

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**VANADYUM REDOKS AKIŞKAN AKÜLERİN ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONUNUN BELİRLENMESİ VE PERFORMANS
ÖLÇÜMLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kenan KILAVUZ**

Anabilim Dalı : Enerji Bilim ve Teknoloji

Programı : Enerji Bilim ve Teknoloji

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**VANADYUM REDOKS AKIŞKAN AKÜLERİN ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONUNUN BELİRLENMESİ VE PERFORMANS
ÖLÇÜMLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kenan KILAVUZ
(301081016)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2011

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN (İTÜ)**

HAZİRAN 2011

Hayatta en değerli varlığım olan aileme,

ÖNSÖZ

Artan dünya nüfusu ve gelişen teknoloji enerjiye olan gereksinimi daha da arttırmıştır. Bu durum yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişmesine ve enerji verimliliği alanındaki çalışmalara hız kazandırmıştır. Talep edilen enerjinin yerli kaynaklar, yerli teknolojiler ile üretilebilir olması ve çevreci olması çok önemlidir. Bu tez çalışmasıyla uzun ömürlü ve çevreci olan bir enerji depolama teknolojisi çalışılmış olup değişken güç çıkışına sahip rüzgâr ve güneş enerjisi teknolojilerinin verimli kullanımına katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Bu çalışmanın ilgilenen herkes için faydalı olmasını umut ederim.

Bu tez çalışması süresince beni her aşamada bilgi ve deneyimleri ile yönlendiren, sabır ve anlayışla karşılaştığım problemleri çözmemde bana yardımcı olan değerli tez danışmanım sayın Prof.Dr. Altuğ Şişman'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan değerli aileme, özellikle bana her zaman rahat bir çalışma ortamı sunmak için gayret gösteren ve tezimde bana her aşamada yardımcı olan değerli eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bilgisayarımda yaşadığım teknik problemleri çözmemde bana büyük yardımı dokunan Fizik Mühendisi değerli mesai arkadaşım Adnan Bıyıklıoğlu'na ve teknik doküman paylaşımında bana destek olan değerli arkadaşım Kerem Turhan'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez konumu oluşturan Vanadyum Redoks Akü'yü enstitümüz laboratuvarına bağışlayan ve her türlü ekipman temininde desteğini esirgemeyen Ericom Telekomünikasyon ve Enerji Teknolojileri A.Ş.'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2011

Kenan Kılavuz

Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Dünyada Enerji Depolama Teknolojisi ve Doğrudan Enerji Dönüşümü	1
1.2 Tezin Konusu ve Ele Alınan Problem.....	3
1.3 Kaynak Taraması.....	4
1.4 Tezde Yapılanlar ve Elde Edilen Temel Bulgular.....	6
2. TEMEL BİLGİLER	9
2.1 Akümülatörler Hakkında Genel Bilgiler	10
2.1.1 Akü Gerilimi ve Kapasitesi	12
2.1.2 Akü Çeşitleri	14
2.2 Vanadyum Redoks Akışkan Aküler (VRB).....	16
2.2.1 Vanadyum Elementi.....	18
2.2.2 VRB Temel Bileşenleri ve Çalışma Prensibi	19
2.2.3 VRB Kurulumu ve İşletilmesi.....	25
2.2.3.1 Normal VRB Çalışması	27
2.2.3.2 Akünün Devreye Alınması	27
2.2.3.3 VRB'nin Şarj Ve Deşarjı	29
2.2.3.4 Mevcut İzleme ve İşaretleme	30
2.2.4 VRB Avantajları ve Dezavantajları	31
2.2.4.1 Avantajları	31
2.2.4.2 Dezavantajları	32
2.2.5 VRB Kullanım Alanları	32
2.2.5.1 Dünya üzerindeki mevcut VRB Kurulumları	33
2.2.6 VRB ile Kurşun Asit Akülerin Karşılaştırılması	34
2.2.7 Vanadyum Redoks Akülerin Ticarileştirilmesindeki Problemler	36
3. VRB DENEY SİSTEMİNİN TANITIMI.....	37
3.1 Deney Sisteminin Tanıtımı: Bileşenler, Ölçüm Sistemi ve Özellikleri.....	37
3.1.1 Yük Bankası.....	38
3.1.2 Rectifier (Yardımcı Ekipman - Doğrultucu).....	41
3.1.3 Multimetre.....	44
3.1.4 Sıcaklık Ölçer (Thermometer)	45
3.1.5 Deneyde Kullanılan VRB'nin Teknik Özellikleri	46
4. VRB ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER VE KARAKTERİZASYON	47
4.1 Soğuk Şarj Karakteristikleri	47

4.2 Tam Kapasite Sabit Yük İle Soğuk Deşarj Karakteristikleri.....	53
4.3 Farklı Doluluk Oranlarında Soğuk Deşarj Karakteristikleri	57
4.4 Sıcak Şarj Karakteristikleri.....	66
4.5 Sıcak Deşarj Karakteristikleri.....	72
4.6 Farklı Doluluk Oranlarında Sıcak Deşarj Karakteristikleri	76
4.7 VRB'nin Farklı Sıcaklıklardaki Performanslarının Karşılaştırılması	86
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR.....	93

KISALTMALAR

V	: Gerilim
I	: Akım
P	: Elektriksel Güç
q	: Transfer Edilen Toplam Elektrik Yüğü
t	: Zaman
E	: Enerji
F	: Faraday Sabiti
n	: Sitokiyometrik Reaksiyonun İçerdiği Elektron Sayısı
E⁰	: Standart Potansiyel
VRB	: Vanadyum Redoks Akışkan Akü
UNSW	: University of South Wales
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı
LED	: Işık Saçan Diyot

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Elektrot Malzeme Karakteristikleri	12
Çizelge 2.1 : (devam) Elektrot Malzeme Karakteristikleri	13
Çizelge 2.2 : Birincil (primary) Batarya Çeşitleri	15
Çizelge 2.3 : İkincil (secondary) Batarya Çeşitleri	16
Çizelge 3.1 : Ölçümü Gerçekleştirilen VRB Teknik Özellikleri.....	46
Çizelge 4.1 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları.....	47
Çizelge 4.1 : (devam) Soğuk Şarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları....	48
Çizelge 4.2 : Tam Kapasite Sabit Yük İle Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları.....	53
Çizelge 4.3 : Farklı Doluluk Oranlarında Sabit Yük İle Soğuk Deşarj Deneyi Ölçüm Sonuçları	57
Çizelge 4.3 : (devam) Farklı Doluluk Oranlarında Sabit Yük İle Soğuk Deşarj Deneyi Ölçüm Sonuçları.....	58
Çizelge 4.4 : Farklı Doluluk Oranlarında Farklı Sabit Yük İle Deşarj Deneyi Ölçüm Sonuçları	64
Çizelge 4.5 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları	67
Çizelge 4.6 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları	72
Çizelge 4.7 : Farklı Doluluk Oranlarında Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları.....	77
Çizelge 4.8 : Farklı Doluluk Oranlarında Sabit Yük İle Deşarj Deneyi Ölçüm Sonuçları	83
Çizelge 4.9 : Farklı Sıcaklıklarda Akü Açık Devre Gerilimi ve Akü İç Direnci.....	87
Çizelge 4.10 : Farklı Sıcaklıklarda İç Direnç ve Açık Devre Hesabı Katsayıları	88

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dünya Nüfus Artışı Beklentisi	1
Şekil 1.2 : Dünya Geneline Enerji Depolama Teknolojilerindeki Yatırımlar	2
Şekil 2.1 : Daniel Hücresi Çalışma Prensibi	10
Şekil 2.2 : Hücrede Gerçekleşen Elektrokimyasal Olay (Deşarj).....	11
Şekil 2.3 : VRB patent sahibi Maria Skyllas-Kazacos	16
Şekil 2.4 : Vanadyum Redoks Akışkan Akü	17
Şekil 2.5 : Vanadyum Elementinin Periyodik Tablodaki Yeri	18
Şekil 2.6 : Vanadyum Elementinin Atomik Yapısı	18
Şekil 2.7 : Vanadyum Redoks Akü Bileşenleri ve Sistem Genel Görüntüsü	19
Şekil 2.8 : VRB Üzerindeki Hücre Yığını (Cell Stack) Teknik Çizimi	20
Şekil 2.9 : VRB Üzerindeki DC Motor ve Pompa Çifti Görüntüsü	21
Şekil 2.10 : VRB Üzerindeki Akış (a) ve Sıcaklık (b) Sensörleri	21
Şekil 2.11 : VRB Akü Kontrol Modülü Bileşenleri	22
Şekil 2.12 : Elektrolit Soğutma Ünitesi	22
Şekil 2.13 : Şarj ve Deşarj Süreçlerindeki İyon Değişim Durumu	23
Şekil 2.14 : Şarj Sürecinde VRB Temel Akış Şeması	23
Şekil 2.15 : Deşarj Sürecinde VRB Temel Akış Şeması.....	24
Şekil 2.16 : VRB Sıvı Yönetimi Kurulum Terazisi Bileşenleri ve Yapısı	26
Şekil 2.17 : VRB – Kurşun Asit Akü Mukayese	34
Şekil 2.18 : VRB Açık Devre Geriliminin Şarj Oranı ile Değişim Grafiği	35
Şekil 2.19 : Kurşun-Asit Akünün Açık Devre Geriliminin Şarj Oranı ile Değişimi	35
Şekil 3.1 : Deney Sistemi Temel Bileşenleri ve Bağlantı Şeması	37
Şekil 3.2 : Yük Bankası İçin Hazırlanılan Alüminyum Profil ve Montaj Aparatları	38
Şekil 3.3 : Yük Bankası İçin Hazırlanılan Alüminyum Profil ve Montaj Aparatları	39
Şekil 3.4 : 10 Adet Eşdeğer Direncin Alüminyum Profil Üzerine Montajı.....	40
Şekil 3.5 : Direnç Kademelerini Anahtarlama Kullanan Sigorta Kutusu.....	40
Şekil 3.6 : 5 kW Gücünde DC Yük Bankası	41
Şekil 3.7 : Deneylerde Kullanılan Rectifier Görüntüsü.....	42
Şekil 3.8 : Rectifier RS232 Bağlantısını Aktif Hale Getiren Ara yüz Görüntüsü	42
Şekil 3.9 : Şarj Akımını Sınırlamak İçin Kullanılan Rectifier Arayüz Görüntüsü	43
Şekil 3.10 : Veri Kaydına İmkân Tanıyan Rectifier Arayüz Görüntüsü	44
Şekil 3.11 : Deneyler Esnasında Kullanılan Multimetre	44
Şekil 3.12 : Deneyler Boyunca Akışkan Sıcaklığını Ölçmek İçin Kullanılan Dijital Termometre	45
Şekil 4.1 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Zaman (t) Grafiği	48
Şekil 4.2 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Transfer Akımı (I) – Zaman (t) Grafiği.....	49
Şekil 4.3 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Kapasite (q) – Gerilim (V) Grafiği.....	49
Şekil 4.4 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Enerji (E) - Gerilim (V) Grafiği	50
Şekil 4.5 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Akım (I) Grafiği	50

Şekil 4.6 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Güç (P) – Zaman (t) Grafiği	51
Şekil 4.7 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Güç (P) – Akım (I) Grafiği.....	51
Şekil 4.8 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Kapasite (q) – Zaman (t) Grafiği.....	52
Şekil 4.9 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Enerji (E) – Zaman (t) Grafiği.....	52
Şekil 4.10 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Zaman (t) Grafiği.....	54
Şekil 4.11 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Akım (I) – Zaman (t) Grafiği	54
Şekil 4.12 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Kapasite (q) Grafiği.....	55
Şekil 4.13 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Enerji (E) Grafiği.....	55
Şekil 4.14 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Güç (P) – Zaman (t) Grafiği	56
Şekil 4.15 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Güç (P) – Akım (I) Grafiği.....	56
Şekil 4.16 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Enerji (kWh) – Zaman (t) Grafiği	57
Şekil 4.17 : Akü %100 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği	59
Şekil 4.18 : Akü %80 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği	59
Şekil 4.19 : Akü % 60 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği	60
Şekil 4.20 : Akü % 40 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği	60
Şekil 4.21 : Akü % 20 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği	61
Şekil 4.22 : Sabit İki Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı	61
Şekil 4.23 : Sabit Dört Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı	62
Şekil 4.24 : Sabit Altı Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı	62
Şekil 4.25 : Sabit Sekiz Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı	63
Şekil 4.26 : Sabit On Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı	63
Şekil 4.27 : 16 ⁰ C Ortam Sıcaklığında Farklı Doluluk Oranları İçin Akım – Gerilim Karakteristikleri.....	64
Şekil 4.28 : Açık Devre Gerilimi $V_0(V)$ 'nin Akü Doluluk Oranı İle Değişimi.....	65
Şekil 4.29 : Akü İç Direncinin Doluluk Oranı İle Değişimi.....	66
Şekil 4.30 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Zaman (t) Grafiği.....	68
Şekil 4.31 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Akım (I) – Zaman (t) Grafiği.....	68
Şekil 4.32 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Kapasite (q) Grafiği	69
Şekil 4.33 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Enerji (E) Grafiği.....	69
Şekil 4.34 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Akım (I) Grafiği.....	70
Şekil 4.35 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Elektriksel Güç (P) – Zaman (t) Grafiği.....	70
Şekil 4.36 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Elektriksel Güç (P) – Akım (I) Grafiği.....	71
Şekil 4.37 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Elektriksel Kapasite (q)-Zaman (t) Grafiği..	71
Şekil 4.38 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Elektriksel Enerji (E) – Zaman (t) Grafiği..	72
Şekil 4.39 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Zaman (t) Grafiği.....	73
Şekil 4.40 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Akım (I) – Zaman (t) Grafiği.....	73
Şekil 4.41 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Kapasite (q) Grafiği	74
Şekil 4.42 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Enerji (E) Grafiği.....	74
Şekil 4.43 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Güç (P) – Zaman (t) Grafiği	75
Şekil 4.44 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Güç (P) – Akım (I) Grafiği	75

Şekil 4.45 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Güç (P) – Akım (I) Grafiği.....	76
Şekil 4.46 : Akü %100 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği	78
Şekil 4.47 : Akü %80 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği	78
Şekil 4.48 : Akü %80 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği	79
Şekil 4.49 : Akü %40 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği	79
Şekil 4.50 : Akü %20 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği	80
Şekil 4.51 : Sabit İki Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı	80
Şekil 4.52 : Sabit Dört Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı	81
Şekil 4.53 : Sabit Altı Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı	81
Şekil 4.54 : Sabit Sekiz Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı	82
Şekil 4.55 : Sabit On Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı	82
Şekil 4.56 : 31,1 ⁰ C Ortam Sıcaklığında Farklı Doluluk Oranları İçin Akım – Gerilim Karakteristikleri.....	83
Şekil 4.57 : Açık Devre Gerilimi $V_0(V)$ 'nin Akü Doluluk Oranı İle Değişimi.....	84
Şekil 4.58 : Sıcak Deşarj Sürecinde Akü İç Direnci - Doluluk Oranı Değişimi	85
Şekil 4.59 : Farklı Çalışma Sıcaklığı ve Farklı Doluluk Oranlarında Akım - Gerilim Karşılaştırması.....	86
Şekil 4.60 : Akü Açık Devre Geriliminin Sıcaklık ve Doluluk ile Değişim Grafiği....	87
Şekil 4.61 : Akü İç Direncinin Sıcaklık ve Doluluk ile Değişim Grafiği.....	88

VANADYUM REDOKS AKIŞKAN AKÜLERİN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONUNUN BELİRLENMESİ VE PERFORMANS ÖLÇÜMLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Artan dünya nüfusu ve gelişen teknoloji insanlığın enerjiye olan gereksinimini hızla arttırmaktadır. Mevcut enerji döngüsünün büyük kısmının sonlu olan fosil yakıtlardan karşılanması ve bu yakıtların çevreye verdiği olumsuz etkileri nedeniyle insanlık yeni nesil teknolojileri geliştirmeyi ve var olan kaynakları verimli kullanmayı hedef edinmiştir. Hem rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından daha etkin bir şekilde faydalanabilmek, hem de şebeke yönetimi sayesinde enerjinin verimli kullanılmasını sağlamak için enerji depolama sistemleri büyük önem kazanmıştır. En yeni teknoloji olarak enerji depolama alanında oldukça uzun çevrim ömrüne sahip vanadyum redoks akışkan aküler bu çalışmanın temel konusunu oluşturmaktadır.

Tamamen tersinir bir elektrokimyasal redoks tepkimesi ile %100 deşarj derinliğine izin veren vanadyum redoks akışkan aküler, sistemde kullanılan elektrolit depolama tankı boyutlarına bağlı olarak istenilen kapasite miktarının ayarlanabilmesine imkân sağlar. Diğer akü çeşitleri ile karşılaştırıldığında çevrim ömrü çok yüksek olan vanadyum redoks akışkan aküler, atık problemi olmayan çevreci bir teknolojidir. Bu aküler özellikle şebekeden bağımsız çalışan uygulamalarda, şebeke yönetiminde yük derecelendirmede ve rüzgâr, güneş gibi değişken çıkışlı güç kaynaklarının stabilizasyonunda en etkili çözüm olarak görülmektedir. Ancak bu akülerin ticari olarak daha fazla yaygınlaştırılabilmesi için farklı çalışma ortamlarında nasıl bir performans gösterdiği konusunda araştırmaların sayısının artırılması gerekmektedir. Bu çalışmada 5 kW gücündeki bir vanadyum redoks akünün ortalama 16,0 °C ve 31,1 °C ortam sıcaklıklarındaki şarj ve deşarj performansı ölçülmüştür. Her iki çalışma koşulu için ayrı ayrı akım, gerilim, anlık güç ve toplam enerji değerlerinin değişim grafikleri oluşturulmuş, akü açık devre geriliminin ve akü iç direncinin sıcaklıkla ve doluluk oranıyla olan ilişkisi araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen bilgiler, vanadyum redoks tabanlı enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesine ve kullanım alanlarının artırılmasına temel oluşturacaktır.

DETERMINATION OF ELECTRICAL CHARACTERIZATION AND MEASURING PERFORMANCE OF THE VANADIUM REDOX FLOW BATTERY

SUMMARY

Increasing world population and developing technology is increased the energy need of humanity. By the reason of the fact that meeting the big portion of the current energy cycle from the finite fossil fuels and the negative effects of that fuels on the environment, humanity is aimed to improve new generation renewable technologies and use the current resources in an effective manner. Energy storing systems are become more crucial both to utilize the renewable energies such as wind and sun more effectively and to provide the efficient usage of the energy by using grid management. As the newest technology, in the energy storage field, vanadium-redox flow batteries those have significantly long cycle-life are underlined this research.

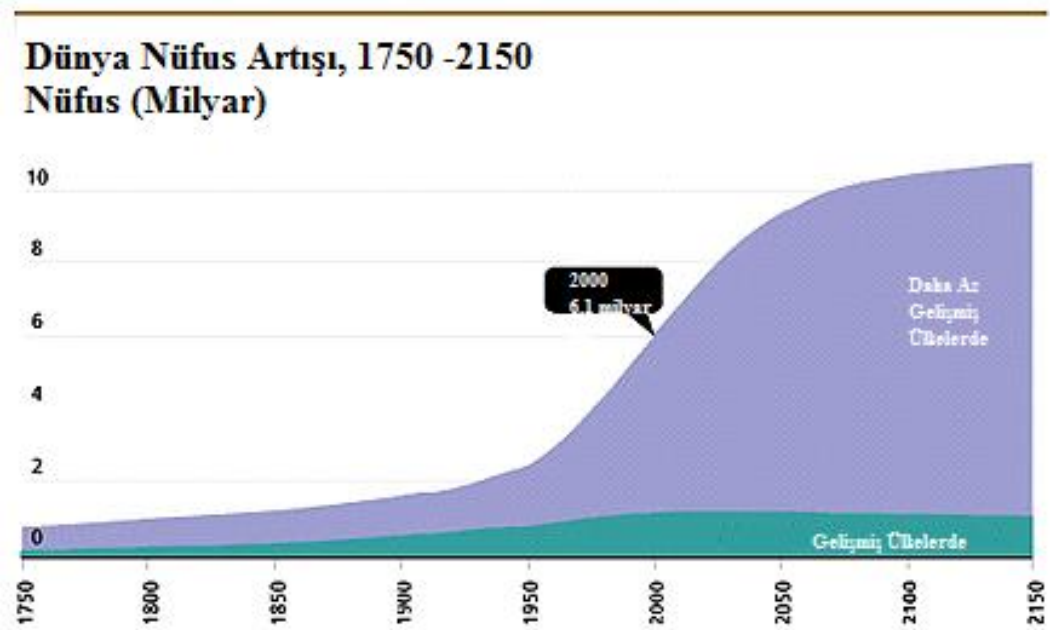
Depends on dimensions of the electrolyte storage tanks, vanadium-redoks flow batteries that let to 100% discharge with completely reversible electro-chemical redox reactions, enables adjusting the capacity. Compared to the other battery types, the vanadium-redox flow batteries that have significantly long cycle-life are environmental friendly technology without any waste problem. These batteries, especially on the applications independent from the grid, is seen as the most effective solution to load leveling in grid management and stabilization of the variable output power resources. However, to extend these batteries commercially, the researches have to be increased to understand the performance of those batteries in different working conditions. In this paper, charge-discharge performance of the 5kW power capacity vanadium redox battery, in average of 16,0 °C and 31,1 °C ambient temperature. For the two working conditions; charts of current, voltage, instantaneous power an total energy values has been established and the relation of battery open circuit voltage and battery internal resistance with temperature and state of charge has been investigated, separately. All datas that derived from this research will be a basis to developments of the vanadium-redox based energy storage technologies, and increase the areas of usage of that battery type.

