

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN BATARYALARA
YÖNELİK OTOMATİK TEST, ANALİZ VE RAPORLAMA SİSTEMİ
GELİŞTİRİLMESİ**

Osman DEMİRCİ

**Danışman
Prof. Dr. Sezai TAŞKIN**



MANİSA-2019

**Osman
DEMİRÇİ**

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN BATAARYALARA YÖNELİK OTOMATİK
TEST, ANALİZ VE RAPORLAMA SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

2019

TEZ ONAYI

Osman DEMİRCİ tarafından hazırlanan "**Otomotiv Sektöründe Kullanılan Bataryalara Yönelik Otomatik Test, Analiz ve Raporlama Sistemi Geliştirilmesi**" adlı tez çalışması 18/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman **Prof. Dr. Sezai TAŞKIN**
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Nevzat ONAT**
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi **Dr.Öğr. Üyesi M. Zübeyir ÜNLÜ**
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Osman DEMİRCİ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VI
TEŞEKKÜR.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1.GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması	2
2. GENEL BİLGİLER VE TANIMLAMALAR	9
2.1. Akünün Tanımı.....	9
2.2. Akülerin Yapısı ve Temel Bileşenleri	10
2.2.1. Plakalar	11
2.2.2. Elektrolit	13
2.2.3. Seperatör	15
2.2.4. Kutup Başları	15
2.2.5. Kutu ve Kapaklar	16
2.2.6. Gaz Kapakları (Buşonlar).....	17
2.2.7. İndikatör (Gösterge).....	17
2.3. Akülerin Çalışma Prensipleri.....	18
2.4. Akü Çeşitleri.....	21
2.4.1. Starter Aküler.....	22
2.4.2. Endüstriyel Aküler.....	22
2.5. Temel Kavramlar ve Hesaplamalar	23
2.5.1. Akülerde Şarj İşlemi	23
2.5.2. Akülerde Deşarj İşlemi	24
2.5.3. Akü Açık Devre Voltajı (OCV).....	24
2.5.4. İç Direnç	26
2.5.5. Self Deşarj.....	26
2.5.6. Yoğunluk	27
2.5.7. Kapasite	27
2.5.8. Akülerde Verim	30
2.5.9. Sülfatlaşma.....	31
2.5.10. Akü Test Cihazları	32
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	34
3.1. Elektriksel Performans Testlerinin İncelenmesi (TS EN-50342-1:2016)	35
3.1.1. Akü Şarj Yöntemleri	36
3.1.2. Kapasite Testi	36
3.1.3. Marş Basma Akımı Testi	37
3.1.4. Çevrimsel Dayanıklılık Testi	37
3.1.5. Korozyon Testi	38
3.1.6. Şarj Tutma Testi.....	39
3.1.7. Derin Deşarj Testi.....	39
3.1.8. Şarj Kabulü Testi	40
3.1.9. Vibrasyon Direnci Testi.....	40
3.1.10. Su Kaybı Testi	41
3.2. Otomatik Test, Analiz ve Raporlama Sistemi Tasarımı.....	42

3.2.1. Veri Toplama Sistemi Donanım Tasarımı	42
3.2.2. Veri Toplama Sistemi Yazılım Tasarımı	51
3.3. Akü Test Adımları ve Test Bağlantı Şemaları	58
3.3.1. Otomatik Test, Analiz ve Raporlama Sistemi ile Akü Bağlantısı	58
3.3.2. Test Başlatma ve Bitirme Adımları	60
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	61
4.1. Şarj Testi ve Analizi	61
4.1.1. Şarj Testi Karakteristiğinin İncelenmesi.....	61
4.1.2. Şarj Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi	62
4.2. Kapasite Testi ve Analizi.....	63
4.2.1. Kapasite Testi Karakteristiğinin İncelenmesi	64
4.2.2. Kapasite Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi.....	65
4.3. Marş Basma Testi ve Analizi	66
4.3.1. Marş Basma Testi Karakteristiğinin İncelenmesi	66
4.3.2. Marş Basma Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi	67
4.4. Çevrimsel Dayanıklılık Testi ve Analizi	68
4.4.1. Çevrimsel Dayanıklılık Testi Karakteristiğinin İncelenmesi.....	69
4.4.2. Çevrimsel Dayanıklılık Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi	71
4.5. Korozyon Testi ve Analizi	72
4.5.1. Korozyon Testi Karakteristiğinin İncelenmesi	72
4.5.2. Korozyon Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi.....	73
4.6. Şarj Tutma Testi ve Analizi.....	74
4.6.1. Şarj Tutma Testi Karakteristiğinin İncelenmesi	74
4.6.2. Şarj Tutma Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi.....	75
4.7. Derin Deşarj Testi ve Analizi	76
4.7.1. Derin Deşarj Testi Karakteristiğinin İncelenmesi	77
4.7.2. Derin Deşarj Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi	77
4.8. Şarj Kabulü Testi ve Analizi	78
4.8.1. Şarj Kabulü Testi Karakteristiğinin İncelenmesi.....	78
4.8.2. Şarj Kabulü Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi	80
4.9. Vibrasyon Direnci Testi ve Analizi.....	81
4.9.1. Vibrasyon Direnci Testi Karakteristiğinin İncelenmesi	81
4.9.2. Vibrasyon Direnci Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi	82
4.10. Su Kaybı Testi ve Analizi.....	83
4.10.1. Su Kaybı Testi Karakteristiğinin İncelenmesi	83
4.10.2. Su Kaybı Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi.....	84
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	86
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	93

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Akım (Amper)
AGM	Absorption Glass Mat
Ah	Amper Saat
Ca	Kalsiyum
CAN	Control Area Network
DoD	Dept of Discharge
EN	European Norm
FOM	Fractional-Order Model
GND	Ground
gr/cm³	Gram/Santimetreküp
H₂	Hidrojen Gazı
H₂O	Su
H₂SO₄	Sülfürik Asit
LabVIEW™	Laboratuary Virtual Instruments For Engineering Workbench
O₂	Oksijen Gazı
OCV	Open Circuit Voltage
OEM	Original Equipment Manufacturer
Pb	Kurşun
pAh	Amper-Saat Verimi
PbO₂	Kurşun Peroksit
PbSO₄	Kurşun Sülfat
PVC	Polivinil Klorür
pWh	Watt Saat Verimi
Sb	Antimon
SoC	State of Charge
TS	Türk Standartları
UPS	Uninterruptible Power Supply
V	Voltaj (Volt)
VRLA	Valf Regulated Lead Acid
Wh	Watt Saat
°C	Sıcaklık (Santigrat Derece)
Ω	Direnç (Ohm)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. 12 V kurşun-asit otomobil aküsü genel görünümü.....	9
Şekil 2.2. 12 V kurşun-asit otomobil aküsü temel bileşenleri	10
Şekil 2.3. Pozitif plaka ve negatif plaka grupları.....	12
Şekil 2.4. Izgara, pozitif plaka, negatif plaka	13
Şekil 2.5. Hidrometre ve dijital yoğunluk ölçer.....	14
Şekil 2.6. Kurşun-asit akü polietilen yapıli seperatör	15
Şekil 2.7. Pozitif kutup başı, negatif kutup başı	16
Şekil 2.8. Akü kutu ve kapağı.....	17
Şekil 2.9. Akü gaz kapağı (buşon).....	17
Şekil 2.10. İndikatör (gösterge)	18
Şekil 2.11. Akü hücresi deşarj ve şarj durumu reaksiyonları	21
Şekil 2.12. Farklı boyut ve kapasitedeki starter aküler	22
Şekil 2.13. a) Stasyoner akü b) Traksiyoner akü	23
Şekil 2.14. DC güç kaynağı ile şarj edilen akü bağlantısı	25
Şekil 2.15. Hioki 3554 iç direnç ölçüm cihazı.....	26
Şekil 2.16. Yoğunluk ölçer	27
Şekil 2.17. Sülfatlaşmış akü pozitif plakaları	31
Şekil 2.18. Midronics MDX-500 akü test cihazı	32
Şekil 2.19. Digatron ve bitrode marka redresörler.....	33
Şekil 3.1. NI-9205 veri toplama kartı (akım ölçümü için).....	43
Şekil 3.2. Akım ölçüm sistemi bağlantı şeması	44
Şekil 3.3. NI-9221 veri toplama kartı	45
Şekil 3.4. Gerilim ölçüm sistemi bağlantı şeması.....	45
Şekil 3.5. NI-9213 veri toplama kartı	46
Şekil 3.6. Sıcaklık ölçüm sistemi bağlantı şeması	47
Şekil 3.7. Kurşun-asit hücre voltajına karşı asit yoğunluğu grafiğı.....	48
Şekil 3.8. Asit yoğunluğuna göre sensör çıkış voltajı.....	49
Şekil 3.9. Yoğunluk ölçüm sensörü tasarımı	49
Şekil 3.10. NI-9205 veri toplama kartı (yoğunluk ölçümü için)	50
Şekil 3.11. Yoğunluk ölçüm sistemi bağlantı şeması	51
Şekil 3.12. Yazılım topolojisi	52
Şekil 3.13. Blok diyagram örnek tasarım	52
Şekil 3.14. Ana sayfa	53
Şekil 3.15. Gerilim ölçüm sayfası.....	54
Şekil 3.16. Akım ölçüm sayfası	54
Şekil 3.17. Sıcaklık ölçüm sayfası	55
Şekil 3.18. Yoğunluk ölçüm sayfası	55
Şekil 3.19. Akü test havuzu takip sayfası	56
Şekil 3.20. Test sayfaları ölçüm bölümleri	58
Şekil 3.21. Test sistemi ana bileşenleri	59
Şekil 3.22. Bu tez kapsamında kullanılan akü test bağlantı şeması.....	59
Şekil 3.23. Geliştirilen sistem, ölçüm noktaları ve akü test havuzuna ilişkin görsel. 60	60
Şekil 4.1. Farklı kapasitedeki akülerin şarj testi karakteristiğı	62
Şekil 4.2. Örnek şarj testi uygulama sonucu.....	63
Şekil 4.3. Farklı kapasitedeki akülere ait kapasite test karakteristikleri	64
Şekil 4.4. Örnek kapasite testi uygulama sonucu	66
Şekil 4.5. Farklı CCA'ya sahip akülerin test karakteristiğı grafiğı.....	67

Şekil 4.6. Örnek CCA testi uygulama sonucu	68
Şekil 4.7. Çevrimsel dayanıklılık testi akım ve voltaj değişimleri	69
Şekil 4.8. Çevrimsel dayanıklılık testi çevrim sayısına bağlı voltaj değişimleri	70
Şekil 4.9. Örnek çevrim test sonucu	71
Şekil 4.10. Korozyon testi V_i-V_1 voltaj değişim grafiği	73
Şekil 4.11. Örnek korozyon test sonucu	74
Şekil 4.12. Yüksek akımla deşarj testi voltaj değişim grafiği.....	75
Şekil 4.13. Örnek şarj tutma testi sonucu	76
Şekil 4.14. Adım 1 akünün tam deşarjlı hale getirilmesi.....	77
Şekil 4.15. Örnek derin deşarj testi sonucu	78
Şekil 4. 16. Şarj kabulü testi Adım 1 voltaj akım grafiği	79
Şekil 4.17. Şarj kabulü testi karakteristik denklemin tanımlanması.....	80
Şekil 4.18. Örnek şarj kabulü test sonucu.....	81
Şekil 4.19. Vibrasyon direnci testi görseli	82
Şekil 4.20. Örnek vibrasyon test sonucu.....	82
Şekil 4.21. Su kaybı testi karakteristiği	84
Şekil 4.22. Örnek su kaybı test sonucu	85

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Akü malzeme bileşenleri.....	10
Tablo 2.2. Akü malzeme bileşenleri.....	11
Tablo 2.3. Araç cinslerine göre ortalama akü ağırlıkları ve kapasiteleri.....	22
Tablo 2.4. Tez çalışmasında kullanılan redresör modelleri.....	33
Tablo 3.1. Akü şarj yöntemleri.....	36
Tablo 3.2. Örnek kapasite test sonucu.....	37
Tablo 3.3. Örnek kapasite test sonucu.....	37
Tablo 3.4. Çevrimsel dayanıklılık seviyeleri.....	38
Tablo 3.5. Örnek çevrimsel dayanıklılık test sonucu	38
Tablo 3.6. Örnek korozyon test sonucu.....	39
Tablo 3.7. Şarj tutma seviyeleri.....	39
Tablo 3.8. Örnek şarj tutma test sonucu	39
Tablo 3.9. Örnek derin deşarj testi sonucu	40
Tablo 3.10. Örnek şarj kabulü testi sonucu	40
Tablo 3.11. Vibrasyon direnci seviyesi	41
Tablo 3.12. Örnek vibrasyon direnci testi sonucu.....	41
Tablo 3.13. Su kaybı seviyeleri	41
Tablo 3.14. Örnek su kaybı test sonucu	42
Tablo 3.15. Test başlatma ve bitirme adımları	60
Tablo 4.1. 60Ah, 80 Ah ve 90 Ah akülerin şarj kapasiteleri.....	62
Tablo 4.2. 65Ah, 75 Ah, 90Ah ve 100 Ah akülere ait U_{30s} değerleri.....	72
Tablo 4.3. 65Ah, 80 Ah, 100Ah ve 120 Ah akülere ait su kaybı hesap tablosu	84
Tablo 5.1. Mevcut test karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılan akü tipleri.....	86
Tablo 5.2. Elektriksel test karakteristiği inceleme sonuçları.....	87
Tablo 5.3. Mevcut durum ile geliştirilen sistemin test tahmin süreleri.....	88
Tablo 5.4. Testlere göre geliştirilen sistemin test tahmin başarıları.....	89

TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aőamasında bilgi ve tecrübesi ile bana destek olan, lisansüstü öğrenim hayatımın zorlu aşamalarında yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan, kendisini sekiz yıldır tanımaktan büyük onur duyduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sezai TAŞKIN'a, çalıőmalarım sırasında manevi desteğini her zaman hissettiğim eőim Burcu ACAR DEMİRCİ'ye ve tüm eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim. Bu çalıőmanın deneysel alt yapısının hazırlanmasında tüm imkanları kullanmama izin veren İnci GS Yuasa Akü San. ve Tic. A.Ő yönetimine, Ar-Ge Merkezi Müdürü Sibel ESERDAĞ'a, Proje ve Test Bölümü Yöneticisi Alper TURHAN'a, Ar-Ge Merkezi çalışma arkadaşlarım Hürkan ÇATALKAYA, Hasan HASSÜMER, Nurullah TUNCER, Sinan AKTAŐ ve Özgür ÇALIK'a teşekkür ederim.

Osman DEMİRCİ
Manisa, 2019

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Otomotiv Sektöründe Kullanılan Bataryalara Yönelik Otomatik Test, Analiz ve Raporlama Sistemi Geliştirilmesi

Osman DEMİRCİ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sezai TAŞKIN

2021 yılından itibaren CO₂ emisyonunun azaltılmasına yönelik yasal zorunluluklar bulunmaktadır. Otomotiv ana ve yan sanayi üreticileri, pazardaki sürekliliğini sağlamak ve diğer firmalarla olan rekabetine devam edebilmek için değişim sürecine uyum sağlamak zorundadır. Sürecin otomotiv sektörüne yansımaları, otomotiv akülerindeki elektriksel performans artış talebi olarak görülmektedir.

Bu tez çalışması ile otomotiv sektöründe kullanılan akülere yönelik otomatik test, analiz ve raporlama sistemi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sistem ile akülere uygulanan tüm elektriksel testler, veri toplama cihazları vasıtasıyla gerçekleştirilmiş, geliştirilen algoritmalar ile otomatik olarak analizler yapılabilmiş ve tüm değişkenler görsel kullanıcı ara yüzünden takip edilerek bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Bu işlemler için LabVIEW™ tabanlı bir kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir. Farklı kapasitedeki akülere ait test sonuçları analiz edilerek her test için ilgili standart çerçevesinde otomatik bir değerlendirme raporu elde edilmiştir. Böylece söz konusu veri toplama ve test analiz sistemi ile test sonuçlarının raporlanması ve çok uzun zaman gerektiren test sonuçlarının önceden tahmin edilmesi sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasının öncelikli amacı, akü performans laboratuvarlarında akülere uygulanan şarj, deşarj, kapasite gibi testlerin sonuçlarının analizlerinde karşılaşılan veri karmaşasının önüne geçmektir. Elde edilen test sonuçları tek bir rapor üzerinde özet tablolar ile gösterilerek test sorumlusuna inceleme kolaylığı ve zaman tasarrufu sağlayacaktır. Akülerin elektriksel testleri TS EN-50342-1:2016 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Akü elektriksel testlerine yönelik geliştirilen bu sistem, akü sektöründe elektriksel testlerin analizi ve yorumlanmasına farklı bir bakış açısı, zaman tasarrufu ve teknolojik gelişim sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Akü, TS EN-50342-1:2016 standardı, Veri toplama, Otomatik raporlama, LabVIEW™.

2019, 93 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Development of Automatic Test, Analysis and Reporting System for Batteries in Automotive Sector

Osman DEMIRCI

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Sezai TASKIN

After the 2021, there are legal requirements to reduce CO₂ emissions. Automotive main and sub-industry manufacturers have to adapt to the change process in order to ensure their continuity in the market and continue their competition with other companies. The reflection of the process to the automotive sector is increasing demand for electrical performance in automotive batteries.

In this project, it is aimed to develop an automatic test, analysis and reporting system for the batteries used in automotive sector. In this system, the results of all electrical tests applied to the batteries are measured by data acquisition devices. The results are automatically analyzed with developed algorithms.

The results are monitored online on a user-interface. The test results which have different capacity of the selected batteries are analyzed. Algorithms are developed for each test. Thanks to the data acquisition system and developed test analysis software, it is easy to report the test results automatically, interpret them by the user and predict the test results in advance.

The primary purpose of this thesis is to determine the charge, discharge, capacity, etc. performance tests of batteries. Hence, it is possible to avoid confusion of data encountered in the analysis of test results. The test results are shown in summary tables on a single report and provided the test supervisor with ease of examination and time-saving. Within the scope of this thesis, electrical tests of batteries are carried out in accordance with TS EN-50342-1: 2016 standard.

Keywords: Battery, TS EN-50342-1:2016 standard, Data acquisition, Automatic reporting, LabVIEW™.

2019, 93 pages

1.GİRİŞ

Aküler yaygın olarak motorlu araçlar, santraller, trenler, forklift, taşıma ve istifleme araçlarında enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte yeni nesil konvansiyonel ve mikro hibrit araçların elektriksel güç tüketimleri giderek artmaktadır. Bununla birlikte yüksek çevrim özelliğine sahip akülerin bu özellikteki araçlarda kullanımı kaçınılmazdır. Akülere uygulanan elektriksel performans testleri akülerin çevrim ömürlerinin tahmin edilmesinde büyük öneme sahiptir. Özellikle farklı tasarımlara ait akülerin elektriksel test sonuçlarının birbiri ile karşılaştırılmasında zorluklar yaşanmaktadır. Geliştirilecek otomatik test analiz ve raporlama sistemi ile yeni ürün geliştirme süreci hızlanacaktır. Aynı zamanda optimum tasarımın belirlenmesine harcanan zaman ve iş yükü azalacaktır. Bununla birlikte yeni ürün geliştirme maliyetleri azalacak ve verimlilik sağlanacaktır. Müşteriye geri dönüşler hızlanacağı için pazarın rekabetçiliğinde avantaj sağlanacaktır.

Ülkemizde otomotiv sektöründe kullanılan akülerin elektriksel performans testleri TS EN-50342-1:2016 standardında tanımlanmıştır. Bunun yanı sıra özellikle OEM(Original Equipment Manufacturer) müşterilerinin belirlemiş olduğu farklı elektriksel test standartları da bulunmaktadır. Akü elektriksel testlerinin başarısı ve testin gidişatı belli periyotlarda redresörlerden elde edilen aküye ait akım, gerilim ve sıcaklık gibi parametrelerin analizi ve yorumlanması ile sağlanmaktadır. Bu da beraberinde iş yükü ve zaman kaybına neden olmaktadır.

Özellikle akü üretimi yapan firmaların elektriksel performans laboratuvarı test alt yapılarında akü performansının belirlenmesinde elektriksel testlere yönelik kullanıcı dostu, kolay kullanılabilir ve kolay raporlanabilir bir veri toplama ve analiz sistemine rastlanmamıştır. Akü elektriksel test standartlarında yer alan ve akülere uygulanan çevrim testlerinin birçoğu aylarca sürebilmektedir. Geliştirilen sistem ile akülerin elektriksel performansı test başlangıcı ile test bitimine kadar geçen tüm zamanı kapsayacak şekilde sürekli takip edilecektir. Böylece tasarım kaynaklı hatalar önceden tespit edilip ürün geliştirme sürecine yönelik önlemler kolaylıkla alınabilecektir. Ayrıca farklı tasarımlara ait ölçüm verileri geliştirilen yazılım kullanılarak karşılaştırılacak ve uygun dizayn kısa sürede tespit edilecektir. Veri kayıt ve analizine imkân sunan bu sistem firma bilgi, birikim ve tecrübesinin

bilgisayar ortamında kayıt altında tutulmasını sağlayacaktır. Akü elektriksel testlerine yönelik geliştirilecek bu sistem akü sektörüne yönelik farklı bir bakış açısı ve teknolojik gelişim sağlayacaktır.

Bu kapsamda literatürde farklı akü teknolojilerine yönelik yapılan çeşitli test tahmin ve veri ölçüm sistemleri ile ilgili çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

1.1. Literatür Taraması

Salameh ve ark. (1992) kurşun asit akülerin matematiksel modellemesi konusunda çalışmışlardır. Matematiksel modelin temelini Thevenin batarya modeli oluşturmaktadır. Bu batarya modeline akünün self deşarj değişimi, sıcaklık değişimi ve iç direnç değişimi de ilave edilerek lineer bir model oluşturulmuştur. Doğrusal olmayan bu parametrelerin modele eklenmesi ile akünün elektro-kimyasal davranışı modellenmiştir. Matematiksel model verileri ile üretici firma verileri karşılaştırılarak matematiksel model gerçeğe yakınsanmakta ve optimize edilmektedir. Geliştirilen model ile yapılan testlerde akü 2 farklı çevrim testine tabi tutulmuştur. İlk çevrim testinde akü 13 A akım ile akü voltajı 10,5 V olana kadar deşarj edilmiştir. Daha sonra akü 13 A maksimum akım ile 15,8 V sabit gerilim limiti dikkate alınarak şarj edilip 0°C'lik ortamda 12 saat bekletilmiştir. Diğer çevrim testinde ise 13 A ile akü gerilimi 11.65 V olana kadar deşarj edilmiş ve daha sonra 13 A ile akü gerilimi 13 V olana kadar şarj edilmiştir. Devamında ise akü 12 saat 35°C'lik ortamda bekletilmiştir. Bu iki farklı test değerlendirildiğinde ilk çevrim testinde ortam sıcaklığına bağlı olarak akü yeteri kadar şarj olamamıştır. 2. çevrim testinde ise akü sıcak ortamda bekletildiğinden self deşarja 1. çevrimdekine göre daha fazla maruz kalmıştır. 2 farklı sıcaklık ve gerilim aralığında yapılan testler neticesinde matematiksel model ile teorik çalışmalar birbirine yakın değerler üretmiştir [1].

Garche ve ark. (2000) UPS (Uninterruptible Power Supply) sistemlerindeki bataryaların kullanım ömrünü artıracak bir batarya yönetim sistemi tasarımı üzerine çalışmışlardır. Bataryanın ömrünün tespitinde üretici verileri ile bataryadan harici bir veri ölçüm sistemi ile elde edilen veriler karşılaştırılmakta ve batarya yönetim sistemi vasıtasıyla batarya kullanım ömrünü artıracak kontrol parametreleri belirlenmektedir. Bu çalışmada veri toplama sistemi ile bataryaların şarj durumu (State of Charge-SoC) ve sağlık durumu (State of Health-SoH) belirlenmektedir. Geliştirdikleri batarya yönetim sisteminde bataryaların elektriksel kontrolü, termal

yönetimi ve güvenlik denetimi sağlanmaktadır. Batarya yönetim sistemi parametreleri, kullanılan batarya tipine göre optimize edilebildiğinden batarya ömrünü uzatmak bu sistem ile mümkündür. Batarya yönetim sistemi bataryaya ait gerilim ve sıcaklık verilerini kullanarak şarj kayıplarını hesaplamakta ve yaklaşık şarj durumunu tahmin etmektedir. Batarya şarj durumu ve sağlık durumunun tespitinde Kalman filtresi kullanılmıştır. Ayrıca bulanık mantık ve yapay sinir ağları kullanılarak da batarya şarj durumu ve sağlık durumu belirlenebilmektedir. Batarya yönetim sistemi ile UPS arasındaki haberleşme otomotivde yaygın olarak kullanılan CAN (Control Area Network) ile sağlanmaktadır [2].

Chatzakis ve ark. (2003) yeni bir batarya yönetim sistemi tasarımı konusunda çalışma yapmışlardır. Çalışmada mevcut batarya yönetim sistemleri ile geliştirmiş oldukları yeni batarya yönetim sistemi metodolojisi arasında karşılaştırma yapmışlardır. Önermiş oldukları yöntemin diğer sistemlere kıyasla avantajı hataya dayanıklı bir özellikte bataryaları korumasıdır. Geliştirilen batarya yönetim sisteminde her bir batarya hücresinde şarj dengeleme yapabilen, hücrelerin gerilim ve akım verilerini izleyen ve hücrelere koruma sağlayan akıllı batarya modülü vasıtasıyla kontrol sağlanmaktadır. Sisteme birden fazla batarya grubu bağlandığında yeni bir akıllı batarya modülü dahil edilmektedir. Tüm akıllı batarya modülleri ana modül ile haberleşmektedir. Akıllı batarya modülü saniyede minimum 6 veri seti elde edebildiği için aküde meydana gelen sorunlara hızlı tepki verebilecek niteliktedir [3].

Rakhmatov ve ark. (2003) çalışmalarında bilgisayarlarda kullanılan bataryaların ömür tahmini üzerine bir model geliştirmişlerdir. Önerilen modelde bilgisayarlarda kullanılan lityum-iyon bataryaların geliştirilen model ile ömrü tahmin edilmiş ve deneysel olarak tahmin doğrulanmıştır. Yapılan çalışmalarda yük altında ve yüksüz durumda batarya analitik modeli vasıtasıyla tahmin yapılmıştır. Model tabanlı benzetim çalışmalarında 2 farklı durum için birçok test yapmışlardır. İlk olarak 22 farklı test için sabit yük altında batarya ömrü tahmin hatası %10 olarak belirlenmiştir. İkinci deney grubunda ise 22 farklı değişken yük testinde batarya ömrü tahmin hatası %5 olarak tespit edilmiştir. Bu deneylere ek olarak gerçek bir bilgisayarın batarya paketi üzerinde 12 farklı sabit yük testi yapılmış ve maksimum ölçüm hatası %4 olarak belirlenmiştir. Bilgisayar üzerinde değişken yük altında

yapılan 21 farklı test sonucuna göre ise batarya ömrü tahmini %99 olarak ölçümlenmiştir [4].

Blanke ve ark. (2004) çalışmalarında elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan kurşun-asit akülerin sağlık durumu, şarj durumu ve marş basma gücünü belirlemek üzere empedans spektroskopisi verilerini analiz etmişlerdir. Empedans spektroskopisi ile şarj durumunun belirlenmesinde 10 Hz ile 5000 Hz aralığındaki frekanslar analiz edilmektedir. Bu frekans aralığında endüktif ve kapasitif özellikler ayrıştırılmaktadır. Kapasitif özellikteki bileşenler şarj durumu belirlenmesinde kullanılmaktadır. Marş basma gücünün belirlenmesinde akünün yüksek akım altındaki elektriksel modeli kullanılarak non-lineer davranıştaki bileşenleri de simüle edilmektedir. Akünün marş basma anındaki akım, sıcaklık ve gerilim bilgilerinden hareketle empedans ölçümü yapılmakta ve marş basma gücü empedans verileri kullanılarak hesaplanmaktadır. Akünün sağlık durumunun belirlenmesinde ise farklı yaşlandırma profilleri altında akünün empedans ölçüm verileri kayıt altına alınmıştır. Yaşlandırma testlerinde akünün her bir hücresine referans elektrot bağlanmıştır. Referans elektrot, pozitif plaka ve negatif plaka gerilimleri kayıt altına alınmıştır. Test sonuçlarına göre akünün farklı yaşlanma profillerindeki ömür değişiminin pozitif plaka kaynaklı olduğu görülmüştür. Empedans ölçümleri ile de bu farklı yaşlanma profillerindeki performans kayıpları belirlenmiştir [5].

Wenzl ve ark. (2005) çalışmalarında enerji depolama ihtiyacı olan sistemlerin tasarımında kritik teknik ve ticari kararlar almak için batarya ömrünün tahmin edilmesinin sisteme uygun düşük maliyetli bataryanın belirlenmesinde en önemli ölçüt olduğunu belirlemişlerdir. Genel anlamda doğru batarya ömrü tahmini için kullanıcı gereksinimlerinin, bataryanın çalışma koşullarının ve performans kayıplarının yer aldığı bir prosedür batarya modelinde yer almalıdır. Bu çalışmada ömür tahmininde 2 sorunun cevabı aranmaktadır: (i) Üretici tarafından belirlenen batarya ömrü nedir ve çalışma koşullarının değişiminin batarya ömrüne etkisi ne olur? (ii) Yeni bir malzeme bileşimine sahip bataryanın mevcut bataryalara göre kullanım ömrü nasıl değişmektedir? Çalışmada batarya ömür tahmininde bataryanın korozyona karşı direnci, sıcaklığın ve şarj koşullarının kullanım ömrüne etkisi gibi elektrokimyasal ve termal etkenler incelenmekte ve bu durum batarya modelinde stres faktör olarak adlandırılan lineer olmayan bir denklemle ifade edilmektedir [6].

Kutluay ve ark. (2005) telekom sektöründe kullanılan güç kaynaklarındaki kurşun-asit akülerin şarj durumunun tahmini ve online olarak görüntülenmesi amaçlı bir ölçüm sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde aküden anlık olarak ölçülen akım, gerilim ve sıcaklık verileri üretici verileri ile karşılaştırılarak akünün şarj durum (doluluk oranı) tahmini, %3 ile -%4 hata oranı ile tespit edilmiştir [7].

Schiffer ve ark. (2006) çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynaklarında ve otonom güç kaynaklarında kullanılan kurşun asit akülere yönelik ömür tahmini yapan bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen modelde kurşun-asit akülerin farklı çalışma koşullarına bağlı ömür değişimlerini incelemişlerdir. Modelde aküye ilişkin şarj sonu gerilimi, gazlanma süreleri ve maksimum deşarj oranı verileri kullanılarak sisteme uygun akü seçilmektedir. Amper-saat ağırlıkları metodu kullanılarak standartlarda yer alan çevrim testleri aküye uygulanmış ve ömür tahmini yapılmıştır. Akünün farklı yaşlanma profilleri altındaki durumu simülasyon ve gerçek testler ile doğrulanmıştır. Geliştirilen model yenilenebilir enerji kaynakları için ayrı, güç kaynakları için ayrı analiz edilerek iki farklı sistem için model parametreleri yeniden belirlenmiştir. Model incelendiğinde özellikle aküde meydana gelen bazı kimyasal reaksiyonlar (stratifikasyon gibi) ve farklı şarj stratejileri ömür tahminini karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle bu tip parametreleri lineer olmayan bir katsayı ile modele dahil etmişlerdir. Geliştirilen model farklı akü ihtiyacına sahip sistemler için bir model teşkil etmekte ve ayrıca seçilen sistemde kullanılan akünün ömür tahminini yapabilmektedir [8].

Lukic ve ark. (2008) enerji depolama sistemlerinin otomotiv uygulamalarındaki kullanımlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada farklı batarya teknolojileri, batarya izleme, koruma ve dengeleme sistemleri detaylı olarak ele alınmaktadır. Ayrıca ultrakapasitörler, volanlar ve yakıt hücreleri gibi diğer enerji depolama kaynakları da karşılaştırılmaktadır. Hibrit güç kaynakları ile de birden fazla enerji depolama sisteminin birbirine entegre çalışmasının üstün bir depolama aracı haline geleceğini öngörmektedirler [9].

Valenciano ve ark. (2009) çalışmalarında otomotiv sektöründe emisyonların azaltılmasına yönelik start-stop ve rejeneratif frenleme fonksiyonlarına sahip araçların yaygınlaşması ile kurşun-asit akülerden beklenen performans talebinin

artacağını öngörmektedirler. Yeni fonksiyonlara sahip bu araçlarda kullanılacak akülerin performansının belirlenmesinde farklı yaşlandırma profilleri ve çevrim testleri ile akü ömrü tahmin edilmektedir. Ayrıca farklı kurşun-asit akü teknolojilerindeki akü performansı ve çevrim süreleri arasındaki farklar araçlara uygun akü teknolojisinin seçiminde belirleyici bir parametredir. Standart kurşun-asit aküler ile ilgili farklı katkı maddelerinin eklendiği tasarımlarda asit stratifikasyonun azaltılarak akü ömrünün artırılması hedeflenmiştir. Fakat en iyi çevrim ömrünü sağlayacak teknolojinin VRLA (Valf Regulated Lead Acid) aküler olduğunu test verileri ile doğrulamışlardır. VRLA aküler ile ilgili 2 farklı teknolojidaki akü karşılaştırılmıştır. Spiral sargılı tasarımın yüksek güç gerektiren araçlara daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Düz plaka tasarımında ise yüksek enerji ihtiyacı duyan yüksek sınıftaki araçlarda kullanımın daha uygun olacağı belirlenmiştir. Her iki VRLA teknolojisindeki aküde su kayıpları yüksek olduğu için akünün aracın motor kısmının dışındaki bir noktada yer almasının daha doğru olacağını önermişlerdir [10].

