünü bir otomobilde test etmiş ve tek şarjla 150 km yol yapmıştır. Edison ile uzun süre patent anlaşmazlığına düşmüş fakat Edison'un sahip olduğu maddi güç nedeniyle yenilmiştir. Şirketi için bu oldukça zarar verici bir olay olmuş ve

sonunda şirketinin ismini değiştirmek zorunda kalmıştır. Günümüzde Saft AB ismi ile faaliyetlerine devam etmekte ve halen Nikel-Kadmiyum pil üretmektedir (Bard et al., 2012; Khan et al., 2019).

20. yüzyılda, 1900'lerin başından itibaren elektrik enerjisini kimyasal olarak depolama konusunda yapılan çalışmalar, paralel gelişen diğer teknolojilerle birlikte tam anlamıyla bir sıçrama yaşamıştır. Bu dönemde şarj edilebilen pillerin daha yüksek enerji yoğunluğuna erişmesi için farklı anot ve katot malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle lityum tabanlı pillerin geliştirilmesi ve yüzyıl sonunda ticarileşmesiyle birlikte günümüzde kullandığımız pek çok teknoloji için enerji sorunu kısmen çözülmüştür.

1967 Yılında Cenevre Araştırma Merkezi'nde geliştirilen teknolojiler temel alınarak aynı yerde çalışan Klaus Beccu tarafından 1970 yılında icat edilmiş ve patenti alınmıştır (Beccu, 1970). Pozitif elektrotundaki reaksiyon Nikel-Kadmiyum pillerdeki ile aynıdır. Fakat negatif elektrotundaki reaksiyonda kadmiyum yerine hidrojen absorban bir alaşım kullanılmaktadır.

Aynı boyutlardaki Nikel-Kadmiyum pillere oranla, iki hatta üç kat daha fazla enerji depolayabilme kapasitesine sahiptir. Bu da enerji yoğunluğu bakımında Lityum-iyon pillere yakındır. Elektrikli araçlarda ilk olarak 4. Nesil Toyota Prius Hibrit araçlarında kullanılmıştır (*Toyota Announces Development of New TNGA-Based Powertrains*, 2019).

Lityum iyon pil teknolojisi 1970'lerde Michael Stanley Whittingham tarafından temelleri atılarak daha sonra 1980'lerde büyük oranda dört kişi tarafından geliştirilmiştir (M.Stanley Whittingham, 1978; M S Whittingham, 1976). Bu kişiler John Goodenough, Michael Stanley Whittingham, Rachid Yazami ve Akira Yoshino'dır (J. B. Goodenough et al., 2019; Mizushima et al., 1980; Ramanan, 2019; M.Stanley Whittingham, 1978). Fakat bu pillerin ticarileştirilmesi Sony firması tarafından 1991'de hayata geçirilmiştir (Nagaura & Tozawa, 1990).

Lityum iyon pillerin icadının ardından katot malzemesi olarak potansiyel adaylar incelenmekteydi. LiMPO_4 (M: Geçiş metali) ailesi en popüler katot malzemesi adayı idi. Lityum iyon pilleri geliştiren araştırma ekibinde yer alan John Goodenough tarafından 1997 yılında, bu aileye mensup olan LiFePO_4 piller geliştirilmiştir (Padhi et al., 1997).

Bu pillerin üstün özellikleri maliyetinin düşük olması ve oldukça güvenli olmaları idi. Bu sebeple küçük (mobil vb.) uygulamalar yerine elektrikli araçlar veya büyük (şebeke ölçekli vb.) enerji depolama sistemleri için tercih edilmiştir (Eftekhari, 2017).

Lityum pillerde anot malzemesi olarak güvenilirliği için grafit kullanılmaktayken farklı bir anot malzemesi ile anottan ayrılan iyonların sayısının arttırılabileceği fikri doğrultusunda farklı anot malzemeleri incelenmiştir (Sandhya et al., 2014).

Ohzuku ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmalar neticesinde, $Li_{1.33}Ti_{1.67}O_4$ 'in 1.5 volt civarında çok düz bir şarj ve deşarj platosuna sahip ve sıfır gerilimli bir anot malzemesi olduğunu 1995 yılında ortaya koymuşlardır (Ohzuku et al., 1995; Yao et al., 2005).

Lityum titanat oksit (LTO) olarak adlandırılan bu pil kimyası farklı firmaların aldığı farklı patentler ile 2000'li yıllarda piyasaya sürülmüştür. Diğer pil kimyalarına göre yüksek şarj/deşarj hızı sayesinde kol saatinden elektrikli bisiklete ve otomotive kadar geniş bir pazara sahip olmuştur (Kanno et al., 1999; Nemeth et al., 2020; Toshiba, 2022; Vaughey et al., 1999).

1900'lerde geliştirilen piller temel olarak aktif elementler kullanmaktadır. Bu elementlerin hava ile teması hızlı yanmaya ve patlamaya yol açmaktaydı. Ayrıca kullanılan elektrolit sıvı olduğu için aşırı şarj/deşarj durumlarında pillerin sıcaklıkları artmakta ve sıvı elektrolitin buharlaşma noktasına geldiğinde iç basıncı arttırmaktaydı. Aşırı iç basınç da pil kabının yırtılmasına ve patlamasına sebep olmaktaydı. Bu nedenle **21. yüzyılda** bilim insanları pillerin enerji yoğunluk probleminin yanı sıra güvenlik, sürdürülebilirlik gibi yeni teknik sorunların çözümü için çalışmaktadırlar.

Katı elektrolitlerin icadı 19 yy. 'da Michael Faraday tarafından bulunmuş olsa da yakın tarihe kadar pillerde kullanımı mümkün olmamıştır (Funke, 2013). Geliştirilen teknolojiler ışığında 2014 yılında Satki3 firmasında çalışan araştırmacılar düşük maliyetli ve yüksek enerji kapasitesine sahip bir katı hal pili (Solid-State Battery) geliştirdiklerini açıklamışlardır (Sastri et al., 2016).

2017 yılında lityum iyon piller konusundaki çalışmalarıyla tanınan John Goodenough ve arkadaşları cam elektrolit ve alkali metal anot kullanarak ürettikleri katı hal pilini tanıtmışlardır (Braga et al., 2017).

Katı hal pillerinde elektrolit olarak yanıcı, patlayıcı ve dolayısıyla güvenlik sorunlarına yol açan sıvı elektrolitlerin yerine çok daha istikrarlı ve güvenli olan katı elektrolitler kullanılmaktadır. Güvenliğin yanı sıra katı hal pillerinin enerji yoğunlukları da li-ion pillere göre 2.5 kat fazladır (Dudney et al., 2015).

Günümüzde elektrik enerjisini depolama teknolojisi güvenlik, sürdürülebilirlik, enerji yoğunluğu ve hızlı şarj parametrelerini temel alarak geliştirilmektedir. Bunun örneklerinden birisi kütsesiz batarya (Massless Battery) olarak adlandırılan bir batarya türüdür.

Bu batarya istenilen şekilde üretilebilmektedir ve mukavemeti yüksektir (Xu et al., 2022). Bu sayede bisiklet, araba, uçak vb. araçların gövdeleri bataryadan yapılabilmektedir. Böyle bir teknolojinin gündelik hayatımıza getireceği yenilikler hayal gücümüz ile sınırlıdır.

Bir başka yeni teknoloji de özellikle 2013 yılından itibaren alınan patentlerden görüldüğü üzere hibrit süperkapasitörlerdir. Bu teknoloji kimyasal pil ilin yüksek enerji yoğunluğu ile kapasitörlerin çok hızlı şarj/deşarj olma özelliklerini bir arada bulunduran yarı pil yarı kapasitör sistemlerdir (Sato, 2014). Yeni yeni ticarileştirilmeye başlanmıştır.

1.2.2 Elektrik motoru ve elektrikli araçların tarihsel gelişimi

Pil teknolojisinin gelişimine paralel olarak elektrik motoru ve ilk elektrikli araçlar da 19. Yüzyıldan itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır.

Bu dönemde elektrik enerjisinin kimyasal olarak depolanması artık bir teknik problem olmaktan çıkmaya başlamıştır. Buna istinaden, elektrik enerjisi ile hareket ve bunun mobil amaçlarla kullanımı konularında önemli gelişmeler sağlanmıştır. Bunların en önemlisi ve kuşkusuz elektrikli araç teknolojisinin temeli, elektrik motordur. Bunun için elektrik alan yardımıyla hareket eden mekanizmalar geliştirilmiş ve sistem daha verimli hale gelecek şekilde evrilmiştir.

Elektrikli araç tarihçesini pek çok bilimsel buluşunun yanında elektrik motorunu icat etmesi sebebiyle Michael Faraday'dan başlatmak en doğru tarihsel başlangıç noktası olarak görülmektedir.

1822 yılında Michael Faraday tarafından yapılan oldukça basit bu mekanizma, aslında basitliğinin arkasında muhteşem bir teknolojik yenilik barındırıyordu. Elektrik motoru.

Faraday'ın üzerinde çalıştığı elektromanyetizma ve manyetik alan içerisinde hareket yeteneği elektrik motorunun doğuşuna vesile olmuştur. Bu teknoloji daha sonra başka bilim insanları tarafından geliştirilerek elektrikli araçlara giden yolda büyük bir adım atılmıştır (Saslow, 2002). Elektrik motorunun temellerini atan Faraday'dan sonra bir sonraki büyük gelişme elektromanyetik kuvvet marifetiyle sürekli dönen rotorun icadı ile birlikte gelmiştir.

Bir doğru akım motorunu oluşturan temel parçalar rotor, stator ve komütatör ilk olarak Macar asıllı Ányos István Jedlik tarafından icat edilmiştir. Tüm parçaları birleştirerek 1828 yılında ilk elektrik motorunu üretmiştir (Heller, 1896) (Guillemin & Thompson, 1891).

Ürettiği bu prototipte hem rotor hem de stator kısımları elektromanyetiktir. 1855 yılında yüke bağlanabilen bir elektrik motoru da yapmıştır (Guillemin & Thompson, 1891). İcat halen çalışır vaziyette olup Budapeşte Uygulamalı Sanatlar Müzesi'nde sergilenmektedir (Valehrachová, 2008).

İskoç mucit ve girişimci Robert Anderson günün popüler teknolojisi olan elektrikli araçların raylı sistemler üzerinde de kullanılabileceğini öngörerek 1832-1839 yıllarında tekrar kullanılmayan bataryalar ile çalışan bir elektrikli tren yapmıştır (Arai, 1995; Dunckley, 1993; Guarnieri, 2012).

Takip eden yıllarda da pek çok insanın bu doğrultuda çalışmasını sağlayan vizyonun arkasında yatan sebep ise küçük elektrikli vagonlardır. Çünkü sanayisi gelişen ve doğal kaynaklara olan ihtiyacı her geçen gün artan ülkelerde madenlerdeki değerli oksijeni harcamayan, elektrikli yük taşıyıcı vagonların popüler olması ve pazar yaratması kaçınılmazdı (Wakefield, 1998).

Hollandalı mucit Sibrandus Stratingh eczacılık okumasına rağmen zamanla kimya ve fizik alanlarında çalışmalar yapmış ve Groningen üniversitesinde profesör olmuştur. Burada hareket konusunda çalışmalar yapmaktaydı.

Temel olarak buhar gücü ile hareket eden araçlar geliştirmekteydi fakat bunun yanında elektromanyetizma ile ilgili çalışmalar da yapmaktaydı (Kirsch, 2000). Dönemin yeni teknolojisi olan elektrik motorlarını kendi düzeneklerinde kullanabileceğini fark etmesi ile birlikte çalışmalarını bu yöne kaydırды. 1835 yılına gelindiğinde Faraday'ın elektromanyetizma prensiplerinden faydalanarak kendinden tahrikli ilk elektrikli aracı yaptı.

Bu araç yolcu taşımak için tasarlanmamıştı. Daha ziyade elektromanyetizma prensiplerinin işlerliğini kanıtlayan bir prototip idi (*Hist. Univ. Groningen*, 2021). Aynı yıllarda pasifik okyanusunun diğer yakasında Thomas Davenport isimli bir demirci ve mucit kendisinden önce yapılan çalışmaları incelemiş ve prensipleri kavramıştı. Çubuk şeklindeki bir sabit mıknatısın etrafına yerleştirdiği bobin vasıtasıyla değişen manyetik alan yaratarak elektrik motoru yapmıştı (Nye, 1992).

Aynı dönemde Joseph Henry, Michael Faraday, William Sturgeon, Moritz Hermann Jacobi ve Hippolyte Pixii gibi pek çok bilim insanı elektrik motoru üzerinde çalışmalar yapıyorlardı (Guarnieri, 2012; Kirsch, 2000; Wakefield, 1998).

Thomas Davenport'da elektrik motoru sayılabilecek icadı için 1837 yılında Amerika'da "Manyetizma ve elektromanyetizma ile tahrik makinelerinde iyileştirme" adındaki patentini almıştı (Patent No: US132A) (Davenport, 1837).

Robert Davidson İskoçyalı bir mucit olmasının ötesinde farklı tarihlerde yaptığı çalışmaları ile yer almaktadır. "The Engineer" dergisinin 12 Şubat 1909 tarihli sayısının 172. sayfasında kendisinin 1837 yılında elektromanyetik bir motor ve buna elektrik enerjisi sağlayan piller ile Edinburgh ve Glasgow arasındaki raylarda tarihteki ilk elektrik tahrikli tren seyahatini gerçekleştirerek yine elektrik tahrikli sistemlerin dünyadaki ilk pratik uygulamasını yaptığı iddia edilmektedir ("Early Experiments In Electric Traction," 1909).

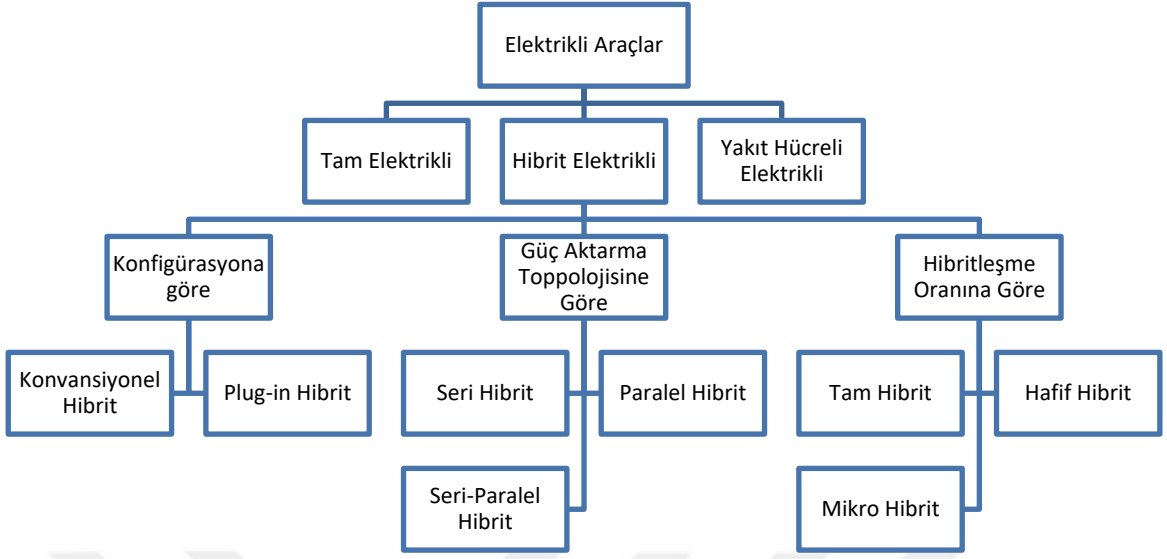
1840 yılında halka açık "Elektromanyetizma Fuarı" düzenledi ve bu fuarda elektrik motoru ile çalışan, iki kişi taşıyabilen bir model lokomotif, 2 ton kaldırma kapasitesine sahip bir elektromıknatıs, elektrikli bir torna tezgâhı ve elektrikli bir baskı makinesini tanıttı. Hatta fuar için basılan afişin altında "Elektro-Manyetizma ile basılmıştır." ibaresi bulunmaktadır (Morgan, 1995).

1.3 Elektrikli Araçlara Genel Bakış

Elektrikli araçlar kendi içinde tam elektrikli, hibrit elektrikli ve yakıt hücreli araçlar olarak üç sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıfların alt kırılımları da Şekil 1.7'de gösterildiği gibidir. Şekil 1.7'deki grafikte yer alan Hibritleşme Oranı (HO) aşağıdaki denklem 1.1'e göre belirlenmektedir.

$$HO = \frac{\text{Elektrik motorunun gücü}}{\text{Elektrik motorunun gücü} + \text{İçten yanmalı motorun gücü}} \quad (1.1)$$

Görüldüğü gibi bu oran, aracın cer motorlarının elektrik gücünün aracın toplam güce oranı şeklinde ifade edilir. Yani aracın hangi oranda elektrikli olduğunu gösteren bir ifadedir.



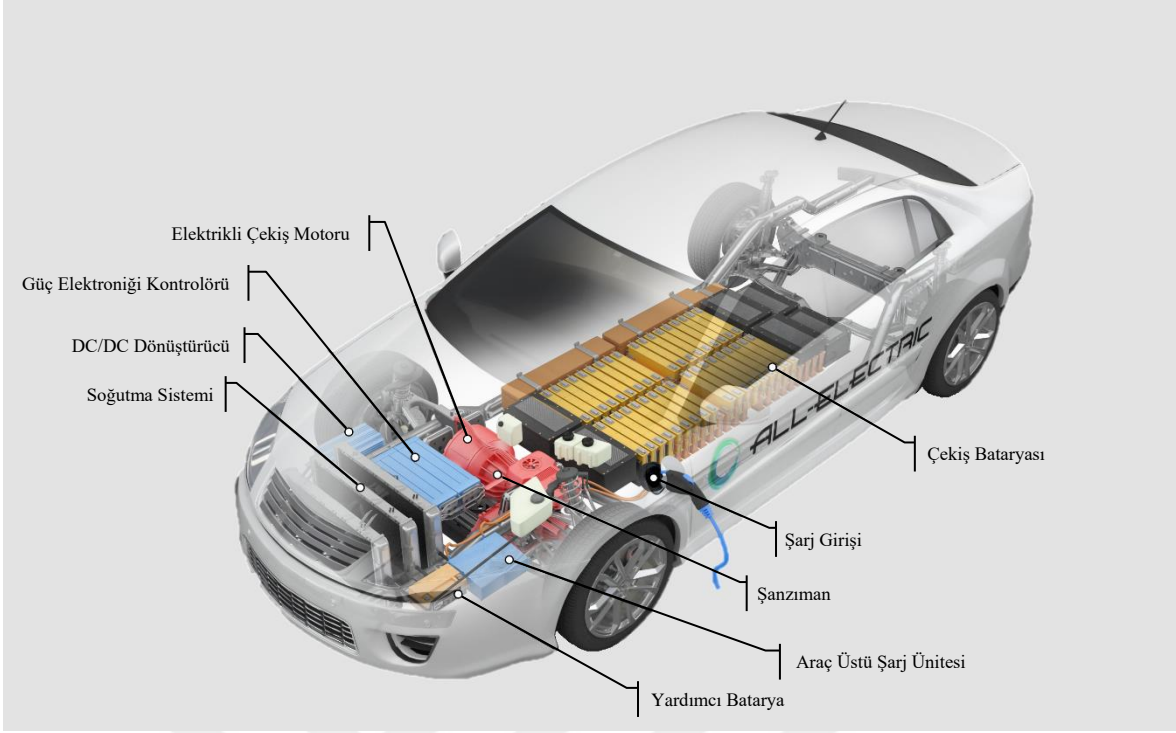
Şekil 1.7: Elektrikli araçların sınıflandırması.

1.3.1 Tam elektrikli araçlar

İçten yanmalı motor yerine elektrik motoruna sahip araçlar, tam elektrikli araçlar (TEA) olarak tanımlanmaktadır (UNECE Transport Division, 2021).

Şekil 1.8’de donanımları sunulan TEA’lar elektrik motoruna enerji sağlamak için yüksek kapasiteli bir batarya grubuna sahiptir. Bataryayı şarj etmek için bir şarj istasyonuna veya duvar prizine takılmalıdır. Şarj modülü araç üzerinde olabileceği gibi araç dışında (Şarj istasyonunda) da olabilir.

Buna göre aracın şarj hızı değişir çünkü araç üzerinde yer alan sistemlerin boyut, kapasite gibi sınırlamaları vardır. TEA’lar Elektrikle çalıştığı için aracın bir egzozu yoktur. Benzin pompası, yakıt hattı ve yakıt deposu gibi yaygın bileşenlere sahip değildir. Egzoz gazı emisyonu olmadığı için karbondioksit, diğer nitrojen bazlı zararlı gazlar veya sera gazları salınımı yapmazlar.



Şekil 1.8: Tam elektrikli araç. (Kaynak: afdc.energy.gov)

Burada TEA'ların bileşenleri şu şekilde tanımlanabilir. Çekiş bataryası, elektrikli çekiş motoru için gereken elektrik enerjisini kimyasal olarak depolayan birimdir. Yardımcı batarya ise çekiş bataryası devreye girmeden önce aracı çalıştırmak ve araç aksesuarlarına güç sağlamak için kullanılmaktadır.

Şarj girişi, çekiş bataryasını şarj etmek için aracın harici bir güç kaynağına yani bir şarj istasyonuna bağlanmasını sağlayan giriştir. Şarj istasyonları DC elektrik sağlayabildiği gibi AC elektrik sağlayanları da vardır. Bu nedenle araç üzerinde bir araç üstü şarj ünitesi bulunmaktadır. Bu ünite, şarj girişi aracılığıyla sağlanan AC elektriği çekiş bataryasını şarj etmek için DC elektriğe dönüştürmektedir. Bu sayede çekiş bataryası şarj edilebilmektedir.

Araç üzerinde bulunan düşük gerilim ile çalışan pek çok donanım için gereken enerji ise bir Dönüştürücü marifetiyle sağlanmaktadır. DC/DC dönüştürücü, çekiş bataryasının yüksek gerilimli DC elektriği araç aksesuarlarını çalıştırmak ve yardımcı bataryayı şarj etmek için gereken daha düşük gerilimli DC elektriğe dönüştürmektedir.

Araç üzerinde bunlardan başka yüksek gerilim (High Voltage – HV) donanımları bulunmaktadır. HV donanımın en önemli ünitesi elbette aracın hareket etmesini sağlayan ana mekanik güç kaynağı olan elektrikli çekiş motorudur. Bu motor, çekiş bataryasından gelen elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirerek aracın tekerleklerini hareket

ettirmektedir. Bazı araçlar, hem sürüş hem de rejeneratif enerji kazanımı işlevlerini yerine getiren motorlar kullanmaktadır.

Elektrikli çekiş motoru, çekiş bataryasından gelen DC elektriği kullanabildiği gibi bazı elektrikli araç modellerinde bataryadan gelen DC gerilim invertörler yardımıyla AC elektriği dönüştürülerek motor sürülmektedir. Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın mutlaka bir güç elektroniği kontrolörü bu sistemlerin kontrolünü sağlamalıdır. Bu donanım, çekiş bataryası tarafından sağlanan elektrik enerjisi akışını yönetmektedir. Ayrıca elektrikli çekiş motorunun hızını ve ürettiği torku da kontrol etmektedir.

Tüm bu HV donanımı bakır kayıpları sebebiyle enerjinin bir kısmını ısı enerjisi olarak atmaktadır. Bu nedenle ısınan donanımları optimal çalışma sıcaklık aralığında tutmak için bir soğutma sistemi kullanılmaktadır. Bu soğutma sistemi hava vb. gaz formundaki akışkanlar ile çalışabildiği gibi hidrolik veya sıvı (su-glikol karışımı gibi) ile de çalışabilmektedir. Soğutma yöntemi HV donanımının tasarım parametrelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

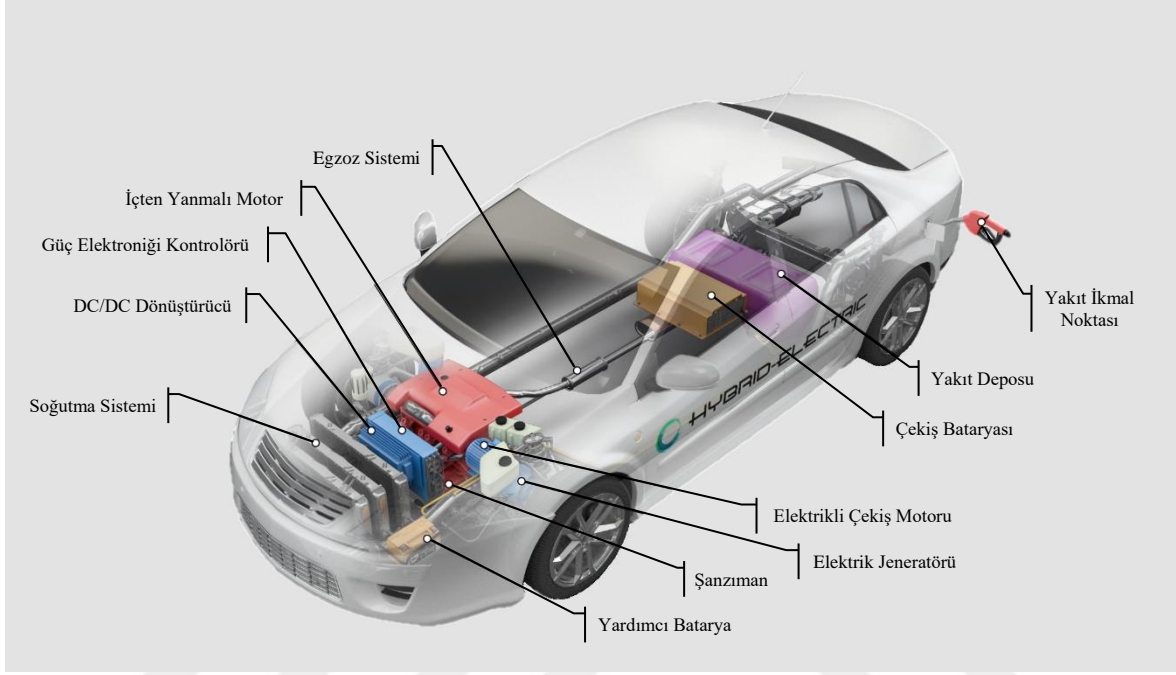
Son donanım ise elektrikli çekiş motorundan hareketi tekerleklere aktaran şanzıman sistemidir. Fosil yakıtlı araçlarda üretilen tork düşük olduğu için aracın ilk hareketi ve motor hızının torka göre ayarlanabilmesi için çok vitesli şanzımanlar kullanılmaktadır. Elektrik motorlarında ise tork devire bağlı olmadığı için böyle bir devir düşürme sisteminin kullanılmasına gerek yoktur. Bu nedenle genel olarak elektrikli araçlarda vites kutusu bulunmaz. Fakat yüksek performanslı yeni model elektrikli araçların bazılarında iki vitesli şanzımanlar tercih edilmektedir (Porsche, 2022). Bu hem torku arttırmakta hem de aracın en yüksek hızının artmasına olanak vermektedir.

1.3.2 Hibrit elektrikli araçlar

Tanım olarak hibrit elektrikli araç (HEA), tahrik enerjisi dönüştürücülerinden birinin elektrik makinesi olduğu bir araç anlamına gelmektedir (UNECE Transport Division, 2021).

Yani, Şekil 1.9’da sunulduğu gibi bir içten yanmalı motor (İYM) ve bataryada depolanan enerjiyi kullanan bir elektrik motoru, hibrit elektrikli araçlara güç sağlayan iki temel donanımdır. Bir hibrit elektrikli aracın bataryası, prize takılarak şarj edilemez. Bunun yerine akü içten yanmalı motor ve rejeneratif frenleme ile şarj edilmektedir. Elektrik motorunun

sunduğu ek güç nedeniyle daha küçük bir içten yanmalı motor kullanımı mümkün olmaktadır. Bu sayede de yakıt tüketimi sağlanmaktadır. Motor durdurulduğunda, batarya ayrıca yardımcı sistemlere güç sağlayabilmekte ve motorun rölantide çalışması azaltılmaktadır. Bu unsurlar, performanstan ödün vermeden yakıt ekonomisini iyileştirmek için birlikte çalışmaktadırlar.



Şekil 1.9: Hibrit elektrikli araç. (Kaynak afdc.energy.gov)

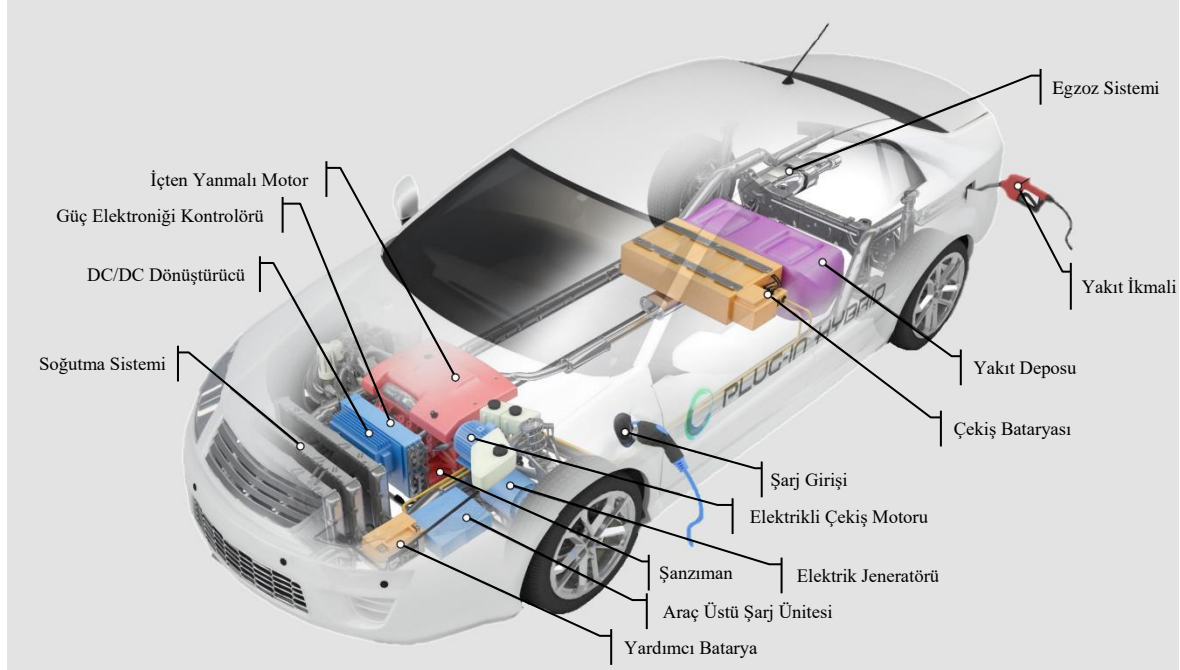
HEA'lar TEA'lardan farklı olarak içten yanmalı motor ve onun yardımcı sistemleriyle donatılmıştır. Bunun yanında çekiş bataryasını içten yanmalı motorun ürettiği mekanik enerji ile şarj edebilmek için bir elektrik jeneratörü ile donatılmıştır.

Bu jeneratörler hem İYM'dan gelen mekanik enerjiyi hem frenleme esnasında aracın ataletinden elde edilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek çekiş bataryasının şarj edilmesini sağlar.

Bunların dışında HEA'larda içten yanmalı motor ve bu motor için gereken yan sistemler mevcuttur. Örnek olarak içten yanmalı motorda meydana gelen yanma neticesinde ortaya çıkan gazların atılması için bir egzoz sistemi bulunmaktadır. Elbette içten yanmalı motorun çalışabilmesi için gereken yakıtı depolayan bir yakıt deposu ve bu deponun doldurulmasını sağlama yakıt ikmal noktası da diğer bileşenlerdir.

1.3.3 Şarjlı hibrit elektrikli araçlar

Şekil 1.10’da sunulan Şarjlı Hibrit Elektrikli Araçlar (ŞHEA) aynı zamanda Plug-in hibrit elektrikli araçlar olarak da bilinmektedirler. Bu araçların HEA’dan farkı çekiş bataryalarının dışarıdan bağlanan bir şarj istasyonu vasıtasıyla şarj edilebilmesidir. Özetle, TEA ile HEA karışımı bir yapıya sahip olduğu rahatlıkla söylenebilir.



Şekil 1.10: Şarjlı hibrit elektrikli araç. (Kaynak: afdc.energy.gov)

1.3.4 Yakıt hücreli elektrikli araçlar

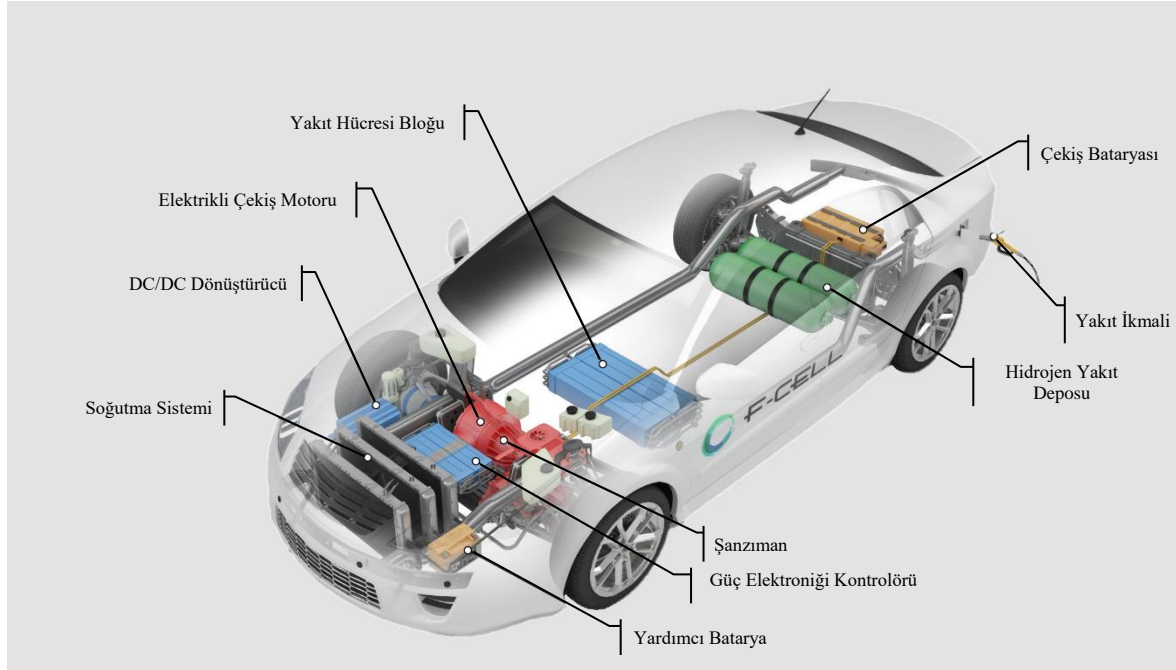
Tamamen elektrikli araçlar gibi, Şekil 1.11’de sunulan Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (YHEA) bir elektrik motoruna güç sağlamak için elektrik enerjisini kullanır. Tanım olarak yakıt hücreli araç, tahrik enerjisi dönüştürücüsü olarak yalnızca yakıt hücresi ve elektrik motoru içeren bir güç aktarma sistemi ile donatılmış bir araç anlamına gelir (UNECE Transport Division, 2021).

Diğer elektrikli araçların aksine, YHEA'lar elektrik enerjisini bir bataryadan sağlamak yerine, hidrojenle çalışan yakıt hücrelerini kullanarak elektrik üretirler. Araç üreticisi tasarım sürecinde, elektrik enerjisini kullanan elektrik motorunun/motorlarının boyutuna göre aracın gücüne uygun büyüklükteki yakıt hücresi ve batarya birleşiminin tasarım yapar.

Araç üreticileri, bataryayı şarj etmek için plug-in özelliklere sahip bir YHEA tasarlayabilseler de, günümüzde çoğu YHEA bataryasını frenleme enerjisini yeniden

yakalamak, kısa süreli hızlanma sırasında ekstra güç sağlamak ve rölantide çalışma esnasında yakıt hücresinden sağlanan gücü yumuşatmak için kullanmaktadır.

Ayrıca düşük güç ihtiyacı olduğu durumlarda yakıt hücresi kapatılabilmektedir. Araç üzerinde depolanan enerji miktarı aracın ihtiyaçları ve hidrojen yakıt deposunun boyutuna göre belirlenmektedir.



Şekil 1.11: Yakıt hücreli elektrikli araç. (Kaynak: afdc.energy.gov)

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki elektrikli araçlar gün geçtikçe popülaritesi artan güncel bir teknolojidir. Bu teknolojinin hayata geçirilmesinde çok sayıda teknik problem ortaya çıkmaktadır. Elektrikli araçların en önemli donanımı olan batarya ve bu bataryanın yönetilmesi ise teknolojik gelişimde en önemli problemdir.

Bu tez çalışması amacı elektrikli araçlarda kullanılan ticarileştirilmiş tüm pil kimyaları için elektronik olarak pilin kimyasını tespit edip uygun parametreleri otomatik olarak ayarlamak suretiyle piyasada bulunan ve piyasaya çıkması muhtemel tüm pil kimyalarını destekleyebilen bir akıllı batarya yönetim sisteminin tasarlanması ve uygulanmasıdır. Bu kapsamda farklı batarya kimyalarını destekleyebilen akıllı batarya yönetim sisteminin tasarımı yanı sıra donanım ve yazılım olarak prototip üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bunun için öncelikle elektrikli araçlarda kullanılan mevcut pil teknolojileri incelenmiş ve çözülmesi gereken problemler belirlenmiştir. İncelemeler neticesinde pil teknolojisinin gelişimine paralel olarak uygulama alanlarının da çeşitlendiği tespit edilmiştir. Elektrik enerjisi ile çalışan tüm sistemlerde bu enerjinin depolanması ve kontrol edilebilmesi önemli

teknik problemlerden birisidir. Bu problemin çözümü için batarya yönetim sistemleri geliştirilmiştir. Farklı kimyalara sahip batarya paketlerinin üstün özelliklerini bir arada kullanabilecek, yüksek verimli bir batarya yönetim sistemi (BYS) geliştirilmesi fikri, geçmiş saha tecrübelerimiz ve akademik literatürde bu konudaki eksiklikler ile birlikte şekillenmeye başlamıştır. 2017 yılı nisan ayında hazırladığımız projenin, İstanbul Teknik Üniversitesi ARI Teknokent'te aralarında otomotiv sanayicileri derneği başkan ve üyelerinin olduğu otomotiv sektör temsilcilerine yapılan sunum ile çalışmanın temelleri atılmıştır. Bu sunum neticesinde fikrin önemli olduğu, fakat teknik zorlukları sebebiyle bunun bir simülasyon çalışması ile desteklenerek sunulması gerektiği anlaşılmıştır.

Doktora çalışmasının birinci fazında MATLAB/SIMULINK ortamında ilk geliştirilen algoritma ile bir simülasyon çalışması yapılmış ve algoritmanın batarya kimyasını tespit etme konusunda başarılı olduğu görülmüştür. Bu simülasyon çalışmasını esas alan yeni bir proje önerisi hazırlanmaya başlanmıştır.

Tüm bu süreçleri takiben aynı yıl haziran ayında İTÜ Çekirdek BİGG programı kapsamında hazırlanan proje önerisi sunulmuştur. Tüm aşamaları başarı ile geçen projemiz, kasım ayında Türkiye Cumhuriyeti Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına yapılan sunum neticesinde aralık ayında desteklenmeye hak kazanmıştır. Buna mukabil TÜBİTAK 1512 desteği için Malatya Teknokent'te Sustech Ar-Ge, Eğitim ve Danışmanlık Limited şirketi kurulmuş ve TÜBİTAK projemiz 2018 yılı Şubat ayı itibariyle başlamıştır. E-Cameleon isimli projemizde donanım için kart tasarımlarına ve yazılım için algoritmanın geliştirilmesine verilmiştir. Bu kapsamda proje ilerledikçe ortaya çıkan eksikliklerimizin giderilmesi için 2018 yılı ekim ayından itibaren altı ay süreyle Polonya'ya gidilmiştir. Malatya'da Trambüs projesi ile tanıdığımız ve irtibatımız olan, elektrikli araçlar için donanım ve yazılım üreten MEDCOM firması ziyaret edilerek orada yapılan çalışmalar hakkında bilgi alınmıştır. Bu sayede özellikle kart tasarımı konusunda hangi yöntemin izleneceği netleşmiştir. Kart tasarımları için EAGLE ve ALTIUM yazılımları kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında, öncelikle BYS yardımcı kartlarının birinci sürüm tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Yardımcı kartların tasarımı yapılırken yaygın olarak kullanılan 12, 15 ve 18 seri pil bağlanabilen seçeneklerden, 18 hücreyi kontrol edebilen topoloji tercih edilmiştir. Dolayısıyla, bu kartlar ile 18 adet seri bağlı pilin ayrı ayrı gerilim değerleri ölçülebilmektedir. Ayrıca ortam sıcaklığı, yonga sıcaklığı ölçülebilmekte; elde edilen veriler galvanik izolasyonlu SPI (Serial Peripheral Interface) bağlantısı ile ana karta iletilebilmektedir.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen ana kart dört farklı kimyaya sahip batarya paketini ayrı ayrı hem yüke hem de şarja bağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu da sekiz adet anahtarlama elemanı ve yine sekiz adet sigorta kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ek olarak Pil Kimyasını Belirleme (PKB) algoritmasının ihtiyaç duyduğu donanım olan yük dirençleri ve bunların anahtarlama için gereken anahtarlama elemanları da tasarıma dâhil edilmiştir. Birinci sürüm ana kartta batarya paketlerinin ayrı ayrı sisteme bağlanıp ayrılabilmesi için anahtarlama elemanı olarak MOSFET'ler kullanılmıştır.

Tasarlanıp üretilen donanım için hem kendi içerisinde yardımcı kartlar ile ana kart arasındaki iletişimi sağlayacak hem de temel batarya yönetim fonksiyonlarının hesaplamalarını yapacak bir çekirdek yazılım C++ dilinde yazılmıştır. Bu yazılım ile elektriksel olarak batarya paketlerinin yüke veya şarja bağlanması sağlanmıştır. Ayrıca elde edilen veriler işlenerek şarj durumu gibi temel parametrelerin yanı sıra pil kimyasını belirleme algoritması da tamamen Raspberry Pi3 üzerinde koşturularak gereken hesaplamalar yapılmaktadır.

Tüm bu verilerin bir arayüz üzerinde kullanıcıya sunulabilmesi için Raspberry Pi3 ve buna uygun 7 inç dokunmatik ekran kullanılmıştır. Bu arayüz için gereken yazılım ise Python programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Raspberry Pi3 üzerinde koşturulan bu yazılım sayesinde röle kontrolü gibi temel komutlar USB (Universal Serial Bus) bağlantı üzerinden ana karta aktarılmaktadır. Yine bu çalışma için özel olarak geliştirilen iletişim protokolü ile USB üzerinden 1 Hz frekansında iletişim sağlanabilmektedir.

TÜBİTAK 1512 projemiz olan E-Cameleon; batarya kimyasını otomatik olarak belirleyip, buna uygun yönetim parametrelerini uygulayabilen özgün donanım ve yazılımı başarı ile tamamlanmıştır (Dikmen & Karadağ, 2021c, 2021b; Karadağ & Dikmen, 2021). 18 ay süren bu projede kazanılan know-how sayesinde E-Cameleon projesinde üretilen otomatik tanılamalı (PKB fonksiyonunu sahip) batarya yönetim sisteminin donanım ve yazılımının geliştirilmesi konusunda bir yol haritası belirlenmiştir (Dikmen et al., 2018).

T.C. Cumhurbaşkanlığı 11. Kalkınma Planı'nda elektrikli araçlar ile ilgili olarak elektrikli araçlara yönelik batarya yatırımı (385.3), elektrikli otobüslerin kullanımının yaygınlaştırılması (385.5), elektrikli tren ve lokomotif üretimi (389.2, 389.3) ve tam elektrikli gemi üretimi (399) konularında belirlenen hedefler ve prensip kararları yer almıştır. 2019-2020 bahar döneminde 100/2000 YÖK doktora bursu programında, Fen ve Mühendislik bilimleri alanında çalışma alt alanı olarak Elektrikli ve Hibrit Araçlar öncelikli alanlara dâhil edilmiştir. Takiben üniversitemiz senatosunun aldığı karar ile hibrit ve

elektrikli araçlar üniversitemizin öncelikli çalışma alanları arasına alınmıştır. Bu sayede çalışmaların bir sonraki fazı için İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP)'ne öncelikli alan projesi hazırlanarak sunulmuştur.

FOA-2018-1358 numaralı “Elektrikli Araçlarda Yeni Nesil Batarya ve Güç Yönetim Sistemlerinin Modellenmesi Geliştirilmesi ve Bataryaların Geri Dönüşüm Süreçlerinin Analizi” projesi 21.12.2018 tarihinde başlamış ve 10.06.2021 tarihinde başarı ile sonuçlandırılmıştır (Dikmen et al., 2021; Dikmen & Karadağ, 2021a, 2021b, 2021e, 2021d; Ekici et al., 2021). Bu proje kapsamında geliştirilen batarya yönetim sisteminin ikinci sürüm donanımları üretilmiş ve yazılım yeni donanıma göre geliştirilmiştir.

BYS ana kartının tamamen baştan tasarlanması gereği doğmuştur. Çünkü ilk sürüm ana kartta anahtarlama için kullanılan MOSFET'lerin bu uygulama için uygun olmadığı tespit edilmiştir. MOSFET'lerin anahtarlama esnasında kartın tasarımı sebebiyle geçiş rejimini kontrol etmek güç olmaktadır. Bu da zaman zaman MOSFET'lerin yanmasına ve donanımsal arızalara sebep olmaktadır. Bu nedenle yeni ana kart tasarımında anahtarlama elemanı olarak röleler tercih edilmiştir. Hem güvenliği arttırmak hem de kartın daha stabil çalışmasını sağlamak için üç kademeli akım koruması eklenmiştir. Bunlardan ilki akım koruma devresidir. Bu devre sayesinde akım belirlenmiş değerin üzerine çıktığında otomatik olarak devreyi kapatmaktadır. İkinci kademe akım koruması 8 amperlik sigortalar ile sağlanmıştır. Üçüncü kademe ise yazılım ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yeni sürümde yine güvenlik maksadıyla röle tetiklemeleri bir çoğullayıcı (mux) üzerinden yapılarak her seferinde sadece bir rölenin aktif olması donanımsal olarak garanti altına alınmıştır.