1. GİRİŞ

1.1 Dünyada Enerji Depolama Teknolojisi ve Doğrudan Enerji Dönüşümü

Artan dünya nüfusu ve gelişen teknoloji, enerjiye olan gereksinimi her geçen gün arttırmaktadır. Özellikle endüstri devrimi sonrasında yaşam kalitesinin artmasına bağlı olarak insan ömrünün uzaması bu konuda büyük etken olmuştur. Mevcut enerji ihtiyacının büyük bir kısmının hâlihazırda sonlu olan fosil yakıtlardan karşılanıyor olması ve bu kaynaklardan enerji eldesinin çevreye olan olumsuz etkileri insanlığı yeni nesil enerji teknolojileri geliştirmeye ve var olan kaynakları verimli kullanmaya yönlendirmiştir.

Şekil 1.1’de verilen istatistiksel eğriden de görüleceği gibi 400 yıllık bir projeksiyon için dünya nüfusunda 10 kat artış yaşanacaktır. Bu artışla birlikte insanlığın geleceğinde beklenen en önemli temel ihtiyaç maddelerinin besin ve enerji ihtiyacı olacağı düşünülmektedir. Bu düşünce birçok ülkeyi enerji verimliliği anlamında ciddi uygulamaları hayata geçirmeye ve yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla yatırım yapmaya sevk etmiştir.

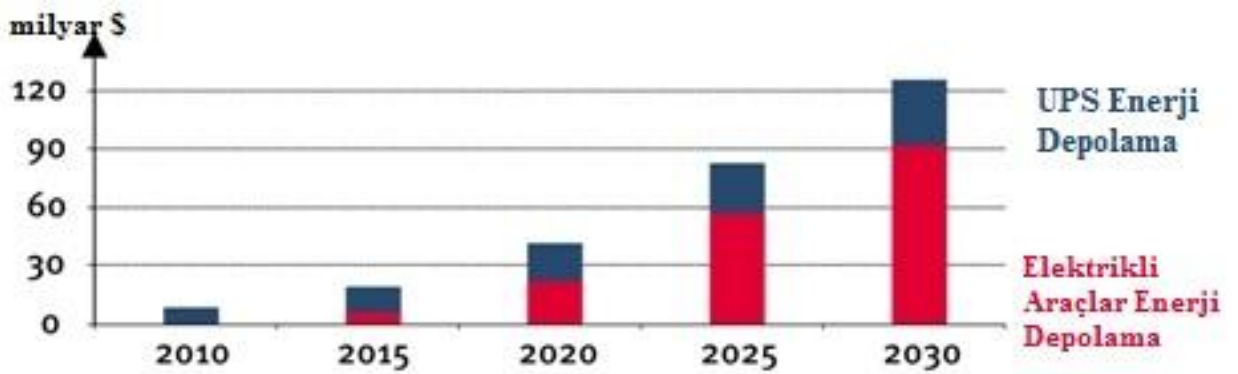


Şekil 1.1 : Dünya Nüfus Artışı Beklentisi [1].

Yenilenebilir enerji sistemleri, kaynağını doğadan alan ve çevre üzerinde kanıtlanmış herhangi bir olumsuz etkileri bulunmayan kaynaklardır. Günümüzde artık birçok ülke gelişmişlik düzeyini AR&GE yatırımlarına ayırdığı bütçeler sayesinde sürdürmekte ve başta kendi vatandaşları olmak üzere insanlığın bu artan enerji talep artışını karşılamaya çalışmaktadır.

Fosil yakıt tüketimindeki artış sonucu ortaya çıkan çevre ve sağlık sorunları yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını ve mevcut kaynaklardan en verimli şekilde yararlanmayı zorunlu kılmıştır. Rüzgâr, güneş vb. yenilenebilir enerji teknolojilerinde, enerji dönüşümünün mümkün merteye ara formlar olmadan istenilen formlara doğrudan dönüşümü temel hedefler arasındadır. Bu hedeflerin sağlanmasında ise enerjinin depolanması ve yeniden kullanılması için enerji depolama sistemleri çok önemli bir yere sahiptir. Bu anlamda enerji depolama sistemlerinin düşük maliyet, yüksek güç ve uzun ömür gibi özelliklere sahip olması beklenmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin kalitesinin artırılması ve üretilen enerjinin depolanarak ihtiyaç duyulan anda kullanılmasına yönelik yatırımlar ciddi artış göstermiştir. Şekil 1.2’de enerji depolama sistemlerine yönelik dünya genelindeki yatırımların artış eğilimi gösterilmektedir. Yatırımlardaki bu artışın çevreci elektrikli araç teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte artarak devam edeceği öngörülmektedir.



Şekil 1.2 : Dünya Genelinde Enerji Depolama Teknolojilerindeki Yatırımlar [2].

Elektrik enerjisinin elde edilmesi ve kullanımından itibaren depolanması daima düşünölmüştür. Günümüzde üretilen elektrik enerjisinin istenildiğinde kullanılması için batarya ve piller kullanılmaktadır. Evlerde, işyerlerinde, ulaşım da ve sanayide önemli miktarda pil kullanılmaktadır. Piller, motorlarda, elektronik cihazlarda, saatlerde, kameralarda, hesap makinelerinde, işitme aletlerinde, kablosuz telefonlarda, oyuncaklarda v.b. yerlerde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Hastaneler, maden ocakları, telekomünikasyon sistemleri gibi enerji sürekliliğinin kritik önem taşıdığı bölgelerde enerjinin depolanması büyük öneme sahiptir. Bu gibi noktalarda depolanan enerjinin miktarı ve depolama sistemi boyutları belirleyici rol oynamaktadır. Çevrim verimi yüksek, uzun ömürlü akü teknolojilerinin geliştirilmesi yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygınlaştırılmasında da önemli rol oynayacaktır.

1.2 Tezin Konusu ve Ele Alınan Problem

Bu çalışma, yeni bir akü teknolojisi olan “Vanadyum Redoks Akışkan Akü (VRB)”lerin elektriksel karakterizasyonlarının belirlenmesi ve performans ölçümlerinin gerçekleştirilmesine yönelik bir çalışma olarak düşünölmüştür. Hem ölkemizde hem de dünya genelinde oldukça yeni bir teknoloji olan bu akü tipinin farklı çalışma sıcaklıkları altındaki davranışı hakkında bilgi veren bu çalışmada, kullanılan teknoloji tüm yöntemleriyle ele alınmıştır. Diğer akü tiplerine göre çok yüksek çevrim ömrüne sahip olmasının ve akü kapasitesinin tamamen kullanıcı tarafından belirlenebilmesine imkân tanınmasının vanadyum redoks akışkan aküleri birçok noktada iyi bir alternatif haline getirdiği vurgulanmıştır.

Son yıllarda şebeke bağlantı noktasından uzaktaki yerleşim alanları, telekomünikasyon, uydu ve ölçüm istasyonlarının güç gereksinimleri için güneş panelleri, rüzgâr türbinleri ve akü gruplarının kullanıldığı hibrit enerji sistemleri tercih edilmeye başlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin depo edilmesi sorunu bu sistemlerin tasarımında en önemli dizayn parametrelerinden biridir.

Bu çalışmada ele VRB'ler, şebeke yönetiminde karşılaşılan talep belirsizliği probleminin çözümünde rol oynayacak, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin stabilizasyonuna olumlu yönde katkı sağlayacak, yenilenebilir enerji kaynaklarını daha ekonomik hale getirecek ve enerji piyasasına yön verebilecek yüksek ölçekli bir enerji depolama teknolojisi olarak taşıdığı önem vurgulanmıştır.

VRB'ler, enerji depolama kapasitesinin tamamen sıvı haldeki elektrolitlerin depolama tankı boyutlarına bağlı olarak kullanıcı tarafından belirlenmesine imkân tanımaktadır. Anot ve katot sıvı elektrolitlerinden enerji üreten hücrelerden istenilen sayıda alınarak hazırlanabilecek hücre yığınları sayesinde çıkış gerilimi de yüke göre ayarlanabilmektedir.

Bir akü kontrol ünitesi sayesinde kolaylıkla DC/DC veya DC/AC dönüştürücü olarak da kullanılabilen VRB'lerin kullanımlarının daha da yaygınlaşabilmesi için farklı çalışma koşullarındaki davranışlarının bilinmesi önemlidir. VRB'ler üzerine yapılan araştırmalara bakıldığında farklı sıcaklıklardaki elektriksel karakterizasyon ölçümü ve performans testlerinin elde edilmesi bakımından bu çalışma bir ilk olma özelliği taşımaktadır.

1.3 Kaynak Taraması

Vanadyum redoks akışkan aküler henüz ticarileşmeye başlamış oldukça yeni bir teknoloji olduğu için VRB teknolojisi, uygulamaları, mühendislik ve temel bilimsel hesaplamaları konusunda literatürde yer alan kaynaklar sınırlı sayıdadır. Bu tez çalışmasında yapılan kaynak araştırmasında incelenen makalelerin özeti aşağıda verilmiştir.

29 Eylül 2007 tarihinde Çin'de, Central South University, Chinese Academy of Science ve Human Agricultural University'de görevli Ke-Long Huang, Xiao-gang Li, Su-qin Liu, Ning Tan ve Li-quan Chen adlı araştırmacılar tarafından "Research Progress of Vanadium Redox Flow Battery for Energy Storage in China" (Çin'de Enerji Depolama Amaçlı Vanadyum Redoks Akülerin Gelişim Süreci) başlıklı bir makale yayınlanmıştır [3].

Makalede vanadyum kaynakları bakımından dünyada oldukça iyi sayılabilecek %11,6 'lık bir paya sahip Çin'de, yeni bir enerji depolama teknolojisi olarak VRB'lerin gelişim süreçleri anlatılmış ve bu alanda ülkedeki Ar-Ge faaliyetleri hakkında bilgi verilmiştir. Vanadyum redoks akülerin diğer redoks akülerle de mukayese edildiği çalışmada, membran ve elektrolit malzemelerindeki yeni araştırmalar anlatılmıştır. Henüz çözülmeyi bekleyen birtakım problemleri bulunsa da VRB'lerin ticari hayattaki yerini almaya başladığı, örnek ticari uygulamaların bulunduğu ve Çin'in önümüzdeki 11. Beş Yıllık Kalkınma Planları'nda bu teknolojinin özellikle vurgulandığı belirtilmiştir.

20 Eylül 2006 tarihinde yine Çin'de, Dalian Institute of Chemical Physics ve Chinese Academy of Science'da görev yapan Ping Zhao, Huamin Zhang , Hantao Zhou, Jian Chen, Sujun Gao ve Boalian Yi adlı araştırmacılar tarafından "Characteristics And Performance of 10 Kw Class All-Vanadium Redox-Flow Battery Stack" (10 kW'lık Vanadyum Redoks Akışkan Akü Performansı ve Karakteristikleri) başlıklı bir makale yayınlamıştır [4].

Yapılan çalışmada her biri 14'er adet hücre yığınının oluştuğu 70 mA cm⁻² akım yoğunluğuna sahip 1,14 kW'lık vanadyum redoks aküler 4 adet seri yığınının oluştuğu 2 paralel kol şeklinde birleştirilmiş ve toplamda enerji verimliliği %80'in üzerinde olan ve 85 mA cm⁻² akım yoğunluğuna sahip 10,05 kW gücünde bir sistem tasarlanmıştır. Hücre yığınlarının seri ve paralel farklı kombinasyonlar şeklinde bir araya getirilmesiyle toplam sistemin çevrim verimi ve akım yoğunluğu değişimi incelenmiştir.

12 Temmuz 2001 tarihinde Avusturya'da Viyana Teknoloji Üniversitesi'nde görevli Ch. Fabjan, B. Harrer, C.Kolbeck ve F.Philipp adlı araştırmacılar ile Almanya'da Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff'da görevli J. Garche, L.Jörissen, Avusturya'lı G. Tomazic ve Portekizli F.Wagner'in ortak çalışmalarıyla "The Vanadium Redox-Battery: An Aefficient Storage Unit For Photovoltaic Systems" (Fotovoltaik Sistemler İçin Verimli Bir Enerji Depolama Ünitesi: Vanadyum Redoks Aküler) başlıklı bir makale yayınlamıştır [5].

Makalede son yıllarda uzun ömrü, sıfır self-deşarj özelliği ve derin deşarj kabiliyeti ile dikkat çeken vanadyum-redoks akü teknolojisinin vanadyumun farklı yükseltgenme derecelerine sahip tepkimelerinin her biri için kaç voltluk bir açık hücre gerilimi oluşturduğu belirtilmiştir. Kapasite düşümü, şarj dengesizliği veya asimetrik elektrolit dağılımı, self deşarj olma durumu gibi problemlerin malzeme kalitesi kaynaklı olduğu belirtilmiş ve membran tasarımı, elektrolit eldesi ve seperatör malzeme teknolojisi konusundaki çalışmaların arttırılması gerektiği vurgulanmıştır. Vanadyum redoks akülerin fotovoltaik sistemler ile birlikte kullanılmasının enerji depolama yöntemi olarak oldukça iyi bir çözüm olarak görüldüğü, akü kontrol ve izleme sistemlerinin gelişmesine paralel olarak güven içerisinde şebekeden bağımsız tesislerin kurulumunun yaygınlaşacağı, ancak bu konuda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmaların dışında bir de enerji depolama sistemleri üzerine çalışan iki Japon elektrik firmasının VRB'ler üzerine yayınladığı bir araştırma raporu bulunmaktadır [6]. Kansai Elektrik ve Sumitomo Elektrik şirketlerinin ortaklaşa yayınladıkları raporda bu akü teknolojisi detaylı olarak anlatılmış, daha sonra ülkedeki yüksek kapasiteli örnek uygulamaların detayları paylaşılmıştır. Kansai Elektrik Enerjisi Ltd. Şti.'nin Tatsumi Trafo Merkezinde 1996 yılında kurduğu yer altı trafo sistemi için temel ünitesi olarak pozisyonlandırılan 450-kW'lık VRB sisteminin test çalışması anlatılmıştır. Daha sonra binalar için dizayn edilmiş ve yine yer altı tankı kullanılan 20 kW'lık sistemin geliştirilme süreci açıklanmış ve son olarak ofis binaları için yüksek güçlü 50 kW'lık örnek bir sistemin gelişim süreci paylaşılmıştır. Raporda ayrıca vanadyum redoks akü teknolojisinin ticarileştirilmesi önündeki engellere değinilmiş, bu sistemin ticari olarak da yaygınlaştırılması için Ar-Ge çalışmalarının sürdürüleceği belirtilmiştir.

1.4 Tezde Yapılanlar ve Elde Edilen Temel Bulgular

Tezin temel bilgiler bölümünde aküler hakkında temel bilgiler verilmiş ve akü kapasitesinin nasıl hesaplandığı hakkında bilgilere yer verilmiştir. VRB sistemindeki temel bileşenler sırasıyla anlatılmış, sistem çalışma prensibi açıklanmıştır. VRB'lerin kurulumu ve işletilmesine yönelik hususlar açıklanmış, VRB'lerin özellikleri ve uygulama alanları anlatılmıştır. Kurşun-asit akülerle karşılaştırılması yapılan VRB teknolojisinin avantajları ve dezavantajlarına değinilmiştir.

Tez çalışmasının temel bölümlerinden birini oluşturan deney sisteminin tanıtılması bölümünde, deneylerin hangi şartlar altında gerçekleştirildiğinin anlaşılması bakımından ölçüm sistemi bileşenleri detaylarıyla tanıtılmış ve ölçümü gerçekleştirilen VRB'ye ait teknik özellikler belirtilmiştir.

Deneysel kısımda ise $16,0^{\circ}C$ ve $31,1^{\circ}C$ olmak üzere iki farklı ortam sıcaklığında VRB önce tamamen boş haldeyken şarj edilmiş, daha sonra aynı koşullarda oluşturulan yük bankası ile tam kapasite yük altında deşarj edilmiştir. Bu şarj ve deşarj süreçleri boyunca doğrultucu (rectifier) üzerinden dakikada bir bilgisayara akım, gerilim ve sıcaklık verisi alınmıştır.

Daha sonra şarj ve deşarj süreçleri boyunca her iki ortam sıcaklığı için ayrı ayrı gerilim-zaman, akım-zaman, gerilim-kapasite, gerilim-enerji, akım-gerilim, güç-zaman, güç-akım, kapasite-zaman ve enerji-zaman gibi grafikler çizdirilmiştir.

Bu ölçümlerin yanı sıra her iki ortam sıcaklığı için de farklı doluluk oranlarında deşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir. VRB %100, %80, %60, %40 ve %20 doluluk oranlarına sahipken her bir doluluk durumunda $4,61 \Omega$ 'luk 10 direnç kademesinden oluşan yük bankası ile sırasıyla 2 – 4 – 6 – 8 ve 10 kademe sabit dirençler ile yüklenmiştir. Bu kısa süreli (1 dk'dan az) deşarj deneylerinde farklı doluluk oranlarında akım-gerilim karakteristikleri çıkartılarak akü iç direnci ve açık devre geriliminin doluluk oranıyla değişimi hesaplanmıştır.

Son olarak iki çalışma sıcaklığındaki deney sonuçları karşılaştırılmış ve her iki durum için de çevrim başına elektriksel yük (Ah) ve enerji (kWh) verimleri hesaplanarak sıcaklığın verimler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca akü iç direncinin ve açık devre geriliminin de sıcaklıkla olan ilişkileri tespit edilerek, bu farklılıkların nedenleri yorumlanmıştır.

2. TEMEL BİLGİLER

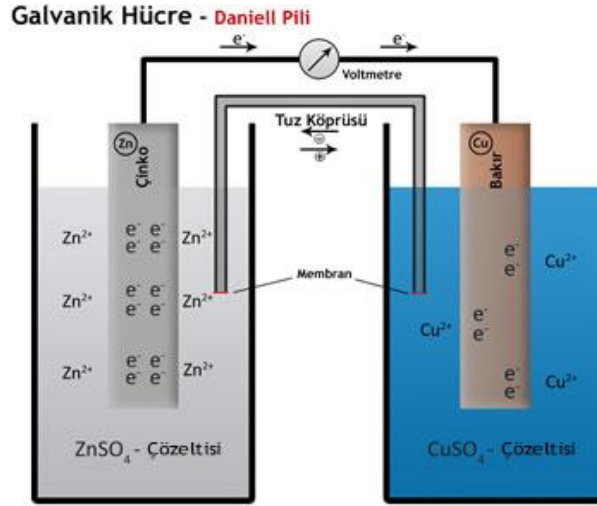
İlk kez 1748 yılında Benjamin Franklin tarafından yüklü cam plakaların arasındaki etkileşimi tanımlamak amacıyla “batarya” terimi kullanılmıştır.

1780 – 1786 yılları arasında Luigi Galvani şu an anladığımız şekliyle sinirler arası iletişimin elektriksel uyarımlar şeklinde gerçekleştiğini ispatlamış ve kendisinden sonraki Volta’nın keşifleri için mihenk taşı oluşturacak bir buluşa imza atmıştır.

1800 yılında Alessandro Volta kendi adını verdiği voltaik pili keşfederek ilk pratik elektrik üretim metodunu geliştirdi. Dairesel çinko ve bakır metallere oluşan diskler arasına tuzlu suda bekletilmiş kalın karton parçaları kullanarak voltaik pilin elektrik akımı üretmesini sağladı. İstenildiği kadar metal çifti eklenerek pilin boyunun uzatılmasıyla uç gerilimini arttırabilmenin mümkün olduğu görüldü. Alessandro Volta’nın üretmiş olduğu pil güvenilir ve kararlı elektrik akımına sahip ilk “ıslak tip batarya” olma özelliğini taşıyordu [7].

1836 yılında İngiliz John F. Daniel iki elektrolit olarak bakır sülfat ve çinko sülfatın kullanıldığı Daniel Hücresi’ni icat etti. Daniel Hücresi daha güvenli ve daha az aşındırıcı bir uygulamaydı.

Daniell Pili bakır ve çinko elektrotların kullanıldığı ve yaklaşık 1.1 volt elektrik gerilimi üreten bir pildir. Çinko soy olmayan ve bakır da yarı soy olan metaldir. Soy olmayan çinko donator (elektron verici) ve yarı soy olan bakır akseptor (elektron alıcı) olarak çalışır. Metallerin sıvı ortamda iyonlaşma gayretinden dolayı negatif yüklü olması ve çinkonun bakıra göre iyonlaşma gayretinin daha yüksek olması ikisi arasında potansiyel yük farkı oluşturur ve bu iki metali birbiri ile bağladığınız zaman bir elektrik akımı oluşur. 1,1 V’luk gerilim [$E_0(\text{Cu}) = 0,34 \text{ V}$] ve [$E_0(\text{Zn}) = -0,76 \text{ V}$] redoks potansiyeli tarafından meydana gelir. Bir yandan çinko çözünürken diğer tarafta bakır sülfürük tortu bırakır. Yük dengelemesi oluşması tuz köprüsü üzerinden gerçekleştirilir ve elektrik devre tamamlanır. Zaman içinde çinko elektrot korozyona uğrar ve bakır elektrot bakır bağlayarak ağırlaşır [8].



Şekil 2.1 : Daniel Hücresi Çalışma Prensibi [9].

Sonrasında hidrojen ve oksijen kombinasyonunda elektrik üreten ilk yakıt hücresi William Robert Grove tarafından 1839 yılında geliştirilmiştir. Bu tarihten 1942'ye kadar olan süreçte bilim adamları sıvı elektrolit kullanan aküler üzerine gelişmeler kaydettiler. Bunsen (1842) ve Grove (1839) 'un icatları en çok ön plana çıkan sıvı elektrolitli akü örnekleri olmuştur [7].