Seong Kim ve ark. (2009) yapmış oldukları çalışmada otomotivde kullanılan 12V kurşun-asit akünün yaşlanmaya bağlı olarak kapasite kaybını modellemişler ve gerçek ölçüm verileri ile karşılaştırmışlardır. Model tasarımında akünün elektrokimyasal değişiminin yanı sıra korozyona bağlı yaşlanma verilerini de kullanmışlardır. Modelleme verilerini doğrulamak için 68 Ah kapasitedeki bir akü kullanılmıştır. Çevrim testleri, 75 °C'de şartlandırılmış ortamda sabit akımla deşarj ve sabit gerilimle şarj işleminden oluşmaktadır. Akü, kapasitesinin 3'te biri (C/3) oranında sabit akımla her 40 çevrim sonunda 25 °C ortamda akü gerilimi 10,5 V olana kadar deşarj edilmiştir. Dana sonra 25 °C ortamda sabit gerilim ile şarj işlemi akımın 10 mA değerine düştüğü anda sonlandırılmıştır. Akünün her 40 çevrim sonundaki kalan kapasitesi %100 ile %85 aralığında değişiklik göstermiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak akünün yaşlanmaya bağlı kapasite kaybı modellenmiş ve gerçek ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır [11].

Cugnet ve ark. (2010) kurşun-asit akülerin iç dirençleri ve marş basma kapasitelerinin tahmini konularında çalışmışlardır. Çalışmalarında akünün iç direnç değişimine bağlı olarak marş basma gücünü tahmin etmişlerdir. Akünün iç direncinin tahmininde FOM (Fractional-Order Model) kullanılmıştır. Bu modelde yüksek

frekans bileşenleri tespit edilerek akünün iç direncinin tahmini yapılmaktadır. Model sonuçları ile iç direnç ölçüm sonuçları karşılaştırılmaktadır. İç direnç algoritma ile optimize edilerek marş basma gücü tahmin edilmektedir. İç direnç verileri değerlendirildiğinde en iyi ölçümün sinyalin yüksek frekans bileşenlerinin kullanılması durumunda mümkün olduğu tespit edilmiştir. Akü direncinin yaşlanmaya bağlı olarak değişeceği de bu çalışmada ön görülmüş ve farklı doluluk oranındaki akülerde testler tekrarlanmıştır. Farklı test çalışmaları ile algoritmayı iyileştirmişler ve son durumda iç direnci %99 doğrulukta tespit etmişlerdir [12].

Schaeck ve ark. (2011) çalışmalarında mikro hibrit elektrikli araçlarda kurşun-asit akülerin kullanımları ile ilgili çalışmalarından bahsetmişlerdir. Mikro hibrit araçlarda start-stop teknolojisi ve rejeneratif frenleme teknolojisi ile düşük emisyon gazı salınımı ve enerji verimliliği hedeflenmiştir. Frenleme esnasında oluşan enerjinin standart kurşun-asit akü üzerinde verimli bir şekilde depolanamayacağı ön görülmüştür. Bu nedenle daha yüksek dinamik şarj kabulüne sahip VRLA (Valf Regulated Lead Acid) aküler mikro hibrit araçlarda kullanılmıştır. 90 Ah kapasitedeki VRLA teknolojiye sahip akü araç üzerinde farklı bölgelerde ve farklı yük altında test edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde akü uzun süreli olarak kullanılmadığı durumda akünün kimyasal yapısında geri dönüşü olmayan bazı bozulmalar meydana gelmekte ve akü ömrü kısalmaktadır. Akü bagaja monte edildiği durumda ise daha az su kaybetmiştir. Standart kurşun asit akülere göre VRLA akülerinin derin deşarja dayanımları daha yüksek olduğu ve mikro hibrit araçlarda kullanımlarının daha uygun olacağı ön görülmüştür [13].

Dufo-López ve ark. (2014) çalışmalarında bağımsız fotovoltaik sistemin tüm bileşenlerini aynı anda ele alarak kurşun-asit akülerin kullanım ömürlerinin tahmini konusunda çeşitli simülasyon ve optimizasyon yöntemlerinden bahsetmişlerdir. İki farklı fotovoltaik sistemi ele alarak kurşun-asit akülerin kullanım ömrünü diğer yöntemler ile karşılaştırmışlardır [14].

Bu tez çalışması ile otomotiv sektöründe kullanılan bataryalara yönelik veri toplama ve otomatik test analiz sistemi geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu ölçüm sistemi ile bataryalara uygulanan tüm elektriksel test sonuçları geliştirilecek algoritma ile otomatik olarak analiz edilecek ve test raporu oluşturulacaktır. Tasarlanacak ölçüm sistemi ile bataryalardan elde edilecek elektriksel parametreler

veri toplama cihazları aracılığıyla elde edilecektir. Geliştirilecek görsel tabanlı kullanıcı ara yüzü ile sonuçlar anlık olarak bilgisayar üzerinden takip edilebilecektir. Bu veri toplama ve test analiz sistemi ile test sonuçlarının raporlanması ve kullanıcı tarafından yorumlanması kolaylaşacaktır.

Özellikle akü elektriksel performans laboratuvarlarında her akü tipi için özel olarak uygulanan şarj, deşarj, kapasite vb. test sonuçlarındaki veri karmaşasının önüne geçilecektir. Test sonuçları tek bir rapor üzerinde özet tablolar ile gösterilebilecektir. Bu yönüyle proje çıktısı, test sorumlularına zaman tasarrufu sağlayacak nitelikte olacaktır.

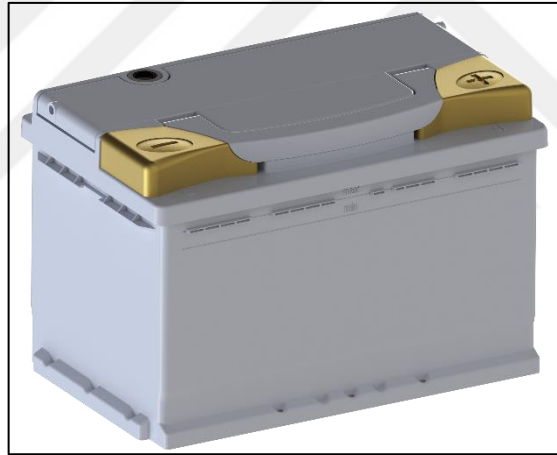


2. GENEL BİLGİLER VE TANIMLAMALAR

2.1. Akünün Tanımı

Aküler elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan ve üzerine elektriksel yük bağlandığı zaman bu enerjiyi tekrar elektrik enerjisine çevirebilen elektro kimyasal statik bir elemandır.

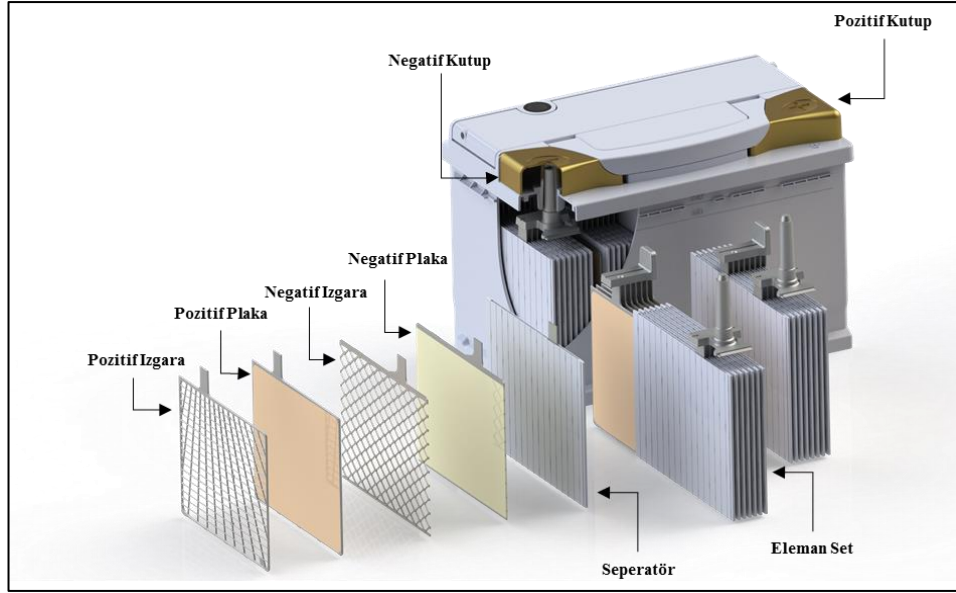
Akülerin motorlu araçlar, endüstriyel yük taşıma araçları ve gemilerdeki esas görevi; motorun ilk hareketi sırasında marş motorunu (doğru akım motorunu) çalıştıracak yüksek akımı sağlamaktır. Akülerde elektrik enerjisi motor devrinin yüksek ve elektrik sarfiyatının az olduğu zamanlarda kimyasal enerji şeklinde depolanmaktadır. Buna karşın elektrik sarfiyatının yüksek ve şarj akımının düşük olduğu veya şarj sisteminin çalışmadığı durumlarda araç içinde yer alan elektrikli sistemlere enerji sağlamaktadır.



Şekil 2.1. 12 V kurşun-asit otomobil aküsü genel görünümü

Aküler kullanılan elektrolitin özelliğine bağlı olarak bazlı veya asitli olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Bu bölümde kurşun asit kimyasındaki akülerin temel bileşenleri ve kullanım alanları konularında bilgi verilmektedir.

12 V kurşun asit otomobil aküsünün iç yapısı ve malzeme bileşenleri Şekil 2.2'de yer almaktadır.



Şekil 2.2. 12 V kurşun-asit otomobil aküsü temel bileşenleri

2.2. Akülerin Yapısı ve Temel Bileşenleri

Kurşun-asit aküler iki farklı bileşenden oluşmaktadırlar. Bu bileşenler elektrot ve elektrolittir. Elektrot olarak kurşun ve farklı katkı maddeli bileşenler, elektrolit olarak ise belli bir yoğunlukta seyreltilmiş sülfürik asit çözeltisi kullanılmaktadır. Akü kapasitesinin büyüklüğüne bağlı olarak elektrotların kalınlığı, genişliği ve alaşım bileşimi değişmektedir.

Tablo 2.1’de aküyü oluşturan malzemelerin örnek bir tasarımdaki yüzdesel oranları verilmiştir.

Tablo 2.1. Akü malzeme bileşenleri

12V - 45Ah - 250A Otomobil Aküsü	% Bileşim Oranı
Kurşun İçeren Malzemeler	63,9
Polipropilen İçeren Malzemeler	5,0
Sülfürik Asit Çözeltisi (H ₂ SO ₄)	28,6
Seperatörler (PP, PVC, Selüloz)	2,5

Kurşun asit aküde bir hücre içinde bulunan elektrotların kapasite ve büyüklükleri ne kadar olursa olsun voltajı değişmez. Kimyası gereği pozitif ve negatif plaka karşılıklı olarak yerleştirildiğinde 2 V potansiyele sahip olmaktadır.

Dolayısıyla değişik voltajlarda akü üretilmek istenildiğinde, 2V'luk hücreler birbirlerine seri bağlanmaktadır. Otomotivde kullanılan aküler 6 hücreden oluşmaktadır. Bu aküler küçük boyutlu oldukları için genelde hücreler aynı kutu içinde kurşun alaşımli köprülerle birbirlerine bağlanırlar. Otomobil aküleri 25 Ah kapasiteden başlayarak 240 Ah kadar farklı kapasitelerde üretilmektedirler.

Endüstriyel alanlarda özellikle forklift ve yük kaldırma araçlarında kullanılan aküler ise 2V'luk hücrelerden oluşmaktadır. Kullanım alanına bağlı olarak 1500 Ah kapasiteye kadar hücreler üretilmektedir. Kullanıcının ihtiyacı doğrultusunda 2V'luk hücreler seri bağlanarak 12 V, 24 V, 48 V veya 80 V olarak paketlenmektedir.

Tablo 2.2'de örnek bir aküde yer alan kurşun ve kurşun bileşimli maddelerin oranları yer almaktadır.

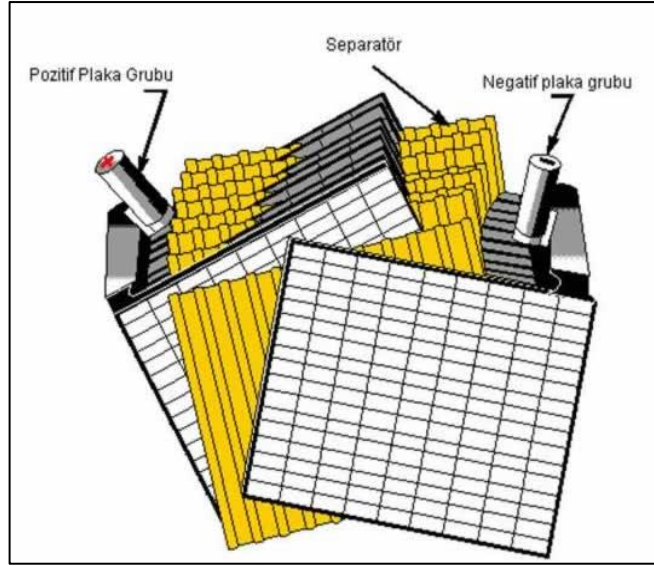
Tablo 2.2. Akü malzeme bileşenleri

Izgara, Kutup Başları ve Bağlantı Köprüleri		44%
Pb	96-98%	
Sb	2-4%	
Ca	<0,5%	
Aktif Madde		56%
PbSO ₄	60%	
PbO (PbO ₂)	19%	
Pb	21%	
TOPLAM		100%

2.2.1. Plakalar

Kurşun asit kimyasında bir aküyü oluşturan ve üzerinde elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan plakalar pozitif plaka ve negatif plaka olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Aküde yer alan pozitif ve negatif plakalarda kurşun, kurşun antimon alaşımları, kurşun kalsiyum alaşımları, kurşun oksitler, plaka gözenek yapısını artırıcı ve sertleştirici katkı maddeleri kullanılmaktadır.

Kurşun asit akülerde For (foure) tipi olarak adlandırılan plaka kullanılmaktadır. Negatif ve pozitif tip plakalar iki kısımdan oluşur: (i) plaka ızgaraları, (ii) aktif maddedir [2].



Şekil 2.3. Pozitif plaka ve negatif plaka grupları

2.2.1.1. Plaka Izgaraları ve Aktif Madde

Akü içerisinde asitle birlikte kimyasal reaksiyon oluşturarak, akünün kapasitesini ya da marş gücünü belirleyen ve çeşitli kimyasalların karışımından meydana gelen pasta aktif madde olarak adlandırılmaktadır. Izgara, aktif maddenin yani kurşun monoksit pastasının akü içerisinde dağılmasını engellemek için kullanılan ve plakaların iskeletini oluşturan malzemedir. Kurşun ızgaralar kalsiyum yapılı veya selenyum yapılı olarak imal edilirler.

Aktif madde hamuru, ızgaraya mekanik olarak (pres kullanılarak) aktarılır. Daha sonra üzerine aktif madde sıvanmış plaka formasyon şarjı olarak tabir edilen ilk şarj işlemine tabi tutulur. Formasyon şarjı sonunda ızgara ve aktif madde elektriksel olarak iletken durumuna geçer ve elektrik akımının iletimi ve depolanması sağlanır.

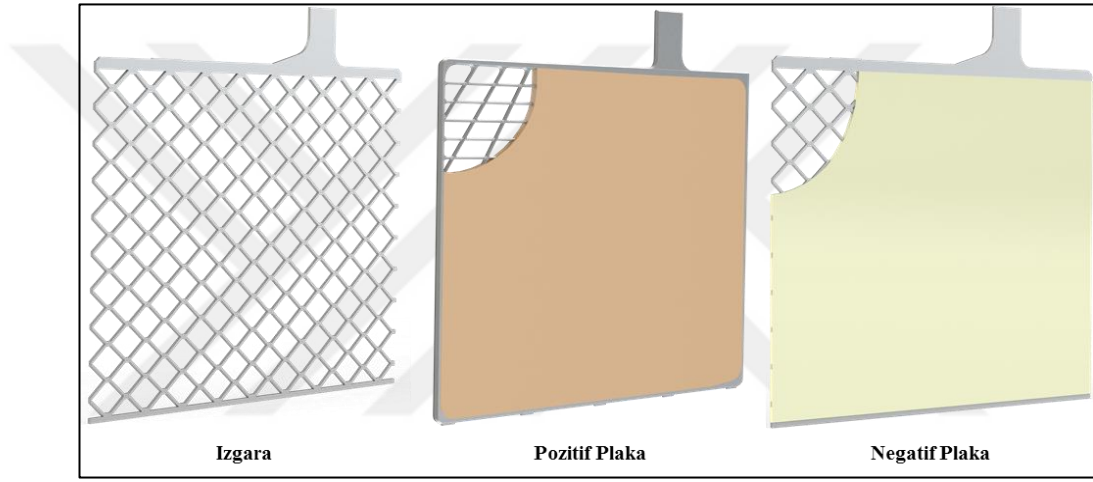
Izgaralar kullanılacak aküden beklenen kapasite talebi ve marş basma akımı ihtiyacına göre farklı kalınlıkta üretilirler. Hafif ve ince ızgaralar genellikle kısa zamanda yüksek akım talebini karşılayacak akülerde kullanılır. Düşük deşarj akımlarına ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılacak akülerde ise kalın ızgaralar kullanılmaktadır.

2.2.1.2. Pozitif Plaka

Pozitif plakalarda kullanılan aktif madde kurşun peroksit (PbO_2) içermektedir. Pozitif plaka ızgara ve üzerine sıvanan kurşun peroksitten katkılı hamurdan oluşmaktadır. Pozitif plaka rengi, kurşun peroksidin kimyasal yapısı gereği koyu kahvedir.

2.2.1.3. Negatif Plaka

Negatif plakada aktif madde olarak saf kurşun (Pb) kullanılmaktadır. Negatif plaka, ızgara ve üzerine sıvanan saf kurşundan oluşur. Negatif plaka rengi, kurşundan dolayı gridir.



Şekil 2.4. Izgara, pozitif plaka, negatif plaka

2.2.2. Elektrolit

Pozitif ve negatif elektrotların içine batırıldığı iyonları (+ ve – yükleri) taşıyan sıvı elektrolit olarak adlandırılmaktadır. Akü elektroliti saf su ile sulandırılmış sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisidir. Kurşun asit akülerde akü tam şarjlı olduğunda elektrolit yoğunluğu $1,260 \text{ gr/cm}^3$ ile $1,290 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğu aralığında değişmektedir. $1,260 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluktaki elektrolit %65 saf su ve %35 sülfürik asitten meydana gelirken, $1,290 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluktaki elektrolit %62 saf su ve %38 sülfürik asitten oluşur.

Plakaların aktif maddesinde bulunan sülfat bileşiminin oranına göre aküye ilk konulacak elektrolitin yoğunluğu değişmektedir. Diğer bir değişle plakaların kimyasal yapısına bağlı olarak formasyon şarjı öncesinde aküye eklenecek elektrolit yoğunluğu değişmektedir.

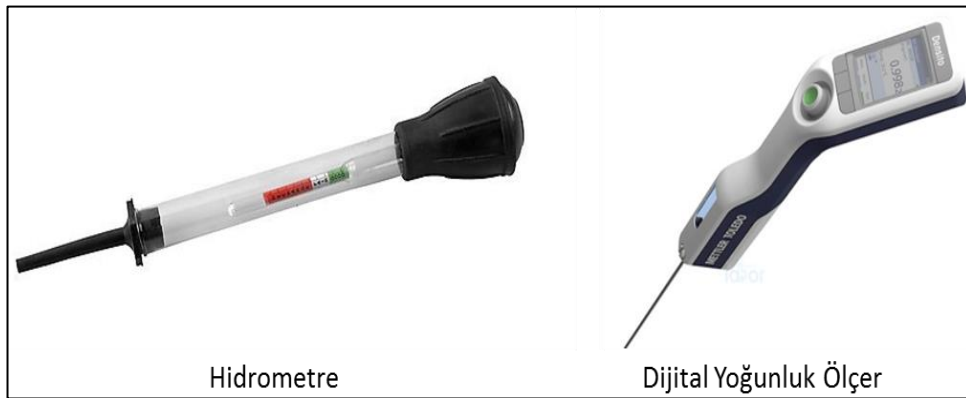
Genellikle ilk şarj öncesi 1,225 gr/cm³ ve 1,235 gr/cm³ yoğunluğuna sahip sülfürik asit çözeltisi aküye ilave edilir. Elektrolit yoğunluğu, birim elektrolit hacminin ağırlığı olarak adlandırılmaktadır ve hidrometre ile ölçülmektedir. Yoğunluk yerine *bome* deyimi Türkiye’de yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel anlamda aynı şeyi ifade ederler fakat sayısal olarak farklı değerler ile ifade edilirler. Aşağıdaki eşitlikte *bome* ile elektrolit yoğunluğunun birbirine dönüşüm formülü yer almaktadır.

$$B_d = \frac{144,38(d-1)}{d} \quad (2.1)$$

$d = \text{Elektrolit yoğunluğu (g/cm}^3\text{)}$

$B_d = \text{Bome derecesi}$

Yüksek elektrolit yoğunluğuna sahip aküler daha yüksek marş basma akımı ve voltaja sahip olurlar. Ancak yüksek elektrolit yoğunluğu özellikle negatif kutuptaki süngerimsi kurşunu çözerek plakaların kısa sürede yıpranmasına neden olmaktadır. Çok düşük elektrolit yoğunluğuna sahip aküler ise akü voltajı ve marş basma gücünün düşmesine neden olduğu gibi kapasite içinde daha fazla hacimde elektrolit gerektirir. Bu ve bunun gibi nedenlerle, elektrolit yoğunluğunun ve miktarının optimum sınırlar içinde olması akü ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir.

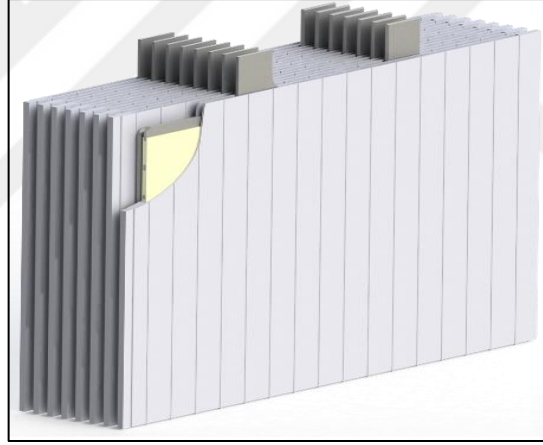


Şekil 2.5. Hidrometre ve dijital yoğunluk ölçer

2.2.3. Seperatör

Akülerde pozitif ve negatif plakalar arasına ayırıcı olarak yerleştirilen ve genellikle polietilen yapılı olan malzemeler seperatör olarak adlandırılır. Seperatörler, plakaları mekaniksel olarak birbirinden ayırmak ve herhangi bir temasa izin vermemek için kullanılmaktadır. Seperatörlerin pozitif ve negatif plakaları birbirinden mekaniksel olarak ayırmış olması yeterli değildir. Aynı zamanda elektriği taşıyan iyonların geçişine engel olmamalı ve plakalar kadar kullanım ömrüne sahip olmaları gerekmektedir.

Seperatör kalitesi; iç direnç, elektroliti emme, porozite ve mekanik mukavemet gibi özelliklerin testi ile belirlenmektedir. PVC (polivinil klorür), kâğıt, kauçuk, cam elyafı gibi değişik malzemelerden yapılan seperatörler vardır. Yaygın olarak Şekil 2.6'da gösterilen zarf tipi polietilen seperatörler kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. Kurşun-asit akü polietilen yapılı seperatör

2.2.4. Kutup Başları

Akülerden elektrik enerjisi çekilmesi ve şarj edilmesi için pozitif ve negatif olarak adlandırılan iki farklı çıkış vardır.

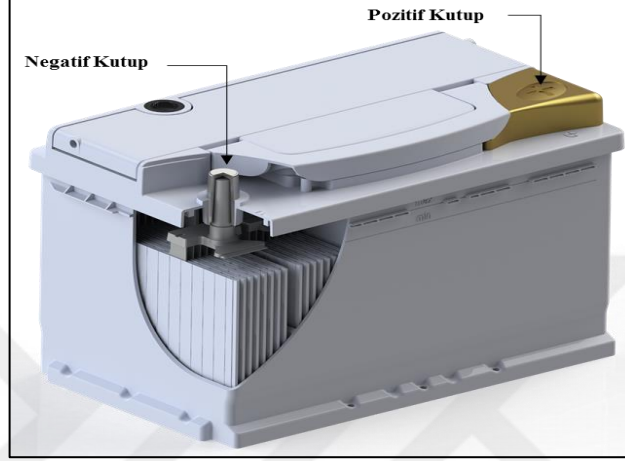
2.2.4.1. Pozitif Kutup

Pozitif plakaların bölmelerde bir araya getirilerek köprüler vasıtasıyla birleştirilip akünün kapak üzerindeki pozitif çıkış yapıldığı noktaya pozitif kutup denir. Genellikle yanlış kablo bağlantısını önlemek için daha kalın yapılmış ya da + ile işaretlenmiştir.

2.2.4.2. Negatif Kutup

Negatif plakaların bölmelerde bir araya gelerek köprüler vasıtasıyla birleştirilip akünün kapak üzerindeki negatif çıkış noktası olarak adlandırılan bölümüne denir. Genellikle daha ince yapılıdır ve – ile işaretlenmiştir.

Şekil 2.7’de akü kutup başlarına ilişkin görsel verilmiştir.



Şekil 2.7. Pozitif kutup başı, negatif kutup başı

2.2.5. Kutu ve Kapaklar

Akü kutu ve kapakları sert ebonit veya plastik türü malzemelerden enjeksiyon veya presleme yöntemi ile üretilirler. Otomobil akülerinde polipropilen kutu ve kapaklar daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Akü kutu ve kapağı yeterli yalıtkanlığı sağlamalı, elektroliti sızdırmamalıdır. Uzun süre farklı ortam koşullarında mekanik ve kimyasal özelliklerini koruyabilmelidir. Ebonit kapaklar akü boyutuna ve müşteri talebine göre dizayn edilirler.

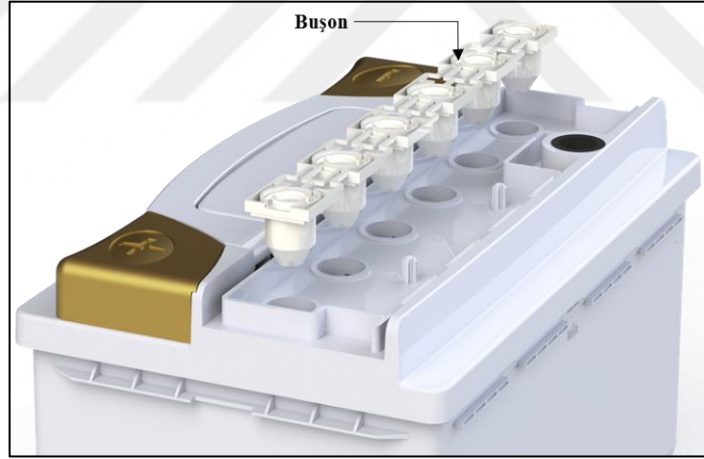
Günümüzde genellikle birden fazla hücreli kutular için tek bir kapak kullanılmaktadır. Çok büyük kapasiteli akülerde ise her bir hücre için ayrı bir kapak bulunmaktadır.



Şekil 2.8. Akü kutu ve kapağı

2.2.6. Gaz Kapakları (Buşonlar)

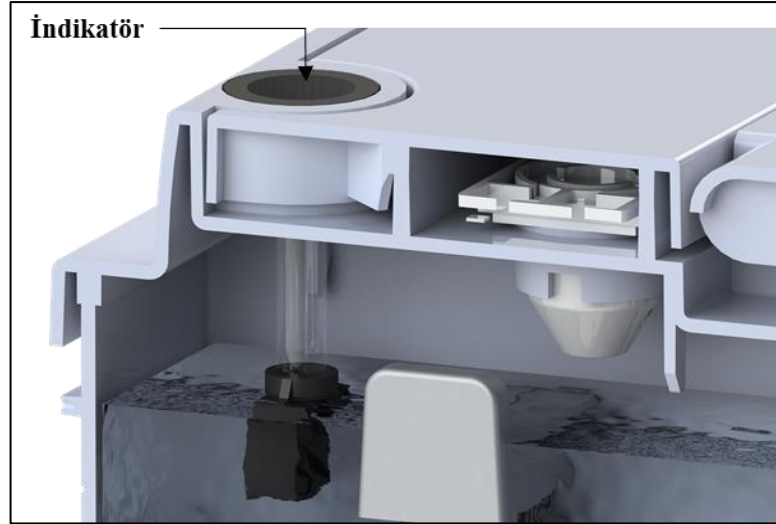
Kurşun-asit akülerin çalışması esnasında yani şarj ve deşarj olduklarında belli bir miktarda H_2 ve O_2 gazı açığa çıkarılırlar. Çıkan bu gazların hücre içindeki basıncı belirli bir seviyenin üzerine çıkarmaması gerekir. Aksi takdirde aşırı basınç sonucu akü şişebilir ve patlayabilir. Oluşan bu gazların dışarıya çıkışını sağlayan delikli kapaklar buşon olarak adlandırılmaktadır. Buşon kullanımının temel amacı gazın çıkışının sağlanmasıyla birlikte sıvı elektrolit kaçışının engellenmesidir.



Şekil 2.9. Akü gaz kapağı (buşon)

2.2.7. İndikatör (Gösterge)

İndikatör akünün elektrolit yoğunluğuna göre şarj durumunu gösteren gösterge olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.10'da indikatöre ait görsel yer almaktadır.

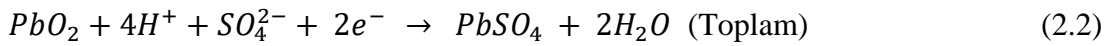
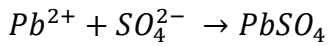
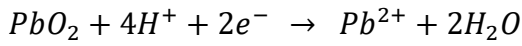


Şekil 2.10. İndikatör (gösterge)

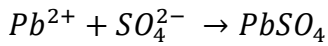
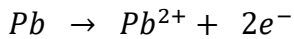
2.3. Akülerin Çalışma Prensibi

Kurşun asit akülerde elektrot olarak kurşun yapılı pozitif ve negatif plaka, elektrolit olarak ise belli bir yoğunlukta olan sülfürik asit çözeltisi kullanılmaktadır. Aküde yer alan plakalar şarjlı iken, pozitif elektrotta reaksiyona girmeye hazır kurşun peroksit (PbO_2), negatif elektrotta ise süngerimsi kurşun bulunmaktadır. Deşarjlı bir aküde pozitif ve negatif elektrotlar kurşun sülfat ($PbSO_4$) tabakası ile kaplanır.

Deşarj sırasında pozitif (+) elektrotta oluşan reaksiyon aşağıdaki gibidir.



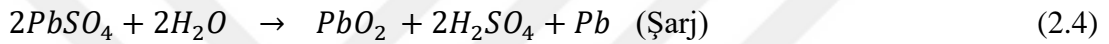
Deşarj sırasında negatif (-) elektrotta oluşan reaksiyon aşağıdaki gibidir.



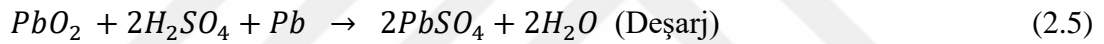
Pozitif ve negatif elektrotta meydana gelen kimyasal reaksiyonlardan görüleceği üzere deşarj reaksiyonu sonucunda kurşun ve sülfat iyonları kurşun sülfata dönüşür. Yani deşarj esnasında metalik kurşun (Pb) kurşun sülfata (PbSO₄) yükseltgenir. Kurşun peroksit (PbO₂) ise kurşun sülfata (PbSO₄) indirgenir. Pozitif elektrotta bu iyonlara ek olarak su açığa çıkmaktadır.

Deşarj anında meydana gelen kimyasal reaksiyonların tersi şarj reaksiyonudur. Deşarjlı bir akünün şarj reaksiyonuna dönüşebilmesi için dışarıdan elektrik enerjisi ile şarj edilmesi gerekmektedir. Aşağıda şarj ve deşarj anında aküde meydana gelen kimyasal reaksiyonların toplamı yer almaktadır.