Tüm bunlara ek olarak, yazılımın ikinci sürümünde iletişim protokolleri yeniden yapılandırılmıştır. Bu sayede USB üzerinden ana karta gönderilen komutlar çift teyitli şekilde gönderilerek işlem yapılabilmesine olanak sağlamıştır. Buna rağmen iletişim hızı artırılarak 10 Hz seviyesine kadar çıkartılmıştır. Ayrıca sistem ekran sayfaları düzenlenmiş ve daha kullanıcı dostu haline getirilmiştir. Eklenen bir diğer yazılım özelliği ise röle komutları gönderilmeden önce elektriksel bağlantı yapılacağı kesinleştirilmesi maksadıyla eklenen butondur. Bu buton sayesinde elektriksel bağlantı yapılacağı anlaşılmaktadır. Aksi durumda bağlantı butonlarına basılsa bile sistem komut göndermemektedir. Aynı buton kapatılması durumunda tüm rölelerin kapatılması komutunu göndererek güvenli elektriksel ayrılmayı garanti etmektedir. Eklenen son özellik ise USB bağlantısının kurulmasında problem olması durumunda otomatik sistem kurtarması yapma

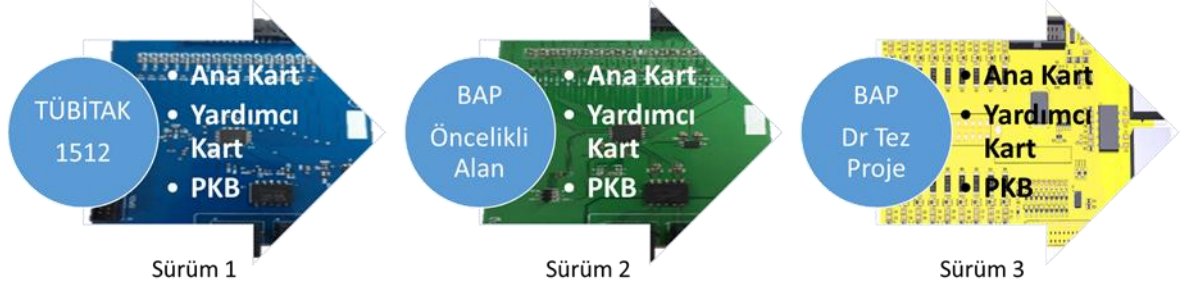
özelliğidir. Ayrıca bu özellik ile USB bağlantısının sağlanması durumunda otomatik olarak veri akışı başlatılmakta ve ancak kullanıcı komutu gelmesi veya sistemden çıkış komutu verilmesi durumunda veri güncellemesini kesmektedir.

BAP öncelikli alan projesi kapsamında tedarik edilen programlanabilir DC yük için LabVIEW 2017 platformu kullanılarak yeni bir yazılım geliştirilmiştir. Yazılım ara yüzünde örnekleme frekansı batarya yönetim sistemi donanımının rahatlıkla karşılayabileceği bir değer olan saniyede 1 örnek olacak şekilde seçilmiştir. Minimum deşarj gerilimi, bağlanan pilin kimyasına göre fabrika verilerinden alınmaktadır. Yük 1 ve Yük 2 değerleri ise yine batarya yönetim sistemi donanımında yer alan yük dirençlerinin değeri olan 10 ohm ve 5 ohm olarak seçilmiştir. Örnekleme zamanı ise 20 sn olarak seçilmiştir. Böylece tanılama algoritması gereği, 10 ohm'luk ve 5 ohm'luk dirençlerin her birinin ayrı ayrı 10'ar saniye süresince aktive edilmesi sağlanmıştır. DC yük için geliştirilen bu yazılım ara yüzünde hem akım hem de gerilim değerleri grafik olarak sunulmakla birlikte anlık akım, gerilim ve güç değerleri sayısal olarak ekranın sağ üst kısmında sunulmaktadır. Ayrıca yazılım, pilden çekilen toplam gücü de grafiksel ve sayısal olarak ekranın en sağ kısmında göstermektedir.

Bu deney düzeneği ve yazılım ile elde edilen veriler kullanılarak bir PBK algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmanın temel problemi, örtüşen akım ve gerilim değerlerinin ayrıştırılabilmesi olduğu için, bu soruna bir çözüm üretmek gereği duyulmuştur.

Tez çalışması kapsamında bu probleme getirilen çözüm akım-gerilim verilerinin çiftler haline getirilmesi ve ardından istatistiksel yöntemler kullanılarak elde edilen verinin hangi kısmının, ayrıştırma işlemi için gereken bilgiyi sağlayabileceğinin tespit edilmesidir. İstatistiksel olarak daha anlamlı olan veri kısmını güçlendiren ve bu sayede örtüşen verilerin ayrıştırılmasını sağlayan bir ayrıştırma fonksiyonu geliştirilmiştir. Bu fonksiyon sayesinde pil kimyasının %100 doğrulukla tespiti mümkün hale gelmiştir (Dikmen & Karadağ, 2022). Böyle bir sistemin özellikle elektrikli araçlarda kullanımı, ardından da elektrikli araç bataryalarının ikinci hayatları için ayrıştırma ve geri dönüşüm merkezlerinde kullanımı önem arz etmektedir.

Tüm bu süreçlerin gerçekleşme sırası Şekil 1.12'de sunulmuştur.



Şekil 1.12: Tez projelendirme akışı.

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar 1 uluslararası SCI makale, 1 TR dizin makalelerde yayınlanmıştır. Çalışma süresinde elde edilen ara çıktılar da 3 farklı uluslararası konferansta tam metin bildiri olarak sunulmuştur. Tez çalışması kapsamında geliştirilen yöntemler ve üretilen prototip BYS için 3 adet ulusal patent başvurusu yapılmıştır. Bunlara ek olarak tez çalışması RDCONF konferansı kapsamında verilen Ar-Ge ve İnovasyon Ödülleri 2021 yarışmasında En Yenilikçi Bilimsel Temelli Proje Kategorisinde Birincilik Ödülü almıştır.

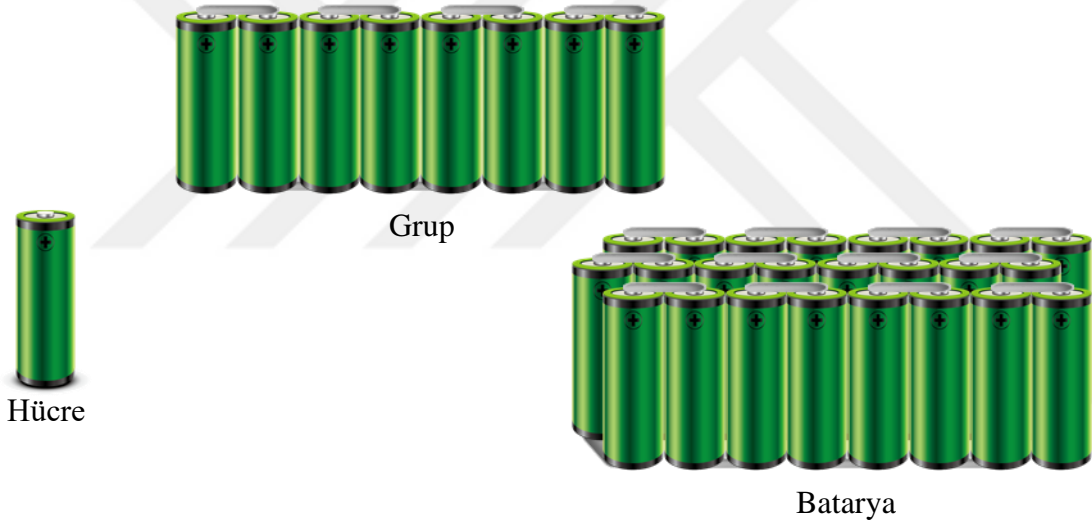
Sunulan doktora tezi Türkçe ve İngilizce özet, 4 ana bölüm yanında sonuçlar ve kaynaklar bölümlerini içermektedir. 7 adet çizelge ve 76 adet şekil içeren toplam 140 sayfadan ibarettir.

2. TEMEL KAVRAMLAR VE TANIMLAR

2.1 Batarya Yönetim Sistemi (BYS)

Bataryalar ve batarya yönetim sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalarda terminolojik olarak karmaşa yaşanmaması için öncelikle bazı kavramların açıklanması gerekmektedir. Burada karşımıza üç kavram çıkmaktadır. Bunlardan ilki hücre yani tek bir pildir. Hücreler sistem gerilimini karşılayabilmek için seri olarak birbirine bağlanarak grupları oluşturmaktadırlar.

Gruplar da kendi aralarında seri veya paralel bağlanarak modülleri, modüller de seri ve/veya paralel bağlanarak bataryaları meydana getirmektedir. Şekil 2.1’de hücre, grup ve batarya kavramlarına ilişkin görseller sunulmuştur. Bu kavramların netleştirilmesinden sonra batarya yönetim sistemlerinden bahsedilebilir.



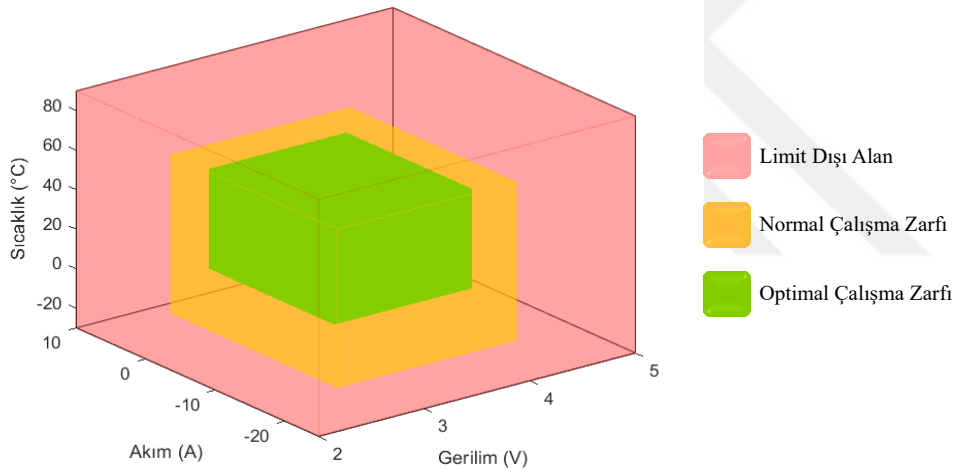
Şekil 2.1: Hücre, grup ve batarya kavramları.

BYS, literatürde elektrikli bir aracın bataryasıyla ilgili temel işlevlerde aynı birkaç farklı tanımlama bulunmaktadır. Olası sorunları yaptığı ölçümler yardımıyla gözlemleyen ve bataryayı izlemek, kontrol etmek, dengelemek için zorunlu bir donanım olarak tanımlanmaktadır (Sandeep Dhameja, 2002; T. Stuart et al., 2002).

Ayrıca, yine literatüre göre; BYS bataryayı gözlemlemek/ölçümlemek (hücre bazında), bataryayı aşırı şarj/deşarjdan korumak, bataryanın durumunu tahmin etmek/öngörmek, bataryanın performansını optimize etmek ve derlediği verileri sisteme ve/veya kullanıcıya raporlamak/sunmak fonksiyonlardan herhangi birini veya birkaçını içerebilmektedir (Andrea, 2010; H.J. Bergveld et al., 2002).

BYS'nin amacı, sisteme güç sağlayan bataryada depolanan enerjiyi en iyi şekilde kullanarak bataryaya ve sisteme zarar vermemektir. Bu amaca ulaşmak için bataryanın hem şarj süreçleri hem de deşarj süreçleri izlenmeli ve kontrol edilmelidir (H.J. Bergveld et al., 2002; Hendrik J. Bergveld et al., 2008; Pop et al., 2008).

BYS, bataryaları veya batarya paketlerini Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, önceden tanımlanmış bir akım, gerilim ve sıcaklık zarfı içinde çalışmasını sağlayan kritik öneme sahip, vazgeçilmez sistemlerdir. Bunu yaparken de en temel iki çıktısı Şarj Durumu ve Sağlık Durumudur. Şarj durumu aracın menzil gibi yan çıktıları üretmesi için büyük önem arz ederken; sağlık durumu ise batarya grubunun toplam enerji depolama kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir. BYs'ler mobil cihazlar gibi küçük hatta mikro ölçekli uygulamalarda kullanılabilir gibi; şehir şebekelerini besleyen çok büyük boyutlu uygulamalarda da, yenilenebilir enerji santrallerinin enerji yedeklemesinde de kullanılabilir.



Şekil 2.2: Örnek li-ion pilin optimal çalışma zarfı.

Özetleyecek olursak, literatürde yer alan tanımlara göre BYs, bataryayı elektrokimyasal özelliklerine göre önceden tanımlanmış bir akım, gerilim ve sıcaklık zarfı içinde çalışmasını sağlayan sistemdir.

Günümüz teknik perspektifinden BYs, akım, gerilim, sıcaklık, şarj durumu (SoC), sağlık durumu (SoH), enerji durumu (SoE), kalan kullanım ömrü (RUL) vb. parametreler açısından; ölçümlendiği verileri kaydeden, işleyen ve kablosuz bağlantı yoluyla bir bulut sunucusuna gönderirken ve/veya diğer cihazlarla paylaşırken bataryanın belirli bir

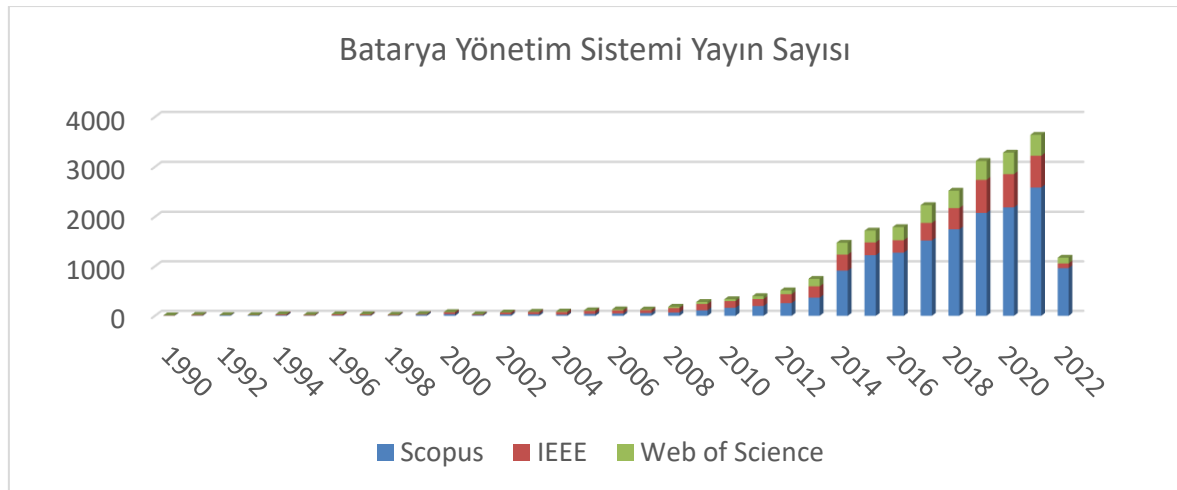
güvenli/optimal çalışma zarfı içinde çalışmasını sağlayan entegre bir donanım ve yazılım bütünü olarak tanımlanabilir.

BYS'nin en temel iki çıktısı Şarj Durumu (ŞD, State of Charge – SoC) ve Sağlık Durumu (SD, State of Health – SoH) olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bataryanın ŞD aracın menzil hesaplamasında önemli bir yer tutmaktadır. Bataryanın SD ise o döngüdeki toplam enerji depolama kapasitesi ile tanımlanabilmektedir.

BYS'ler mikro ölçekli uygulamalarda kullanılabildiği gibi mobil cihazlar gibi küçük uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca, şehir çok büyük boyutlu, şebekelerini besleyen elektrik enerjisi depolama uygulamalarda da kullanılmaktadır. Özellikle büyük ölçekli uygulamalar başta olmak üzere bataryalarda kullanılan pillerin kimyaları büyük oranda lityum tabanlıdır.

Literatür incelendiğinde batarya yönetim sistemleri üzerine yapılan çalışmaların Şekil 2.3'de görüldüğü gibi 2008 yılından itibaren ciddi bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu çalışmalar hem donanım hem de yazılım üzerine yapılmıştır.

Donanım üzerine yapılan çalışmaların merkezinde aracın güvenlik ihtiyaçlarına ve elektriksel parametrelerine göre tasarım geliştirme faaliyetleri olduğu görülmektedir. Yazılım çalışmalarında ise SD, ŞD, menzil vb. BYS çıktılarının hesaplanmasında kullanılan numerik ve sezgisel yöntemler ayrı ayrı veya tümleşik olarak uygulanmıştır.



Şekil 2.3: BYS yayın sayıları.

2.2 Elektrikli Araçlarda BYS

Batarya teknolojisinin gelişimine paralel olarak bataryaların yönetim ihtiyacı da ortaya çıkmaya başlamıştır. Bunun nedeni ise, elektrokimyasal pillerde kullanılan lityum elementinin tercih edilme sebeplerinin aynı zamanda onu dengesiz ve tehlikeli yapmasıdır. Diğer pil kimyalarında ise hafıza oluşumu veya optimal enerji yönetimi için bir BYS'ye ihtiyaç duyulmuştur. Kurşun asit bataryalar, oldukça güvenli olmaları ve olgunlaşmış bir teknoloji olması sebebiyle özgün bir BYS'ye fazla ihtiyaç duyulmamıştır.

Kurşun asit bataryaların otomotivde, elektrikli araçlarda kullanılabilmesi için verimliliklerinin artırılması gerekliliği yapılan çalışmalarla ortaya koyulmuştur (Kruger & Barrick, 1966). Bu çalışmaların neticesinde, 1960'lı yıllarda kurşun asit bataryaların verimliliklerine etki eden parametrelerin ayrı bir sistem vasıtasıyla gözlemlenerek kontrol edilmesi gerektiği fikri ortaya çıkmıştır (Kruger & Barrick, 1966).

Bu parametreler akım, gerilim, sıcaklık, şarj durumu, elektrolit yoğunluğu ve hücre yaşı olarak belirlenmiştir (Kruger & Barrick, 1966). Bu sayede bir BYS'de bulunması gereken fonksiyonlar netleşmeye başlamıştır. Bu parametrelerin bazıları ölçülürken bazılarının hesaplanması gerekmektedir. 1970'li yıllarda hesaplanması gereken parametreler için bataryaların dinamik karakteristiklerinin çıkarılması çalışmaları yapılmıştır (Taylor & Siwek, 1973).

Kurşun asit bataryalar daha yüksek kapasiteli, bakımı daha kolay yapılabilen ve daha iyi performansa sahip bir batarya teknolojisi 1980 yılında çıkana kadar standart olarak görülmekteydi (Hayden, 1981).

Bugün bildiğimiz şekliyle monolitik silikon entegre devre teknolojisinin ilk patenti 1959'da alınmıştır (Noyce, 1959). Bu muazzam ilerleme, beraberinde sayısız elektronik gelişmeyi getirmiştir. Boyuttaki küçültme ise en önemli atılımlardan birisi olmuştur. Sonraki yıllarda hem taşınabilir teknolojiler hayatımızda yer bulmuş hem de elektronik devrelerin boyutları ciddi bir biçimde küçülmüştür.

1990'lı yıllarda nikel ve lityum tabanlı pil teknolojilerinin olgunlaştığı ve ticarileşerek pazarda yer bulmaya başladığı görülmektedir. Taşınabilir cihazlarda kullanılmak için pil hücresinin parametrelerini ölçerek basit ikazlar verebilen ve özellikle pilin gerilimini belirli bir çalışma zarfında tutabilen, BYS sayılabilecek ilk özelleşmiş tümleşik devreler geliştirilmiştir (Caruthers, 1994; Cates & Richey, 1996; Freeman, 1995; F. Goodenough, 1993, 1996b, 1996a; Jones, 1991; Kerridge, 1993; Maliniak, 1995; Swager, 1995).

Elektrikli araçlar, batarya hücrelerinin verimli ve kontrollü kullanılmasının önemli olduğu uygulamaların başında gelmektedir. Seri üretimi yapılan ilk tam elektrikli araç, 1996 yılında piyasaya çıkan General Motors EV1'dir (Glover & Kimberley, 1996; Johnson, 1999; "Wired Wheels," 1996). EV1 aracı ile kullanılan Valve-Regulated Lead Acid (VRLA) aküleri yani bakımsız veya kapalı akü olarak bilinen akülerle yapılan saha çalışmalarında elde edilen veriler, bir batarya yönetim sisteminin bataryaların verimli bir şekilde kullanılabilmesi için aynı zamanda termal kontrol yapması gerekliliğini ortaya koymuştur (Brost, 1998).

2.2.1 BYS temel fonksiyonları

BMS, elektrikli aracın enerji depolama sistemini yönetmek için birkaç girdiye ihtiyaç duymaktadır. Bu girdilere dayanarak sistemin durumunu analiz edebilmekte ve dolayısıyla yönetebilmektedir. Bu girişlerden bazıları şunlardır: hücre gerilimi, grup gerilimi, toplam gerilim, şarj/deşarj akımı, hücre sıcaklığı, ortam sıcaklığı, termal soğutucu giriş/çıkış sıcaklığı, pedal durumu, gaz kelebeği/fren bobini, ivmeölçer/duman/gaz sensörü değerleri vb.

Bu girişlere göre BYS tarafından üretilen ana çıkışlar; şarj/deşarj/acil durum için ana devre kontaktör kontrol sinyali, ısı kontrolü için elektrikli fan veya ısıtıcı sinyali, dengeleme için kondansatör veya dengeleme direnci, iletişim sinyali, hata sinyali vb. dir. BYS'nin bu girişler ve çıkışlar arasındaki bağıntıyı ortaya koyan fonksiyonları şunlardır:

2.2.1.1 Batarya parametrelerini algılama

Batarya parametrelerinden öncelikle arıza veya aşırı akım/gerilimi önlemek için hücre gerilimleri ölçülür. Bunun yanında hücre sıcaklıkları, toplam gerilim, toplam akım, batarya bölgesinde gaz, duman, izolasyon vb. parametreler algılayıcılar marifetiyle ölçülür.

Batarya parametrelerini algılama, hem batarya hem de aracın güç verilerinin algılayıcılar vasıtasıyla ölçülüp okunmasını ifade etmektedir. Çünkü batarya yönetim sisteminin tüm algoritmaları, giriş bilgisi olarak ölçülen ve/veya hesaplanan verileri kullanmaktadır. Burada uygulama türüne bağlı olmak üzere; doğruluk, örnekleme oranı çok önemlidir.

Örneğin, elektrikli uçak uygulamalarda örnekleme oranları 50 Hz'den fazla iken; elektrikli araç uygulamaları için 1 Hz. örnekleme hızı yeterlidir. (Jossen et al., 1999; X. Zhang et al., 2018).

Bu fonksiyon ile bataryaya ve hücre gerilimleri, bataryaya giren/çıkan akım, ortam sıcaklığı, batarya sıcaklığı vb. değerler ölçümlenmektedir.

2.2.1.2 Batarya durumlarının kestirimi

Durum kestiriminde bataryanın doluluk oranı, sağlık durumu, deşarj derinliği ve işlev durumu kestirimi ölçülen batarya parametrelerine göre hesaplanır. Doluluk oranı ve deşarj derinliği çalışma akımı, gerilimi ve sıcaklığına bağlı olarak kestirimi yapılan durumlardır. Bataryanın sağlık durumu, batarya hücrelerinin uygun olmayan parametreler ile kullanımı ve performans düşüşünün kapsamına göre kestirilir. İşlev durumu ise bataryanın doluluk oranı, sağlık durumu ve pillerin çalışma ortamına göre kestirilir.

Batarya durumunun kestirimi fonksiyonu, bataryanın şarj durumu (State of Charge – SoC), sağlık durumu (State of Health – SoH), enerji durumu (State of Energy – SoE) ve kalan kullanılabilir ömür (Remaining Useful Life – RUL) değerlerinin hesaplanmasını ifade etmektedir.

Batarya durumunun belirlenmesi, batarya yönetim sistemi içindeki elektrik yönetimi için bir giriş değeri olarak kullanılmaktadır. Veri toplama fonksiyonu ile araç ve batarya paketi üzerinde bulunan algılayıcılardan elde edilen veriler kullanılarak SoC, SoH, SoE ve RUL değerleri hesaplanmaktadır.

Şarj durumu (SoC), mevcut batarya kapasitesi ile bataryanın nominal kapasitesi arasındaki orandır ve Denklem 2.2’de sunulmuştur. Burada η_e bataryanın coulomb verimliliğini, $I(t)$ anlık batarya akımını ve C_{nom} bataryanın nominal kapasitesini ifade etmektedir.

$$SoC(t)\% = \left[1 + \frac{\int_0^t \eta_e I(t) dt}{C_{nom}} \right] \times 100 \quad (2.2)$$

Sağlık durumu (SoH), bir hücrenin veya bir bataryanın nominal koşullarına kıyasla durumunun bir performans katsayısı olarak tanımlanabilir. Denklem 2.3’de sunulan SoH, yüzde cinsinden ifade edilir (%100 = fabrika çıkışı teknik özelliklerini tam karşılıyor demektir). Burada, C_{act} bataryanın mevcut kapasitesi, C_{nom} bataryanın nominal kapasitesi ve C_{end} bataryanın sistem gereksinimlerini karşılayamadığı kapasiteyi ifade etmektedir. C_{end} genellikle %80 C_{nom} olarak belirlenmektedir.

$$SoH\% = \frac{C_{act} - C_{end}}{C_{nom} - C_{end}} \times 100 \quad (2.3)$$

SoE, SoC ile bazı benzerlikler taşıyan bir ölçüdür. Fakat tek başına akımı integrale dâhil etmek yerine, SoE batarya voltajını da integrale dâhil etmektedir. Sıcaklık, yaşlanma ve deşarj oranı batarya voltajı davranışına yansıtıldığından, gerilimin Denklem 2.4’de sunulan SoE metriğine dâhil edilmesi, batarya enerjisini SoC'den daha iyi izlemek ve yönetmek için kullanılabilceğini göstermektedir (Hickey & Jahns, 2019; Waag et al., 2014; XT et al., 2014).

Burada η_e bataryanın coulomb verimliliğini, $V(t)$ anlık batarya gerilimini, $I(t)$ anlık batarya akımını ve E_{nom} bataryanın nominal enerjisini ifade etmektedir.

$$SoE(t)\% = \left[1 + \frac{\int_0^t \eta_e V(t) I(t) dt}{E_{nom}} \right] \times 100 \quad (2.4)$$

Kalan kullanılabilir ömür (RUL), belirli bir anda kalan faydalı ömür veya batarya kapasitesi kabul edilemez bir düzeye ulaşmadan önce kalan kullanılabilir hizmet süresidir. RUL, belirli bir batarya için kalan şarj ve deşarj döngüsü sayısı ile ölçülür (L. Chen et al., 2020; Chinomona et al., 2020).

Denklem 2.5’de sunulan RUL ifadesinde, β batarya ömrü sonunda ulaşılacak şarj/deşarj döngü sayısını ve α mevcut şarj/deşarj döngü sayısını ifade etmektedir.

$$RUL = \beta - \alpha \quad (2.5)$$

Elektrik yönetimi fonksiyonu, akım, gerilimler, sıcaklıklar, hesaplanan SoC, SoH, SoE ve RUL değerlerini kullanan bir algoritmayı ifade eder. Bu fonksiyon, şarj/deşarj süreçlerini ayrı ayrı kontrol etmek, güvenlik yönetimini sağlamak ve dengeleme için kullanılmaktadır.

Ayrıca, termal kontrol için şarj ve deşarj süreçlerini sınırlandırmaktadır. Deşarj sınırlaması ve şarj kontrol süreci büyük ölçüde kullanılan batarya kimyasına bağlıdır.

2.2.1.3 Araç üstü arıza tespiti

Algılayıcı arızası, kontaktör arızası, iletişim arızası, batarya arızası, aşırı gerilim (aşırı şarj), düşük gerilim (aşırı deşarj), aşırı akım, yüksek sıcaklık, düşük sıcaklık, gevşek bağlantı, yanıcı gaz konsantrasyonunun aşılması, izolasyon arızası, dengeleme arızası gibi arızaların sistem tarafından algılanan parametreler yardımıyla tespit edilmesidir.

2.2.1.4 Batarya güvenliği kontrolü ve alarmı

BYS tarafından fazla şarj durumunda yüksek gerilim kontrolü, kısa devre veya arıza durumunda yüksek akım kontrolü, bataryanın verimli çalışabilmesi için ise termal kontrol yapılmaktadır.

Aşırılık durumlarında arızalar teşhis edildiğinde, araç kontrol ünitesi veya şarj cihazı iletişim ağı üzerinden bilgilendirilecek ve arızaları düzeltici/önleyici yönde işlem yapmaları sağlanmaktadır. Bunun için deşarj derinliğini takip etmeli ve derin deşarja karşı bataryayı koruyabilmelidir. Aynı ayrı batarya hücrelerinin ařırđ deşarja koruyabilmelidir.

BYS, limit dışı gerilim, akım ve sıcaklık durumlarına karşı bataryayı bir bütün olarak koruyabilmelidir. Bir çarpışma ve/veya elektrolit gaz sızıntısı durumunda bataryayı acil durum kontaktörleri vasıtasıyla sistemden otomatik olarak ayrabilmelidir.

2.2.1.5 Dengeleme

Her batarya hücresinin algılanan parametrelerine göre, BYS hücreler arasındaki şD'nu olabildiğince birbirine yakın hale getirmek için pasif veya aktif dengeleme yöntemlerini kullanabilir. Bu yöntemler kendi içlerinde pasif dengeleme ve aktif dengeleme olarak sınıflandırılabilirler.

Pasif dengeleme

Bir dengeleme direnci üzerinden bataryadaki şarj durumu yüksek olan hücre/hücrelerin deşarj edilerek bataryanın tümünden tekrar şarj edilmesini içeren iteratif yöntemdir (Kivrak et al., 2020). Sabit şönt direnci metodu ve anahtarlamalı şönt direnci metodu olarak ikiye ayrılmaktadır.

Aktif dengeleme

Bu yöntem, enerjiyi tüm hücreler dengelenene kadar daha yüksek şarj hücresinden daha düşük şarj hücresine aktaran kapasitör veya indüktör gibi depolama elemanlarını kullanan bir dengeleme tekniğidir (Kauer et al., 2017; Pham et al., 2016).

Tek katman kapasitörlü, anahtarlamalı kapasitörlü, çift katmanlı anahtarlamalı kapasitörlü, tek katman indüktörlü, çok katman indüktörlü, tek katman transformatörlü, tek katman manyetik çekirdekli transformatörlü, çok katman manyetik çekirdekli transformatörlü, ve transistör anahtarlamalı yeniden yapılandırılabilir olarak farklı metotlar kullanılmaktadır (Ci et al., 2016; Han et al., 2019; S, 2020).

2.2.1.6 Şarj kontrolü

Kendi bataryalarının özelliklerine ve şarj cihazının güç seviyesine bağlı olarak BYB, bataryaları şarj etmek için şarj cihazını kontrol edebilmektedir. Bunu şarj kablosu içerisinde yer alan bir iletişim kablosu ve buna uygun protokol yardımı ile gerçekleştirmektedir.

2.2.1.7 Termal yönetim

Batarya paketindeki sıcaklık dağılımına ve şarj/deşarj gereksinimlerine göre BYB, ısıtmayı mı soğutmayı mı başlatacağına; ısıtma gücü ve soğutma gücüne karar verir. Buna göre ilgili sisteme komut gönderir.

Termal yönetim fonksiyonu, yüksek güçlü uygulamalar için vazgeçilmez bir fonksiyondur. Termal yönetim sisteminin görevleri, hücreler arasında sıcaklık eşitlemesi, bataryanın soğutulması ve bazı durumlarda bataryanın ısıtılmasıdır. Batarya hücreleri belirli bir sıcaklık aralığında en yüksek performansı göstermektedir. Sıcaklık fazla artar veya azalırsa ki soğuk havalarda karşılaşılan durum budur; termal yönetim fonksiyonu sayesinde batarya optimal çalışma sıcaklığı aralığında tutulmaktadır. Bu da bataryadan alınabilecek en yüksek verimi alabilmek için kullanılır. Bunu sağlamak için sıvı veya hava fanlı sistemler kullanılmaktadır.

Elektrolitin ve plastik hücre muhafazasının ısıl direnci oldukça yüksek olduğu için batarya hücrelerinin içinden dışarıya ısı transferi termal yönetimin en büyük sorunudur. Özellikle şarj/deşarj süresince batarya hücrelerinin optimal ısı zarfında olmaması geri döndürülemez kapasite kaybına, yanığa ve hatta patlamaya yol açabilir (Mahamud & Park, 2011; Zhuang et al., 2021).

2.2.1.8 İletişim

BYB'yi bir araçta sökmek uygun olmadığı ve bu arada aracın ağ işlevlerine sahip olması gerektiği için kalibrasyon, izleme, otomatik kod oluşturma, program indirme, güncelleme işlemlerinin genellikle herhangi bir sökme işi olmadan yapılması arzu edilmektedir.

Genellikle ağ protokolü olarak İletişim fonksiyonu, batarya yönetim sistemi hem bataryanın tüm donanımlarıyla hem de araç üzeri haberleşme sistemi ile doğrudan haberleşebilmelidir. Bunun için günümüzde yaygın olarak batarya donanımları arasında I²C, SPI gibi protokoller kullanılırken; otomotivde yaygın kullanılan Kontrolör Alan Ağı (CAN) kullanılmaktadır (*ISO 11898 Road Vehicles — Controller Area Network (CAN)*, 2022; Richards, 2002; Song et al., 2018)

2.2.2 BYS topolojileri

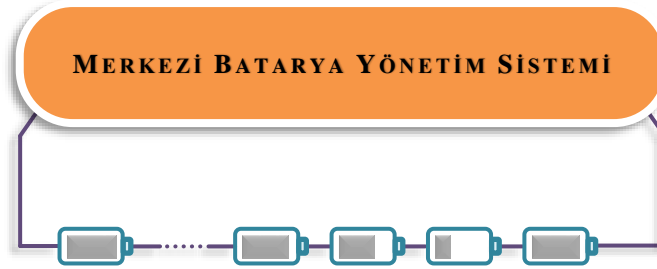
Batarya yönetim sistemleri temel olarak dört temel sınıfta gruplanabilir. Birincisi tüm işlemlerin tek merkezde yapıldığı merkezi topolojidir (Bonfiglio & Roessler, 2009; Bowkett et al., 2013; A. Zhang et al., 2017). Bu durumun tam tersi de mümkündür. Bu da merkezi olmayan topoloji olarak adlandırılmaktadır (Faika et al., 2018; Frost & Howey, 2018).

Üçüncüsü ise algılayıcıların ve işlemcilerin farklı ünitelerde yer aldığı dağıtık topolojidir (Čermák & Bartl, 2014; Karavas et al., 2015; Mahmood et al., 2015; Pavić et al., 2018; T. A. Stuart & Zhu, 2011). Son grup ise her modülün her işi yapabildiği modüler topolojidir (C. Kim et al., 2011; Rahimi-Eichi et al., 2013).

2.2.2.1 Merkezi topoloji

Tüm işlemlerin birkaç kabloyla batarya veya batarya hücrelerine bağlanan tek bir modüle entegre edilerek yapılan sistemler merkezi batarya yönetim sistemi olarak adlandırılmaktadır (Andrea, 2010). Hatta tek bir entegre devrenin tüm batarya yönetim işlevlerini yerine getirebildiği bazı uygulamalar da bulunmaktadır (Wan et al., 2009).

Şekil 2.4’de sunulan bu topolojinin dezavantajı, çok sayıda uzun kablo bağlantısını içermesi sebebiyle kısa devre riskini önemli ölçüde artırmasıdır. Ayrıca, bağlantılar gevşeyebilmekte ve girişler kolaylıkla karıştırılabilmekte veya yanlış bağlanabilmektedir. Bu da hatalara karşı duyarlılığı önemli ölçüde artırmaktadır (Reindl et al., 2020).

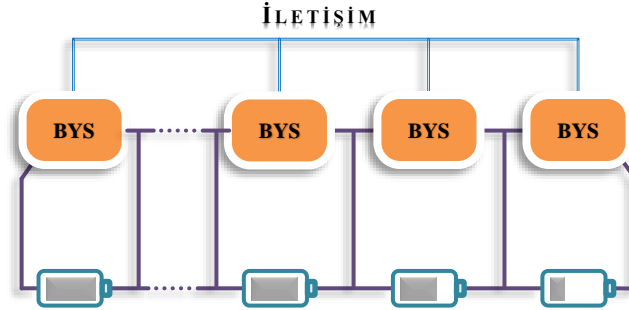


Şekil 2.4: Merkezi batarya yönetim sistemi topolojisi.

2.2.2.2 Merkezi olmayan topoloji

Merkezi kontrol yapılarının dezavantajlarının üstesinden gelmek için, batarya yönetim sistemlerinin merkezi olmayan bir yapıya dönüştürülmesi uygun bir seçenek olarak görülmektedir. Bu tip merkezi olmayan batarya yönetim sistemlerinde tüm işlevsellik Şekil 2.5’de sunulduğu gibi yerel ve özerk birkaç eşit birimden oluşmaktadır.

Ayrı BYS birimleri birbirlerinden bağımsız olarak çalışabilmektedir. Hatta bazı merkezi olmayan batarya yönetim sistemlerinde birimler arasında iletişim gereksinimi ortadan kalkmıştır (Faika et al., 2018; Frost & Howey, 2018).

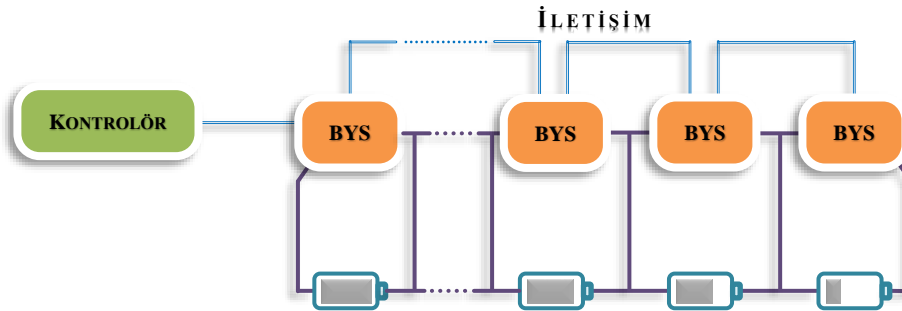


Şekil 2.5: Merkezi olmayan batarya yönetim sistemi topolojisi.

2.2.2.3 Dağıtık topoloji

Dağıtık batarya yönetim sistemlerinde, tek tek batarya hücreleri veya batarya grupları Şekil 2.6'da sunulduğu gibi ayrı BYS yardımcı modülüyle kontrol edilmektedir. BYS yardımcı modülleri iletişim, dengeleme ve çalışma parametrelerinin ölçülmesini ve kontrolünü sağlamaktadır.

Bu topolojideki BYS'lerde, her bir batarya hücresinin çalışma koşullarının gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve raporlanması için, birkaç adet yardımcı ve bir adet ana BYS modülünden oluşmaktadır (Brahma et al., 2000; Čermák & Bartl, 2014; Feng et al., 2016; Gutmann, 1999; Jinrui et al., 2006; Linlin et al., 2017; Qiang et al., 2006; Souza et al., 2019).

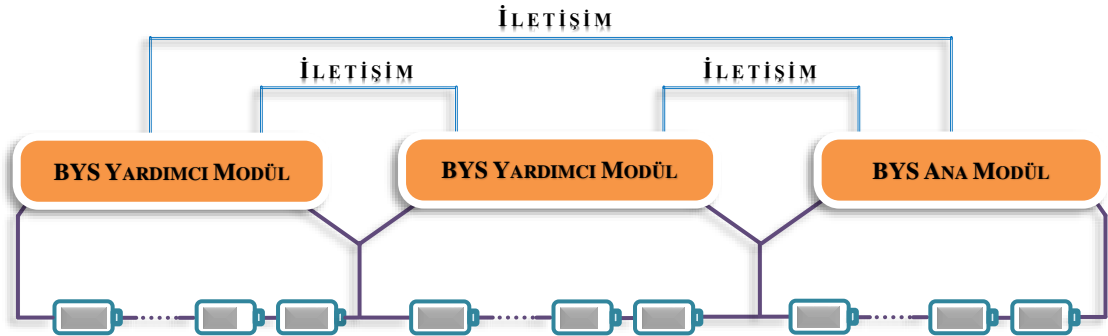


Şekil 2.6: Dağıtık batarya yönetim sistemi topolojisi.

2.2.2.4 Modüler topoloji

Modüler batarya yönetim sistemleri, merkezi BYS'ye benzer şekilde ayrı ayrı bataryalara veya batarya hücrelerine ayrı ayrı bağlanan kablolarla donatılmış birkaç özdeş modülden oluşmaktadır. Şekil 2.7'de sunulan bu topolojide, genellikle modüllerden biri yönetici rolüne atanır veya ayrı bir modül yönetici görevi görür.

Ana modül, tüm batarya paketini kontrol etmektedir ve sistemin geri kalanıyla iletişim kurarken, diğer modüller yalnızca ölçülen verileri kaydederek ana üniteye iletmektedir (C. Kim et al., 2011; Rahimi-Eichi et al., 2013).



Şekil 2.7: Modüler batarya yönetim sistemi topolojisi.

2.3 BYS uygulamaları

BYS'lerin elektrikli kara, deniz, hava ve uzay araçlarında kullanım zarureti ve uygulama çeşitliliği sebebiyle ele alınması oldukça zor bir konudur. Temel olarak elektrikli araçlardaki farklı BYS uygulamalarına örnek çalışmalar literatürden derlenerek sunulmuştur.

2.3.1 Elektrikli raylı sistemlerde BYS

Raylı sistemler alanında elektrikli trenler yaygın kullanılan bir teknoloji olmasına rağmen batarya gücü ile çalışan raylı sistemler oksijen gerektirmediği ve gaz salınımı yapmadıkları için genellikle madenlerde kullanılmaktadır. Bu bataryalı elektrikli araçlara örnek olarak halatlı kepçeler, yük taşıma kamyonları, çekici kamyonlar, matkaplar, servis araçları, birincil kırıcılar, kepçeler, ayna sondaj makinesi, küçük kamyonlar, lokomotifler, kaya bulonlama teçhizatı, konveyörler verilebilir.

Bunların dışında bataryalı patlayıcı yükleyiciler ve bataryalı LED ışık kuleleri madenlerde kullanılmaktadır (Ertugrul et al., 2020). Madenlerde çalışmak üzere tasarlanmış elektrikli raylı araçlara özel batarya yönetim sistemleri de geliştirilmiştir (Huang et al., 2021).

Elektrikli raylı sistemlerde de en önemli sorunlardan birisi araç üzerine konuşlandırılacak enerji depolama sisteminin boyutudur. Raylı elektrikli sistemler konusunda da batarya yönetim sisteminin kontrol stratejilerinin, enerji depolama sisteminin boyutuna olan etkisinin analiz edilerek optimum enerji depolama sistemi kapasitesi üzerine çalışmalar yapılmıştır (Zhu et al., 2017).

Elektrikli hafif raylı araçlar konusunda enerji depolama sistemi sadece süperkapasitörlerden teşkil edilmiş raylı sistem araçları konusunda hücre dengelemesi üzerine çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada geliştirilmiş bir itme-çekme dönüştürücüsünden türetilen ve yüksek akım kapasitesine sahip voltaj dengeleme devresi ile hücre dengeleme süresini kısaltmak ve hücre dengeleme verimliliğini artırmak için tahmin edilen hücre davranışlarına dayalı bir voltaj dengeleme algoritması önerilmiştir (L. Li et al., 2017).

Tüm elektrikli araçlarda olduğu gibi elektrikli raylı araçlarda da iki türlü hibritleşme söz konusudur. Bunlardan ilki çekiş sistemi bakımında hibrit olmasıdır. Genel olarak içten yanmalı bir motor ile elektrik motornun bir arada kullanıldığı sistemlerdir. Diğeri ise enerji depolama sistemi bakımından hibritleşmedir. Burada da çekiş sistemi tamamen elektrik olmasına karşın enerji depolama sistemi tek çeşit kaynak yerine farklı enerji depolama kaynaklarını bir arada kullanmaktadır.

Hibrit enerji depolama sistemleri konusunda, süperkapasitör, yakıt hücresi ve batarya kombinasyonları ile çalışan enerji depolama sistemleri için enerji yönetimi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda enerji verimliliğini arttırmak ve dolayısıyla işletme maliyetlerini düşürmek için optimal enerji depolama sistemi boyutu ve enerji yönetim algoritmaları sunulmuştur (Cheng et al., 2018, 2017; Da Moraes et al., 2019; F. Gao et al., 2019; V. Herrera et al., 2016; V. I. Herrera et al., 2016; Kang et al., 2020; Krastevm et al., 2015; Peng et al., 2020; Sarma & Ganguly, 2020).

Bu şekilde oluşturulan hibrit sistemlerde enerji ihtiyacının frekansına göre; düşük frekanslarda batarya, orta frekanslarda stabilizasyon sağlan yakıt hücreleri ve yüksek frekansta ise süperkapasitörler kullanılmaktadır. Yapılan bir hibrit enerji depolama sistemi çalışmasında, süper kapasitör ve kesintisiz güç kaynağı (UPS) metro treninin darbe gücünü yumuşatmak için kullanılmıştır. Bu yöntem ile şebeke voltajında meydana gelen büyük dalgalanmalar, frenleme enerjisi israfı ve istasyonda UPS'lerin düşük kullanımı gibi sorunları ortadan kaldırmaya yönelik olarak hibrit enerji depolama sistemine dayalı yeni bir kentsel demiryolu taşımacılığı mimarisi önerilmiştir (Liu et al., 2019).

Yapılan bir başka çalışmada ise hızlı trenler için yeterli enerji taşıyamayan hatlarda dahi hızlı trenlerin kullanılmasına imkân veren batarya ile desteklenmiş bir elektrikli tren enerji yönetim sistemi sunulmuştur (Calderaro et al., 2015).