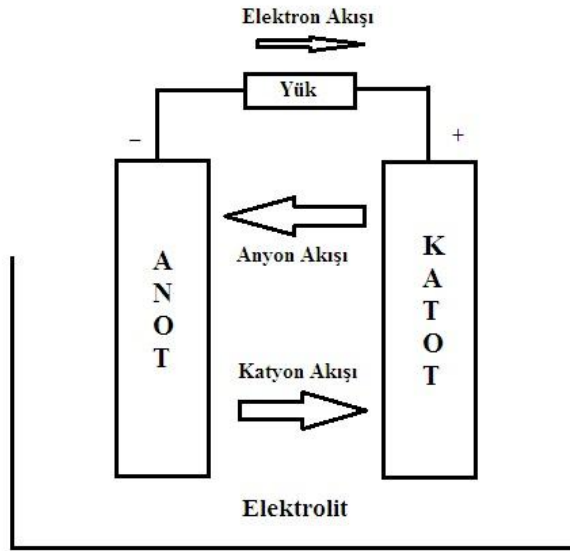
Kurşun akümülatör ilk olarak 1859 yılında Fransız Fizikçi Gaston Plante tarafından yapılmış ve üretimi hızla yaygınlaşmıştır. 1880 yılına gelindiğinde C. Faure, kurşun plakalar üzerine kurşun oksit (PbO) hamuru sıvamayı düşünerek, şarj formasyonunu çabuklaştırmış, daha büyük kapasitede akümülatörler yapılmasını sağlamıştır [10].

Akü teknolojisi ve enerji depolama sistemleri konusunda sürekli çalışan bilim adamları bugünkü ileri düzeye gelinmesini başarmışlardır.

2.1 Akümülatörler Hakkında Genel Bilgiler

Aküler en genel tanımıyla elektrik enerjisini kimyasal olarak depolayabilen, daha sonra da bu elektrokimyasal tepkimeyi tamamen tersinir olarak çalıştırarak ihtiyaç duyulduğunda elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu kimyasal tepkime elektronların bir malzemedan diğerine geçişine imkân tanır. Elektrokimyasal olmayan paslanma veya yanma gibi redoks tepkimelerinde elektron doğrudan açığa çıkar ve yalnızca ısı oluşur.

Her ne kadar literatürde “batarya” ve “hücre” terimleri aynı manalar için sıklıkla kullanılsa da, aslında batarya iki ya da daha fazla hücrenin seri veya paralel şekilde birleşimine verilen isimdir. Bir hücre Şekil 2.2’de gösterildiği gibi anot (negatif elektrot), katot (pozitif elektrot) ve elektrolit (iyonik iletken) olmak üzere üç temel kısımdan meydana gelir.



Şekil 2.2 : Hücrede Gerçekleşen Elektrokimyasal Olay (Deşarj) [11].

Anot ve katot malzemelerinin en avantajlı kombinasyonları yüksek hücre gerilimi üretebilecek ve daha yüksek kapasiteye sahip hafif hücre tasarımları anlamına gelecektir. Ancak hücre çeşidi, reaksiyon aktivitesi düşüklüğü veya yüksek maliyet gibi nedenlerden dolayı her zaman optimum malzeme çiftleri bir araya getirilemeyebilir.

Pratikte anot ve katot malzemelerinin yüksek coulombik çıkışa (Ah/g) ve iyi iletkenliğe sahip, ucuz malzemeler olması beklenir. Anot malzemesi olarak uygun nitelikleri nedeniyle genellikle çinko kullanılırken, katot malzemesi olarak genellikle metal oksitler kullanılır. Ancak anot malzemesi olarak hafif bir metal olan Lityum son dönemlerde akü teknolojisinde dikkati çeken bir gelişme göstermiştir.

Elektrolit malzemesinin ise hücre içerisinde kısa devre oluşturmaması için elektriksel iletkenliği olmayan, ancak iyonik iletkenliği iyi olan ucuz malzemeler olması istenir. Elektrolit malzeme özelliğinin sıcaklıkla çok fazla değişmemesi de diğer belirleyici etken olmaktadır.

2.1.1 Akü Gerilimi ve Kapasitesi

Teorik hücre gerilimi ve kapasitesi anot ve katot malzemelerinin birer fonksiyonudur. Bir reaksiyon gerçekleştiğinde denklem (2.1)'de görüldüğü şekilde sistemdeki serbest enerjisi bir azalma meydana gelir.

$$\Delta G^0 = -n.F.E^0 \quad (2.1)$$

G = Sistemdeki serbest enerji miktarı

F = Farady sabiti (26,8 Ah)

n = Sitokiyometrik reaksiyonun içerdiği elektron sayısı

E^0 = Standart potansiyel (V)

Standart hücre potansiyeli aktif malzemenin deneysel ölçümü ya da serbest enerji verileri ile belirlenebilir. Standart koşullar altında elektrot potansiyelleri (indirgenme potansiyelleri) Çizelge 2.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 2.1 : Elektrot Malzeme Karakteristikleri [11].

Malzeme	Atomik veya moleküler ağırlık	25 C'de Standart indirgenme potansiyeli, V	Valans değişimi	Erime noktası, C	Yoğunluk, g/cm ³	Elektrokimyasal Karşılıklar		
						Ah/g	g/Ah	Ah/cm ³
Anot Malzemeleri								
H ₂	2,0	0	2	-	-	26,59	0,037	
Li	6,9	-3,01	1	180	0,54	3,86	0,259	2,06
Na	23,0	-2,71	1	98	0,97	1,16	0,858	1,14
Mg	24,3	-2,38	2	650	1,74	2,20	0,454	3,8
		-2,69						
Al	26,9	-1,66	3	659	2,69	2,98	0,335	8,1
Ca	40,1	-2,84	2	851	1,54	1,34	0,748	2,06
		-2,35						
Fe	55,8	-0,44	2	1528	7,85	0,96	1,04	7,5
Zn	65,4	-0,76	2	419	7,14	0,82	1,22	5,8
		-1,25						
Cd	112,4	-0,40	2	321	8,65	0,48	2,1	4,1
Pb	207,2	-0,13	2	327	11,34	0,26	3,87	2,9

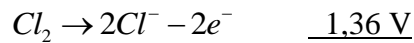
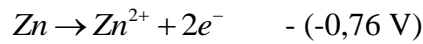
Çizelge 2.1 : (devam) Elektrot Malzeme Karakteristikleri [11].

Malzeme	Atomik veya moleküler ağırlık	25 C'de Standart indirgenme potansiyeli, V	Valans değişimi	Erime noktası, C	Yoğunluk, g/cm ³	Elektrokimyasal Karşılıklar		
						Ah/g	g/Ah	Ah/cm ³
Katot Malzemeleri								
O ₂	32,0	1,23	4	-	-	3,350	0,30	
Cl ₂	71,0	1,36	2	-	-	0,756	1,32	
SO ₂	64,0	-	1	-	-	0,419	2,38	
MnO ₂	86,9	1,23	1	-	5,0	0,308	3,24	1,54
NiOOH	91,7	0,49	1	-	7,4	0,292	3,42	2,16
CuCl	99,0	0,14	1	-	3,5	0,270	3,69	0,95
FeN ₂	119,9	-	4	-	-	0,890	1,12	4,35
AgO	123,8	0,57	2	-	7,4	0,432	2,31	3,20
Br ₂	159,8	1,07	2	-	-	0,385	2,95	
HgO	216,6	0,10	2	-	11,1	0,247	4,05	2,74
AH ₂ O	231,7	0,35	2	-	7,1	0,231	4,33	1,64
PbO ₂	239,2	1,69	2	-	9,4	0,224	4,45	2,11

Bir hücrenin standart potansiyeli standart elektrot potansiyelinden (yükseltgenme potansiyeli indirgenme potansiyeline göre negatif değerdedir) denklem (2.2)'de görüldüğü şekilde hesaplanabilir:

$$\text{Anot (yükseltgenme pot.)} + \text{Katot (indirgenme pot.)} = \text{Standart hücre pot.} \quad (2.2)$$

Örneğin; $Zn + Cl_2 \rightarrow ZnCl_2$ reaksiyonunda



$$2,12 \text{ V}$$

Hücre gerilimi aynı zamanda sıcaklık, konsantrasyon gibi diğer faktörlere de bağlıdır.

Hücre kapasitesi coulomb veya amper-saat olarak tanımlanan ve elektrokimyasal reaksiyonun içerdiği toplam elektrik miktarı olarak açıklanabilir. Bir bataryanın amper-saat kapasitesi aktif malzemelerden açığa çıkan elektrik miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Teorik olarak 1 eşdeğer gram ağırlığındaki malzeme 96,487 C yada 26,8 Ah açığa çıkartacaktır. (1 eşdeğer gram aktif malzemenin mevcut gram ağırlığının içerdiği atom ya da molekül sayısına bölünmesiyle hesaplanan atom veya molekül ağırlığıdır.)

Bir batarya sisteminin teorik kapasitesi aktif malzemelerin elektrokimyasal reaksiyona katılımlarına bağlı olarak reaktanların eşdeğer ağırlıkları üzerinden hesaplanır. Zn/Cl_2 sisteminin teorik kapasitesi denklem (2.3)'de belirtilen şekilde 0,394 Ah/g 'dır.



0,82 Ah/g 0,76 Ah/g

1,22 g/Ah 1,32 g/Ah = 2,54 g/Ah ya da 0,394 Ah/g

Batarya kapasitesi aynı zamanda enerji (watt-saat) bazında gerilimi de içerisine alacak şekilde denklem (2.4)'de belirtildiği gibi de ifade edilebilir.

$$\text{watt-saat (Wh)} = \text{gerilim (V)} \times \text{amper-saat (Ah)} \quad (2.4)$$

Zn/Cl_2 örneğinde eğer standart potansiyel 2,12 V olarak alınır, aktif malzemenin gramı başına teorik watt-saat kapasitesi (teorik gravimetric enerji yoğunluğu) denklem (2.5)'de belirtildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} \text{watt-saat / gram kapasite} &= 2,12 \text{ V} \times 0,395 \text{ Ah/g} \\ &= 0,838 \text{ Wh/g} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Yüksek akımlarda akünün iç direncinde oluşan kayıplardan ve kimyasal reaksiyon yeterince hızlı gerçekleşemediğinden dolayı akünün kapasitesi düşer. Akü kapasitesini daima yüksek tutabilmek için mümkün mertebe akım oranını düşük tutmak gerekir. Yani akü ne kadar yavaş deşarj edilirse verimliliği o kadar yüksek olur. Bunu gerçekleştirmek için kullanılan maksimum deşarj akımını bilmemiz ve bu veri ile çalışmamız gerekmektedir.

2.1.2 Akü Çeşitleri

Elektrokimyasal hücreler ve bataryalar elektriksel bakımdan şarj edilebilirliklerine bağlı olarak birincil (şarj edilemez) ve ikincil (şarj edilebilir) şeklinde iki ana gruba ayrılırlar. Bu sınıflandırma dışındaki diğer tüm sınıflandırmalar tanecik yapısını veya akü dizaynını belirtmek için kullanılır.

Birincil hücreler genellikle serbest ya da sıvı elektrolit içermeyen kuru tip bataryaları oluştururlar. En önemli avantajları ucuz, hafif ve mobil uygulamalara elverişli olmalarıdır. El fenerleri, oyuncaklar, hesap makineleri, fotoğraf makineleri gibi taşınabilir ürünlerde ideal çözümdürler ve raf ömürleri uzundur. Yüksek kapasiteli birincil hücreler ise genellikle askeri uygulamalar ve sinyalizasyon sistemlerinde kullanılmaktadır.

Şarj edilebilir ikincil hücreler ise depolama bataryaları veya akümülatör olarak adlandırılır. Deşarj sonrasında zıt yönde bir elektrik akımı geçirilmesiyle tekrar eski konumuna geri dönebilen sistemlerdir. Bu tip bataryalar genellikle talep yüküne bağlı olarak enerji depolama amacıyla kullanılır. Otomotiv, havacılık vb. sektörlerde daha çok kullanıldığı gibi şebeke yönetiminde de önemli bir ihtiyaca cevap verebilirler. Ayrıca hastane, maden ocağı vb. kesintisiz enerji gerektiren sistemlerde UPS olarak da kullanılmaktadırlar.

Anot ve katotta kullanılan elektrot malzemesine göre birincil bataryalar Çizelge 2.2’de, ikincil bataryalar Çizelge 2.3’de kapasiteleriyle birlikte verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Birincil (primary) batarya çeşitleri [11].

Battery	Anode	Cathode	Reaction mechanism	V	Capacity†	
					g/Ah	Ah/kg
Primary						
Leclanché	Zn	MnO ₂	$Zn + 2MnO_2 \rightarrow ZnO \cdot Mn_2O_3$	1.6	4.46	224
Magnesium	Mg	MnO ₂	$Mg + 2MnO_2 + H_2O \rightarrow Mn_2O_3 + Mg(OH)_2$	2.8	3.69	271
Alkaline MnO ₂	Zn	MnO ₂	$Zn + 2MnO_2 \rightarrow ZnO + Mn_2O_3$	1.5	4.46	224
Mercury	Zn	HgO	$Zn + HgO \rightarrow ZnO + Hg$	1.34	5.27	190
Mercurad	Cd	HgO	$Cd + HgO + H_2O \rightarrow Cd(OH)_2 + Hg$	0.91	6.15	163
Silver oxide	Zn	Ag ₂ O	$Zn + Ag_2O + H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + 2Ag$	1.6	5.55	180
Zinc/air	Zn	O ₂ (air)	$Zn + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow ZnO$	1.65	1.55	658
Li/SO ₂	Li	SO ₂	$2Li + 2SO_2 \rightarrow Li_2S_2O_4$	3.1	2.64	379
Li/MnO ₂	Li	MnO ₂	$Li + Mn^{IV}O_2 \rightarrow Mn^{IV}O_2(Li^+)$	3.5	3.50	286

Çizelge 2.3 : İkincil (secondary) batarya çeşitleri [11].

Battery	Anode	Cathode	Reaction mechanism	V	Capacity†	
					g/Ah	Ah/kg
Lead-acid	Pb	PbO ₂	$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$	2.1	8.32	120
Edison	Fe	Ni oxide	$Fe + 2NiOOH + 2H_2O \rightarrow 2Ni(OH)_2 + Fe(OH)_2$	1.4	4.46	224
Nickel-cadmium	Cd	Ni oxide	$Cd + 2NiOOH + 2H_2O \rightarrow 2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2$	1.35	5.52	181
Silver-zinc	Zn	AgO	$Zn + AgO + H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + Ag$	1.85	3.53	283
Nickel-zinc	Zn	Ni oxide	$Zn + 2NiOOH + 2H_2O \rightarrow 2Ni(OH)_2 + Zn(OH)_2$	1.73	4.64	215
Nickel-hydrogen	H ₂	Ni oxide	$H_2 + 2NiOOH \rightarrow 2Ni(OH)_2$	1.5	3.46	289
Nickel-metal hydride	MH†	Ni oxide	$MH + NiOOH \rightarrow M + Ni(OH)_2$	1.35	6.50	206§
Silver-cadmium	Cd	AgO	$Cd + O + H_2O \rightarrow Cd(OH)_2 + Ag$	1.4	4.41	227
Zinc/chlorine	Zn	Cl ₂	$Zn + Cl_2 \rightarrow ZnCl_2$	2.12	2.54	394
Zinc/bromine	Zn	Br ₂	$Zn + Br_2 \rightarrow ZnBr_2$	1.85	4.17	239
Lithium/manganese dioxide	Li	MnO ₂	$Li + Mn^{IV}O_2 \rightarrow Mn^{IV}O_2(Li^+)$	3.5	3.50	286
Lithium/iron disulfide	Li(Al)	FeS ₂	$2Li(Al) + FeS_2 \rightarrow Li_2FeS_2 + 2Al$	1.73	3.50	285
Lithium/iron monosulfide	Li(Al)	FeS	$2Li(Al) + FeS \rightarrow Li_2S + Fe + 2Al$	1.33	2.99	345
Sodium/sulfur	Na	S	$2Na + 3S \rightarrow Na_2S_3$	2.1	2.65	377
Sodium/nickel chloride	Na	NiCl ₂	$2Na + NiCl_2 \rightarrow 2NaCl + Ni$	2.58	3.28	305
Fuel cell						
H ₂ /O ₂	H ₂	O ₂ (or air)	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	1.23	0.336	2975

2.2 Vanadyum Redoks Akışkan Aküler (VRB)

Vanadyum Redox çiftlerinin akışkan akülerde kullanımı ilk olarak NASA araştırmacıları Pellegri ve Spaziante tarafından 1978'de önerilmiştir. Ancak sülfirik asit elektrolitli asıl tipi, 1986 yılında Avustralya “Yeni Güney Galler Üniversitesi-UNSW” araştırmacılarından Maria Skyllas-Kazacos (Şekil 2.3’de) tarafından geliştirilmiş ve patentlenmiştir. [12]



Şekil 2.3 : VRB patent sahibi Maria Skyllas-Kazacos [12].

Vanadyum redoks akışkan akü, tipik şekilde içerdiği iki farklı elektrolit sıvısının bir proton değişim membranı ile ayrıldığı güç hücrelerinin birleşiminden meydana gelmektedir ve enerji elektrolit içinde kimyasal değişimlerle depolanır. İki ayrı tanktan hücrelere pompalanarak akım oluşması sağlanan elektrolitler, bir dizi kimyasal proses sonucu hazırlanan, sülfürik asit içerisinde çözülmüş vanadyum pentaoksit içeren sıvılardır. Çözelti kuvvetli asit niteliğini aynen devam ettirmektedir.

Sıvı elektrolitlerin bu sirkülasyonu kısmen de olsa vanadyum akışkan akülerin mobil uygulamalarda kullanılmasını elverişsiz hale getirmekte, büyük ölçekli kurulumlarla sınırlı kullanıma sahip olmasına neden olmaktadır. Ancak hücrede gerçekleşen reaksiyon tamamen tersinirdir ve bu durum da akünün şarj, deşarj ve tekrar şarjında yüksek verimlere ulaşılmasını sağlar.

Enstitümüz laboratuvarında yer alan ve performans ölçümü gerçekleştirilen Vanadyum Redoks Akışkan Akü'ye ait fotoğraf Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 : Vanadyum Redoks Akışkan Akü

2.2.1 Vanadyum Elementi

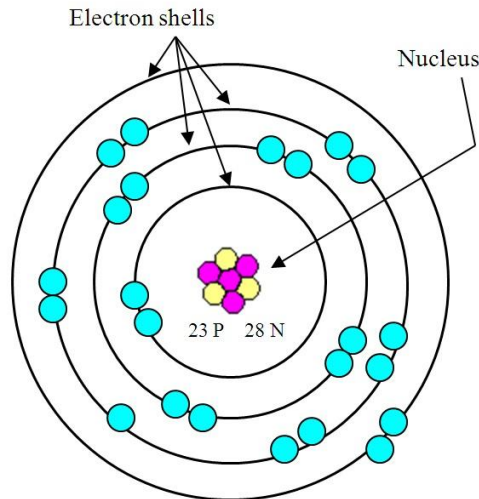
Vanadyum elementi Şekil 2.5’de gösterildiği gibi periyodik tabloda 23. Sırada bulunmaktadır.

The image shows a standard periodic table with Vanadium (V) highlighted in yellow. The table includes elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og). The periodic table is organized into rows and columns, with Vanadium (V) located in the 4th row and 5th column.

Şekil 2.5 : Vanadyum Elementinin Periyodik Tablodaki Yeri [12].

Vanadyum gümüş renkli bir geçiş metalidir. Valans elektronları birden çok kabukta bulunabilir. Normal seviyede, vanadyum atomları 23 proton, 23 elektron ve 28 nötrona sahiptir. Dünyada birçok yerde bulunabilen bir element olan vanadyum, demir, çelik ve titanyum’a eklenmesiyle bu malzemelerin güçlendirmelerinde, malzeme dayanıklılığını ve yüksek sıcaklığa karşı dayanımı arttırmada kullanılır.

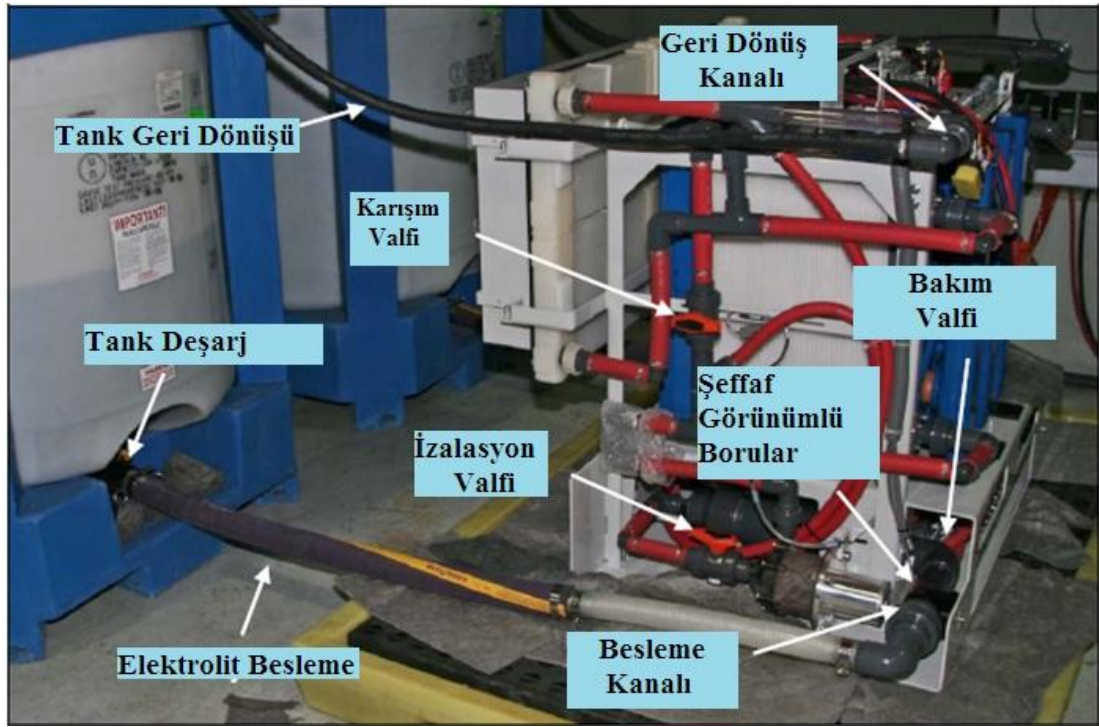
Vanadyum elementinin serbest halde iken atom yapısını gösteren modeli Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6 : Vanadyum Elementinin Atomik Yapısı [12].