Şarj esnasında oluşan kimyasal dönüşüm;



Deşarj esnasında oluşan kimyasal dönüşüm;



Akü hücresinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlardan da anlaşılacağı üzere kurşun asit akülerde hücre gerilimi, sülfürik asit konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Bir hücrenin toplam gerilimi, pozitif elektrot gerilimi ile negatif elektrot gerilimi farkına eşittir. Pozitif elektrotun gerilimi (+), negatif elektrotun gerilimi ise (-) işaretlidir. Elektrotların cinsine ve elektrolit türüne bağlı olarak hücre gerilimi değişmektedir. Bir kurşun asit hücresindeki teorik gerilim hesabı aşağıdaki gibidir.

$$V_h = V_p + V_n = 1,74 - (-0,27) \cong 2 \text{ V} \quad (2.6)$$

V_h : Hücre gerilimi, V_p : Pozitif plaka gerilimi, V_n : Negatif plaka gerilimi,

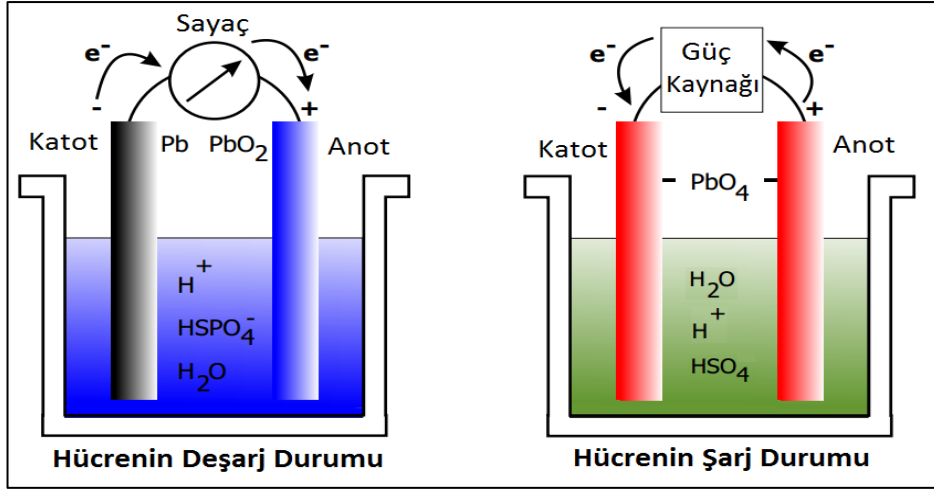
Standart olarak bir kurşun asit hücresinin 2 V potansiyele sahip olduğu kabul edilmektedir. Fakat kullanılan elektrolitin yoğunluğuna bağlı olarak 2,05 V – 2,15 V aralığında değişmektedir. Otomobil sektöründe yaygın olarak 6 V ve 12 V olarak tabir edilen 3 veya 6 hücreden oluşan kurşun asit aküler kullanılmaktadır.

Tamamı deşarjlı yani %0 SoC'a sahip bir aküde hücre voltajı minimum değeri 1,75 V olarak kabul edilmektedir. Tam deşarjlı bir akü için minimum voltaj değeri çekilen akıma bağılı olarak değışmektedir. Deşarj sonunda plakalarda yer alan kimyasal enerjinin tamamı elektrik enerjisine dönüşmez. Aküden elde edilecek elektrik enerjisi deşarj akımına bağılı olarak değışmektedir. Deşarj akımı arttıkça birim zamanda aküden elde edilecek efektif kapasite azalmaktadır.

Aküde deşarj reaksiyonu ile elektrik enerjisine dönüşen toplam enerji miktarı kapasite olarak adlandırılmaktadır. Kurşun asit akülerde kapasite, elektrotların özelliklerine, aktif maddeye, elektrolit yoğunluğuna, aktif maddenin dönüşüm oranına, deşarj akımının değeri ve elektrolit sıcaklığına bağılı olarak değışir. Bunun yanı sıra aktif maddenin yüzey alanı ve yapısının gözenekli olup olmaması da kapasiteyi önemli ölçüde etkilemektedir.

Otomobil akülerinde %100 deşarjlı bir akü için belirlenen minimum hücre gerilimi 1,75 V olarak kabul edilmiştir. Bu kabulün nedeni, akünün yeniden kimyasal yapısı bozulmadan şarj olabilmesidir. Akü nominal kapasitenin yirmide biri bir akımla yapılan deşarj edilirken 1,75 V / hücreye kadar olan gerilimde kurşun sülfat ($PbSO_4$) tanecikleri küçüktür. Bu gerilimin daha altına inilirse kurşun sülfat taneleri büyümektedir. Bu da beraberinde $PbSO_4$ tanelerinin tekrar şarj edilmesini zorlaştıracak ve akü kapasite kaybedecektir.

Yukarıda yer alan açıklamalar dikkate alındığında hücre voltajının 1,75 voltun altına düşmesi, reaksiyona girecek aktif maddenin tamamının elektrik enerjisine dönüştüğü anlamına gelmez. Ancak kalan aktif maddenin üzeri kurşun sülfat ($PbSO_4$) taneleri ile kaplandığından akünün gerilimi hızla düşer. Şekil 2.11'de akü hücresinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır [15].



Şekil 2.11. Akü hücresi deşarj ve şarj durumu reaksiyonları

2.4. Akü Çeşitleri

Aküler kurşun asit, nikel kadmiyum, nikel demir gibi kullanılan malzemelerin cinsine göre sınıflara ayrılmaktadır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan akü tipi kurşun asit aküdür. Kurşun asit aküler sulu ve kuru tip olarak ikiye ayrılmaktadır.

Sulu aküler, yaygın olarak otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Otomotiv aküleri tam kapalı ve buşonları açılabilen diye ikiye ayrılmaktadır. Bu iki tip akünün kimyasal yapısı aynıdır. Buşonları açılabilen akülerin tek farkı kullanıma bağlı olarak saf su ilavesi yapılabilmektedir. Bu anlamda tam kapalı aküler bakımsız, buşonları açılabilen aküler de bakımlı akü olarak adlandırılırlar. Sulu aküler, otomotiv sektörünün haricinde sabit tesislerde, forklift ve yük taşıma araçlarında da kullanılmaktadır. Stasyonier (sabit tesis) ve traksiyonier (forklift) aküleri sulu akülerdir. Buna karşın iç yapısı otomotivde kullanılan akülerden farklıdır.

Kuru akü (VRLA -Valve Regulated Lead Acid), sulu akülerden tamamen farklı bir tasarıma ve teknolojiye sahip aküdür. VRLA aküler sübap ayarlı kurşun asit aküler olarak adlandırılmaktadır. VRLA aküler AGM (Absorption Glass Mat) ve Jel aküler olarak ikiye ayrılırlar. VRLA akülerde elektrolit, kutu içerisinde sıvı formda olmadığı için asit taşması ve sızdırması olmamaktadır. Kimyasal yapısı gereği su kaybı ve gazlaşma minimumdur. Bu nedenle sulu akülere göre güvenlidir ve raf ömürleri yüksektir. Sabit tesisler, UPS'ler, tekneler ve santrallerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

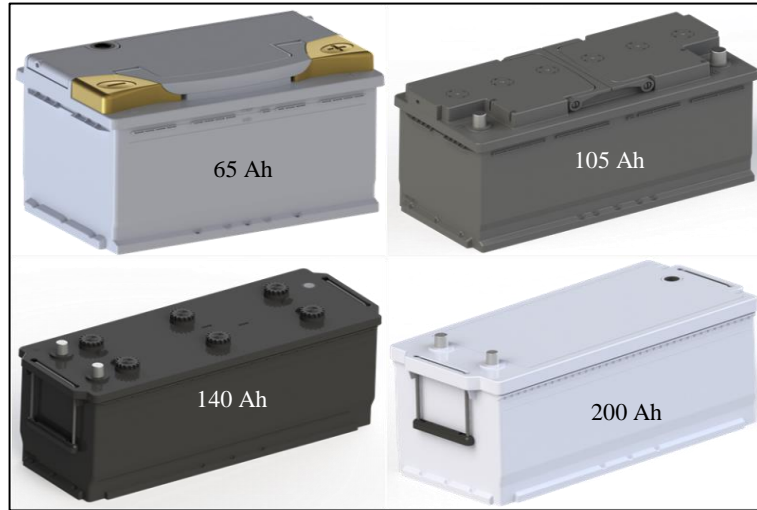
Kurşun asit aküler kullanım alanlarına bağlı olarak starter aküler ve endüstriyel aküler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.4.1. Starter Aküler

Starter aküler otomotiv aküleri olarak bilinen otomobil, motosiklet, minibüs, kamyonet, kamyon, otobüs, iş makineleri, deniz araçları, golf araçları, bahçe araçları ve askeri araçlarda kullanılan başlatma, ateşleme ve aydınlatma ihtiyaçlarına enerji sağlayan akülerdir. Kurşun asit akü sektöründe pazar payının büyük oranını otomotiv aküleri oluşturmaktadır. Motorlu araçların sayısının artışına bağlı olarak otomotiv akülerine olan talep de artmaktadır. Motorlu araçların cinsine bağlı olarak akü kapasiteleri ve ağırlıkları farklılık göstermektedir. Tablo 2.3'te araç cinslerine göre ortalama akü ağırlıkları ve akü kapasiteleri yer almaktadır.

Tablo 2.3. Araç cinslerine göre ortalama akü ağırlıkları ve kapasiteleri

Araç Cinsi	Motosiklet	Otomobil / Minibüs	Kamyon	Otobüs	Traktör
Kapasite Aralığı (Ah)	2.5-30	35-105	105-170	170-240	100-150
Ortalama Ağırlık(kg)	1-8	12-35	35-44	40-65	25-35



Şekil 2.12. Farklı boyut ve kapasitedeki starter aküler

2.4.2. Endüstriyel Aküler

Stasyonere ve traksiyone aküler olarak 2 gruba ayrılan endüstriyel aküler forkliftler, yer temizleme makineleri, taşıyıcı ya da kaldırma platformları, elektrikli araçlar, hava alanı araçları, yer altı maden lokomotifleri gibi araçlarda

kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda özellikle forkliftlerde yaygın olarak kullanılan traksiyoner akülerin %90'nı aside dayanıklı kaplama ve boya yapılmış, üstü açık çelik kasa (kazan) içine 2 V'luk hücrelerin yerleştirilmesi ve hücre kutuplarının birbirine iletken bağlantı kabloları ile bağlanması sonucu oluşturulur. İstenen voltaj seviyesine göre uygun sayıda 2 Volt' luk hücrelerin seri olarak bağlanmasıyla 1 adet traksiyoner akü paketi elde edilmiş olmaktadır. Müşteri talebine bağlı olmakla birlikte genellikle 12 V – 96 V ve 150 Ah – 1500 Ah aralığında üretilirler.

Stasyonery aküler, sabit tesislerde yedek enerji kaynağı olarak kullanılan akülerdir. Herhangi bir elektrik kesintisi durumunda akü ya da akü grupları devreye girerek sistemi kapasitesi kadar beslemektedir. Her biri 2V olan hücrelerin birbirine seri bağlanması ile ihtiyaca uygun gerilimde stasyonery akü paketi oluşturulur. 100 Ah ile 3000 Ah kapasite aralığındaki farklı kapasitelerde üretilebilmektedir.



Şekil 2.13. a) Stasyonery akü b) Traksiyonery akü

2.5. Temel Kavramlar ve Hesaplamalar

2.5.1. Akülerde Şarj İşlemi

Aküye DC formda çıkış sağlayan bir güç kaynağından akım verme işlemi şarj olarak tanımlanmaktadır. DC formdaki bu elektrik enerjisi şarj işlemi ile aküde kimyasal enerji olarak depolanır. Aküler, şarj esnasında aşağıdaki değişimlere uğrarlar.

- Pozitif plakalar kurşun sülfat ($PbSO_4$) yapısından kurşun peroksit (PbO_2) yapısına dönüşür.
- Negatif plakalar kurşun sülfat ($PbSO_4$) yapısından süngerimsi kurşuna dönüşür.
- Pozitif ve negatif plakalardaki kurşun sülfatlar elektrolite geçtiğinden dolayı sülfürik asit çözeltisi yoğunluğu artmaktadır.
- Şarj esnasında akünün voltajı artmakta şarj tamamlandığında belli bir süre sonra stabil hale gelmektedir.

Akülerde ilk şarj işlemi formasyon şarjı olarak adlandırılmaktadır. Montaj işlemi tamamlanan akü, üretim hattında düşük yoğunluklu sülfürik asit çözeltisi ile doldurularak kapasitesi ve tasarımına bağlı bir şarj programı ile ilk şarj yapılmaktadır.

2.5.2. Akülerde Deşarj İşlemi

Akünün dışarıdan DC formda enerji talep eden bir yüke akım vermesi işlemi deşarj olarak tanımlanmaktadır. Aküler deşarj esnasında aşağıdaki değişimlere uğrarlar.

- Pozitif plakalar, kurşun peroksit (PbO_2) yapısından kurşun sülfat ($PbSO_4$) yapısına dönüşür.
- Negatif plakalar süngerimsi kurşundan kurşun sülfata ($PbSO_4$) dönüşür.
- Elektrolitteki sülfat bileşenleri plakalara geçiş yaptığından dolayı sülfürik asit çözeltisi yoğunluğu azalmaktadır.
- Deşarj esnasında akünün voltajı azalmakta ve deşarj tamamlandıktan belli bir süre sonra stabil hale gelmektedir.

2.5.3. Akü Açık Devre Voltajı (OCV)

Bir akü hücresinin pozitif kutupu ile negatif kutupu arasında oluşan potansiyel değişim açık devre voltajı olarak tanımlanmaktadır. Akünün şarjlılık oranına bağlı olarak voltajı değişmektedir. Akülerde voltaj; anma voltajı, yavaş şarj voltajı ve deşarj sonu voltajı olmak üzere 3 başlık altında incelenmektedir.

2.5.3.1. Anma Voltajı (Nominal Voltaj)

%100 doluluk oranına sahip bir akü hücresinin kutupları arasından ölçülen voltaj değeridir. Kurşunun kimyası gereği her bir akü hücresinin 2 V potansiyele sahip olduğu kabul edilir. Otomotivde kullanılan aküler 12 V nominal voltaja sahip aküler olarak adlandırılmaktadır.

2.5.3.2. Yavaş Şarj Voltajı

Aküyü stokta tam şarjlı olarak tutabilmek için DC enerji kaynağı ile yapılan tampon şarj, yavaş şarj veya float şarj olarak ifade edilir. Bir akü hücresinin tampon şarj voltajı 2,10 V ile 2,18 V aralığında değişmektedir. 12 V nominal voltajlı bir otomotiv aküsünde ise bu değer 12,60 V ile 13,1 V aralığında değişiklik gösterebilmektedir.

2.5.3.3. Deşarj Sonu Voltaj

Akünün deşarjı esnasında izin verilen minimum voltaj değeri olarak tanımlanmaktadır. Akü hücresi için bu değer 1,75 V olup 12 V otomotiv aküsü için 10,5 V'tur. Aküler deşarj işlemi ile 10,5 V'a ulaştıklarında tamamen boşalmış sayılırlar. Bu potansiyele kadar deşarj olan akülerin alternatör şarjı ile tekrar tamamen şarj edilmesi uzun zaman almakta ve akü kapasite kaybetmektedir. Bu nedenle tamamen deşarj olmuş aküler araç dışında DC güç kaynağı ile kapasitesinin 10'a biri akımla 10h süreyle şarj edilmelidir. Şekil 2.14'te araç dışında şarj edilen akünün görseli yer almaktadır.



Şekil 2.14. DC güç kaynağı ile şarj edilen akü bağlantısı

2.5.4. İç Direnç

Akü içerisinde yer alan plaka, seperatör, elektrolit ve bağlantı köprüleri gibi bileşenlerin tamamının direnci akü iç direncini oluşturmaktadır. Akünün plaka sayısı ve yapısına bağlı olarak iç direnç 2 m Ω ile 13 m Ω arasında değişiklik gösterebilmektedir. Akünün şarjlılık durumuna bağlı olarak iç direnç ters orantılı olarak değişmektedir. Bu tez kapsamında yapılan iç direnç ölçümleri için Hioki 3554 marka iç direnç ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.15. Hioki 3554 iç direnç ölçüm cihazı

2.5.5. Self Deşarj

Akünün stokta beklerken veya araç üzerinde kullanılmadığı durumlarda dışarıdan herhangi bir enerji girişi ve enerji çıkışı olmadan kendi kendine deşarj olmasıdır. Akülerin self deşarj olmasının temel nedeni elektrolitin plakalara temas ettiği noktalarda çözeltide yer alan saf suyun oksijen ve hidrojene ayrışmasıdır. Akülerin self deşarjı aşağıdaki etkenlere bağlıdır:

- Akünün bulunduğu ortam sıcaklığı arttıkça self deşarj oranı artmaktadır.
- Kurşun plakalardaki antimuan vb. bileşenler arttığında self deşarj artmaktadır.

Antimuan oranının %1 ile %2 aralığında olduğu alışımlarda bir aylık sürede akü nominal kapasitesinin %3'ü kadar deşarj olmaktadır. Antimuan oranının %2 ile %6 aralığında olduğu alışımlarda ise akünün aylık nominal kapasite kaybı %5 seviyelerine kadar artış gösterebilmektedir.

2.5.6. Yoğunluk

Elektrolit belli bir miktarda sülfürik asit ve saf su karışımından oluşmaktadır. Birim hacimdeki elektrolitin ağırlığı akü yoğunluğu olarak ifade edilir. Yoğunluğun birimi gr/cm^3 veya kg/l 'dir. Elektrolit yoğunluğu genellikle hidrometre denilen cihaz ile ölçülür. Hidrometre, ölçekli bir cam şamandıranın sıvı içinde yoğunluğa bağlı olarak belli bir seviyede sabit kalması esasına göre ölçüm yapmaktadır. Bu tez kapsamında yoğunluk ölçümleri için dijital ölçüm yapabilen Anton Paar DMA35 dijital yoğunluk ölçer kullanılmıştır.



Şekil 2.16. Yoğunluk ölçer

Elektrolit yoğunluğu sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Teorik hesaplara göre her $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık değişimi için yoğunluk $0,007\text{ gr/cm}^3$ değişim göstermektedir. Örnek olarak $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta $1,280\text{ gr/cm}^3$ yoğunluktaki elektrolit $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta $1,273\text{ gr/cm}^3$ olarak ölçülmektedir. Sıcaklık arttıkça yoğunluk düşmektedir.

2.5.7. Kapasite

Bir akünün şarj esnasında elektrik enerjisi kimyasal enerji olarak depolanmakta, kullanıcı ihtiyaçları doğrultusunda bu kimyasal enerji elektrik enerjisi olarak aküye bağlı yükler tarafından harcanmaktadır. Deşarj anında aküden elde edilebilecek maksimum enerji miktarı akünün kapasitesi olarak adlandırılmaktadır. Kapasitenin birimi Amper Saat'tir. Kısaca 'Ah' harfleri ile ifade edilir. Akünün etiket değerinde nominal kapasite (C_n) değeri yazılır. Fakat akünün yaşlanma durumu ve şarjlılık durumuna göre efektif kapasitesi (C_e) değişiklik göstermektedir. Akünün kapasitesini etkileyen en önemli parametreler aşağıdaki gibidir.

a) Bir akü hücresindeki toplam plaka adeti ve plaka yüzey alanı genişliğine bağlı olarak kapasite, doğru orantılı artış göstermektedir. Plaka sayısının fazla olması ve yüzey alanın geniş olması temelde aktif malzeme miktarını artıracığı için aküde depolanacak enerji miktarını artırmaktadır. Plakalardaki aktif madde miktarı ne kadar fazla ise akünün enerji depolama ve enerji verme yeteneği yani kapasitesi fazla olacaktır.

b) Elektrolitin yoğunluğuna bağlı olarak akü kapasitesi değişiklik göstermektedir. Bir aküye yüksek yoğunlukta elektrolit konursa kapasite belli oranda yükselir. Fakat, yoğunluğun artması aküde korozyonu hızlandıracağından akü ömrünün kısalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, elektrolit yoğunluğunun belli değerler aralığında ($1,270 \text{ g/cm}^3$ - $1,290 \text{ g/cm}^3$) olması gerek akü ömrünün gerekse kapasitenin optimum olmasını sağlamaktadır.

Yukarıda açıklanan iki etken, akünün tasarımı ile ilgili olup imalatçı tarafından belirlenebilmektedir. Bu iki etkenin yanı sıra bir akünün kapasitesi kullanım ömrüne yani yaşına bağlıdır. Akü kullanıldıkça plakalardan aktif madde kaybı meydana gelmekte ve aküyü oluşturan elemanların korozyona uğraması ve yıpranması artmaktadır. Buna bağlı olarak kapasite, akü kullanıldıkça belli oranda azalacaktır.

c) Bir akünün kapasitesi, elektrolit sıcaklığına yani akünün kullanıldığı ortam sıcaklığına bağlı olarak değişir. Teorikte sıcaklık arttıkça kapasite artar. Fakat, aşırı sıcaklık, kurşun ızgaralarda aşınmaya neden olur. Aşınan ızgara çubukları mekanik olarak kırılır ve üzerindeki aktif malzeme dökülür. Sıcaklık ile kapasite artmasına rağmen akü kullanım ömrü azalmaktadır.

Elektrolit sıcaklığının akü kapasitesi üzerindeki etkisi teorik olarak aşağıdaki gibi açıklanabilir. Sıcaklığa bağlı akü kapasite değişiminin hesabında aşağıdaki adımlar izlenmektedir.

- i. Akünün nominal kapasitesi ve referans sıcaklık değeri üretici firma dokümanından belirlenir. (Örnek olarak $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 50 Ah kapasiteye sahip bir aküyü ele alalım.)

- ii. Akünün bulunduğu ortamdaki elektrolit sıcaklığı ölçülür. (Elektrolit sıcaklığı 40 °C olsun)
- iii. Ölçüm sıcaklığının referans sıcaklık değeri ile olan farkı hesaplanır.(40-20=20 °C)
- iv. Elektriksel testlere göre her 5°C'lik sıcaklık artışı kapasiteyi %4 oranında artırmaktadır. (20 °C'lik sıcaklık farkı için kapasite %16 artacaktır.)
- v. Sonuç olarak 50 Ah kapasiteye sahip akü 40 °C'de 58 Ah kapasite verebilmektedir. Elektrolit sıcaklığı 20 °C'nin altında olduğunda tüm işlemler tersine uygulanmalıdır.

d) Bir akünün kapasitesi deşarj akımına bağılı olarak değışmektedir. Peukert yasasına göre yüksek akım ile deşarj olan bir akünün kapasitesi düşük akım ile deşarj olduğu duruma göre daha azdır. Örnek olarak 72 Ah nominal kapasiteye sahip bir otomotiv aküsünü ele alalım. Elektriksel test standartlarında akünün kapasite tespiti için aşağıdaki test adımları uygulanmaktadır.

Adım 1: 25 °C'lik bir ortamda akü 3,6 A (kapasitesinin 1/20) akım ile deşarj edilir.

Adım 2: Akü voltajı 10,5V olana kadar deşarj işlemi devam eder.

Adım 3: Akü Kapasitesi = 3,6 A x Zaman olarak hesaplanır.

Deşarj akımının farklı olduğu durumların simüle edilmesinde ise Peukert yasası kullanılmaktadır.

$$Cp = I^k \times t \quad (2.7)$$

Cp : Peukerte göre kapasite, I : Deşarj akımı, t : Deşarj süresi, k : Peukert sabiti

Kurşun asit aküler için Peukert sabiti 1,1 ile 1,3 arasında değışiklik göstermektedir. Peukert yasasına göre örnek bir akü kapasitesinin hesabı aşağıdaki gibi yapılabilir. 150 Ah kapasiteye sahip bir aküyü ele alalım. Bu akü 50 A ile deşarj edilmek isteniyor. Nominal kapasite değışimi Peukert yasasına göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

150 Ah kapasiteye sahip bu akü ile ani enerji kesintisi esnasında kullanıcıların 3 saat süre ile bu akü üzerinden beslenmesi hedeflenmektedir. Kapasite formülüne göre;

Amper-saat / Amper = 150 / 30 = 3 saat elde edilir. Deşarj süresi 10 saatten düşük olduğu durumlarda Peukert eğrisi kullanılarak akünün hedeflenen süreyi ne kadar sağlayacağı hesaplanmalıdır.

2.5.8. Akülerde Verim

Bir aküden deşarjda elde edilen kapasitenin şarj esnasında aküye aktarılan kapasiteye oranı akünün verimini oluşturmaktadır. Aküde verimin belirlenmesinde aşağıdaki adımlar dikkate alınmalıdır.

- i. Akü anma kapasitesinin maksimum 10'da 1'i akımla şarj ve deşarj edilmelidir.
- ii. Deşarj işlemi akü voltajı 1,8 V olana kadar devam edilmelidir. Temel olarak aküde 2 farklı verim vardır. Bunlar; Amper-Saat ve Watt-Saat verimidir.

2.5.8.1. Amper-Saat Verimi

Akülerde Amper-saat verimi, "pAh" olarak ifade edilmektedir. Kurşun akülerin Amper-saat verimleri yaklaşık olarak %90 olarak kabul edilmekte ve aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$pAh = \frac{I_d \times D_t}{I_c \times C_t} \quad (2.8)$$

I_d : Deşarj akımı(A), D_t : Deşarj süresi(h), I_c : Şarj akımı(A), C_t : Şarj süresi(h)

2.5.8.2 Watt-Saat Verimi

Akülerde Watt-saat verimi, "pWh" olarak ifade edilmektedir. Kurşun asit akülerde Watt-saat verimi yaklaşık olarak %75'tir.

$$pWh = \frac{I_d \times D_t \times D_v}{I_c \times C_t \times C_v} \quad (2.9)$$

C_v : Şarj Voltajı(V), D_v : Deşarj Voltajı(V)

Diğer değişkenler Amper-saat verimindeki hesaplarda tanımlanmıştır.

Verim hesabında akım ve voltaj değişkenlerinin şarj ve deşarj esnasında sabit olması mümkün değildir. şarj veya deşarj esnasında akü üzerinden voltaj, akım ve zaman bilgisi belli periyotlarda kayıt altına alınarak sistemin Amper-saat verimi ve Watt-saat verimi hesaplanabilmektedir. Gelişmiş akü test cihazlarıyla yapılan testlerde cihazlar toplam kapasiteyi ve gücü otomatik kayıt altına alabilmektedir.

2.5.9. Sülfatlaşma

Sülfatlaşma akü plakalarında oluşan korozyon olarak tanımlanır. Korozyona bağlı olarak plakalar, enerjiyi yeteri kadar depolayamazlar. Sülfat kristalleri deşarj işlemi esnasında elektrolitten ayrılarak plaka yüzeyine tutunurlar. Ancak, şarj işlemi ile plaka yüzeyine tutunan sülfat kristalleri elektrolite tekrar geçiş yapar. Bu çift yönlü enerji transferi akü şarj ve deşarj olduğu sürece tekrarlanır. Sülfat kristallerinin plaka yüzeyinde kalıcı olarak kalması sülfatlaşma olarak adlandırılmaktadır. Kalıcı olarak plakalarda biriken sülfat kristalleri akünün kapasite kaybetmesine neden olacak ve bunun sonucu olarak daha ileriki safhalarında akünün marş basmasını engelleyecektir.

Sülfatlaşmanın temel nedeni akülerin derin deşarja maruz kalması ve yeteri kadar şarj edilmemesidir. Ayrıca, akü yüksek sıcaklıktaki ortamlarda kullanıldığında self deşarjı hızlanacağından sülfatlaşma hızı da artacaktır. şekil 2.17’de sülfatlaşmiş bir akünün plakalarının görseli yer almaktadır.



şekil 2.17. Sülfatlaşmiş akü pozitif plakaları

2.5.10. Akü Test Cihazları

Akülerin sahadaki sağlamlık kontrollerinde farklı firmaların üretmiş olduğu akü sağlamlık tespiti cihazları kullanılmaktadır. Özellikle laboratuvar ortamındaki elektriksel performans testleri için ise aküler için özelleşmiş şarj-deşarj yapabilme kabiliyetine sahip gelişmiş redresörler kullanılmaktadır.

2.5.10.1. Akü Sağlamlık Kontrolü Cihazı

Akülerin enerji depolama aygıtları olarak kullanımı hayatımızın birçok alanında karşımıza çıkmaktadır. Yaygın olarak kullanılan akülerin verimli ve uzun ömürlü kullanılabilmesi gereklidir. Bu da ancak, akünün doğru şekilde kullanılması ve periyodik testlerden geçirilmesiyle mümkün olmaktadır. Bu anlamda mikroşlemci tabanlı geliştirilen akü test cihazları ile akülerin üretim sonrası ve saha koşullarında belli periyotlarda test edilerek ömür durumları ve arıza nedenleri belirlenmektedir. Bu tez kapsamında akü sağlamlık kontrolü için Midronics firmasının geliştirmiş olduğu MDX-500 marka akü test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.18. Midronics MDX-500 akü test cihazı

2.5.10.2. Şarj-Deşarj Redresörleri

Alternatif elektrik enerjisini yarı iletken malzemeler olan tristör, diyot gibi malzemeler sayesinde doğru akım enerji formuna çeviren cihazlar redresör olarak adlandırılmaktadır. Redresörler enerji yedeklemesi amacıyla güvenlik ve acil aydınlatma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında akü performans testleri için özel olarak tasarlanmış gelişmiş donanım ve yazılım alt yapısına sahip şarj ve deşarj yapabilen redresörler kullanılmıştır.

Elektriksel laboratuvar bünyesinde Digatron ve Bitrode marka redresörler ile elektriksel performans testleri yapılmaktadır. Bu redresörler bilgisayar kontrollü olup elektriksel test standartlarındaki tüm test adımlarını uygulayabilecek programlama fonksiyonlarına sahiptir. Bu tez kapsamında kullanılan farklı redresör modelleri ve kapasiteleri Tablo 2.4'te yer almaktadır. Şekil 2.19'da testlerde kullanılan redresörlere ait görseller yer almaktadır.

Tablo 2.4. Tez çalışmasında kullanılan redresör modelleri

Marka-Model	Akım Limiti (A)	Gerilim Limiti (V)
Bitrode-FTV Serisi	50A -150 A	20 V
Bitrode-LCV Serisi	100 A	20 V
Bitrode-DTV Serisi	3000 A	15 V
Digatron-UBT Serisi	50-150 A	20 V



Şekil 2.19. Digatron ve bitrode marka redresörler

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu tez kapsamında otomotiv sektöründe kullanılan akülere yönelik elektriksel test standardında yer alan testlerin takibinin yapılabildiği, test sonuçlarının sistem tarafından otomatik yorumlanabildiği bir ölçüm ve analiz sistemi geliştirilmiştir. Bu ölçüm sistemi ile aküye ait akım, gerilim, sıcaklık ve yoğunluk bilgileri veri toplama cihazları vasıtasıyla ölçülmekte ve bilgisayar ortamında kayıt altına alınmaktadır. Bu verilerin toplanması, analiz ve yorumlanması için LabVIEW™ (Laboratory Virtual Instruments For Engineering Workbench) programı kullanılmıştır.

Otomotiv sektöründe kullanılan akülerde elektriksel performans kriterleri TS EN 50342-1:2016 yer alan testler ile belirlenmektedir. Bu standart “Kurşun Asit Aküler için Genel Kurallar ve Deney Metotları” başlığıyla Türk Standartları Enstitüsünde yer alan akü elektriksel performans standardıdır. Bu standardın yanı sıra özellikle OEM (Original Equipment Manufacturer) müşterilerinin belirlemiş olduğu farklı elektriksel test standartları da bulunmaktadır. Akülerin elektriksel testlerdeki performans başarısı; belli periyotlarla redresörlerin (akü şarj-deşarj cihazı) kayıt altına aldığı akım, gerilim ve sıcaklık verilerinin analizi ile belirlenmektedir. Bu bilgilerin yorumlanması ve analiz edilmesi test sorumlusuna ek iş yükü getirmekte ve zaman kaybına neden olmaktadır. Ayrıca akülerde önemli bir performans analiz kriteri olan elektrolit yoğunluğu redresör vasıtasıyla kayıt altına alınamamaktadır. Özellikle akü yoğunluk bilgisi bazı çevrim testlerinin yorumlanmasında büyük önem arz etmektedir. Akü üzerinden yeterli ölçüm verilerinin alınamaması elektriksel test sonuçlarının analizini zorlaştırmaktadır.

Bu tez kapsamında materyal ve yöntemler bölümü başlığı altında akü elektriksel test standardında yer alan tüm testler detaylı analiz edilecek olup bu analizler otomatik test analiz ve raporlama sisteminin yazılım mimarisine referans olacaktır. Ayrıca bu bölümde geliştirilen ölçüm sisteminin donanım ve yazılım tasarım detayları, kullanılacak veri toplama cihazlarının teknik özellikleri ve tez kapsamında uygulanacak test adımları açıklanacaktır.