Bunun yanında dizel motor ile çalışan fakat batarya ile desteklenen hibrit raylı araçlar konusunda da enerji yönetimi ve kontrolü üzerine çalışmalar mevcuttur (Wilson et al., 2016).

Doğu Japonya demiryolu şirketi ile Hitachi firmasının yaptığı ortak bir çalışmada, elektriksiz demiryolu hattında enerji tasarrufu ve çevresel yük azalması talebini karşılamak için yeni nesil hibrit demiryolu sistemi önerilmiştir (Nomoto et al., 2006).

Demiryolu sistemleri ile ilgili yapılan batarya yönetim sistemi çalışmaları oldukça farklı teknolojik çözümler de sunmaktadır. Buna örnek olarak tren raylarındaki ısı enerjisini yakın mesafede yerleştirilmiş algılayıcıları beslemek için kullanan, termoelektrik jeneratör ve lityum bataryadan meydana gelen bir sistemin batarya yönetim sistemi ve sistem tasarımı verilebilir (M. Gao et al., 2019; H. Li et al., 2020).

2.3.2 Elektrikli deniz araçlarında BYS

Elektrikli deniz araçlarını küçük ölçekli elektrikli botlardan uluslararası taşıma yapan elektrikli gemilere kadar farklı ölçeklerde incelemek mümkündür. Bu konuda yapılan derleme çalışmaları genel olarak sıfır emisyonlu sürdürülebilir taşımacılık, bununla bağlantılı olarak limanların elektrikli gemilere uygun hale getirilmesi ve bunun şebekeye etkileri başlıkları altında incelenmiştir (Anwar et al., 2020; Fang et al., 2020; Groppi et al., 2021; Jeong et al., 2020; Kumar & Zare, 2019; Ma et al., 2021; Mutarraf et al., 2018; Nguyen et al., 2020; Nuchturee et al., 2020; Pfeifer et al., 2020).

Elektrikli deniz araçlarının normal elektrikli araçlara göre daha yüksek güç ihtiyaçları vardır. Bunu karşılayabilmek adına bataryada seri bağlı hücre sayısının artırılması gerekmektedir. Çok sayıda seri bağlı hücre olduğunda ise bu hücreler arasında gerilim dengelemesi problemiyle karşılaşılmaktadır. Elektrikli deniz araçlarındaki bu probleme çözüm getirmek için yılında yapılan bir çalışmada seçici anahtar matris tasarlanarak tüm modüller eşit gerilim durumuna ulaşana kadar en düşük gerilimli modüle ekstra elektrik enerjisi pompalanarak dengeleme yapılması önerilmiştir (Lin et al., 2013).

Elektrikli deniz araçlarında, elektrikli kara araçlarından farklı olarak hibrit enerji sistemleri için fotovoltaik hücreler de kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan bir çalışmada insansız bir batimetri (su, deniz, göl ve okyanus tabanlarının derinlik ölçmek suretiyle topoğrafik ölçümlerinin yapılması) görevleri için bir elektrikli insansız araç tasarlanmıştır. Bu araç foto voltaik hücrelerden ve bataryadan oluşan bir plug-in hibrit tasarıma sahiptir. Çalışmada önerilen batarya yönetim sistemi ile günlük yedi saat görev yapacak şekilde enerji yönetimi optimal hale getirilmiştir. Çalışma sonucunda aracın güneşli günlerde şarja bağlanmasına gerek kalmadan görevini tamamlayabildiği belirtilmiştir (Makhsos et al., 2018).

Özellikle taşımacılık alanında kullanılan gemilerin kütleleri göz önüne alındığında hızlanma ve/veya yavaşlama esnasında yük değişimleri büyük dalgalanmalar göstermektedir. Elektrikli yük gemilerinde bu durum büyük enerji dalgalanmalarına sebep olmaktadır. Bunu kompanse edebilmek için de hibrit enerji depolama sistemleri önerilmektedir. Bu konuda yapılan bir çalışmada, ana güç kaynağı olarak dizel jeneratör kullanan bir geminin ön ve arka kısmına yerleştirilen elektrikli iticiler yerleştirilmiştir.

Elektrikli iticilerin yük dalgalanmasını dengelemek için batarya ve süperkapasitörlerden meydana gelen hibrit bir enerji depolama sistemi kullanılmıştır. Böylece, talep edilen enerjideki dalgalanmalarda yüksek frekanslar için süperkapasitörler görev yaparken orta frekanslar için LiFePO₄ batarya, düşük frekanslar için dizel jeneratör görev yapmaktadır. Bu şekilde ayrı frekanslarda çalışan enerji depolama sistemi sayesinde enerji talebi gerçek uygulamalarda sık sık değiştiği için yük akımının profilini önceden bilmeden dizel jeneratörün yük değişimlerinin etkilerini azaltmayı sağlamaktadır (Bellache et al., 2018).

Bir başka çalışmada ise değişken devirli iki dizel jeneratör ve batarya kullanılarak hibrit bir enerji depolama sistemi önerilmiş ve bu tasarımın dizel jeneratörlerde yakıt verimini arttırdığı tespit edilmiştir (Zhou et al., 2017).

Günümüzde ise elektrikli deniz araçlarında enerji yönetimi konusu bambaşka bir hal almıştır. Enerji yönetimi daha gelişmiş yöntemlerle yapılmaktadır. Bir çalışmada batarya ve dizel jeneratör ile donatılmış bir rıhtımdaki elektrikli geminin ana ve yardımcı motorları kapalıyken kıyıda elektrik enerjisi sağladığı durumları da göz önüne alan ve çok amaçlı pekiştirmeli derin öğrenme yöntemini kullanan bir batarya yönetim sistemi tasarlanmıştır (Hasanvand et al., 2020).

Bir başka çalışmada ise sabit güç yüklerini besleyen dc-dc dönüştürücüler için akıllı tek girişli kayan kipli denetime dayalı tip-2 bulanık mantık denetleyicisi önerilmiştir (Khooban et al., 2020).

Elektrikli denizaltı araçları yeni bir disiplin olduğu için bu araçlar için tasarlanan batarya yönetim sistemleri de başlangıç aşamasında olduğu söylenebilir (B. Wang et al., 2021). Bu nedenle, günümüzde elektrikli denizaltı çalışmalarında batarya yönetim sistemlerinin alt fonksiyonlarının tanımlanması ve bu fonksiyonların iyileştirilmesi çalışmaları yapılmaktadır.

2.3.3 Diğer uygulamalar ve yöntemler

Zaman içerisinde batarya yönetim sistemi fonksiyonlarında kullanılan yöntemler de gelişmektedir. 2021 yılına gelindiğinde BYS'ler batarya paketi içerisinde yer alan paralel bağlı hücrelerden bir tanesinin arızalı olup olmadığını anlayacak kadar gelişmiş yapay sinir ağlarına sahip olmuştur (Lumertz et al., 2021).

Dengeleme konusunda, batarya dinlenme halindeyken ve aktif durumda çalışırken batarya hücreleri arasındaki denge farkını azaltma çalışmaları yapılmıştır (Ziegler et al., 2021). Şarj ve sağlık durumunu daha doğru tahmin etmek için gelişmiş şarj durumu ve sağlık durumu kestirim algoritmaları üretilmiştir (Singirikonda & Obulesu, 2021). Günümüzün en önemli teknolojilerinden birisi olan büyük veri de batarya yönetim sistemlerine dâhil edilmiştir (S. Li & Zhao, 2021).

Elektrikli hava araçlarında geri kazanılan enerji, uçuş hızına bağlı olduğundan, havacılık alanındaki güç dinamiği elektrikli kara araçlarındaki ile karşılaştırıldığında zorludur. Bu da batarya yönetim sisteminin çok daha uç koşullarda çok daha iyi kestirim yapmasını zorunlu kılar (Hashemi et al., 2021).

Uydularda kullanılmak üzere zorlu koşullarda çalışabilen batarya yönetim sistemleri de geliştirilmiştir (Aung et al., 2020).

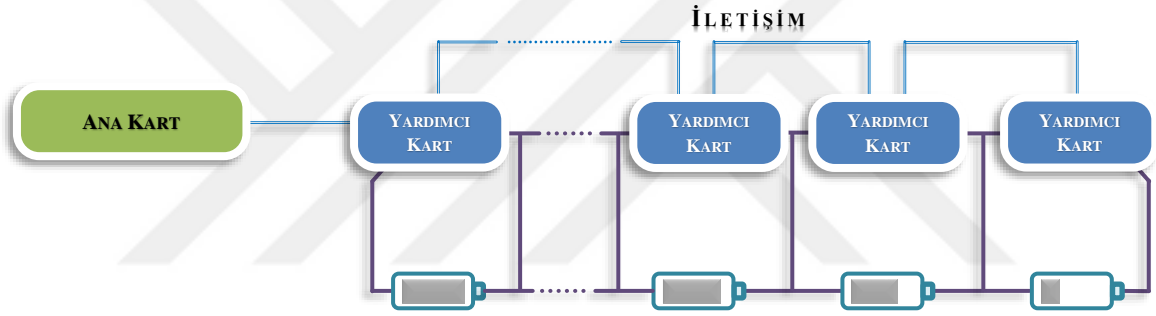
Özetle BYS'ler, günlük hayatımızda yer bulan en küçük elektrikli cihazdan şebeke ölçeğinde, elektrik dağıtım şebekelerini destekleyen devasa batarya bloklarına kadar kendisine her ölçekte uygulama alanı bulabilmektedir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Geliştirilen BYS'nin Topolojisi

Batarya Yönetim Sistemlerinde farklı topolojiler kullanılmaktadır (Dikmen & Karadağ, 2021d). Bu çalışmada Şekil 3.1'de sunulan dağıtık topoloji tercih edilmiştir. Dağıtık batarya yönetim sistemlerinde her bir batarya hücresi, grubu veya hücresine bağlanan, bunların ölçüm ve kontrolünü sağlayan yardımcı modüllerden ve yardımcı modellerle tüm sistemi kontrol eden bir ana modülden oluşmaktadır.

Ana modül yönetici tüm batarya paketlerini kontrol ederken, yardımcı modüller sadece bağlı oldukları gruptan sorumludurlar. Ana modül, sistemin geri kalanıyla iletişim kurarken, yardımcı modüller sadece ölçülen verileri kaydetmek ve ana üniteye iletmekle yükümlüdürler.

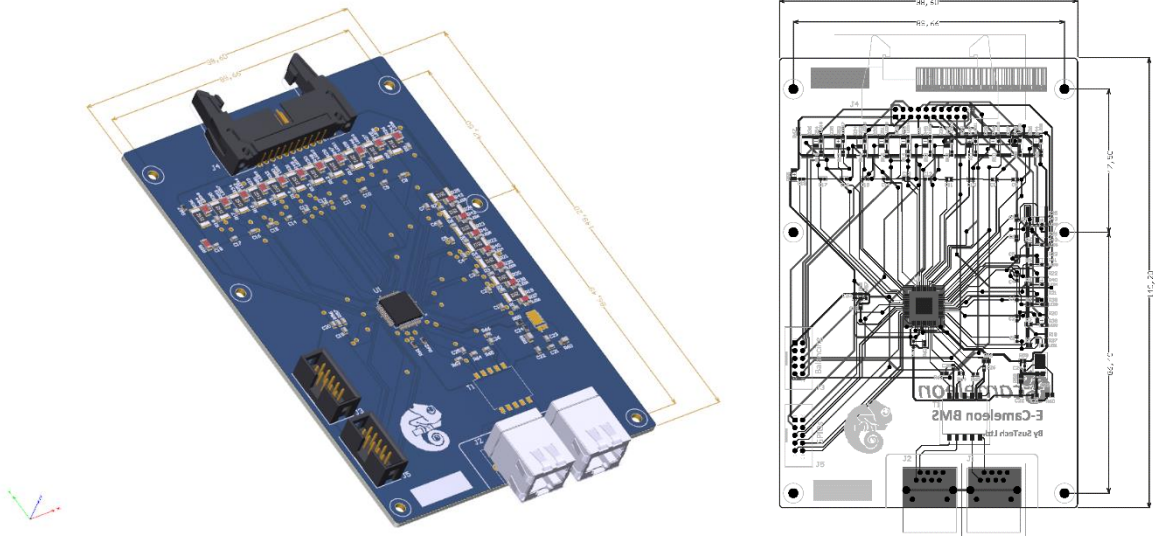


Şekil 3.1: Geliştirilen BYS için tercih edilen topoloji.

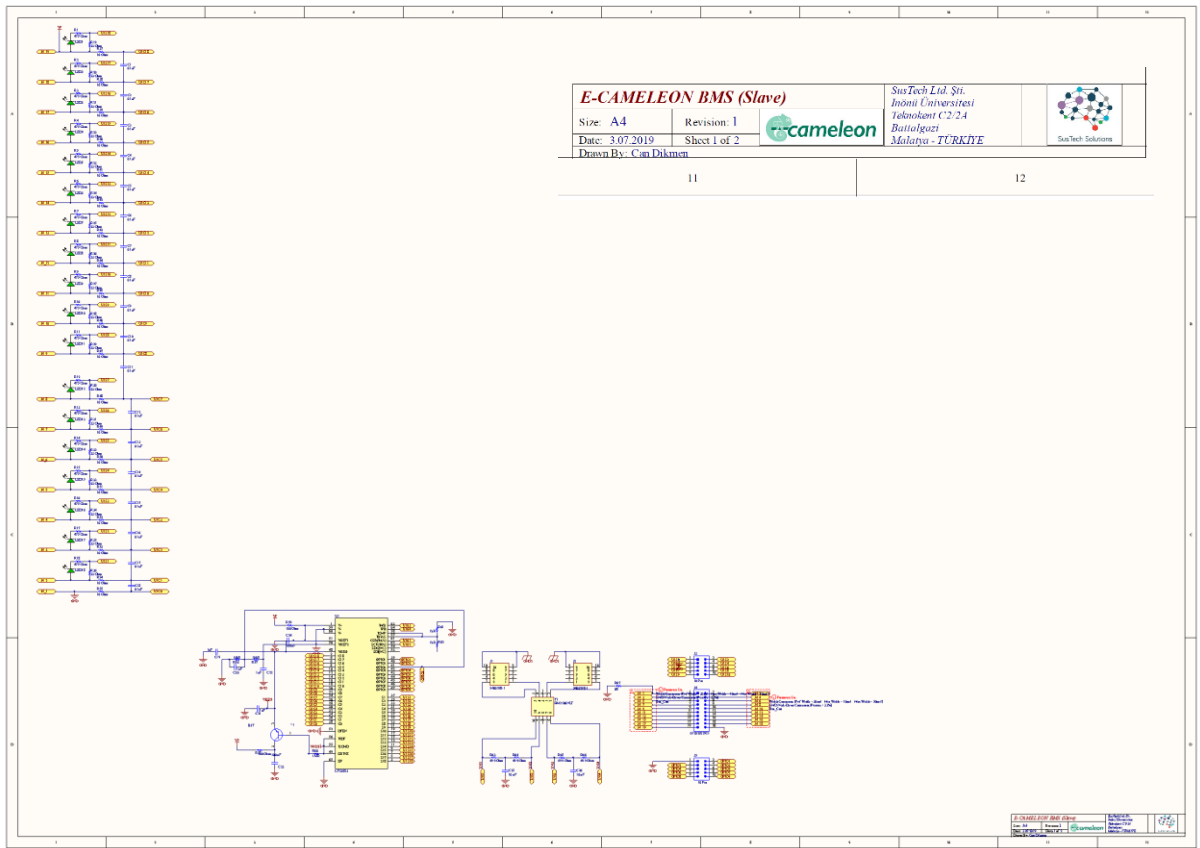
3.2 ALTIUM İle Elektronik Devre Kartı Tasarım

BYS donanımı için gereken elektronik devre kartlarının tasarımları ilk sürümünde Altium Designer yazılımının öğrenci lisansı satın alınarak gerçekleştirilmiştir. Altium Designer ilk olarak 2005 yılında, o zamanlar Protel Systems Pty Ltd olarak bilinen Altium firması tarafından piyasaya sürülmüştür. Kökleri, şirketin 1985 yılında piyasaya sürdüğü Protel PCB olarak bilinen DOS tabanlı PCB tasarım aracına kadar uzanmaktadır. Günümüzde profesyonel devre kartı tasarımı için en yaygın kullanılan yazılımlardan bir tanesidir (*Altium Designer*, 2022).

Altium Designer yazılımının baştan öğrenilip kart çizimlerinin tamamlanması yaklaşık olarak beş ay sürmüştür. Yapılan çalışmaya örnek olarak Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de yardımcı kart için devre şeması ve baskı devre 3D görselleri sunulmuştur.



Şekil 3.2: Yardımcı kart tasarımının örnek kart çizimi ve 3D görünümü.



Şekil 3.3: Yardımcı kart tasarımının örnek şematik çizimi.

3.3 Programlanabilir DC Yük

3.3.1 Donanım

Tayvan menşeli Prodigit firmasının ürettiği 3350F programlanabilir DC yük 60V, 120A ve 1200W olarak sınıflandırılmıştır. Bu elektronik yük dört farklı modda çalışabilmektedir. Bunlar CC, CV, CR ve CP modlarıdır. Sırasıyla sabit akım, sabit gerilim, sabit direnç ve sabit güç olarak açıklanabilir. Çalışma düzeneği Şekil 3.4’de sunulmuştur.

Bu çalışmada pilin iki farklı yük direncine sırayla bağlanması ile çalışan bir algoritma kullanıldığı için sabit direnç modunda çalıştırılmıştır. Cihaz, masaüstü bilgisayara USB üzerinden ile bağlanmaktadır ve bölüm 3.3.2’de detayları ile açıklanan, geliştirilen yazılım ile kontrol edilmiştir.

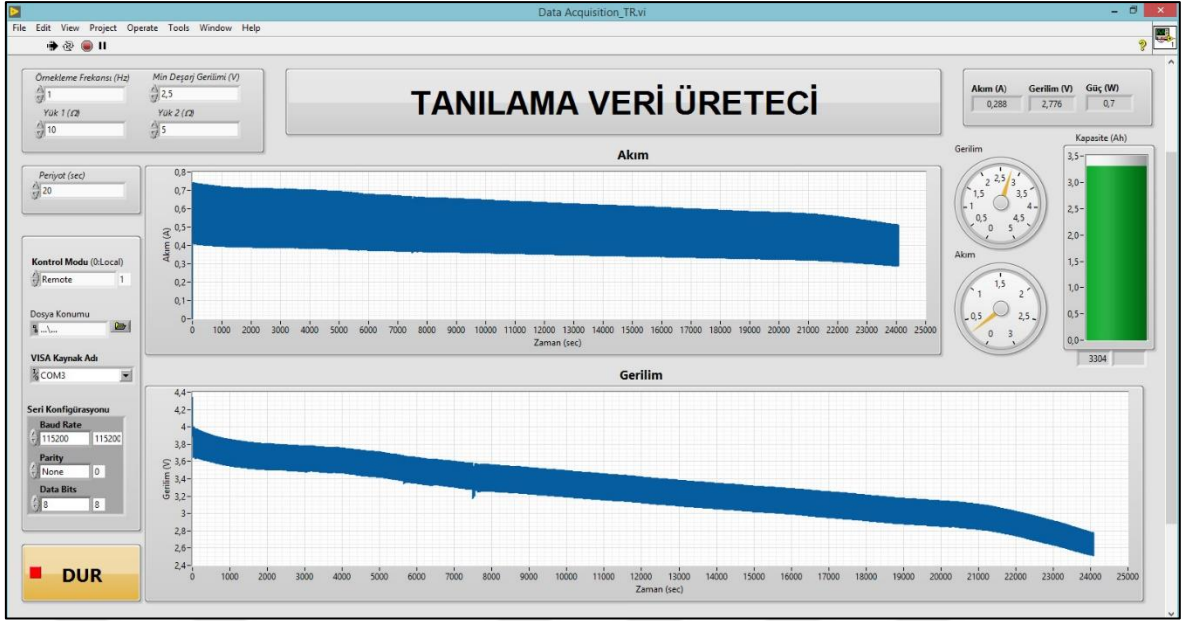


Şekil 3.4: Programlanabilir DC yük.

3.3.2 DC yük için LabVIEW’de geliştirilen yazılım

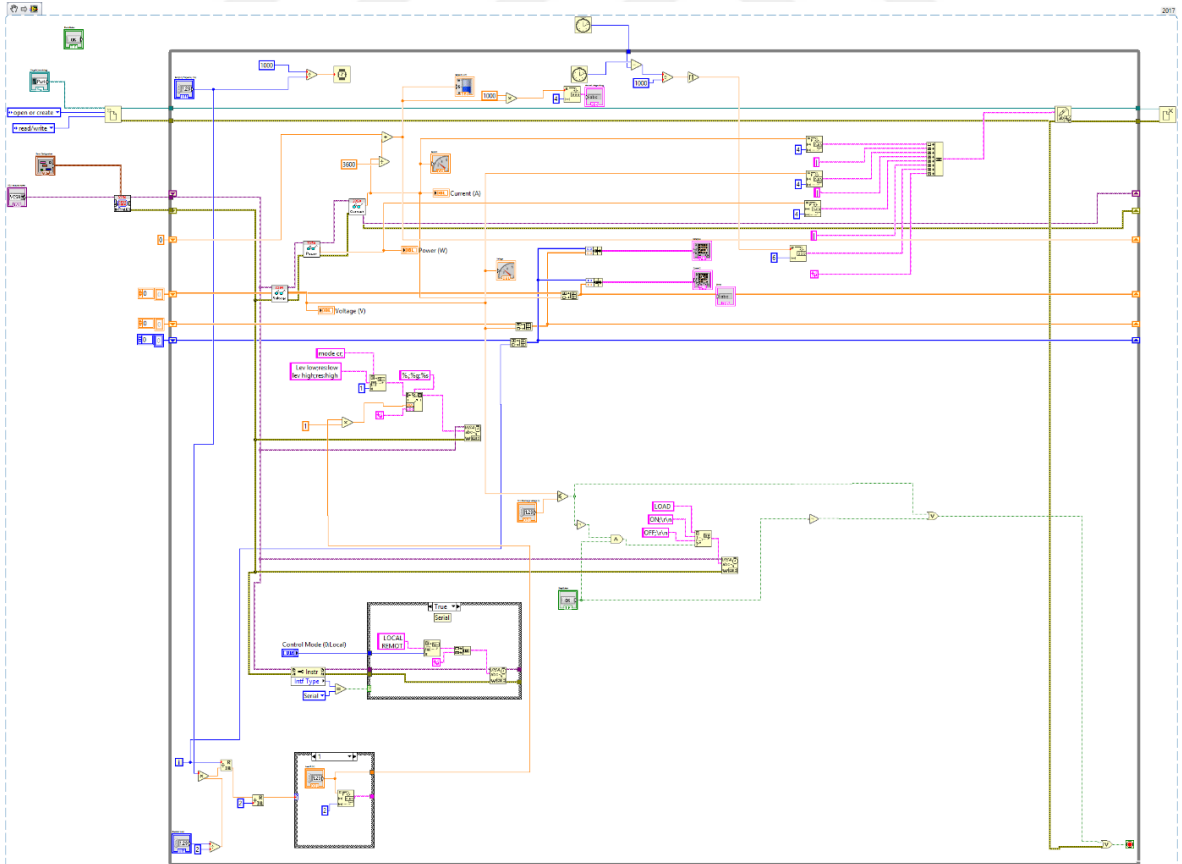
Prodigit 3350F Programlanabilir DC yükünü kontrol edebilmek için National Instruments firması tarafından geliştirilen ve laboratuvar cihazlarının kontrolünde kullanılan LabVIEW ortamında geliştirilen yazılım kullanılmıştır.

Esasen LabVIEW blok programlama mantığı ile çalışan, mühendislerin otomatik araştırma, doğrulama ve üretim test sistemleri geliştirmek için kullandıkları bir grafik programlama ortamıdır (National Instruments, 2022).



Şekil 3.5: LabVIEW’de geliştirilen yazılım arayüzü.

LabVIEW’de yazılım önce bloklar halinde oluşturulmakta ardından her bir bloğun arayüz görünümü ve işlevi tanımlanmaktadır. Geliştirilen yazılımın arayüz görüntüsü Şekil 3.5 ve blok görüntüsü Şekil 3.6’da sunulmuştur.



Şekil 3.6: LabVIEW’de geliştirilen yazılım.

3.4 Kullanılan Piller

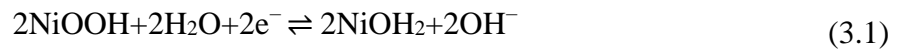
Çalışmada kullanılan pilleri piyasada bulunan diğer standart pilleri gibi IEC 60086 ve ANSI C18.1 standartları ile belirlenen adlandırma ve etiketlemelere sahiptirler (ANSI, 2021; IEC, 2022). Bu bağlamda piller kimyaları, paketlenme şekilleri ve boyutları ile ilişkili olarak etiketlenmektedirler (IEC, 2022). Örnek olarak NiCd AA; pilin Nikel Kadmiyum kimyaya sahip olduğunu ve 14.5 x 50.5 mm boyutlarında olduğu anlamına gelmektedir. Ya da NCA 18650; lityum nikel – kobalt - alüminyum oksit kimyaya sahip 18 mm çapında ve 65 mm yüksekliğinde olduğunu ifade etmektedir (IEC, 2022).

3.4.1 Nikel kadmiyum piller (NiCd)

Elektrot olarak nikel oksit hidroksit ve metalik kadmiyum kullanan şarj edilebilir bir pil türüdür. Diğer şarj edilebilir pil türleri ile karşılaştırıldığında, makul bir kapasite ile düşük sıcaklıklarda iyi bir çevrim ömrü ve performans sunmaktadırlar.

Ancak asıl önemli avantajları yüksek deşarj akımlı uygulamalarda bile tam kapasitelerini sunabilmeleridir. Bununla birlikte, üretildikleri malzemeler kurşun-asit bataryalara kıyasla daha yüksek maliyetlidir. NiCd pil hücrelerinin kendi kendine deşarj oranları da yüksektir (Omar et al., 2014).

Negatif elektrot reaksiyonu,



Pozitif elektrot reaksiyonu,



3.4.2 Nikel-metal hidrit piller (NiMH)

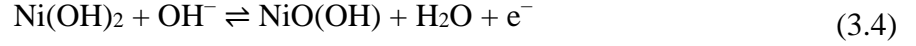
Nikel-metal hidrit piller nikel kadmiyum piller ile kimyasal olarak oldukça benzerdirler. Pozitif elektrottaki kimyasal reaksiyon her ikisi de nikel oksit hidroksit (NiOOH) kullanan nikel-kadmiyum hücresininkinden farklıdır. Çünkü bu pillerin negatif elektrotlarında kadmiyum yerine hidrojen emici bir alaşım kullanılmaktadır.

NiMH pillerin kapasiteleri lityum iyon pillerden çok daha azdır. Fakat daha yüksek enerji yoğunlukları sebebiyle aynı boyuttaki Nikel Kadmiyum pillerin iki ile üç katı kadar bir kapasiteye sahip olabilmektedirler. NiMH pillerin reaksiyonları aşağıdaki gibidir.

Negatif elektrot reaksiyonu,



Pozitif elektrot reaksiyonu,



3.4.3 Lityum nikel kobalt alüminyum oksit piller (NCA)

Lityum nikel kobalt alüminyum oksit piller NCA olarak da isimlendirilirler. Yüksek enerji yoğunlukları ve görece daha güvenli olmaları sebebiyle elektrikli araçlarda gelecek on yılda da yaygın olarak kullanılması beklenen bir pil teknolojisidir (W. Li et al., 2020).

Negatif elektrot reaksiyonu,



Pozitif elektrot reaksiyonu,



Bu çalışmada Panasonic NCR18650BF piller tercih edilmiştir. NCA kimyaya sahip bu piller aşağıda sunulan teknik özelliklere sahiptirler. Firmanın verdiği isimlendirmede yer alan NCR, Nikel Kobalt Şarj edilebilir – Nickel Cobalt Rechargeable ifadesinin kısaltmasıdır.

3.4.4 Lityum demir fosfat piller (LFP)

Lityum demir fosfat piller katot malzemesi olarak lityum demir fosfat (LiFePO_4) ve anot olarak da metalik bir desteğe sahip bir grafit karbon elektrot kullanan bir lityum iyon pil çeşididir. Bu pillerin enerji yoğunluğu NCA gibi diğer yaygın lityum iyon pil türlerinden görece daha düşüktür. Ayrıca çalışma voltajları da yine NCA pillere göre daha düşüktür. Fakat düşük maliyetleri, düşük toksisitesi, uzun çevrim ömrü gibi faktörler sebebiyle LFP piller özellikle elektrikli araçlarda, şebeke ölçeğinde enerji depolama sistemlerinde ve yedek güç ünitelerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Negatif elektrot reaksiyonu,

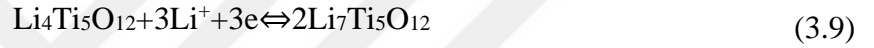


Pozitif elektrot reaksiyonu,



3.4.5 Lityum titanyum oksit piller (LTO)

Lityum-titanat olarak isimlendirilen bu pil, anotunun yüzeyinde karbon yerine lityum-titanat nano kristalleri kullanan iyileştirilmiş bir lityum-iyon pil olarak tanımlanabilir. Bunun sebebi nano ölçekte sünger benzeri bir fiziksel yapıya sahip olmasıdır. Böylece karbon için gram başına 3 m² ile karşılaştırıldığında, anoda gram başına yaklaşık 100 m² bir yüzey alanı vermektedir. Bu sayede elektronlar anoda hızlı bir şekilde girip çıkabilmekte ve sonuç olarak görece hızlı şarj/deşarj olabilmektedir. Ayrıca, titanyum oksitlere Li⁺ interkalasyonunun redoks potansiyeli, grafitte Li⁺ interkalasyonunun redoks potansiyelinden daha pozitiftir.



Bu, yüksek akımlı şarjın çok daha güvenli olmasına yol açmaktadır. Çünkü karbon durumunda, lityum dendritlerin ilk durumda oluşma olasılığı daha düşüktür. Bu dendrit oluşum problemi tüm kimyasal pillerin temel sorunu olmakla birlikte halen lityum sülfür pillerde çözüme kavuşturulamadığı için bu pillerin ticarileşmesi gecikmektedir.

Bu çalışmada Hunan Huahui New Energy firmasının ürettiği HTC1865 piller kullanılmıştır. Teknik özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Pillerin görselleri ise Şekil 3.7'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1: Çalışmada kullanılan pillerin teknik özellikleri.

	NiCd	NiMH	NCA	LFP	LTO	
Nominal Gerilim (V)	1,2	1,2	3,6	3,2	2,4	
Kesme Gerilimi (V)	<i>Şarj</i>	1,25	1,6	4,2	3,65	2,8
	<i>Deşarj</i>	1,0	1,0	2,5	2,0	1,5
Nominal Kapasite (mAh)	1000	3800	3250	1500	1300	
Ağırlık (g)	21	49	47,5	40,5 ± 2	38,5 ± 1	
Paket	AA	18650	18650	18650	18650	



Şekil 3.7: Çalışmada kullanılan piller. (Beyaz: NiCd; Yeşil: NiMH; Kırmızı: NCA; Mavi: LFP; Sarı: LTO).

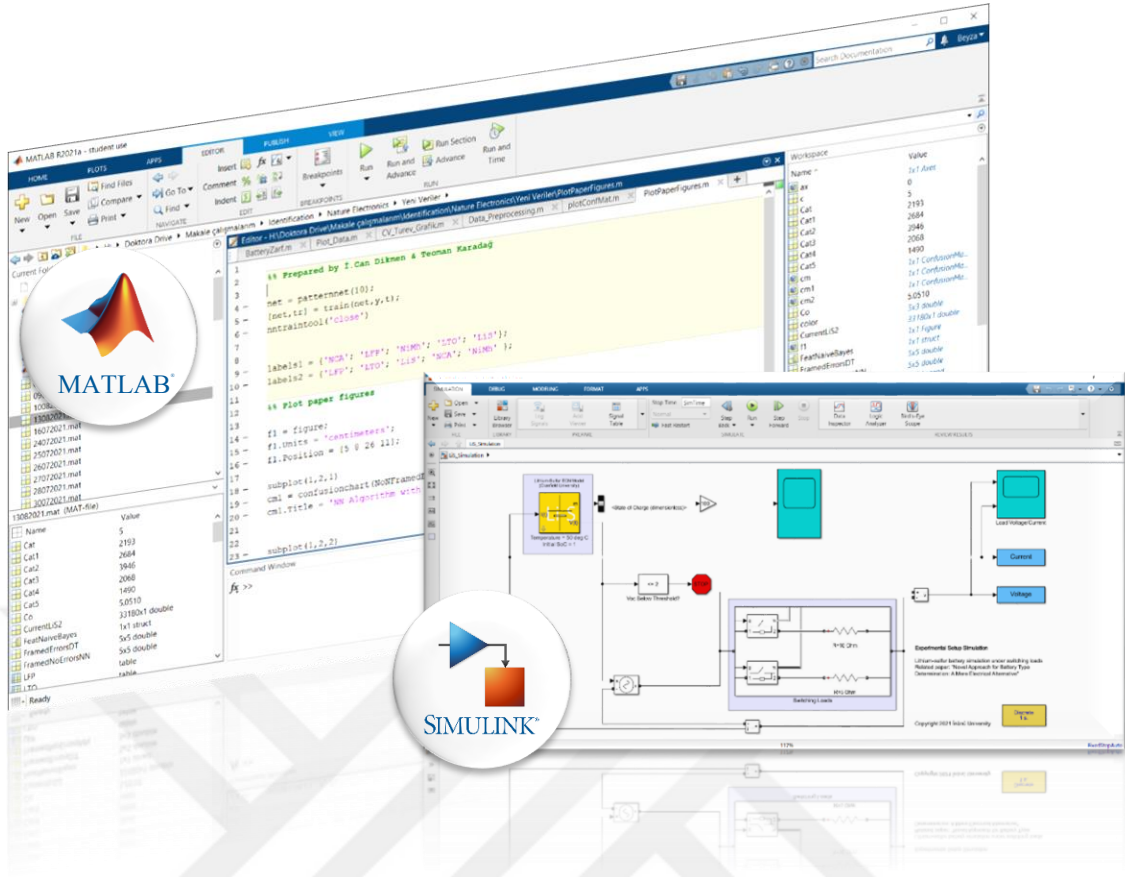
3.4.6 Lityum sülfür piller (LiS – Simülasyon)

LiS piller yüksek özgül enerjisiyle dikkat çeken, yakın gelecekte lityum iyon pillere rakip olması beklenen şarj edilebilir bir pil türüdür. Lityum'un düşük atom ağırlığı ve kükürt'ün orta düzeyde atom ağırlığı nedeniyle LiS pillerin diğer pil kimyalarına göre aynı hacimde nispeten daha hafif olduğu anlamına gelmektedir (S. S. Zhang, 2013).

LiS piller henüz ticari olarak piyasada bulunmadıkları için bu çalışmada deneysel çalışmalarla doğruluğu kanıtlanmış olan Cranfield üniversitesinde geliştirilen elektro kimyasal model kullanılarak bir simülasyon çalışması yapılmıştır (Propp et al., 2016).

Yüksek güç yoğunlukları sebebiyle LiS bataryaların alçak irtifa uydularında, yüksek irtifa uzun menzil araçlarında veya elektrikli döner kanatlı hava araçlarında kullanımı konusunda yani yüksek performanslı elektrikli hava araçları konusunda yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır (Dörfler et al., 2021). Bu nedenle LiS pilleri bu doktora tez çalışmasına dâhil edilmiştir.

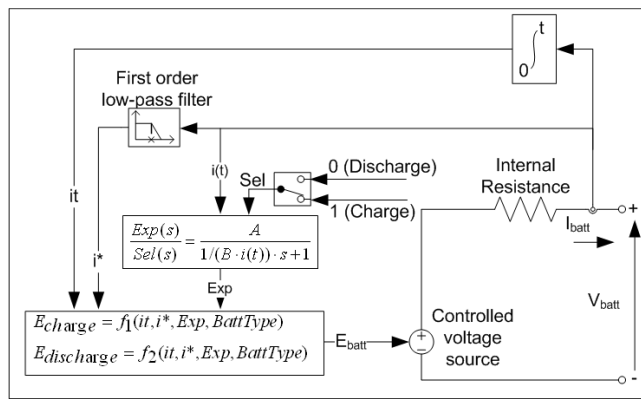
Bu amaçla programlanabilir DC yük için geliştirilen yazılım ile aynı algoritmaya sahip bir SIMULINK modeli hazırlanmıştır. Şekil 3.8'de sunulan model MATLAB ile birlikte çalıştırılarak LiS piller algoritmaya uygun olarak modellenip tanılama için gereken veriler simülasyon yardımıyla elde edilmiştir.



Şekil 3.8: Lityum sülfür pil MATLAB ve SIMULINK simülasyonu.

3.5 Pil Matematiksel Modeli

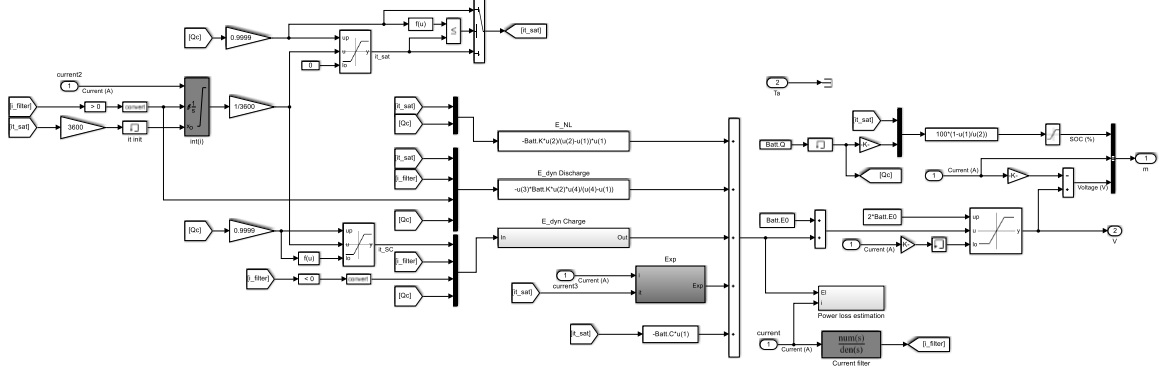
Yapılan ilk simülasyon çalışmasında kullanılan elektrokimyasal lityum iyon pilin matematiksel modeli Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da sunulmuştur.



Şekil 3.9: Pil eşdeğer devre modeli (MathWorks, 2022).

$$E_{Discharge} = E_0 - K \frac{Q}{Q-t} i^* - K \frac{Q}{Q-t} it + Ae^{-Bit} \quad (3.10)$$

$$E_{Charge} = E_0 - K \frac{Q}{0.1Q+t} i^* - K \frac{Q}{Q-t} it + Ae^{-Bit} \quad (3.11)$$



Şekil 3.10: Pil matematiksel modelinin Simulink diyagramı.

3.6 İstatistiksel Analiz

Batarya kimyasını tanılama algoritması istatistiksel analize dayalı olarak geliştirilmiştir. Bunun için algoritmanın farklı geliştirme basamaklarında farklı istatistiksel testler kullanılmıştır.

3.6.1 tTest

tTest, 1876'da Friedrich Robert Helmert tarafından önerilen istatistiksel bir testtir (Helmert, 1876). Kullanışlı olması nedeniyle pek çok makalede farklı isim ve amaçlarla yer bulmuştur. İlk kez 1908'de İngilizce olarak yayınlayan William Sealy Gosset'in takma adı nedeniyle yaygın olarak Öğrenci testi (Student's test) olarak bilinmektedir (Student, 1908). tTest, temelde iki veri kümesinin istatistiksel olarak benzer veya farklı olup olmadığını belirleyen bir araçtır. Bu, t-Değeri hesaplanarak yapılır. Eğer t-Değeri büyükse bu veri kümeleri arasında bulunan farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu kanıtlar. t-Değeri küçükse, veri setlerinin benzer olduğu ve bu nedenle değişikliklerin şans eseri meydana geldiği anlamına gelir. t-Değeri denklem 3.12 ile hesaplanmaktadır.

$$t - Değeri = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\frac{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \times \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \quad (3.12)$$

Burada, μ_i ortalama değerdir, σ_i varyans ve n veri kümesindeki kayıtların sayısıdır.

3.6.2 Kruskal-Wallis H testi

Kruskal-Wallis H testi adını bu testi geliştiren William Kruskal ve W. Allen Wallis'ten almaktadır. Tek yönlü ANOVA (Varyans Analizi) testinin parametrik olmayan karşılığı olarak da bilinmektedir. İki veri örneğinin aynı istatistiksel dağılıma sahip olup olmadığını belirlemek için kullanılan parametrik olmayan bir yöntemdir. Aynı veya farklı örneklem boyutlarına sahip iki veya daha fazla bağımsız veri kümesini karşılaştırmaktadır. Yalnızca iki grubu karşılaştırmak için kullanılan Mann-Whitney U testinin bir uzantısı olduğu da söylenebilir. Tek yönlü varyans analizi, Kruskal-Wallis testinin parametrik eşdeğeri (Kruskal & Wallis, 1952).

Kruskal-Wallis testi anlamlı olduğunda, en az bir örneğin stokastik olarak diğerine baskın olduğu anlamına gelmektedir. Test, stokastik baskınlığın nerede meydana geldiğini veya kaç grup çiftinin etkilendiğini ortaya çıkarmamaktadır.

Stokastik baskınlık için örnek çiftlerini analiz etmek amacıyla bazen Dunn testi, Bonferroni düzeltilmeli ikili Mann-Whitney testleri veya daha güçlü fakat daha az bilinen Conover-Iman testi kullanılmaktadır. Bu çalışmada Conover testi kullanılmıştır.

Denklem 3.13'de verilen formülde k , örnek sayısı; n_i , her örnekteki birim sayısı; N , birleştirilmiş tüm örneklerdeki birim sayısı; R_i , j . örnek için sıra sayıları toplamını ifade etmektedir.

$$H = \frac{12}{n \cdot (n + 1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3 \cdot (n + 1) \quad (3.13)$$

3.6.3 Conover testi

Conover testi, Levene'nin istatistikte varyans eşitliği testinin parametrik olmayan bir varyasyonudur. Conover'ın kare sıra testi, varyansın tek parametrik olmayan eşitliği testi gibi görünmektedir.

Parametrik testler, veri dağılımındaki farklılıkların önemini belirlemek için de kullanılmaktadır (yani, varyans farkı testleridir). Kare sıra testi, kendi başına varyanstan ziyade veri dağılım farkının önemini bir ölçüsüdür (Conover & Iman, 1981). Conover testi ise, sıra toplamı farklılıkları için Conover-Iman t-testi istatistiğine dayalı olarak $m = k(k-1)/2$ çoklu ikili karşılaştırmalar yapmaktadır.

$$|\bar{R}_i - \bar{R}_j| > t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-k} \cdot \sqrt{s^2 \cdot \left[\frac{n-1-\hat{H}^*}{n-k} \right] \cdot \left[\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right]} \quad (3.14)$$

$$\hat{H}^* = \frac{\frac{12}{n \cdot (n+1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3 \cdot (n+1)}{1 - \frac{\sum_{i=1}^r (t_i^3 - t_i)}{n^3 - n}} \quad (3.15)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \left[\sum R_i^2 - n \cdot \frac{(n+1)^2}{4} \right] \quad (3.16)$$

3.7 Tez Çalışmasında Kullanılan Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Doktora tez çalışması kapsamında geliştirilen BYS'nin batarya kimyasını belirleme fonksiyonuyla ilgili olarak; problem kategorizasyon problemi şekline sokulduktan sonra makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak çözüme ulaşılmaktadır. Çalışmada yapay sinir ağı, çok sınıflı destek vektör makinesi ve sınıflandırma ağacı algoritmaları kullanılmıştır.

Bunlara ek olarak, ayrıştırma fonksiyonunun parametrelerini optimize etmek için metasezgisel optimizasyon algoritmalarından ateş böceği algoritması kullanılmıştır.

3.7.1 Yapay sinir ağı

Yapay sinir ağı (YSA), yönlendirilmiş ağırlıklı bağlantılarla birbirine bağlanan basit yapay nöronların bir denklemdir. YSA konseptinin arkasındaki fikir 1940'lara ve 1950'lere kadar uzanmaktadır (McCulloch & Pitts, 1943; "Representation of Events in Nerve Nets and Finite Automata," 1956).

1957 yılında Rosenblatt, "The Perceptron" adlı ilk işlevsel yapay sinir ağını yayınlamıştır (Rosenblatt, 1957). Perceptron'dan 2021'e kadar YSA kavramı, yapay zekâya doğru hızla gelişmiştir ve makine öğrenimi, doğal dil işleme, görüntü tanıma, konuşma tanıma gibi farklı yöntem ve uygulamalara ayrılmıştır (Samuel Greengard, 2019).

Yeni nesil batarya yönetim sistemlerine eklenebilecek böyle bir fonksiyonun mümkün olan en az işlemsel maliyete sahip olması öncelikli tasarım parametresi olarak belirlenmiştir. Çünkü tanılama fonksiyonu batarya yönetim sistemi dâhilindeki bir mikro denetleyici üzerinde çalıştırılacaktır. PKB işlemini gerçekleştirebilmek için mümkün olduğunca basit, yonga üzerinde çalışabilecek yapıda bir yapay sinir ağı tasarlanmıştır.

3.7.2 Çok sınıflı destek vektör makinesi

Destek vektör makinesi (DVM) algoritması 1990'lı yıllarda AT&T Bell Laboratuvarlarında Vladimir Vapnik ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Cortes & Vapnik, 1995). DVM algoritmaları Vapnik ve Chervonenkis tarafından önerilen istatistiksel öğrenme çerçevelerine veya yine kendileri tarafından geliştirilen VC (Vapnik-Chervonenkis) teorisine dayanan en dayanıklı (robust) tahmin yöntemlerinden biridir.

Çok sınıflı destek vektör makinesi (ÇSDVM) problemi ise DVM algoritmasının ikiden fazla sınıf için uygulanması problemidir. Problemin amacı verilen N örnekle bir karar fonksiyonu oluşturmaktır. Fakat verilerde genellikle $(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$ şeklinde verilen gürültü bulunmaktadır. Burada, $x_i: i = 1, \dots, N$ ifadesi N boyundaki bir vektörü göstermektedir. $y_i \in \{1, \dots, M\}$ ise örneğin sınıfını göstermektedir.