2.2.2 VRB Temel Bileşenleri ve Çalışma Prensibi

Vanadyum redoks akışkan aküler temel olarak dört ana bileşenden oluşurlar. Bu bileşenler: hücre yığını; pompalar, valfler, sensörler, borular ve ısı eşanjöründen oluşan akışkan sistemi; akü kontrolörü ve kablo tertibatından oluşan elektrik sistemi; tüm bu sistemleri bir arada tutan dış kasadır. Akışkan akünün her iki yanında anot ve katot elektrolitlerini içeren elektrolit tankları bulunmaktadır. Tüm bu bileşenlerin akışkan akü üzerindeki konumları Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

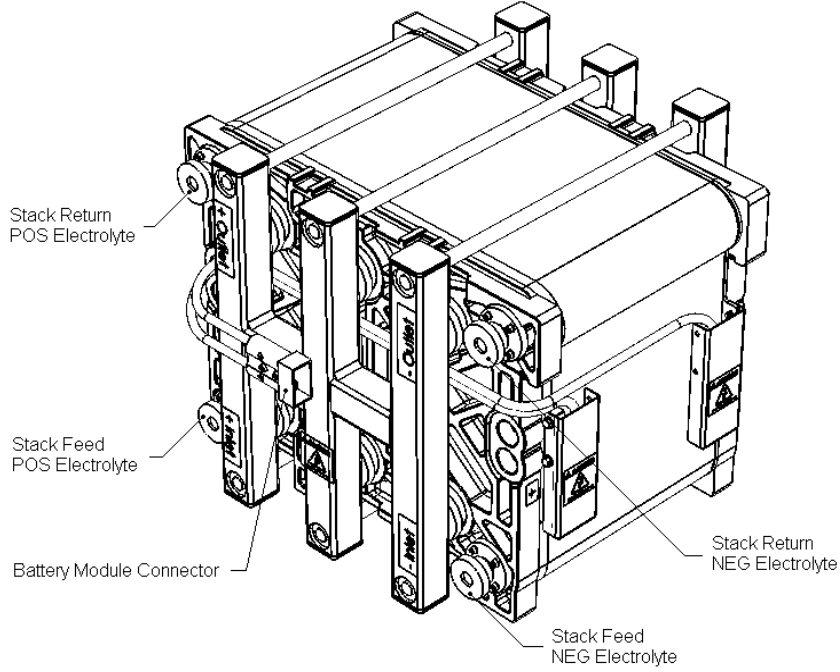


Şekil 2.7 : Vanadyum Redoks Akü Bileşenleri ve Sistem Genel Görüntüsü [14].

VRB hücre yığını, çalışması için başka cihaz gerektirmeyen, her biri iyon değişim membranı ile ayrılmış iki yarım hücre içeren, eş hücre serileri bulunduran kapalı bir yapıdır. Elektrokimyasal reaksiyonlar, akünün şarjı ya da deşarjı, bu yarı hücrelerde gerçekleşir.

Şarj edilmiş elektrolit çözeltisi VRB'nin hücre yığınlarından geçerek akmaya başladığında, vanadyum iyonlarının membranın bir tarafından öbür tarafına geçen farklı formları arasında iç devrede elektriksel akıma sebep olur, DC akım oluşur ve deşarj için elektrokimyasal yol tamamlanmış olur. Harici bir kaynaktan VRB hücre yığına akım verilmesi bu süreci tersine döndürür ve elektroliti yeniden şarj konumuna geri dönüştürür.

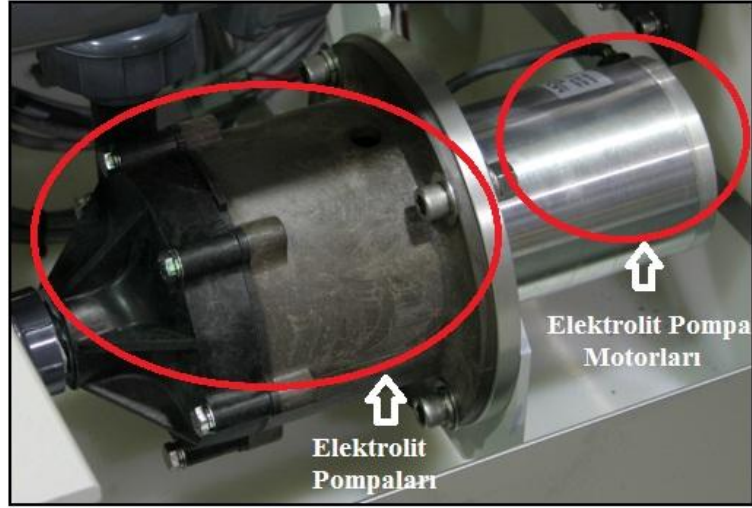
Hücre yığınları birden fazla hücrenin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur ve bu hücre sayısı ayarlanarak yük profiline göre çıkış gerilimi istenilen değerde elde edilebilir. Hücre yığını ve elektrik bağlantı uçlarını gösteren teknik çizim Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 : VRB Üzerindeki Hücre Yığını (Cell Stack) Teknik Çizimi [14].

Hücre yığınlarının her iki yanında harici elektrolit depolama tankları bulunmaktadır. Depolanacak enerjinin miktarının belirlenmesine imkân sağlayan bu tanklar akü kontrol ünitesi tarafından kontrol edilebilmeye uygun olarak tasarlanmıştır.

Elektrolit tanklarının en alt seviyesinden akışkanları hücre yığınlarına, elektrolit soğutmaya ve tank girişine pompalayan seramik şaftlı ve manyetik sürürlü çarka sahip iki adet pompa bulunmaktadır. Pompalar kuru halde (akışkan olmadığı durumlarda) kullanılmamalıdır. Pompalar, fırçasız DC motorlar ile çalıştırılmaktadır. DC motor ve pompa çifti Şekil 2.9’da gösterilmektedir.



Şekil 2.9 : VRB Üzerindeki DC Motor ve Pompa Çifti Görüntüsü [14].

Akışkan sistemi üzerinde pompa hızına ayarlanarak kontrol edilip izlenebilen ve basıncı da ölçebilen bir akış sensörü ve pompa dışından akışkan sıcaklığı ölçebilen bir sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Şekil 2.10'da her iki sensöre de ait fotoğraflar görülmektedir.



(a) Akış Sensörü



(b) Sıcaklık Sensörü

Şekil 2.10 : VRB Üzerindeki Akış (a) ve Sıcaklık (b) Sensörleri [14].

VRB'ye ait elektriksel kontrol modülü iki bileşen grubunu içerir: Akü işlemlerini kontrol için gerekli olan elektriksel donanım ve sensörler. Bu donanım DC bara kontaktörü, DC akım dönüştürücüsü, ortam sıcaklığı sensörü, DC şebeke bağlantıları, iç DC bara (kontaktörün akü kontrolörü tarafı), sistem topraklama barası ve güç bağlayıcısı ile hücre yığını bağlayıcısından oluşur.

Akü kontrolörü, monitörleri kontrol eden ve VRB'nin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayan mikro-işlemci temelli bir kontrolördür. Kontrolör, aynı zamanda,

- Uygun şarj kontrolünü sağlamak için dış sistemlere bilgi aktarılmasına
- VRB'nin uygun biçimde şarj ve deşarj olmasına
- İşlemleri gözlemlemek için dış sistemlere izin veren iletişim ara yüzünü de temin eder.

Mikroişlemci, VRB-ESS'nin işletim gereklilikleri için özel olarak dizayn edilmiş aygıt yazılımını içerir. Akü kontrol modülü bileşenleri Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : VRB Akü Kontrol Modülü Bileşenleri [14].

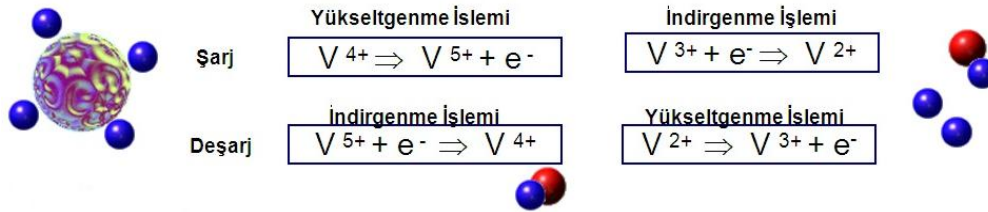
Elektrolit soğutma ünitesi üzerinde elektrolit üzerindeki atık ısıyı uzaklaştırmaya yarayan bir ısı eşanjörü bulunmaktadır. Soğutma fanı akü kontrol modülü tarafından kontrol edilir. Elektrolit sıcaklığı 30°C'nin üzerine çıktığında fanlar devreye girer. Elektrolit soğutma ünitesi Şekil 2.12'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.12 : Elektrolit Soğutma Ünitesi [14].

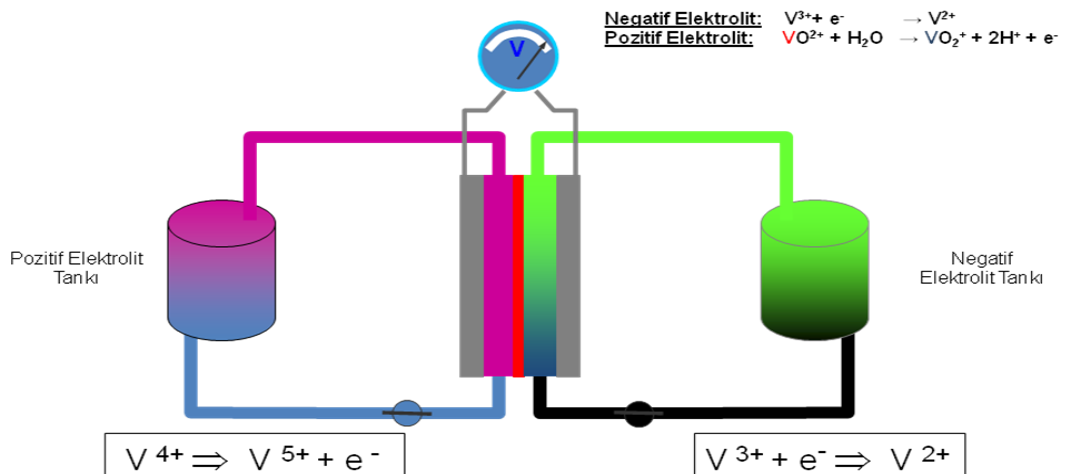
Enerji depolanması yükseltgegen ve indirgenen farklı yapılarıdaki vanadyum iyonlarıyla gerçekleşir. Bu iyonların sülfirik asit içerisinde çözülmeleriyle vanadyum elektron tedarikçisi ve kabul edicisi durumuna geçer.

Akü şarj edilirken DC akımla elektronlar aküye doğru akar. Sisteme kabul edilen elektronlar vanadyum dış bağlarında depolanır. VRB akü şarj edildiğinde elektronlar akünün artı kutbundan hareket ederken pozitif yarı hücredeki VO_2^+ iyonları VO_2^+ iyonlarına dönüşmektedir. Benzer şekilde negatif yarı hücrede de elektronlar V^{3+} iyonlarının V^{2+} iyonlarına dönüşmesini sağlar. Deşarj sırasında bu proses tam tersi şekildedir ve genel itibarıyla açık devre geriliminin $25^{\circ}C$ 'de 1,41 V olmasıyla sonuçlanır. Şarj ve deşarj süreçlerinde gerçekleşen bu iyon değişimleri Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13 : Şarj ve Deşarj Süreçlerindeki İyon Değişim Durumu [14].

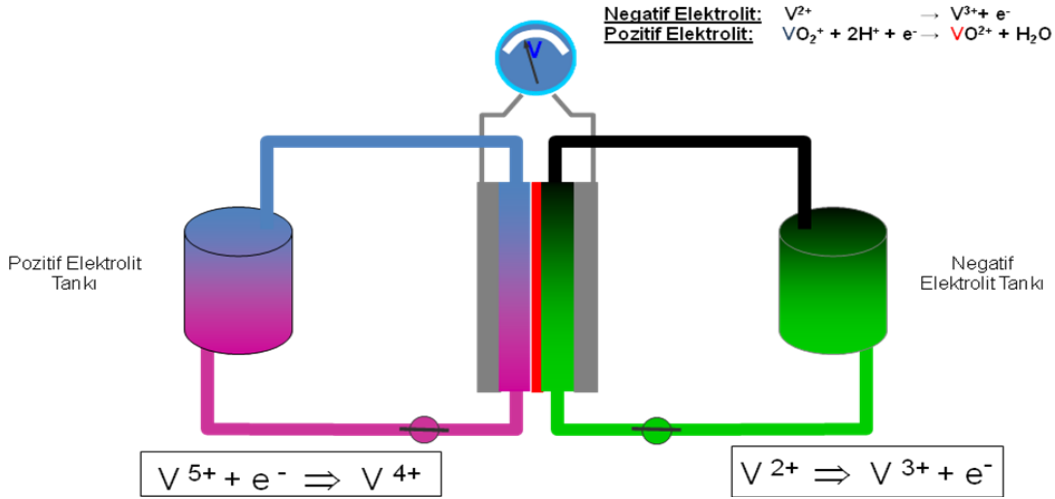
Şarj olurken, elektron akışı elektron dış devresi üzerinden yapılır. Protonlar membran üzerinden transfer olarak yük dengesi sağlanır. Şarj sürecinde VRB temel akış şeması Şekil 2.14'de belirtildiği gibidir.



Şekil 2.14 : Şarj Sürecinde VRB Temel Akış Şeması [14].

Deşarj olurken, protonlar tekrar eski orjinal dağılımlarına dönerler. Bu işlem sırasında elektronlar aküden dışarı yönde yük dengesi sağlamak için hareket ederler.

Hidrojen iyonları (proton) için geçirgen bir polimer membran (PEM) içeren hücre içerisinde “akıtılan” sıvılar birbirlerine H⁺ iyonu (proton) vererek dış devreden elektron akışını sağlar. Deşarj sürecinde VRB temel akış şeması Şekil 2.15’de belirtildiği gibidir.



Şekil 2.15 : Deşarj Sürecinde VRB Temel Akış Şeması [14].

VRB’lerin diğer önemli özellikleri de yükteki değişime çok hızlı cevap verme süresi ve oldukça geniş ölçekli aşırı yüklenme kapasitesidir. University of South Wales (UNSW) tarafından yapılan araştırmalar VRB’lerin yükteki % 100 oranındaki bir değişikliğe yarım milisaniyenin altında bir sürede cevap verdiğini ve 10 s boyunca % 400 aşırı yüklenmelere izin verdiğini ortaya koymuştur. Cevap süresi daha çok elektriksel ekipmanlar nedeniyle sınırlanmaktadır. [12].

Mevcut VRB ürünleri 25 Wh/kg elektrolit enerji yoğunluğuna ulaşmayı başarmıştır. UNSW’de yapılan en son araştırmalar yavaşlatıcı çöktelerin enerji yoğunluğunu 35 Wh/kg’a kadar yükseltebileceğini, elektrolit sıcaklığını kontrol ederek de daha da yüksek yoğunluk değerlerine çıkılabileceğini ortaya koymuştur. Bu enerji yoğunluğu diğer şarj edilebilir pillerle kıyaslandığında oldukça düşüktür (örneğin kurşun-asit 30-40 Wh/kg; lityum-iyon 80-200 Wh/kg) [12].

Fraunhofer Kimya Teknolojisi Enstitüsü araştırmacıları, enerji yoğunluğu bakımından kurşun-asit akülerden lityum-iyon akülere kadar tüm akülerden dört beş kat daha gelişmiş hücre prototipi üretmenin mümkün olduğunu öne sürmektedirler.

Ancak “derin deşarj” konusunda tüm diğer “Flow Battery” tipleri gibi iyi bir performans gösterir. Binlerce kere %100 deşarj edilse bile enerjiyi depolayan sıvılarda enerji yoğunluğundan kayda değer bir şey kaybetmez. Günümüzde büyük VRB tipleri yenilenebilir enerji üretim tarlalarında (özellikle rüzgâr), enterkonekte sisteme bağlanmadan önce elektrik enerjisi tamponlama işlevi için kullanılır. 10 kW’dan düşük modeller UPS veya telekom uygulamaları için de geliştirilmiştir [13].

2.2.3 VRB Kurulumu ve İşletilmesi

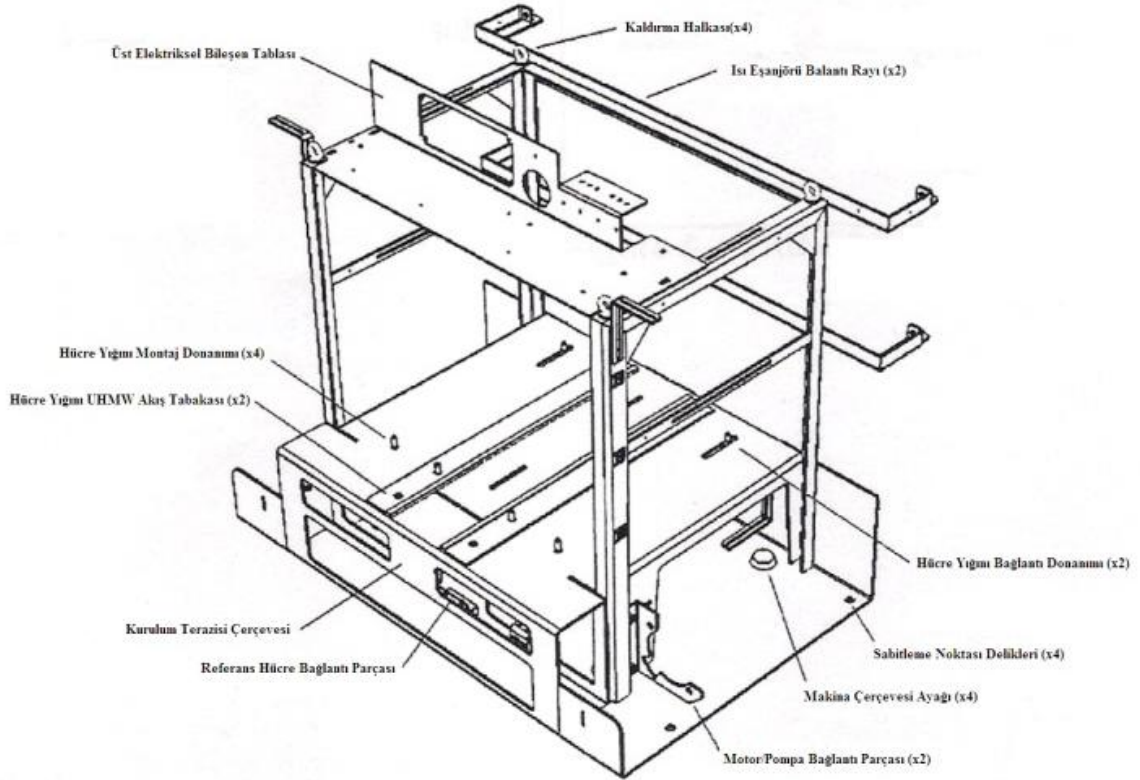
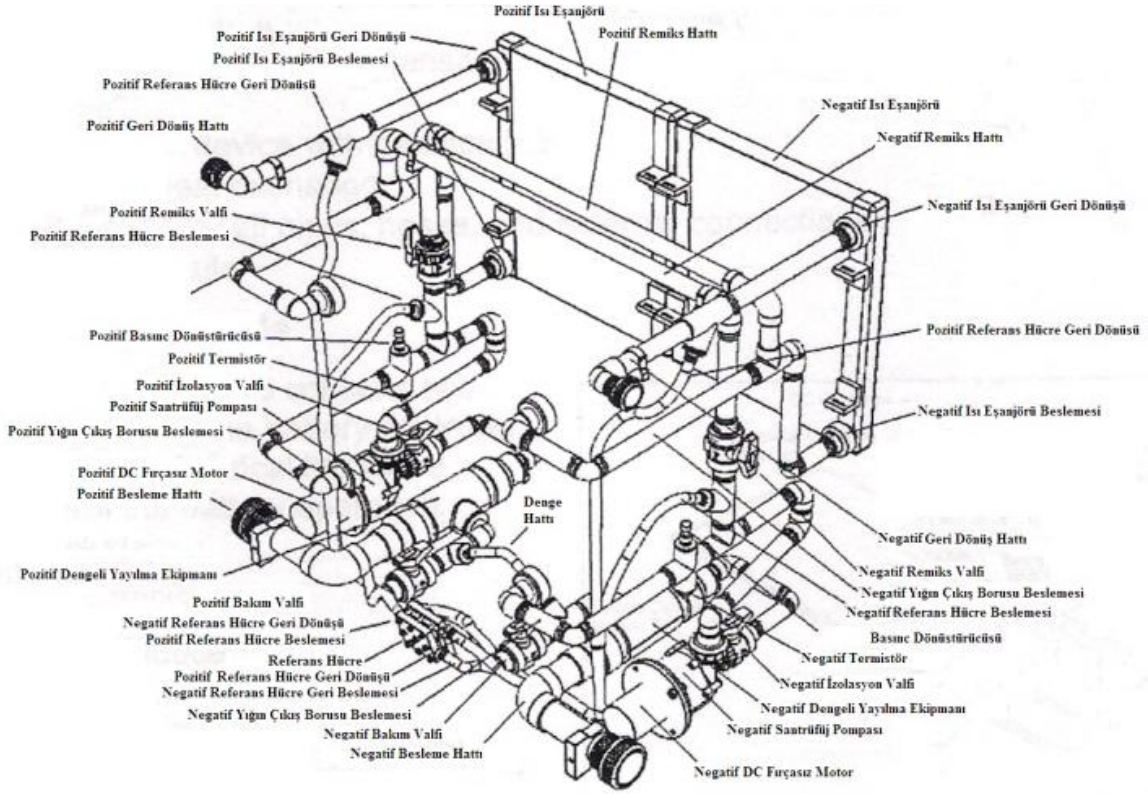
VRB aküler, genel olarak pasif enerji depolama araçları olarak tasarlanırken, sistemi çalıştırmayı başarabilmek için birçok ara yüze ihtiyaç vardır.