Bu bölüm kapsamında incelenecek ana başlıklar aşağıdaki gibidir:

- Elektriksel Performans Testlerinin İncelenmesi (TS EN 50342-1:2016)
- Otomatik Test, Analiz ve Raporlama Sistemi Tasarımı
- Akü Test Adımları ve Test Bağlantı Şemaları

3.1. Elektriksel Performans Testlerinin İncelenmesi (TS EN-50342-1:2016)

TS EN 50342-1:2016 elektriksel test standardında akü elektriksel performansının belirlenmesine yönelik çeşitli akü yaşlandırma ve ömür testleri yer almaktadır. Otomotiv sektöründeki yeni nesil araçların elektriksel güç tüketimleri giderek artmaktadır. Bununla birlikte yüksek çevrim özelliğine sahip akülerin bu özellikteki araçlarda kullanımı kaçınılmaz olmuştur. Akülere uygulanan elektriksel performans testleri ile akünün zorlu saha koşulları altındaki kullanım ömürleri ve malzeme dayanımları simüle edilmektedir. Özellikle farklı tasarımlara ait akülerin elektriksel performanslarının birbiri ile karşılaştırılmasında zorluklar yaşanmaktadır. Bu nedenle bu başlık altında, akü elektriksel test standardında yer alan tüm testler detaylı analiz edilecektir. Her bir elektriksel test için testin başarısını etkileyen kriterler belirlenerek otomatik test, analiz ve raporlama sisteminin yazılım mimarisine referans oluşturacaktır. Elektriksel test standardında yer alan testler aşağıda belirtilen test başlıklarında incelenecektir.

- Kapasite Testi
- Marş Basma Akımı Testi
- Çevrimsel Dayanıklılık Testi
- Korozyon Testi
- Şarj Tutma Testi
- Derin Deşarj Testi
- Şarj Kabulü Testi
- Vibrasyon Direnci Testi
- Su Kaybı Testi

Bu testler arasında yer alan vibrasyon direnci testi mekanik dayanımı tespit eden bir test olmasına rağmen elektriksel test adımları içerdiği için elektriksel testler ile birlikte incelenmektedir. Ayrıca akülerde şarj işlemi ile ilgili standartta yer alan yöntemler ve test adımları bu başlık altında incelenmiştir.

3.1.1. Akü Şarj Yöntemleri

İlgili standart gereği yukarıda yer alan temel testlere başlamadan önce akünün tam şarjlı hale getirilmesi gerekmektedir. Akünün tam şarjlı hale getirilmesi akü boyutuna göre değişiklik göstermektedir. Tablo 3.1’de farklı tipte akülere uygulanan şarj yöntemleri yer almaktadır [16].

Tablo 3.1. Akü şarj yöntemleri

Akü Tipi	Voltaj	Akım	Zaman	Sıcaklık	Tanım
EN 50342-2'ye göre boyutu tanımlı sulu aküler	16,00 V ± 0,05V	5 In	24 h (16 h) ^a	15 °C - 35 °C	
EN 50342-4'e göre boyutu tanımlı sulu aküler	16,00 V ± 0,05V	5 In	20 h (16 h) ^a	15 °C - 35 °C	Adım 1
	Limit Yok	In	4 h (0 h) ^a	15 °C - 35 °C	Adım 2
VRLA akü "Yalıtılmış (kapalı) akü ya da kuru aküler"	14,80 ± 0,05 V	5 In	24 h (16 h) ^a	15 °C - 35 °C	

^a Marş basma testinden sonra aküler 16 saat şarj edilir. In=Nominal Akım $In=Cn/20$

3.1.2. Kapasite Testi

Akülerde elektriksel performans kriterlerinin temeli, akünün nominal kapasitesini sağlayıp sağlamadığıdır. Aküde depolanan enerjinin ölçümü kapasite kontrol testi ile yapılmaktadır. Akü nominal kapasitesinin 1/20'si kadar akımla 10,5 V'a kadar deşarj edilir. 10,5 V'a ulaşma süresi kayıt altına alınır. Kapasite hesabı aşağıdaki gibidir [17].

$$C_e = I_n \times t_{10,5V} \quad (3.1)$$

C_e :Etkin Kapasite (Ah)

C_n : Nominal Kapasite (Ah)

I_n : Nominal Akım ($C_n / 20$) (A)

$t_{10,5V}$: Akü voltajının 10,5 V'a düşme süresi (saat)

Kapasite testinin başarı kriteri test sonucunda aküden deşarj edilen etkin kapasitenin, minimum akü kapasitesi kadar olmasıdır. Tablo 3.2’de örnek kapasite test sonucuna ilişkin detaylar yer almaktadır. 35 Ah kapasiteye sahip akü kapasite testi sonucunda 36,23 Ah kapasite vermiştir.

Tablo 3.2. Örnek kapasite test sonucu

C_n (Ah)	35	Ah
$C_e \geq 100\%$	103,5	%
C_e (Ah)	36,23	Ah
SONUÇ	Başarılı	

3.1.3. Marş Basma Akımı Testi

Otomotiv akülerinin temel görevi araca ilk hareket enerjisini sağlamasıdır. Araç marş basma anında, modeli ve alternatörünün türüne göre 150-300 A aralığında bir akımı anlık talep etmektedir. Marş basma gücünün simüle edilmesi amacıyla marş basma testi onay sürecinde akülere uygulanmaktadır.

-18 °C iklimlendirme kabininde bir gün bekletilen aküden, etiket değerinde yazan marş basma akımı ile yüksek akımda deşarj işlemi yapılır. Deşarj işleminin 10. saniyesi sonundaki voltaj değerinin 7,5 V üstü olması gerekmektedir. Daha sonra akü 10 saniye bekletilip marş basma akımının %60'ı kadar akım ile akü voltajı 6 V olana kadar deşarj edilmeye devam edilir. Akünün 6 V'a düşme süresi minimum 90 saniye olmalıdır [18]. 80 Ah kapasiteye sahip ve marş basma akımı 760 A olan bir aküye uygulanan marş basma test sonucu Tablo 3.3'teki gibidir.

Tablo 3.3. Örnek kapasite test sonucu

C_n (Ah)	80	Ah
I_{cc} (A)	760	A
$U_{10s} \geq 7,50V$	7,75	V
$t_{6v} \geq 90$ saniye	115	saniye
SONUÇ	Başarılı	

3.1.4. Çevrimsel Dayanıklılık Testi

Bu test ile aküler hızlandırılmış ömür testine tabi tutularak saha koşullarının laboratuvar ortamında simüle edilmesi amaçlanmaktadır. Akülerin çevrim ömrü birbirini takip eden şarj ve deşarj adımlarının aküye uygulanması ile belirlenir. Tablo 3.4'te farklı çevrim seviyelerine göre minimum çevrim sayıları yer almaktadır [19].

Tablo 3.4. Çevrimsel dayanıklılık seviyeleri

Çevrim Seviyesi	E1	E2	E3	E4
Çevrim Sayısı	80 Çevrim	150 Çevrim	230 Çevrim	360 Çevrim (VRLA)

Tablo 3.5’de 60 Ah bir aküye ilişkin çevrimsel dayanıklılık test sonucu yer almaktadır. Bu test için başarı kriteri akünün hedef çevrim sayısına ulaşana kadar teste devam edip testi tamamlamasıdır. Ayrıca bu testin akabinde akü, marş basma testi ve kapasite testine tabi tutulur. Bu testler için de tabloda belirtilen kriterleri sağlaması gerekmektedir.

Tablo 3.5. Örnek çevrimsel dayanıklılık test sonucu

Çevrim Seviyesi	E1	
Hedef Çevrim Sayısı	80	
Akü Boyutu Standart No	EN 50342-2	
Test Sıcaklığı	+40 °C ± 2 °C	
C _n	60	Ah
Test Sonrası Çevrim Sayısı	80	çevrim
Test Sonrası Marş Basma Testi U_{30s} ≥ 7.2V	8,22	V
Kapasite Testi C_e ≥ 0,5xC_n	42,64	Ah
SONUÇ	Başarılı	

3.1.5. Korozyon Testi

Bu test ile akülerin korozyona karşı malzeme dayanımının ölçülmesi amaçlanmaktadır. Akü 60°C’lik test havuzunda 14 V sabit voltaj altında 52 gün boyunca şarj edilerek iç yapısı yaşlandırılmaktadır. Test 4 çevrimden oluşmaktadır. Her çevrim 13 gün şarj ve 13 gün bekleme adımlarını içermektedir. Her çevrim sonunda akü yüksek akımla deşarj edilmektedir. Yüksek akımla deşarj testinde akünün 30 saniye sonundaki voltajının minimum 7,2 V olması gerekmektedir [20]. Elektriksel olarak testi başarıyla tamamlayan akü kesilerek iç yapısı, korozyon miktarı ve korozyona bağlı akü plaka büyümesi ölçülmektedir. Tablo 3.6’da örnek korozyon test sonucu verilmiştir.

Tablo 3.6. Örnek korozyon test sonucu

Çevrim No	1		2		3		4	
$U_{30s} \geq 7,2V$	9,19	V	9,35	V	9,34	V	9,07	V
SONUÇ	Başarılı		Başarılı		Başarılı		Başarılı	

3.1.6. Şarj Tutma Testi

Bu test sırasında aküler 40 °C'lik test havuzunda 21 gün boyunca açık devre olacak şekilde yani redresöre bağlı olmadan boşta bekletilir. Standartta belirtilen bu bekleme süresi sonunda aküler şarj edilmeden yüksek akım ile deşarj edilirler. Bu test ile sıcak ortamda herhangi bir şekilde şarj olmadan bekleyen akülerin, şarj tutma performans seviyelerinin ölçümü amaçlanmaktadır. Yüksek akım ile deşarj test sonucuna göre, akülerin şarj tutma seviyeleri belirlenmektedir [21]. Tablo 3.7'de şarj tutma seviyeleri, Tablo 3.8'de ise örnek test sonucu yer almaktadır.

Tablo 3.7. Şarj tutma seviyeleri

Şarj Tutma Seviyesi	C1	C2
Deşarj Voltajı	$U_{30s} > 8 V$	$U_{30s} > 8,5 V$

Tablo 3.8. Örnek şarj tutma test sonucu

Şarj Tutma Seviyesi	C2	
$U_{30s} \geq 8,5V$	8,70	V
SONUÇ	Başarılı	

3.1.7. Derin Deşarj Testi

Bu test ile akülerin araçta herhangi bir enerji tüketicisinin açık kaldığı durumdaki davranışının simüle edilmesi amaçlanmaktadır. Test öncesinde akünün tüm kapasitesi deşarj edilir. Akabinde 12 V ampul, 1 hafta boyunca aküye bağlı bırakılır. Akünün boyutuna göre TS EN-50342-2'de tanımlı aküler 10W ampul ile TS EN-50342-4'te tanımlı aküler ise 21W ampul ile derin deşarja maruz bırakılır. Daha sonra akü tam şarjlı hale getirilip, kapasite testine tabi tutulur. Yapılan kapasite testi sonucunun minimum değerinin nominal kapasitesinin %80'i kadar olması gerekmektedir. Kapasite testi sonrası akü marş basma testine tekrar tabi tutularak 10.

saniye sonundaki voltajı kayıt altına alınır. 10. saniye sonunda akü voltajının 7,5 V'un üstünde olması gerekmektedir [22]. Tablo 3.9'da örnek test sonucu yer almaktadır.

Tablo 3.9. Örnek derin deşarj testi sonucu

C_n	60	Ah
Ampul Bağlama Süresi (168 sa \pm 4 sa)	168	saat
$C_e \geq 80\%$	110,8	%
$C_e \geq 0,8 \times C_n$	66,5	Ah
$U_{10s} \geq 7,5$ V	7,76	V
SONUÇ	Başarılı	

3.1.8. Şarj Kabulü Testi

Şarj kabulü testi ile deşarjlı bir akünün tekrar şarj olabilme yetkinliği ölçülmektedir. Deşarjlı akü sabit voltaj altında ve belli bir akımla (büyük tiplerde 100 A, küçük tiplerde 50 A) teste başlamaktadır. Test 10 dakika sürmektedir. Test sonundaki şarj akımının (I_{ca}) şarj kabulü akımının (I_o) en az 2 katı olması gerekmektedir [23]. Tablo 3.10'da örnek test sonucu yer almaktadır.

Tablo 3.10. Örnek şarj kabulü testi sonucu

C_n	74	Ah
C_e	77,78	Ah
$I_{ca} \geq 2I_o$	39,93	A
SONUÇ	Başarılı	

3.1.9. Vibrasyon Direnci Testi

Bu test ile akünün ömür ve performansı üzerinde önemli etkiye sahip olan titreşime karşı dayanımı ölçülmektedir. Vibrasyon seviyesinin uygunluğu görsel kontrollerin yanı sıra, test öncesi ve test sonrasında uygulanan yüksek akım deşarj testleri ile belirlenir. Tablo 3.11'de vibrasyon süresi ve uygulanan ivme değerlerine bağlı vibrasyon seviyeleri yer almaktadır.

Tablo 3.11. Vibrasyon direnci seviyesi

Vibrasyon Seviyesi	V1	V2	V3
Vibrasyon Süresi	2 Saat	2 Saat	20 Saat
İvme	30 m/sn ²	60 m/sn ²	60 m/sn ²

Akünün bu testteki başarısı test öncesi yapılan marş basma testi ile test sonrası yapılan marş basma testlerinin başarılı olmasına bağlıdır. Ayrıca vibrasyon testi esnasında aküde herhangi bir asit sızıntısı ve mekanik deformasyon olmamalıdır [24]. Tablo 3.12’de örnek vibrasyon test sonucu verilmiştir.

Tablo 3.12. Örnek vibrasyon direnci testi sonucu

Vibrasyon Seviyesi	V2	
$U_{60s} \geq 7,50$ V	10,02	V
t_{6V} (saniye)	191	saniye
Test Öncesi Marş Basma Test Sonucu	Başarılı	
$U_{60s} \geq 7,20$ V	10,11	V
$t_{6V(av)} \geq 0,8$ t_{6V} (saniye)	194	saniye
Test Sonrası Marş Basma Test Sonucu	Başarılı	
Asit Sızıntısı Durumu	Sızıntı Yok	

3.1.10. Su Kaybı Testi

Bu test ile akü ömrünü ve performansını önemli derecede etkileyen su kaybının efektif kapasiteye olan oranı test edilir. Akü 60 °C sıcaklıktaki ortamda alternatör şarjını temsil eden 14,4 V sabit voltaj ile şarj edilir [25]. Bu test ile akünün su kaybı seviyesinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Tablo 3.13’te su kaybı seviyeleri ve bu seviyelere ait su kaybı miktarları belirtilmiştir.

Tablo 3.13. Su kaybı seviyeleri

Su Kaybı Seviyesi	W1	W2	W3	W4	W5
Test Süresi	21 Gün	21 Gün	42 Gün	42 Gün	84 Gün
Su Kaybı Miktarı	24 gr/Ah	16 gr/Ah	8 gr/Ah	4 gr/Ah	4 gr/Ah

Denklem 3.2’de su kaybı hesabında kullanılan eşitlik verilmiştir.

$$W = (W_f - W_l)/C_e \quad (3.2)$$

Denklemdede;

W : Su Kaybı Miktarı(gr/Ah), W_f : İlk Ağırlık(gr), W_1 : Son Ağırlık(gr), C_e : Etkin Kapasite(Ah)

Tablo 3.14'te 53,37 Ah etkin kapasiteye sahip bir akünün W3 su kaybı seviyesine göre test sonucu yer almaktadır.

Tablo 3.14. Örnek su kaybı test sonucu

Su Kaybı Seviyesi	W3	
Test Süresi	42 gün	
C_e	53,37	Ah
İlk Ağırlık	13121	gr
Test Sonu Ağırlık	12850	gr
Su Kaybı	5,08	gr/Ah
SONUÇ	Başarılı	

3.2. Otomatik Test, Analiz ve Raporlama Sistemi Tasarımı

Bu kısımda, tez çalışmasının deneysel aşamalarında kullanılan donanım ve geliştirilen yazılım hakkında bilgiler verilmiştir.

3.2.1. Veri Toplama Sistemi Donanım Tasarımı

3.2.1.1. Donanım Topolojisinin Belirlenmesi

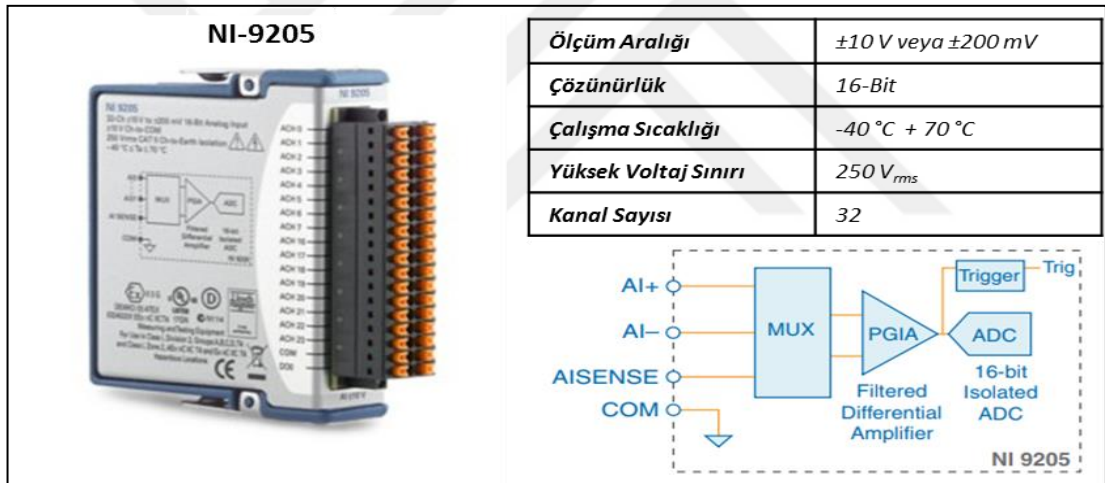
Bu tez kapsamında National Instrument (NI) firmasının yüksek çözünürlüklü ve endüstriyel ortama dayanıklı veri toplama kartları kullanılmıştır. Veri toplama kartlarının teknik özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

- Voltaj ölçümü için -20 V ile +20 V çalışma aralığında ölçümleme yapabilen veri toplama cihazının kullanılması gerekmektedir.
- Akım ölçümü, şönt direnç üzerinden yapılacaktır. Sistem gereksinimi olarak 100 A altındaki akım ölçümlerinde maksimum 100 mV'luk gerilim düşümü oluşan şönt direnç kullanılmıştır. Daha yüksek akım gerektiren uygulamalarda ise maksimum 200 mV'luk şönt kullanılmıştır. Bu nedenle akım için seçilecek donanımın +200 mv ile -200 mV aralığında hassas ölçüm yapabilme özelliğinin olması gerekmektedir.

- iii. Sıcaklık ölçümleri için K tipi asite dayanıklı termokupl ve NI firmasının sıcaklık ölçüm modülü kullanılmıştır.
- iv. Yoğunluk sensörünün çalışma aralığı 0-5 V skalasında olacaktır. Yoğunluk ölçüm verilerinin kaydı için 0-5 V aralığında analog girişe sahip veri toplama kartı kullanılmıştır.

3.2.1.2. Akım Ölçüm Sistemi

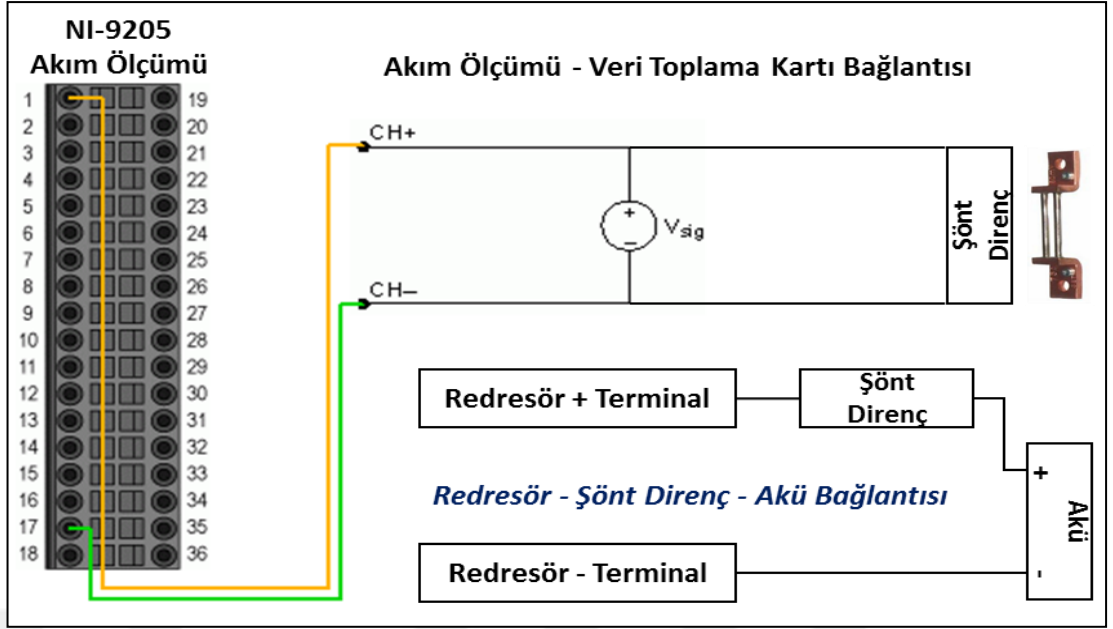
Akünün elektriksel performans kriterlerinin belirlenmesinde akımın zamana bağlı değişimi ve yorumlanması çok önemlidir. Bu kapsamda elektriksel performans testlerinin takibinde akım ölçüm sisteminin redresör ölçümleri kadar hassas olması gerekmektedir. Bu tez kapsamında farklı tipteki veri toplama kartları incelenmiş ve akım ölçümü için NI- 9205 analog ölçüm modülü alınmasına karar verilmiştir. Akım ölçümü için kullanılan veri toplama kartının detayları aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.1. NI-9205 veri toplama kartı (akım ölçümü için)

Akünün şarj ve deşarj operasyonlarındaki akım değişimi aküye seri bağlı şönt direnç üzerinden mV mertebesinde ölçülmektedir. Şekil 3.1’de akım ölçümüne ilişkin bağlantı diyagramları verilmiştir. Akım ölçümü için belirlenen analog giriş kartı 32 kanala sahiptir. Bu veri toplama kartının 16 kanalı akım ölçümünde diğer 16 kanalı ise yoğunluk ölçümünde kullanılmaktadır.

Şekil 3.2’de akım ölçüm sisteminin şönt dirence ve aküye bağlantısı yer almaktadır.

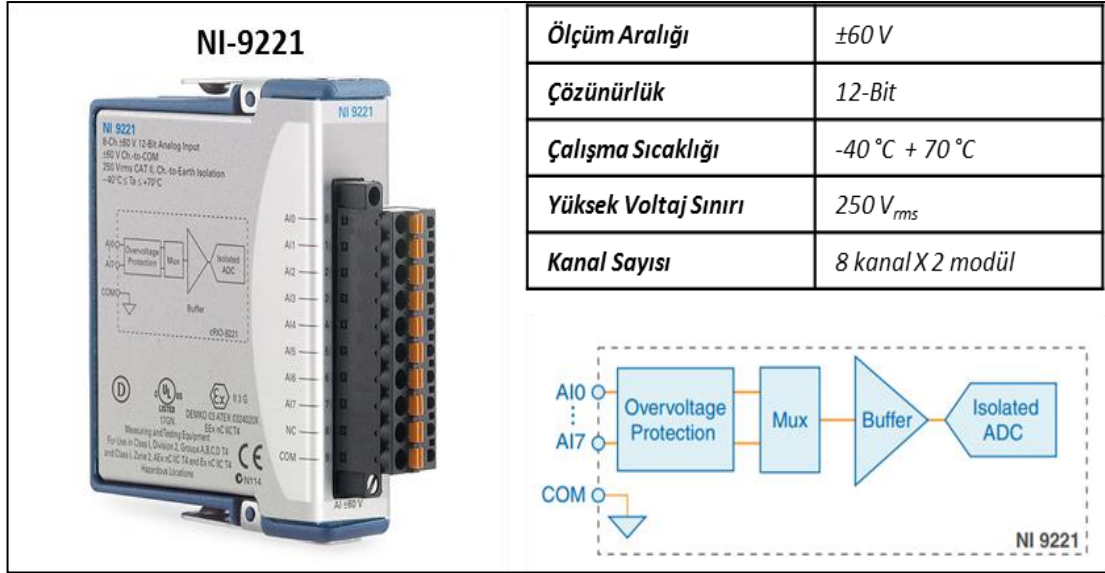


Şekil 3.2. Akım ölçüm sistemi bağlantı şeması

3.2.1.3. Gerilim Ölçüm Sistemi

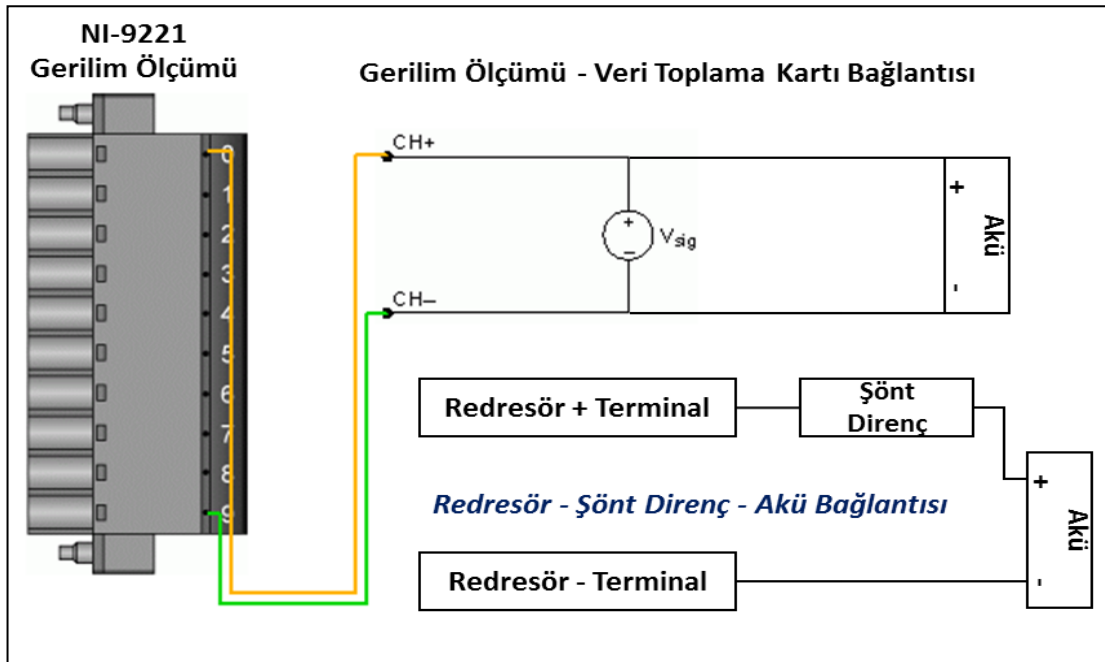
Akünün elektriksel performans ölçütlerinin belirlenmesinde diğer bir önemli ölçüt ise voltajın zamana bağlı değişimidir. Gerilim ölçümlerinin maksimum %1 hata ile ölçülmesi gerekmektedir. Akü gerilimi sabit akımla şarj esnasında 18 V'a kadar ulaşabilmektedir. Bazı özel testlerde 2 veya 3 akü seri bağlanarak test edilebilmektedir. Bu gerekli özellikleri sağlayacak veri toplama kartları incelenmiş ve NI-9221 analog ölçüm modülünün kullanılmasına karar verilmiştir. Bu modül 8 kanaldan oluşmaktadır. Hedeflenen sistemde 16 kanal ile ölçüm yapılması gerekmektedir. Bu nedenle bu modülden 2 adet temin edilmiştir.

Şekil 3.3'te NI-9221 analog ölçüm modülünün detayları incelendiğinde bu ölçüm modülü ile 8 farklı aküden aynı anda ölçüm alınabilmektedir. Her akünün – terminali GND girişine bağlanmalıdır. AI0-AI7 kadar tanımlı olan giriş kanallarına ise akünün + terminali bağlanarak gerilim ölçümü her aküden bağımsız olarak yapılmaktadır.



Şekil 3.3. NI-9221 veri toplama kartı

Şekil 3.4’te akü ile veri toplama kartı arasındaki bağlantı şeması verilmiştir. Tek GND referans alınarak yapılan bu ölçüm metodunda, birbirine seri bağlı akülerin her birinin voltajının ölçülmesi kısa devreye yol açacaktır. Bu nedenle bu tasarım seri bağlı olmayan 16 farklı akünün ölçümü için uygundur. Gerilim ölçümü akünün kutup başları üzerinden direk ölçülmektedir.

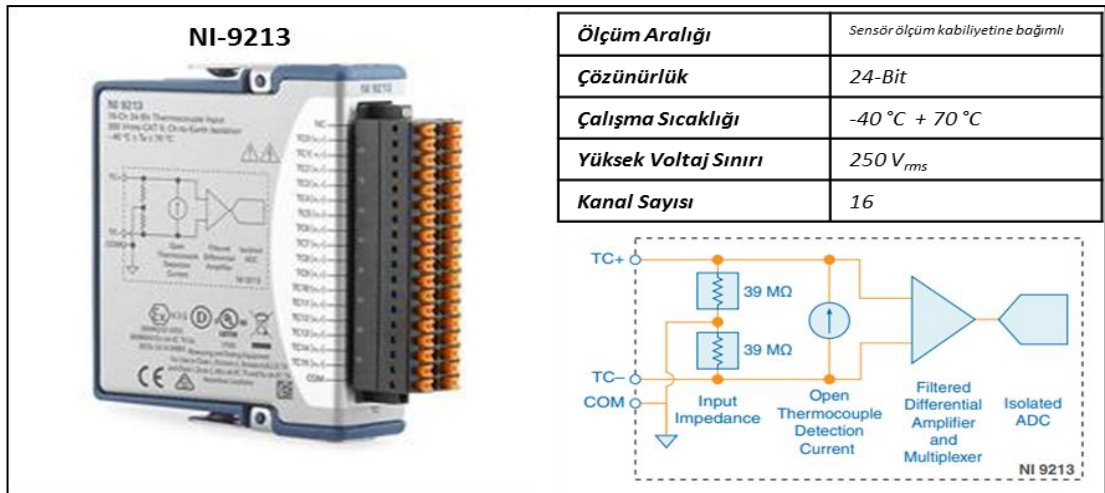


Şekil 3.4. Gerilim ölçüm sistemi bağlantı şeması

3.2.1.4. Sıcaklık Ölçüm Sistemi

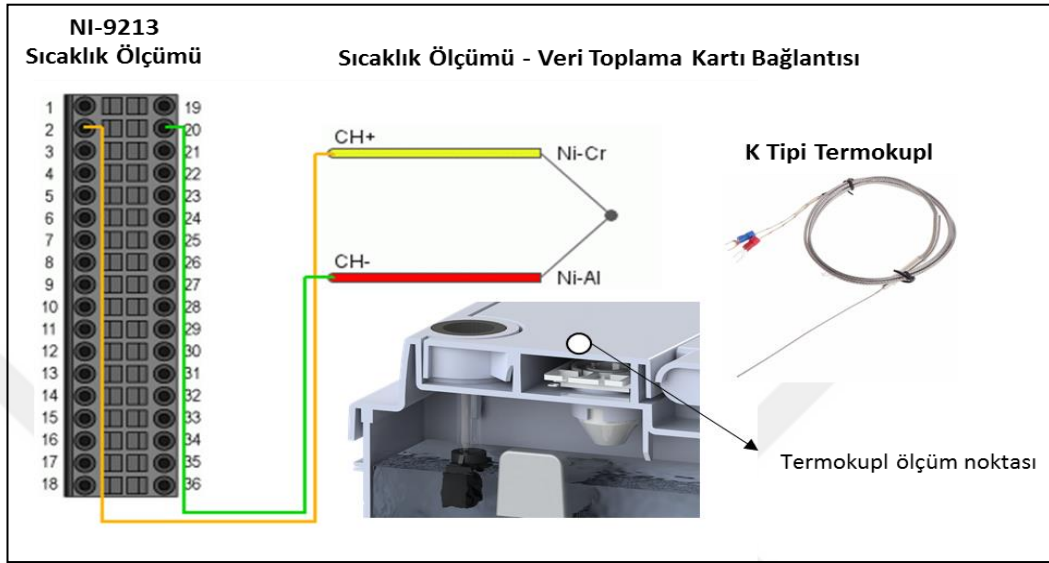
Akünün elektriksel performans kriterlerinin belirlenmesinde sıcaklık parametresi özellikle korozyon, çevrim ve su kaybı testi için büyük önem arz etmektedir. 12 V otomotiv aküsü 6 hücreden oluşmaktadır. Aküyü oluşturan hücrelerinin tamamı şarj veya deşarj anında aynı sıcaklığa maruz kalmamaktadır. Bu nedenle bazı testlerde akünün iç hücreleri ile dış hücreleri arasında su kayıp miktarı farklı olmaktadır. Bu farklılık akünün iç hücreleri ile dış hücreleri arasında performans sapmalarına neden olmakta ve seri bağlı hücrelerden bazıları erken yaşlanmaktadır. Sıcaklık ölçüm sistemi ile testin içeriğine göre tek bir hücreden sıcaklık ölçümü alınabildiği gibi birden fazla hücreden de ölçüm alınabilmektedir. Örneğin korozyon testinde her bir hücre takip edilirken, kapasite kontrol testinde tek bir hücrenin sıcaklığının takip edilmesi sıcaklık değişiminin teste olan etkisinin incelenmesinde yeterli olacaktır. Sıcaklık ölçümü için K tipi asite dayanıklı özel kılıfa sahip termokupl kullanılması gerekmektedir. Bu gereksinimleri sağlayacak özellikte veri toplama kartları incelenmiş ve NI-9213 sıcaklık ölçüm modülünün kullanılmasına karar verilmiştir. Bu modül tüm termokupl modelleri ile uyumludur. Modül, 16 kanaldan oluşmaktadır. Aynı anda 16 aküden veri toplanılabildiği gibi 6 kanal ile akünün tüm hücrelerinin sıcaklık değişimi de kayıt altına alınabilmektedir.