ÇSDVM sınıflandırma problemleriyle uğraşırken geleneksel yöntem, problemi bir dizi ikili sınıflandırma problemi olarak düşünerek basitleştirmektedir. Bu yöntemde, her sınıf için bir tane olmak üzere M adet sınıflandırıcı oluşturulur. m inci sınıflandırıcı, m inci sınıf ile kalan $M-1$ sınıf arasında bir hiperdüzlem oluşturur. Pozitif yönde sınırdan uzaklığın en fazla olduğu sınıfa yeni bir test numunesi atanır. Böylece optimizasyon problemi Denklem 3.17'deki şekilde genellenebilir (Chamasemani & Singh, 2011).

$$\Phi(\mathbf{w}, \xi) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \mathbf{w}_m^T \mathbf{w}_m + C \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{m \neq y_i} \xi_i^m \quad (3.17)$$

Kısıt:

$$\begin{aligned} (\mathbf{w}_{y_i}^T x_i) + b_{y_i} &\geq (\mathbf{w}_m^T x_i) + b_m + 2 - \xi_i^m, \quad \xi_i^m \geq 0, \\ \wedge i &= 1, \dots, N \text{ ve } m \in \{1, \dots, M\} \setminus \{y_i\} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Bu durumda karar sınırı şu şekilde yazılabilir;

$$f(x) = \operatorname{argmax}_m [(\mathbf{w}_m^T x) + b_m], \quad m = 1, \dots, M \text{ için} \quad (3.19)$$

Optimizasyon problemi Lagrangian'ın eğer noktasının bulunması ile çözülebilir. Nihai sınıflandırıcı aşağıdaki gibi formülize edilebilir.

$$f(x) = \sum a_i x_i^T x + b_m \quad (3.20)$$

3.7.3 Sınıflandırma ağacı

Sınıflandırma ağacı terimi ilk olarak Breiman ve arkadaşları tarafından 1984 yılında kullanılmıştır (Breiman et al., 1984). Makine öğrenmesi algoritmalarından olan, karar ağaçları olarak da bilinen sınıflandırma ağaçları, verilere yöneltilen soruların cevaplarını tahmin eder.

Ağaçtaki kararlar, bir yanıtı tahmin etmek için başlangıç (kök) düğümden yanıtı içeren bir yaprak düğüme kadar izlenmektedir. Sınıflandırma ağaçları, 'doğru' veya 'yanlış' gibi mantıksal yanıtlar verirler. Bu yanıtlara göre de diğer yaprak düğümlere dallanırlar ya da bir kategorideki verileri içeren bir sonuca varırlar.

3.8 Ateş Böceği Optimizasyon Algoritması

Doktora tez çalışmasında, ayrıştırma fonksiyonunun optimal parametrelerini belirlemek için ilk olarak Xin-She Yang tarafından önerilen "Ateşböceği Optimizasyonu" metasezgisel optimizasyon algoritması kullanılmıştır (Fister et al., 2013; Yang & He, 2013).

Literatürde yaygın olarak belirtildiği gibi, uygulanabilirliği nedeniyle parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) veya varyantları gibi metasezgisel algoritmalar bu tür parametre belirleme problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Yang, 2008).

Çalışmada beş farklı kimyaya sahip pil yani beş tip pilin verileri ayrı ayrı kullanılmaktadır. Bunun için denklemden pil tipleri Tip 1, Tip 2, Tip 3, Tip 4 ve Tip 5 olarak isimlendirilmiştir. 3.21'de sunulan μ ise ana veri kütesinin orta değerini yani medyanı göstermektedir.

Çalışmada, ayrıştırma fonksiyonunun parametrelerini belirlemek için ateşböceği optimizasyon algoritmasında Denklem 3.22'de sunulan maliyet fonksiyonu kullanılmıştır.

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Y_{n,k} \quad (3.21)$$

$$f_{Cost} = \left[10^6 - \sum_{i=1}^{40} \left(\sqrt{(\mu_{Tip\ 1}(i) - \mu_{Tip\ 2}(i))^2} - \sqrt{(\mu_{Tip\ 4}(i) - \mu_{Tip\ 3}(i))^2} - \sqrt{(\mu_{Tip\ 2}(i) - \mu_{Tip\ 5}(i))^2} \right) \right]^2 \quad (3.22)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Geliştirilen Pil Kimyasını Belirleme (PKB) Algoritmasının Temeli

Yüksek performanslı elektrikli araçlar ani güç ihtiyaçları için yüksek performanslı bataryalara ihtiyaç duymaktadırlar. Günümüzde pil teknolojisinin geldiği noktada bir kapasitör kadar hızlı şarj/deşarj olabilen fakat çok daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip piller henüz geliştirilememiştir.

Mevcut sistemlerde süperkapasitör blokları batarya ile birlikte kullanılabilir. Fakat bu süperkapasitör bloklarının toplam enerji kapasitesi kimyasal pillerle kıyasla oldukça düşüktür. Günümüzde en hızlı enerji depolayabilen pil kimyası lityum titanat oksit iken en güvenli ve enerji yoğun pil kimyası ise lityum demir fosfattır.

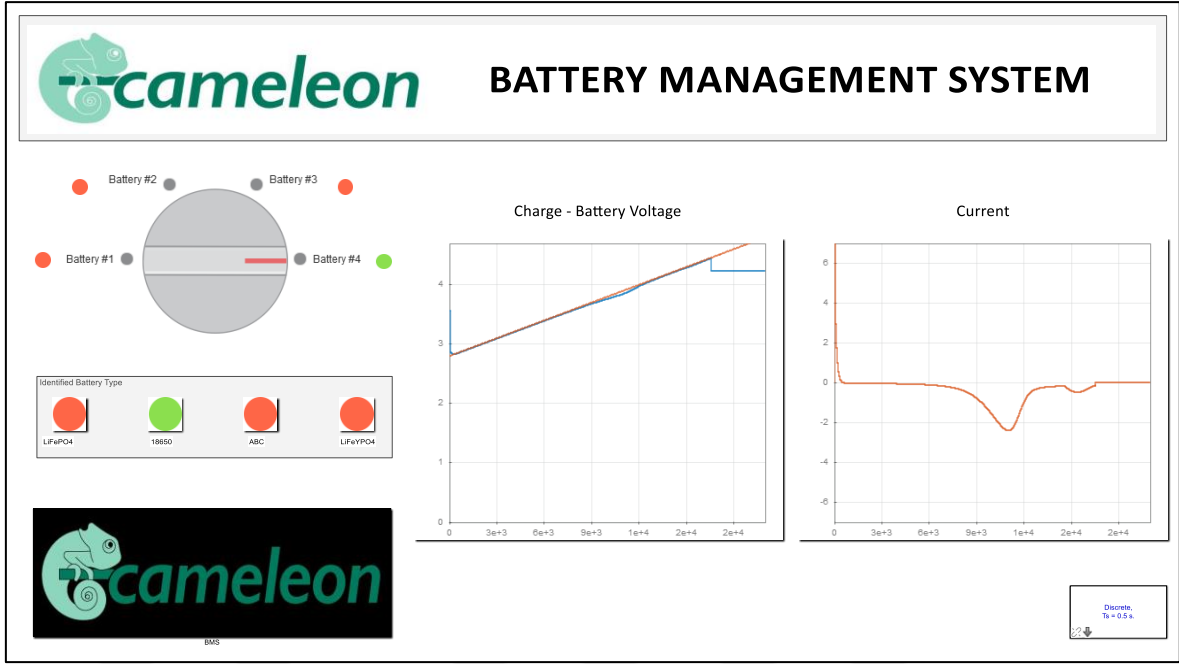
Bu iki pil kimyasının aynı batarya paketi içerisinde kullanılabilmesi ise ikisinin ayrı ayrı tanımlanıp yönetilmesi ile mümkündür. Literatürde bu doğrultuda yapılan çalışmalarda %20'ye yakın verimlilik artışı ortaya koyulmuştur (Chung & Trescases, 2017). Bu tip çoklu kimyalı batarya yönetim sistemlerinde kullanılmak üzere pil kimyasını otomatik olarak belirleyebilen için bir algoritma geliştirilmiştir.

4.2 Simülasyon

İlk geliştirilen pil kimyasını tanılama algoritmasında pilin şarj akımı 0.1 ampere düşene kadar şarj edilerek sonuçta tam şarj gerilimi ölçülmekte ve bu sayede pilin kimyası tespit edilebilmektedir. Bu fikrin çalışabilirliğini ispatlamak amacıyla MATLAB® 2015b altında SIMULINK ortamında bir simülasyon hazırlanmış ve fikrin çalıştığı görülmüştür (Dikmen et al., 2018). Simülasyonda, BYS ağının ideal örnekleme frekans donanım sınırlamaları nedeniyle 2 Hz'dir. Bu nedenle çözücü 0,5 saniye örnekleme süresi ile Ode4 Runge-Kutta olarak seçilmiştir. Powergui bloğu da 0,5 örnekleme süresine ayarlanmıştır. Sistemi gerçeğe çok daha yakın bir şekilde modellemek için bazı varsayımlar yapılmıştır.

Simülasyon aşağıdaki varsayımlar ile yapılmıştır.

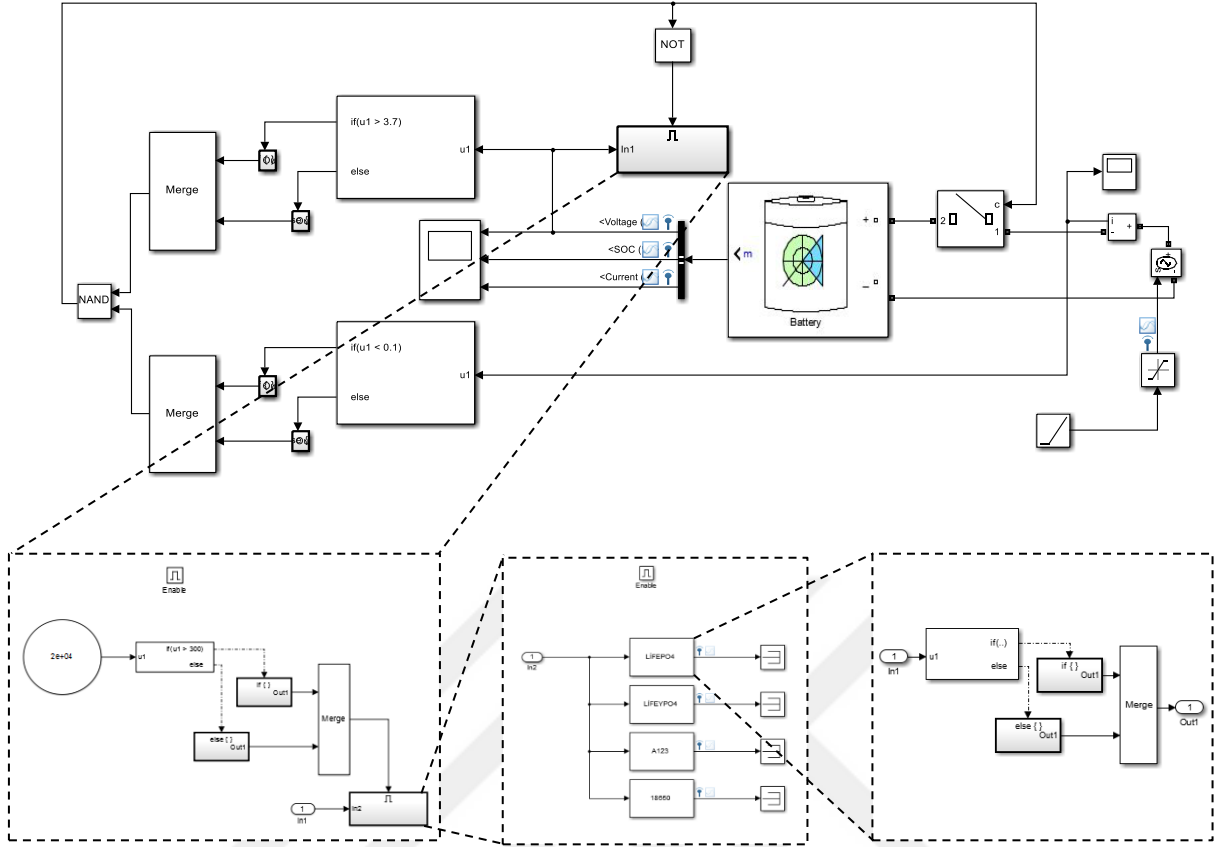
- Haberleşme protokolü örnekleme frekansını desteklemektedir.
- Anahtarlar ve kontaktörler idealdir.
- Piller tamamen sağlıklıdır.



Şekil 4.1: Birinci simülasyonun genel görünümü.

<https://www.youtube.com/watch?v=RoUnOcewoH0>

Simülasyonda görülen seçici anahtar dört pilden birini seçmek için kullanılmaktadır. Seçilecek piller numaralandırılmıştır ve aktif (bağlı) pil yeşil dairesel ışıkla işaretlenmiştir. Simülasyon çalıştırıldığında seçilen pil Şekil 4.1'deki gibi kontaktörler vasıtasıyla sisteme bağlanır. Ardından şarj işlemi başlamakta ve şarj gerilimi 2.8 V'dan başlayarak kademeli olarak arttırılmaktadır. Bu başlangıç değerinin seçilmesinin nedeni, ekseriyetle lityum pillerin minimum şarj voltajı olmasıdır (Buchmann, 2017). Pil tamamen şarj olduğunda akım değerine göre sistem şarjı durdurmaktadır, ardından bir süre pil geriliminin dengeye gelmesi için beklemektedir. Takiben stabil olmuş pil gerilimi okunmaktadır. Bir algoritma, tam şarj voltajını bilinen türlerle karşılaştırarak bağlı pilin türünü belirlemekte ve ilgili yeşil ışığı yakmaktadır. Algoritmanın blok diyagramı Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Simülasyon algoritması ve detayı.

4.3 PKB Algoritması

Batarya yönetim sistemi yazılımı ve donanımı hemen hemen her uygulamada tasarlandığı batarya hücresinin kimyasına bağlıdır. Bunun yanı sıra, batarya yönetim sistemi mimarisi farklı uygulamalara göre büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Bu nedenle, yeniden yapılandırılabilir batarya yönetim sistemi mimarisi veya ikinci ömür uygulamaları gibi bazı özel uygulamalar, otomatik hücre kimyası belirleme özelliğine ihtiyaç duymaktadır.

Burada, yeniden yapılandırılabilir mimari farklı batarya türlerinin üstün özelliklerinden yararlanmak için batarya paketleri arasında geçiş yapma yeteneğini ifade eder. İkinci ömür ise özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek güç isteyen ve batarya sağlığının önem arz ettiği uygulamalarda, bataryalar gerekli performans kriterlerini artık karşılamadıklarında ilk kullanımından farklı uygulamalarda (örneğin elektrik şebekelerinde) kullanılması anlamına gelir. Her iki uygulama örneğinde de batarya hücresinin kimyasının otomatik olarak belirlenmesi bir mühendislik problemidir.

Son on yılda elektrikli araçlara olan ilginin hızla artması, bu teknolojinin gelişmesi ve satışlardaki muazzam artış; piyasadaki ilk elektrikli araçlarda kullanılmış olan çok miktarda çekiş bataryasının yakın bir zamanda kullanım ömrünün sonuna geleceği gerçeğini de beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla bu bataryaların içerisinde yer alan pillerin hâlihazırda geri dönüşüm için toplanan ve atık akışında karıştırılan diğer pillere ekleneceği anlamına gelmektedir (Zhao et al., 2021).

Bu atık akışına dâhil olan pillerden bazıları için ikinci hayat döngüsü söz konusu olabilir. 2030 yılına kadar ikinci hayat döngüsüne giren pil kapasitesinin yıllık 275 GWh 'i geçeceği öngörülmektedir (*Second-Life Electric Vehicle Batteries 2020–2030*, 2020). Bu da enerji depolaması için büyük fırsatlar sunmaktadır.

Tabii ki bu süreçleri sekteye uğratabilecek pek çok teknik, ekonomik ve yasal düzenleyici zorluk mevcuttur. Geri dönüştürücüler, geri dönüştürülmüş malzemeleri satın alan üreticilerin teknik özelliklerini karşılamak için pilleri kimyasal bileşimlerine göre tanımlamalı ve ayrıştırmalıdır (Zhao et al., 2021).

Bu noktada pil kimyasını tanımlamanın zorluğu pil üzerinde uygun etiketleme yapılmaması, standart olmayan tasarımlar veya açık bir işaretin bulunmamasıdır (Harper et al., 2019). Günümüzde geri dönüşüm merkezlerinde pilleri ayırmak için kullanılan X-ışını radyografik tarama, bilgisayarla görme, yapay zekâ ve blok zinciri gibi yöntemler mevcuttur (Bazilian, 2018; H. Chen & Shen, 2017; Harper et al., 2019; Scrosati et al., 2015).

Batarya tanılama iki farklı kimyaya sahip bataryanın üstün özelliklerinden faydalanmak için bir arada kullanıldığı çoklu kimyaya sahip batarya sistemlerinde de önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır (Chung & Trescases, 2017; Islam et al., 2008; Riczu et al., 2018; Smith et al., 2019). Önerilen yöntem ile bu iki mühendislik problemine de çözüm getirilmesi amaçlanmıştır.

4.3.1 PKB Algoritması Ver.1

Bu algoritmanın amacı, pil tipini sadece anlık terminal gerilimi ve akımı ile belirlemektir. Bunun için pillerin elektrokimyasal özelliklerinden ileri gelen üç savdan yola çıkılmıştır (Dikmen & Karadağ, 2021b).

Lemma 1:

Şarj durumu (SoC), kalan kullanılabilir kapasite nedeniyle açık devre geriliminin (OCV) düşmesine neden olan bir faktördür.

$$SoC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{nominal}} \quad (4.1)$$

Lemma 2:

Farklı kimyasal bileşime sahip piller, farklı terminal gerilimlerine sahip olmasına yol açan farklı OCV'lere sahiptir (Schweiger et al., 2010).

Lemma 3:

Piller zamanla yaşlanmaya maruz kalmaktadır ve bu ister takvim yaşlanması ister döngü yaşlanması olsun sonuçta mutlaka kapasite kaybına neden olmaktadır (Corno & Pozzato, 2020).

Bu yaşlanma, kimyasal bileşime, hücre tasarımına ve yük, sıcaklık, şarj durumu ve deşarj derinliği gibi koşullara bağlıdır (Klett, 2014; Wikner, 2017). Yani, eskimiş bir pil enerji depolama yeteneğini, kapasitesini kaybetmektedir ve bu da terminal geriliminin sabit bir yük altında nispeten daha düşük olmasına neden olmaktadır.

PKB algoritmasını çalıştırmak için iki yük direnci, MOSFET'ler ve bir mikro denetleyici içeren bir donanım öngörülmüştür. Bu yöntemin bir mikro denetleyici üzerinde çalıştırılması amaçlandığından, donanım mümkün olduğunca basit tasarlanmıştır. Bu nedenle, tasarım kısıtları akım ve işlem gücü olarak belirlenmiştir. Burada mikro denetleyici, iki farklı yük direncine bağlı MOSFET'leri sırayla sürmektedir. Her yük, ayrı ayrı sırayla on saniye boyunca yüke pili bağlamıştır. Eş zamanlı olarak bir sensör tarafından da akım ölçülmüştür.

Algoritmada sınıflandırma işlemi için yapay sinir ağı kullanılması öngörülmüştür. Bu ağın eğitimi için farklı kimyalara sahip batarya hücrelerinden deneysel veriler toplanmıştır. Bu veriler iki bölüm halinde ayrılmıştır. Birinci bölüm anlık akım verileri ve ikinci bölüm ise terminal gerilimi verileridir. Bu veriler iki farklı sabit yükte toplandığından, bir veri çerçevesi oluşturmak için dört veri bölümü birleştirilerek veri kümeleri oluşturulmuştur. Her dört bölüm için on saniyelik veri sağlayan 1 Hz'ye ayarlanan örnekleme oranı, daha sonra 40 saniyelik bir veri çerçevesi içerisinde birleştirilmiştir.

4.3.1.1 Deneysel Çalışma

Çalışmada üç farklı kimyaya sahip pil kullanılmıştır. Bunlar Şekil 4.3'de sunulan, birinci tip Sanyo NCR18650BF Lityum Kobalt Oksit pillerdir (NCA) pil, ikinci tip PowerExtra Lityum Demir Fosfat (LFP) ve üçüncü tip PowerExtra Nikel Metal Hidrür pil (NiMH) pillerdir. Bu

pillerin nominal gerilim değerleri 3.2V, 1.2V, 3.7V ve kapasiteleri sırasıyla 3200 mAh, 1500 mAh ve 3800 mAh'dir.

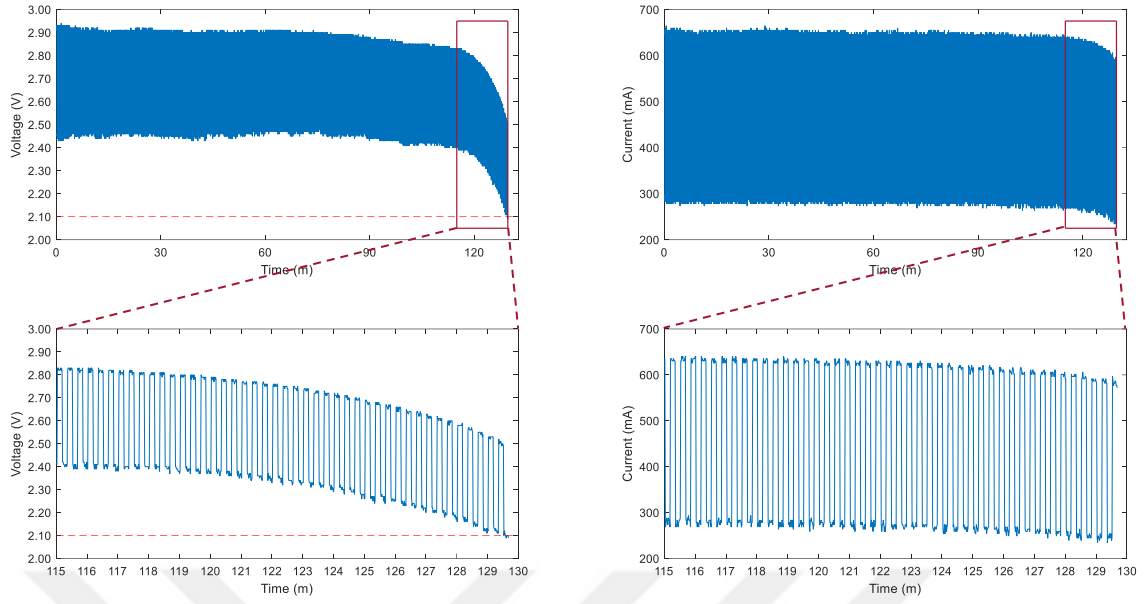


Şekil 4.3: PKB Algoritması Ver.1 deneysel çalışmada kullanılan piller. (Mavi: LFP; Kırmızı: NCA; Yeşil: NiMh)

Bu pil tipleri elektrikli araçlarda en çok kullanılan pil türleri olduğu için tercih edilmiştir. Eğitim için veri toplama sürecini içeren tüm deneyler, laboratuvar ortamında sabit koşullar altında gerçekleştirilmiş ve sıcaklık ve nem gibi gözlemlenen parametre değişiklikleri ihmal edilebilecek kadar küçük bulunmuştur.

Şekil 4.4'de voltaj dalgalanmalarının 2.95V-2.45V arasında olduğu görülebilen veri örneği sunulmuştur. Burada gözlemlenen sabit darbeleri yükün etkisidir; bu da pilin gevşemesine, yani üzerindeki yükün kaldırılarak açık devre gerilimine ulaşmasına, izin verilmediği anlamına gelmektedir. Pil yük sonrasında gerilimini toparlamak için gereken zamana sahip olmadığı için açık devre voltaj seviyesine ulaşamamıştır. Bu etki, pil tipini belirlemede pilin kimyasına ilişkin bilgilerin toplanmasına yardımcı olmasının yanı sıra algoritmanın 20 saniye gibi kısa bir sürede çalıştırabilmesine olanak sağlamaktadır. Buradaki esas nokta sabit bir gerilim ve akım ölçümü elde etmektir.

Ölçümlerin stabil hale gelmesi için 10 saniyenin yeterli olduğu gözlemlenmiştir. Tüm veriler 1 Hz frekans ile toplanmış ve dolayısıyla 20 saniyelik sürede iki farklı yük altında PKB için gereken veri toplanmıştır.



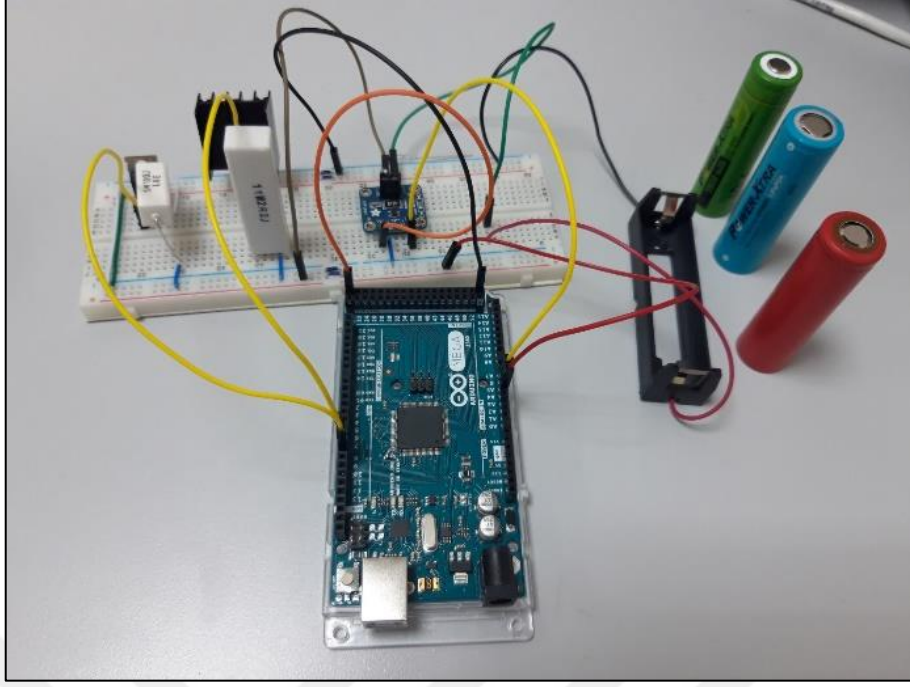
Şekil 4.4: Ölçülen terminal gerilimi ve eşlik eden akım değerleri.

Geliştirilen PKB algoritmasının deneysel olarak uygulanması için iki MOSFET, iki yük direnci, bir akım sensörü, bir 18650 pil yuvası ve Arduino Mega kullanılarak kurulan devre Şekil 4.5’de sunulmuştur. Bu devreden elde edilen verileri bilgisayar ortamında işleyebilmek için SIMULINK Arduino Hardware Support Toolbox ile bir yazılım geliştirilmiştir (*SIMULINK Arduino Hardware Support Package*, 2022).

Geliştirilen bu yazılım ile deney düzeneğinden elde edilen veriler SIMULINK’de okunarak önce oluşturulan yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılmıştır. Takiben eğitilmiş sinir ağı ile deney düzeneği birlikte koşturularak pil yuvasına takılan pilin kimyasının hata payıyla tespit edilebildiği gözlemlenmiştir. Burada yapay sinir ağı bilgisayar üzerinde koşturulmuştur.

Bilgisayar üzerinde yapay sinir ağını çalıştırmak yüksek işlem gücü sebebiyle kolaydır. Fakat donanım üzerinde yani bir mikro kontrolör üzerinde çalıştırılmak istenirse işlem gücünün kısıtlı olması sebebiyle tasarım hesaplarının doğru yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, çalışmada kullanılan yapay sinir ağı donanım üzerinde koşturulacağı için bilgisayar üzerinde koşturulan yapay sinir ağının yeniden tasarlanması gerekmiştir.

Deney düzeneğinde kullanılan mikro kontrolörün teknik özellikleri Çizelge 3.2.’de sunulmuştur (*ATmega2560 Parametrics*, 2022).



Şekil 4.5: Deneysel çalışma düzeneği.

<https://www.youtube.com/watch?v=GcOZzW0ERLU>

Çizelge 3.2: ATmega2560 mikro kontrolör teknik özellikleri

Program Memory Type	Flash
Program Memory Size (KB)	256
CPU Speed (MIPS/DMIPS)	16
SRAM (B)	8,192
Data EEPROM/HEF (bytes)	4096
Digital Communication Peripherals	4-UART, 5-SPI, 1-I2C
Capture/Compare/PWM Peripherals	4 Input Capture, 4 CCP, 16PWM
Timers	2x8-bit, 4x16-bit
Number of Comparators	1
Temperature Range (°C)	-40 to 85
Operating Voltage Range (V)	1.8 to 5.5
Pin Count	100

4.3.1.2 Yapay Sinir Ağının Tasarımı

Yapay sinir ağının (YSA) tasarlanmasında öncelikli kısıt ağın bir mikro kontrolör üzerinde çalışacak olmasıdır. Mikro kontrolörlerin sahip oldukları kısıtlı işlem gücü ve hafıza göz önüne alınarak YSA'nın mümkün olduğunca az nöron ile mümkün olan en yüksek doğruluk sağlaması için optimal bir çözüme ihtiyaç duyulmuştur (Dikmen & Karadağ, 2021e).

Tasarımda giriş ve çıkış nöron sayıları sabittir. 20 sn süre ile okunan akım ve gerilim değerleri için 40 adet giriş nöronuna ihtiyaç vardır. Çıkış nöron sayısı ise farklı kimyalara sahip pil tipleri kadar, yani 3 adettir. Bu durumda değiştirilebilir tek parametre gizli katmanda yer alan nöron sayısıdır.

Nöron sayısının tespiti için bir nöronun ateşlenmesi için gereken hesaplamanın alacağı süre ve gereken hafıza boyutunu hesaplamak ve kısıtlara uygun sayıyı belirlemek gerekmektedir. Burada hesaplanması gereken ağırlıklar aşağıdaki denklem 4.2'de sunulmuştur. Denklem 4.2'de N_w YSA'daki toplam ağırlık sayısı, sırasıyla N_i giriş, N_H gizli, N_o çıkış katmanlarındaki nöron sayılarını ifade etmektedir.

$$N_w = (N_i + 1)N_H + (N_H + 1)N_o \quad (4.2)$$

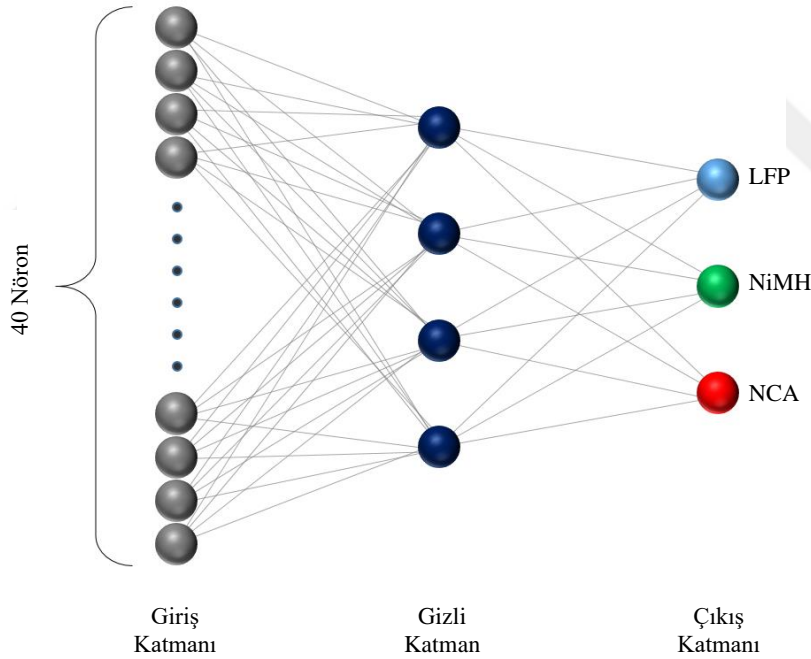
$$f(x) = \frac{(y_{max} - y_{min}) * (x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} + y_{min} \quad (4.3)$$

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \Rightarrow a_j = f\left(b_j + \sum_{i=1}^N W_{i,j}x_i\right) \quad (4.4)$$

Denklem 4.4'de verilen $f(x)$ aktivasyon fonksiyonudur, b_j bias terimidir ve $W_{i,j}$, x_i 'yi a_j 'ye bağlayan ağırlıktır. Hesaplama maliyeti açısından, her nöronda $N_i \times N_H$ adet çarpma işlemi, N_H adet toplama ve N_H adet aktivasyon fonksiyonu hesaplaması yapılmalıdır. Yani N_H adet gizli katman için aktivasyon fonksiyonu hesaplanmaktadır.

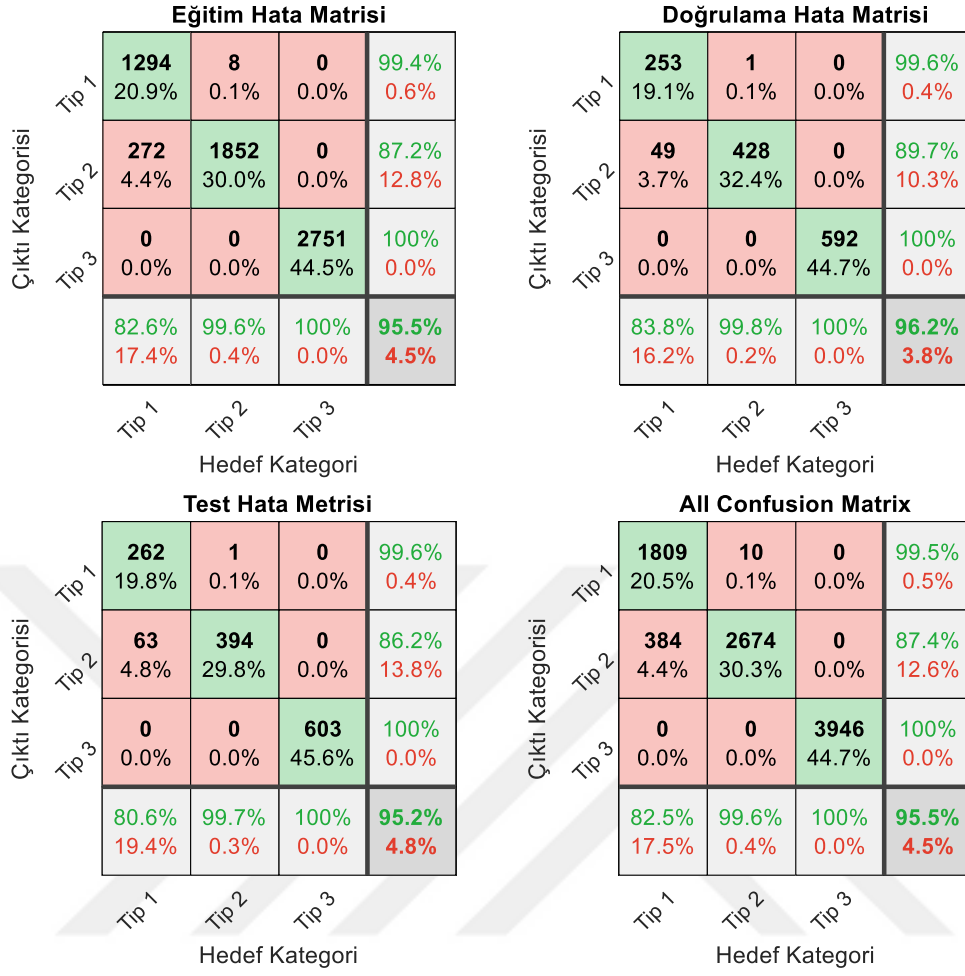
Aktivasyon fonksiyonunda 2 adet toplama/çıkarma, 1 adet çarpma, 1 adet bölme ve 1 adet üstel ifade vardır. Bu hesaplamalar, 16 MHz saat frekansında çalışan mikrodenetleyici üzerinde sırasıyla yaklaşık 7µ saniye, 24µ saniye, 29µ saniye ve 295µ saniye zaman almaktadır. Sonuç olarak, gizli katman nöron sayısı, bir çarpan ile birlikte hesaplama maliyeti ile ilişkilidir. 40 giriş ve 3 çıkış için toplam hesaplama süresi $1331N_H + 1107$ mikrosaniye olarak formüle edilebilir. Sonuç olarak N_H , hesaplama süresini 1331 faktörü ile etkilemektedir.

Yazılımın global değişkenleri belleğin %32'sini kullanmaktadır. Bu nedenle, diğer değişkenler için 5570 bayt boş alan kalmıştır. Üstel terim, daha iyi performans için doğrudan hesaplanmamıştır. Bunun yerine bir arabul çizelgesi (look up table) kullanılmaktadır. Her değişkenin 4 byte bellek kapladığını düşünürsek; 40 giriş ve 3 çıkış için toplam değişken sayısı $184N_H+204$ bayt olarak formüle edilebilir. Dolayısıyla bu mimari ve miktodenetleyici ile matematiksel olarak en fazla 29 gizli katman nöronu kullanılabilir. Ancak, seri iletişim, arabul çizelgesi vb. ile ilgili bellek sınırlamaları nedeniyle gerçek zamanlı uygulamada 8'den fazla nöron kullanılmasının mümkün olmadığı gözlemlenmiştir. Yapay sinir ağlarında gizli katman nöronlarının sayısını belirlemek için kullanılan bazı denklemler varken (Sheela & Deepa, 2013); bu çalışmada bellek sınırlamalarını göz önüne alarak ve ağın dört veya daha az nöronla çalışmadığı tespit edildiği için beş nöron kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmiştir. Tasarlanan yapay sinir ağı Şekil 4.6'da sunulmuştur.



Şekil 4.6: Tasarlanan yapay sinir ağı.

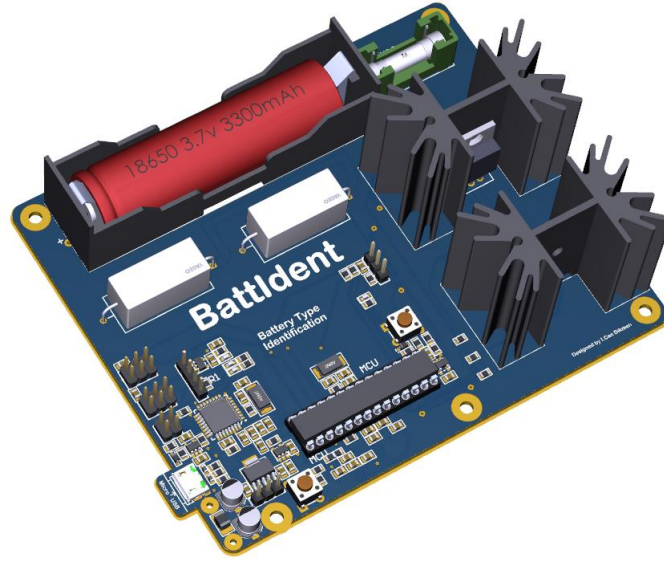
Deneysel düzenek üzerinden toplanan veriler ile yapay sinir ağı mikrodnetleyici üzerinde koşurulduğunda PKB algoritması %4,5 hata payı ile pilin kimyasını belirleyebilmiştir. Elde edilen sonuçlara ilişkin hata matrisleri Şekil 4.7'de sunulmuştur.



Şekil 4.7: PKB algoritmasının sadece yapay sinir ağı ile kullanımı sonucunu gösteren hata matrisi.

PKB algoritmasının matematiksel olarak Atmega324P mikrodenetleyici üzerinde de çalışabilmesinin mümkün olduğu hesaplanmıştır.

Bu mikrodenetleyici ve PKB algoritmasının koşturulabilmesi için gereken minimum donanım iki adet yük direnci ve bir akım sensörüdür. Bunlara ilaveten bir de sigorta içeren programlanabilir ve USB üzerinden diğer sistemler ile haberleşebilen bir devre ALTIUM'da tasarlanmıştır. Bu devreye PKB algoritmasına istinaden BattIdent ismi verilmiş ve Şekil 4.8'de görseli sunulmuştur.



Şekil 4.8: BattIdent izometrik görüntüsü.

4.3.2 PKB Algoritması Ver.2

Bölüm 4.3.1’de sunulan *Lemma 1*, *Lemma 2* ve *Lemma 3* birlikte ele alındığında; nispeten düşük nominal gerilime sahip bir pilin terminal geriliminin, nispeten daha yüksek nominal gerilime sahip eski veya düşük bir SoC’ye eşit olabileceği sonucuna varılabilir. Böyle bir durumda terminal gerilimlerinin örtüştüğü bir zarf söz konusudur.

Bu nedenle ham akım-gerilim değerlerinden pil kimyasının %100 doğrulukla belirlenebilmesi mümkün değildir. Yapılan ilk çalışmada hata payı minimum %4,5’e kadar indirilebilmiştir. Bu problemi ortadan kaldırmak için istatistiksel analiz temelli bir ayrıştırma fonksiyonu geliştirilmiştir.

4.3.2.1 Ayrıştırma Fonksiyonu

Bu fonksiyonun türetilmesi için akım ve terminal gerilimi değerlerinden hangilerinin istatistiksel olarak birbirleriyle anlamlı bir korelasyona sahip olduğunu belirlemek gerekmektedir. İstatistiksel anlamlılık, 1700'lere kadar uzanan ve verilerdeki sonuçların tek başına tesadüfen açıklanamayacağını tanımlayan bir terimdir (Arbuthnot, 1710). İstatistiksel anlamlılığın belirlenmesi için birçok istatistiksel yöntem vardır (Borror, 2009). Bu çalışmada üç farklı pil tipinin ikili kombinasyonlarda istatistiksel anlamlılık değerlendirilmesi yapılacağı için tTest kullanılmıştır.

tTest uygulanırken her seferinde iki veri seti dikkate alınmaktadır. Böylece, veri setlerinin istatistiksel önemi, ikili kombinasyonlarda hesaplanmıştır. Üç pil tipi için elde edilen

deneysel veriler üzerinde uygulanan tTest neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1:'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1: Hesaplanan t-Değerleri

t-Değerleri		
Akım Verilerine Göre		
LFP	-94,0903	NiMh
NiMh	-544,7052	NCA
NCA	0,4789	LFP
Terminal Voltaj Verilerine Göre		
LFP	-94,4213	NiMh
NiMh	-604,4625	NCA
NCA	9,8253	LFP

LFP ve NCA verileri arasında hesaplanan t-Değerinin diğer kombinasyonlara göre daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bu, istatistiksel anlamlılığın diğer kombinasyonlara kıyasla daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Hesaplanan t-değerlerine göre veri kümesinin ikinci kısmı istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar ışığında gerilim değerini, akım değerine bağlı olarak güçlendiren Denklem 4.5'de sunulan ayrıştırma fonksiyonu türetilmiştir (Dikmen & Karadağ, 2022).

$$f: x_{i,j} \rightarrow y_{i,j}, \quad \forall x_{i,j} \in \mathbb{R} \text{ and } \forall y_{i,j} \in \mathbb{R}$$

$$f_s(x) = \begin{cases} n \leq \frac{n_{max}}{2}, & f(x) = \frac{(x + \varepsilon) \times \eta}{\beta} \\ n > \frac{n_{max}}{2}, & f(x) = \frac{(x + \varepsilon) \times \eta \times \rho}{\beta} \end{cases} \quad (4.5)$$

Burada,

n : Satır numarası

n_{max} : Çerçevedeki maksimum veri uzunluğu

ε : Öteleme katsayısı

η : Ölçek büyütme faktörü

ρ : Önem faktörü

β : Ölçek küçültme faktörüdür.

Ayrıştırma fonksiyonunun matris formunda yazılışı Denklem 4.6'daki gibidir.

$$\begin{aligned} y_{i,j} &= f(x_{i,j}) \\ \mathbf{Y} &= f(\mathbf{X}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,j} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ x_{i,1} & \dots & x_{i,j} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & \dots & y_{1,j} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ y_{i,1} & \dots & y_{i,j} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

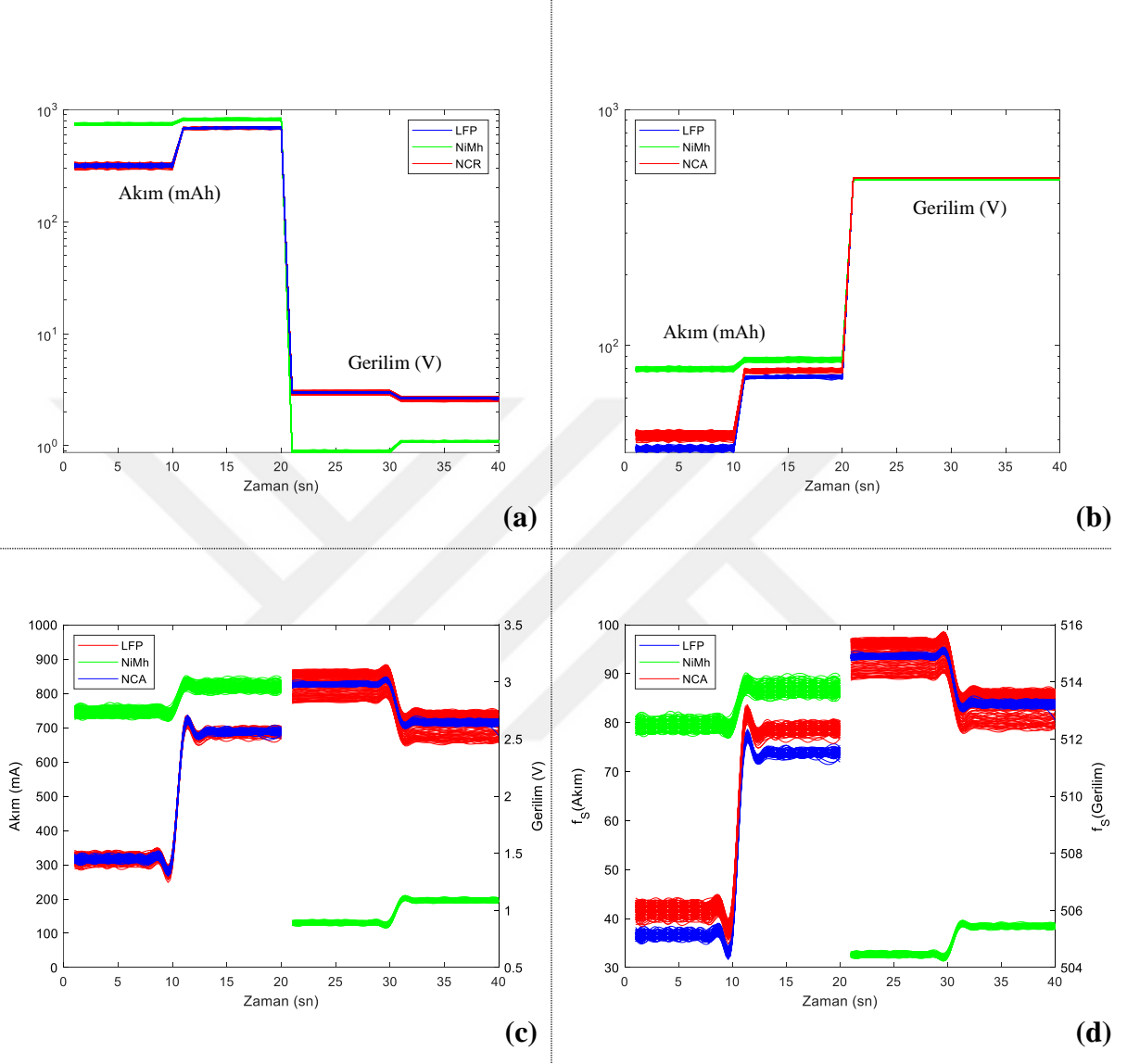
Denklem 4.7'de \mathbf{X} toplanan veriler ve \mathbf{Y} işlenen verilerdir. Bu veriler, satırları veri çerçevelerinden oluşan bir matris şeklinde birleştirilmiştir. Ayrıştırma fonksiyonu $f_s(x)$, Denklem 8'deki gibi matris formatında gösterilmektedir.