Operatör, kurulumun aşağıdaki listede belirtilen hususlara riayet edilerek yapıldığından emin olmalıdır. Bunlarda hata yapılırsa, sistem uygun bir şekilde çalışmayabilir ve kişisel hasar ya da yaralanmalara neden olabilir.

Akü kurulum aşamasında yapılması gerekenler:

- Güç modülü uygun bir şekilde yere civatalanarak sabitlenmelidir.
- Elektrolit tankları sisteme yakın olarak kurulmalıdır.
- Elektrolit ve havalandırma hortumları sistem ve tanklar arsına kurulmalıdır.
- Sistemin DC güç bağlantıları yapılmalıdır.
- Güç açma/kapama rölesi sisteme bağlanmış olmalıdır.
- Hava akışının, elektrolit soğutucu ısı eşanjöründen geçmesi sağlanmalıdır.
- Kurulum, doldurulmuş elektrolit tankları ile birleştirilmelidir [15].

Akışkan yönetiminin kurulum terazisi ve yapısı Şekil 2.16’da gösterilmiştir.



Şekil 2.16 : VRB Sıvı Yönetimi Kurulum Terazisi Bileşenleri ve Yapısı [15].

2.2.3.1 Normal VRB Çalışması

Öncelikle ve özellikle belirtilmelidir ki, VRB hücre yığınları, elektrolit içerisindeki elektriksel kapasite miktarına bağlı olarak, tehlikeli miktarlarda elektriksel enerjiye sahip olabilirler. Elektriksel bağlantılara dokunmadan önce, VRB hücre yığınlarının uçları arasındaki gerilim potansiyeli test edilmelidir.

Aküyü çalıştırmaya başlamadan önce aşağıdakilerden emin olunmalıdır:

- VRB'nin kurulum talimatnamesine riayet edilerek kurulduğundan emin olunması gerekmektedir.
- Harici ekipmanlarda kurulu bulunan elektriksel kilitleri kaldırmadan önce elektriksel hasarlardan korunmakta olduğunuzdan emin olunması gerekmektedir.
- VRB'nin herhangi bir mekaniksel ve elektriksel bileşeniyle temas halinde olunmaması gerekmektedir.
- VRB'nin sistem özelliklerinde belirtilen akım ve voltaj oranlarına erişebilmesi için yeterli gücü sağlayacak olan şarj dinamosuna bağlı olduğundan emin olunması gerekmektedir.

2.2.3.2 Akünün Devreye Alınması

Aküyü ilk kez devreye alırken işleme başlamadan önce uygun koruyucu ekipmanlar giyilmelidir.

1. Akü modülünün ve kullanıcı ekipmanlarının işlem için hazır olup olmadığı kontrol edilmelidir.
2. Kurulum listesinde yer alan bütün şartlar yerine getirilmiş olmalıdır.
3. Elektrolit tanklarının vanalarının doğru konumda olup olmadığını kontrol edilmelidir.
4. Yavaşça her iki tankında deşarj valflerini açılmalıdır.

5. Elektrolitin besleme hattına girdiğini, elektrolit giriş noktasındaki borunun şeffaf plastik bölmesinde süreç modülüne doğru ilerlediğinin gözlemlenmesi gerekmektedir.
6. Hücre yığını izolasyon valflerinin her ikisini de yavaşça yarı açık konuma getirilmesi gerekmektedir. Güç modülü tamamen elektrolitle dolduğunda her iki valfin de tamamen açık konuma getirilmesi gerekmektedir.
7. Elektrolit sızıntısı olmadığından emin olunmalıdır.
8. Yardımcı sistemin (rectifier) kapalı olduğundan emin olunmalıdır.
9. Güç kaynağı gerilimini 58.9 V DC'ye ayarlayın. Multimetreyi kullanarak, sistem bağlantı kutbunun bu güç modülüne tekabül ettiğini doğrulanmalıdır. Güç kaynağını 125A DC'yle sınırlanmalıdır.
10. Güç kaynağı kablosu sistem güç bağlantı noktasına bağlanmalıdır.
11. Aküden 5 metre uzakta durularak ve akünün güç kaynağı açılmalıdır. (VRB'nin güç kaynağı açıldığında, sülfirik asit etrafa sıçrayabilir ve kişiye ya da akü akışkanı içeren bileşenlere zarar verebilir. Bu özellikle sistem ilk defa çalıştırıldığında gerçekleşebilir. Bu yüzden akünün güç kaynağını açmadan önce en az 5 metre geride durulması önemlidir.)
12. Güç on/off rölesini ya manuel olarak ya da bir harici kontrol sistemi vasıtasıyla kapatarak akü kontrolörü ile elektriksel bağlantıyı başlatılır.
13. Akünün çalıştığını gözlemlenir. Elektrolit akışının başlaması gerekmektedir.
14. Yaklaşık 60 sn. sonra ana kontaktör kapanacaktır, kontrolörün önündeki sabit durum lambası yeşil LED (solid state green LED) ışığı aktif olmalıdır. Akünün kapasitesine bağlı olarak, aşırı düşük kapasitelerde sabit durum lambasında sarı LED ışığı veya aşırı şarj anında sabit durum lambasında kırmızı LED ışığı görülebilir ve bu ışığın kaybolması birkaç saat sürebilir.
15. Eğer herhangi bir elektrolit sızıntısı görülürse, derhal güç kaynağını kapatılmalı ve sızıntının sebebi tamir edilmelidir.

16. 125A DC ve 58.9 V DC'de akü şarj edilmeye devam edilmelidir. Akü kontrolörü, akünün kapasite durumunu belirten veri çıktılarını değerlendirerek %100 kapasiteye ulaşıldığında aşırı şarjı engellemek için transfer akımını kesecektir.

17. Akü tam olarak şarj ve deşarj edilmelidir. Akünün ara doluluk oranlarında uzun süre bırakılması tanklardaki elektrolit seviyelerinde dengesizliklere neden olabilir.

2.2.3.3 VRB'nin Şarj Ve Deşarjı

VRB'nin şarj ve deşarj özellikleri geleneksel akülere benzemektedir ve karmaşık harici kontrol ya da şarj yönetimi gerekmemektedir.

Akü performansını ve ömrünü maksimize etmek için, elektrolitin zarar görmesine neden olacak düşük oranlı şarjdan kaçınılması tavsiye edilmektedir. Yardımcı sistemler, akü kontrolörü tarafından dalgalı şarj stratejisi oluşturmaya yönelik komutlara cevap verebilecek şekilde ayarlanabilir.

VRB teknolojisinin avantajı, % 0 kapasitenin altında defalarca deşarj edilmesinin bir zarara uğratmamasıyla en iyi şekilde ispat edilir. Bununla birlikte, yükün büyüklüğüne bağlı olarak akü tamamen deşarj olduğunda güç kesintisi yaşanabilir.

VRB'nin Şarjı:

Sistemi şarj etmenin en etkili yolu, güç kaynağı gerilimini 58.9 VDC'ye ve akımı 125A DC'ye ayarlamaktır. Sistem bir kere tam şarj edildiğinde, akü kontrolörü yardımcı şarj ekipmanlarına işaret verir ve VRB daha fazla şarj akımını kabul edemez. Yardımcı şarj sistemleri bu sinyale karşılık vermelidir ya da VRB aşırı şarjdan korumak için harici DC bara ile bağlantıyı kesecektir. Bu, bağlantı durumunu akü kontrolörüne geri bildirmek için, ihtiyaç duyulduğu anda yüke enerji sağlamada akü kabiliyetini etkiler.

VRB'nin Deşarjı:

Deşarj beslenen yük gereksinimlerine göre, sistemin deşarj akımı kapasitesine bağlı olarak yapılabilir. Deşarj sonunda, akü kontrolörü akünün bitmek üzere olduğunu belirten bir uyarı sinyali iletir. Ancak akü derin deşarjlardan zarar görmez bu yüzden harici yükler bu noktanın ötesinde de güç çekmeye devam edebilirler. Akünün harici yüklerle bağlantısı kesildiğinde iç DC bara gerilimi 40 VDC'nin altına düşecektir.

2.2.3.4 Mevcut İzleme ve İşaretleme

VRB sürekli kapasitesini ve çalışma performansını gözlemler ve sistemin şarj, deşarj ve ya ikisi için de uygun olup olmadığına karar verir.

Yardımcı sistemin akünün tamamen şarj olup olmadığını sorgulayabilmesi için 3 yol vardır:

- Kapasite durumu hakkında bilgi veren sinyal çıkışı yoluyla akü kapasitesini gözlemler.
- Seri bara yoluyla akü kapasitesini gözlemler.
- Şarj inhibit rölesini gözlemler.

Bu sinyal tiplerinden birine cevap verirken, yardımcı sistem;

- Pil ile güç kaynağı arasındaki bağlantıyı keser
- Güç kaynağını beklemeye alır ya da kapatır.
- Harici DC bara gerilimini 42 V DC ya da bunun altına düşürür.

Eğer şarj kontrolü, şarj inhibit rölesi yerine VRB-ESS kapasitesini gözlemleyerek yapılıyorsa, kapasitenin %75'in altına düşene kadar, akünün yeniden şarj olmasına izin vermemek için özen gösterilmelidir.

Deşarj inhibit rölesi;

- Akü deşarjı tamamlamak üzere olduğunda
- Arıza, bakım ya da kapatma durumunda ya da
- Akünün güç çekemeyecek gibi olduğu zamanlarda aktif konuma geçer.

Deşarj inhibit kontrolünü uygulamak, yardımcı sistemin alternatif güç sistemine ya da yüke bağlanmasında yeterli zamanın sağlanmasında, ya da makine ekipmanlarının sırasıyla kapatılmasında bir stratejidir. Kritik güvenlik durumları hariç, deşarj inhibit komutu ile akünün yükden bağlantısının kesilmesi avantaj olarak belirtilecektir.

2.2.4 VRB Avantajları ve Dezavantajları

2.2.4.1 Avantajları

Vanadyum dünya üzerinde Güney Afrika, Rusya, ABD, Çin, Norveç, Finlandiya, Kanada, Avustralya gibi birçok ülkede madenciliği yapılan ve tahmini toplam rezervi 160 Milyon Ton (%46 Güney Afrika, %26 Rusya, %13 ABD, %12 Çin v.s) olan mevcut kullanım hızı ile 100-150 yıl daha çok rahat ve ucuz temin edilebileceği belirtilen bir elementtir [13]. Temel olarak endüstride çeliği sertleştirmek veya sülfirik asit üretiminde katalizör olarak kullanılır. Yiyecek endüstrisinde diyet ürünlerin içerisinde kullanılır.

Kurşun, Nikel, Çinko, Kadmiyum vb. hiçbir ağır metalin kullanılmadığı VRB'lerde diğer bazı akışkan akü çözümlerinde olduğu gibi iki ayrı tanktaki elektrolitik sıvılardan birbirine madde alışverişi yapılmadığı için reaksiyonlar sonrası iki tanktaki elektrolit de aynı içerikte kalır. Bu nedenle çevrim teorik ömrü sınırsızdır. Elektrolitin elde edildiği Vanadyum Pentaoksit (V_2O_5) çevreye zararlı bir madde değildir.

Sadece elektrolit tanklarını büyüterek daha yüksek miktarda enerji depolamak mümkündür. Sistemde ve elektrolitlerde herhangi bir kalıcı zarar olmaksızın %100 derin deşarj edilebilir.

Elektriksel olarak şarj edilebildiği gibi istenirse şarjlı sıvılar doldurularak da "dolu" akü elde edilebilir. Bu özelliği ile VRB kullanan ve elektroliti istasyonlarda değiştirilerek şarj edilen otomobil prototipleri yapılmaktadır.

Diğer Flow Battery teknolojilerine göre düşük sıcaklıkta reaksiyon gösterdiği için çok az ısı üretir. Şarj işlemi endotermik olduğundan şarj sırasında birçok akü teknolojisinin tersine elektrolit sıvılar soğur.

Diğer akü teknolojileri ile karşılaştırıldığında çok yüksek çevrim ömürlerine sahiptir (15,000-25,000 @%80 derin deşarj) ve sonsuz servis süresi vardır.

Kurşun asit gibi akülere kıyasla çok daha yüksek sıcaklıklarda ömür ve performansından kaybetmeksizin çalışabilir. Yükte cevap zamanı milisaniyeler mertebesindedir.

Değişken güç kaynaklarının stabilizasyonunu sağlar. VRB'ler büyük sistemlerde % 80-90 küçük sistemlerde %65-80 gibi nispeten yüksek çevrim verimliliği sağlarlar [13].

2.2.4.2 Dezavantajları

Enerji yoğunluğu nispeten diğer akü teknolojilerine göre düşüktür (5-20 Wh/kg elektrolit). Dolayısı ile VRB sistemler fazla yer kaplar ve ağırdır.

Çok küçük güçlü ve az enerji depolanması gereken (<5kW / 10 kWh) uygulamalarda fizible olamamaktadır. Genelde 6-8 ila daha fazla saat enerji yedeklemesi sağlayacak uygulamalarda uygun olmaktadır.

Henüz yeterince bilinmediği için pazarda talep yeterince oluşmamıştır. Bu nedenle seri üretimden kaynaklanacak maliyet düşümleri henüz yeterli seviyeye gelmediğinden birim enerji başına maliyet parametreleri henüz 500-600 € / Wh gibi yüksek değerlerdedir. Ancak yeterli adetlerde siparişlerde bu değerler 300-400 € /Wh seviyelerine inebilmektedir.

2.2.5 VRB Kullanım Alanları

VRB güneş ve rüzgâr enerjisinin depolanmasında kullanılır. Rüzgâr, çıktısı çok değişken olan bir enerji kaynağıdır. Son derece yüksek kapasite imkanlarıyla Vanadyum Redoks Aküler, rüzgar ya da güneş gibi yüksek değişkenlikte enerji üretimine sahip kaynaklarının düzenlenmesine yardımcı olabilecek yüksek ölçekli güç depolama sistemlerinde veya talepteki büyük dalgalanmalarla başa çıkmakta jeneratör sistemine yardımcı sistemlerde kullanılmak için son derece uygundur.

VRB'lerin kısıtlı self-deşarj karakteristikleri, onları enerji sürekliliğinin korunmasını ve kısa süreli bakımlarda bile yüksek miktarda enerji depolanılmasını gerektiren uygulamalar için kullanışlı hale getirmektedir. Bu özellikleri VRB'lerin yüksek güvenlik ihtiyacı olan askeri uygulamalarda ve elektronik alanlarında kabul görmesini sağlar.

Bu akülerin son derece hızlı cevap verme süreleri sayesinde jeneratör veya kurşun-asit aküler yerine kesintisiz güç kaynağı uygulamalarında kullanılması da oldukça elverişlidir.

VRB uygulama alanlarını özetle şu şekilde sınıflandırabiliriz:

- Yük dengeleme; elektrik enerjisinin daha ucuz olan gece zaman diliminde depolanarak daha pahalı olan zaman dilimlerinde tüketilmesi uygulamalarında kullanılırlar.
- Rüzgâr ve Güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan depolanan elektrik enerjisinin talep gücünün maksimum olduğu anlarda kullanılabilirler.
- Şebeke kesintileri olduğunda kesintisiz enerji sağlamak için kullanılırlar.
- Dönüştürücü olarak, tüm hücreler aynı elektroliti kullanmaktadır. Şarj esnasında belirli sayıda hücre kullanıp, deşarj esnasında farklı sayıda hücre kullanılmasıyla, akü geriliminin kullanılan hücre sayısına bağlı olarak ayarlanabilir olduğu düşünülürse, güçlü bir DC/DC dönüştürücü olarak kullanılmaları mümkündür. Bununla birlikte giriş ve çıkış hücre sayısı değiştirilerek yalnızca anahtarlama ile frekans sınırlaması yapılarak AC/DC, AC/AC ya da DC/AC güç dönüştürücüleri olarak da kullanılabilirler.
- Akışkan aküler elektrolitin tekrar yerine konulması ile çok kısa sürede şarj edilebilme özelliğine sahip olduklarından dolayı elektrikli araçlarda da kullanılabilmesi için de elverişlidir. Bu alandaki çalışmalar devam etmektedir.
- Şebekeden bağımsız sistemler için; özellikle telekomünikasyon sektöründe şebekeden bağımsız baz istasyonlarının enerjilendirilmesinde, yine şebekeden bağımsız rüzgar veya güneş ile çalışan sistemlerde sistem kararlılığını sağlamak amacıyla veya kullanılan jeneratörde yakıt tasarrufu sağlamaya yönelik kullanılırlar.

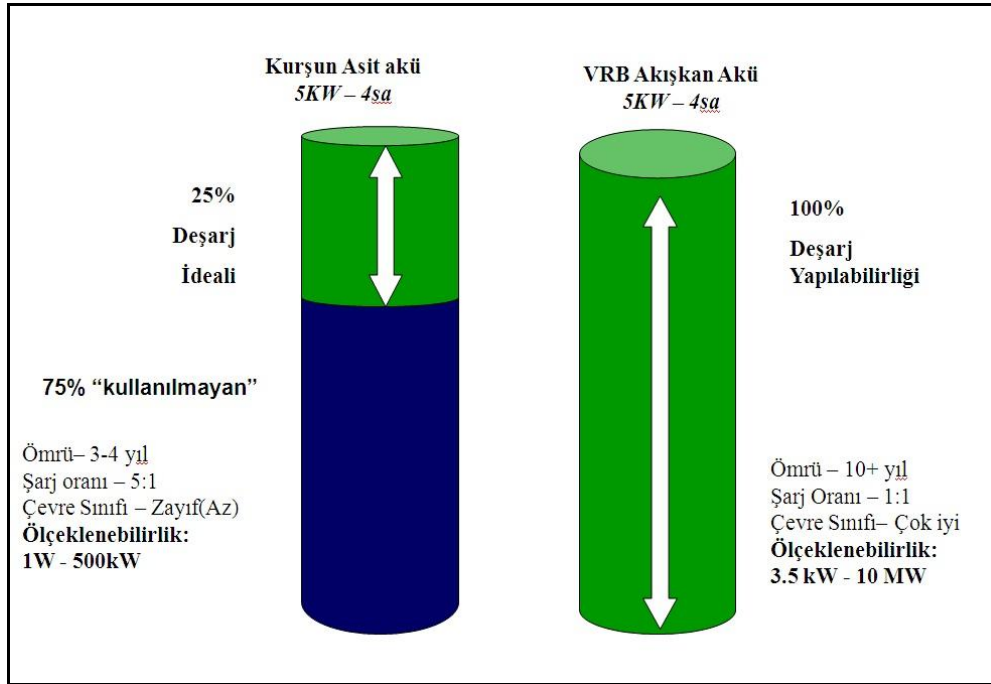
2.2.5.1 Dünya üzerindeki mevcut VRB Kurulumları

- Japonya'da yarı iletken üretim fabrikasında 1,5 MW'lık UPS sistem uygulaması
- Japonya, Hokkaido'daki Tomari Rüzgar Tepelerinde rüzgar enerjisi projesinde çıkış dengeleyici 275 kW'lık uygulama

- Tazmanya, King Island üzerindeki Huxley Tepeleri Rüzgar Tarlası'nda 200 kW'lık sistem, 800 kWh (2,9 GJ) çıkış gücü kademelendirme uygulaması
- Utah, Castle Valley'de 250 kW'lık sistem, 2MWh (7,2 GJ) talep gücü dengeleme uygulaması
- Kenya'da Katangi ve Njabini'de yer alan Winafrique Teknoloji'ye ait Safaricom GSM uygulaması için 5 kW gücündeki bir ünite uygulaması
- Florida, St.Petersburg'de kamu araştırmaları güç merkezinde 5 kW gücünde bir ünite uygulaması bulunmaktadır [12].

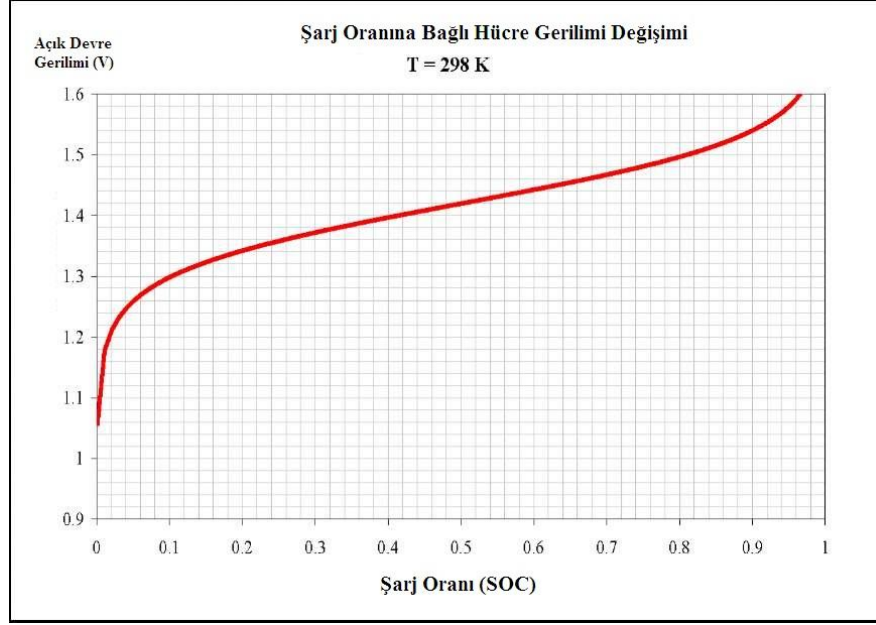
2.2.6 VRB ile Kurşun Asit Akülerin Karşılaştırılması

VRB'ler kurşun asit akülere ve dizel jeneratörlere göre daha çevre dostu bir sistemdir. Kurşun asit aküler derin deşarja imkan tanımaz ve çevrim ömrü VRB'lere göre çok daha kısadır. VRB'ler ile yapılan mukayese Şekil 2.17'de gösterilmektedir.