Şekil 3.5'te NI-9213 modülüne ilişkin detaylar yer almaktadır. Termokupl ölçümleri mV mertebesinde olduğu için modülün çözünürlüğünün yüksek olması gerekmektedir. Bu nedenle 24 bit çözünürlüğe sahip veri toplama kartı temin edilmiştir.



Şekil 3.5. NI-9213 veri toplama kartı

Şekil 3.6’da akü ile termokupl arasında bağlantı şeması verilmiştir. Aküler tamamen kapalı sistemler olduğu için sıcaklık ölçümü için sensörün giriş yapacağı nokta veya noktalar delinerek termokupl elektrolit ile temas halinde bırakılır. Daha sonra bu deliğin etrafı silikon vb. maddeler ile yalıtılmalıdır.

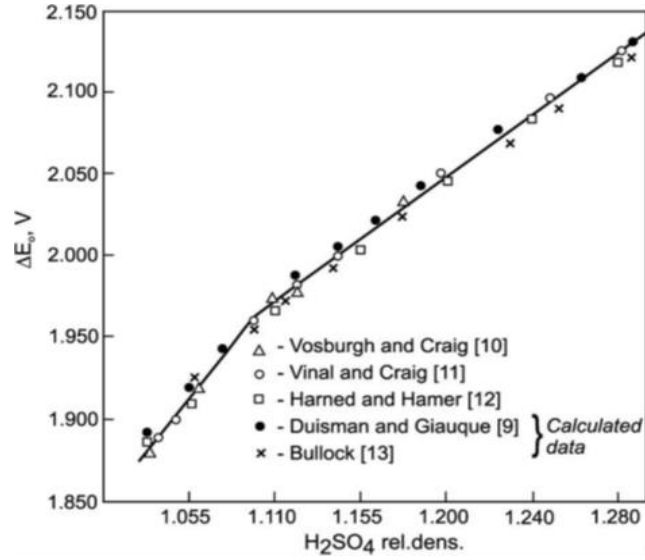


Şekil 3.6. Sıcaklık ölçüm sistemi bağlantı şeması

3.2.1.5. Yoğunluk Ölçüm Sistemi

Kurşun-asit akü sistemlerindeki odak konulardan biri şarj durumunun (SoC) belirlenmesidir. Bu konu üzerinde birçok araştırma yapılmasına rağmen, kullanışlı ve pratik sayılabilecek çok az yöntem vardır. Şarj durumu tespit metotları voltaj düşüşü veya empedans gibi elektriksel karakteristiklerin ölçülmesi ya da elektrolit (H_2SO_4) konsantrasyonunun belirlenmesi olarak iki kategoriye ayrılabilir [26].

Duisman ve Giaque; 0,1 M-14 M H_2SO_4 konsantrasyon aralığında, termodinamiğin üçüncü yasasını temel alarak hücrenin EMK'sını (Elektromotor Kuvvet), molar konsantrasyonun fonksiyonu olarak hesaplamışlardır [27]. Belirli bir dengeleme süresinden sonra (akü asidinin por sistemi içerisinde eşit konsantrasyona ulaşması) açık devre voltajı hücrenin EMK'sına eşit duruma gelmektedir. Hücre EMK'sı sıcaklık ve asit konsantrasyonu tarafından belirlenir.



Şekil 3.7. Kurşun-asit hücre voltajına karşı asit yoğunluğu grafiği

Şekil 3.7’de asit yoğunluğu değişkenine bağlı, deneysel olarak ölçülmüş ve teorik olarak hesaplanmış hücre voltajları görülmektedir. 1,100 gr/cm³ ile 1,280 gr/cm³ H₂SO₄ yoğunluk aralığında açık devre durumunda hücre voltajı doğrusal olarak artış göstermektedir. Bu doğrusallık kullanılarak hücrenin açık devre voltajı olan ΔE ölçülerek pratik bir biçimde asit yoğunluğunun, d, hesaplanması aşağıdaki denklem ile gerçekleştirilebilir.

$$d = \Delta E - 0,845 \quad (3.3)$$

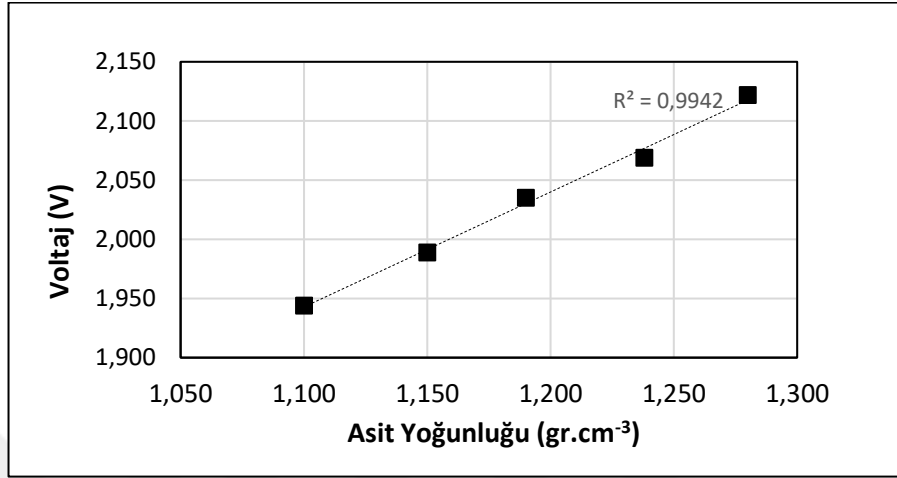
d : Göreceli yoğunluk,

ΔE : Açık devre voltajı

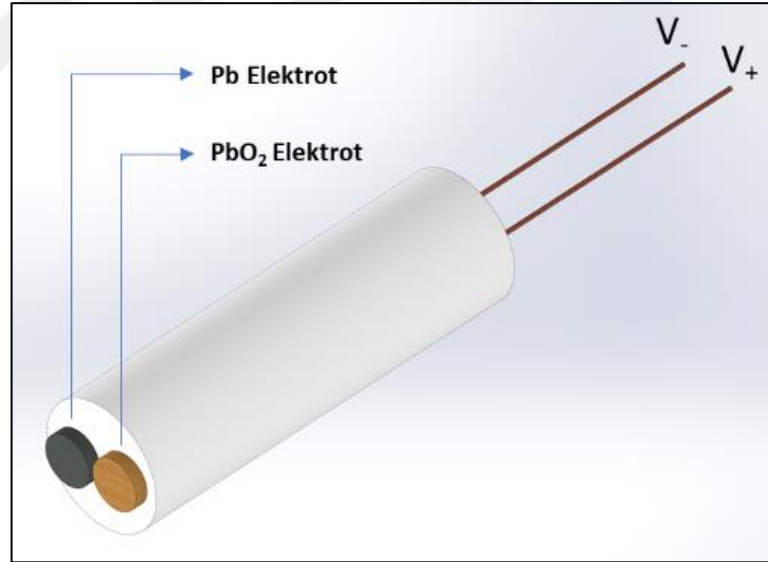
Yukarıdaki formül açık devredeki hücre voltajının, hücre EMK’sına eşit olduğu durumlar için geçerlidir. Bu durum hücrenin yatışkın duruma ulaşmış içerisinde sıcaklık ve yoğunluk gradyanı bulunmaması anlamına gelmektedir [27].

Bu çalışmada Pb/PbO₂ elektrot çifti (mini kurşun-asit hücre) kullanılarak elde edilen çıkış voltajına göre yoğunluk hesaplaması hedeflenmiştir. Bu kapsamda test edilen akü hücrelerine Pb/PbO₂ elektrot çiftinden oluşan sensör yerleştirilip ölçülen çıkış voltajından yola çıkılarak akü testi sırasında asit yoğunluk değişimi takibi sağlanması düşünülmüştür.

Kurşun-asit akü plaka hazırlama sürecince kullanılan pasta formülleri kullanılarak hazırlanan 1 cm² yüzey alanına sahip dairesel elektrotlar ile hazırlanan sensör, konvansiyonel akü sürecindeki sürece benzer biçimde şarj edilerek hazırlanmış ve asit yoğunluğuna göre verdiği çıkış voltajı Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 8. Asit yoğunluğuna göre sensör çıkış voltajı



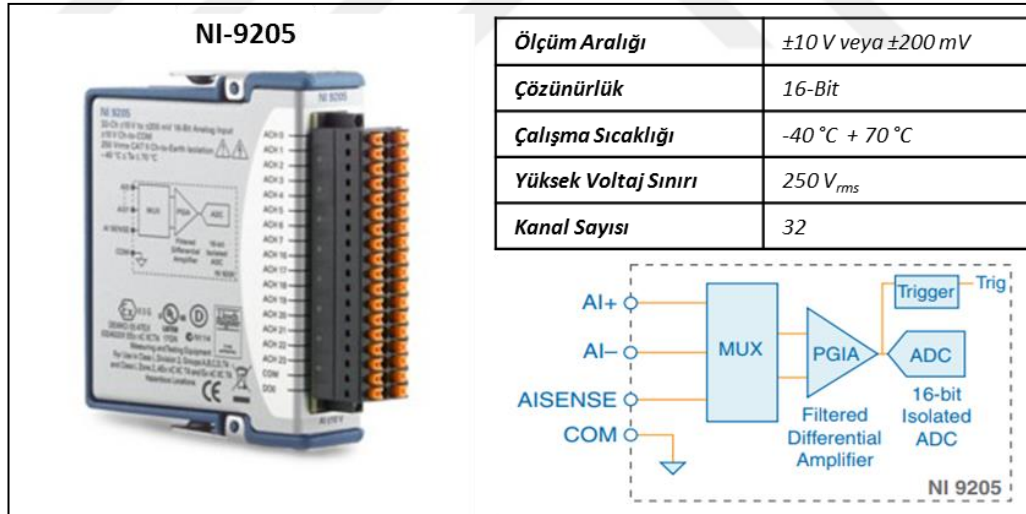
Şekil 3. 9. Yoğunluk ölçüm sensörü tasarımı

Sensör performans testleri sonucunda elde edilen sonuçlara göre, hücre içerisi iyon gradyanı ile sensörün bulunduğu bölüm arasında meydana gelen farktan dolayı dengeli bir ölçüm alınmamaktadır.

İyon hareketi hücre içerisinde aktif bir karıştırma bulunmadığı için difüzyon limitli olmakta böylece sensörün tepki süresini uzatmaktadır. Şekil 3.8’de yapılan ölçümlerde sensörün tepki hızı 900 saniye olarak ölçülmüştür.

Sensörden daha dengeli ve tepki süresi kısa bir cevap elde etmek için elektrotların porozitesi artırılarak iyon geçirgenlikleri iyileştirilmelidir. Testler sonucunda elde edilen verilere göre Pb/PbO₂ elektrot sisteminin kararsızlığı tespit edilmiş olup, Pb/PbSO₄ elektrot sistemi ile daha kararlı ölçümler alınabileceği düşünülmektedir [26]. Ayrıca sandviç tarzı olarak oluşturulan bir elektrot çiftinden, persaltik pompa ile akü içinden çekilen 5-10 ml asidin geçirilmesi ile difüzyon kısıtlaması ortadan kaldırılarak daha hızlı cevap süreleri elde edilebilecektir.

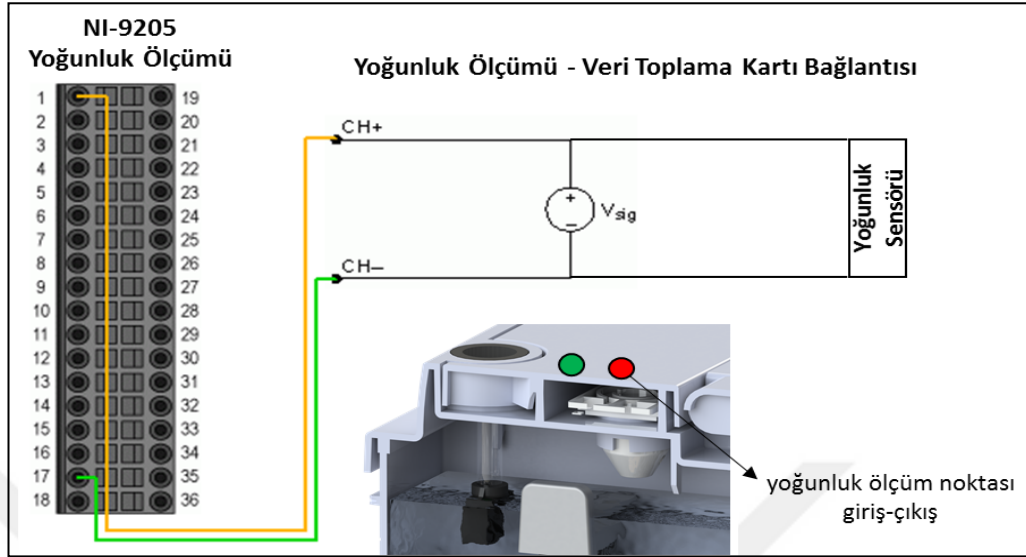
Yukarıda teorik alt yapısı açıklanan yoğunluk sensöründen gelen verilerin ölçüleceği veri toplama modülüne ilişkin donanım detayları aşağıdaki gibidir. Şekil 3.10’da yoğunluk ölçümlerinde kullanılacak veri toplama kartının detayları yer almaktadır.



Şekil 3.10. NI-9205 veri toplama kartı (yoğunluk ölçümü için)

Şekil 3.11’de yoğunluk sensörü ile analog ölçüm modülü arasındaki elektriksel bağlantı şeması yer almaktadır. Akım ölçümü bölümünde belirtildiği üzere NI-9205 tipi modül 32 kanala sahip bir veri toplama modülüdür. Bu modülün 16 kanalı yoğunluk ölçümünde kullanılacaktır. Yoğunluk ölçümü için tasarlanan

sensör, kurşun asit hücresinin eşdeğeri olduğundan yoğunluk ölçümleri ± 3 V'tan daha büyük olmayacaktır. NI-9205 modülü ± 10 V'a kadar ölçüm yapabilmektedir.



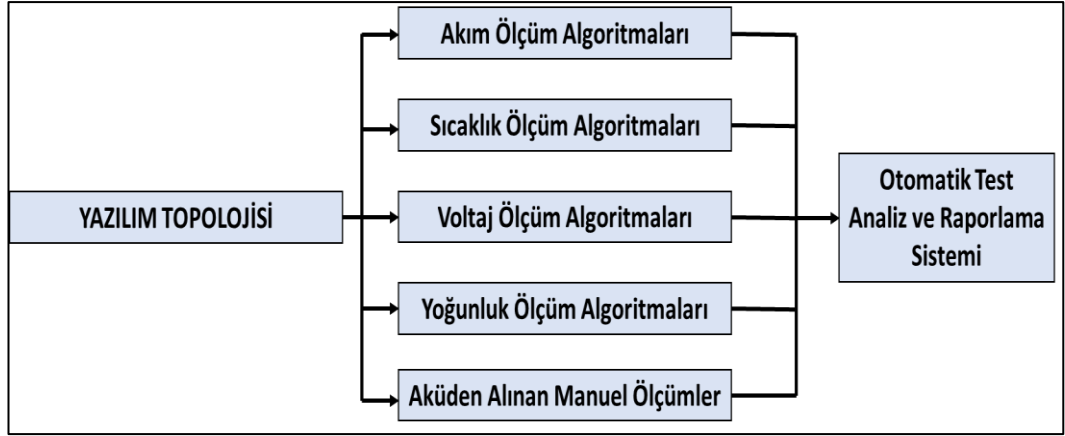
Şekil 3.11. Yoğunluk ölçüm sistemi bağlantı şeması

3.2.2. Veri Toplama Sistemi Yazılım Tasarımı

3.2.2.1. Yazılım Topolojisinin Belirlenmesi

Bu tez kapsamında NI LabVIEW™ grafiksel programlama geliştirme ortamı kullanılmıştır. Programda yer alan modüler yapıdaki birçok fonksiyon ve Express VI'lar programlama sürecini hızlandırmaktadır. Bu programlama alt yapısı ile programcı paletlerden ihtiyacı olan fonksiyonları alarak bir akış şeması oluşturur gibi yazılım üretebilmektedir. Ayrıca Express VI'lar ile sadece girişleri ve çıkışları bağlamak suretiyle program çok kısa sürede tasarlanabilmektedir.

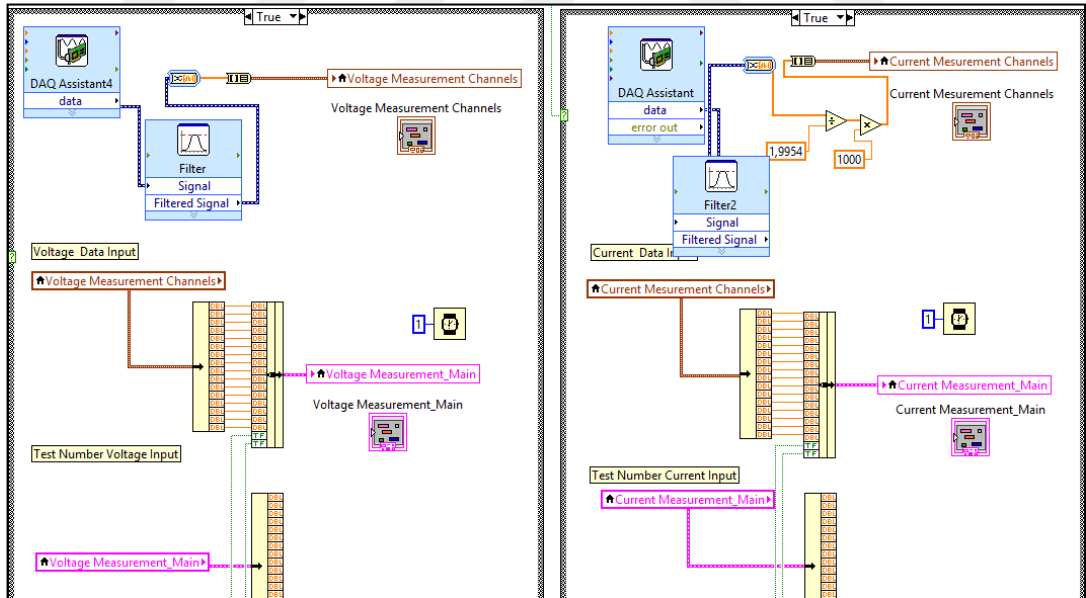
Yazılım topolojisinin belirlenmesinde en önemli etken elektriksel test standardında (TS EN-50342-1:2016) yer alan elektriksel performans testlerinde önemli ölçüm kriterlerinin ve test karakteristiklerinin belirlenmesidir. Literatürdeki çalışmalarda akü karakteristiğinin belirlenmesinde birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Fakat elektriksel performans testlerinin tamamı ile ilgili yapılmış bir ölçüm analiz ve raporlama sistemine rastlanılmamıştır. Yazılım topolojinin yapısı Şekil 3.12'de yer almaktadır.



Şekil 3.12. Yazılım topolojisi

3.2.2.2. Temel Ölçüm Algoritmaları

NI LabVIEW™ programı blok diyagram (block diagram) ve ön panel (front panel) olarak adlandırılan iki bölümden oluşmaktadır. Blok diyagramlar asıl programın yazıldığı kod bloklarının yer aldığı kısımdır. Front panel ise yardımcı bir tasarım aracı olup simülasyon ve ölçümlerin görsel araçlarla kullanıcıya sunulduğu kısımdır. Şekil 3.13’de blok diyagram tasarımına ilişkin örnek bir görsel verilmiştir.



Şekil 3.13. Blok diyagram örnek tasarım

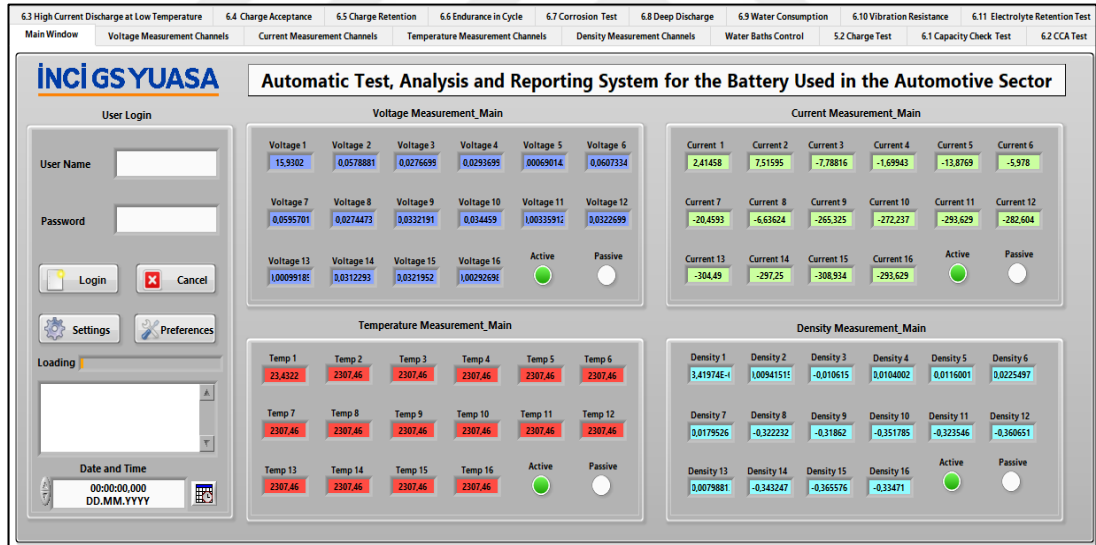
Temel ölçüm algoritmaları her bir ölçümün ayrı ayrı görüntülenebildiği sayfalardan oluşmaktadır. Tüm sayfaların front panelde görsel tasarımı yapılarak blok diyagram panelinde ise kod blokları ile gerekli bağlantıları yapılmıştır.

- Ana Sayfa
- Gerilim Ölçüm Sayfası
- Akım Ölçüm Sayfası
- Sıcaklık Ölçüm Sayfası
- Yoğunluk Ölçüm Sayfası

Ölçüm sayfaları ile ilgili detaylar aşağıdaki gibidir.

➤ Ana Sayfa

Veri toplama kartlarından anlık olarak gelen tüm ölçümler (sıcaklık, akım, gerilim, yoğunluk vb.) bu sayfada gösterilmektedir. Örnek olarak, akü şarjı esnasında alınan ölçümlerde akü voltajı 15,93 V, akım 2,41 A ve sıcaklık 23,43 °C olarak aşağıdaki görselde yer almaktadır. Ayrıca ana pencerede kullanıcı girişi ve ayarların bulunduğu bir bölüm yer almaktadır. Kullanıcı adı ve şifre girişi ile sisteme müdahale edilebilmektedir.



Şekil 3.14. Ana sayfa

➤ Gerilim Ölçüm Sayfası

NI-9221 analog ölçüm modülü vasıtasıyla 16 kanal voltaj bilgisi anlık olarak Şekil 3.15’de yer alan görsel pencerede takip edilmektedir. Bu görsel pencere ile tüm çıkışlardaki akülerin voltaj değerleri tek bir ekran üzerinden takip edilebilmektedir.



Şekil 3.15. Gerilim ölçüm sayfası

➤ Akım Ölçüm Sayfası

NI- 9205 analog ölçüm modülü vasıtasıyla 16 kanal akım bilgisi anlık olarak Şekil 3.16'da yer alan görsel pencerede takip edilmektedir. Bu görsel pencere ile aküye bağlı şönt üzerinden alınan voltaj bilgisi matematiksel olarak akım karşılığına çevrilmekte ve bu ekran üzerinden takip edilebilmektedir.

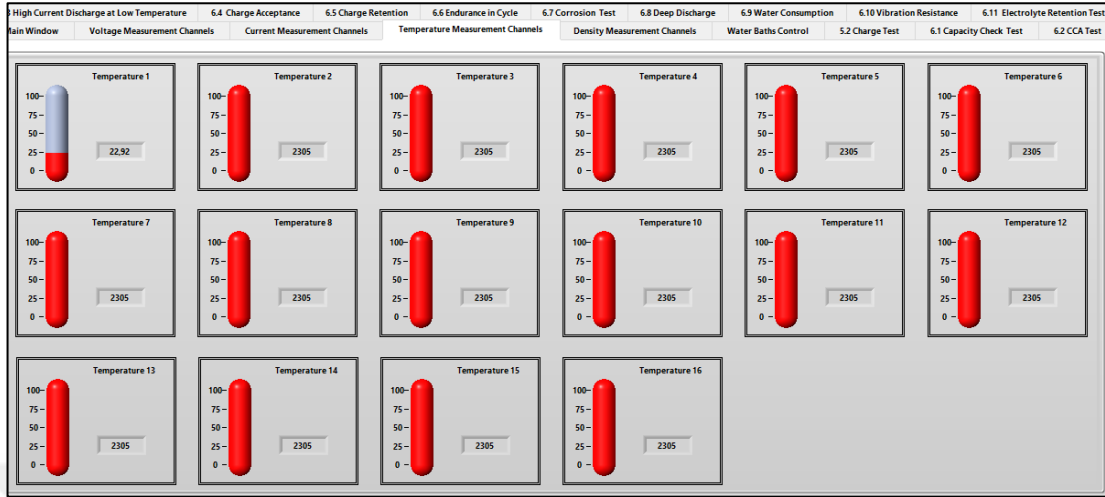


Şekil 3.16. Akım ölçüm sayfası

➤ Sıcaklık Ölçüm Sayfası

NI-9213 sıcaklık ölçüm modülü vasıtasıyla 16 kanal sıcaklık bilgisi anlık olarak Şekil 3.17'de yer alan görsel pencerede takip edilmektedir. Bu görsel

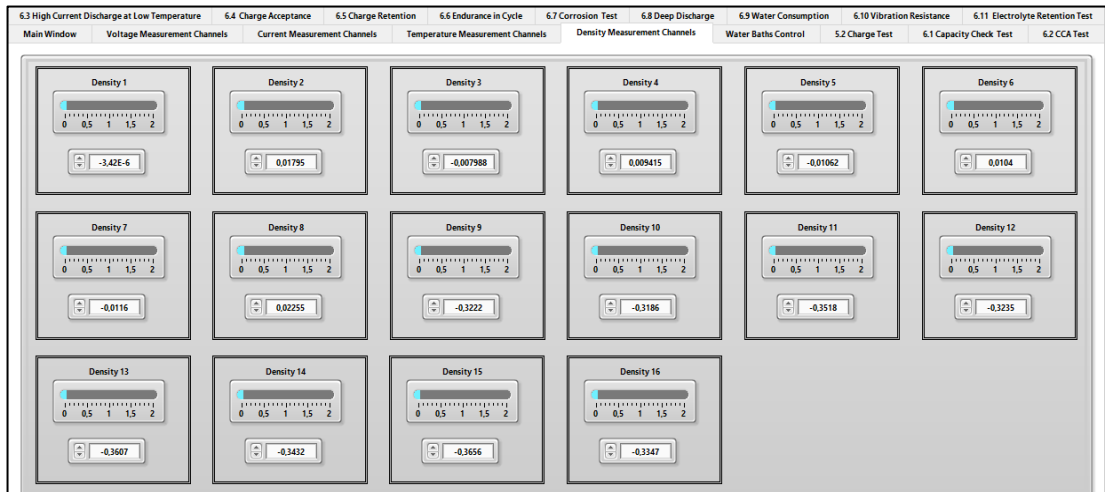
pencerede K tipi termokupllardan gelen sıcaklık bilgisi tek bir ekran üzerinden takip edilebilmektedir.



Şekil 3.17. Sıcaklık ölçüm sayfası

➤ Yoğunluk Ölçüm Sayfası

NI- 9205 analog ölçüm modülü vasıtasıyla 16 kanal yoğunluk bilgisi anlık olarak Şekil 3.18’de yer alan görsel pencerede takip edilmektedir. Bu görsel pencerede ise tüm çıkışlara bağlı akülerin yoğunluk değerleri tek bir ekran üzerinden takip edilebilmektedir.



Şekil 3.18. Yoğunluk ölçüm sayfası

Yukarıda yer alan temel ölçüm sayfaları ile aküden elde edilen her bir parametre ayrı ayrı ölçülerek kullanıcı bilgisine sunulmaktadır. Bu ölçüm sayfalarına ek olarak elektriksel laboratuvarında kullanılan akü test havuzlarının sıcaklık

değişiminin takip edilebileceği bir bölüm programa ilave edilmiştir. Sıcaklık ölçüm modülü bu ölçüm sayfası ile haberleşerek kullanıcı isteğine göre akü sıcaklığı veya akü test havuzunun sıcaklığı ayrı ayrı takip edebilmektedir. Şekil 3.19’da akü test havuzu takip sayfası yer almaktadır. Bu bölüm tamamen fonksiyonel amaçlı tasarlanmış olup ihtiyaç halinde kullanılacaktır.



Şekil 3.19. Akü test havuzu takip sayfası

3.2.2.3. Test Sayfası Ölçüm Bölümleri

Elektriksel test standardında yer alan akü performans testlerinin her biri için ayrı ayrı ölçüm sayfaları tasarlanmıştır. Ölçüm sayfalarının her biri içinde 6 farklı ölçüm bölümü bulunmaktadır. Tüm ölçüm sayfalarının Şekil 3.20’de belirtilen 1,2,3,4 ve 6 numaralı bölümleri aynıdır. 5 numara ile ifade edilen bölüm ise tahmin sonuçlarını içerdiğinden testlerin başarı kriterlerine göre değişiklik göstermektedir. Aşağıda test ölçüm sayfaları ile ilgili detaylar açıklanmıştır.

1 No’lu Bölüm: Genel Tanımlamalar

Bu bölümde akünün test numarası, nominal kapasitesi, marş basma akımı ve ağırlığına ilişkin parametreler test sorumlusu tarafından ölçüm sistemine giriş yapılmaktadır. Algoritma ihtiyaç duyduğunda ilgili parametreye ait değeri bu ekrandan alarak arka planda kullanabilmektedir. Bu bölümdeki değerler manuel olarak girilmektedir.

2 No'lu Bölüm : Test Öncesi Ölçümler

Bu bölümde akünün voltajı, elektrolit yoğunluğu, iç direnci ve midronics akımı ile ilgili parametreler bulunmaktadır. Test sorumlusu teste başlamadan bu parametreleri ilgili cihazlar ile ölçerek test sistemine manuel giriş yapmaktadır.

3 No'lu Bölüm : Test Sonrası Ölçümler

Test sonrası ölçümler bölümünde ilgili test tamamlandıktan sonra akünün voltajı, elektrolit yoğunluğu, iç direnci ve midronics akımı test sorumlusu tarafından ölçülerek bu bölüme giriş yapılır.

4 No'lu Bölüm : Anlık Test Sonuçları

Bu bölümde veri toplama kartlarından gelen veriler örnekleme zamanına göre görüntülenmektedir. Örnekleme zamanı, toplam test süresi gibi parametreler bu bölümde yer almaktadır. Ayrıca akünün anlık voltajı, akımı, sıcaklığı da bu bölümde görüntülenmektedir.

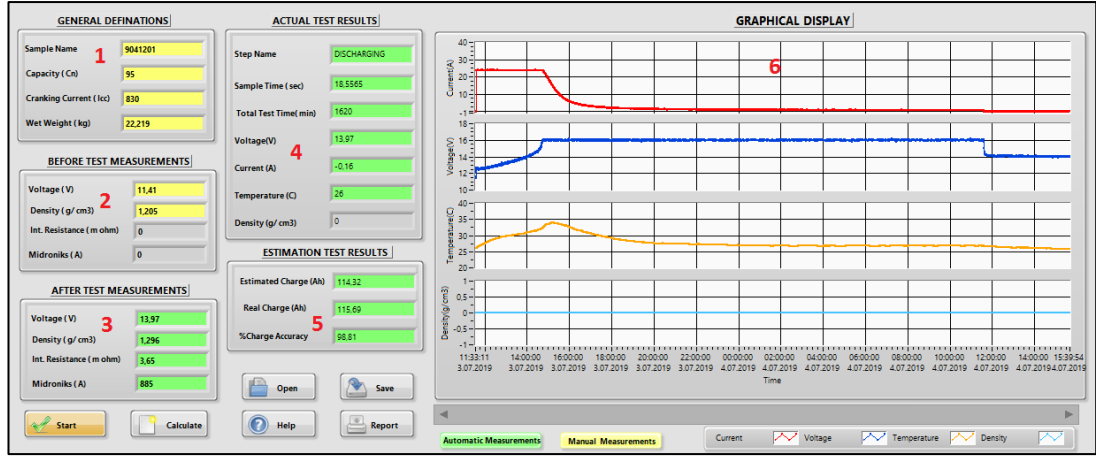
5 No'lu Bölüm : Tahmin Sonuçları

Tahmin sonuçları bölümü her testin başarı kriterleri dikkate alınarak tasarlanmıştır. Bir sonraki bölümde geliştirilen sistem ile yapılan örnek testlerde bu bölümlerle ilgili detaylı bilgi verilecektir.