Parametreler $n_{max} = 40$, $\varepsilon = 100$, $\eta = 10$, $\rho = 50$ ve $\beta = 100$ olarak seçildiğinde elde edilen sonuç Şekil 4.9'da görüldüğü gibidir. Şekil 4.9a'da ham veriler sunulmuştur. Burada 0sn-10sn zaman aralığında, yük 1 direnci için mA ölçeğinde akım verileridir; 10sn-20sn zaman aralığı, yük 2 direnci için mA ölçeğinde akım verileridir. 20sn-30sn zaman aralığı, yük 1 direnci için volt ölçeğinde gerilim değerleri; 30sn-40sn zaman aralığı ise yük 2 direnci için volt ölçeğinde gerilim verileri görülmektedir. Hem akım hem de gerilim verileri aynı grafik üzerinde gösterildiğinden ordinat birimi verilmemiştir ve verilerin anlamlı bir görselde sunulması için logaritmik ölçek kullanılmıştır.

Şekil 4.9c'de, Şekil 4.9a'nın doğrusal ölçekte iki eksenli gösterimidir. Yani farklı aralığa sahip iki farklı veri iki ordinat eksenini ile sunulmaktadır. Burada, Tip 1 (LFP) ve Tip 2 (NCA) pillerin hem akım hemde gerilim verilerinin örtüştüğü açıkça görülmektedir.

Bu sorunu çözmek için verilere uygulanan, önerilen ayrıştırma fonksiyonunun etkisi Şekil 4.9b'de logaritmik ordinat ekseninde gösterilmektedir. Tip 1 ve Tip 2 pillerin gerilim verileri t-Test'e göre istatistiksel açıdan en anlamlı olanlardır. Yani ayrıştırma fonksiyonu, akım verilerini ayırmak için gerilim verilerini kullanmaktadır.

Ayrıştırma fonksiyonunun etkisi Şekil 4.9'de doğrusal ordinat ekseninde sunulmuştur. Verilerin işlenmesinden sonra mevcut değerlerin sınıflandırma yapılabilecek kadar ayrıldığı açıkça görülmektedir.

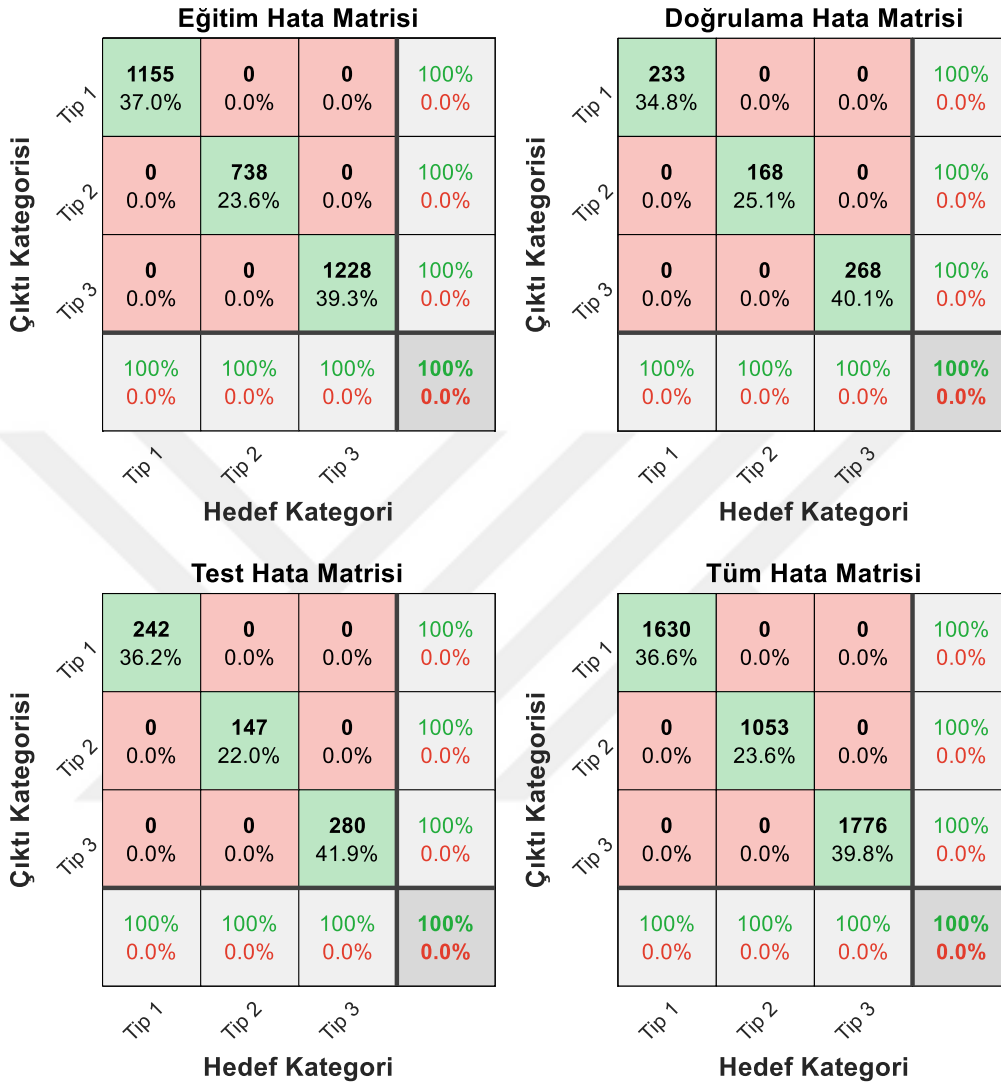


Şekil 4.9: Ayrıştırma fonksiyonunun etkisi.

Bu noktadan itibaren pil kimyasını belirleme problemi bir kategorizasyon problemine dönüşmektedir. Kategorizasyon probleminin çözümü için de PKB Algoritması Ver.2'de yapay sinir ağı kullanılmıştır.

Ayrıştırma fonksiyonu ile işlenen veri 4.3.1.2'de tasarlanan yapay sinir ağı kullanılarak kategorizasyona tabi tutulmaktadır. Ön işleme sayesinde kategorizasyon işlemi %100

doğrulukla yapılabilmektedir. Yapay sinir ağının hata matrisi Şekil 4.10’da sunulmuştur. Burada Tip 1 LFP, Tip 2 NCA ve Tip 3 NiMh batarya kimyasını temsil etmektedir.



Şekil 4.10: PKB algoritmasının ayrıştırma fonksiyonu ile işlenmiş veriyi kullanan yapay sinir ağı uygulaması sonucunu gösteren hata matrisi.

4.3.3 PKB Algoritması Ver.3

Bu çalışmada ortaya koyulan PKB Ver.1 ve PKB Ver.2 algoritmaları üç farklı pil kimyasını ayırt edebilme özelliğine sahipti. PKB Ver.3 ise beş farklı kimyaya sahip pilin kimyasını %100 doğrulukla belirleyebilecek şekilde geliştirilmiştir. Bu kapsamda kullanılan ilk dört pil, hâlihazırda ticarileştirilmiş ve yaygın olarak kullanılan, Şekil 4.11’de sunulan Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA), Lityum Demir Fosfat (LFP), Nikel Metal Hidrür (NiMh) ve Lityum Titanat Oksit (LTO) pillerdir.



Şekil 4.11: PKB Algoritması Ver.3 çalışmasında kullanılan fiziksel piller (Yeşil: NiMH; Kırmızı: NCA; Mavi: LFP; Sarı:LTO).

Son yıllarda artan patent sayısı ve ticarileştirme potansiyeli nedeniyle beşinci pil kimyasının lityum sülfür (LiS) olarak belirlenmiştir (Robinson et al., 2021).

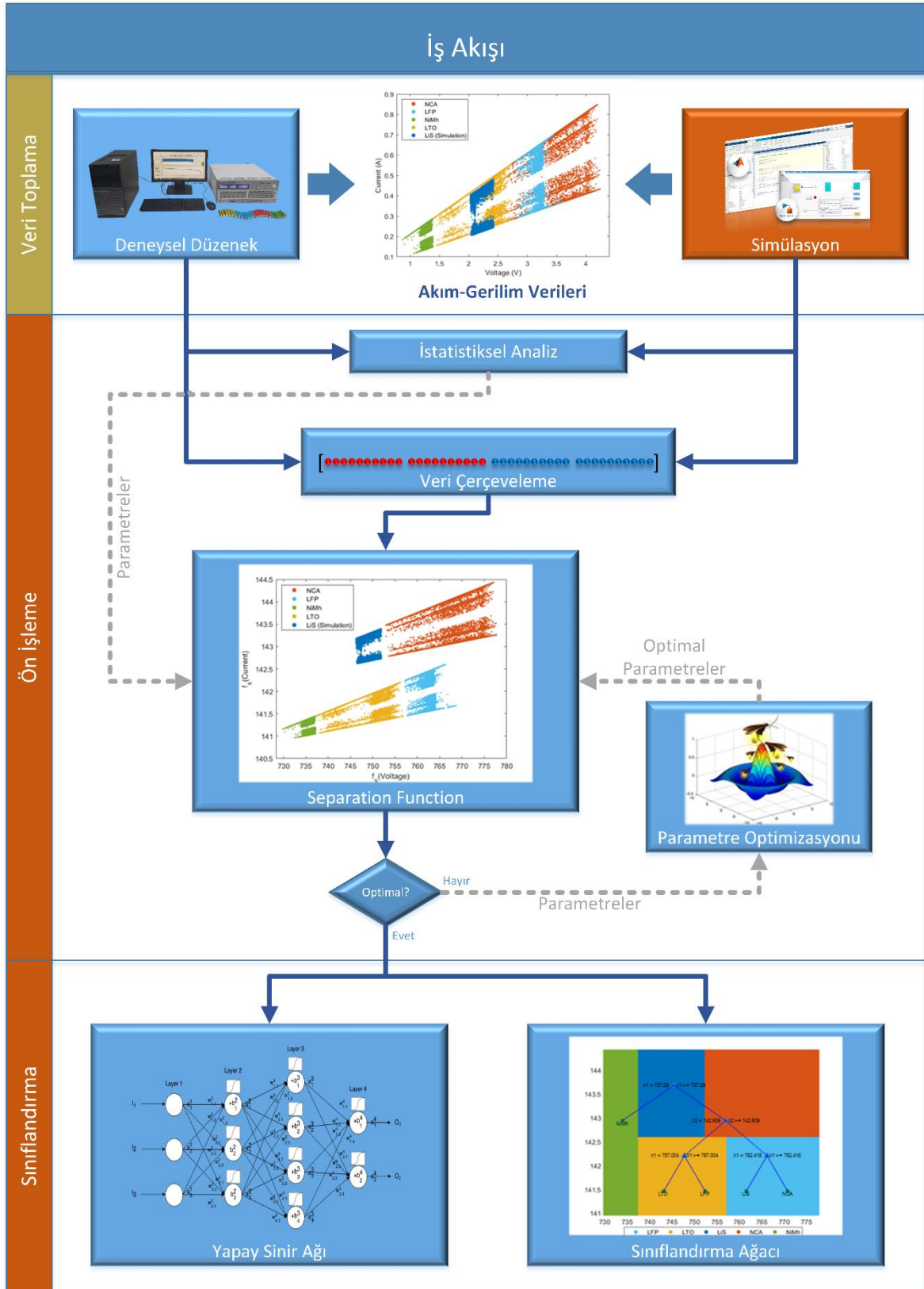
NCA, LFP, NiMh ve LTO pillerin verileri laboratuvar ortamında hazırlanan deney düzeneğinden elde edilmiş, LiS pillerin verileri ise MATLAB/SIMULINK'te hazırlanan ve tanılama algoritmasını uygulayan simülasyondan elde edilmiştir.

Deneysel çalışmada kullanılan tüm piller 1C ile yaşlandırılmışlardır. Yaşlandırma süreci Neware BTS4000 pil test cihazında toplamda 12 ay sürmüştür.

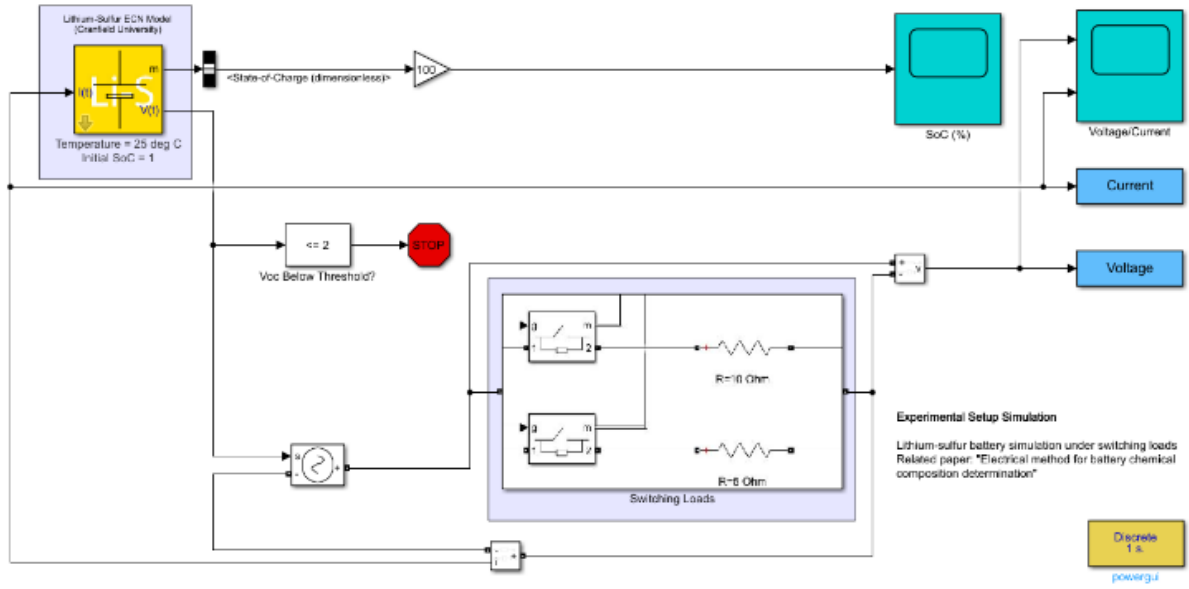
Lityum-Kükürt ECN Modeli (Propp et al., 2016), diğer pil kimyaları için deneysel veri toplama düzeneği için kullanılan algoritma ile aynı algoritma kullanılarak LiS pilleri için çalıştırılmıştır. Bu sayede LiS pillerinin PKB algoritmasının ihtiyacı olan akım-gerilim verileri elde edilmiştir.

SIMULINK görseli Şekil 4.13'de sunulan bu simülasyonda, yaşlanma etkisini simüle etmek için modeldeki dâhili direnç değerleri rastlantısal oranlarda artırılmıştır. Ayrıca simülasyon sıcaklığı 25°C'ye ayarlanmıştır ve başlangıç SoC %100 olarak alınmıştır.

Hem deneysel hem de simülasyon ile toplanan tüm verilerle, Şekil 4.12'de sunulan akış diyagramında gösterildiği sıra ve şekilde geliştirilen algoritmanın basamakları ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu sayede elde edilen optimal parametreler ile çalışan ayrıştırma fonksiyonu ve farklı oranlarda yaşlandırılmış pillerin deneysel verileri sayesinde PKB algoritması %100 başarı ile pil kimyasını belirleyebilmektedir.



Şekil 4.12: PKB Algoritması Ver.3 çalışmasının iş akışı diyagramı.



Şekil 4.13: LiS pillerin PKB algoritmasında kullanılan veri üretici simülasyonu.

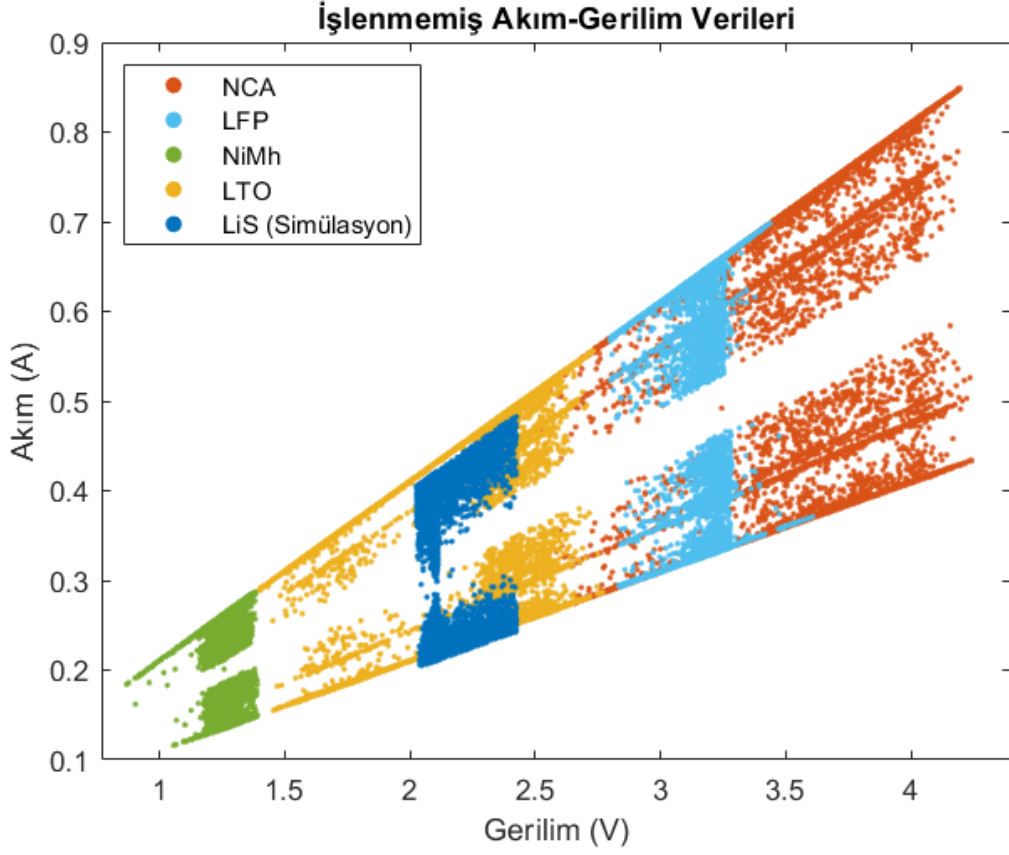
Yaklaşık 12 ay süren tüm bu çalışmalar sonucunda, deneysel ve simülasyon veri üreticilerinden 500000'den fazla ölçüm alınmıştır. Toplanan veriler Şekil 4.14:'de akım-gerilim çiftleri şeklinde sunulmuştur.

Burada, farklı kimyalara sahip ve 25 ila 2500 döngü arasında farklı oranlarda yaşlandırılmış pillerin verilerinin belirli alanlarda birbiriyle örtüştüğü görülmektedir.

Özellikle, NCA ve LFP piller ile LTO ve LiS pillerin verileri örtüşmektedir. Şekil 4.14'de iki keskin, doğrusal çizgiyle ayrılmış bir desen göze çarpmaktadır. Bunun nedeni ise akım-gerilimlerin iki farklı yük altında ölçülmüş olmasıdır.

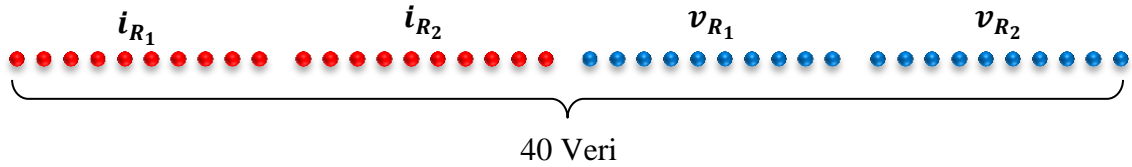
Bu iki keskin çizgi arasında görülen dağılım ise yaşlanma etkisinden kaynaklanmaktadır. Örnek olarak, yaşlanmış bir pil aynı gerilim değerine karşılık daha düşük bir akım sağlayabilmektedir ki bu da diferansiyel gerilim analizi ile yaşlanma etkisinin hesaplanabilmesine olanak sağlayan bir durumdur.

Şekil 4.14'de de görüldüğü gibi örtüşen değerler nedeniyle yalnızca ham akım-gerilim verilerinden pil kimyasını belirlemek her zaman mümkün değildir. Bu nedenle, veriler tanılama algoritmasında ön işleme tabi tutulmaktadır.



Şekil 4.14: Ayrıştırma fonksiyonu kullanılmadan beş farklı kimyaya sahip pilin akım-gerilim verileri.

Bu amaçla veriler çerçeveler halinde düzenlenmekte ve örtüşen değerleri ayırmak için doktora tez çalışması kapsamında geliştirilen ayrıştırma fonksiyonu kullanılmaktadır. Akım-Gerilim verileri, veri çerçevelerine dönüştürülürken birinci ve ikinci yükün akım değerleri (1 Hz örnekleme frekansı, 10 saniye için 10 veri noktası) ve daha sonra gerilim değerleri Şekil 4.15'de gösterildiği gibi veri çerçevelerini oluşturmak için yan yana birleştirilmektedir. Bu yapı pil kimyası ile ilgili daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.15: PKB algoritmasında kullanılan veri çerçevesi formatı.

PKB Algoritması Ver.2'de ortaya koyulan gerilim değerlerinin istatistiksel olarak daha anlamlı olduğu savının beş farklı pil kimyası kullanılması durumunda da geçerli olduğunu ispatlamak için deneysel olarak toplanan veriler üzerinde istatistiksel analiz yapılmıştır.

Verilerin Minimum, 1. Çeyrek, Ortanca, 3. Çeyrek ve Maksimum değer istatistikleri Çizelge 4.2.'de sunulmuştur. Sayısal değişkenlerin grup bazında normal dağılıma uygunluğu Shapiro-Wilk testi ile incelenmiştir.

Gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığını belirlemek için de Kruskal-Wallis H testi kullanılmıştır. Kruskal-Wallis H testinin ardından Conover testi kullanılarak ikili grup karşılaştırmaları yapılmıştır (Arslan et al., 2018).

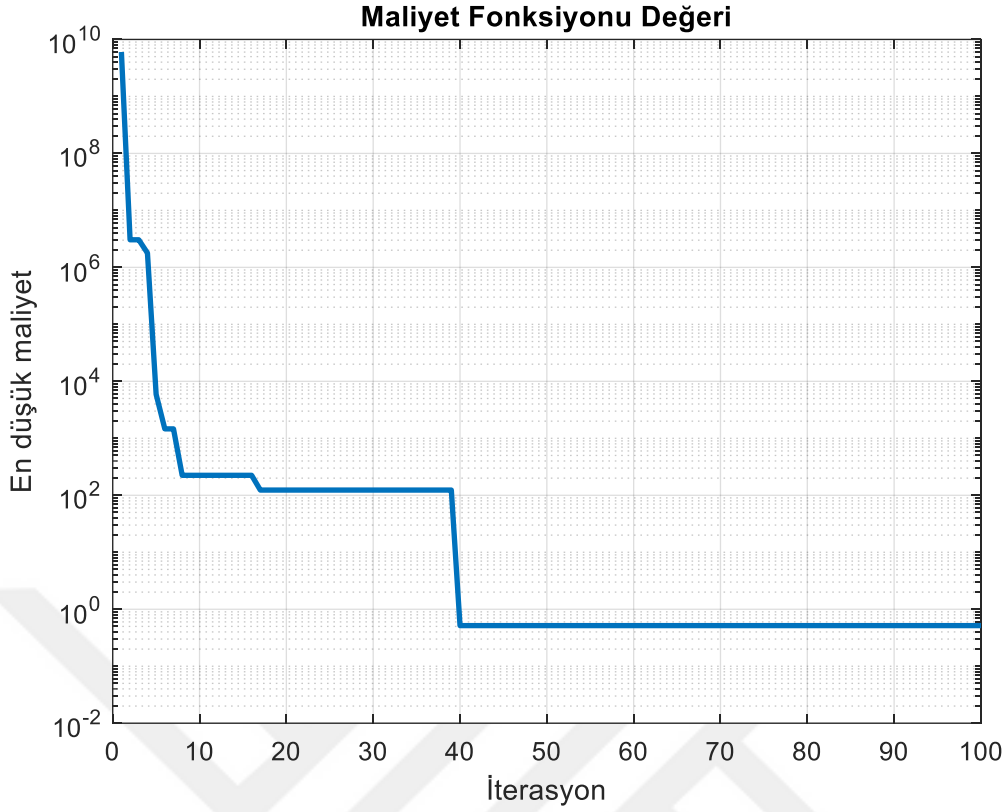
Çizelge 4.2: Akım-Gerilim veri istatistikleri

Grup		Min.	1. Ç	Ortanca	3. Ç	Mak.
LFP	Gerilim	2,7985	3,1546	3,2026	3,2309	3,6069
	Akım	0,2930	0,3320	0,4610	0,6460	0,6980
LiS	Gerilim	2,0364	2,0963	2,1020	2,1080	2,4245
	Akım	0,2061	0,2236	0,2994	0,3987	0,4822
LTO	Gerilim	1,3946	2,3194	2,3875	2,4737	2,8955
	Akım	0,1550	0,2510	0,3210	0,4840	0,5720
NCA	Gerilim	2,4966	3,4121	3,62325	3,8518	4,2417
	Akım	0,2640	0,3770	0,5160	0,7270	0,8490
NiMh	Gerilim	0,8683	1,2447	1,2612	1,2845	1,3913
	Akım	0,1160	0,1370	0,1950	0,2620	0,2870

Elde edilen sonuçlara göre tüm pil tiplerinde gerilim değerlerinin istatistiksel olarak daha anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu da doktora tez çalışması kapsamında geliştirilen ayrıştırma fonksiyonunun doğru yapılandırıldığı ve beş farklı pil kimyası için de kullanılabilirliğini göstermektedir.

Ateş böceği optimizasyon algoritmasının uygulanması esnasında, maliyet fonksiyonunun yakınsama grafiği Şekil 4.16'da sunulmuştur. 40'inci iterasyondan sonra optimal değerlere ulaşıldığı grafikte görülmektedir. Optimizasyon sonucunda da ayrıştırma fonksiyonunun optimal parametreleri $\eta = 38.03$, $\rho = 5.051$, $\beta = 1.3523$, and $\varepsilon = 50.502$ olarak hesaplanmıştır.

Optimize edilen değerlerin de istatistiksel anlamlılık analizi sonuçlarını desteklemesi gerekmektedir. Yani örtüşen verilerin gerilim kısımları istatistiksel olarak anlamlı bulunduğundan, ρ parametresi birden farklı bir değer almak zorundadır. Optimizasyon sonucunda da ρ parametresi 5.051 olarak hesaplanmıştır. Bu da hesaplanan optimal parametrelerin istatistiksel anlamlılık analizi sonuçlarını desteklediğini göstermektedir.

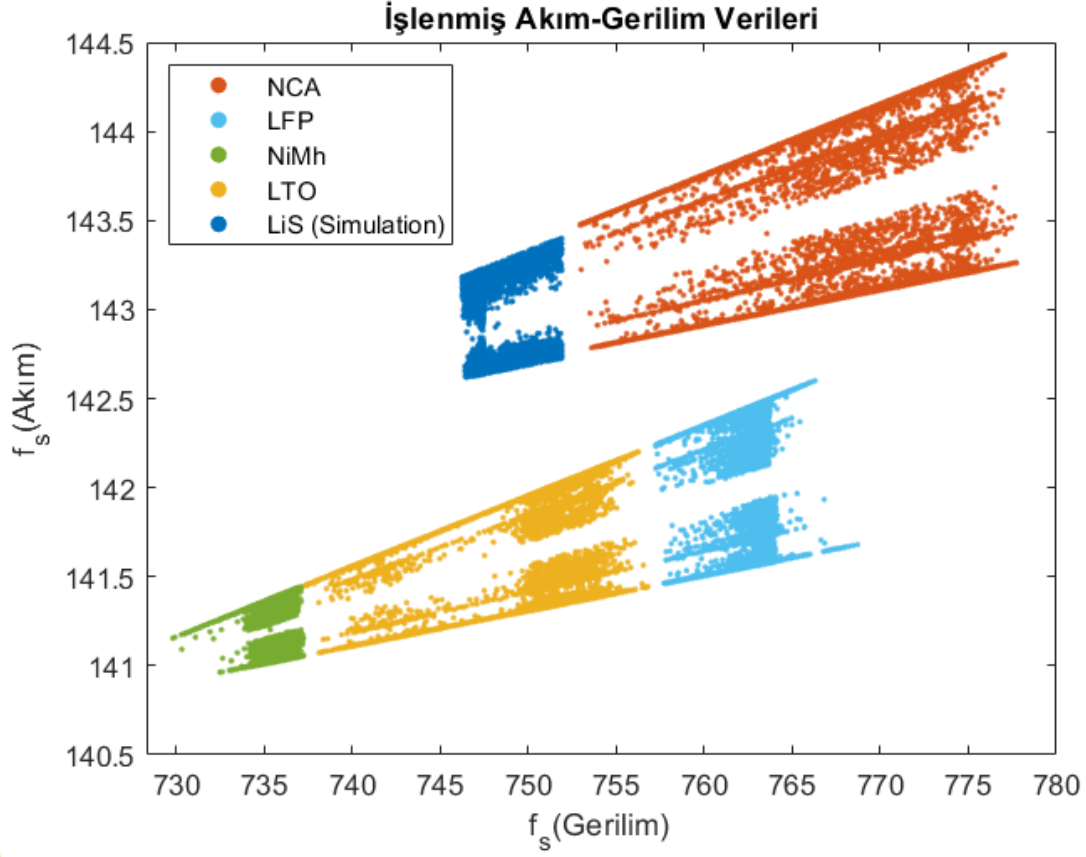


Şekil 4.16: Ateş böceği optimizasyon algoritmasının maliyet fonksiyonu yakınsama grafiği.

Akım-gerilim verileri, parametreleri optimize edilmiş ayrıştırma fonksiyonu işlendiğinde belirgin bir şekilde farklı kimyaya sahip pillerin verilerinin birbirinden ayrılabilirdiği görülmektedir. Ayrıştırma fonksiyonunun etkisi Şekil 4.17’de açıkça görülmektedir. Şekil 4.17’de özellikle örtüşen LiS-LTO ve LFP-NCA verilerinin aynı gerilim değerlerine karşılık geldikleri halde ayrıştırma fonksiyonunun akım değerlerine göre farklı değerler üretebilmesi sebebiyle ayrıştığı; yani aynı gerilim değerine karşılık gelen fonksiyon değerlerinin y ekseninde belirgin biçimde ötelendiği görülmektedir.

Ayrıca bu grafikte verilerin alt ve üst kısmında görülen net doğrusal çizgiler PKB algoritması gereği kullanılan iki farklı değerdeki dirence karşılık gelen akım değerlerini gösterirken; bu iki çizgi arasında kalan alandaki dağılım bölgesi ise veri almak için kullanılan pillerin farklı oranlarda yaşlandırılmış olmasından kaynaklanmaktadır.

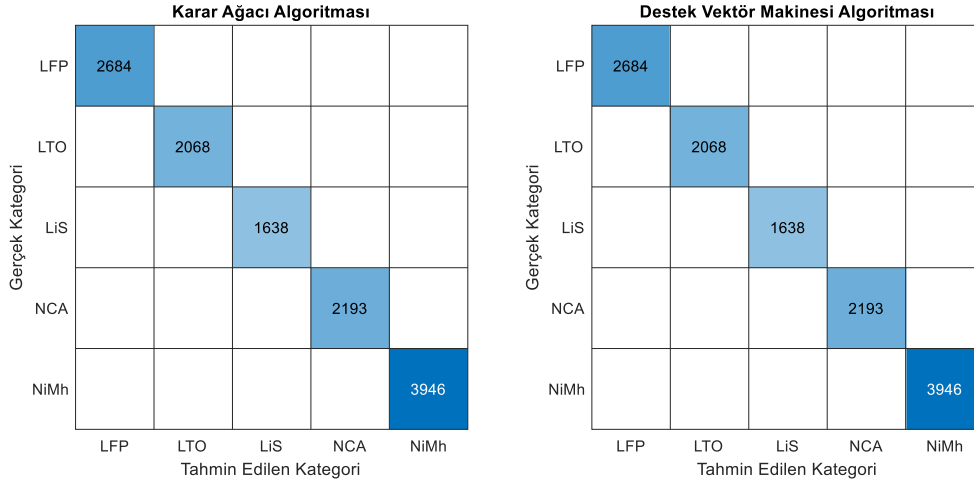
Burada ayrıştırma fonksiyonunun pillerin sağlık durumları ne olursa olsun ayrıştırma işleminin etkin biçimde gerçekleştirebildiği görülmektedir.



Şekil 4.17: Ayırıştırma fonksiyonu ile işlenmiş beş farklı kimyaya sahip pilin akım-gerilim verileri.

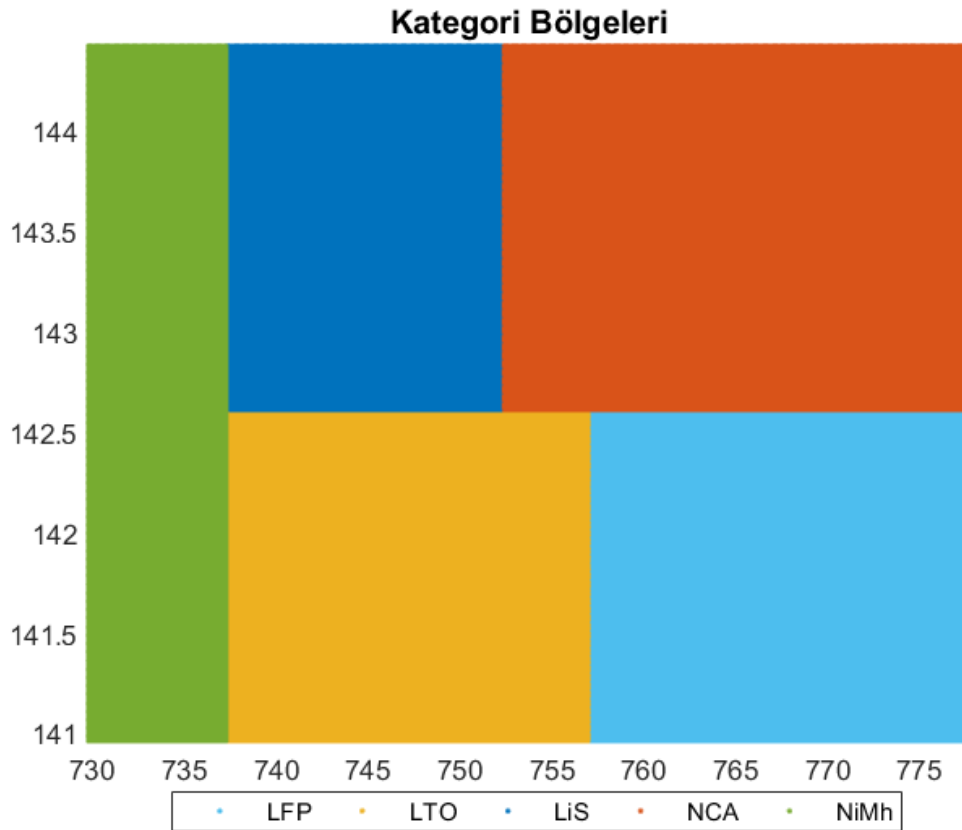
Pil kimyasını belirleme problemi, ayırıştırma fonksiyonu sayesinde, bu noktadan itibaren bir kategorizasyon problemine dönüşmektedir. Kategorizasyon probleminin bu fazda çözümü için makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmıştır. Bunun için MATLAB bünyesinde bulunan Classification Learner uygulaması kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre ayırıştırma fonksiyonu ile işlenmiş veriler hem Karar Ağacı algoritmasında hem de Destek Vektör Makinesi algoritmasında %100 doğrulukla kategorize edilebilmektedir. Her iki algoritmanın da hata matrisleri Şekil 4.18’de sunulmuştur.



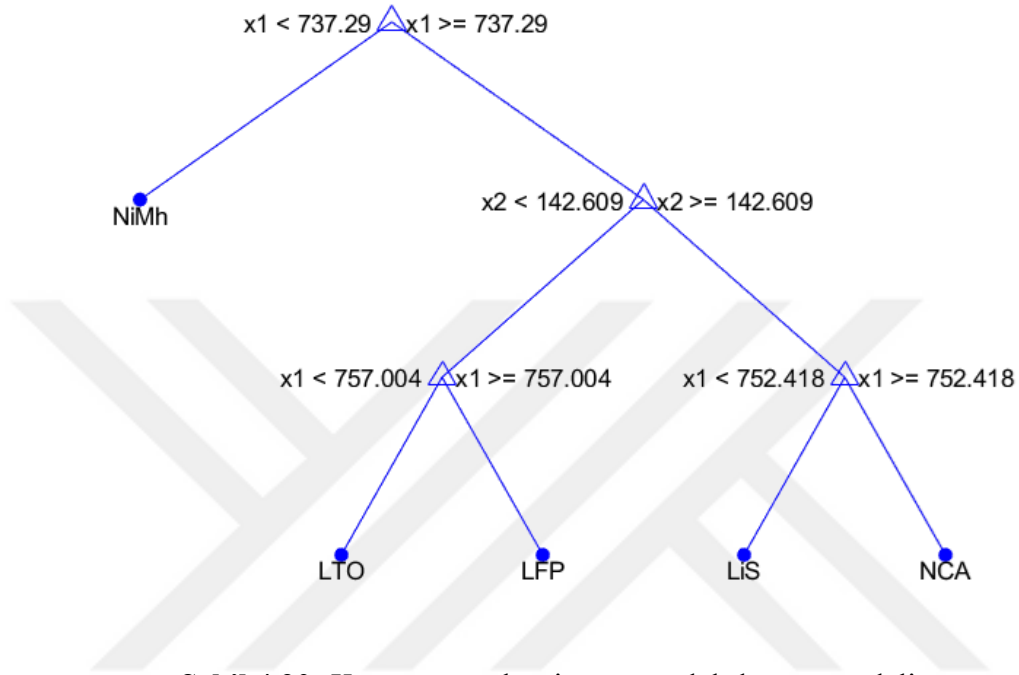
Şekil 4.18: Karar ağacı ve destek vektör makinesi algoritmalarının hata matrisleri.

Doktora tez çalışması kapsamında geliştirilen tanılama algoritmasının BYS donanımında bir mikrodenetleyici üzerinde çalışacağı göz önüne alındığında işlemsel maliyetin mümkün olan en düşük seviyede tutulması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle kategorizasyonda Karar Ağacı algoritmasının kullanılmasının işlemsel maliyet bakımından çok daha avantajlı olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.19: Karar ağacı algoritmasının sınıflandırma alanları.

Ayrıştırma fonksiyonu ile işlenmiş akım-gerilim verilerinin Karar Ağacı Algoritması ile kategorizasyonu Şekil 4.19’da sunulmuştur. Şekil 4.20’de ise algoritmanın dal ve düğümleri sunulmuştur.



Şekil 4.20: Karar ağacı algoritmasının dal-düğüm modeli.

4.4 Geliştirilen Batarya Yönetim Sistemi (E-Cameleon)

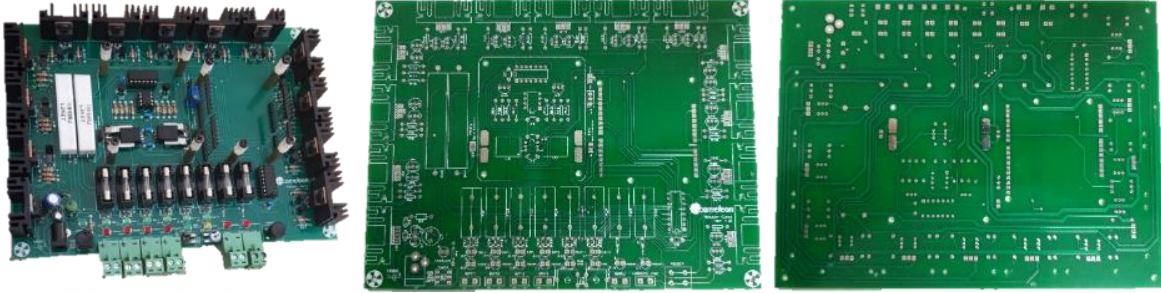
TÜBİTAK 1512 programı desteği ile birinci sürümü geliştirilen PKB özelliğine sahip batarya yönetim sistemi olan E-Cameleon’un ikinci sürümü için İnönü Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenen bir öncelikli alan projesi yürütülmüştür. Bu proje ile ikinci sürüm prototipi geliştirilen yeni nesil, modüler ve akıllı batarya yönetim sisteminin en son sürümü olan üçüncü sürümü ise İnönü Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenen Dr Tez Projesi ile gerçekleştirilmiştir (Dikmen & Karadağ, 2021c; Karadağ & Dikmen, 2021).

4.4.1 Donanım

Batarya yönetim sistemi donanımı için iki farklı kart tasarımı yapılmıştır. Bunlardan ilki ana kart ikincisi ise yardımcı karttır. Kart tasarımları için ALTIUM yazılımı kullanılmıştır.

4.4.1.1 Ana kart 1. sürüm

Ana kart tasarımında ise dört adet bataryayı ayrı ayrı yüke veya şarja bağlayabilecek ve bunu yaparken de hem akım sınırlaması hem de gerilim kontrolü yapabilecek bir tasarım yapılmıştır. İlk tasarım MOSFET'ler ile yapılmıştır. Ana kartın ilk sürümünün görüntüleri Şekil 4.21'de sunulmuştur.

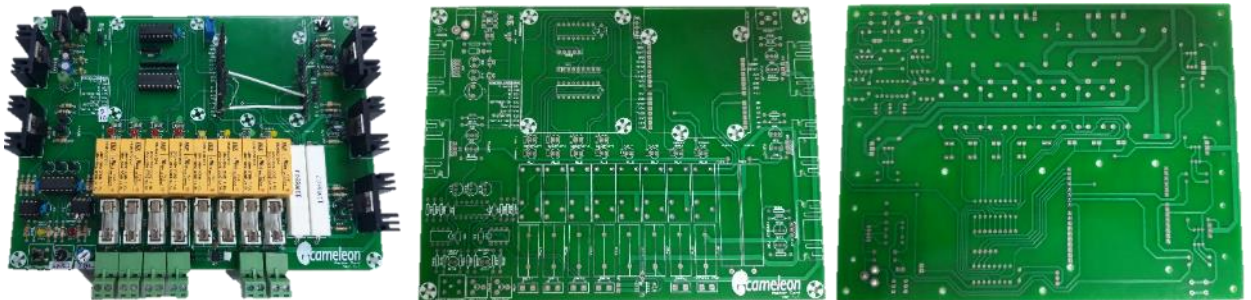


Şekil 4.21: Ana kart 1.sürüm devre kartının dizgili ve dizgisiz görünümü.