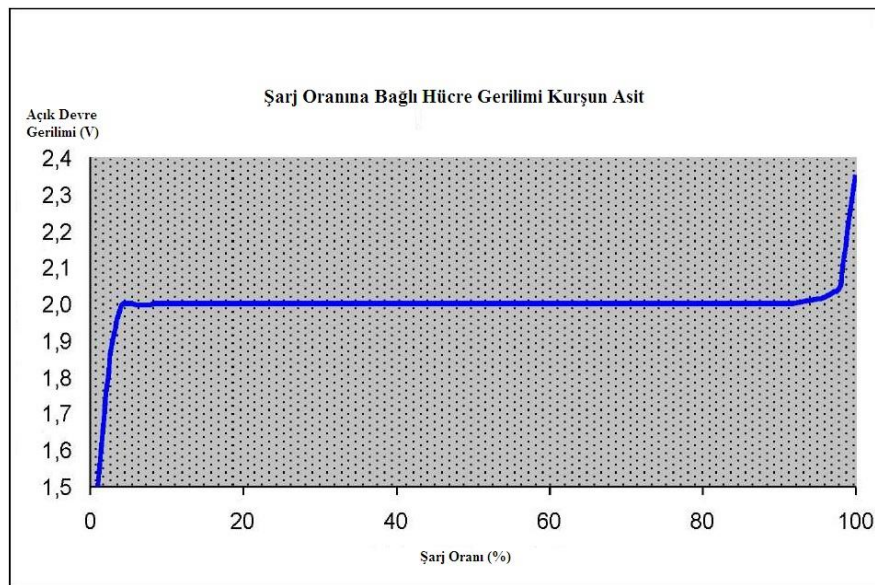
Şekil 2.17 : VRB – Kurşun Asit Akü Mukayese [13].

VRB'lerin önemli bir avantajı da şarj seviyesi (State Of Charge-SOC) bilgisinin akünün açık devre geriliminin değeri ile ölçülebilir olmasıdır. Şekil 2.18'de yer alan grafikten de görüleceği üzere VRB'lerin şarj durumu akü açık devre gerilimine göre % 10 - % 90 aralığında lineer artmaktadır.



Şekil 2.18 : VRB Açık Devre Geriliminin Şarj Oranı ile Değişim Grafiği [13].

Oysa Şekil 2.19'da görüleceği üzere kurşun asit akülerde şarj seviyesi aynı aralıkta düz bir grafiktedir. Yani bu aralıkta ölçülen açık devre gerilimi akünün şarj seviyesi hakkında kesin bir bilgi vermez.



Şekil 2.19 : Kurşun-Asit Akünün Açık Devre Geriliminin Şarj Oranı ile Değişim Grafiği [13].

2.2.7 Vanadyum Redoks Akülerin Ticarileştirilmesindeki Problemler

Redoks akışkan akülerin ticarileştirilmesinde, sistemin uzun dönemde güvenilirliğinin doğrulanması, fiyatların düşürülmesi ve sistemin daha optimum tasarlanması önemlidir. Kompaktlık özellikle ofis binaları ve benzer yapılar için kurulum alanlarındaki kısıtlardan dolayı önemlidir. Bu sebeplerden dolayı, sistemi geliştirebilmek için aşağıda belirtilenler hedefler üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

- (1) Akü'de kW başına düşen üretim maliyetlerini yüksek güç çıktısına (yüksek elektrik akım yoğunluğu) ulaşılarak düşürmek.
- (2) Yüksek yoğunluklu elektrolit kullanarak tank hacmini küçültmek.

Redoks akışkan akülerde, akünün büyük bir bölümünü elektrolit kaplamaktadır. Vanadyumun bu elektrolit içerisinde aktif madde olarak kullanılmasıyla, elektrolit sıvısındaki artan vanadyum konsantrasyonu daha iyi kompaktlık için önemli bir öncelik olmaktadır.

Elektrolit yoğunluğunun iki katına çıkarılması, tank hacminin yarı yarıya azalması anlamına gelir. Özellikle ofis binalarında atıl durumdaki hacimlerin daha etkin kullanılması amacıyla yer altı tankları geliştirilmiştir. Bu yeni teknolojinin performansı gerçekleştirilen bir uygulama ile sistemle gösterim testleri yoluyla doğrulanmıştır. Redoks akışkan akülerin ofis binalarında yeterli uygulanabilirliğe sahip olduğu gösterilmiştir.

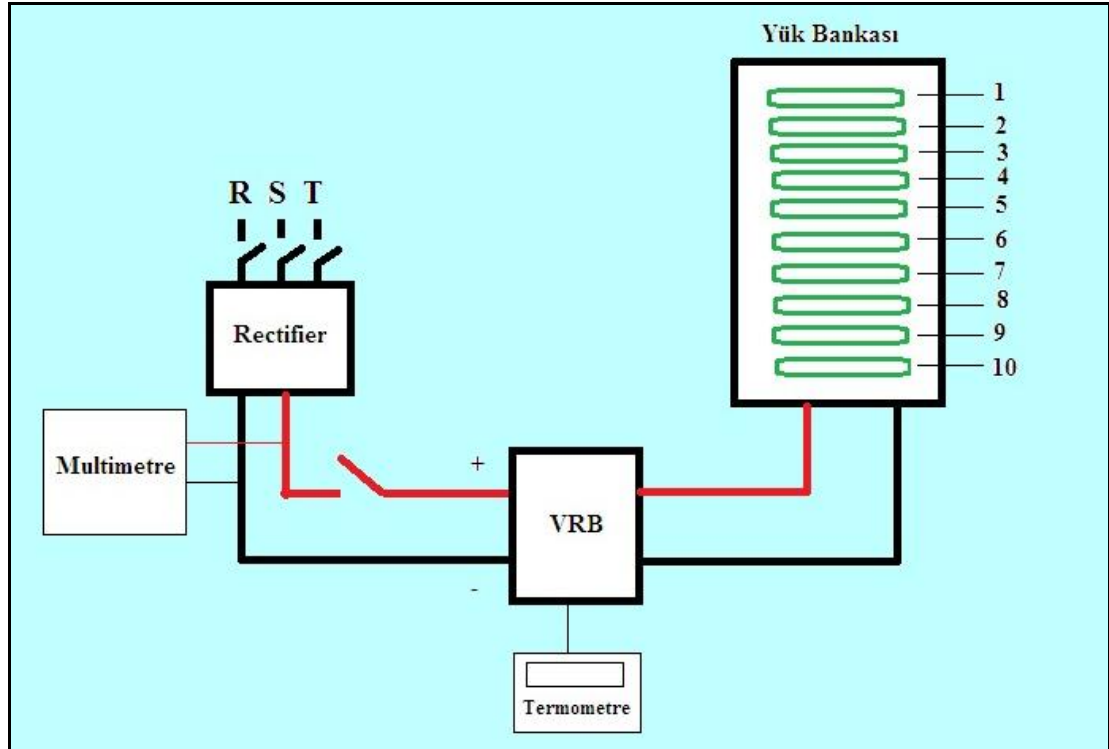
Maliyetleri düşürme ve dayanıklılığı arttırmaya odaklı teknolojik gelişmeler istenilen ticarileşme seviyelerine ulaşana dek sürecektir.

3. VRB DENEY SİSTEMİNİN TANITIMI

3.1 Deney Sisteminin Tanıtımı: Bileşenler, Ölçüm Sistemi ve Özellikleri

Vanadyum Redoks Akışkan Akü'nün elektriksel karakterizasyon ölçümleri boyunca kullanılan deney sistemi bileşenleri bu başlık altında tanıtılacaktır.

Deney sistemi; VRB'yi şarj etmek için kullanılan yardımcı ekipman (rectifier), sabit yük altında deşarj yapabilmek için tasarlanan DC yük bankası, performans ölçümü gerçekleştirilen VRB ve akışkan sıcaklığını ölçmemize yarayan sıcaklık ölçer bileşenlerinden oluşmaktadır. Ölçümler boyunca akım, gerilim ve sıcaklık bilgisi rectifier üzerinden alınmış, ancak multimetre yardımı ile de sistem gerilimi teyit edilmiştir. Deney sistemi temel bileşenleri ve bağlantı şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Deney Sistemi Temel Bileşenleri ve Bağlantı Şeması

3.1.1 Yük Bankası

Piyasada gc elektroniği üzerine üretim yapan firmaların müşteri talepleri doğrultusunda hazır ürün olarak tasarladığı çeşitli yük bankaları mevcuttur. Aküyü değişken olmayan sabit bir yük altında deşarj ederek farklı koşullar altındaki ak davranışını incelemek amacıyla kademeli bir yük bankasına ihtiyaç duyulmuştur.

Yapılan piyasa araştırmaları sonucunda yük bankası fiyatları oldukça yüksek bulunmuş, kendi imknlarımızla yük bankası tasarlanmanın daha ucuza geleceği grlmştir. Bunun zerine 5 kW gücünde bir yük bankası hazırlanmasına karar verilmiştir.

Öncelikle zerine direnç montajı gerçekleştirebilmek için 100 x 160 cm ebatlarında 5 mm kalınlığında bir alüminyum profil hazırlanmıştır. Dirençlerin deşarj süreci boyunca açığa çıkaracağı yüksek miktardaki ısı düşünülerek, soğutma vazifesine yardımcı olabilmesi maksadıyla belirtilen kalınlıkta alüminyum malzeme seçilmiştir.

Daha sonra bu alüminyum profilin bir duvar üzerine montajını sağlayabilecek ve dirençleri duvar yüzeyinden 10 cm uzakta tutmayı sağlayacak montaj ayakları hazırlanmıştır. Şekil 3.2'de gösterilen U Őeklindeki bu montaj ayakları için yine aynı kalınlıkta alüminyum malzeme kullanılmıştır.



Şekil 3.2 : Yük Bankası İçin Hazırlanılan Alüminyum Profil ve Montaj Aparatları

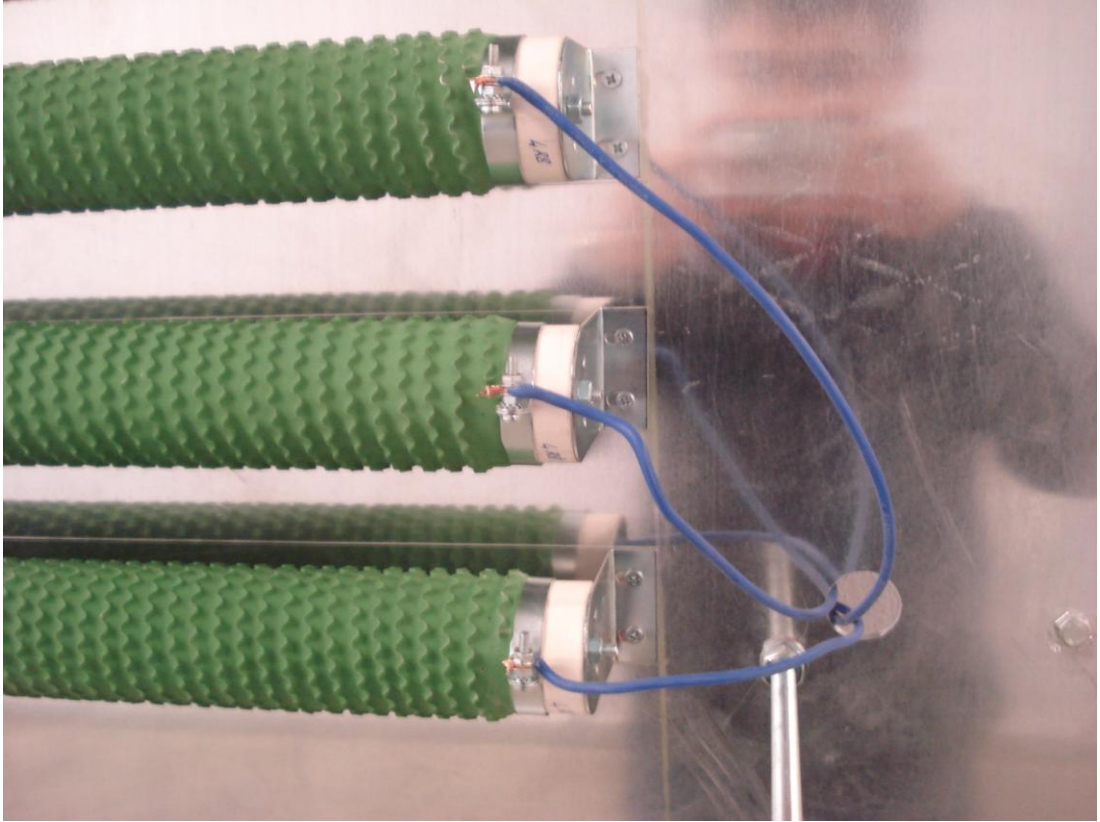
Her biri 500 W elektriksel güç çekebilecek 10 adet eşdeğer direnç satın alınmıştır. Bu dirençlerin ohm değerleri belirlenirken deşarj süreci boyunca 57 V ile 42 V arasında değişen akü geriliminin ortalama 48 V olduğu kabul edilmiştir. Her bir direnç kademesinin 500 W güç çekebilmesi için her bir direnç üzerinden denklem 3.1'e göre;

$$P = V.I \quad (3.1)$$

$500 = 48.I \Rightarrow I = 10,41A$ akım geçmesi gerekmektedir.

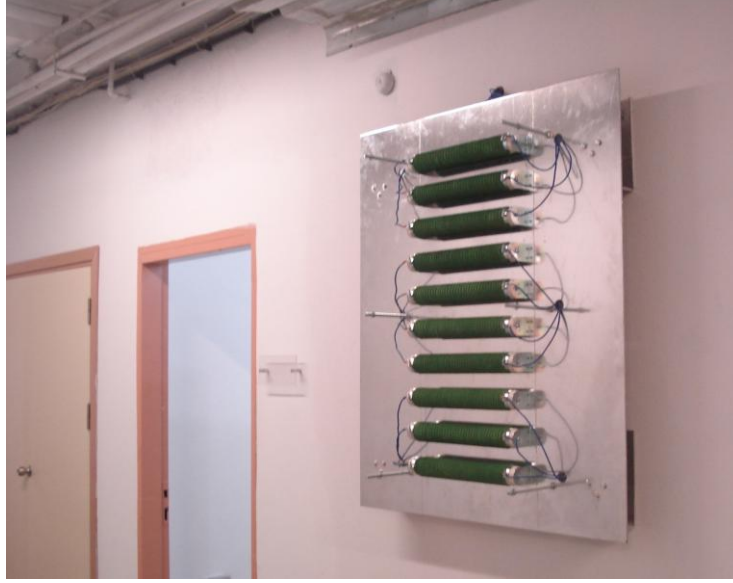
$$V = I.R \Rightarrow R = \frac{V}{I} = \frac{48}{10,41} = 4,61\Omega \text{ olarak her bir direncin büyüklüğü hesaplanmıştır.}$$

Yük bankası için satın alınan taş dirençlerden her biri 40 cm uzunluğunda, 5 mm kalınlığında tel sarım dirençlerdir. Üzerleri ısıya $250^{\circ}C$ 'ye kadar sıcaklığa dayanıklı özel bir malzeme ile kaplanmıştır. Bu kaplama aynı zamanda tel sarımların deşarj esnasında genleşerek kısa devre oluşturmalarına da engel olurlar. Dirençlere ait fotoğraf Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



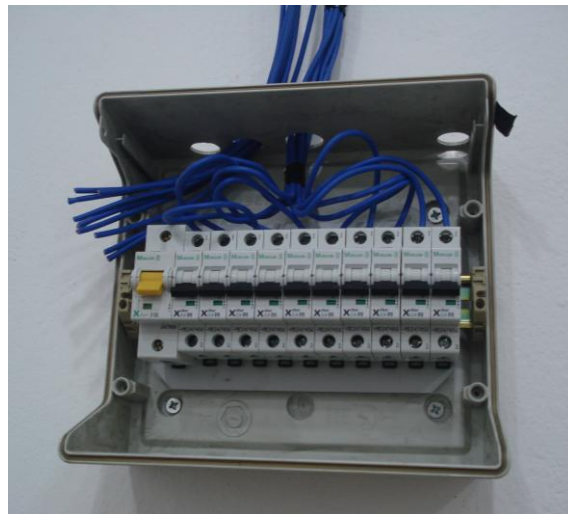
Şekil 3.3 : Yük Bankası İçin Hazırlanılan Alüminyum Profil ve Montaj Aparatları

Bu 10 adet eşdeğer direnç hazırlanılan alüminyum profil üzerine Şekil 3.4’de gösterildiği gibi sırayla monte edilmiştir.



Şekil 3.4 : 10 Adet Eşdeğer Direncin Alüminyum Profil Üzerine Montajı

Her bir direnci ayrı ayrı anahtarlayabilmek için her bir direnç kademesi başına 16A’lik otomat sigortalar yerleştirilmiştir. Kısa devre durumunda sistemi korumak için bir adet de 125 A’lik sigorta sistem ana girişine bağlanmıştır. Yük bankasının monte edildiği duvarın tam arkasına yerleştirilen sigorta kutusunda rectifier’a elektriksel bağlantı yapılmıştır. Hem şarj, hem de deşarj rectifier üzerinden gerçekleştirilmiş ve bu sayede dakikalık olarak sistemdeki güç bileşenleri ölçülebilmektedir. Direnç kademelerini anahtarlamak için hazırlanan sigorta kutusu Şekil 3.5’de gösterilmektedir.



Şekil 3.5 : Direnç Kademelerini Anahtarlamakta Kullanılan Sigorta Kutusu

Her biri 48 V gerilim ile 500 W elektriksel güç çekebilen dirençlerden oluşturduğumuz yük bankası toplamda 5 kW gücünde gerçekleşmiştir. Tüm sistem bağlantıları tamamlandıktan sonra dirençlerin üzeri yine alüminyum bir plaka ile kapatılarak dirençler devrede iken herhangi bir çarpılma veya yanma tehlikesine karşı Şekil 3.6'da gösterildiği gibi önlem alınmıştır.



Şekil 3.6 : 5 kW Gücünde DC Yük Bankası

3.1.2 Rectifier (Yardımcı Ekipman - Doğrultucu)

VRB şarj ve deşarj edilirken tüm elektriksel olaylar bir rectifier üzerinden gerçekleştirilmiştir. Delta marka ES48/300-UQA02 model rectifier'ın teknik özellikleri şu şekildedir;

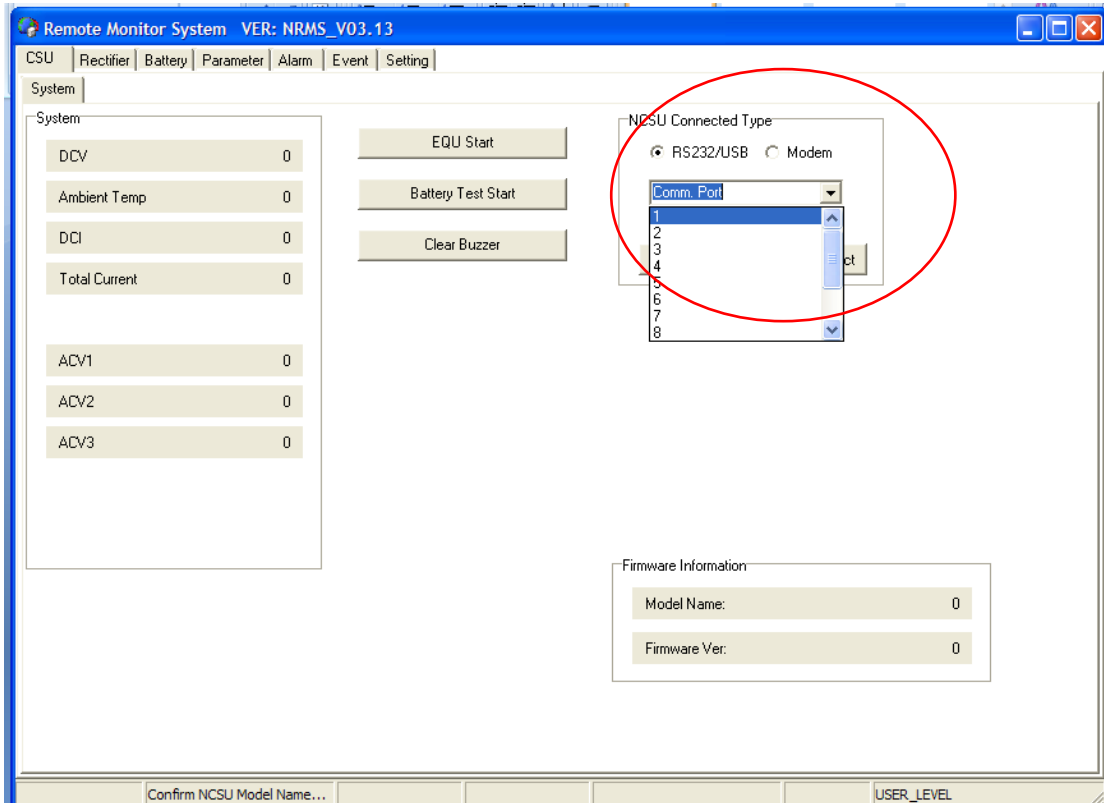
1. Giriş Voltajı: 380V/220V, Üç Faz
2. Giriş Frekansı: 50/60 Hz \pm %5
3. Çalışma Sıcaklığı: $-20^{\circ}C \square +60^{\circ}C$ ($-4^{\circ}F \square +149^{\circ}F$)
4. Nem Oranı: 10 \square +95% RH (yoğunlaşmamış)
5. Zemin Dayanıklılık Ölçüsü: 600 kg/m²

Delta marka ve deney boyunca kullanılan belirtilen özelliklerdeki rectifier'ın görüntüsü Şekil 3.7'de verilmiştir.