6 No'lu Bölüm : Grafıksel Takip Ekranı

Grafıksel ekranda aküye ilişkin akım, sıcaklık, yoğunluk ve voltaj verileri anlık olarak görüntülenmektedir. Bu bölüm kullanıcının tüm test periyodu boyunca test esnasında ölçülen parametrelerin zamana bağlı değişiminin takip edilerek test sorumlusunun testin gidişatını kontrol etmesine katkı sağlamaktadır.

Yukarıda detayları verilen bölümlerin yanı sıra testi başlatma, bitirme ve verileri kaydetme gibi işlevleri yerine getiren butonlarda ilgili test ölçüm sayfalarında bulunmaktadır.



Şekil 3.20. Test sayfaları ölçüm bölümleri

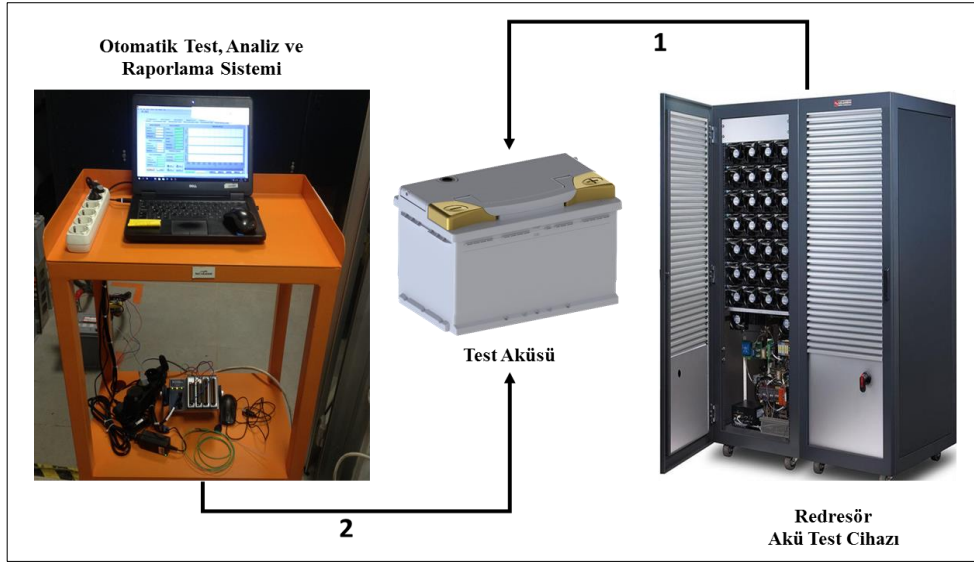
3.3. Akü Test Adımları ve Test Bağlantı Şemaları

Bu alt başlık altında akülerin redresör sistemi ve geliştirilen ölçüm sistemi ile olan bağlantı şemaları, elektriksel bağlantı diyagramları ve test adımları ile ilgili detayları verilmiştir.

3.3.1. Otomatik Test, Analiz ve Raporlama Sistemi ile Akü Bağlantısı

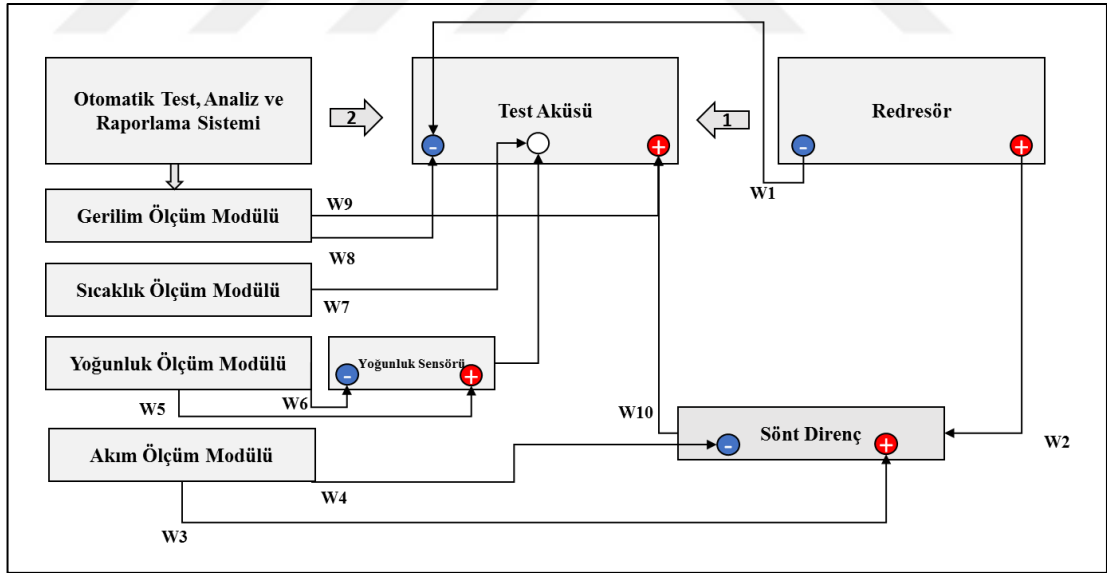
Şekil 3.21’de test sisteminde yer alan ana bileşenler yer almaktadır. 1 numaralı bağlantı yönü test aküsü ile redresör arasındaki elektriksel bağlantıları ifade etmektedir. 2 ile ifade edilen bağlantı yönü ise test aküsü ile geliştirilen sistem arasındaki bağlantıları temsil etmektedir.

1 numaralı yönde redresör + terminali ve – terminali akünün ilgili kutbuna bağlanmaktadır. 2 numara ile belirtilen yönde, geliştirilen sisteme giriş yapan akım, gerilim, sıcaklık ölçümleri için gerekli bağlantıları ifade etmektedir. Temsili olarak belirtilen bu bağlantı yönlerinin detaylı şeması Şekil 3.21’de verilmiştir. Geliştirilen sistem ile yapılan tüm testlerde bu bağlantı diyagramları dikkate alınarak deney düzenekleri kurulmuştur.

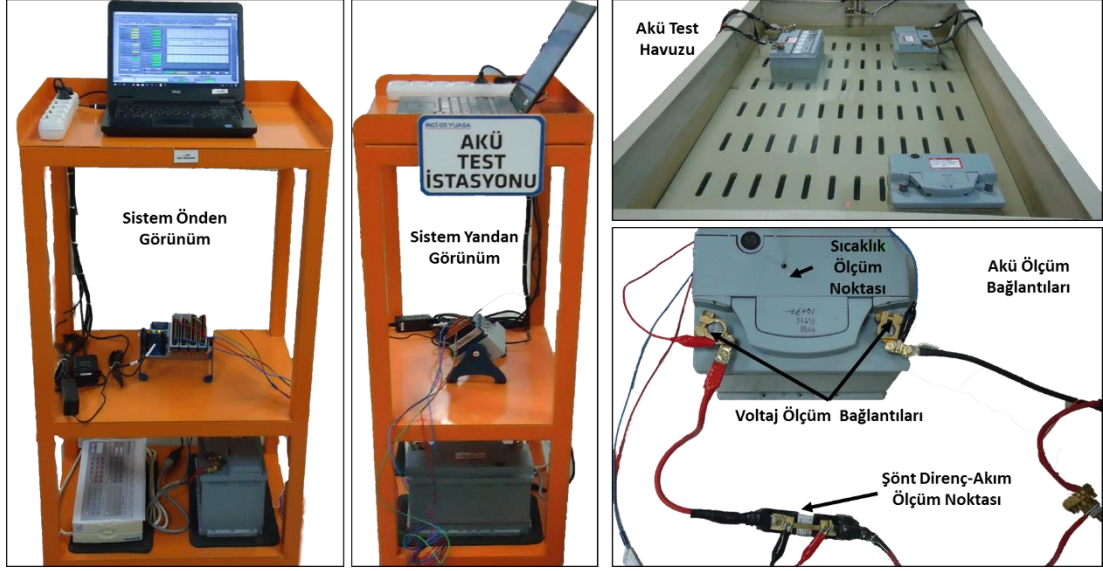


Şekil 3.21. Test sistemi ana bileşenleri

Şekil 3.21’de yer alan 1 ve 2 numara ile ifade edilen bağlantı yönlerinin detaylı bağlantı şeması Şekil 3.22’de verilmiştir. Şekil 3.23’de ise geliştirilen sistemin görseli, akü test havuzu ve aküden ölçüm alınan noktaların görsel tanımlamaları verilmiştir.



Şekil 3.22. Bu tez kapsamında kullanılan akü test bağlantı şeması



Şekil 3.23. Geliştirilen sistem, ölçüm noktaları ve akü test havuzuna ilişkin görsel

3.3.2. Test Başlatma ve Bitirme Adımları

Bu tez kapsamında test edilecek akülere uygulananan temel test adımları Tablo 3.16'da tanımlanmıştır.

Tablo 3.15. Test başlatma ve bitirme adımları

Adım No	Operasyon Adı	Açıklama	İlgili Görsel	Detay
1	Test Öncesi Ölçüm	Aküye ilişkin voltaj, iç direnç, yoğunluk, ağırlık gibi parametreler ölçülür.	Manuel	Manuel
2	Redresör Bağlantı	Redresör çıkışı akünün kutup başlarına bağlanır.	Şekil 3.19	W1-W2 arası hatlar
3	Ölçüm Sistemi Bağlantı	İlgili görselde yer alan tüm elektriksel ve sensör bağlantıları yapılır.	Şekil 3.19	W3-W10 arası hatlar
4	Ölçüm Sistemi Veri Girişi	1 numaralı adımda alınan ölçümler ölçüm sistemine giriş yapılır.	Şekil 3.17	1 ve 2 ile belirtilen alanlar
5	Ölçüm Sistemi Başlatma	Ölçüm sistemi veri toplama işlemine başlar.	Şekil 3.17	4 ve 6 ile belirtilen alanlar
6	Redresör Sistemi Başlatma	Redresör kontrol bilgisayarından ilgili test programı başlatılır.	Şekil 3.18	1 no'lu yön aktif
7	Redresör Sistemi Durdurma	İlgili test programı tamamlandığında redresör enerji aktarımını keser.	Şekil 3.18	1 no'lu yön pasif
8	Ölçüm Sistemi Durdurma	Veri toplama işlemi durdurulur.	Şekil 3.18	2 no'lu yön pasif
9	Test Sonrası Ölçüm	Aküye ilişkin adım 1'de belirtilen parametreler tekrar ölçülür.	Manuel	Manuel
10	Test Sonucu	Ölçüm sisteminden elde veriler test sorumlusu tarafından kayıt altına alınır.	Manuel	Manuel

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde TS EN-50342-1:2016 standardında yer alan ve bir önceki bölümde teorik alt yapısı açıklanan elektriksel performans testlerine ait mevcut test verileri analiz edilmiş ve geliştirilen sistem ile elde edilen tez bulguları verilmiştir. Bir önceki bölümde de belirtildiği üzere aküden akım, gerilim, sıcaklık ve yoğunluk ölçümlerinin kullanılarak testlerin analiz ve takibinin yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda yoğunluk ölçüm sensörünün tasarımında yaşanan ölçüm kararsızlığı nedeniyle otomatik test analiz ve raporlama sisteminde yoğunluk sensörü bağlantısı yapılmamıştır. İlgili standartta yer alan elektriksel testlere ilişkin test bulguları aşağıda yer almaktadır.

4.1. Şarj Testi ve Analizi

Akülere şarj testi bir önceki bölümde yer alan Tablo 3.1’de verilen kriterler doğrultusunda yapılmaktadır. Bu başlık altında akü şarj karakteristiği incelenmiştir. Örnek olarak 95 Ah nominal kapasiteye sahip bir akü geliştirilen sistem ile test ve analiz edilmiştir.

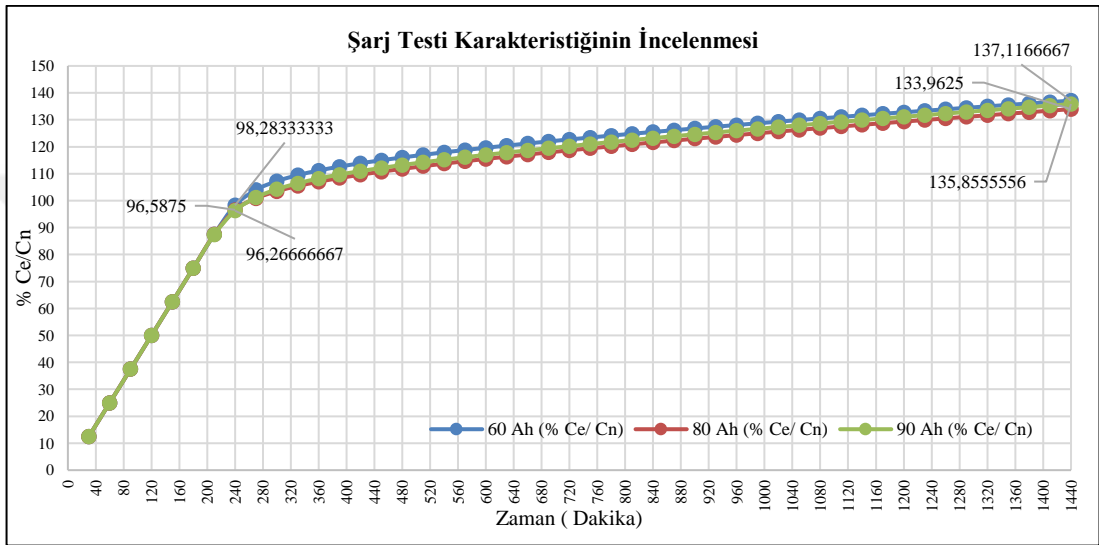
4.1.1. Şarj Testi Karakteristiğinin İncelenmesi

Şarj testi karakteristiğinin belirlenmesi için otomotivde yaygın olarak kullanılan 60 Ah, 80 Ah ve 90 Ah kapasiteye sahip akülerin şarj verileri grafiksel olarak analiz edilmiştir. Bu analiz sonuçları otomatik test, analiz ve raporlama sistemi şarj testine girdi olarak kullanılmıştır. Şekil 4.1’de referans olarak kullanılan aküler 24 saat süre boyunca, 16 V sabit voltaj ve $5 \times I_n$ maksimum şarj akımıyla şarj edilmiştir. Bu testlere ilişkin redresör dataları incelenmiş ve etkin kapasitelerinin nominal kapasitelerine oranları grafiksel olarak analiz edilmiştir.

Şekil 4.1’den görüleceği üzere aküler bu testin 240. dakikasına kadar nominal kapasitelerinin ortalama $97 \pm 1\%$ ’i kadar şarj olmaktadır. Testin geriye kalan 1200 dakikası boyunca ise nominal kapasitenin $37 \pm 2\%$ ’si kadar ilave şarj olmaktadır. Tablo 4.1’de farklı kapasitedeki akülerin şarj esnasındaki şarj kapasite değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. 60Ah, 80 Ah ve 90 Ah akülerin şarj kapasiteleri

Kapasite (Ah)	% (Ce/ Cn)	
	240. dakika	1440. Dakika
60	98,28	137,11
80	96,58	135,85
90	96,26	133,96
Ortalama	97,04	135,64



Şekil 4.1. Farklı kapasitedeki akülerin şarj testi karakteristiği

4.1.2. Şarj Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi

Tablo 4.1’de verildiği gibi etkin kapasitenin nominal kapasiteye oranının zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre kapasitenin belirgin değişimi testin 240. dakikasından sonra meydana gelmektedir. Bu bulgular dahilinde örnek bir aküye şarj testi uygulanmıştır.

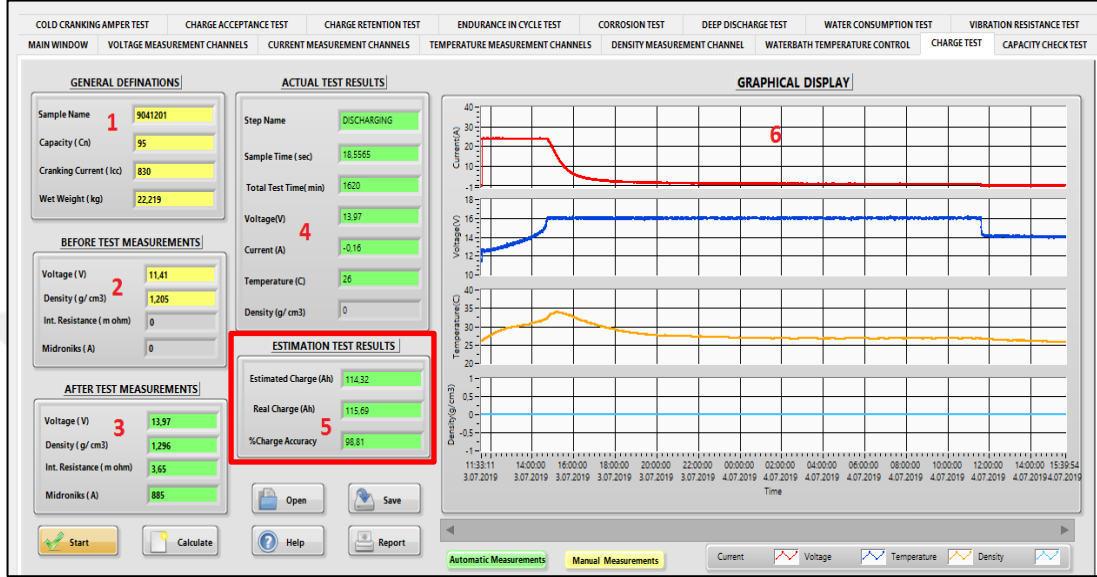
Şekil 4.2’de 95 Ah kapasiteye sahip bir otomotiv aküsü geliştirilen sistem ile test edilmiştir. 5 numara ile ifade edilen tahmin sonuçları bölümünde testin 240. dakikasını tamamlandığında program otomatik olarak test sonu aküye aktarılacak şarj miktarını 114,32 Ah olarak hesaplamıştır. Test tamamlandığında ise aküye aktarılan gerçek kapasite 115,69 Ah olarak sistem tarafından ölçülmüştür. Şarj testinin tahmin doğruluğu aşağıdaki eşitlik kullanılarak %98,81 olarak hesaplanmıştır.

$$\%Ch_d = (Ch_{es} / Ch_{re}) \times 100 \quad (4.1)$$

Ch_d : Şarj doğruluğu

Ch_{es} : Tahmini şarj miktarı (240. dakika sonunda yapılan otomatik hesap)

Ch_{re} : Test sonu toplam şarj miktarı



Şekil 4.2. Örnek şarj testi uygulama sonucu

Örnek test sonucuna göre geliştirilen sistemin şarj miktarı tahmin başarısı yukarıda da belirtildiği üzere %98,81'dir. Ayrıca 60 Ah ve 80 Ah kapasitedeki aküler içinde test tekrarlanmış ve tahmin başarısının %97 ±%2 aralığında olduğu doğrulanmıştır. Geliştirilen sistemde kullanılan yaklaşım ile, akünün aşırı şarj olup olmadığı da tespit edebilmektedir. Akülerin aşırı şarj olması akünün arızalı ya da rafta uzun süre bekleyip korozyona uğramış olabileceğini göstermektedir. Yukarıda belirtilen tahminleme süresi sonunda akü belirtilen sapmaların dışında şarj olmuş ise test sorumlusuna uyarı vererek akünün beklenen karakteristik dışında şarj olduğunu otomatik olarak tespit edilmektedir.

4.2. Kapasite Testi ve Analizi

Bu başlık altında kapasite testinin karakteristik özellikleri analiz edilmiş ve örnek olarak 95 Ah kapasiteye sahip bir akü geliştirilen sistem ile test edilerek geliştirilen sistemin tahmin başarısı hesaplanmıştır.

4.2.1. Kapasite Testi Karakteristiğinin İncelenmesi

Akülerde plaka sayısı ve kullanılan aktif madde miktarına bağlı olarak etikette yer alan nominal kapasite belirlenmektedir. Efektif kapasitenin nominal kapasiteden daha büyük olması durumunda akü kapasite testinden başarılı olmaktadır. Kapasite testi karakteristiğinin belirlenmesinde 60 Ah ,80 Ah ve 90 Ah nominal kapasiteli akülere kapasite testi uygulanmıştır. Bu test verileri kullanılarak akü voltajının zamana bağlı değişimi ve voltaj düşüş eğimi hesaplanmıştır. Şekil 4.3'te görüleceği üzere akü kapasite kaybettikçe voltajı azalmaktadır.

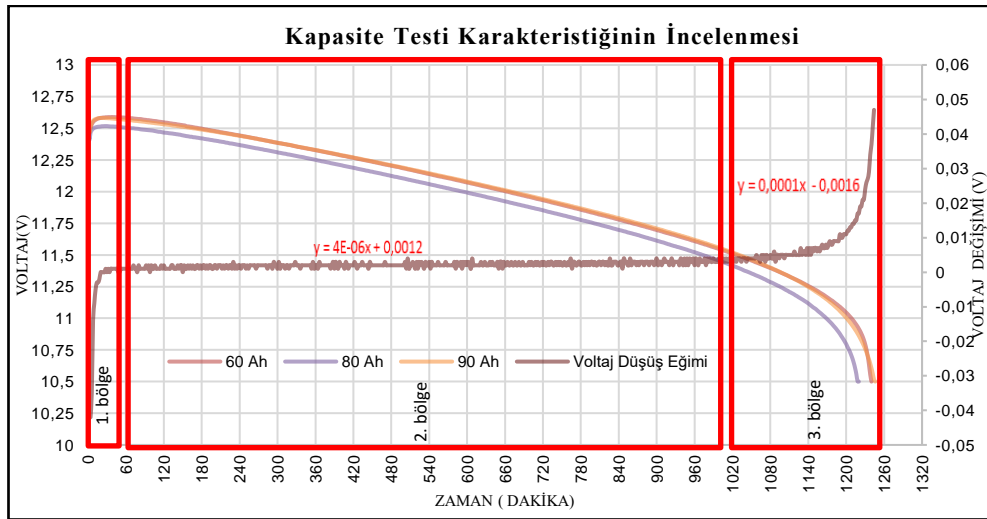
Akünün voltaj değişim hızına bağlı olarak 3 farklı bölgede test karakterize edilmiştir. 1. bölge negatif eğime sahip olduğundan kapasite tahmini hesabında kullanılmayacaktır. Akünün elektro kimyasal yapısı gereği testin ilk yarım saatlik bölümünde yüzey voltajını hızla kaybetmektedir. 2. bölgede ise sabit bir eğimle voltaj düşüşü meydana gelmektedir. 3. bölge ani düşüş bölgesi olarak adlandırılan voltajın hızla düştüğü bölümdür. Akünün kapasite tahmininde 2. bölgede belirtilen fonksiyon ve 3. bölgede belirtilen fonksiyonlar geliştirilen sistemde kapasite tespit kriteri olarak kullanılmaktadır.

$$C_{tf} = y_2 + y_3 \quad (4.2)$$

C_{tf} : Kapasite Tahmin Fonksiyonu,

y_2 : 2. Bölge voltaj değişim denklemi

y_3 : 3. Bölge voltaj değişim denklemi



Şekil 4.3. Farklı kapasitedeki akülere ait kapasite test karakteristikleri

4.2.2. Kapasite Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi

4.2 numaralı eşitlik referans alınarak 95 Ah nominal kapasiteye sahip bir akü geliştirilen sistemin kapasite testi ölçüm ve analiz sayfasında takip ve analiz edilmiştir. 1. ve 2. bölümde kapasite testi öncesi aküden manuel alınan ölçümler sisteme giriş yapılmıştır. 4. ve 6. bölümde akünün anlık olarak voltaj, sıcaklık ve akım verileri sistem tarafından ölçülerek grafiksel olarak görüntülenmiştir. 3. bölümde ise kapasite testi tamamlandıktan sonraki voltajı ve test sonunda aküden elde edilen voltaj ve sıcaklık parametreleri kullanılarak yoğunluğu hesaplanmıştır.

Şekil 4.4'te 6 numaralı bölümde görüleceği üzere akünün test esnasındaki akım, voltaj ve sıcaklık değişimleri anlık olarak takip edilerek ölçüm sistemi tarafından kapasite tahmini yapılmıştır. 5 numaralı bölümde yer alan test sonu tahmin sonuçları incelendiğinde akünün tahmini kapasitesinin 98,89 Ah olduğu görülmektedir. Test tamamlandığında ise akünün gerçek kapasitesi 99,77 Ah olarak tespit edilmiştir. Aşağıda yer alan 4.3 numaralı eşitlik kullanılarak kapasite tahmin doğruluğu hesaplanmıştır.

$$\%C_d = (C_{es} / C_{re}) \times 100 \quad (4.3)$$

C_d : Kapasite doğruluğu

C_{es} : Tahmini kapasite miktarı (Ah) (240. Dakikadaki tahmin)

C_{re} : Test sonu toplam etkin kapasite miktarı (Ah)

Örnek test sonucuna göre geliştirilen sistemin kapasite testi tahmin başarısı %99,11'dir. Ayrıca 60 Ah ve 80 Ah kapasitedeki aküler içinde kapasite testi tekrarlanmış ve tahmin başarısı %98 ±%1,5 olarak tespit edilmiştir. Aküde kapasite kaynaklı bir problem olması durumunda tahmini kapasite ile akünün nominal kapasitesi arka planda programsal olarak sorgulanmakta ve test sorumlusuna testin ilk 1 saati içinde uyarı vermektedir. Test tamamlandığında test esnasında aküden ölçülen tüm parametreler ve manuel ölçümler excel dosyasında kayıt altına alınarak raporlanmaktadır.



Şekil 4.4. Örnek kapasite testi uygulama sonucu

4.3. Marş Basma Testi ve Analizi

Bu başlık altında kapasite testinin karakteristik özellikleri analiz edilmiş ve örnek olarak 62 Ah kapasiteye sahip, etiket marş basma akımı 540 A olan bir akü geliştirilen sistem ile test edilerek sistemin CCA test tahmini hesaplanmıştır.

4.3.1. Marş Basma Testi Karakteristiğinin İncelenmesi

Akünün marş basma akımı aküde kullanılan plaka sayısı ve tasarımına göre değişiklik göstermektedir. Teoride aküde paralel bağlı plaka sayısı arttıkça akü marş basma gücü artmaktadır. 3 farklı marş basma gücüne sahip akü test edilmiş ve Şekil 4.5'te verildiği gibi voltajın zamana bağlı değişimleri grafiksel olarak analiz edilmiştir. Aşağıda 3 farklı bölgede aküye uygulanan test parametreleri açıklanmıştır.

1. Bölge : 10 saniye boyunca akü I_{cc} akımı ile deşarj edilir.
2. Bölge : 10 saniye boyunca akü bekletilir.
3. Bölge : Akü voltajı 6V olana kadar $0,6 \cdot I_{cc}$ akımı ile deşarj edilir.

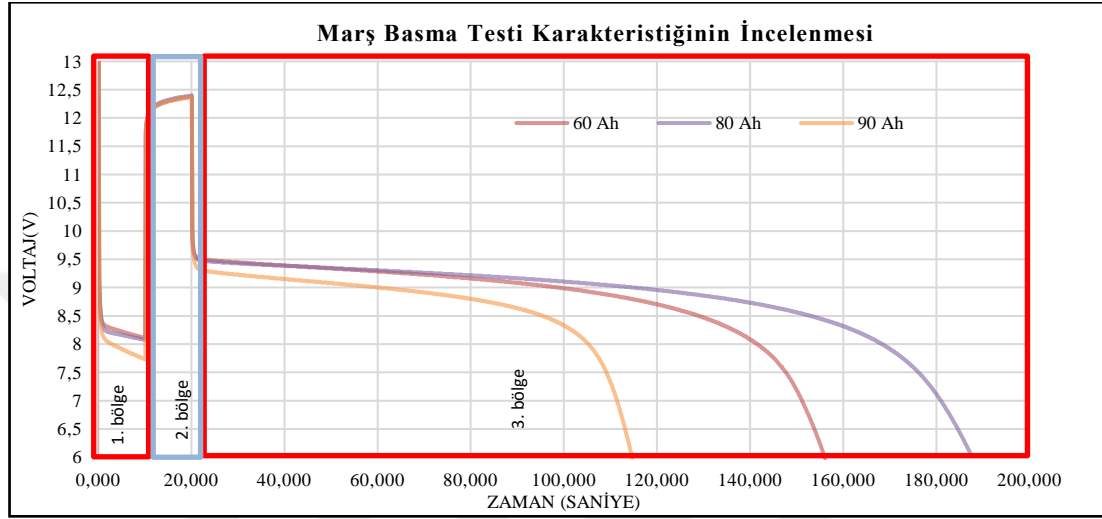
Voltajın zamana bağlı değişimi incelendiğinde 1. bölgedeki test sonu voltaj değeri 4.4 numaralı denklem kullanılarak tahmin edilmektedir. 2. bölge dinlenme fazı olduğu için test sonucuna bir etki etmemektedir. 3. Bölgedeki değişimler arasında ise lineer bir orantı bulunmamaktadır. Bu nedenle CCA testi ilk başarı kriteri olan U_{10s} sonundaki voltaj değeri ölçüm sistemine manuel olarak giriş yapılan midronics akımı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$V_{10es} = 11,5V - (CCA_{real} \div CCA_{es}) \times (11,5V - 7,5V) \quad (4.4)$$

V_{10es} : 10 saniye sonundaki voltaj tahmini, CCA_{real} : Marş basma akımı

CCA_{es} : Midronics ile ölçülen akım, 11,5V : Akünün -18 °C'deki voltajı

7,5V : Test sonu minimum akü voltajı



Şekil 4.5. Farklı CCA'ya sahip akülerin test karakteristiği grafiği

4.3.2. Marş Basma Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi

Denklem 4.4'te yer alan eşitlik referans alınarak 62 Ah nominal kapasitedeki 540 A marş basma akımına sahip bir akü geliştirilen sistemde marş basma testi ölçüm ve analiz sayfasında takip edilerek, ölçüm sistemi tarafından analiz edilmiştir. 1. bölümde aküye ilişkin temel parametreler için test sorumlusu tarafından giriş yapılmıştır. 2. bölümde ise akünün midronics akımı ve voltajı test öncesinde manuel ölçülmüştür. 2. bölümde yer alan yoğunluk ve iç direnç ölçümleri akü -18 °C'de olduğu için dikkate alınmamıştır. 4. ve 6. bölümde akünün marş basma testi anındaki voltaj, sıcaklık ve akım verileri anlık olarak sistem tarafından ölçülerek grafiksel olarak görüntülenmiştir. 3. bölümde ise marş basma testi tamamlanıp akü stabil hale geldiği durumdaki voltaj bilgisi görüntülenmektedir.

Denklem 4.4 program tarafından referans alınmış ve testin 10. saniyesindeki voltajın 7,64 V olacağı tahmin edilmiştir. Test tamamlandığında 10. saniye sonundaki voltaj değeri 7,57 V olarak ölçülmüştür. Denklem 4.5'te bu teste ilişkin % doğruluk hesabı verilmiştir.

$$\%M_d = (M_{es} / M_{re}) \times 100 \quad (4.5)$$

M_d : Marş basma testi doğruluğu

M_{es} : 10. saniye sonundaki tahmini voltaj değeri

M_{re} : 10. Saniye sonunda aküden ölçülen voltaj değeri

Yukarı detayları verilen bilgiler doğrultusunda yapılan marş basma testi sonucunda akünün marş basma testi tahmin doğruluğu %99,07'dir.



Şekil 4. 6. Örnek CCA testi uygulama sonucu

Ayrıca 830 A ve 650 A marş basma gücüne sahip akülere de test tekrarlanmış ve tahmin başarısı $\%96 \pm \%3$ olarak tespit edilmiştir. Akünün elektro kimyasal yapısı gereği yüksek akımla deşarj testlerinde test süresi arttığında voltajın zamana bağlı değişiminin matematiksel olarak bir eşitlikle ifade edilmesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle marş basma testinin test başarı kriterinden ilki olan 10. saniye sonu voltaj değeri geliştirilen sistem ile tahmin edilebilmektedir. Diğer başarı kriteri ise 6 V'a ulaşma süresidir. Testin 5 numaralı bölümünden de görüleceği üzere bu değer ölçüm sistemi tarafından ölçülmüş fakat referans bir değerle karşılaştırılmamıştır.

4.4. Çevrimsel Dayanıklılık Testi ve Analizi

Çevrimsel dayanıklılık testi literatürde %50 DoD (Dept of Discharge) testi olarak da adlandırılmaktadır. Bu test ile akünün saha koşullarındaki çevrimsel dayanıklılığı ölçülmektedir. Bu çalışma kapsamında örnek olarak 62 Ah kapasiteye sahip bir aküye uygulanan test sonuçları paylaşılacaktır.

4.4.1. Çevrimsel Dayanıklılık Testi Karakteristiğinin İncelenmesi

Çevrimsel dayanıklılık testi akünün %50 SoC'a kadar (State of Charge) deşarj edilip daha sonra %108 SoC'a kadar şarj edilmesi prensibine dayanmaktadır. Akünün çevrim seviyesine göre bu iki adım tekrarlanmaktadır. Aşağıdaki testte uygulan şarj ve deşarj adımları yer almaktadır.