Ana kart kontrolünde Arduino tabanlı bir işlemci seçilmiştir. Bunun sebebi ise sonraki sürümlerde CAN haberleşmesi için altyapı sağlaması ve yazılım geliştirme kolaylıklarıdır. Tüm bunların yanında ana kart üzerinde bağlanan bataryaların tipinin tanınması ve gelecekte kullanılacak farklı batarya tiplerinin tanınması için ayrı bir devre yer almaktadır. Bu sayede arayüz yazılımının oluşturulduğu mini bilgisayar yardımıyla yapay zekâ uygulamaları geliştirilerek mevcut PKB sisteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

4.4.1.2 Ana kart 2. sürüm

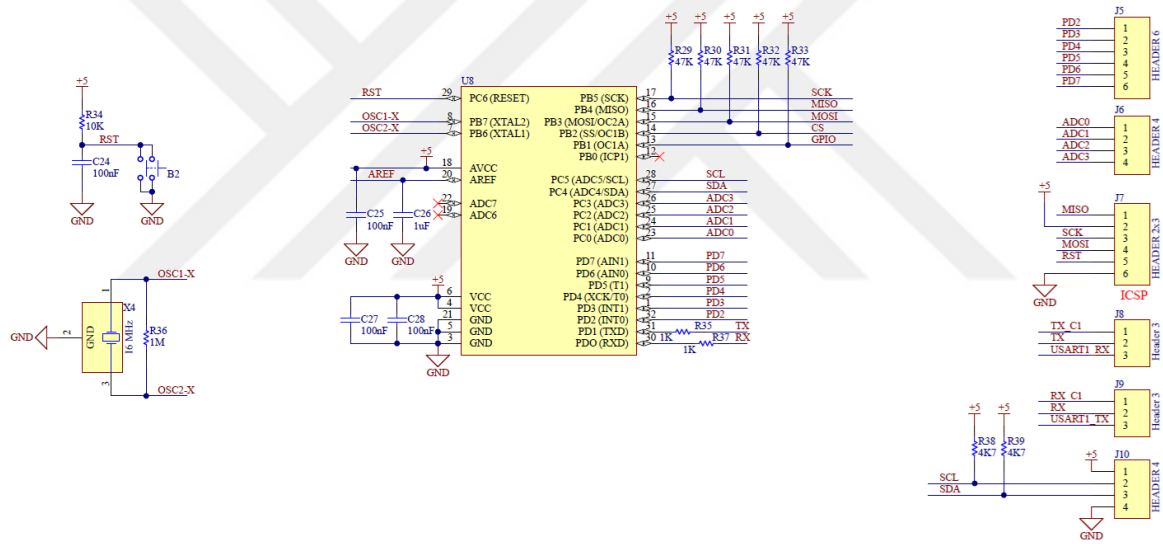
Ana kart 1.sürüm'de görülen eksiklik ve aksaklıklar doğrultusunda kartın tasarımı geliştirilerek ikinci sürümü yapılmıştır. Bu ikinci sürümde Şekil 4.22'de görüldüğü gibi röleler kullanılmış ve ilk sürüme ek olarak iki donanımsal ve bir yazılımsal olmak üzere üç katmanlı bir akım koruması eklenmiştir.



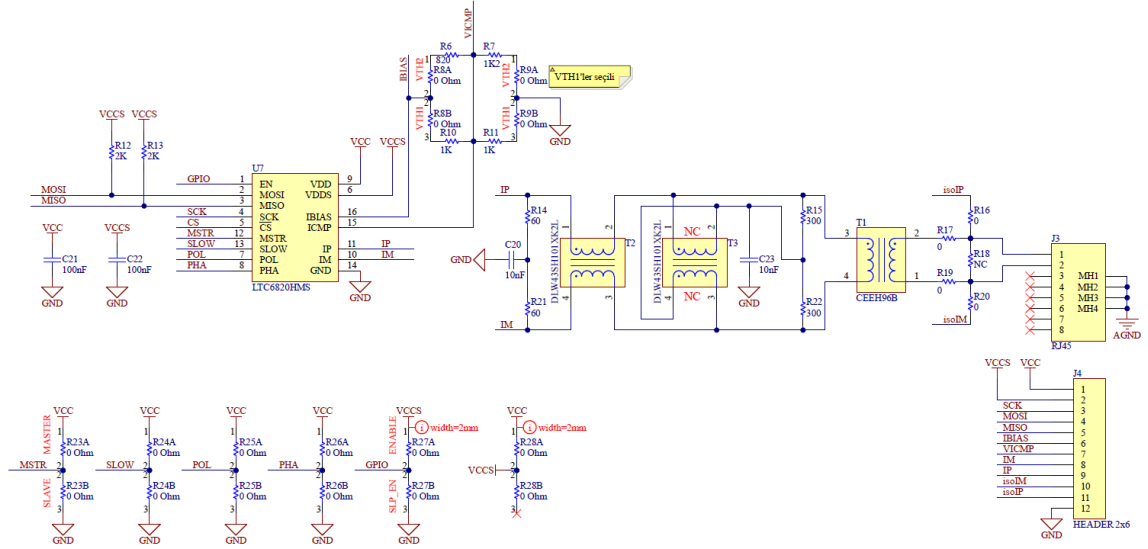
Şekil 4.22: Ana kart 2.sürüm devre kartının dizgili ve dizgisiz görünümü.

4.4.1.3 Ana kart 3. sürüm

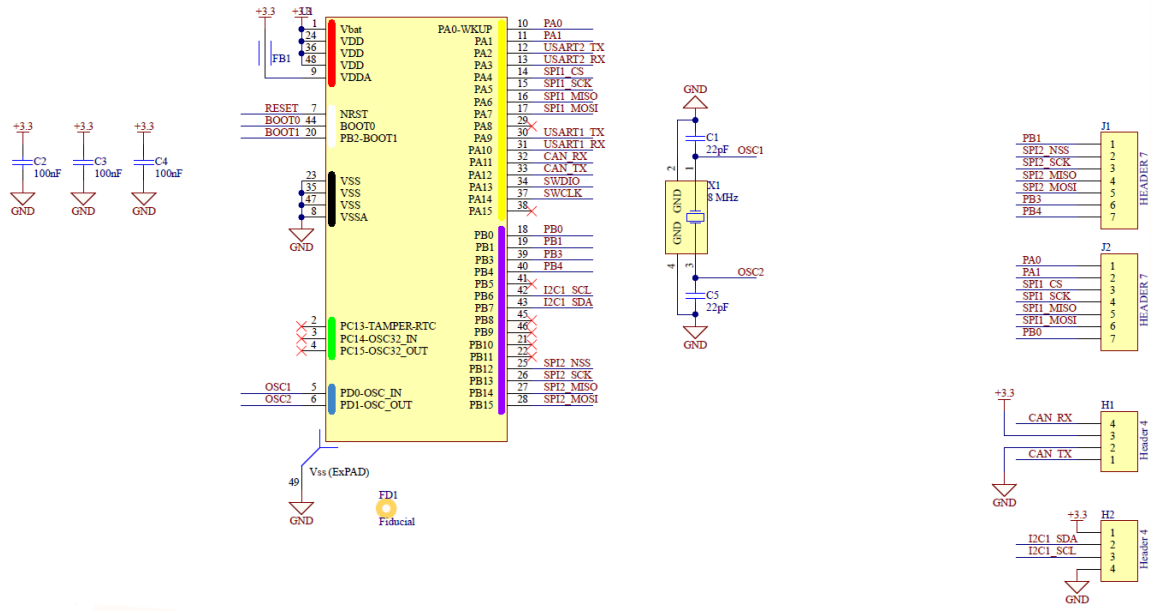
Ana kart 3. sürümde sistem bazında esneklik sağlanması amacıyla anahtarlama mekanizması uzaktan kontrol edilebilecek biçimde tasarlanabilmektedir. Yani, kart kontrol iletişim portları ile anahtarlama devresi kontrol edilebilmektedir. Kart üzerinde iki adet mikro denetleyici bulunmaktadır. Ana kart, yardımcı kartlar ile galvanik izolasyonlu SPI bağlantı üzerinden iletişim kurmaktadır. Araç ve/veya yardımcı sistemler ile USB bağlantısı ile iletişim kurabilmektedir. Bunun yanında yine araç ile iletişim için otomotiv sektöründe standart iletişim protokolü olarak kullanılan CAN-BUS desteği eklenmiştir. Daha önce Raspberry pi3 üzerinde yapılan yüksek seviye BYS hesaplamaları için de STM32 işlemcisi eklenmiştir. Bu sayede birden fazla sistemi kontrol edebilen, çok fonksiyonlu, tümleşik bir ana kart tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ana kartın detaylı devre şemaları Şekil 4.23 – Şekil 4.26’da sunulmuştur. Ana kart ve 3D görseli ise Şekil 4.27’de sunulmuştur.



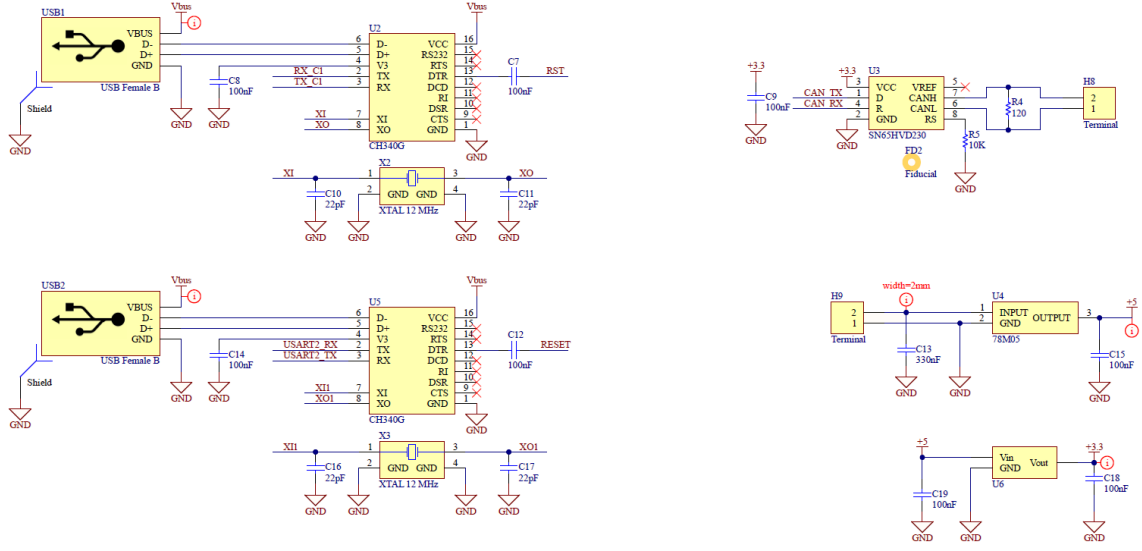
Şekil 4.23: Ana kart CPU1 devre şeması.



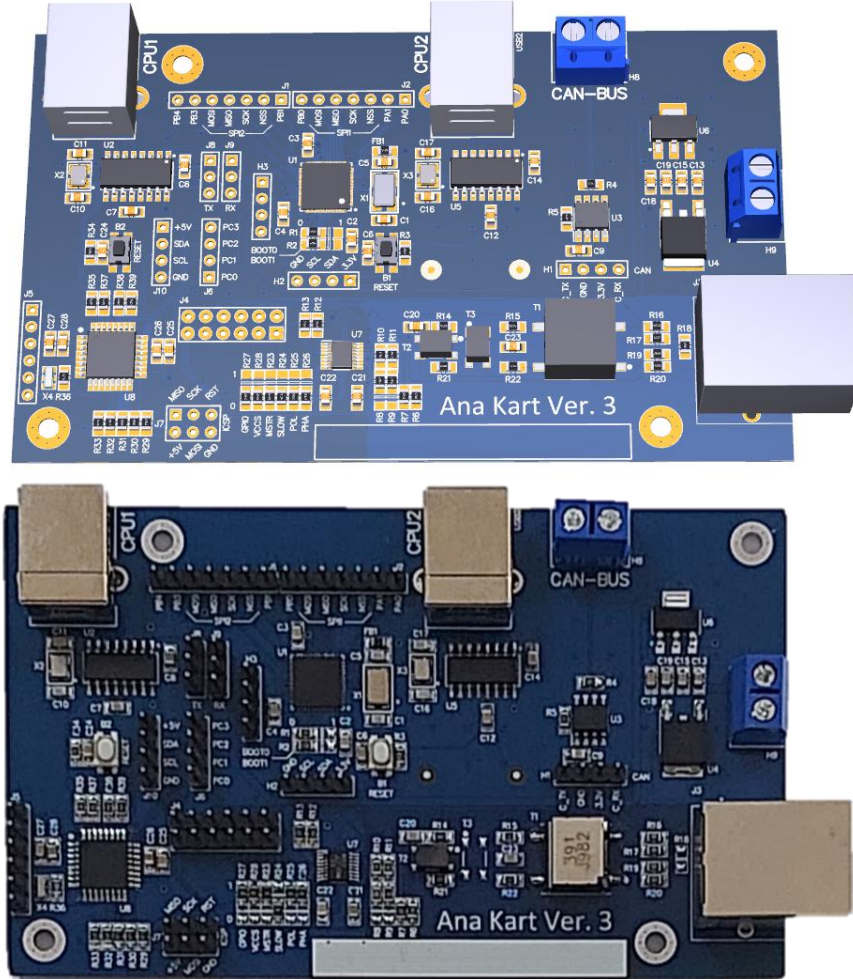
Şekil 4.24: Galvanik izolasyonlu SPI iletişim devresi seması.



Şekil 4.25: Ana kart CPU2 devre şeması.



Şekil 4.26: Ana kart CPU programlama ve haberleşme USB devresi şeması.



Şekil 4.27: Ana kart ve 3D görünümü.

4.4.1.4 Yardımcı kart 1. sürüm

Yardımcı kart tasarımlarında 18 adet hücre ile oluşturulacak bir batarya paketi esas alınarak tasarım yapılmıştır. Bu 18 hücrenin gerilimlerini ayrı ayrı okuyabilen ve böylece batarya paketini yönetebilen bir sistem tasarlanmıştır. Bunun için öncelikle PCB tasarım programında kart tasarım yapılmış sonrasında ise gerber dosyaları elde edilerek üretimleri hizmet alımı ile gerçekleştirilmiştir.

Üretilen yardımcı kartın ilk sürümünün görüntüleri Şekil 4.28’de sunulmuştur. Yardımcı kartlar, ana kart ile galvanik izolasyonlu SPI bağlantısı üzerinden haberleşmektedirler. Bu sayede galvanic izolasyon sağlanmaktadır. Bu özellik otomotiv sanayiinde kullanılan batarya yönetim sistemleri için zaruri bir özelliktir.



Şekil 4.28: Yardımcı kart 1. sürüm.

4.4.1.5 Yardımcı kart 2. sürüm

İlk sürüm ile yapılan testler sonucunda görülen eksiklik ve aksaklıklar sebebiyle tasarım güncellenerek yeni sürümü üretilmiştir. Yardımcı kart 2.sürümünün görüntüsü de Şekil 4.29’da sunulmuştur.



Şekil 4.29: Yardımcı kart 2. sürüm.

Donanım seviyesinde hem ana kart, hem de yardımcı kart geliştirilerek ikinci sürümleri üretilmiştir. Ana kartın ilk sürümünde anahtarlama elemanı olarak MOSFET'ler tercih edilmişken, ikinci sürümünde röleler tercih edilmiştir. Bunun nedeni MOSFET'lerin anahtarlama esnasında meydana gelen geçici rejimlerin donanımsal olarak bertaraf edilememesi ve kartta arızalara yol açmasıdır.

İkinci sürümünde hem rölelere geçilmiş hem de röle anahtarlama bir çoğullayıcı (multiplexer) üzerinden gerçekleştirilerek her defasında sadece ve sadece bir anahtarın açık olması donanımsal olarak garanti altına alınmıştır. Yardımcı kartların ilk sürümünde dengeleme ve harici giriş portları pin soketleri ayrı verilmiştir. İkinci sürümünde ise bu kadar fazla harici girişe ihtiyaç olmaması sebebiyle sadece ortam sıcaklığını ölçmek için bir adet GPIO (General Purpose Input Output - Genel Maksat Giriş Çıkış) pini ve yanına gereken besleme hattı çekilerek üç pinli bir çıkış verilmiştir.

Ayrıca birinci sürüm yardımcı kartlar dört katmanlı PCB olarak tasarlanıp üretilmişken, ikinci sürümde bu iki katman olarak tasarlanıp üretilmiştir. Bu da hem üretim kolaylığı, maliyet düşüklüğü hem de arıza durumunda kolay tespit ve onarım imkânı sağlamaktadır.

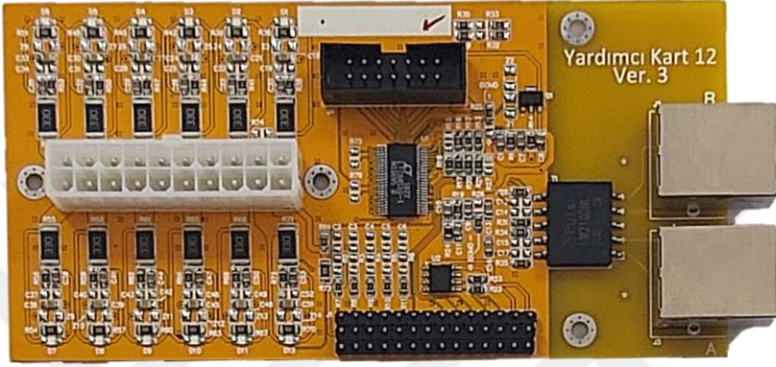
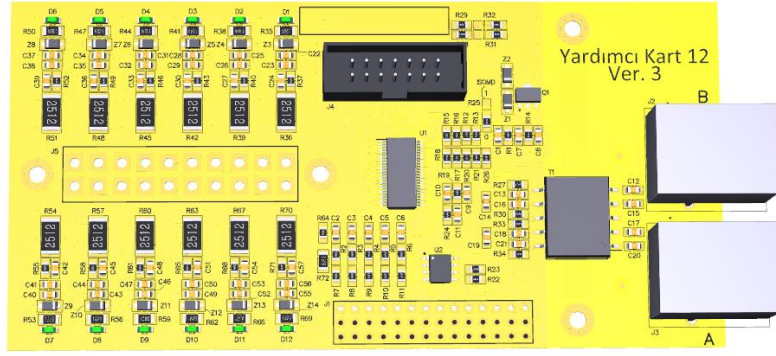
4.4.1.6 Yardımcı kart 3. sürüm

Yardımcı kartların 3. sürümünde 18 hücre için kullanılan yardımcı kartların yanı sıra 12 hücre yönetebilen kartlar da tasarlanmıştır. Bu sayede grup ve batarya oluşturulurken farklı kimyaya sahip hücrelerin toplam gerilimleri birbirlerine daha yakın olan gruplar oluşturulabilmektedir.

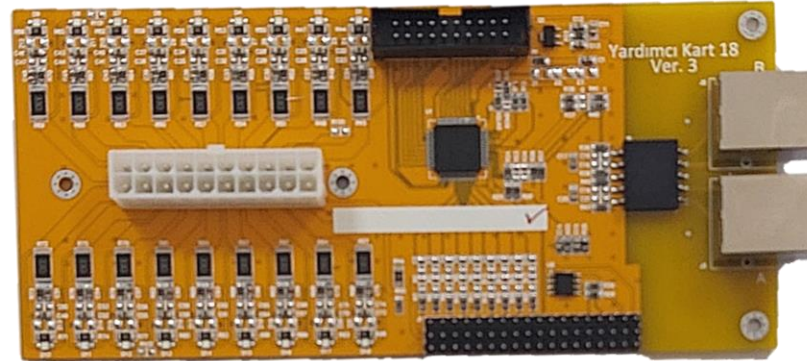
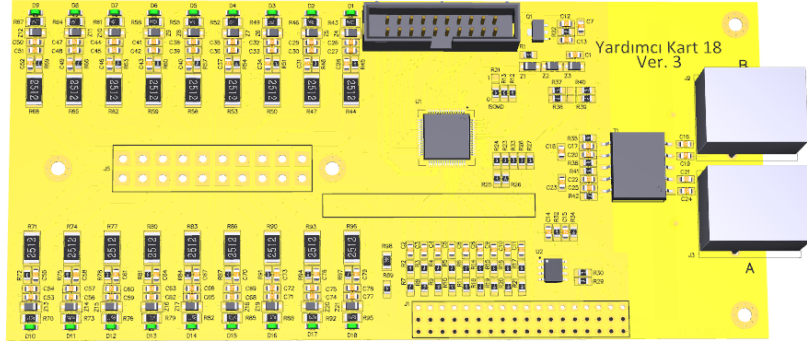
Bu yaklaşım çoklu kimyali bataryaların tasarımını kolaylaştırmaktadır. 3. sürüm yardımcı kartlar ayrıca pasif dengelemeyi de desteklemektedir. Bu amaçla kart üzerinde yerleştirilmiş LED'ler devreye ters bağlanmıştır. Böylece pil grubundan karta doğru akım akışı olması durumunda yani dengeleme için akım çekilirken LED'ler yanmaktadır.

Yardımcı kart kullanımında dengeleme esnasında ışıklı ikaz verilerek algoritmanın ve devrenin doğru çalıştığı ve dengeleme yapıldığı görsel olarak anlaşılabilir. Şekil 4.30 – Şekil 4.32'de yardımcı kartların devre şemaları sunulmuştur.

12 veya 18 hücre kontrol edebilmesine göre LTC6813 entegresinin C portuna bağlanan hücre sayısı değişmektedir. 12 ve 18'lik yardımcı kartlar ve 3D görselleri ise Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'de görülmektedir.



Şekil 4.33: 12'lik yardımcı kart 3. sürüm 3D görünümü ve üretilen prototip.



Şekil 4.34: 18'lik yardımcı kart 3. sürüm 3D görünümü ve üretilen prototip.

4.4.2 Yazılım

Ana kart/yardımcı kart kontrolü için C++ tabanlı bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım ile temel olarak iki işlev öngörülmüştür. Bunlardan ilki yardımcı kartlardan alınan verilerin işlenmesi ve ana karta gönderilmesidir. İkinci işlevi ise ana kartın kontrolüdür.

Birinci işlevi için galvanik izolasyonlu SPI bağlantı ile yardımcı kartlardan alınan veriler, bütünleştirilerek derlenip arayüz yazılımına USB bağlantısı üzerinden gönderilmesidir. Bu sayede arayüz üzerinde BYS verileri gösterilebilmektedir.

İkinci işlevi olan ana kart kontrolü için ise yine yazılımsal olarak güvenli (teyitli) bir şekilde ana kart üzerindeki rölelerin ve MOSSFET'lerin sürülmesi gerçekleştirilmektedir. Tüm bu işlemler, arayüz yazılımı tarafından, USB bağlantısı üzerinden gönderilen komutların uygulanması ve teyit/hata mesajlarının geri gönderilmesi şeklinde yapılandırılmıştır.

Bu sayede arayüz yazılımı gönderdiği her komut için teyit olarak işlem yapmaktadır. Tüm bu özelliklere ek olarak, bağlı bataryaların şarj durumlarını (SoC) ölçümlemek/kestirmek için iki yöntem tercih edilmiştir. Bunlardan ilki ve daha doğru sonuç verdiği tespit edilen yöntem cloumb sayma metodudur. İkinci yöntem ise bataryaların yaşlandırma verilerinden elde ettiğimiz veri seti kullanılarak uygulanan kestirim metodudur.

4.4.2.1 Ana kart yazılımı

Ana kart yazılımı C++ dilinin özelleştirilmiş bir sürümü olan Processing dili kullanılmıştır ve 1428 satır koddan meydana gelmektedir. Bu yazılım yardımcı kartlar ile haberleşerek onlardan aldığı verileri işlemektedir. Bunun yanında batarya yönetim sisteminin tüm fonksiyonlarını yerine getirmektedir. Bu yazılımda kullanılan fonksiyonlar ve kısa tanımları aşağıdaki gibidir.

run_command(char cmd)

USB üzerinden gelen komutun uygulanmasını sağlayan fonksiyondur. Gelen komutlar tek karakter olarak gönderilmektedir. Bu fonksiyon da gelen karaktere göre ilgili dallanmayı sağlamaktadır. Komutlar ve karşılıkları şu şekildedir:

- 1: Yardımcı kartlardan gelen ve hesaplanan verileri USB üzerinden gönder.
- 2: Batarya 1'in elektriksel olarak bağlanması için gereken işlemleri yap.
- 3: Batarya 2'nin elektriksel olarak bağlanması için gereken işlemleri yap.
- 4: Batarya 3'ün elektriksel olarak bağlanması için gereken işlemleri yap.

- 5: Batarya 4'ün elektriksel olarak bağlanması için gereken işlemleri yap.
- 6: Tüm bataryaların elektriksel bağlantısını kesmek için gereken işlemleri yap.
- 7: Elektriksel olarak bağlanmış bataryayı yüke bağlamak için gereken işlemleri yap.
- 8: Elektriksel olarak bağlanmış bataryayı şarja bağlamak için gereken işlemleri yap.
- 9: Seri haberleşme önbelleklerini temizle ve yeni komut almak için hazır bekle.
- A: Batarya 1'in elektriksel olarak şarja bağlanması için gereken işlemleri yap.
- B: Batarya 2'nin elektriksel olarak şarja bağlanması için gereken işlemleri yap.
- C: Batarya 3'ün elektriksel olarak şarja bağlanması için gereken işlemleri yap.
- D: Batarya 4'ün elektriksel olarak şarja bağlanması için gereken işlemleri yap.
- E: Elektriksel olarak bağlanmış bataryayı tanılama birinci yüküne bağlamak için gereken işlemleri yap.
- F: Elektriksel olarak bağlanmış bataryayı tanılama ikinci yüküne bağlamak için gereken işlemleri yap.
- T: Donanımı Test et.
- Z: Akım sensörünü oku.

measurement_loop(uint8_t datalog_en)

Bağlı tüm yardımcı kartlardan hücre gerilimlerini, entegre sıcaklık değerini ve GPIO verilerinin önceden belirlenmiş zaman aralıklarında periyodik olarak okunmasını sağlar. Ayrıca her bir yardımcı kartın doğru veri gönderip göndermediğini kontrol eder ve diagnostik hizmeti sağlar.

4.4.2.2 Arayüz yazılımı

Python programlama dilinde mini bilgisayar (Raspberry pi 3) üzerinde çalışan bir arayüz yazılımı yazılmıştır. Bu yazılım BYS tarafından elde edilen verilerin ve ana kart kontrolünün kullanıcı dostu bir şekilde görselleştirilmesinin yanı sıra arka planda tanılama, SoC kestirimi gibi işlemsel maliyeti yüksek algoritmaların uygulanması işlevini görmektedir. Bu da bir dokunmatik, LCD ekran üzerinde verilerin görselleştirilmesini sağlamaktadır. Yazılımın görsel kısmı için appJar kütüphanesi kullanılmıştır.

Kullanılan Python appJar Widget'ları:

Çerçeve: appJar penceresi için sabit bir boyutta çerçevenin ana hatlarını çizmektedir.

Düğmeler: Kullanıcının sistem arayüzüyle etkileşimde bulunmasının bir yolu olarak bir düğme kullanılır. Düğmeye tıklandığında, program tarafından ilgili eylem tetiklenmektedir.

Giriş: Kullanıcı arayüzü aracılığıyla kullanıcıdan girdi almak için kullanılan standart bir appJar widget'ı. Kullanıcının metin girebileceği basit bir kutu sağlanmıştır.

Kontrol Düğmesi: Onay düğmesi, kullanıcıya önceden tanımlanmış bir dizi seçenek sunan bir appJar GUI pencere öğesidir. Kullanıcı birden fazla seçenek seçebilmektedir.

Radyo Düğmesi: Bir radyo düğmesi, kullanıcının önceden tanımlanmış karşılıklı olarak dışlayıcı seçeneklerden yalnızca birini seçmesine izin veren bir appJar GUI pencere öğesidir.

Etiket: Bir GUI'de basit metin satırlarını görüntülemek için kullanılan bir appJar widget'ıdır.

Menü: appJar Menu widget'ı, ana pencerenin başlık çubuğunun hemen altında görüntülenen üst düzey menüler gibi GUI'de çeşitli menüler oluşturmak için kullanılmaktadır.

Combo Kutu: Seçeneklerden oluşan bir açılır liste sunar ve bunları birer birer görüntüler. Diğer benzer widget'lardan daha modern bir yaklaşıma sahiptir.

Liste Kutusu: Kullanıcının seçmesi için bir seçenek listesi görüntülemek için kullanılan başka bir appJar widget'ıdır. Metin biçimindeki tüm seçenekleri tek seferde görüntülemektedir.

Menü Düğmesi: Hem düğme hem de menü widget'ının bir kombinasyonu olan bu düğme, tıklandığında seçenekler listesinin bulunduğu bir açılır menü görüntülemektedir.

Canvas: Adından da anlaşılacağı gibi, üzerinde grafikler oluşturmak ve grafikler çizmek için kullanılmaktadır.

Ölçek: appJar ölçek widget'ı, kullanıcı arayüzüne bir grafik kaydırıcı uygulamak için kullanılır ve kullanıcıya bir dizi değer arasından seçim yapma seçeneği sunar.

Kaydırma çubuğu: GUI'lerde, bir appJar penceresinde kaydırmanıza veya belirli widget'lar için kaydırma özelliğini etkinleştirmenize olanak tanımaktadır.

Metin: Kullanıcıdan çok satırlı girdi almak için kullanılabilen appJar Giriş widget'ına bir alternatiftir.

Bahsedilen bu widget'lar kullanılarak, Şekil 4.35'de görülen arayüz tasarımı yapılmıştır. Bu arayüzde yedi adet sayfa bulunmaktadır. Bu sayfalardan ilki "Giriş" sayfasıdır. Giriş sayfası

temel olarak, dokunmatik ekran ile kullanılan bu arayüz yazılımında karşılama ve yazılımının sonlandırılması işlevini görmektedir.



Şekil 4.35: BYS arayüz yazılımı giriş sayfası.

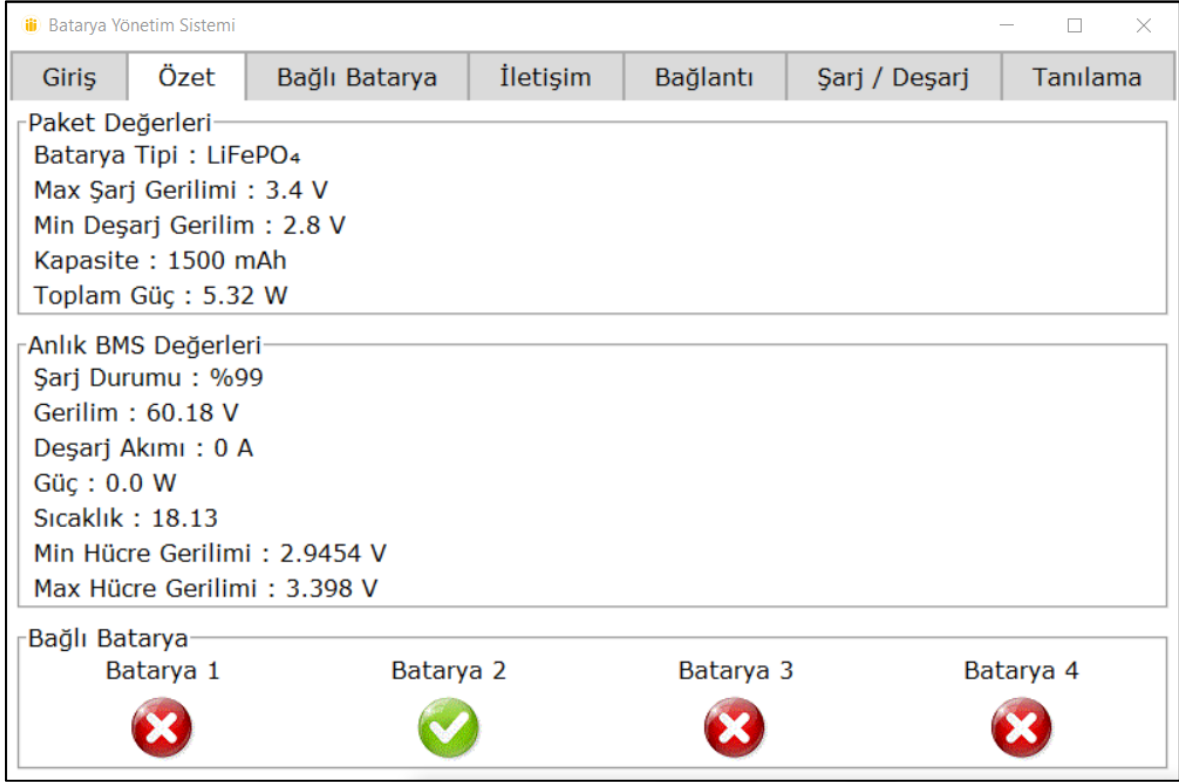
İkinci sayfa ise Şekil 4.36’da sunulan “Özet” sayfasıdır. Bu sayfada bağlı bulunan batarya grubunun hangisi olduğu en altta gösterilmektedir. Bağlı bulunan batarya grubunun hangi kimyaya sahip olduğu ve buna göre datasheet verileri paket değerleri bölümünde gösterilmektedir.

Anlık BYS değerleri kısmında ise bağlı bulunan batarya paketinin şarj durumu (SoC), anlık olarak batarya akımı şarj veya deşarj olma durumuna göre ayrı ayrı gösterilmektedir.

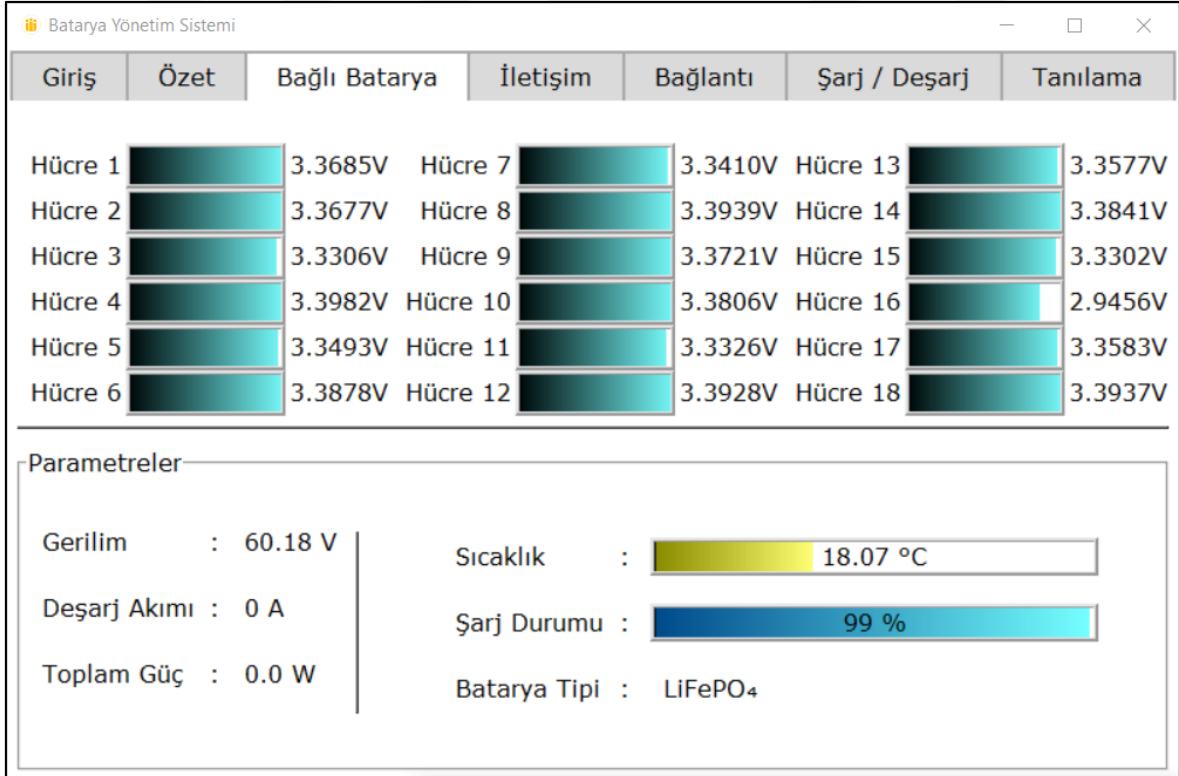
Ayrıca bataryanın anlık gücü, sıcaklığı ve batarya içerisinde yer alan hücrelerden en düşük ve en yüksek gerilime sahip olanların gerilim değerleri gösterilmektedir.

Üçüncü sayfa Şekil 4.37’de sunulan “Bağlı Batarya” sayfasıdır. Bu sayfada bağlı bulunan bataryanın içerisinde yer alan hücrelerin teker teker gerilimleri noktadan sonra dördüncü basamak hassasiyetinde sunulmaktadır.

Ayrıca parametreler kısmında bataryanın toplam gerilimi, şarj veya deşarj olma durumuna göre akımı, gücü, sıcaklığı, şarj durumu (SoC) ve batarya kimyası gösterilmektedir.



Şekil 4.36: BYS arayüz yazılımı özet sayfası.

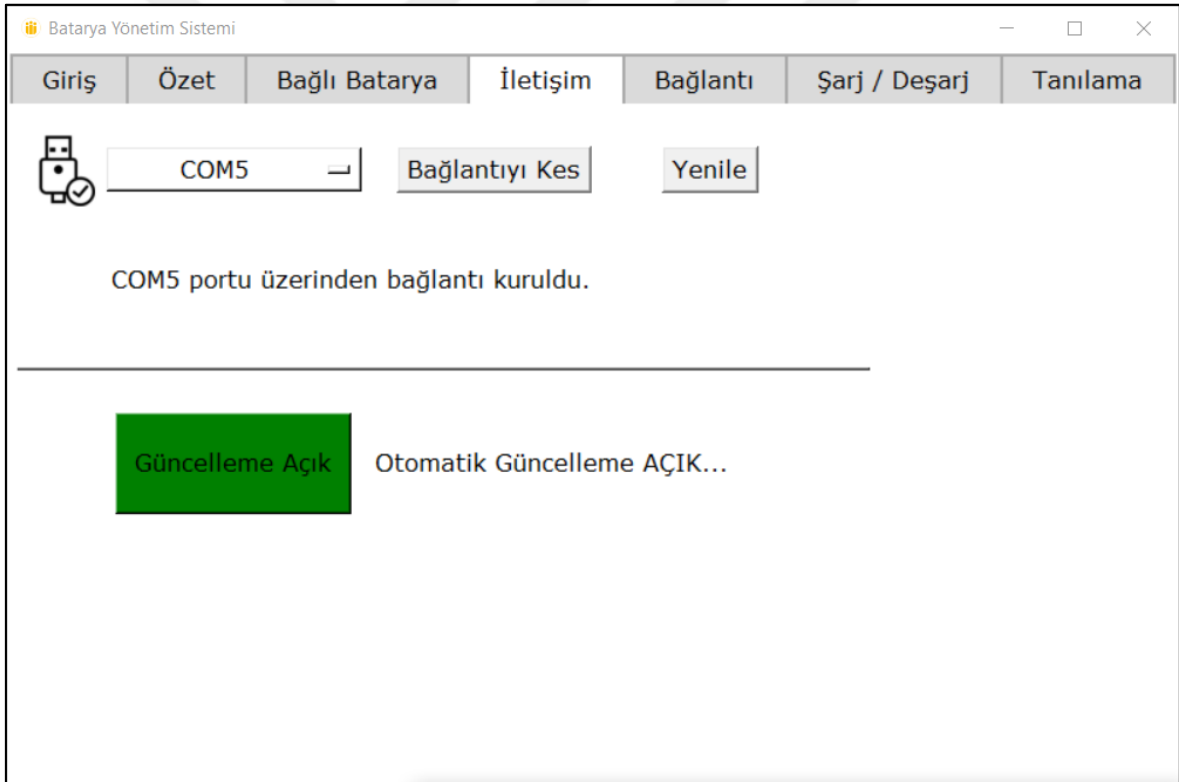


Şekil 4.37: BYS arayüz yazılımı bağlı batarya sayfası.

Dördüncü sayfa Şekil 4.38’de sunulan “İletişim” sayfasıdır. Bu sayfada bilgisayar veya Raspberry Pi’nin hangi iletişim portu üzerinden BYS ile iletişim kuracağı seçilebilmektedir. Yazılım bu işlemi otomatik olarak yapmasına rağmen tüm seçenekleri açılır bir menüde sunmaktadır.

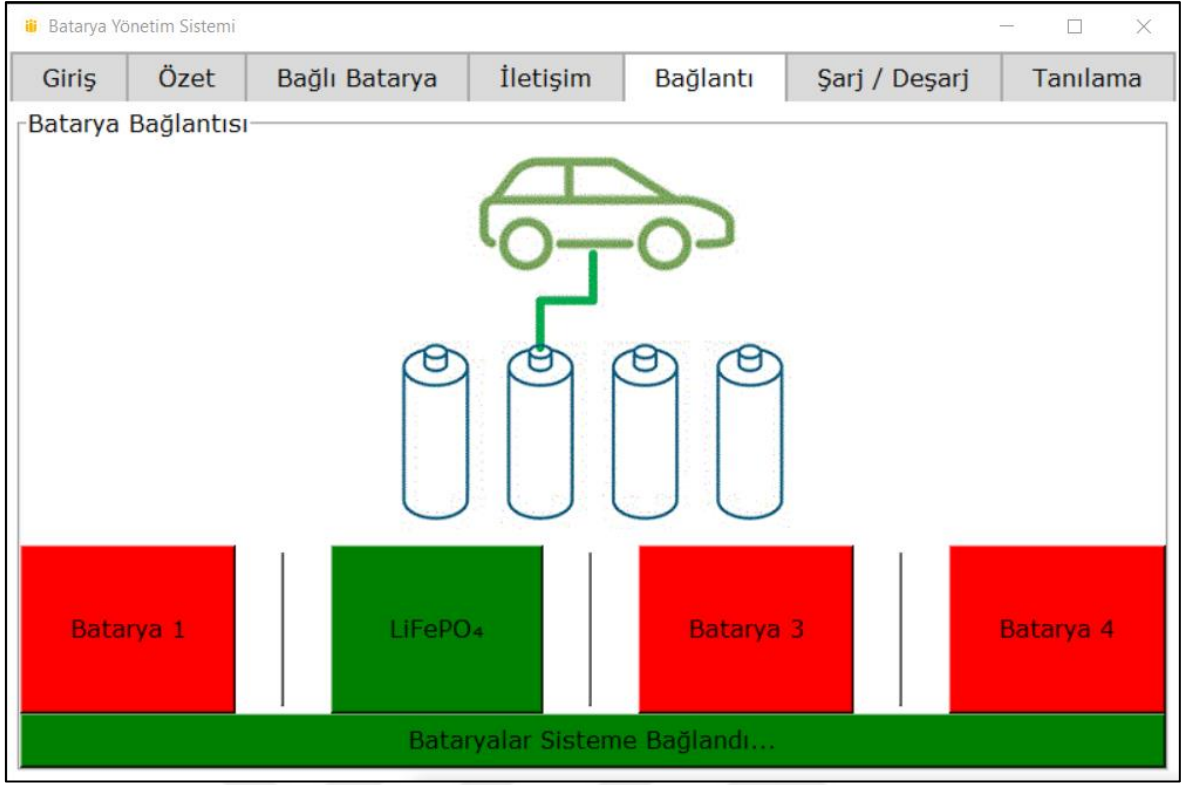
Bağlantı kurulması durumunda yazı ile hangi port üzerinden bağlantı kurulduğunu göstermektedir. USB kablosunun çıkarılıp tekrar takılması gibi durumlarda, bağlantının yeniden sağlanabilmesi için hazır olan bağlantı port adreslerinin güncellenmesi gerekmektedir.

Bunun için “Yenile” butonu bulunmaktadır. Sayfa altında yer alan “Otomatik Güncelleme” fonksiyonu 2 Hz. yenileme hızı ile BYS sisteminden gelen verilerin arayüz ekranında gösterilmesini sağlamaktadır. Yazılımda bu fonksiyon tamamen otomatik olarak çalışmakla birlikte istenildiği takdirde kapatılabilmesi için bir buton yerleştirilmiştir.

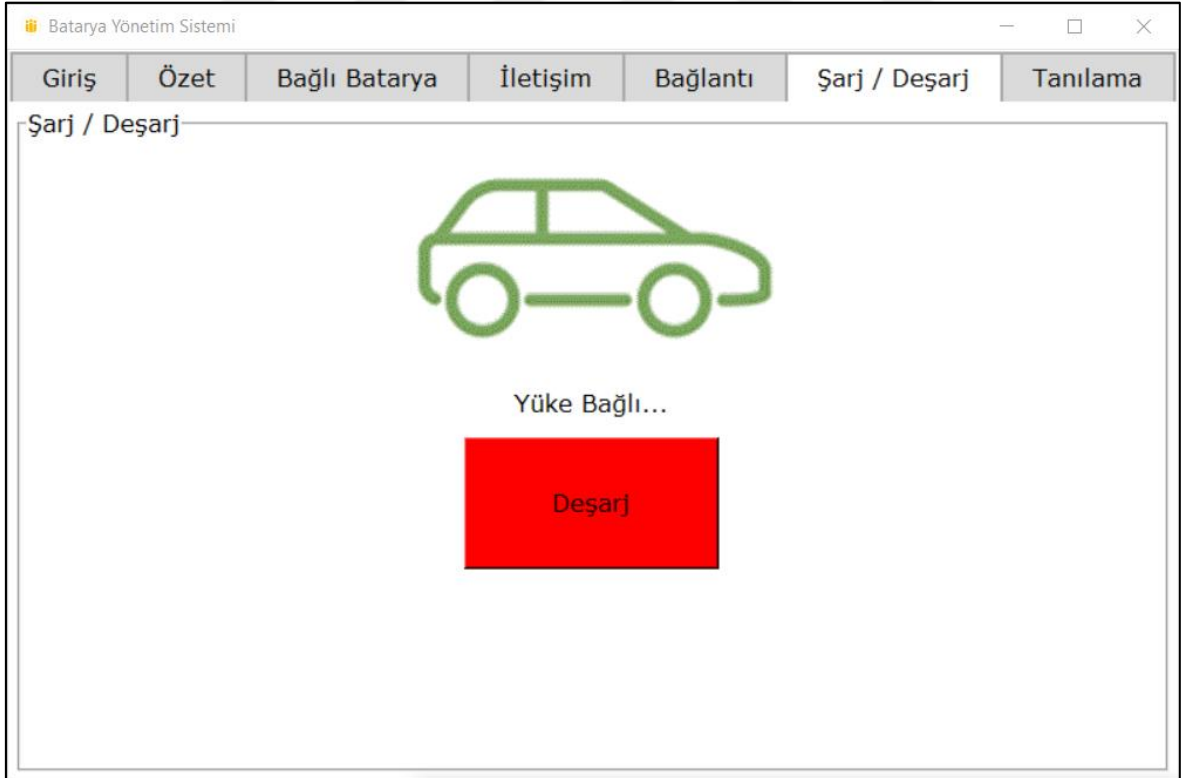


Şekil 4.38: BYS arayüz yazılımı iletişim sayfası.

Beşinci sayfa Şekil 4.39’da sunulan “Bağlantı” sayfasıdır. Bu sayfada hangi batarya grubunun elektriksel olarak bağlanacağı seçilebilmekte ve bağlantı görsel olarak sunulmaktadır. En alt kısımda bulunan buton ile bataryaların sisteme bağlanmaya hazır olduğu komutu verilmektedir. Aynı zamanda bu buton ile tüm bataryalar sistemden elektriksel olarak ayrılabilir.