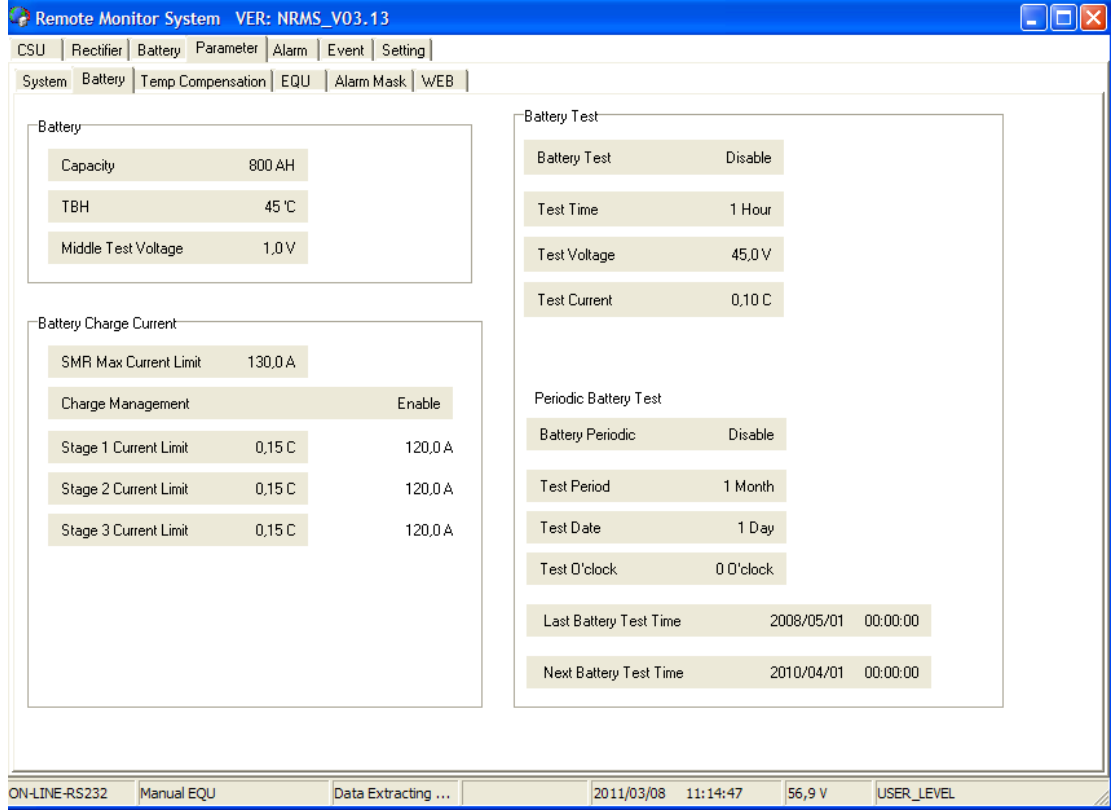
Şekil 3.7 : Deneylerde Kullanılan Rectifier Görüntüsü

VRB şarjı ve deşarjı rectifer üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şarj akımını sınırlamaya, şarj ve deşarjı başlatmaya ve dakikalık olarak sistemden akım, gerilim ve sıcaklık dotalarını almaya yarayan bir bilgisayar ara yüzü mevcuttur. Bu arayüzde öncelike Şekil 3.8'deki ekran üzerinden RS232 bağlantısı aktif hale getirilir.



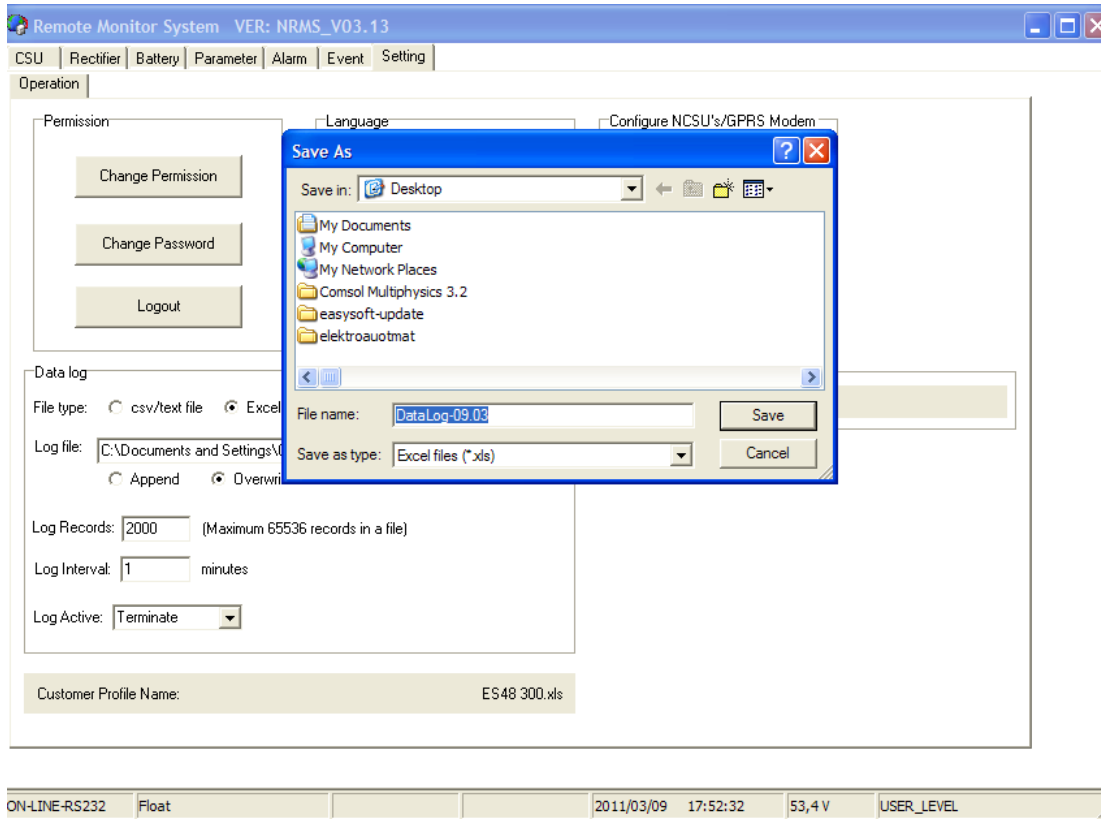
Şekil 3.8 : Rectifier RS232 Bağlantısını Aktif Hale Getiren Ara yüz Görüntüsü

Sistem şarj konumunda iken şebekeden çekilen akım “Total Current” değeri olarak, sistem deşarj durumunda iken “DCI” değeri olarak arayüz üzerinde gösterilir. Akü şarj süreci başlatılmadan önce şarj akımı sınırlaması için gerekli düzenlemeler aynı arayüzün “Battery” simgesi altında Şekil 3.9’da görüldüğü gibi gerçekleştirilir.



Şekil 3.9 : Şarj Akımını Sınırlamak İçin Kullanılan Rectifier Arayüz Görüntüsü

Şarj veya deşarj sürecini başlatmadan önce bilgisayar üzerinde tanımlanan konuma sistemde rectifier tarafından ölçümü yapılan tüm verilerin dakikada bir kaydedilmesi sağlanmaktadır. Data alımı başlatıldıktan sonra şarj veya deşarj başlatılmalıdır. Aksi takdirde veri kaybı oluşabilir. Excel dosya formatı olarak veri kaydının bilgisayarda tanımlanan alana gerçekleştirilmesine imkân sağlayan arayüz Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Veri Kaydına İmkân Tanıyan Rectifier Arayüz Görüntüsü

3.1.3 Multimetre

Her ne kadar sistem dataları rectifier üzerinden okunsa da gerilim ve akım değerlerini karşılıklı kontrol etmek ve referans hücre üzerinden SoC (state of charge) durumunu ölçebilmek için Şekil 3.11’de gösterilen multimetre kullanılmıştır.



Şekil 3.11 : Deneyle Esnasında Kullanılan Multimetre

VRB üzerinde bulunan bir referans hücre pini akü %0 dolulukta iken 0,5 V , %100 dolulukta iken 9,5 V gerilim ölçümüne izin vermektedir. Bu gerilim değeri belirtilen aralıkta lineer bir fonksiyon olduğu için SoC formülü denklem (3.1)'de görüldüğü gibidir ve deneyler boyunca multimetre yardımıyla mevcut durumdaki kapasite bilgisi ölçülmüştür.

$$c(\%) = \frac{(V - 0,5)}{(9,5 - 0,5)} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Multimetrenin aynı zamanda pens ampermetre özelliği ve direnç ölçme özelliği de mevcuttur.

3.1.4 Sıcaklık Ölçer (Thermometer)

VRB üzerinde sıvı elektrolitlerin here yığınlarına doğru aktığı şeffaf borular üzerine ölçüm ucu sıkıca bağlanan termometre ile akışkan sıcaklığı yarım saat aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Dört farklı ölçüm ucuna sahip Şekil 3.12'de gösterilen dijital termometre, 0.1 birim ölçüm hassasiyetine sahiptir.



Şekil 3.12 : Deneyler Boyunca Akışkan Sıcaklığını Ölçmek İçin Kullanılan Dijital Termometre

3.1.5 Deneyde Kullanılan VRB'nin Teknik Özellikleri

Deneyleer boyunca elektriksel karakterizasyon ölçümleri gerçekleştirilen Prudent Energy Marka 5 kW gücündeki 20 kWh'lik aküye ait teknik bilgiler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Ölçümü Gerçekleştirilen VRB Teknik Özellikleri

VRB KARAKTERİSTİKLERİ	
Açık Devre Gerilimi	49.0V – 57.0V
Maksimum Şarj Gerilimi	59.0V
Maksimum Deşarj Gerilimi	42V
Maksimum Şarj Akımı	140A
Maksimum Deşarj Akımı (kesintisiz)	125A
Maksimum Deşarj Akımı ($\leq 120s$)	175A
Deşarj başlangıç anma gücü	6.0kW
Deşarj sonu anma gücü	5.0kW
Sistem Verimi	65%
Tepki süresi	$\leq 1ms$
Deşarj Derinliği	100%

4. VRB ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER VE KARAKTERİZASYON

Bölüm 3.2.1’de ayrı ayrı açıklanan karakterizasyonun bölümleri bu başlık altında ele alınmış, elektriksel ölçümlere ilişkin sonuçlar detaylı olarak verilmiştir.

4.1 Soğuk Şarj Karakteristikleri

Tamamen boş durumda olan akü ortalama $16^{\circ}C$ ortam sıcaklığında tam kapasiteye ulaşıncaya kadar şarj edilmiş ve dakikada bir veri kaydı alınmıştır. Şarj süreci boyunca Çizelge 4.1’de verilen aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

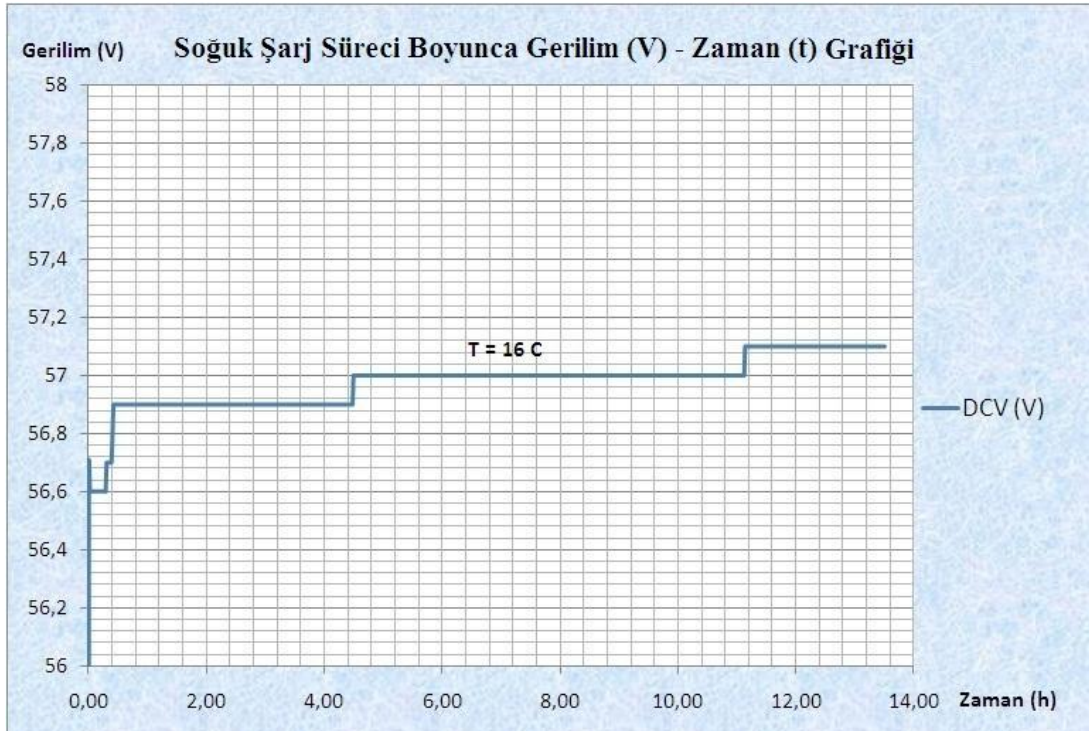
Çizelge 4.1 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları

Ölçüm Zamanı	Zaman (h)	Akışkan Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	DC V (V)	Şarj Akımı (A)	Toplam Transfer Edilen Elektrik Yüğü (Ah)	Anlık Güç (kW)	Toplam Transfer Edilen Enerji (kWh)
10:20:00	0,00	16,5	48,8	0	0,00	0,00	0,00
10:50:00	0,50	17,7	56,9	119	59,03	6,77	3,35
11:20:00	1,00	16,9	56,9	110	116,08	6,26	6,59
11:50:00	1,50	16,6	56,9	101	168,67	5,75	9,58
12:20:00	2,00	16,6	56,9	94	217,35	5,35	12,35
12:50:00	2,50	16,5	56,9	83	261,52	4,72	14,87
13:20:00	3,00	16,3	56,9	77	301,57	4,38	17,15
13:50:00	3,50	16,1	56,9	68	338,07	3,87	19,22
14:20:00	4,00	16,0	56,9	63	370,95	3,58	21,09
14:50:00	4,50	15,9	57	59	401,47	3,36	22,83
15:20:00	5,00	15,9	57	54	429,73	3,08	24,44
15:50:00	5,50	15,4	57	51	456,02	2,91	25,94
16:20:00	6,00	15,4	57	48	480,55	2,74	27,34
16:50:00	6,50	15,4	57	44	503,43	2,51	28,64
17:20:00	7,00	15,4	57	41	524,65	2,34	29,85
17:50:00	7,50	15,4	57	38	544,47	2,17	30,98
18:20:00	8,00	15,4	57	36	562,97	2,05	32,04
18:50:00	8,50	15,4	57	34	580,37	1,94	33,03
19:20:00	9,00	15,4	57	32	596,65	1,82	33,96
19:50:00	9,50	15,3	57	30	611,93	1,71	34,83

Çizelge 4.1 : (devam) Soğuk Şarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları

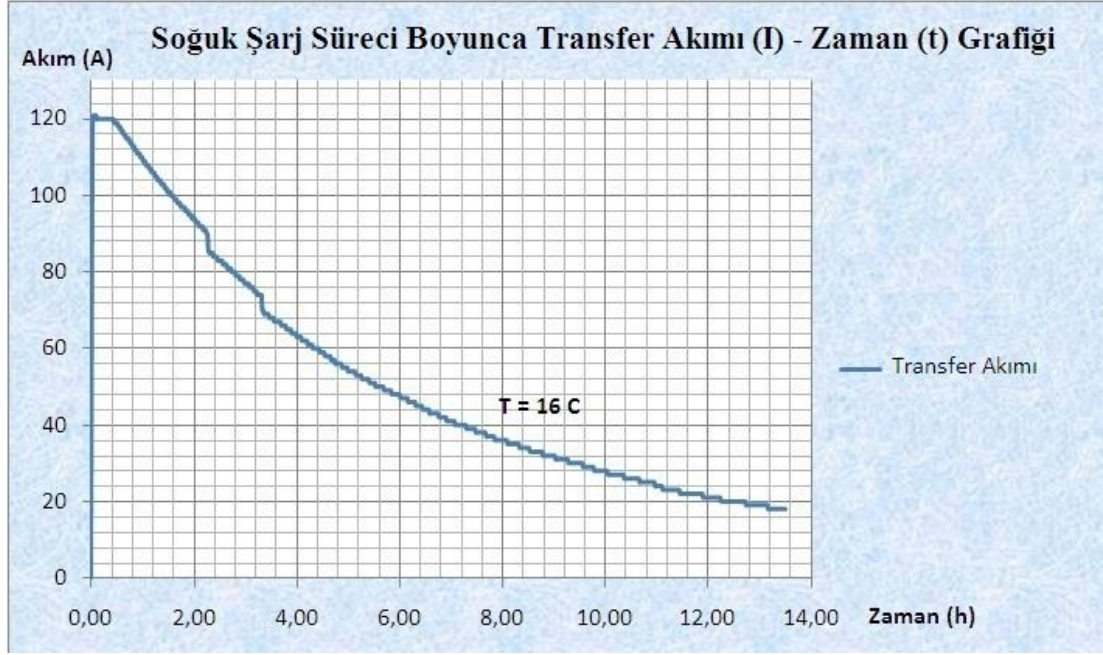
Ölçüm Zamanı	Zaman (h)	Akışkan Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	DC V (V)	Şarj Akımı (A)	Toplam Transfer Edilen Elektrik Yüğü (Ah)	Anlık Güç (kW)	Toplam Transfer Edilen Enerji (kWh)
20:20:00	10,00	15,2	57	28	626,25	1,60	35,64
20:50:00	10,50	15,2	57	26	639,63	1,48	36,41
21:20:00	11,00	15,2	57	24	652,23	1,37	37,12
21:50:00	11,50	15,2	57,1	22	663,77	1,26	37,78
22:20:00	12,00	15,2	57,1	21	674,65	1,20	38,40
22:50:00	12,50	15,1	57,1	20	684,88	1,14	38,99
23:20:00	13,00	15,0	57,1	19	694,60	1,08	39,54
23:50:00	13,50	15,0	57,1	18	703,75	1,03	40,07

Soğuk şarj süreci boyunca beklendiği üzere Şekil 4.1’de gösterildiği gibi akü gerilimi zamana bağlı olarak bir artış göstermiştir.



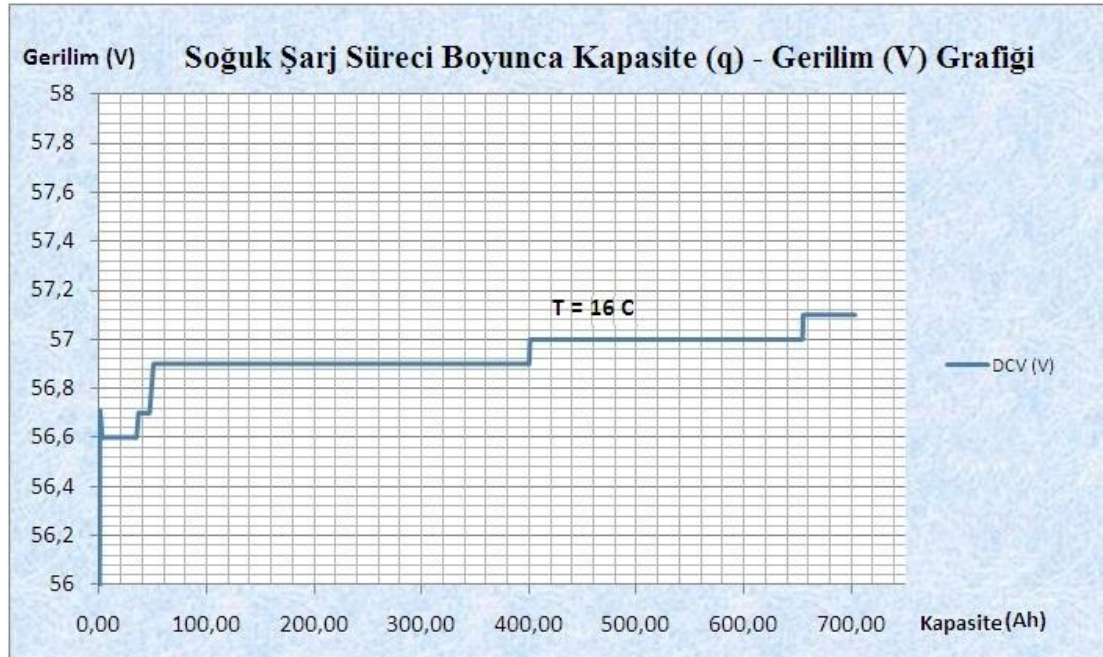
Şekil 4.1 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Zaman (t) Grafiği

Soğuk şarj süreci boyunca transfer akımının zamana göre değişimi Şekil 4.2’de gösterildiği gibidir. Akü doluluk oranı arttıkça transfer akımı azalmaktadır.