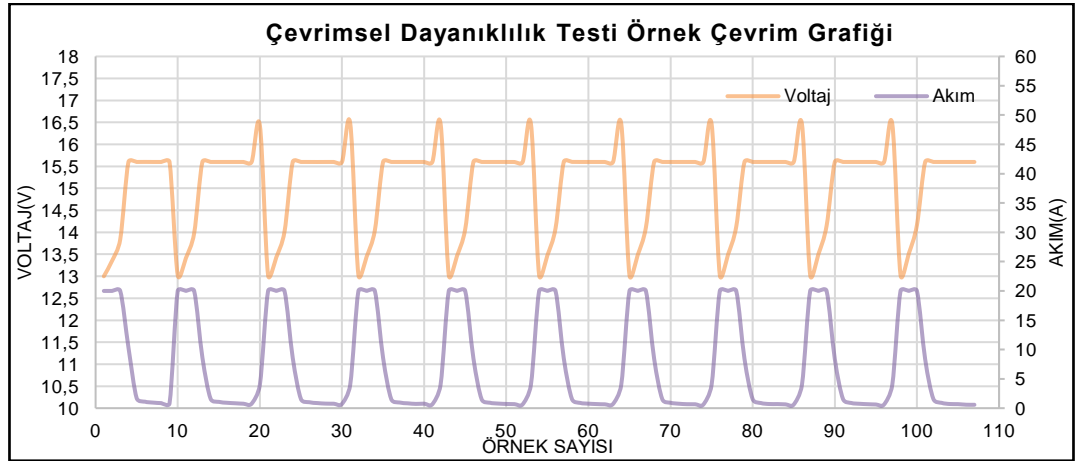
Adım 1: Akü $5xI_n$ akımı ile 2 saat deşarj edilir. Akünün %50 kapasitesi boşaltılır.

Adım 2: Akü $5xI_n$ akımı ve 16 V sabit voltaj ile 5 saat şarj edilir. Eğer 5 saat sonunda şarjda aküye aktarılan kapasite deşarjın 1,08 katı kadar olmaz ise Adım 3'e geçilir.

Adım 3: I_n akımı ile akü deşarjda kaybettiği kapasitenin 1,08 katına kadar şarj edilir.

Uyarı: Akü voltajı deşarj esnasında (20. saatin öncesinde) herhangi bir nedenden dolayı 10,5 V'un altına düşerse testten başarısız sayılır.

Şekil 4.7'de 65 Ah kapasiteki bir akünün çevrimsel dayanıklılık testinin ilk 10 çevrimindeki akım ve voltajın değişimleri yer almaktadır.



Şekil 4.7. Çevrimsel dayanıklılık testi akım ve voltaj değişimleri

65 Ah, 80 Ah ve 100 Ah kapasiteye sahip 3 farklı otomotiv aküsünün çevrim test verileri incelenmiş ve testin tipik karakteristiğine deşarj sonu voltajın zamana bağlı değişiminin analizi ile tahmin edilebileceği ön görülmüştür. Bu nedenle her bir

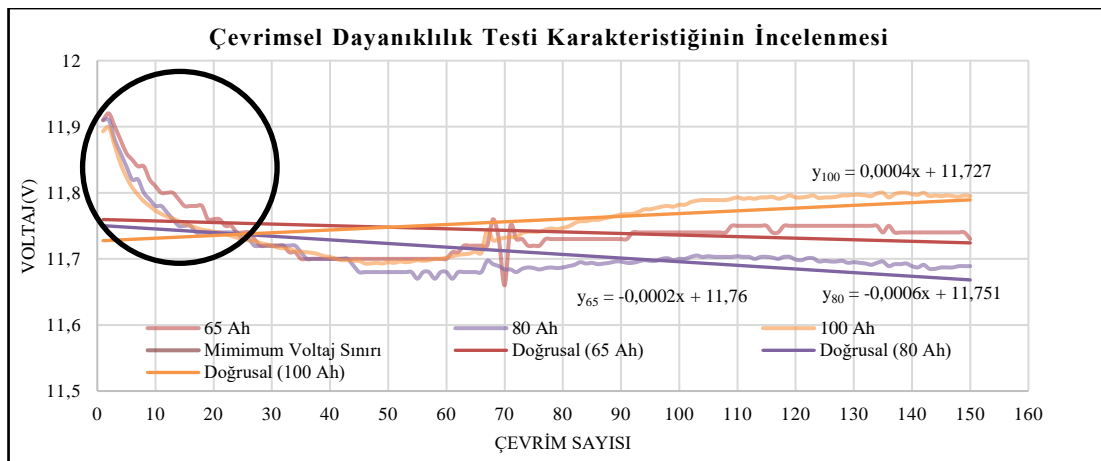
akünün çevrim sayısına bağlı voltaj değişim grafiği incelenmiş ve çevrim sayısına bağlı doğru denklemleri oluşturulmuştur.

$$y_{100} = 0,0004x + 11,727$$

$$y_{80} = -0,0006x + 11,751$$

$$y_{65} = -0,0002x + 11,76 \quad (4.6)$$

Geliştirilen algoritmaya 4.6'da yer alan denklemler giriş yapılmıştır. Çevrimsel dayanıklılık testi akünün tasarımına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Farklı kapasiteki akülerin çevrim sayısına bağlı deşarj sonu voltaj değişimleri farklılık göstermektedir. Bu nedenle her bir farklı kapasiteki akü için geçmişte yapılmış test sonuçları analiz edilmeli ve karakteristik denklem akü tasarımı ve kapasitesine göre sisteme girdi olarak verilmelidir. Bu çalışma kapsamında ise yukarıda yer alan 3 denklemin ortalaması programda tahmin fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Teorik olarak voltajın değişim hızı arttıkça akünün ömrü de azalmaktadır. Geliştirilen sistem her çevrim sonundaki minimum voltajı takip edebildiğinden arka planda voltaj değişim kontrolü algoritmasını çalıştırarak her çevrim sonunda doğrulama yapmaktadır. Çevrim ömrü eğiminde ani bir değişiklik olması durumunda ekran görsel uyarı vererek test sorumlusunu uyarılmaktadır.



Şekil 4.8. Çevrimsel dayanıklılık testi çevrim sayısına bağlı voltaj değişimleri

4.4.2. Çevrimsel Dayanıklılık Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi

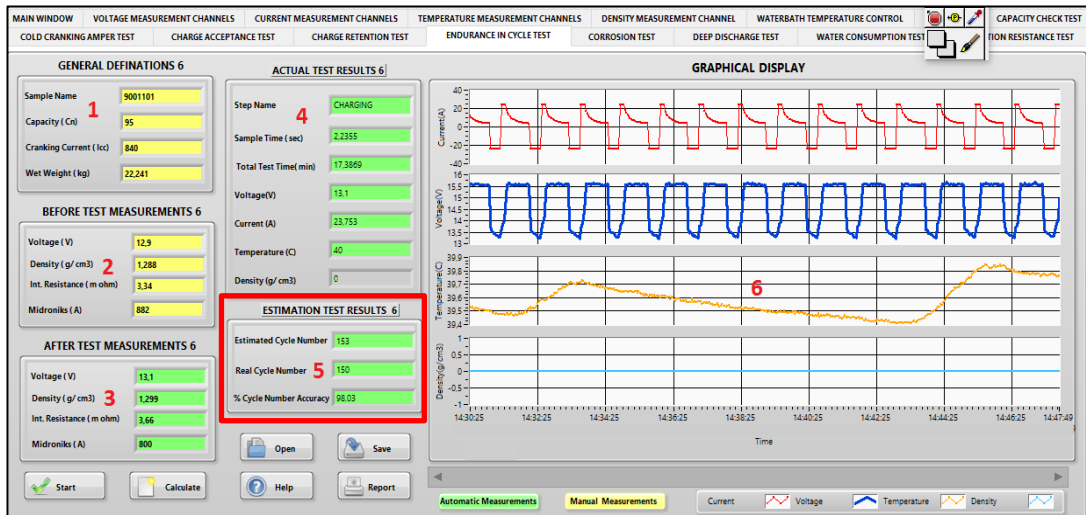
Geliştirilen ölçüm analiz ve raporlama sistemi ile 62 Ah kapasiteye ve 540 A marş basma gücüne sahip bir akünün çevrim testi takip edilmiştir. Şekil 4.8'deki veriler incelendiğinde akünün tahmini çevrim sayısının 15. çevrim tamamlandığında 153 çevrim olacağı ön görülmüştür. Şekil 4.9'da verildiği gibi ilk 15 çevrim sonunda voltajın hızla düştüğü, testin devamında ise sabit bir eğimle testin devam ettiği görülecektir. Sonuç olarak çevrim testi tahmini için uygulanan testin minimum 15 çevriminin tamamlanması gerekmektedir. Çevrim testi tahmin doğruluk oranı denklem 4.7'de yer alan eşitlik ile hesaplanmaktadır. 15. çevrim sonrası ölçüm sistemi herhangi bir nedenden dolayı akünün voltajının hızla düştüğünü tespit ederse 15. Çevrim sonunda tahmin ettiği değeri iptal ederek yeni çevrim sayısını güncellemektedir. Voltajın düşüşü için ön görülen denklemde beklenenden %5 bir düşüş olması durumunda algoritma programa öğretilen denklemi yoksayarak yeniden hesaplama yapmaktadır. Bu yönüyle değerlendirildiğinde algoritma adaptif tabanlı da çalışabilmektedir. Örnekte yer alan akünün çevrim sayısı 153 olarak tahmin edilmiş, fakat akü 150. çevrim sonunda testten başarısız olmuştur. Bu örnek için test tahmin başarı oranı %98,03'dir.

$$\%E_d = (E_{es} / E_{re}) \times 100 \quad (4.7)$$

E_d : Çevrim testi tahmin doğruluğu

E_{es} : 15. Çevrim sonundaki tahmini çevrim sayısı

E_{re} : Test tamamlandığında ulaşılan çevrim sayısı



Şekil 4.9. Örnek çevrim test sonucu

75 Ah ve 90 Ah kapasiteye sahip 2 farklı aküde test tekrarlanmış ve sistemin testi tahmin başarısı %95 ±%4 olarak tespit edilmiştir.

4.5. Korozyon Testi ve Analizi

Bir önceki bölümde detayları verildiği gibi bu test ile akülerin korozyona karşı malzeme dayanımı ölçülmektedir.

4.5.1. Korozyon Testi Karakteristiğinin İncelenmesi

Bu testte aküler 60°C'lik akü test havuzunda aşağıdaki test adımlarına göre test edilmektedir. Aşağıdaki test adımları ilgili standart gereği 4 kez tekrarlanmakta ve akünün voltajının adım 3'te uygulanan marş basma testi sonunda 7,2 V'tan daha büyük olması gerekmektedir. Tablo 4.2'de farklı kapasiteye sahip akülere her bir çevrim sonrası uygulanan marş basma testi verileri yer almaktadır.

Adım 1: 14 V sabit voltaj şarjı ile 13 gün şarj

Adım 2: Test havuzunda akü 13 gün bekletilir.

Adım 3: Daha sonra akü oda koşullarında $0,6 \times I_{cc}$ marş basma akımıyla test edilir.

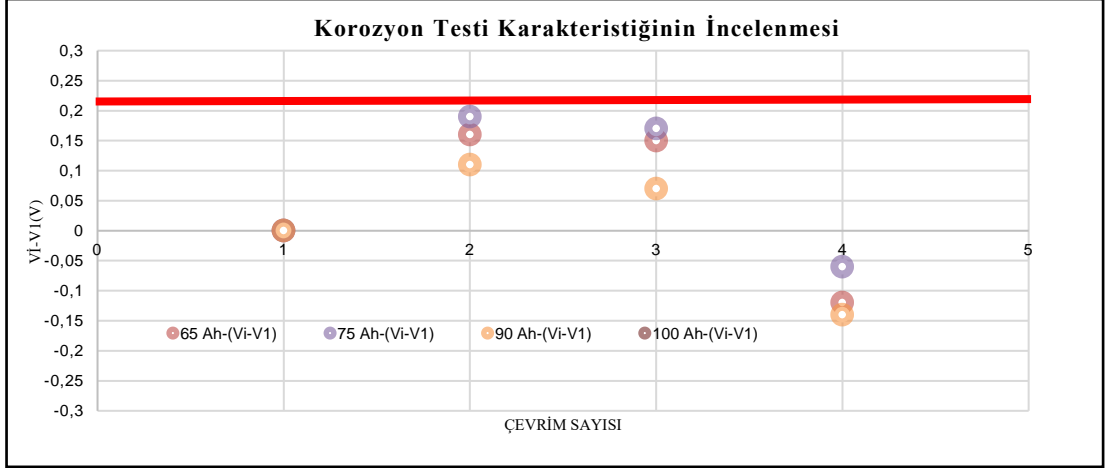
Tablo 4.2. 65Ah, 75 Ah, 90Ah ve 100 Ah akülere ait U_{30s} değerleri

Çevrim Sayısı	65 Ah- U_{30s}	75 Ah- U_{30s}	90 Ah- U_{30s}	100 Ah- U_{30s}
1	9,19	10,17	9,25	9,17
2	9,35	10,36	9,36	9,38
3	9,34	10,34	9,32	9,33
4	9,07	10,11	9,11	9,16

Tablo 4.2'de yer alan veriler akü ızgara tasarımı ve aktif madde bileşimine göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle her bir çevrimde ölçülen voltajın ilk çevrim ile olan farkının hesaplanması, karakteristiğinin daha doğru belirlenmesini sağlayacaktır. $V_i - V_1$ olarak adlandırılan bu değerlere ilişkin değişim grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.

V_i : i. Çevrimdeki voltaj değeri

V_1 : İlk çevrimdeki voltaj değeri

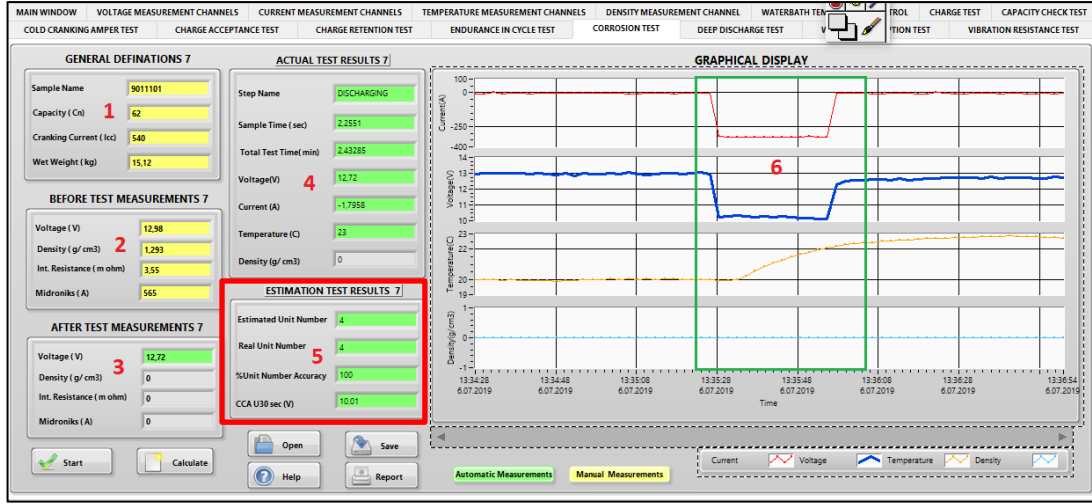


Şekil 4.10. Korozyon testi V_i-V_1 voltaj değişim grafiği

Şekil 4.9'daki voltaj fark grafiği incelendiğinde çevrimler arasındaki marş basma testlerinde maksimum 0,21 V fark meydana gelmektedir. Ölçüm sisteminin hassasiyeti dikkate alındığında 0,21 V maksimum farkın görüldüğü durum için 0,1 V ilave edilerek maksimum sınır $\pm 0,31$ V olarak sisteme giriş yapılmıştır. Bu değer dışında bir ölçüm yapıldığında program otomatik olarak farkı tespit etmekte ve çevrim tahminini revize etmektedir. Böyle bir durumda test sorumlusu akünün bir sonraki çevrimde testten kalacağını ön görerek bu test için en az 26 gün zaman kazanmış olacaktır.

4.5.2. Korozyon Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi

62 Ah-540 A etiket değerine sahip bir otomotiv aküsü korozyon testine tabi tutulmuş ve analiz edilmiştir. Şekil 4.11'de yer alan 6 numaralı bölümde 1. çevrim sonu aküye uygulanan marş basma testinin grafiksel sonucu yer almaktadır. Yeşil ile taralı alan testin uygulandığı bölgeyi ifade etmektedir. Örnek test sonucu 5. bölümde de görüleceği üzere tahmini çevrim sayısı %100 doğrulukta tespit edilmiştir. Korozyon testi tamamlanan akü daha sonra kesilerek görsel kontroller yapılmaktadır. Mekanik analiz ile de akünün deformasyona uğrayan kısımları tespit edilmektedir.



Şekil 4.11. Örnek korozyon test sonucu

4.6. Şarj Tutma Testi ve Analizi

Sıcaklığın yüksek olduğu tropikal iklime sahip bölgelerde aküler yıl içinde ortalama 40°C'lik sıcaklıkta rafta beklemektedirler. Bu bölgelerde rafta bekleyen akülerin self deşarjı hızlanmakta ve raf ömrü azalmaktadır. Bu durumun simüle edilmesi amacıyla akülere şarj tutma testi uygulanmaktadır. Testin başarı kriteri 21 gün sonundaki yüksek akımla deşarj testine bağlıdır. Bu kapsamda aşağıdaki alt başlıklarda testin karakteristiği incelenmiş, geliştirilen sistem ile yapılan örnek çalışmadan bahsedilmiştir.

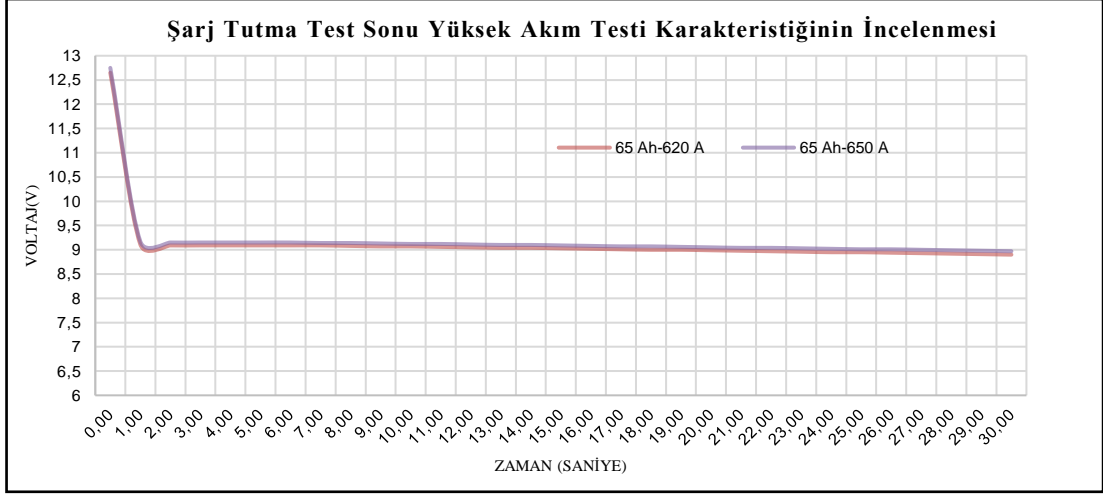
4.6.1. Şarj Tutma Testi Karakteristiğinin İncelenmesi

Kapasitesi ve marş basma testi tamamlanmış akü 40 °C'lik akü test havuzunda 21 gün boyunca bekletildikten sonra aşağıdaki test adımları ile marş basma testine tabi tutulmaktadır.

Adım 1: 40 °C'lik test havuzunda akü 21 gün bekletilir.

Adım 2: -18 °C'lik iklimlendirme kabininde 24 saat bekletilir.

Adım 3: 0,6x I_{cc} akımı ile 30 saniye boyunca akü yüksek akımda deşarj edilir. Test sonu voltaj değeri kayıtlı altına alınır.



Şekil 4.12. Yüksek akımla deşarj testi voltaj değişim grafiği

Şarj tutma testi sonunda uygulanan yüksek akımla deşarj testinin marş basma testinden farkı testin ilk adımındaki deşarj akımının $0,6 \times I_{cc}$ olmasıdır. Bu nedenle marş basma testi voltaj tahmininde kullanılan denklem referans alınarak bu test için yeniden bir voltaj tahmin bağıntısı oluşturulmuştur. Gerçek test verileri kullanılarak da bu denklem doğrulanmıştır.

$$V_{30es} = V_{bat} - (CCA_{real} \div CCA_{es}) \times (V_{bat} - C_{ret}) \quad (4.8)$$

V_{30es} : 30 saniye sonundaki voltaj tahmini

CCA_{real} : Marş basma akımı

CCA_{es} : Midronics ile ölçülen akım

V_{bat} : Akünün test öncesi ölçülen voltaj değeri

C_{ret} : Şarj tutma seviyesine göre minimum voltaj değeri

4.6.2. Şarj Tutma Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi

62 Ah-540 A etiket değerine sahip bir otomotiv aküsüne şarj tutma testi uygulanmış ve geliştirilen sistem ile analiz edilmiştir. 4.8 numaralı eşitlik geliştirilen sistem tarafından hesaplama fonksiyonu olarak kullanılmıştır. 1. bölümde aküye ilişkin temel parametreler giriş yapılmıştır. 2. bölümde akünün midronics akımı ve voltajı test öncesinde manuel olarak ölçülmüştür. 6. bölümde akünün yüksek akımla deşarj testi anındaki voltaj, sıcaklık ve akım verileri anlık olarak sistem tarafından ölçülerek grafiksel olarak görüntülenmiştir. 3. bölümde ise marş basma testi tamamlanıp akü kararlı hale geldiği durumdaki voltaj bilgisi görülecektir.

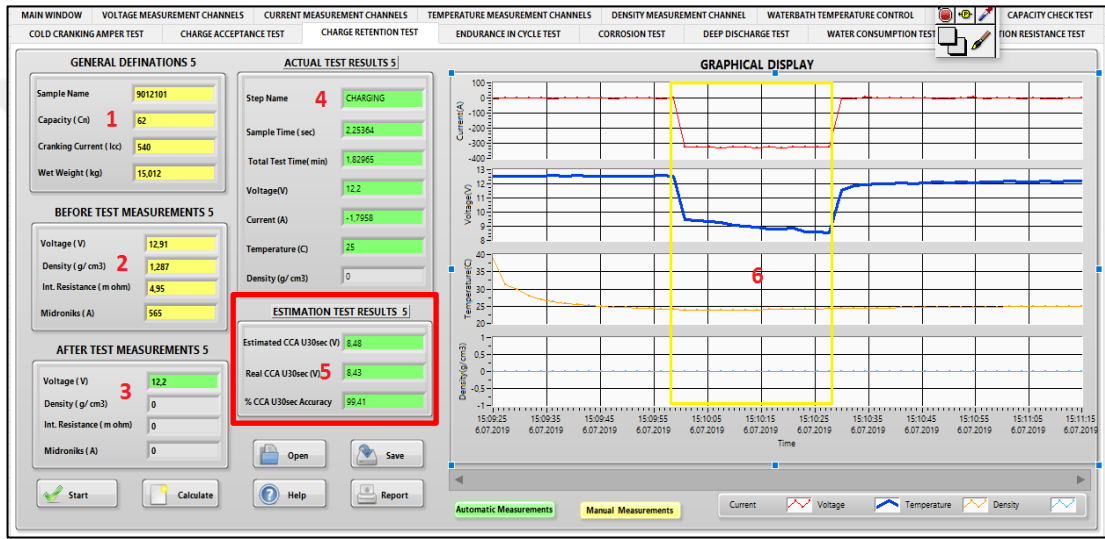
4.8 no'lu eşitlik kullanılarak 5. bölümden de görüleceği üzere sistem 30. saniye sonundaki voltajı 8,48V olarak tespit etmiştir. Test tamamlandığında 30. saniye sonundaki voltaj değeri 8,43 V olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki eşitliğe göre sistemin voltaj tahmin etme doğruluğu %99,41'dir.

$$\%Y_d = (Y_{es} / Y_{re}) \times 100 \quad (4.9)$$

Y_d : Yüksek akım deşarj testi doğruluğu

Y_{es} : 30. saniye sonundaki tahmini voltaj değeri

Y_{re} : 30. Saniye sonunda aküden ölçülen voltaj değeri



Şekil 4.13. Örnek şarj tutma testi sonucu

Yukarıda detayları verilen teste ek olarak 75 Ah ve 95 Ah kapasiteye sahip 2 farklı aküde şarj tutma testi tekrarlanmış ve tahmin başarısı %97 ±%3 olarak tespit edilmiştir. Daha öncede belirtildiği üzere akünün elektro kimyasal yapısı gereği yüksek akımla deşarj testlerinde test süresi arttığında voltajın zamana bağlı değişiminin matematiksel olarak bir eşitlikle ifade edilmesi zorlaşmaktadır.

4.7. Derin Deşarj Testi ve Analizi

Bu alt başlık altında derin deşarj testi temel test gereklilikleri incelenmiş ve geliştirilen sistem ile test edilmiş örnek test sonucu verilmiştir.

4.7.1. Derin Deşarj Testi Karakteristiğinin İncelenmesi

Bu test ile akülerin araçta herhangi bir enerji tüketicisinin açık kaldığı durum simüle edilmektedir. İlgili standart gereği bu test için başarı kriteri; test sonunda aküye uygulanan kapasite testinin, minimum nominal kapasitenin %80'i kadar olması ve test sonunda aküye uygulanan marş basma testinin 10. saniyesinde ölçülen voltajın minimum 7,5 V olması gerekmektedir. Derin deşarj testi için uygulanan test adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 1: Akü tam deşarjlı hale getirilir.(Akü voltajı 10,5 V olana kadar deşarj edilir.)

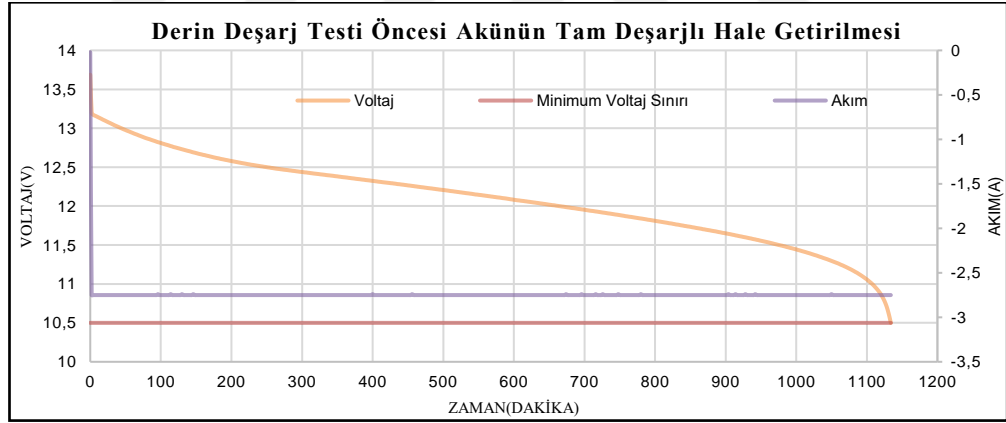
Adım 2: Akü 168 saat boyunca 10W 12 V lamba ile derin deşarja maruz bırakılır.

Adım 3: Akü tam şarjlı hale getirilir. (Tablo 3.1'e göre)

Adım 4: Kapasite kontrolü testi yapılır.(Minimum %80 x C_n)

Adım 5: 10 saniye süreyle marş basma testi yapılır.(U_{10s} ≥ 7,5V)

Adım 1'de tanımlı deşarj işlemine ilişkin 60 Ah kapasiteli bir akünün redresör verisi Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Adım 1 akünün tam deşarjlı hale getirilmesi

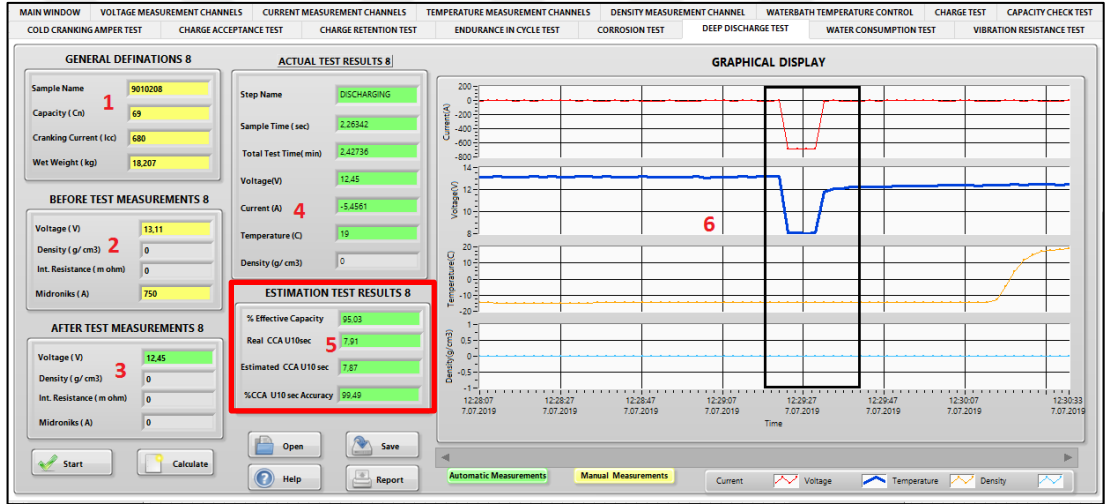
Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda derin deşarj testinin temel başarı kriterleri test sonunda aküye uygulanan kapasite testi ve marş basma testidir.

4.7.2. Derin Deşarj Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi

Derin deşarj testi ile akü uzun süre derin deşarja maruz kaldığından aküde yer alan kurşun elementi sülfata dönüşmekte buna bağlı olarak akü şarj edilse dahi geri dönüşü olmayan kapasite kayıpları yaşanmaktadır. Bu nedenle testin başarı kriteri olan kapasite kontrolünün belli bir tahmin fonksiyonu ile tespit edilmesi, sonucun

yanlış yorumlanmasına neden olacaktır. Testin diğer bir başarı kriteri olan marş basma testinin kontrolü geliştirilen sistem ile analiz edilmiştir.

69 Ah nominal kapasiteli 680 A marş basma akımına sahip bir akü yukarıda açıklanan ilk 4 adımı tamamladıktan sonra geliştirilen sistemde derin deşarj test sayfasında marş basma testine tabi tutularak analiz edilmiştir. Şekil 4.15'te 5 numaralı bölümde derin deşarj sonrası aküye uygulanan kapasite kontrol testi ve marş basma testine ait veriler yer almaktadır. Kapasite kontrol testine göre akü nominal kapasitesinin %95,03 kadar kapasite vermiştir. Marş basma testi tahmini başarısı ise %99,49 olarak ölçülmüştür. Aynı görsel üzerinde 6 numaralı bölümde test sonu aküye uygulanan marş basma testinin voltaj akım karakteristiği yer almaktadır.



Şekil 4.15. Örnek derin deşarj testi sonucu

4.8. Şarj Kabulü Testi ve Analizi

Bu alt başlık altında şarj kabulü testi karakteristik özellikleri incelenmiş ve geliştirilen sistem ile test edilen örnek bir aküye ilişkin test sonucu verilmiştir.

4.8.1. Şarj Kabulü Testi Karakteristiğinin İncelenmesi

Şarj kabulü testi ile deşarjlı bir akünün tekrar şarj olabilme yetkinliği simüle edilmektedir. İlgili standart gereği şarj kabulü için uygulanan test adımları ve grafiksel analizler aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Adım 1 : Akü 5 saat boyunca efektif kapasitesinin 10'da biri akımla deşarj edilir.

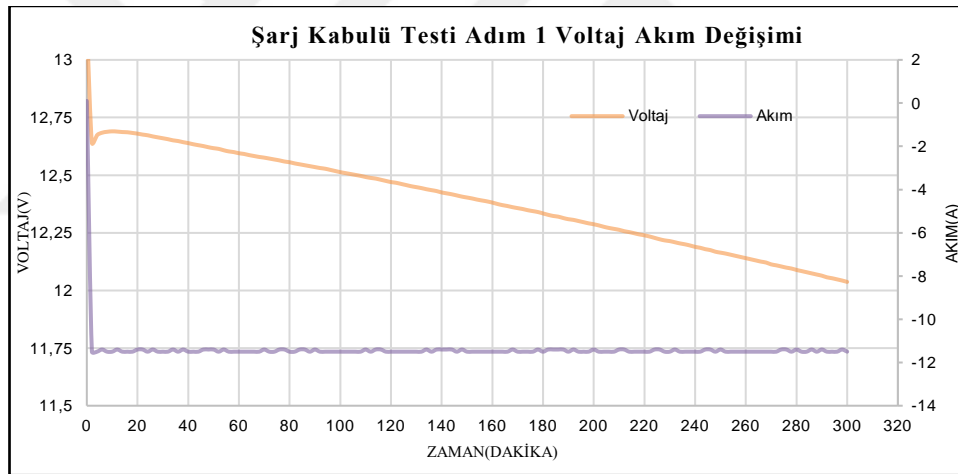
$$(I_o = C_e/10)$$

Adım 2 : Akü 0 °C'lik iklimlendirme kabiniinde 15 saat bekletilir.