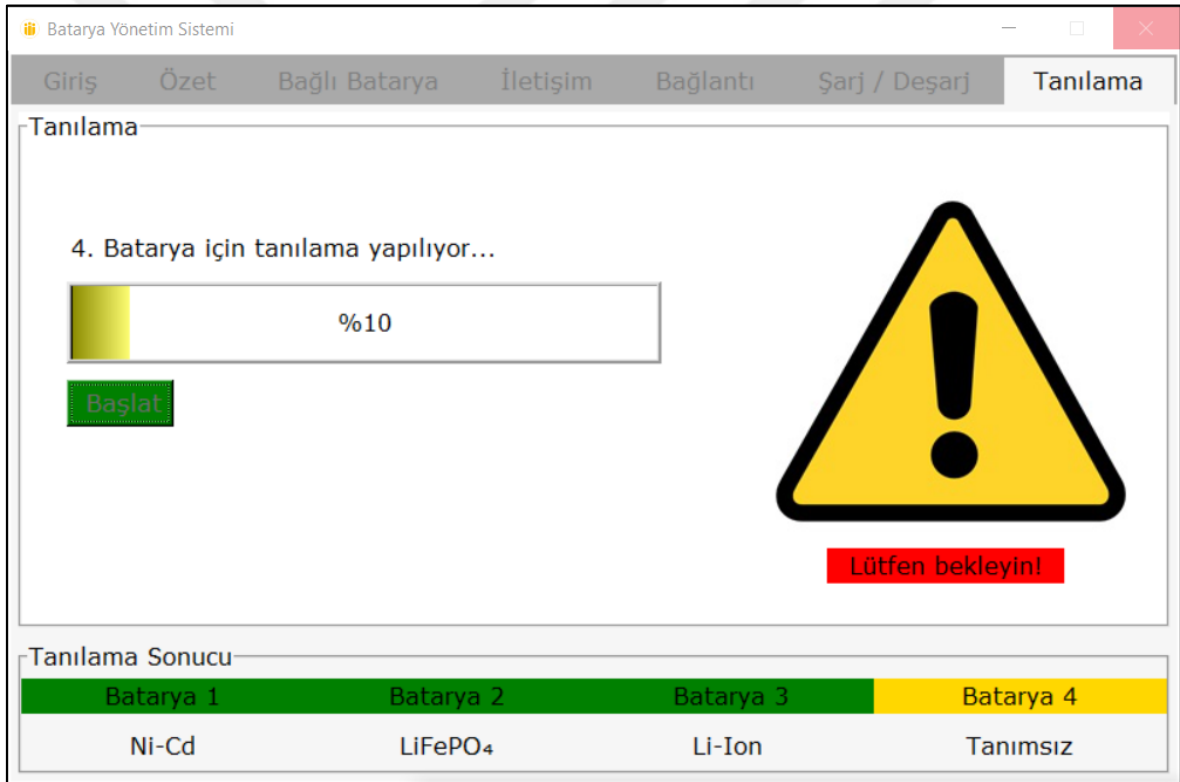
Şekil 4.39: BYS arayüz yazılımı bağlantı sayfası.



Şekil 4.40: BYS arayüz yazılımı şarj/deşarj sayfası.

Batarya 1-4 butonları bataryaların bağlı oldukları kontaktör veya MOSFET'lerin aktivasyonu için kullanılmaktadır. Bu butonların aktive ettiği fonksiyonlar elektriksel bir arızaya sebebiyet vermemek için arka planda diğer tüm bağlantıları teyitli bir şekilde kapatıp sadece ilgili bataryanın sisteme teyitli olarak bağlanmasını sağlamaktadır. Bu tarz bir anahtarlama algoritması ile sistemin çalışma güvenliği sağlanmaktadır. Ayrıca butonlar üzerinde o an bağlı olan bataryanın kimyası da yazmaktadır.

Altıncı sayfa Şekil 4.40'da sunulan “Şarj/Deşarj” sayfasıdır. Bu sayfada tek bir buton yer almaktadır. Varsayılan olarak deşarj durumundadır. Bu da sistemin bataryalardan yüke bağlı olduğu anlamına gelmektedir. Bağlı bataryanın şarj edilebilmesi için uygun anahtarlamanın yapılabilmesi bu buton ile sağlanmaktadır. Diğer elektriksel bağlantı butonları ile aynı güvenli bağlantı algoritmasını kullanarak çalışmaktadır.



Şekil 4.41: BYS arayüz yazılımı tanılama sayfası.

Yedinci sayfa Şekil 4.41'de sunulan “Tanılama” sayfasıdır. Bu sayfada yer alan tanılama butonuna basıldığında PKB algoritması koşturularak bağlı olan bataryaların kimyası tespit edilmektedir. İşlem sonucunda belirlenen pil kimyası “Tanılama Sonucu” bölümünde gösterilmektedir. Burada PKB algoritmasının o anda koşturulduğu batarya grubu sarı renk ile gösterilirken; kimyası belirlenmiş batarya grupları yeşil renk ile gösterilmektedir. Henüz hiçbir işlem yapılmamış batarya grubu ise gri renk ile gösterilmektedir.

(a) Arayüz yazılımında kullanılan fonksiyonlar

Doktora tez çalışması kapsamında hazırlanan arayüz yazılımı Python programlama dilinde yazılmış ve appJar GUI kütüphanesini kullanan toplam 1783 satır koddan meydana gelmektedir.

Bu yazılım hem dokunmatik ekran üzerinde verilerin görsel hale getirilmesi hem de dokunmatik ekrandan girilen komutların ana karta gönderilmesini sağlamaktadır. Tüm iletişim USB üzerinden sağlanmaktadır. Yazılımda kullanılan fonksiyonlar ve kısa tanımları aşağıda sunulmuştur.

def CreateTabs():

Arayüz ekranında bulunan sayfa tablalarının açılması ve düzenlenmesi işlemini yerine getirir.

- Ana Sayfa
- Özet Sayfası
- Batarya Sayfaları
- İletişim Sayfası
- Bağlantı Sayfası
- Şarj / Deşarj Sayfası
- Tanılama Sayfası

def Update():

Arayüz ekranında yer alan bilgilerin güncellenmesini sağlayan fonksiyondur. O anda aktif olan batarya veya özet sayfasında yer alan ve anlık olarak güncellenmesi gereken gerilim, akım, sıcaklık vb. parametrelerin ana karttan gelen veriler ile güncellenmesi işlevini yerine getirir.

def PageSplit(x, y, t):

Tanımlanan t numaralı tab sayfasının içini x adet satır ve y adet sütuna bölerek sayfa içerisine yerleştirilen diğer bileşenlerin düzgün yerleşimini sağlamak işlevini görmektedir.

def Tanılama():

Ana kart yazılımına tanılama algoritması kapsamında komutlar göndererek pil kimyasını tespit etmek için gereken işlemleri yapar. Bunu yaparken de akıranda yer alan ilgili alanların güncellenmesini sağlar.

def ConnectLoad(loadNum):

Tanımlama algoritması kapsamında bataryanın sabit yüke ana kart üzerinden elektriksel olarak bağlanmasını sağlayan fonksiyondur. Ana kart yazılımı ile haberleşerek ilgili yükün bağlanmasını sağlar.

def printTime(start):

Zamanın hesaplanması ve istenirse ekranda yazılmasını sağlayan fonksiyondur. Tanımlama algoritması gereği sabit yüklere belirli zaman aralıklarında bataryanın bağlanması gerekmektedir. Bu sürenin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

def Charge_Discharge():

Şarj/Deşarj sayfasında bulunan butonun fonksiyonudur. Eğer batarya bağlı ise çalışır. Batarya şarj durumunda ise ana karta komut göndererek elektriksel olarak bataryanın şarj soketinden ayrılmasını sağlar ve hemen ardından yine elektriksel olarak bataryanın deşarj soketine bağlanması işlevini görmektedir. Bu sayede batarya şarj edilebilmekte veya sisteme bağlı olarak deşarj yani yük durumunda tutulabilmektedir.

def SecureConnectBat(BatNumToConnect):

Ekranda verilerin yenilenmesini sağlayan otomatik güncellemeyi kapatır. Ardından ana karta bataryayı ayırması için komut gönderir ve bataryanın elektriksel olarak ayrıldığını, başka bir bataryanın bağlı olmadığını teyit edilmesini bekler.

Ana karttan bataryanın sorunsuz bir şekilde ayrıldığı teyidini aldığı anda tekrar otomatik güncelleme fonksiyonunu çalıştırır. Bu sayede karşılıklı teyit olarak bataryanın bağlanmasını veya ayrılmasını sağlar. Tüm bu işlemler ana kart ile dokunmatik ekran arasındaki USB bağlantısı üzerinden yapılmaktadır.

def Batarya_Connect1():

Ana kartta bulunan 1 numaralı bağlantı noktasına, 1 numaralı bataryayı elektriksel olarak bağlamak için ana karta ilgili komutları gönderen fonksiyondur.

SecureConnectBat fonksiyonundan geri dönen teyit bilgisi ile bataryanın elektriksel olarak güvenli bir şekilde bağlanmasını sağlar ve arayüz üzerinde ilgili yerlerdeki bağlı batarya yazı ve görsellerini günceller.

def Batarya_Connect2():

Ana kartta bulunan 2 numaralı bağlantı noktasına, 2 numaralı bataryayı elektriksel olarak bağlamak için ana karta ilgili komutları gönderen fonksiyondur. SecureConnectBat fonksiyonundan geri dönen teyit bilgisi ile bataryanın elektriksel olarak güvenli bir şekilde bağlanmasını sağlar ve arayüz üzerinde ilgili yerlerdeki bağlı batarya yazı ve görsellerini günceller.

def Batarya_Connect3():

Ana kartta bulunan 3 numaralı bağlantı noktasına, 3 numaralı bataryayı elektriksel olarak bağlamak için ana karta ilgili komutları gönderen fonksiyondur. SecureConnectBat fonksiyonundan geri dönen teyit bilgisi ile bataryanın elektriksel olarak güvenli bir şekilde bağlanmasını sağlar ve arayüz üzerinde ilgili yerlerdeki bağlı batarya yazı ve görsellerini günceller.

def Batarya_Connect4():

Ana kartta bulunan 4 numaralı bağlantı noktasına, 4 numaralı bataryayı elektriksel olarak bağlamak için ana karta ilgili komutları gönderen fonksiyondur. SecureConnectBat fonksiyonundan geri dönen teyit bilgisi ile bataryanın elektriksel olarak güvenli bir şekilde bağlanmasını sağlar ve arayüz üzerinde ilgili yerlerdeki bağlı batarya yazı ve görsellerini günceller.

def Batarya_Connect():

Bataryaların ana kart üzerinden elektriksel bağlantılarının yapılabilmesi veya tüm bataryaların ana kart üzerinden elektriksel olarak ayrılmasını sağlayan güvenlik fonksiyonudur. Bağlantı sayfasında en altta yer alan uzun buton ile kumanda edilir.

Herhangi bir batarya bağlanmadan önce ana karta komut göndermesini ve yardımcı kartların durumunun kontrol edilmesini sağlar. Ardından hiçbir batarya bağlı değilse bataryaların bağlanabilmesi için güvenlik bayrağını “true” yapar. Yani elektriksel bağlantıya onay verir. Bu sayede bataryaların elektriksel bağlantısı yapılabilir.

Bir diğer görevi ise herhangi bir bataryanın elektriksel bağlantısı hâlihazırda yapılmış ise veya programa kapatma komutu verilmişse tüm bataryaların elektriksel bağlantılarının kapatılması için ana karta komut gönderir. Teyit aldıktan sonra diğer işlemlere devam eder.

def checkStop():

Arayüz karşılama ekranında bulunan “ÇIKIŞ” butonu ile kumanda edilir. Bu fonksiyon ekrana bir mesaj kutusu açarak kullanıcıya "Çıkmak istediğinize emin misiniz?" sorusunu yöneltir. Cevaba göre ya geri döner ya da tüm bataryaların elektriksel bağlantılarının kapatılması için ana karta komut gönderir ve kapandı teyidi bekler. Teyit geldiğinde ekrana bilgi kutucuğu açarak "Tüm Bataryalar Ayrıldı. Kapatma işlemi emniyetli !!!" ikazı verir ve 0.5 sn bekleyip tüm sistemi kapatır.

def serial_ports():

Bu fonksiyon USB bağlantısı kurulabilecek tüm portları tarar ve uygun olarak tespit ettiklerini bir diziye atar. Fonksiyon dönüşünde bu diziyi getirmektedir. Bunu işlemi Windows, Linux ve Darwin işletim sistemleri için yapabilme kabiliyetine sahiptir. Olağan dışı bir durumla karşılaşırsa “Desteklenmeyen platform!!!” ikazı vermektedir.

def PortUpdate():

Bu fonksiyon “İletişim” sayfasında yer alan “Yenile” butonu ile çalıştırılmaktadır. USB bağlantı kurulu iken çıkarılıp tekrar takıldığında aynı portu görmeyebilmektedir. Hazır olan portların tekrar tespit edilmesi için yeniden tüm portların taranması ve hazır portlar dizisinin güncellenmesini sağlar.

def ConnectPort(btn):

Bu fonksiyon “İletişim” sayfasında yer alan “Bağlan” butonu ile çalıştırılmaktadır. Dropdown menüde gösterilen hazır USB portlardan sisteme bağlı olan seçilerek komut verilir ve ana kart ile dokunmatik ekranı kontrol eden Raspberry PI arasındaki iletişim sağlanmaktadır.

def BatUpdateEnableFunc():

Bu fonksiyon “İletişim” sayfasında yer alan “Yenile” butonu ile kullanıcı müdahalesiyle veya elektriksel bağlantı yapıldığında yazılımsal olarak çalıştırılmaktadır. Ana kart, yardımcı kartlardan gönderilen her bir hücre gerilimini ve sıcaklık verilerini ön işlemeden geçirerek; bu verilere akımı ve diğer batarya yönetim sistemi algoritmalarının hesapladığı verileri de ekleyerek görüntülenmek üzere dokunmatik ekrana göndermektedir. Bu veri gönderim süreci sürekli bir işlemdir fakat ana karta gönderilen komut ile duraklatılabilmektedir. Örnek olarak tanılama algoritması çalıştırılırken duraklatılması gerekmektedir.

def sendToMaster(sendStr):

Ana karta USB üzerinden veri gönderilmesini sağlayan fonksiyondur. Burada gönderilen veri utf-8 ile kodlanmaktadır (encoding). Yazılımın geliştirilmesi sürecinde bu fonksiyon içerisine şifreleme algoritması eklenerek ve/veya farklı unicode kodlama opsiyonları kullanılarak bağlantı şifrelenebilmektedir.

def recvFromMaster():

Ana kartta USB üzerinden gönderilen verinin alınmasını sağlayan fonksiyondur. Burada gönderilen veri utf-8 ile kodlanmaktadır (encoding). Gelen veride iletişim esnasında meydana gelebilecek hataları ortadan kaldırarak, tam ve doğru verinin gelmesini garanti altına almaktadır. Bu sayede veri iletim hızı da artırılabilir. Gelen veriye bir numara vererek Data dizisine atılmaktadır. Data dizisi global bir dizi olup, diğer fonksiyonlar tarafından da kullanılmaktadır.

Örnek veri dizisi:

```
Data = "41, 1.2484, 1.2511, 1.2492, 1.2491, 1.2500, 0.9613, 1.2369, 1.2526, 1.2531, 1.2524, 1.2451, 1.2535, 1.2502, 1.2541, 1.2534, 1.2533, 1.2505, 1.2461, 42, 3.3877, 3.3866, 3.3322, 3.4221, 3.3603, 3.4045, 3.3484, 3.4124, 3.3918, 3.3981, 3.3337, 3.4073, 3.3720, 3.3997, 3.3318, 2.9610, 3.3743, 3.4099, 43, 3.8879, 3.5896, 3.3181, 3.5494, 3.3173, 3.2601, 3.8161, 3.5725, 3.6628, 4.1434, 3.6467, 3.7725, 3.6137, 4.0648, 3.6472, 3.7702, 3.4993, 3.7235, 44, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 41, -49.81, 18.93, 42, -49.74, 19.89, 43, -49.78, 22.30, 44, 605.35, 586.30, 41, 22.2060, 2.2419, 5.0164, 3.2043, 1521.6142, 101.00, 42, 60.4470, 2.2487, 5.0580, 3.1979, 1521.6142, 100.00, 43, 65.8830, 2.2673, 5.0432, 3.2066, 1518.3973, 101.00, 44, 196.6050, 6.5535, 6.5535, 6.5535, 1518.3973, 100.00, 23.0469"
```

def waitForMaster():

Ana karttan, USB üzerinden “E-Cameleon hazır...” mesajı gelene kadar bekleyen fonksiyondur. Sistemin hazırlık durumunu garanti etmek için kullanılmaktadır.

def CalculateTotalBatVoltages():

Ana karttan gönderilen veri dizisi içerisindeki ilgili indeksleri toplayarak her bir bataryanın toplam gerilimini hesaplayan fonksiyondur.

def UpdateBatColor():

Tanımlanan batarya kimyasına göre arayüzde kullanılan batarya ilgili rengini atayan fonksiyondur. Burada NCA için kırmızı, LPF için mavi, NiMH için yeşil, NiCd için beyaz ve LTO için de sarı renk seçilmiştir.

4.5 BYS Fonksiyonlarının Yıllar İçerisindeki Değişimi ve Geliştirilen BYS (E-Cameleon) ile kıyaslanması

1990'lı yılların sonunda, bir batarya yönetim sisteminin sahip olması gereken temel fonksiyonlar veri toplama, Batarya durumunun belirlenmesi (Şarj durumu), elektrik yönetimi, termal yönetim, güvenlik yönetimi ve iletişim fonksiyonu olarak belirlenmiştir (Jossen et al., 1999; Masaak et al., 1998). Bu fonksiyonlar, BYS'lerin en temel fonksiyonları olarak kabul edilmektedir.

BYS'ler günün ihtiyaçları doğrultusunda gelişen sistemlerdir. Lityum pillerin ticarileştirilip kullanımı yaygınlaştıkça bunu etkisi BYS'ler üzerinde de görülmektedir. 2011 yılında bir batarya yönetim sisteminin temel fonksiyonlarına ek olarak sahip olması gereken fonksiyonlar ise literatürde aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Xing et al., 2011).

- Güvenlik koruması
- Bataryanın durumunu tahmin etme
- Hücre dengeleme
- Batarya durumunun ve kimlik doğrulamasının yapıp bir kullanıcı arayüzüne gönderilmesi

Algılama ve ölçüm sistemlerindeki teknolojik gelişmelere eşlik eden yeni hesaplama yöntemleri ve algoritmalar BYS teknolojisinin gelişimine katkı sağlamıştır. Bu gelişmeler neticesinde, 2020 yılında BYS'nin önceki tüm fonksiyonlarına ek olarak şu fonksiyonlar eklenmiştir (Y. Wang et al., 2020):

- Modelleme ve durum tahminleri
- Arıza teşhisi
- Sağlık yönetimi
- IOT teknolojileri ile uyum (Haldar et al., 2020; Sivaraman & Sharmeela, 2020)
- Bulut teknolojileri (T. Kim et al., 2018)

Batarya teknolojisinin gelişimi, batarya ile çalışan cihaz çeşitliliğinin artması ve özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek güç uygulamalarında hem batarya hem de buna bağlı olarak batarya yönetim sistemlerinin teknolojileri birbirlerine paralel olarak gelişmiştir.

Çizelge 4.3:'de yıllar içerisinde batarya yönetim fonksiyonlarının gelişimi verilmiştir. Burada dikkat çeken husus BYB temel fonksiyonlarının kaybolmadan önem ve yerlerini korumalarıdır. Teknolojik gelişime paralel olarak gerekli fonksiyonların zaman içerisinde batarya yönetim sistemlerine entegre edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.3:'de BYB fonksiyonlarının yıllar içerisindeki gelişim ve değişimi doktora tez çalışması kapsamında geliştirilen e-Cameleon batarya yönetim sisteminin fonksiyonları ile birlikte karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.3: BYB fonksiyonlarının karşılaştırması

		1999	2011	2021	e-Cameleon
Veri toplama		✓	✓	✓	✓
Batarya durumu	SoC	✓	✓	✓	✓
	SoH		✓	✓	✓
	SoE			✓	✓
	RUL			✓	✓
Elektrik yönetimi		✓	✓	✓	✓
Termal yönetim		✓	✓	✓	✓
Güvenlik Yönetimi		✓	✓	✓	✓
İletişim		✓	✓	✓	✓
Batarya durumunun kestirimi			✓	✓	✓
Güvenlik koruması			✓	✓	✓
Hücre dengeleme			✓	✓	✓
Kullanıcı arayüzü bağlantısı			✓	✓	✓
Tüm batarya bileşenleriyle iletişim			✓	✓	✓
Daha uzun pil ömrü			✓	✓	✓
Arıza teşhisi				✓	✓
Akıllı algoritmaların kullanımı				✓	✓
IoT teknolojileri				✓	✓
Bulut teknolojileri				✓	✓
Lityum kimyali BYB				✓	✓
CAN-BUS desteği				✓	✓
Batarya kimyası tespiti					✓
Çoklu kimyali BYB					✓
Gerçek zamanlı anahtarlama					✓
Kullanıcı dostu dokunmatik yönetim ekranı					✓

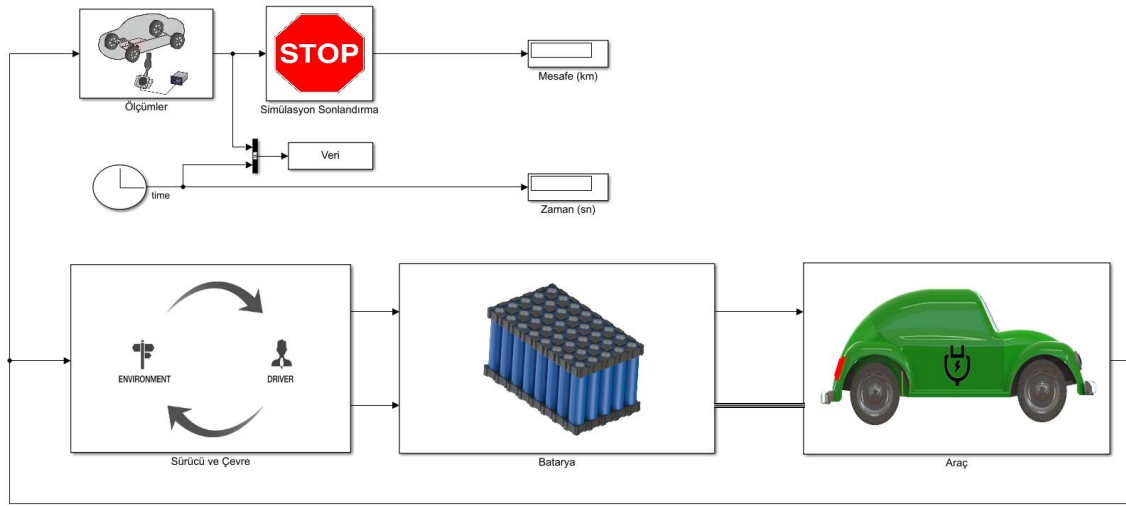
Çizelge 4.3:'de de görüldüğü gibi BYB'lerin sahip oldukları fonksiyonlar geliştirilip genişletilerek dört yeni fonksiyon eklenmiştir. Bu fonksiyonlar PKB algoritması sayesinde batarya kimyasının tespiti; çoklu kimyali batarya desteği, bu bataryaların gerçek zamanlı

olarak anahtarlamaasının yapılabilmesi ve bu sayede getirilen verim artışı; tüm bunlara ek olarak BYs'nin dokunmatik bir arayüz ekranından kontrol ve kumanda edilebilmesidir.

Böylece tez çalışmasında hemen hemen bütün elektrikli araçlar için geçerli olabilen kompleks BYs tasarlanarak prototip üretimi gerçekleştirilmiştir.

4.6 Anahtarlamaalı BYs Simülasyonu

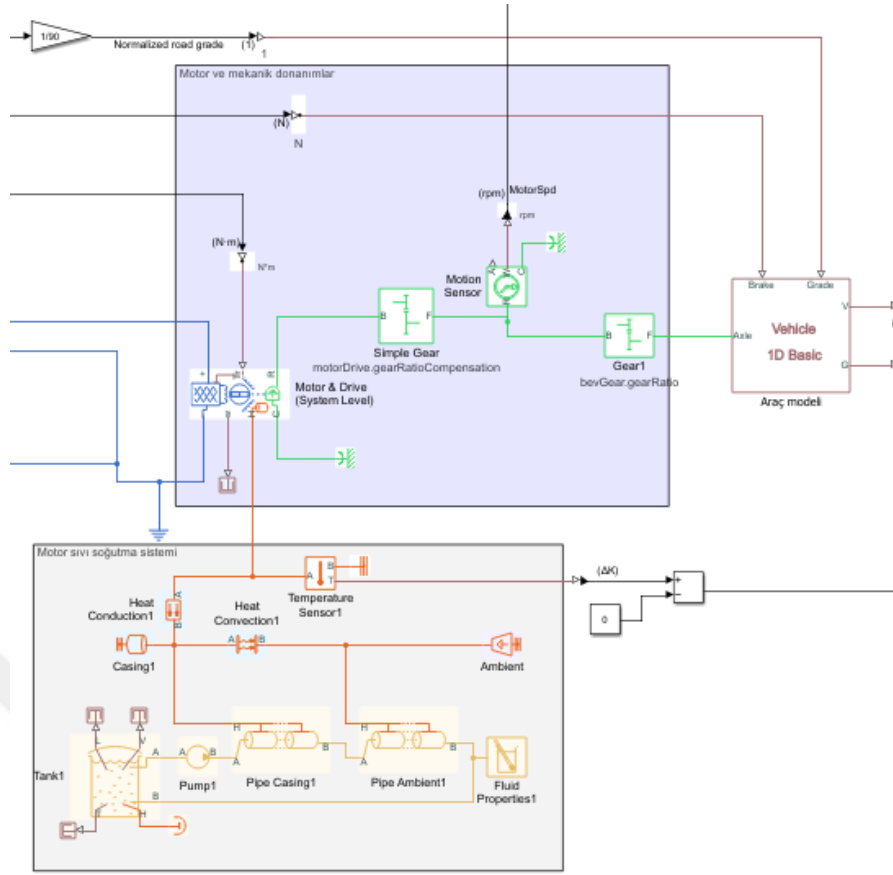
Simülasyon çalışması MATLAB/SIMULINK 2021a ortamında yapılmıştır. Simülasyon 5 temel fonksiyonu yerine getiren bloktan meydana gelmektedir. Bunlar araç, batarya, sürücü ve çevre, ölçümler ve sonlandırmadır. Blokların genel görünümü Şekil 4.42'de sunulmuştur.



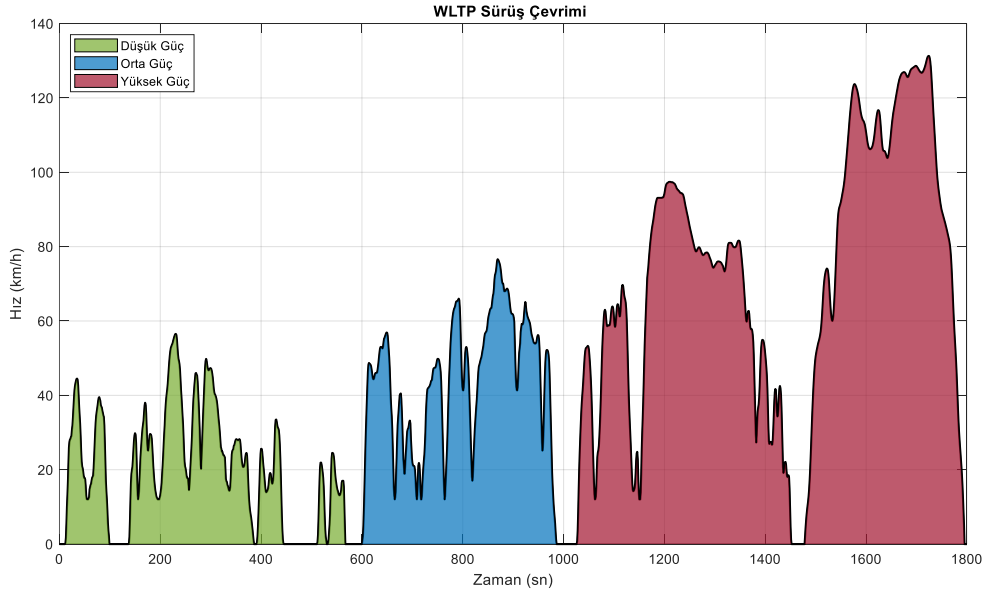
Şekil 4.42: Anahtarlamaalı BYs simülasyon çalışması.

Araç bloğunda Simscape blokları ile yapılmış motor, redüksiyon dişlisi, şaft vb. mekanik donanımlar ve motor soğutma sistemi yer almaktadır. Şekil 4.43'de sunulan modellenen araç, 1600kg ağırlığındadır. 150kW'lık bir motor ile donatılmış ve tekerlek yarıçapı 30cm olan bir araçtır. Güç/ağırlık oranı ise 93,75'dir.

Araç modeli, güç/ağırlık oranı esas alınarak WLTP Class 3 sürüş çevrimi ile oluşturulmuştur. Bu çevrim Şekil 4.44'de sunulan üç bölümden meydana gelmektedir. Bunlar düşük, orta ve yüksek güç bölümleridir. Düşük bölümde görece düşük hız ve ivme söz konusu iken yüksek bölümde yüksek hız ve ivme uygulanmaktadır.



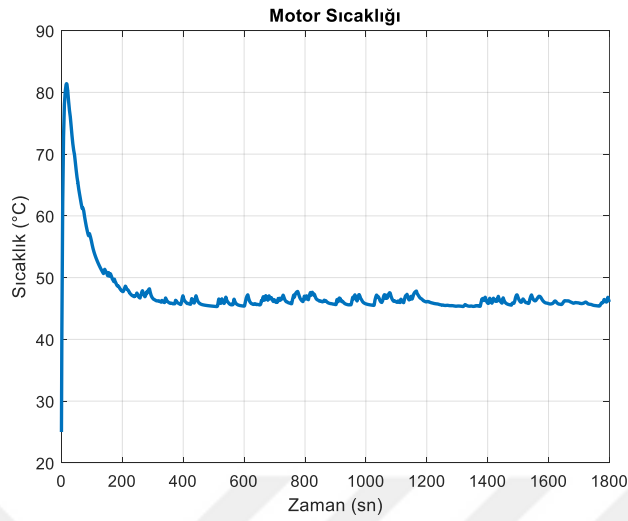
Şekil 4.43: Araç bloğu içerisindeki mekanik donanım ve soğutma sistemi.



Şekil 4.44: WLTP sürüş çevrimi (UNECE Transport Division, 2021).

Araç üzerinde yer alan elektrik motoru sıvı tip soğutma sistemine sahiptir. Soğutma sıvısı olarak etilen glikol ve su karışımı kullanılmıştır. Bu sayede ısınan motorun verimli bir

biçimde soğutularak optimal çalışma sıcaklığında çalışabilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.45’de yüksek başlangıç sıcaklığına rağmen soğutma sisteminin etkinliği görülmektedir.



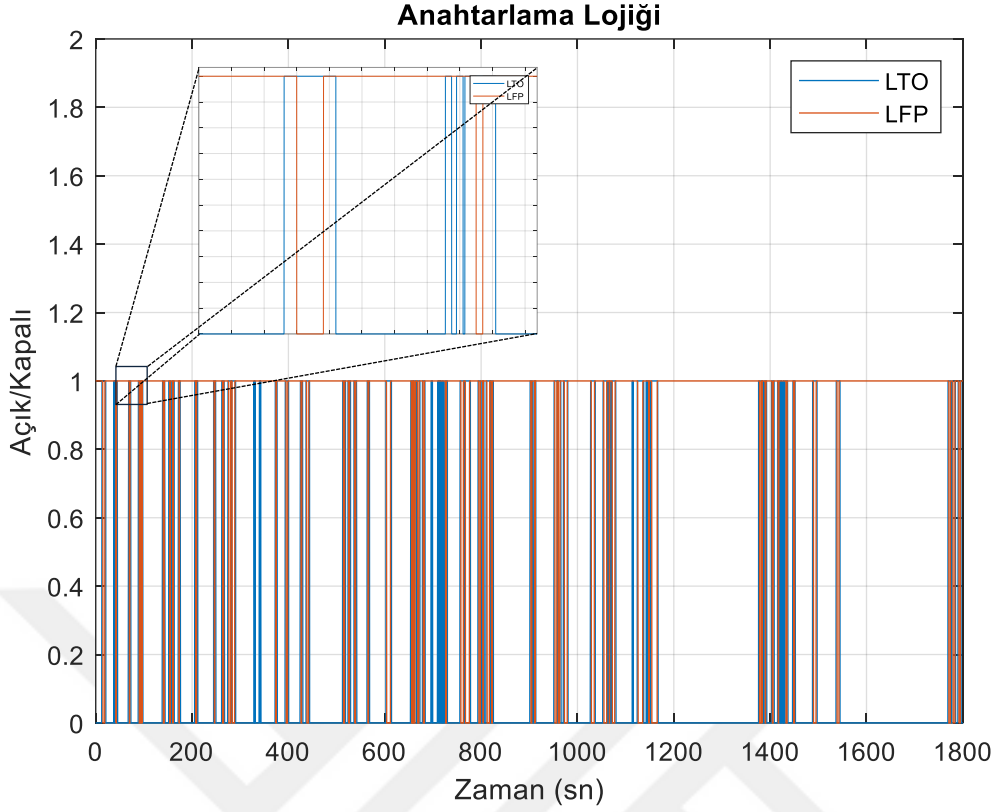
Şekil 4.45: Motor sıcaklığının bir döngüdeki değişimi.

Batarya bloğunda iki adet batarya ve bunların elektriksel anahtarlamasını yapan kontaktörler bulunmaktadır. Anahtarlama sırası bu noktada en önemli konudur. Yüksek güç altında, yüksek hızlarda anahtarlama yapılabilmesi için IGBT kullanılması gerekmesine rağmen uygun bir anahtarlama yöntemi ile normal kontaktörlerin de kullanılabileceği bu simülasyon çalışması ile görülmüştür.

Uygulanan yöntem LTO batarya devreye girdikten sonra, LFP bataryanın devreden çıkmasını 3 saniye geciktirmek; aynı şekilde LFP batarya tekrar devreye girdiğinde LTO bataryanın devreden çıkmasını 3 sn geciktirmek şeklindedir. Yöntemin etkisi Şekil 4.46’da sunulmuştur.

İki batarya içerisinde 18 seri hücreden meydana gelen gruplar kendi aralarında ikişerli paralellerden oluşan modülleri meydana getirmektedir. Her bataryada 6 adet modül bulunmaktadır. Böylece yaklaşık 450 voltluk bataryalar oluşturulmuştur.

Her modül hem kendi içerisinde hem de birbirleriyle ısı alışverişi içerisindedirler. Batarya bloğunun termal kontrolü bu ısı alışverişi göz önüne alınarak yapılmakta ve bataryalar uygun sıcaklık aralığında çalıştırılmaktadırlar.

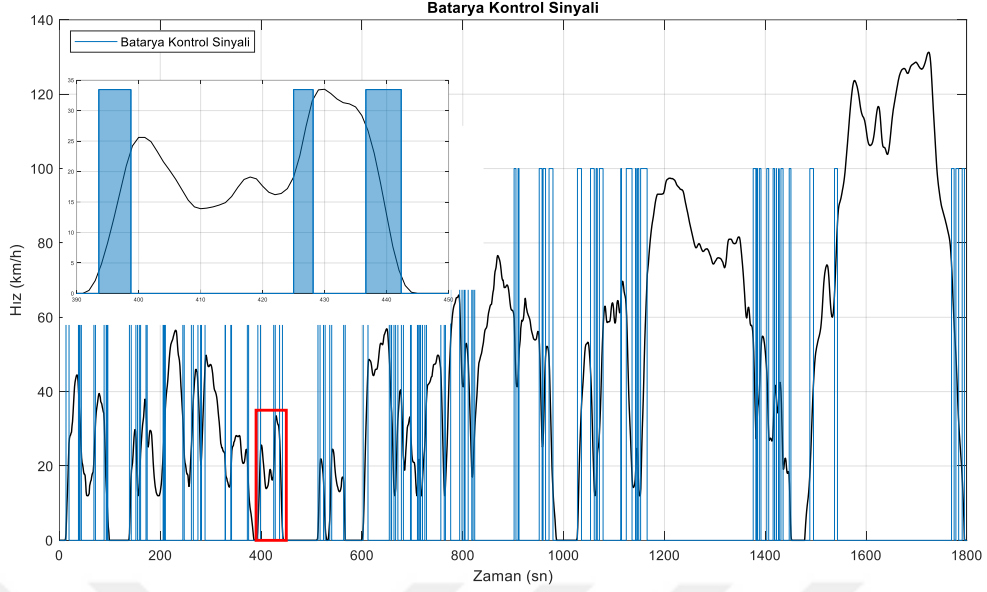


Şekil 4.46: Batarya anahtarlama lojiji.

Sürücü ve çevre bloğunda, sürüş çevrimini üreten bloğun yanı sıra sürücüyü modelleyen araç kontrol bloğu bulunmaktadır. Ayrıca sürüş çevriminin ürettiği referans hız değerlerinden gereken ivme hesaplanarak bataryalar arasındaki anahtarlamaı gerçekleştiren bir batarya kontrol sinyali üretilmektedir.

Hesaplanan ivme değeri belirlenmiş eşik değer üzerinde ise LTO batarya aktive edilmektedir. Simülasyonda bu değer 0.75m/sn^2 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.47’de WLTP sürüş çevriminde simülasyon tarafından üretilen batarya kontrol sinyali gösterilmektedir. Burada, aracın ivmesi $\pm 0.75\text{m/sn}^2$ aralığında olduğunda LTO bataryanın devreye girmesi için sinyal üretilmektedir.

390-450 sn zaman aralığındaki batarya kontrol sinyali ise büyütülmüş olarak sunulmuştur. Böylece, aracın hızlanması veya yavaşlaması durumunda aracın ihtiyaç duyduğu enerji veya aracın ürettiği rejeneratif enerjinin LTO bataryaya yönlendirilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 4.47: Batarya kontrol sinyali.

Ölçümler bloğunda, araç, batarya ve sürücü modelleri üzerinden hesaplanan veriler, araç, batarya ve motor başlıkları altında sınıflandırılarak kat edilen mesafe, bataryadan harcanan toplam güç vb. değerler hesaplanmakta ve elde edilen veriler uygun kategoriler içerisine yerleştirilip tüm bu verilere simülasyon saatinden alınan zaman verisi eklenerek bir dosyaya kaydedilmektedir.

Simlasyon sonucunda, LFP ve LTO kimyali bataryalardan meydana gelen anahtarlama bir çoklu batarya sisteminin aynı elektriksel ve kapasite özelliklerine sahip sadece LFP kimyali bir batarya sistemine göre; batarya kapasitesi, kapasitelerinin birbirlerine oranları vb. parametrelere göre değişmek kaydıyla %10 ile %22 arasında bir performans artışı sağladığı görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrikli araç teknolojileri ve getirdiği yenilikler bugün hayatımızı etkileyen konuların başında gelmektedir. Bu teknoloji, beraberinde getirdiği yenilikler ve sorunlarla birlikte yakın gelecekte de dünya gündeminin önemli başlıklarından olmaya devam edecektir.

Önümüzdeki on yılda küresel ısınma gibi çevresel sorunların üstesinden gelmek için fosil yakıtlı sistemlerin elektrikliye dönüşümü ve sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesinin kritik öneme sahip olacağı öngörülmektedir.

Tarih boyunca, bu teknolojinin hayata geçmesinin önündeki en büyük engel elektrik enerjisini depolama problemi olmuştur. Elektrikli araç teknolojisinin hayata geçirilip uygulanabilir hale gelmesi ancak uygun ve yeterli enerji depolama kabiliyetinin geliştirilip uygulanması ile gerçekleştirilebilmiştir.

Yeniden şarj edilebilir pilin icadı, elektrik enerjisinin kimyasal olarak depolanması problemi için büyük bir atılım olmuştur. Bugün bile kullanılan kurşun asit pil teknolojisinin temelleri o dönemde atılmıştır. Bu başarı adımlarını takip eden çok sayıda bilim insanı, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan ve elektrikli araç teknolojisinin bugün var olmasını sağlayan en büyük etken olan lityum pilleri zaman içerisinde geliştirilmesini sağlamışlardır. Lityum elementinin onu pillerde kullanımını ideal kılan özellikleri aynı zamanda özenli ve dikkatli bir şekilde kullanımını gerektirmektedir. Bu nedenle, lityum pillerin doğaları gereği iyi bir yönetim sistemine olan gereksinimleri BYS konusunda çok daha fazla çalışma yapılmasını gerektirmiştir. Fakat yapılan tüm bu çalışmalar günümüzde hızla gelişen elektrikli araçlar teknolojisi için yetersiz kalmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yerli ve milli olarak, yazılım ve donanım tasarımları tamamen bize ait, mevcut BYS'lerin sahip olduğu fonksiyonları yerine getirirken, alanında bir ilk olan dört özgün ve yeni fonksiyona sahip yeni nesil, akıllı batarya yönetim sistemi geliştirilerek, detaylarıyla sunulmuştur.

Eklenen pil kimyasını belirleme (PKB) algoritması ile BYS'ye bağlanan bataryanın kimyası elektronik olarak tespit edilmesine imkân sağlayan yeni bir fonksiyon geliştirilerek uygulaması yapılmıştır.

BYS fonksiyonlarının yıllar içerisinde; o günün ihtiyaçları ve batarya teknolojisindeki gelişmelere göre şekillendiği görülmektedir. Buna rağmen yeni teknolojilerin beraberinde getirdiği teknik problemlerin tamamına çözüm getirilemediği yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir.

Bu nedenle yapılan çalışma neticesinde BYS fonksiyonlarına dört yeni fonksiyon eklenmiştir. Bu fonksiyonlar PKB algoritması sayesinde batarya kimyasının tespiti; çoklu kimyali batarya desteği, bu bataryaların gerçek zamanlı olarak anahtarlamasının yapılabilmesi ve bu sayede getirilen verim artışı; tüm bunlara ek olarak BYS'nin dokunmatik bir arayüz ekranından kontrol ve kumanda edilebilmesidir.

Çoklu kimyali BYS çalışmasında kapasitör bloğu yerine LTO batarya kullanılarak, NCA ve LTO bataryaların üstün özelliklerini bir arada kullanabilecek bir BYS tasarlanmıştır. Bu BYS bağlanan bataryanın kimyasını geliştirilen algoritma sayesinde tespit ederek her kimyaya uygun BYS kontrol parametrelerini otomatik olarak ayarlayarak uygulayabilmektedir.

NCA batarya yüksek güç yoğunluğu ve dayanıklılığı, LTO batarya ise yüksek C'lerde şarj/deşarj olabilme kabiliyeti sebebiyle tercih edilmiştir. Burada amaçlanan şey ani güç ihtiyacı/üretimi (rejeneratif frenleme) durumlarında LTO bataryanın yüksek akım verebilme/alabilme kabiliyetinden yararlanırken; normal seyir halinde NCA bataryanın yüksek güç yoğunluğundan faydalanmaktır. Böylece gaz pedalının/kolunun ani hareketlerinde hızlıca LTO bataryaya geçilmektedir. Bu anahtarlama mekanizmasının uygulanabilirliğini göstermek için bir simülasyon çalışması yapılmıştır.

Yüksek performanslı elektrikli araçların ihtiyaç duydukları ani gücün LTO gibi yüksek C ile şarj/deşarj olabilen bir batarya'dan sağlanırken normal kullanım koşullarında NCA veya LFP gibi bir batarya ile kullanılmasının %20 gibi bir verim artışı sağladığı literatürde yer almaktadır. Bu çalışmada literatürde yer alan az sayıdaki diğer çok kimyali batarya yönetim sistemlerinden farklı bir yaklaşım ile bir batarya sürekli aktif iken diğeri eşzamanlı olarak deaktif edilmesi esası temel alınarak tasarlanmıştır. Yani, bir batarya aktifken diğeri batarya 3 saniye sonra deaktive edilmektedir. Böylece 3 saniyelik bir zaman zarfında her iki batarya da aktif durumda bulunmaktadır. Bu sayede IGBT gibi pahalı ve zahmetli bir sistem tasarımı yerine çok daha basit ve ucuz olan kontaktörler ile bir anahtarlama donanımının yapılabilirliği simülasyon çalışması ile ortaya koyulmuştur.

Böylece tez çalışmasında hemen hemen bütün elektrikli araçlar için geçerli olabilen kompleks BYS tasarlanarak prototip üretimi gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- a) PKB algoritması geliştirilerek pil kimyasının %100 doğrulukla elektronik olarak belirlenmesi sağlanmıştır.

- b) Bir batarya yönetim sistemi donanım ve yazılım olarak geliştirilmiştir.
- c) Geliştirilen PKB algoritması batarya yönetim sistemi üzerinde uygulanmıştır.
- d) Batarya yönetim sistemi yüksek seviye fonksiyonları için python temelli bir yazılım geliştirilmiştir. Bu sayede sistem yapay zekâ BYS algoritmalarının geliştirilmesi ve uygulanması için uygun hale getirilmiştir.
- e) Batarya yönetim sisteminin kontrolü için dokunmatik ekranlı bir arayüz yazılımı geliştirilmiştir.

Çalışmanın devamına ve gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması bakımından aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- a) Gerçek bir elektrikli araç üzerinde deneysel verilerin toplanması.
- b) Pil sağlık durumunun otomatik kontrolü için algoritmalarının geliştirilmesi.
- c) Mekanik yüke bağlanmış bir elektrik motoru veya bir elektrikli mini araç kullanılarak gerçek koşullarda sistem performansının analizi ve değerlendirilmesi.
- d) PKB algoritması için daha fazla pil kimyası ve daha fazla sayıda pil hücresi kullanılarak algoritmanın geliştirilmesi.
- e) Sürücü karakteristiğini öğrenen adaptif bir batarya yönetim sistemi algoritmalarının geliştirilmesi.

KAYNAKLAR

- Altium Designer*. (2022). https://en.wikipedia.org/wiki/Altium_Designer
- An Electric Dog-Cart. (1888). *The Engineer*, 218.
- Andrea, D. (2010). *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*. Artech House.
- ANSI. (2021). *American National Standard for Portable Primary Cells and Batteries with Aqueous Electrolyte-General and Specifications*.
- Anwar, S., Zia, M. Y., Rashid, M., Rubens, G. Z., & Enevoldsen, P. (2020). Towards Ferry Electrification in the Maritime Sector. In *Energies* (Vol. 13, Issue 24). <https://doi.org/10.3390/en13246506>
- Arai, H. (1995). *Automobile engineering almanac: History of the development of the automobile*. Sankaido Press.
- Arbuthnot, J. (1710). II. An argument for divine providence, taken from the constant regularity observ'd in the births of both sexes. By Dr. John Arbuthnott, Physitian in Ordinary to Her Majesty, and Fellow of the College of Physitians and the Royal Society. *Philosophical Transactions*, 27(328), 186–190. <https://doi.org/10.1098/rstl.1710.0011>
- Arslan, A. K., Yaşar, Ş., Çolak, C., & Yoloğlu, S. (2018). WSSPAS: An Interactive Web Application for Sample Size and Power Analysis with R Using Shiny. *Turkiye Klinikleri Journal of Biostatistics*, 10(3), 224–246. <https://doi.org/10.5336/biostatic.2018-62787>
- ATmega2560 Parametrics*. (2022). <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega2560>
- Aung, H., Soon, J. J., Goh, S. T., Lew, J. M., & Low, K.-S. (2020). Battery Management System With State-of-Charge and Opportunistic State-of-Health for a Miniaturized Satellite. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56(4), 2978–2989. <https://doi.org/10.1109/TAES.2019.2958161>
- Bard, A. J., Inzelt, G., & Scholz, F. (2012). *Electrochemical Dictionary* (2nd, Revis ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/0.1007/978-3-642-29551-5>
- Bazilian, M. D. (2018). The mineral foundation of the energy transition. *The Extractive Industries and Society*, 5(1), 93–97.
- Beccu, K. (1970). *Negative electrode of titanium-nickel alloy hydride phases* (Patent No. US3824131A). US Patent.
- Bellache, K., Camara, M. B., & Dakyo, B. (2018). Transient Power Control for Diesel-Generator Assistance in Electric Boat Applications Using Supercapacitors and Batteries. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(1), 416–428. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2737828>
- Bergveld, H.J., Kruijt, W. S., & Notten, P. H. . (2002). *Battery Management Systems* (1st ed.). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0843-2>
- Bergveld, Hendrik J., Pop, V., & Notten, P. H. L. (2008). *Method and apparatus for determination of the state-of-charge (soc) of a rechargeable battery* (Patent No. WO2008099298A1). WIPO (PCT).
- Bonfiglio, C., & Roessler, W. (2009). A cost optimized battery management system with active cell balancing for lithium ion battery stacks. *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 304–309. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289837>
- Borrer, C. (2009). *The Certified Quality Engineer Handbook* (3rd ed.). ASQ Quality Press.
- Bowkett, M., Thanapalan, K., Stockley, T., Hathway, M., & Williams, J. (2013). Design and implementation of an optimal battery management system for hybrid electric vehicles.

- 2013 19th International Conference on Automation and Computing, 1–5.
- Braga, M. H., Grundish, N. S., Murchison, A. J., & Goodenough, J. B. (2017). Alternative strategy for a safe rechargeable battery. *Energy & Environmental Science*, 10(1), 331–336. <https://doi.org/10.1039/C6EE02888H>
- Brahma, A., Guezennec, Y., & Rizzoni, G. (2000). Optimal energy management in series hybrid electric vehicles. *Proceedings of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.00CH36334)*, 1(6), 60–64 vol.1. <https://doi.org/10.1109/ACC.2000.878772>
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). *Classification And Regression Trees* (1st Editio). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781315139470>
- British Autocars for the Sultan of Turkey. (1895). *The Autocar*.
- Brost, R. D. (1998). Performance of valve-regulated lead acid batteries in EV1 extended series strings. *Proceedings of the Annual Battery Conference on Applications and Advances*, 25–29. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0031675716&partnerID=40&md5=c2f407383f57af95ba2c53c0de88297f>
- Buchmann, I. (2017). *BU-205: Types of Lithium-ion*. Battery University. http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- Calderaro, V., Galdi, V., Graber, G., Piccolo, A., Capasso, A., Lamedica, R., & Ruvio, A. (2015). Energy management of Auxiliary Battery Substation supporting high-speed train on 3 kV DC systems. *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 1224–1229. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2015.7418603>
- Callihan, P. F. (2010). *A Major Study of American (Ford) Compared With Japanese (Honda) Automotive Industry Their Strategies Affecting Survivability*. Cleveland State University.
- Caruthers, F. (1994). Battery-management Circuitry Gets Smarter. *Computer Design's OEM Integration*, May, 15–18.
- Cates, R., & Richey, R. (1996). Charge NiCd and NiMH Batteries Properly. *Electronic Design*, June 10, 118–122.
- Čermák, K., & Bartl, M. (2014). Decentralized Battery Management System. *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 599–603. <https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6839509>
- Chamasemani, F. F., & Singh, Y. P. (2011). Multi-class Support Vector Machine (SVM) Classifiers -- An Application in Hypothyroid Detection and Classification. *2011 Sixth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications*, 351–356. <https://doi.org/10.1109/BIC-TA.2011.51>
- Chen, H., & Shen, J. (2017). A degradation-based sorting method for lithium-ion battery reuse. *PLOS ONE*, 12(10), e0185922. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185922>
- Chen, L., Chen, J., Wang, H., Wang, Y., An, J., Yang, R., & Pan, H. (2020). Remaining Useful Life Prediction of Battery Using a Novel Indicator and Framework With Fractional Grey Model and Unscented Particle Filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(6), 5850–5859. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2952620>
- Cheng, L., Acuna, P., Aguilera, R. P., Jiang, J., Fletcher, J., & Baier, C. (2017). Model predictive control for Energy Management of a hybrid energy storage system in Light Rail Vehicles. *2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG 2017*, 683–688. <https://doi.org/10.1109/CPE.2017.7915255>
- Cheng, L., Wang, W., Wei, S., Lin, H., & Jia, Z. (2018). An improved energy management strategy for hybrid energy storage system in light rail vehicles. *Energies*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/en11020423>

- Chinomona, B., Chung, C., Chang, L.-K., Su, W.-C., & Tsai, M.-C. (2020). Long Short-Term Memory Approach to Estimate Battery Remaining Useful Life Using Partial Data. *IEEE Access*, 8, 165419–165431. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022505>
- Chung, S., & Trescases, O. (2017). Hybrid Energy Storage System With Active Power-Mix Control in a Dual-Chemistry Battery Pack for Light Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(3), 600–617. <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2710628>
- Ci, S., Lin, N., & Wu, D. (2016). Reconfigurable Battery Techniques and Systems: A Survey. *IEEE Access*, 4, 1175–1189. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2545338>
- Conover, W. J., & Iman, R. L. (1981). Rank Transformations as a Bridge Between Parametric and Nonparametric Statistics. *The American Statistician*, 35(3), 124–129. <https://doi.org/10.2307/2683975>
- Corno, M., & Pozzato, G. (2020). Active Adaptive Battery Aging Management for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(1), 258–269. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2940033>
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273–297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
- Costa, M. C. S., & Porto, P. A. (2021). The Daniell cell : A historical case study. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 38(3), 1650–1672.
- Da Moraes, C. G., Junior, S. L. B., Cavilha, P. P., Pacheco, A. L. S., Heldwein, M. L., & Waltrich, G. (2019). Multi-Port System for Storage and Management of Regenerative Braking Energy in Diesel-Electric Locomotives. *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference, COBEP/SPEC 2019*. <https://doi.org/10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065725>
- Davenport, T. (1837). *Improvement in propelling machinery by magnetism and electro-magnetism* (Patent No. US132A).
- Dikmen, İ. C., Ekici, Y. E., Karadağ, T., Abbasov, T., & Hamamcı, S. E. (2021). Electrification in Urban Transport: A Case Study with Real-time Data. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(1), 69–77. <https://doi.org/10.17694/bajece.837248>
- Dikmen, İ. C., & Karadağ, T. (2021a). *Hibrit ve Elektrikli araç batarya ekspertiz sistemi ve yöntemi* (Patent No. 2021/018933).
- Dikmen, İ. C., & Karadağ, T. (2021b). *Lityum Tabanlı Piller için Pil Kimyasını Elektronik Olarak Belirleme Yöntemi* (Patent No. 2021-GE-212728).
- Dikmen, İ. C., & Karadağ, T. (2021c). *Pil Kimyasını Otomatik Belirleyebilen Adaptif Modüler ve Akıllı Batarya Yönetim Sistemi* (Patent No. 2021/018973).
- Dikmen, İ. C., & Karadağ, T. (2022). Electrical Method for Battery Chemical Composition Determination. *IEEE Access*, 10, 6496–6504. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3143040>
- Dikmen, İ. C., & Karadağ, T. (2021d). Batarya Yönetim Sistemi Fonksiyonlarının Gelişimi ve Topolojilerinin İncelenmesi. *6. Uluslararası Erciyes Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, 49–60.
- Dikmen, İ. C., & Karadağ, T. (2021e). Onboard Battery Type Determination. *2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 360–365. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT52890.2021.9604658>
- Dikmen, İ. C., Seven, S., & Karadağ, T. (2018). A Numerical Study for Automatic Battery Identification in Hybrid Battery Packs for Electric Vehicles. *Proceedings of the International 9th Automotive Technologies Congress*, 825–832.
- Dörfler, S., Walus, S., Locke, J., Fotouhi, A., Auger, D. J., Shateri, N., Abendroth, T., Härtel,

- P., Althues, H., & Kaskel, S. (2021). Recent Progress and Emerging Application Areas for Lithium–Sulfur Battery Technology. *Energy Technology*, 9(1), 2000694. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ente.202000694>
- Dudney, N., West, W., & Nanda, J. (2015). Handbook of Solid State Batteries. In *Materials and Energy* (Vol. 6, p. 836). World Scientific. <https://doi.org/10.1142/9487>
- Duff, A. W., Lewis, E. P., Marshall, C. E., Carman, A. P., & McClung, R. K. (1916). *A Text-Book of Physics* (4th ed.). Blakiston's Son.
- Dummer, G. W. A. (1983). *Electronic Inventions and Discoveries: Electronics from its earliest beginnings to the present day* (3rd ed.). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-03663-8>
- Dunckley, M. (1993). Electric vehicles — are they a realistic option for the future? *Journal of Power Sources*, 42(1), 291–295. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-7753\(93\)80158-L](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-7753(93)80158-L)
- Early Experiments In Electric Traction. (1909). *The Engineer*, 172.
- Eftekhari, A. (2017). LiFePO₄/C nanocomposites for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 343, 395–411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.01.080>
- Ekici, Y. E., Dikmen, İ. C., Nurmammed, M., & Karadağ, T. (2021). Efficiency Analysis of Various Batteries with Real-time Data on a Hybrid Electric Vehicle. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 5(3), 214–223. <https://doi.org/10.30939/ijastech..946047>
- Ertugrul, N., Kani, A. P., Davies, M., Sbarbaro, D., & Morán, L. (2020). Status of Mine Electrification and Future Potentials. *2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES)*, 151–156. <https://doi.org/10.1109/SGES51519.2020.00034>
- Faika, T., Kim, T., & Khan, M. (2018). An Internet of Things (IoT)-Based Network for Dispersed and Decentralized Wireless Battery Management Systems. *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 1060–1064. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2018.8450161>
- Fang, S., Wang, Y., Gou, B., & Xu, Y. (2020). Toward Future Green Maritime Transportation: An Overview of Seaport Microgrids and All-Electric Ships. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(1), 207–219. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2950538>
- Feng, Y., Cao, Z., Shen, W., Yu, X., Han, F., Chen, R., & Wu, J. (2016). Intelligent battery management for electric and hybrid electric vehicles: A survey. *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 1436–1441. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2016.7474969>
- Fister, I., Fister, I., Yang, X.-S., & Brest, J. (2013). A comprehensive review of firefly algorithms. *ArXiv, abs/1312.6*.
- Freeman, D. (1995). Freeing Portables from Battery Tyranny. *Electronic Design*, July 10, 115–121.
- Frost, D. F., & Howey, D. A. (2018). Completely Decentralized Active Balancing Battery Management System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(1), 729–738. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2664922>
- Funke, K. (2013). Solid State Ionics: from Michael Faraday to green energy—the European dimension. *Science and Technology of Advanced Materials*, 14(4), 43502. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/14/4/043502>
- Gao, F., Zhang, G., Shi, Y., & Qiang, G. (2019). Energy Management Strategy for New Type Urban Rail Vehicle Hybrid Power System. *Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society*, 41(4), 48–54. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2019.04.007>
- Gao, M., Su, C., Cong, J., Yang, F., Wang, Y., & Wang, P. (2019). Harvesting thermoelectric

- energy from railway track. *Energy*, 180, 315–329.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.087>
- Gladstone, J. H., & Tribe, A. (1882). On the Chemistry of the Plants and Faure Accumulators. *Nature*, 25(646), 461–463. <https://doi.org/10.1038/025461c0>
- Glazebrook, R. T., & Skinner, S. (1892). On the Clark Cell as a Standard of Electromotive Force. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 183, 567–628. <https://doi.org/10.1098/rsta.1892.0015>
- Glover, M., & Kimberley, W. (1996). Kind of hush. *Automotive Engineer (London)*, 21(6). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0030379484&partnerID=40&md5=41f683ae8437770cff7647810c7e9f4f>
- Goodenough, F. (1993). Battery-based Systems Demand Unique ICs. *Electronic Design*, 39(14), 47–61.
- Goodenough, F. (1996a). Battery Management ICs Meet Diverse Needs. *Electronic Design*, August 19, 79–96.
- Goodenough, F. (1996b). Microcontroller Grabs Data and Processes Analogue Data. *Electronic Design*, April 15, 139–144.
- Goodenough, J. B., Whittingham, M. S., & Yoshino, A. (2019). *The Nobel Prize in Chemistry 2019*. <https://doi.org/10.1007/s12045-019-0905-2>
- Groppi, D., Pfeifer, A., Garcia, D. A., Krajačić, G., & Duić, N. (2021). A review on energy storage and demand side management solutions in smart energy islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110183. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110183>
- Guarnieri, M. (2012). Looking back to electric cars. *2012 Third IEEE HISToRY of ELECTRO-Technology CONFERENCE (HISTELCON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/HISTELCON.2012.6487583>
- Guillemin, A., & Thompson, S. P. (1891). *Electricity and magnetism*. Macmillan and Co.
- Gutmann, G. (1999). Hybrid electric vehicles and electrochemical storage systems — a technology push–pull couple. *Journal of Power Sources*, 84(2), 275–279. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00328-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00328-6)
- Haldar, S., Mondal, S., Mondal, A., & Banerjee, R. (2020). Battery Management System Using State of Charge Estimation: An IOT Based Approach. *2020 National Conference on Emerging Trends on Sustainable Technology and Engineering Applications (NCETSTEA)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/NCETSTEA48365.2020.9119945>
- Han, W., Zou, C., Zhang, L., Ouyang, Q., & Wik, T. (2019). Near-Fastest Battery Balancing by Cell/Module Reconfiguration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(6), 6954–6964. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2915013>
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
- Hasanvand, S., Rafiei, M., Gheisarnejad, M., & Khooban, M. (2020). Reliable Power Scheduling of an Emission-Free Ship: Multiobjective Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 6(2), 832–843. <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.2983247>
- Hashemi, S. R., Mahajan, A. M., & Farhad, S. (2021). Online estimation of battery model parameters and state of health in electric and hybrid aircraft application. *Energy*, 229, 120699. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120699>
- Hayden, C. L. (1981). Electric vehicle battery management. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/810417>
- Heller, A. (1896). Anianus Jedlik. *Nature*, 53(1379), 516–517.

- <https://doi.org/10.1038/053516a0>
- Helmert. (1876). Die Genauigkeit der Formel von Peters zur Berechnung des wahrscheinlichen Beobachtungsfehlers directer Beobachtungen gleicher Genauigkeit. *Astronomische Nachrichten*, 88(8-9), 113–131.
<https://doi.org/10.1002/asna.18760880802>
- Henderson, M. (1977). Developments in lead-acid batteries. *Electronics and Power*, 23(6), 491–493. <https://doi.org/10.1049/ep.1977.0260>
- Herrera, V. I., Gaztañaga, H., Milo, A., Saez-De-Ibarra, A., Etxeberria-Otadui, I., & Nieva, T. (2016). Optimal Energy Management and Sizing of a Battery-Supercapacitor-Based Light Rail Vehicle with a Multiobjective Approach. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(4), 3367–3377. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2555790>
- Herrera, V., Milo, A., Gaztañaga, H., Etxeberria-Otadui, I., Villarreal, I., & Camblong, H. (2016). Adaptive energy management strategy and optimal sizing applied on a battery-supercapacitor based tramway. *Applied Energy*, 169, 831–845.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.079>
- Hickey, R., & Jahns, T. M. (2019). Direct Comparison of State-of-Charge and State-of-Energy Metrics for Li-Ion Battery Energy Storage. *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2466–2470.
<https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8912696>
- Huang, K., Wang, Y., & Feng, J. (2021). Design of lithium-ion battery management system for mine electric vehicle. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 680(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/680/1/012015>
- IEC. (2022). *IEC International Standard on Primary Batteries*.
<https://webstore.iec.ch/publication/673>
- Islam, R., Anwar, S. R. M., Kamal, A. T., Rahman, S. N., Faraby, H. M., Imtiaz, H., Jahan, M. S., & Tulip, F. S. (2008). Battery Chemistry Detection Algorithm Implementable with Intelligent Systems: A Step towards the Development of a Novel Charger Applicable for Multi-Chemistry Environment. *2008 Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, 3, 805–810.
<https://doi.org/10.1109/IITA.2008.441>
- ISO 11898 Road vehicles — Controller area network (CAN). (2022). International Organization for Standardization (ISO). <https://www.iso.org/standard/63648.html>
- Jayson, J. S. (2014). The Daniell cell, Ohm's law, and the emergence of the International System of Units. *American Journal of Physics*, 82, 60–65.
- Jeong, B., Jeon, H., Kim, S., Kim, J., & Zhou, P. (2020). Evaluation of the Lifecycle Environmental Benefits of Full Battery Powered Ships: Comparative Analysis of Marine Diesel and Electricity. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 8, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/jmse8080580>
- Jinrui, N., Fengchun, S., & Qinglian, R. (2006). A Study of Energy Management System of Electric Vehicles. *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/VPPC.2006.364301>
- Johnson, B. C. (1999). Environmental products that drive organizational change: General motor's electric vehicle (EV1). *Corporate Environmental Strategy*, 6(2), 140–150.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1066-7938\(00\)80024-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1066-7938(00)80024-X)
- Jones, G. (1991). Battery Management in Modern Portable Systems. *Electronic Engineering*, 43–52.
- Jossen, A., Späth, V., Döring, H., & Garche, J. (1999). Reliable battery operation — a challenge for the battery management system. *Journal of Power Sources*, 84(2), 283–286. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00329-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00329-8)
- Kang, J., Guo, Y., & Liu, J. (2020). Rule-based energy management strategies for a fuel cell-

- battery hybrid locomotive. *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Connecting the Grids Towards a Low-Carbon High-Efficiency Energy System, EI2 2020*, 45–50. <https://doi.org/10.1109/EI250167.2020.9346652>
- Kanno, Y., Watanabe, S., Onodera, H., Takasugi, S., & Sakai, T. (1999). *Non-aqueous electrolyte secondary battery with a lithium copper titanium oxide electrode* (Patent No. US6395425B1).
- Karadağ, T., & Dikmen, İ. C. (2021). Yeni Nesil, Modüler ve Akıllı Batarya Yönetim Sistemi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 32, 1103–1112. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1045564>
- Karavas, C.-S., Kyriakarakos, G., Arvanitis, K. G., & Papadakis, G. (2015). A multi-agent decentralized energy management system based on distributed intelligence for the design and control of autonomous polygeneration microgrids. *Energy Conversion and Management*, 103, 166–179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.021>
- Kauer, M., Narayanaswamy, S., Steinhurst, S., & Chakraborty, S. (2017). Rapid Analysis of Active Cell Balancing Circuits. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTER-AIDED DESIGN OF INTEGRATED CIRCUITS AND SYSTEMS*, 36(4), 694–698. <https://doi.org/10.1109/TCAD.2016.2597224>
- Kerridge, B. (1993). Battery Management ICs. *EDN*, May 13, 100–108.
- Khan, N., Dilshad, S., Khalid, R., Kalair, A. R., & Abas, N. (2019). Review of energy storage and transportation of energy. *Energy Storage*, 1(3), e49. <https://doi.org/10.1002/est2.49>
- Khooban, M. H., Gheisarnejad, M., Farsizadeh, H., Masoudian, A., & Boudjadar, J. (2020). A New Intelligent Hybrid Control Approach for DC–DC Converters in Zero-Emission Ferry Ships. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(6), 5832–5841. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2951183>
- Kim, C., Kim, M., Kim, Y., & Moon, G. (2011). A modularized charge equalizer using battery monitoring IC for series connected Li-Ion battery strings in an electric vehicle. *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, 304–309. <https://doi.org/10.1109/ICPE.2011.5944609>
- Kim, T., Makwana, D., Adhikaree, A., Vagdoda, J. S., & Lee, Y. (2018). Cloud-Based Battery Condition Monitoring and Fault Diagnosis Platform for Large-Scale Lithium-Ion Battery Energy Storage Systems. In *Energies* (Vol. 11, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/en11010125>
- Kirsch, D. A. (2000). *The Electric Vehicle and the Burden of History*. Rutgers University Press.
- Kivrak, S., Ozer, T., Oguz, Y., & Erken, E. B. (2020). Battery management system implementation with the passive control method using MOSFET as a load. *MEASUREMENT & CONTROL*, 53(1–2), 205–213. <https://doi.org/10.1177/0020294019883401>
- Klett, M. (2014). Electrochemical Studies of Aging in Lithium-Ion Batteries. In *TRITA-CHE-Report NV-2014:16*. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:715990/FULLTEXT01.pdf>
- Krastevm, I., Mukherjee, N., Tricoli, P., & Hillmanssen, S. (2015). New modular hybrid energy storage system and its control strategy for a fuel cell locomotive. *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE Europe 2015*. <https://doi.org/10.1109/EPE.2015.7309371>
- Kruger, R., & Barrick, J. W. (1966). Battery ratings. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/660029>
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583–621.

- <https://doi.org/10.2307/2280779>
- Kumar, D., & Zare, F. (2019). A Comprehensive Review of Maritime Microgrids: System Architectures, Energy Efficiency, Power Quality, and Regulations. *IEEE Access*, 7, 67249–67277. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917082>
- Kurzweil, P. (2010). Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery. *Journal of Power Sources*, 195(14), 4424–4434. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.126>
- Larminie, J., & Lowry, J. (2003). *Electric Vehicle Technology Explained*. <https://doi.org/doi:10.1002/0470090707.ch1>
- Li, H., Jiang, J., Wang, Z., Zhang, W., Sun, B., An, F., & He, X. (2020). State of Energy Estimation of Lithium-Ion Capacitor for Rail Transit Application. *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/VPPC49601.2020.9330975>
- Li, L., Huang, Z., Li, H., & Peng, J. (2017). A rapid cell voltage balancing scheme for supercapacitor based energy storage systems for urban rail vehicles. *Electric Power Systems Research*, 142, 329–340. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.09.021>
- Li, S., & Zhao, P. (2021). Big data driven vehicle battery management method: A novel cyber-physical system perspective. *Journal of Energy Storage*, 33, 102064. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102064>
- Li, W., Erickson, E. M., & Manthiram, A. (2020). High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries. *Nature Energy*, 5, 26–34.
- Lin, J. C. M., Dai, Y. L., & Li, P. S. (2013). Balance management system for battery modules in series. *Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 32(2), 67–72.
- Linlin, L., Xu, Z., Zhujinsheng, Jing, X., & Shuntao, X. (2017). Research on dynamic equalization for lithium battery management system. *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 6884–6888. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978421>
- Liu, R., Xu, L., Liu, F., Zheng, Z., Wang, K., & Li, Y. (2019). A Novel Architecture of Urban Rail Transit Based on Hybrid Energy Storage Systems Using Droop Control. *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, ESARS-ITEC 2018*. <https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607728>
- Luke Gear, Harrop, P., Collins, R., Wyatt, D., & Edmondson, J. (2019). *Electric Vehicles: Land, Sea and Air 2021-2041*.
- Lumertz, M. M., da Cruz, F. G., Lamperti, R. D., Pasa, L. A., & Marujo, D. (2021). *Damaged Cell Location on Lithium-Ion Batteries Using Artificial Neural Networks BT - Control Applications in Modern Power System* (A. K. Singh & M. Tripathy (Eds.); pp. 477–486). Springer.
- Ma, S., Lin, M., Lin, T.-E., Lan, T., Liao, X., Maréchal, F., Van herle, J., Yang, Y., Dong, C., & Wang, L. (2021). Fuel cell-battery hybrid systems for mobility and off-grid applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110119. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110119>
- Mahamud, R., & Park, C. (2011). Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity. *Journal of Power Sources*, 196(13), 5685–5696. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.02.076>
- Mahmood, H., Michaelson, D., & Jiang, J. (2015). Decentralized Power Management of a PV/Battery Hybrid Unit in a Droop-Controlled Islanded Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(12), 7215–7229. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2394351>

- Makhsoos, A., Mousazadeh, H., Mohtasebi, S. S., Abdollahzadeh, M., Jafarbiglu, H., Omrani, E., Salmani, Y., & Kiapey, A. (2018). Design, simulation and experimental evaluation of energy system for an unmanned surface vehicle. *Energy*, *148*, 362–372. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.158>
- Maliniak, D. (1995). Intelligence Invades the Battery Pack. *Electronic Design*, January 9, 153–159.
- Manwaring, L. A. (1966). *The Observer's Book of Automobiles* (12th Ed.). Library of Congress catalog card # 62-9807.
- Masaak, S., Kiyook, K., Masahiko, K., Yoshiaki, T., & Hiroshige, S. (1998). *Electronic Apparatus, Battery Management System, and Battery Management Method* (Patent No. 5635813).
- MathWorks. (2022). *Implement generic battery model - Simulink - MathWorks*. <https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/battery.html>
- McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, *5*(4), 115–133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>
- Mizushima, K., Jones, P. C., Wiseman, P. J., & Goodenough, J. B. (1980). Li_xCoO_2 ($0 < x < 1$): A new cathode material for batteries of high energy density. *Materials Research Bulletin*, *15*(6), 783–789. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-5408\(80\)90012-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-5408(80)90012-4)
- Morgan, D. (1995). *The Villages of Aberdeen: Round About Mounthooly*. Denburn Books.
- Morimoto, M. (2009). *Electric vehicles: Framework for vehicles run by electricity and motors*. Morikita Press.
- Mutarrif, M. U., Terriche, Y., Niazi, K. A., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2018). Energy Storage Systems for Shipboard Microgrids—A Review. In *Energies* (Vol. 11, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/en11123492>
- Nagaura, T., & Tozawa, K. (1990). Lithium Ion Rechargeable Battery. *Progress in Batteries and Solar Cells*, *9*, 209.
- National Instruments. (2022). *LabVIEW*. <https://www.ni.com/en-tr/shop/labview.html>
- Nemeth, T., Schröer, P., Kuipers, M., & Sauer, D. U. (2020). Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications – Electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations. *Journal of Energy Storage*, *31*, 101656. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101656>
- Nguyen, H. P., Hoang, A. T., Nizetic, S., Nguyen, X. P., Le, A. T., Luong, C. N., Chu, V. D., & Pham, V. V. (2020). The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO₂ emission in ocean shipping: A comprehensive review. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, *n/a*(*n/a*), e12580. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2050-7038.12580>
- Nomoto, H., Omura, T., Toyota, E., & Shimada, M. (2006). Hybrid traction system for railway vehicles. *22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exposition, EVS 2006*.
- Noyce, R. N. (1959). *Semiconductor device-and-lead structure* (Patent No. US2981877A).
- Nuchteere, C., Li, T., & Xia, H. (2020). Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *134*, 110145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110145>
- Nye, D. E. (1992). *Electrifying America: Social Meanings of a New Technology, 1880-1940*. MIT Press.
- Ohzuku, T., Ueda, A., & Yamamoto, N. (1995). Zero-Strain Insertion Material of $\text{Li}[\text{Li}_{1/3}\text{Ti}_{5/3}]\text{O}_4$ for Rechargeable Lithium Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, *142*(5), 1431–1435. <https://doi.org/10.1149/1.2048592>

- Omar, N., Firouz, Y., Monem, M. A., Samba, A., Gualous, H., Coosemans, T., Van den Bossche, P., & Van Mierlo Molecular Sciences and Chemical Engineering, J. B. T.-R. M. in C. (2014). *Analysis of Nickel-Based Battery Technologies for Hybrid and Electric Vehicles*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.10740-1>
- Padhi, A. K., Nanjundaswamy, K. S., & Goodenough, J. B. (1997). Phospho-olivines as Positive-Electrode Materials for Rechargeable Lithium Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 144(4), 1188–1194. <https://doi.org/10.1149/1.1837571>
- Pavić, I., Beus, M., Bobanac, V., & Pandžić, H. (2018). Decentralized Master-Slave Communication and Control Architecture of a Battery Swapping Station. *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8494601>
- Peng, H., Li, J., Löwenstein, L., & Hameyer, K. (2020). A scalable, causal, adaptive energy management strategy based on optimal control theory for a fuel cell hybrid railway vehicle. *Applied Energy*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114987>
- Pfeifer, A., Prebeg, P., & Duić, N. (2020). Challenges and opportunities of zero emission shipping in smart islands: A study of zero emission ferry lines. *ETransportation*, 3, 100048. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100048>
- Pham, V., Nguyen, T., Tran, D., Vu, V., & Choi, W. (2016). A new cell-to-cell fast balancing circuit for Lithium-Ion batteries in Electric Vehicles and Energy Storage System. *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 2461–2465. <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2016.7512684>
- Pop, V., Bergveld, H. J., Danilov, D., Regtien, P. P. L., & Notten, P. H. L. (2008). *Battery Management Systems Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*. Springer Science+Business Media B.V.
- Porsche. (2022). *The powertrain Pure performance*. <https://media.porsche.com/mediakit/taycan/en/porsche-taycan/der-antrieb>
- Propp, K., Marinescu, M., Auger, D. J., O'Neill, L., Fotouhi, A., Somasundaram, K., Offer, G. J., Minton, G., Longo, S., Wild, M., & Knap, V. (2016). Multi-temperature state-dependent equivalent circuit discharge model for lithium-sulfur batteries. *Journal of Power Sources*, 328, 289–299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.090>
- Qiang, J., Yang, L., Ao, G., & Zhong, H. (2006). Battery Management System for Electric Vehicle Application. *2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 134–138. <https://doi.org/10.1109/ICVES.2006.371569>
- Rahimi-Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F., & Chow, M. (2013). Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(2), 4–16. <https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2250351>
- Ramanan, A. (2019). Development of lithium-ion batteries – 2019 Nobel Prize for Chemistry. *Current Science*, 117(9), 1416–1418.
- Reindl, A., Meier, H., & Niemetz, M. (2020). *Scalable, Decentralized Battery Management System Based on Self-organizing Nodes BT - Architecture of Computing Systems – ARCS 2020* (A. Brinkmann, W. Karl, S. Lankes, S. Tomforde, T. Pionteck, & C. Trinitis (Eds.); pp. 171–184). Springer International Publishing.
- Representation of Events in Nerve Nets and Finite Automata . (1956). In *Automata Studies*. (Vol. 34). Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400882618-002>
- Richards, P. (2002). *A CAN Physical Layer Discussion* (No. AN228). <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00228a.pdf>
- Riczu, C., Habibi, S., & Bauman, J. (2018). Design and Optimization of An Electric Vehicle

- with Two Battery Cell Chemistries. *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 506–512. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2018.8450156>
- Robinson, J. B., Xi, K., Kumar, R. V., Ferrari, A. C., Au, H., Titirici, M.-M., Parra-Puerto, A., Kucernak, A., Fitch, S. D. S., Garcia-Araez, N., Brown, Z. L., Pasta, M., Furness, L., Kibler, A. J., Walsh, D. A., Johnson, L. R., Holc, C., Newton, G. N., Champness, N. R., ... Shearing, P. R. (2021). 2021 roadmap on lithium sulfur batteries. *Journal of Physics: Energy*, 3(3), 31501. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/abdb9a>
- Rosenblatt, F. (1957). *The perceptron, a perceiving and recognizing automaton Project Para*. Cornell Aeronautical Laboratory.
- S, H. (2020). Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology. *Energy Storage*, e203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/est2.203>
- Samuel Greengard. (2019). *What is Artificial Intelligence?*
<https://www.datamation.com/artificial-intelligence/what-is-artificial-intelligence.html>
- Sandeep Dhameja. (2002). *Electric Vehicle Battery Systems*. Elsevier.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-9916-7.X5000-6>
- Sandhya, C. P., John, B., & Gouri, C. (2014). Lithium titanate as anode material for lithium-ion cells: a review. *Ionics*, 20(5), 601–620. <https://doi.org/10.1007/s11581-014-1113-4>
- Sarma, U., & Ganguly, S. (2020). Design optimisation for component sizing using multi-objective particle swarm optimisation and control of PEM fuel cellbattery hybrid energy system for locomotive application. *IET Electrical Systems in Transportation*, 10(1), 52–61. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2018.5053>
- Saslow, W. M. (2002). *Chapter 12 - Faraday's Law of Electromagnetic Induction* (W. M. B. T.-E. Saslow Magnetism, and Light (Ed.); pp. 505–558). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-012619455-5.50012-7>
- Sastry, A. M., Albano, F., Wang, C.-W., Kruse, R., & Lebrun, J. (2016). *Electric vehicle propulsion system and method utilizing solid-state rechargeable electrochemical cells* (Patent No. US9419303B2).
- Sato, A. (2014). *TAIYO YUDEN Lithium Ion Capacitors: An Effective EDLC Replacement*.
https://www.yuden.co.jp/include/english/solutions/lic/LIC_White_Paper_Final.pdf
- Schweiger, H.-G., Obeidi, O., Komesker, O., Raschke, A., Schiemann, M., Zehner, C., Gehnen, M., Keller, M., & Birke, P. (2010). Comparison of Several Methods for Determining the Internal Resistance of Lithium Ion Cells. *Sensors*, 10(6), 5604–5625.
<https://doi.org/10.3390/s100605604>
- Scrosati, B., Garche, J., & Tillmetz, W. (Eds.). (2015). *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02665-2>
- Second-life Electric Vehicle Batteries 2020–2030*. (2020).
- Sheela, K. G., & Deepa, S. N. (2013). Review on Methods to Fix Number of Hidden Neurons in Neural Networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 425740.
<https://doi.org/10.1155/2013/425740>
- SIMULINK Arduino Hardware Support Package*. (2022).
<https://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-simulink.html>
- Singirikonda, S., & Obulesu, Y. P. (2021). *Advanced SOC and SOH Estimation Methods for EV Batteries—A Review* BT - *Advances in Automation, Signal Processing, Instrumentation, and Control* (V.L.N. Komanapalli, N. Sivakumaran, & S. Hampannavar (Eds.); pp. 1963–1977). Springer.
- Sivaraman, P., & Sharmeela, C. (2020). IoT-Based Battery Management System for Hybrid Electric Vehicle. In *Artificial Intelligent Techniques for Electric and Hybrid Electric Vehicles* (pp. 1–16). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119682035.ch1>
- Smith, M. T., Starke, M. R., Chinthavali, M., & Tolbert, L. M. (2019). Architecture for Utility-Scale Multi-Chemistry Battery Energy Storage. *2019 IEEE Energy Conversion*

- Congress and Exposition (ECCE)*, 5386–5392.
<https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8912309>
- Song, J., Zhang, J., & Fan, X. (2018). Routing protocol for battery management system of electric vehicles based on ad-hoc network. *IET Networks*, 7(5), 283–286.
<https://doi.org/10.1049/iet-net.2017.0097>
- Souza, J. V. de, Momesso, A. E. C., Monteiro, F. M. d. S., Otto, R. B., & Asada, E. N. (2019). Intelligent Management of Battery System for Energy Arbitrage. *2019 IEEE Milan PowerTech*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810805>
- Stuart, T. A., & Zhu, W. (2011). Modularized battery management for large lithium ion cells. *Journal of Power Sources*, 196(1), 458–464.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.04.055>
- Stuart, T., Fang, F., Wang, X., Ashtiani, C., & Pesaran, A. (2002). A Modular Battery Management System for HEVs. *SAE Transactions*, 111, 777–785.
<http://www.jstor.org/stable/44699487>
- Student. (1908). The Probable Error of a Mean. *Biometrika*, 6(1), 1–25.
<https://doi.org/10.1093/biomet/6.1.1>
- Swager, A. W. (1995). Smart-Battery Technology: Power Management’s Missing Link. *EDN*, March 2, 47–64.
- Taylor, D. F., & Siwek, E. G. (1973). The dynamic characterization of lead-acid batteries for vehicle applications. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/730252>
- Toshiba. (2022). *Toshiba’s SCiB™ rechargeable battery used in various fields*.
 Toyota announces development of new TNGA-based powertrains. (2019).
<https://blog.toyota.co.uk/toyota-announces-development-new-tnga-based-powertrains>
- UNECE Transport Division. (2021). *UN GTR No. 15 (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP))*.
- Valehrachová, M. (2008). *Zabudnutý vynálezca, Štefan Anián Jedlík*. Perfekt.
- Vaughey, J. T., Thackeray, M. M., Kahaian, A. J., Jansen, A. N., & Chen, C. (1999). *Lithium-titanium-oxide anodes for lithium batteries* (Patent No. US6221531B1).
- Volk, C. (1971). *Magnus Volk of Brighton*. Phillimore.
- Volta, A., & Banks, J. (1800). On the Electricity Excited by the Mere Contact of Conducting Substances of Different Kinds. *The Philosophical Magazine*, 7(28), 289–311.
<https://doi.org/10.1080/14786440008562590>
- Waag, W., Fleischer, C., & Sauer, D. U. (2014). Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, 258, 321–339. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.064>
- Wakefield, E. H. (1998). *History of the Electric Automobile*. SAE International.
- Wan, X., Wu, J., & Hu, H. (2009). The smart Battery management system. *2009 International Conference on Test and Measurement*, 1, 29–32.
<https://doi.org/10.1109/ICTM.2009.5412938>
- Wang, B., Sun, Q., Zhang, D., & Gong, Y. (2021). Design of Lithium Battery Management System for Underwater Robot. In *Advances in Intelligent Systems and Computing: Vol. 1274 AISC* (pp. 989–995). https://doi.org/10.1007/978-981-15-8462-6_113
- Wang, Y., Tian, J., Sun, Z., Wang, L., Xu, R., Li, M., & Chen, Z. (2020). A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110015.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110015>
- Whittingham, M. Stanley. (1978). Chemistry of intercalation compounds: Metal guests in chalcogenide hosts. *Progress in Solid State Chemistry*, 12(1), 41–99.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0079-6786\(78\)90003-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0079-6786(78)90003-1)
- Whittingham, M S. (1976). Electrical Energy Storage and Intercalation Chemistry. *Science*,

- 192(4244), 1126 LP – 1127. <https://doi.org/10.1126/science.192.4244.1126>
- Wikner, E. (2017). *Lithium ion Battery Aging: Battery Lifetime Testing and Physics-based Modeling for Electric Vehicle Applications*.
- Wilson, A., Cleary, T., & Ballew, B. (2016). Power management control optimization of a hybrid electric-diesel locomotive. *2016 Joint Rail Conference, JRC 2016*. <https://doi.org/10.1115/JRC2016-5777>
- Wired wheels. (1996). *Industry Week*, 245(20), 50.
- Xing, Y., Ma, E. W. M., Tsui, K. L., & Pecht, M. (2011). Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles. In *Energies* (Vol. 4, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/en4111840>
- XT, L., Wu, J., CB, Z., & ZH, C. (2014). A method for state of energy estimation of lithium-ion batteries at dynamic currents and temperatures. *Journal of Power Sources*, 270, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.107>
- Xu, J., Geng, Z., Johansen, M., Carlstedt, D., Duan, S., Thiringer, T., Liu, F., & Asp, L. E. (2022). A multicell structural battery composite laminate. *EcoMat*, 4(3), e12180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eom2.12180>
- Yang, X.-S. (2008). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. Luniver Press.
- Yang, X.-S., & He, X. (2013). Firefly Algorithm: Recent Advances and Applications.
- Yao, X. L., Xie, S., Chen, C. H., Wang, Q. S., Sun, J. H., Li, Y. L., & Lu, S. X. (2005). Comparisons of graphite and spinel $\text{Li}_{1.33}\text{Ti}_{1.67}\text{O}_4$ as anode materials for rechargeable lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 50(20), 4076–4081. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.01.034>
- Zhang, A., Song, S., Wang, C., Zhang, J., Wang, K., & Li, L. (2017). Research of battery management system for integrated power supply. *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, 3178–3181. <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8243323>
- Zhang, S. S. (2013). Liquid electrolyte lithium/sulfur battery: Fundamental chemistry, problems, and solutions. *Journal of Power Sources*, 231, 153–162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.102>
- Zhang, X., Liu, L., Dai, Y., & Lu, T. (2018). Experimental investigation on the online fuzzy energy management of hybrid fuel cell/battery power system for UAVs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(21), 10094–10103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.075>
- Zhao, Y., Pohl, O., Bhatt, A., Collis, G. E., Mahon, P., Rütger, T., & Hollenkamp, A. (2021). *A Review on Battery Market Trends, Second-Life Reuse, and Recycling*.
- Zhou, Z., Camara, M. B., & Dakyo, B. (2017). Coordinated Power Control of Variable-Speed Diesel Generators and Lithium-Battery on a Hybrid Electric Boat. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(7), 5775–5784. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2638878>
- Zhu, F., Yang, Z., Lin, F., & Xia, H. (2017). Research on Acceleration-Time-Prediction-Based Energy Management and Optimal Sizing of Onboard Energy Storage System for Modern Trams. *Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society*, 32(23), 158–166. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L70661>
- Zhuang, W., Liu, Z., Su, H., & Chen, G. (2021). An intelligent thermal management system for optimized lithium-ion battery pack. *Applied Thermal Engineering*, 189, 116767. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116767>
- Ziegler, A., Oeser, D., Hein, T., Montesinos-Miracle, D., & Ackva, A. (2021). Reducing cell to cell variation of lithium-ion battery packs during operation. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3057125>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İsmail Can DİKMEN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2002, Hava Harp Okulu, Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2009, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği
- **Doktora** : 2022, İnönü Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2020 – Halen İnönü Üniversitesi
- 2019 – 2020 Malatya Turgut Özal Üniversitesi
- 2018 – 2020 SusTech Ar-Ge Eğitim ve Danışmanlık Ltd. Şti.
- 2015 – 2017 Malatya Büyükşehir Belediyesi Ulaşım AŞ. (MOTAŞ)
- 2002 – 2014 Türk Hava Kuvvetleri

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

Makaleler

- **İsmail Can DİKMEN and Teoman KARADAĞ (2022)**. Electrical Method for Battery Chemical Composition Determination. IEEE Access.
- **Teoman KARADAĞ ve İsmail Can DİKMEN (2021)**. Yeni Nesil, Modüler ve Akıllı Batarya Yönetim Sistemi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Özel Sayı (RDCONF)

Bildiriler

- **İsmail Can DİKMEN, Sibel SEVEN, and Teoman KARADAĞ (2018, May)**. A Numerical Study for Automatic Battery Identification in Hybrid Battery Packs for Electric Vehicles. In Proceedings of the International 9th Automotive Technologies Congress (OTEKON) (pp. 825–32).
- **İsmail Can DİKMEN and Teoman KARADAĞ (2021, September)**. Batarya Yönetim Sistemi Fonksiyonlarının Gelişimi ve Topolojilerinin İncelenmesi. In 6th International Erciyes Conference on Scientific Research (pp. 49–60).

- **İsmail Can DİKMEN and Teoman KARADAĞ (2021, October).** Onboard Battery Type Determination. In 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) (pp. 360–65). IEEE.

Patentler

- **İsmail Can DİKMEN ve Teoman KARADAĞ (2021).** Lityum Tabanlı Piller İçin Pil Kimyasını Elektronik Olarak Belirleme Yöntemi. Patent Başvuru No: 2021/005464
- **İsmail Can DİKMEN ve Teoman KARADAĞ (2021).** Hibrit ve Elektrikli Araç Batarya Ekspertiz Sistemi ve Yöntemi. Patent Başvuru No: 2021/018933
- **İsmail Can DİKMEN ve Teoman KARADAĞ (2021).** Pil Kimyasını Otomatik Belirleyebilen Adaptif, Modüler ve Akıllı Batarya Yönetim Sistemi. Patent Başvuru No: 2021/018973

Ödüller

- **En Yenilikçi Bilimsel Temelli Proje Kategorisinde Birincilik Ödülü (2022, Ocak).** RDCONF Ar-Ge ve İnovasyon Ödülleri 2021

Projeler

- **İsmail Can DİKMEN, Sibel SEVEN ve Teoman KARADAĞ.** E-CAMELEON, TÜBİTAK 1512 Teknogirişim Sermaye Desteği Programı. Proje No: 2170454
- **İsmail Can DİKMEN, Teoman KARADAĞ, Serdar Ethem HAMAMCI, Teymuraz ABBASOV, Adıgüzel Mehmet YÜCEER, Yunus Emre EKİCİ, Mustafa NURMUHAMMED ve Dursun ÇİÇEK.** Elektrikli Araçlarda Yeni Nesil Batarya ve Güç Yönetim Sistemlerinin Modellenmesi Geliştirilmesi ve Bataryaların Geri Dönüşüm Süreçlerinin Analizi. İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi. Proje No: FOA-2018-1358
- **İsmail Can DİKMEN ve Teoman KARADAĞ.** Yüksek Performanslı Elektrikli Kara ve Hava Araçları için Akıllı Batarya Yönetim Sisteminin Tasarımı Modellenmesi Simülasyonu ve Uygulaması. İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi. Proje No: FDK-2021-2645