Adım 3 : Akü 50 A ile 14,4 V sabit voltaj sınırı ile 10 dakika şarj edilir.

Adım 3'te tanımlı şarjın 10. dakikası sonundaki şarj akımı I_o şarj kabulü akımı I_{ca} 'nın en az 2 katı olması gerekmektedir. Tablo 3.10'da örnek test sonucu yer almaktadır.

Örnek olarak 100 Ah nominal kapasiteli bir akünün kapasite testi tamamlandığında efektif kapasitesi 115 Ah olarak tespit edilmiştir. Adım 1'de yer alan kural gereği akü 11,5 A akım ile 5 saat deşarj edilmiştir. Şekil 4.16'da Adım 1'e ilişkin görsel verilmiştir. Bu adım sonunda akü etkin kapasitesinin yarısını kaybetmektedir.



Şekil 4. 16. Şarj kabulü testi Adım 1 voltaj akım grafiği

Şarj kabulü test karakteristiğinin belirlenmesi amacıyla Adım 3'te tanımlı test verileri incelenmiş ve aşağıdaki bulgular şarj kabulü akımı tahmin fonksiyonu olarak ölçüm sistemine giriş yapılmıştır.

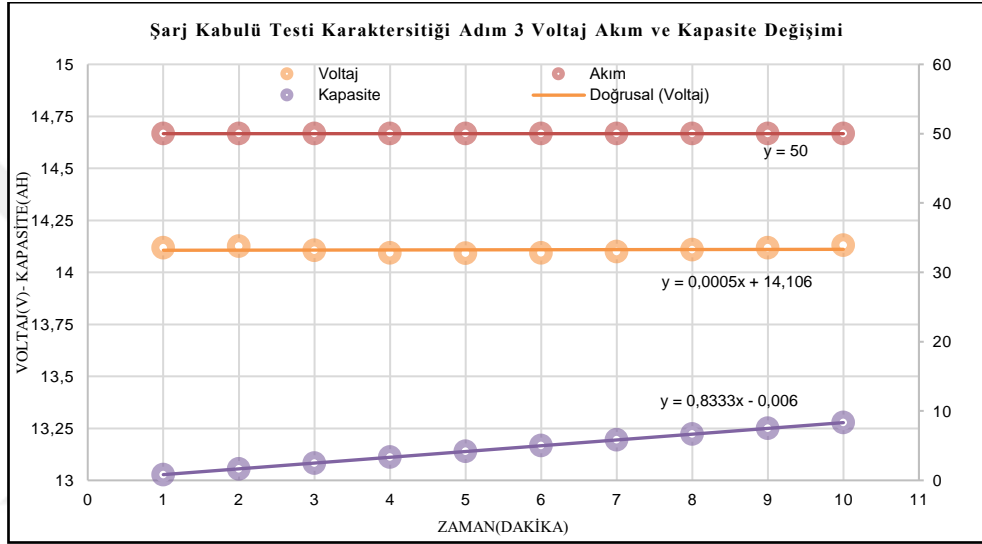
Şekil 4.17'de yer alan kapasite eğim fonksiyonu ölçüm sisteminde kullanılarak birim zamanda aküye aktarılan kapasite denkleminden yararlanılarak, 4. dakika sonunda şarj kabulü akımının tahmin edilebileceği ön görülmüştür.

$$y_{ca} = 0,833 \times t - 0,006 \quad (4.10)$$

y_{ca} : Tahmini kapasite(Ah)

t : Zaman (dakika)

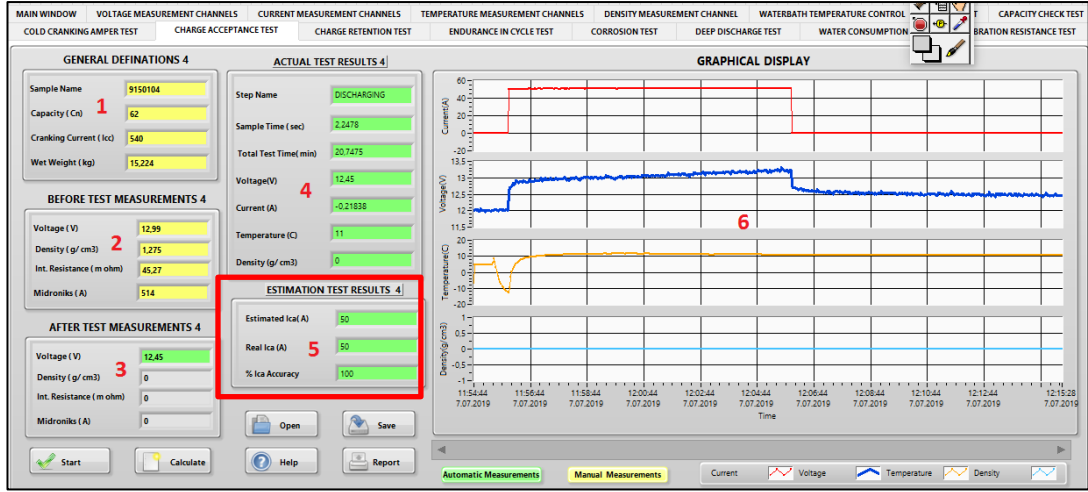
Yukarıdaki denklemin yanı sıra sistem akünün o anki voltaj ve akımını da kontrol etmekte birim zamanda aküye aktarılan kapasiteyi hesaplamaktadır. Anlık ölçülen kapasite değeri o anki tahminden büyük olması durumunda yeni tahmin olarak test sonu şarj kabulü akımını güncellemektedir.



Şekil 4.17. Şarj kabulü testi karakteristik denklemin tanımlanması

4.8.2. Şarj Kabulü Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi

62 Ah kapasiteli bir aküde uygulanan şarj kabulü testine ilişkin geliştirilen sistemden elde edilen test verileri Şekil 4.18’de yer almaktadır. 5 numaralı bölümden de görüleceği üzere şarj kabulü akımı %100 doğrulukla tespit edilmiştir. Akünün şarj kabulü tasarımına bağlı olarak da değişiklik gösterebilmektedir. Bu test için kullanılan referans fonksiyon farklı ızgara ve aktif madde yapısına sahip akülerde test edilmiş ve test sonu tahmin başarısı %90 seviyelerine kadar düşmüştür.



Şekil 4.18. Örnek şarj kabulü test sonucu

4.9. Vibrasyon Direnci Testi ve Analizi

Bu alt başlık altında vibrasyon direnci test gereklilikleri incelenmiş ve geliştirilen sistem ile test edilmiş örnek aküye ait test sonucu verilmiştir.

4.9.1. Vibrasyon Direnci Testi Karakteristiğinin İncelenmesi

Vibrasyon direnci testi akünün vibrasyona karşı dayanımının belirlendiği bir mekanik testtir. Vibrasyon testi, mekanik kontroller ve elektriksel kontroller olmak üzere 2 kısımda incelenmektedir. Teste ilişkin adımlar aşağıdaki gibidir.

Adım 1: Vibrasyon testi öncesi akü yüksek akımla deşarj yapılır. (0,6 x Icc ile ortam koşullarında hızlı deşarj)

Adım 2: Akü tam şarjlı hale getirilir. (Tablo 3.1'e göre)

Adım 3: Vibrasyon profili uygulanır. (Mekanik bir hasar veya asit sızıntısı olmamalıdır.)

Adım 4: Vibrasyon testi sonrası akü yüksek akımla deşarj yapılır. (0,6 x Icc ile ortam koşullarında hızlı deşarj)

Adım 5: Test öncesi ve sonrası uygulanan yüksek akım deşarj testleri karşılaştırılır.

Vibrasyon testi mekanik bir test olduğu için geliştirilen sistem ile akünün mekanik hasarına bağlı elektriksel test sonucunun yorumlanması zorlaşmaktadır. Bu nedenle geliştirilen sistemde test öncesi uygulanan ve sonrasında uygulanan deşarj

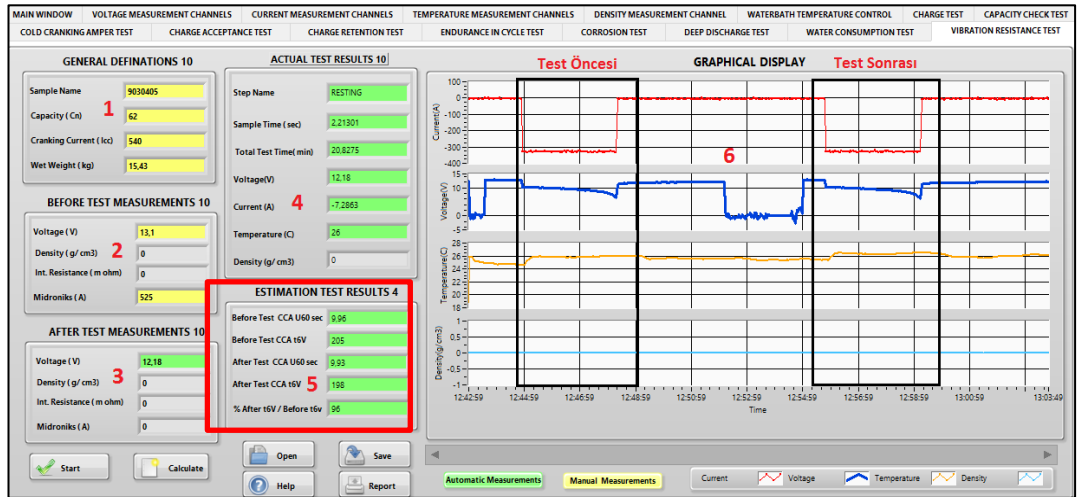
testleri takip edilmiştir. Şekil 4.19’te örnek vibrasyon direnci testi görseli yer almaktadır.



Şekil 4.19. Vibrasyon direnci testi görseli

4.9.2. Vibrasyon Direnci Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi

62 Ah-540 A etiket değerine sahip bir akü vibrasyon testi V2 profili ile test edilmiş ve geliştirilen sistemde test öncesi uygulanan yüksek akımla deşarj testi ile test sonrası uygulanan yüksek akımla deşarj testi karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Test öncesi uygulanan yüksek akımla deşarj testinde akünün 6 V’a düşme süresi 205 saniyedir. Test sonrası ise bu değer 198 saniye olarak ölçülmüştür. Testin başarı kriteri 2. test sonundaki sürenin ilk testteki sürenin en az %80’i kadar olmasıdır. Ayrıca akünün 60 saniye sonundaki voltaj değerleri 7,5 V’un üzerinde olması gerekmektedir. Şekil 4.20’de geliştirilen sistem ile test edilen akünün vibrasyon test sonucu verilmiştir.



Şekil 4.20. Örnek vibrasyon test sonucu

4.10. Su Kaybı Testi ve Analizi

Bu alt başlık altında su kaybı testinin karakteristik özellikleri incelenmiş ve geliştirilen sistem ile örnek bir akü test edilmiştir.

4.10.1. Su Kaybı Testi Karakteristiğinin İncelenmesi

Su kaybı testi ile akü 60 °C'lik test havuzunda 14,4 V sabit voltaj altında şarj edilerek standartta belirtilen su kaybı seviyesine göre su kaybı miktarı hesaplanmaktadır. Su kaybına ilişkin eski test verileri incelendiğinde 42 gün süren bir su kaybı 3 bölümde karakterize edilebilmektedir. 1. Bölge, testin ilk 4 gününü içermektedir. Test başlangıcında akü 14,4 V sabit voltaja ulaşana kadar maksimum akımla şarj edilir. 2. ve 3. bölgede ise akü sabit voltaja ulaştığından şarj akımı 1 A'in altına düşmektedir. Şekil 4.19'da su kaybı testi esnasında şarj miktarının değişim grafiği verilmiştir. Su kaybı tahmininde kullanılacak yaklaşım akünün birim Ah şarjına karşılık kaybettiği su miktarıdır. Aşağıda bu hesaba ilişkin eşitlik verilmiştir.

$$W_{es} = (Ch_{es} \times W_k) / (C_e \times 42 / t_{es}) \quad (4.11)$$

W_{es} : Su Kaybı Tahmini (gr/Ah)

Ch_{es} : Tahmin yapılan zamandaki toplam şarj miktarı (Ah)

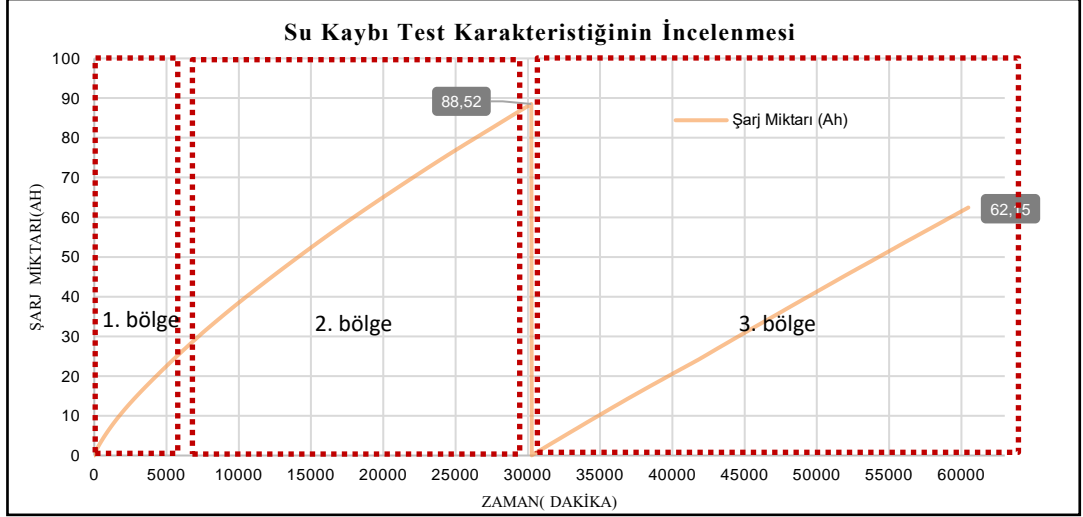
W_k : $W_{es} / C_e / W_{re}$ oranı (Ah^{-1})

W_{re} : Gerçek su kaybı miktarı (gr/Ah)

C_e : Etkin kapasite (Ah)

t_{es} : Tahminin yapıldığı zaman (saat)

4.11'de yer alan eşitlik kullanılarak akünün su kaybı testinin herhangi bir anındaki su kaybının tahmin edilmesi mümkündür. Tablo 4.3'te farklı kapasiteye sahip akülerin su kaybı bilgileri verilmiştir.



Şekil 4.21. Su kaybı testi karakteristiği

Tablo 4.3. 65Ah, 80 Ah, 100Ah ve 120 Ah akülere ait su kaybı hesap tablosu

C_n (Ah)	Ch_{ca} (Ah)	W (gr/Ah)	C_e	W_k
65	150,67	4,4	66,85	0,51223907
80	195,4	4,7	83,34	0,498853709
100	235	4,3	109,3	0,499827719
120	339	5,1	127	0,523390459

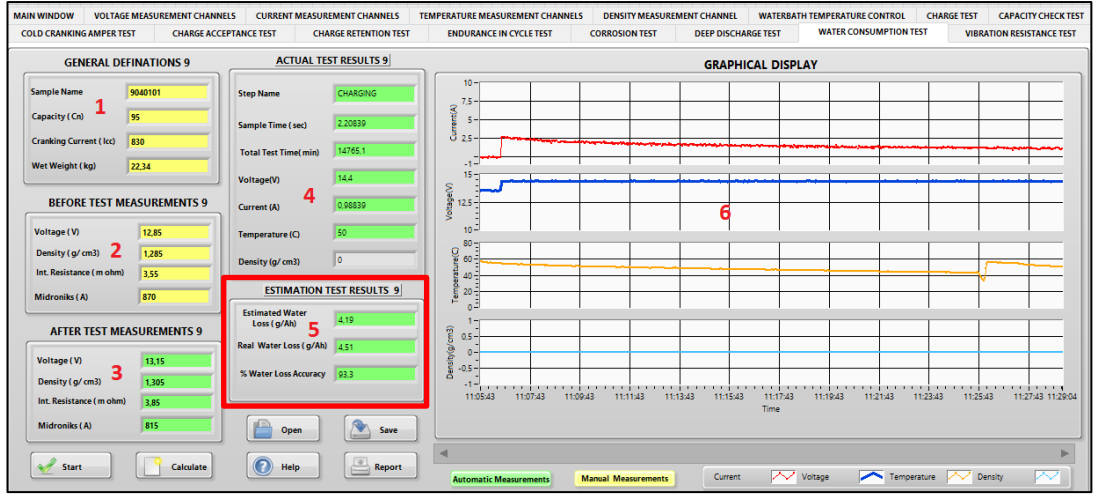
4.10.2. Su Kaybı Testinin Geliştirilen Sistem ile Analizi

95 Ah kapasiteye sahip bir akü geliştirilen sistem ile test edilmiştir. 5. günün sonunda tahmin edilen tahmini su kaybı 4,19 gr/Ah olarak sistem tarafından hesaplanmıştır. Test tamamlandığında bölüm 3'te yer alan aşağıdaki denklem vasıtasıyla gerçek su kaybı hesaplanmış ve sisteme giriş yapılmıştır.

$$W = (W_f - W_l) / C_e \quad (4.12)$$

W : Su Kaybı Miktarı, W_f : İlk Ağırlık, W_l : Son Ağırlık, C_e : Etkin Kapasite

Şekil 4.22'de yer alan 5 numaralı bölümden de görüleceği üzere sistemin testin 5. gün sonundaki su kaybı tahmini %93,3 olarak hesaplanmıştır. 80 Ah kapasitedeki akü için ise 21. gün sonu tahmin başarısı %98,8'dir.



Şekil 4.22. Örnek su kaybı test sonucu

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında geliştirilen sistem ile aküye ilişkin akım, sıcaklık ve voltaj değişkenleri veri toplama kartları vasıtasıyla elde edilmiş ve geliştirilen görsel kullanıcı ara yüzünde anlık olarak takip edilebilmiştir. TS EN-50342-1:2016 test standardında yer alan testlerin her biri için ayrı bir ölçüm ve analiz penceresi tasarlanmıştır. Geliştirilen sistemde test, analiz ve tahmin algoritması olarak kullanılmak üzere mevcut test verileri grafiksel olarak incelenmiştir. Mevcut test verilerinin detaylı analizi sonucu her teste özel test tahmini ve analiz fonksiyonları belirlenmiştir. Bu kapsamda her test için farklı kapasitedeki akülere, belirlenen elektriksel testler uygulanmıştır. Tablo 5.1’de mevcut test karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılan akü tipleri ve testlere göre örnekleme yapılan akü sayıları yer almaktadır.

Tablo 5.1. Mevcut test karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılan akü tipleri

No	Test Adı	Mevcut Test Karakteristiğinin İncelenmesi				Örnek Sayısı
		Referans Aküler				
1	Şarj Testi	60 Ah	80 Ah	90 Ah	-	3
2	Kapasite Testi	60 Ah	80 Ah	90 Ah	-	3
3	Marş Basma Testi	60 Ah	80 Ah	90 Ah	-	3
4	Çevrimsel Dayanıklılık Testi	65 Ah	80 Ah	100 Ah	-	3
5	Korozyon Testi	65 Ah	75 Ah	90 Ah	-	3
6	Şarj Tutma Testi	65 Ah	-	-	-	1
7	Derin Deşarj Testi	60 Ah	-	-	-	1
8	Şarj Kabulü Testi	100 Ah	-	-	-	1
9	Vibrasyon Direnci Testi	-	-	-	-	0
10	Su Kaybı Testi	65 Ah	80 Ah	100 Ah	120 Ah	4

Referans olarak kullanılan akü verilerinin detaylı incelenmesi sonucunda Tablo 5.2’de yer alan bulgular elde edilmiştir. Kapasite, Şarj Kabulü ve Çevrimsel Dayanıklılık testleri için doğrusal bir tahmin denklemi oluşturulmuştur. Geliştirilen sistemde bu denklem kullanılarak teste göre başarı kriterleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Derin Deşarj, Şarj Tutma ve Marş Basma testlerinde akünün midronics akımı olarak adlandırılan ve marş bakma akımını simüle eden bu akım değeri kullanılarak geçmiş tecrübelerden elde edilmiş eşitlikler test tahmin fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Bu testler için test tahmini test öncesinde yapılabilmektedir. Şarj testi olarak tabir edilen testte ise akünün zamana bağlı kapasite değişiminden

hareketle zamana bağlı basit bir eşitlikle test sonucu tahmin ve analiz edilmektedir. Korozyon testi için ise her bir çevrim sonundaki yüksek akım deşarj testi sonuçlarının farkı programa kural olarak tanıtılmış ve bir sonraki çevrimde akünün teste devam edip edemeyeceği tahmin edilmiştir. Vibrasyon direnci testi mekanik bir test olduğundan doğrusal ya da tecrübelere dayalı elde edilmiş bir eşitlikle ifade edilmesi zordur.

Tablo 5.2. Elektriksel test karakteristiği inceleme sonuçları

No	Test Adı	Mevcut Test Karakteristiğinin İncelenmesi
		İnceleme Sonucu
1	şarj Testi	Akülerin C_0/C_n oranının yüzdesel değişim grafikleri incelenerek testin karakteristik özellikleri belirlendi.
2	Kapasite Testi	Akülerin kapasite testi boyunca voltaj değişim grafiği incelenerek doğrusal denklem modeli oluşturuldu.
3	Marş Basma Testi	Akünün -18 °C'deki voltaj karşılığı referans alınarak testin 10. saniye sonu voltaj tahmin denklemi oluşturuldu.
4	çevrimsel Dayanıklılık Testi	Akülerin evrim sonu minimum voltaj değişim grafikleri incelenerek doğrusal denklem modeli oluşturuldu.
5	Korozyon Testi	Her bir çevrim sonu marş basma testi farkları incelenerek maksimum değişim limiti belirlendi.
6	şarj Tutma Testi	Marş basma testindeki denklem referans alınarak akünün şarj tutma seviyesine bağlı olarak 30. saniye sonu voltaj tahmin denklemi oluşturuldu.
7	Derin Deşarj Testi	Marş basma testi ile aynı tahmin fonksiyonu kullanıldı.
8	şarj Kabulü Testi	Akünün zamana bağlı kapasite değişimi incelenerek lineer değişim denklemi oluşturuldu.
9	Vibrasyon Direnci Testi	Mekanik test içerdiği için geliştirilen sistem ile sadece test takibi yapıldı.
10	Su Kaybı Testi	Akülerin test sonu şarj miktarları ve gerçek su kayıpları kullanılarak su kaybı tahmin denklemi oluşturuldu.

Tez kapsamında belirtildiği üzere akü testlerinin geliştirilecek ölçüm sistemi ile test sonuçları tek bir rapor üzerinde anlık görüntülenmektedir. Ayrıca sistemde kullanılan test yaklaşımları ile önceden tahmin edilmektedir. Bu kapsamda mevcut durumda testlerin sonuçlanma süreleri ile geliştirilen sistemin testleri tahmin etme süreleri Tablo 5.3'te yer almaktadır. Marş basma testi, şarj tutma testi ve derin deşarj testine ilişkin test başarı kriterleri teste başlanılmadan aküden alınan temel ölçümler kullanılarak %95 başarıyla tahmin edilmektedir. Şarj testinde 4. saat, kapasite testi ise 16. saatini tamamladığında bu ana kadar aküden ölçülen parametreler kullanılarak test sonucu %95 üzeri başarı ile tahmin edilebilmektedir. Çevrimsel dayanıklılık testinde 15. çevrimden sonra sistem yaklaşık bir çevrim sayısı hesaplamakta, test devam ederken voltajın değişimine büyük bir fark görmesi durumunda tahmin ettiği bu değeri revize edebilmektedir. Korozyon testi için sistemin en az 2. çevrimi sonunda yapılan marş basma testi sonucunu ölçmesi gerekmektedir. Bu değere bağlı olarak her bir çevrim sonunda bir sonraki çevrimde testin başarılı devam edip etmeyeceğini tahmin etmektedir. Su kaybı testi için ise 5. günden sonra sistem su kaybını tahmin edebilmektedir.

Tablo 5.3. Mevcut durum ile geliştirilen sistemin test tahmin süreleri

No	Test Adı	Mevcut Durumda Ortalama Test Sonuçlanma Süreleri	Geliştirilen Sistem ile Tahmin Edilen Zaman
1	Şarj Testi	1 gün	4. Saat sonunda
2	Kapasite Testi	1 gün	16. Saat sonunda
3	Marş Basma Testi	1-2 gün	Teste başlamadan
4	Çevrimsel Dayanıklılık Testi	30-80 gün	15. Çevrimden itibaren (6. günden sonra)
5	Korozyon Testi	120 gün	2. Çevrimden itibaren (52. günden sonra)
6	Şarj Tutma Testi	1-2 gün	Teste başlamadan
7	Derin Deşarj Testi	1-2 gün	Teste başlamadan
8	Şarj Kabulü Testi	10 dakika	4. dakika sonunda
9	Vibrasyon Direnci Testi	1-4 gün	-
10	Su Kaybı Testi	21-84 gün	5. Günden itibaren

Tablo 5.4'te bu tez kapsamında geliştirilen sistemin başarı oranları verilmiştir.

Tablo 5.4. Testlere göre geliştirilen sistemin test tahmin başarıları

No	Test Adı	% Testlere Göre Sistem Başarısı
1	Şarj Testi	%97 ±%2
2	Kapasite Testi	%98 ±%1,5
3	Marş Basma Testi	%96 ±%3
4	Çevrimsel Dayanıklılık Testi	%95±%4
5	Korozyon Testi	%100
6	Şarj Tutma Testi	%97 ±%3
7	Derin Deşarj Testi	%96 ±%3
8	Şarj Kabulü Testi	%90 ±%10
9	Vibrasyon Direnci Testi	-
10	Su Kaybı Testi	%93 ±%5

Bu çalışmada geliştirilen Otomotiv Sektöründe Kullanılan Bataryalara Yönelik Otomatik Test, Analiz ve Raporlama Sistemi ile TS EN-50342-1:2016 akü test standardında belirtilen test kuralları dikkate alınarak geliştirilen ölçüm sistemi performansı her test için ayrı ayrı belirlenmiştir. Test sonuçlarının doğruluk tahmin yüzdesinin yüksek olması, akü test çalışmalarındaki prosesin gerektirdiği bekleme zamanını azaltmaktadır.

Yoğunluk ölçüm sensörü ölçümlerinde yaşanan ölçüm kararsızlığı nedeni ile geliştirilen sisteme yoğunluk sensörü bağlantısı yapılmamıştır. İleriki çalışmalarda daha kararlı bir sensör tasarlanarak sisteme entegre edilebilir. Tasarlanan mevcut ölçüm sisteminde yoğunluk ölçüm sensörü bağlantı alt yapısı da hazır hale getirilmiştir.

Bu tez kapsamında analiz edilen elektriksel performans testlerine ait algoritmalar geliştirilerek test tahmin sonuçlarının başarımları daha da iyileştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Salameh, Z. M., Casacca, M. A., Lynch, W. A. A mathematical model for lead-acid batteries. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.1992, 7(1), 93–98.
- [2] Garche, J., Jossen, A. Battery Management Systems (BMS) for Increasing Battery Life Time. Third International Telecommunications Energy Special Conference, 10 May 2000, Dresden, Germany, (81–84).
- [3] Chatzakis, J., Kalaitzakis, K., Voulgaris, N. C., Manias, S. N., Member, S. Designing a New Generalized Battery Management System. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*. 2003, 50(5),990–999.
- [4] Rakhmatov, D., Vrudhula, S., Wallach, D. A. A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 2003, 11(6),1019–1030.
- [5] Blanke, H., Bohlen, O., Buller, S., Doncker,R.W.D., Fricke, B., Hammouche, A., Linzen, D., Thele, M. Impedance measurements on lead-acid batteries for state-of-charge, state-of-health and cranking capability prognosis in electric and hybrid electric Vehicles. *Journal of Power Sources*. 2005, 144(2), 418–425.
- [6] Wenzl, H., Baring-Gouldb, I., Kaiserc, R., Liawd, B.R., Lundsagere, P., Manwellf, J., Ruddellg, A., Svobodah, V. Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery. *J Journal of Power Sources*. 2005, 144(2), 373–384.
- [7] Kutluay, K., Çadirci, Y., Özkazanç, Y. S., Çadirci, I. A new online state-of-charge estimation and monitoring system for sealed lead-acid batteries in telecommunication power supplies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2005, 52(5), 1315–1327.
- [8] Schiffer, J., Uwe, D., Bindner, H., Cronin, T., Lundsager, P., Kaiser, R. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems. *Journal of Power Sources*. 2006, 168(2007), 66–78
- [9] Lukic S. M., Cao, J., Bansal R.C., Rodriguez,F., Emadi, A. Energy Storage For Automotives. 2008, 55(6), 2258–2267.
- [10] Valenciano, J., Fernández, M., Trinidad, F., Sanz, L. Lead-acid batteries for micro- and mild-hybrid applications . 2009, 187(2009), 599–604.
- [11] Seong, U., Burm, C., Myun, S., Tae, S., Won, B. Modeling of the capacity loss of a 12 V automotive lead-acid battery due to ageing and comparison with measurement data. 2009, 190(2009), 184–188.

- [12] Cugnet, M., Sabatier, J., Laruelle, S., Grugeon, S., Sahut, B., Oustaloup, A., Tarascon, J.M. On Lead-Acid-Battery Resistance and Cranking-Capability Estimation. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010, 57(3), 909–917.
- [13] Schaeck, S., Stoermer, A. O., Kaiser, F., Koehler, L., Albers, J., Kabza, H. Lead-acid batteries in micro-hybrid applications Part I. Selected key parameters. Journal of Power Sources. 2011, 196(3), 1541–1554.
- [14] Dufo-López, R., Lujano-Rojas, J. M., Bernal-Agustín, J. L. Comparison of different lead-acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems. Applied Energy. 2014,115(2014), 242–253.
- [15] Aküdeki kimyasal reaksiyonlar.(Web Sayfası: http://bl.com.tr/hizmetler-7-BL_aku_bakim_ve_yenileme-tr.html). (Erişim Tarihi:24 Şubat 2019).
- [16] TS EN 50342-1:2016,(2016),Kurşun asit akümülatörler - Bölüm 1. Genel Kurallar ve Deney Metotları, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü (Reference 5.2)
- [17] TS EN 50342-1:2016,(2016),Kurşun asit akümülatörler - Bölüm 1. Genel Kurallar ve Deney Metotları, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü (Reference 6.1)
- [18] TS EN 50342-1:2016,(2016),Kurşun asit akümülatörler - Bölüm 1. Genel Kurallar ve Deney Metotları, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü (Reference 6.2)
- [19] TS EN 50342-1:2016,(2016),Kurşun asit akümülatörler - Bölüm 1. Genel Kurallar ve Deney Metotları, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü (Reference 6.6)
- [20] TS EN 50342-1:2016,(2016),Kurşun asit akümülatörler - Bölüm 1. Genel Kurallar ve Deney Metotları, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü (Reference 6.7)
- [21] TS EN 50342-1:2016,(2016),Kurşun asit akümülatörler - Bölüm 1. Genel Kurallar ve Deney Metotları, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü (Reference 6.5)
- [22] TS EN 50342-1:2016,(2016),Kurşun asit akümülatörler - Bölüm 1. Genel Kurallar ve Deney Metotları, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü (Reference 6.8)
- [23] TS EN 50342-1:2016,(2016),Kurşun asit akümülatörler - Bölüm 1. Genel Kurallar ve Deney Metotları, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü (Reference 6.4)
- [24] TS EN 50342-1:2016,(2016),Kurşun asit akümülatörler - Bölüm 1. Genel Kurallar ve Deney Metotları, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü (Reference 6.10)

- [25] TS EN 50342-1:2016,(2016),Kurşun asit akümülatörler - Bölüm 1. Genel Kurallar ve Deney Metotları, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü (Reference 6.9)
- [26] Pavlov, D. Lead-Acid Batteries Science and Technology. Elsevier Science, England, 2011,656. (ISBN: 978-0-444-52882-7)
- [27] Guo, Y. A sensor of sulfuric acid specific gravity for lead-acid batteries. Sensors and Actuators B. 2005, 105 (2005) 194–198



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Osman DEMİRCİ
Doğum Yeri ve Yılı : Torul, 1992
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : odemirci@incigsyuasa.com

Eğitim Durumu

Lise : Mareşal Çakmak Anadolu Öğretmen Lisesi, 2010
Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Bölümü, 2015
Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı,2019

Mesleki Deneyim

İnci GS Yuasa Akü San. ve Tic. A.Ş 2016-....(Halen)

Yayımları

Demirci, O., Taşkın, S., Acar, B., Turan, A. Traksiyoner Tipi Aküler İçin Akıllı Redresör Tasarımı ve Uygulaması. CBÜ Fen Bilimleri Dergisi. 2016, 12(1),109-114.

Demirci, O., Acar Demirci, B., Taşkın, S. Otomotiv Akülerinde Problem Tespitine Yönelik Hücresel Ölçüm ve Hata Teşhis Sistemi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. (doi: 10.5505/pajes.2018.98105)