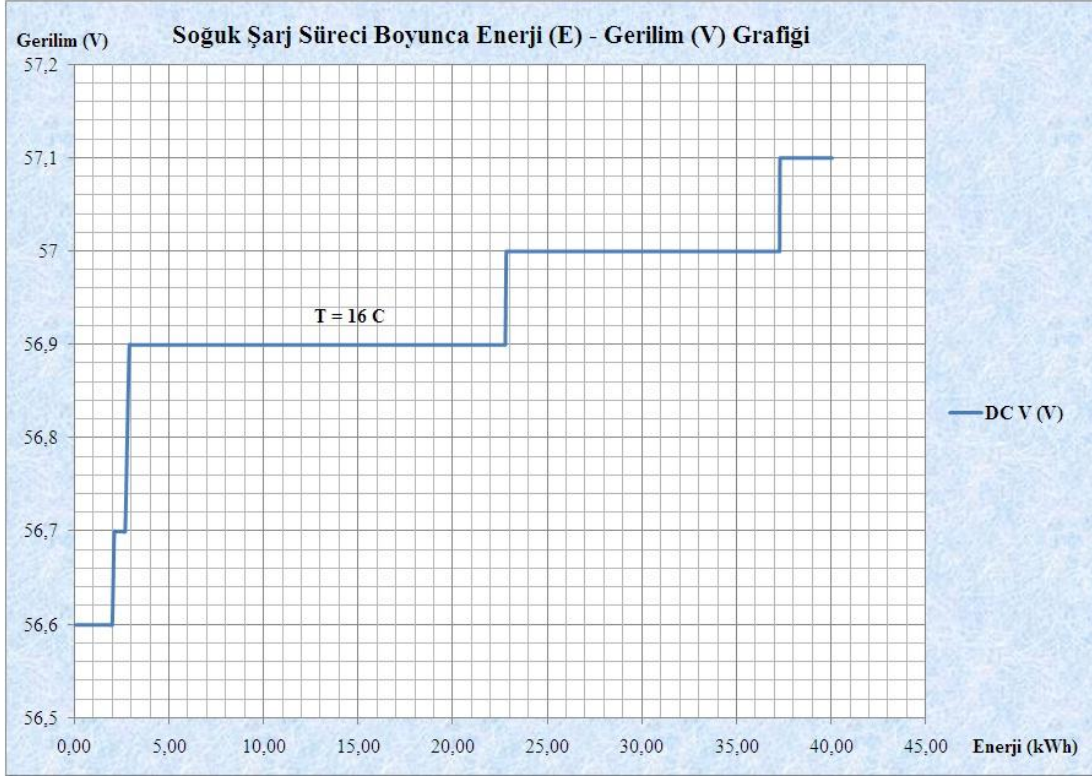
Şekil 4.2 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Transfer Akımı (I) – Zaman (t) Grafiği

Soğuk şarj süreci boyunca kapasite artışına bağlı olarak akü gerilimi Şekil 4.3’de gösterildiği gibi artmıştır.



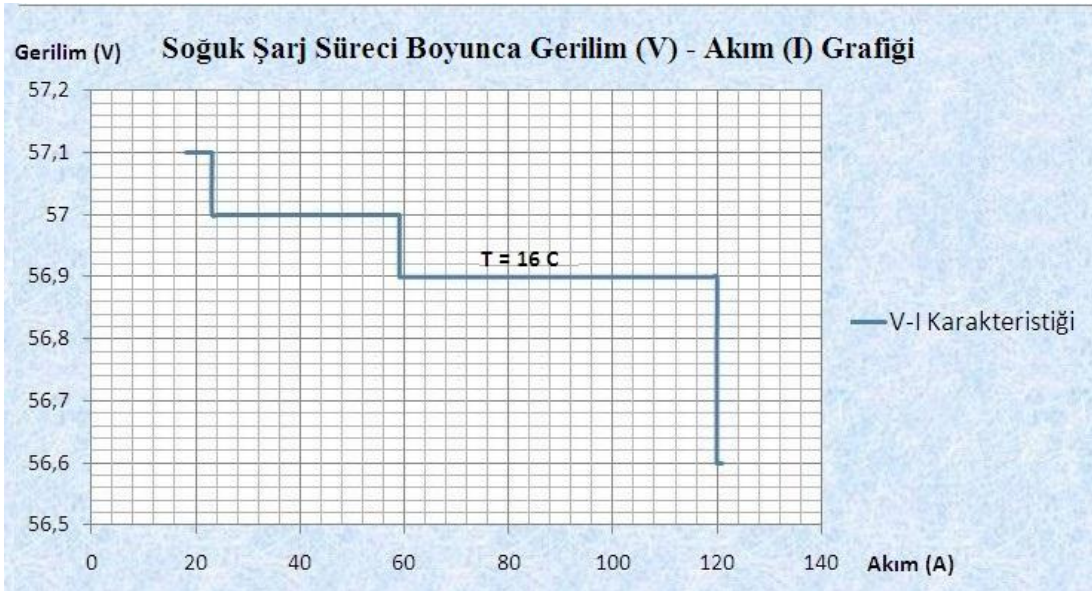
Şekil 4.3 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Kapasite (q) – Gerilim (V) Grafiği

Soğuk şarj süreci boyunca transfer edilen enerji arttıkça akü gerilimi yükselmektedir. Bu yükselişe ait grafik Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



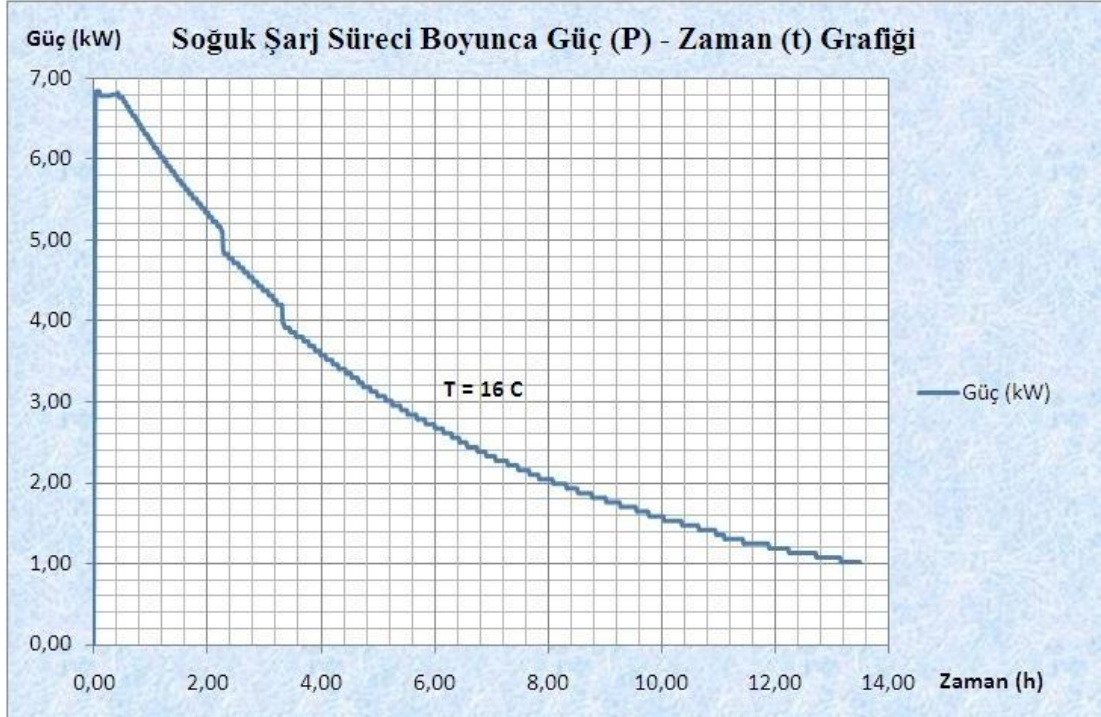
Şekil 4.4 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Enerji (E) - Gerilim (V) Grafiği

Soğuk şarj süreci boyunca akım-gerilim karakteristiği Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



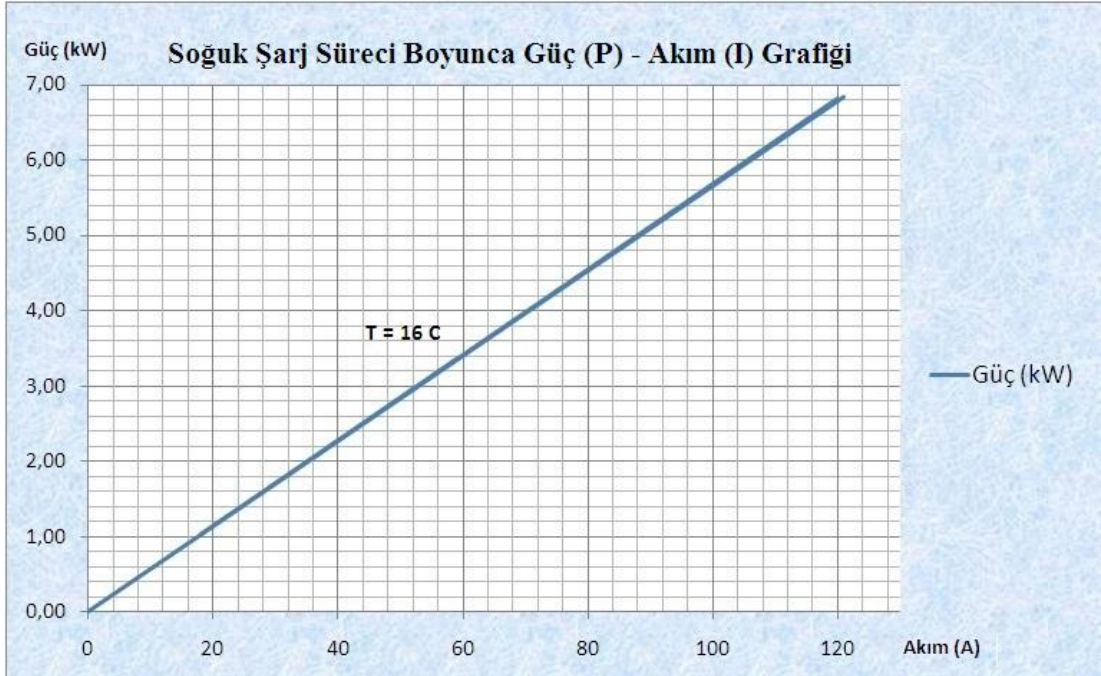
Şekil 4.5 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Akım (I) Grafiği

Soğuk şarj boyunca gücün zamana göre azaldığını gösteren grafik Şekil 4.6’da sunulmuştur.



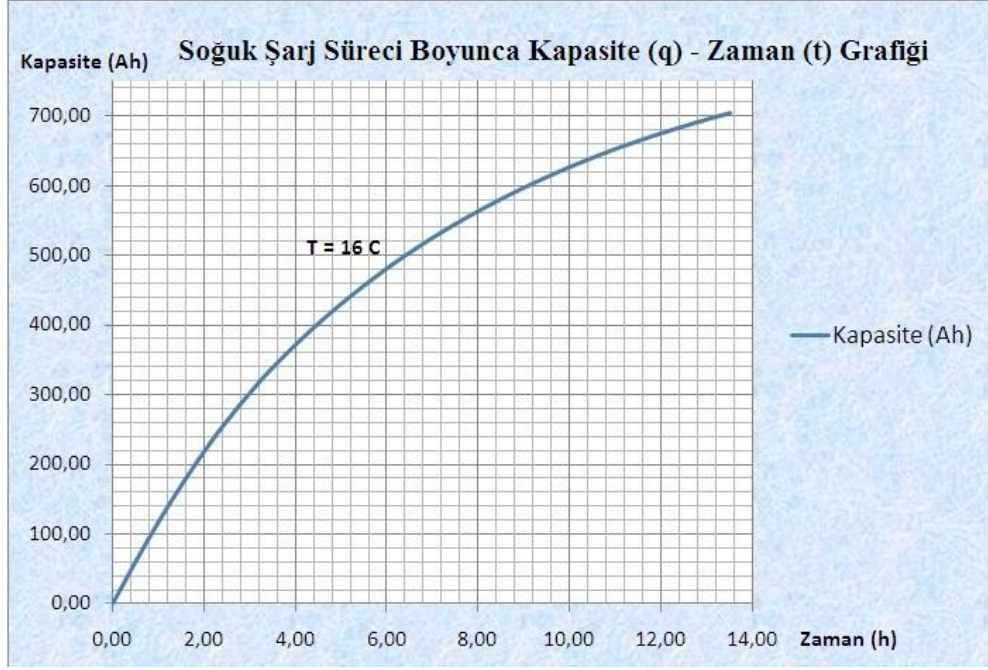
Şekil 4.6 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Güç (P) – Zaman (t) Grafiği

Soğuk şarj süreci boyunca transfer edilen toplam akım azaldıkça anlık gücün de Şekil 4.7’deki gibi azaldığı görülmüştür.



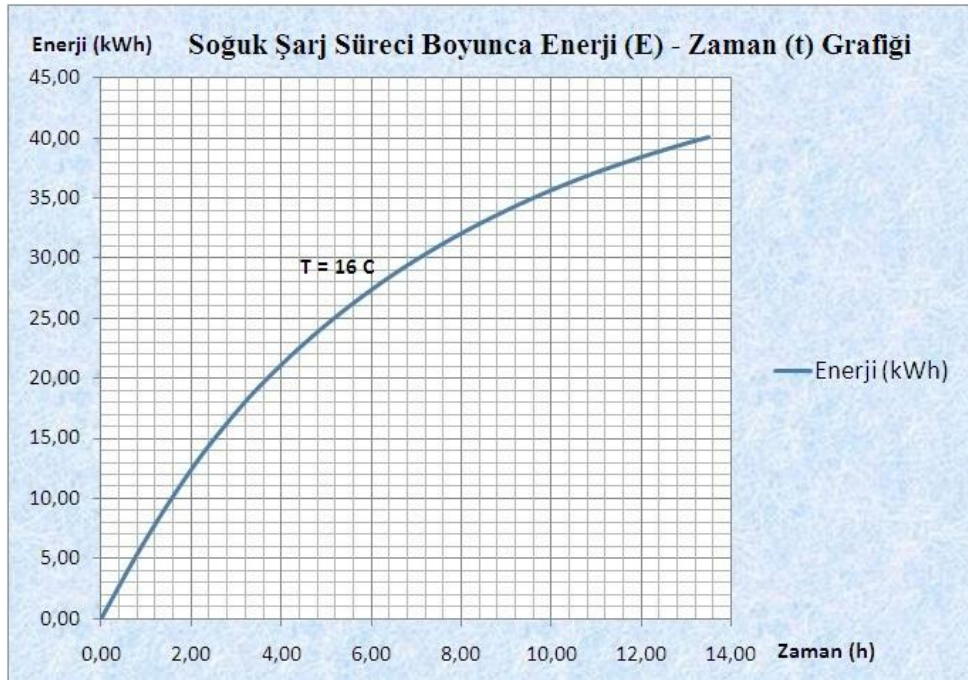
Şekil 4.7 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Güç (P) – Akım (I) Grafiği

Soğuk şarj süreci boyunca akü kapasitesindeki zamana bağlı değişim Şekil 4.8’de verilmiştir. Tahmin edileceği üzere, toplam transfer edilen elektrik yükü zamana bağlı olarak artmaktadır.



Şekil 4.8 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Kapasite (q) – Zaman (t) Grafiği

Soğuk şarj süreci boyunca toplam transfer edilen enerji Şekil 4.9’da görüldüğü gibi zaman içerisinde artmaktadır.



Şekil 4.9 : Soğuk Şarj Süreci Boyunca Enerji (E) – Zaman (t) Grafiği

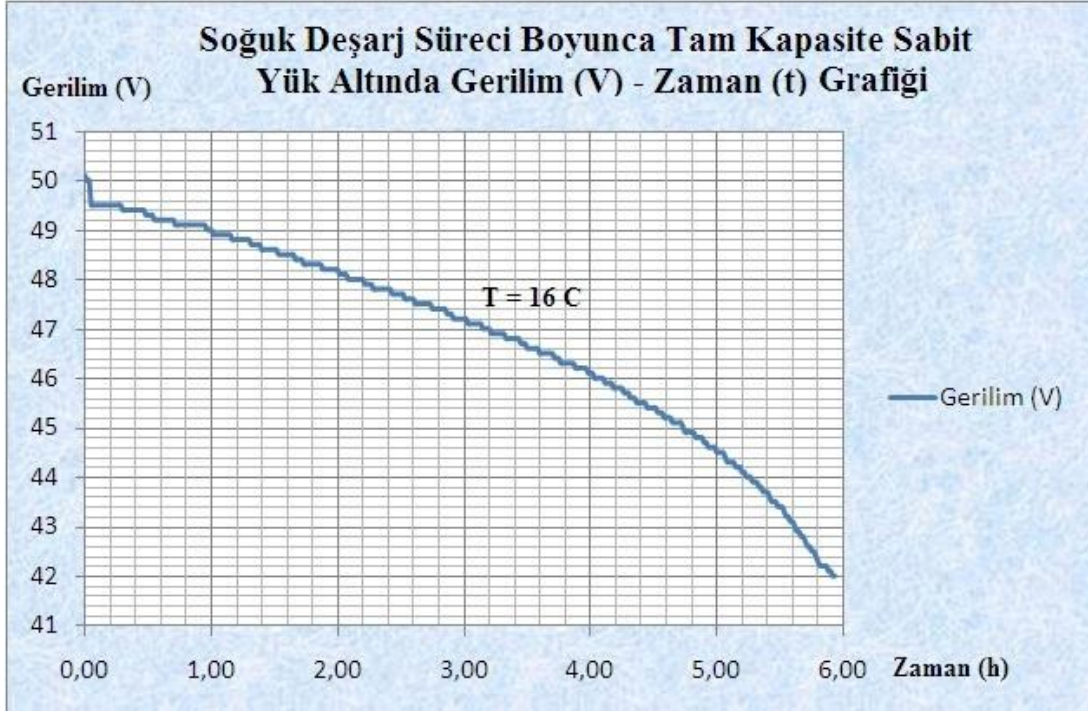
4.2 Tam Kapasite Sabit Yük İle Soğuk Deşarj Karakteristikleri

Tam kapasite dolu durumda olan akü, her biri 10 adet eşdeğer direnç ile (5 kW gücünde tam kapasite sabit yük altında) 16⁰C ortam sıcaklığında deşarj edilmiş ve Çizelge 4.2’de belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.2 : Tam Kapasite Sabit Yük İle Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları

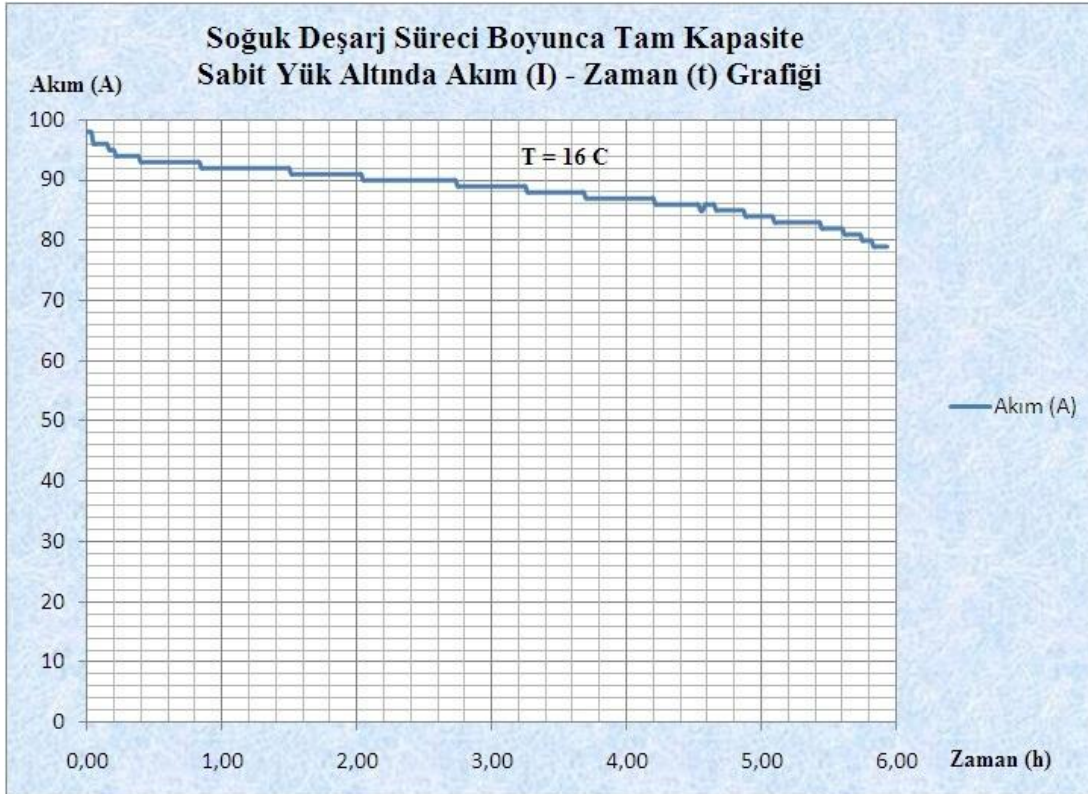
Ölçüm Zamanı	Zaman (h)	DC V (V)	DCI (A)	Toplam Transfer Edilen Elektrik Yüğü (Ah)	Anlık Güç (kW)	Toplam Enerji (kWh)
12:50:00	0,00	50,1	98	1,63	4,91	0,08
13:20:00	0,50	49,3	93	48,93	4,58	2,42
13:50:00	1,00	49	92	95,27	4,51	4,70
14:20:00	1,50	48,6	92	141,27	4,47	6,94
14:50:00	2,00	48,2	91	186,77	4,39	9,14
15:20:00	2,50	47,7	90	231,80	4,29	11,30
15:50:00	3,00	47,2	89	276,53	4,20	13,42
16:20:00	3,50	46,6	88	320,78	4,10	15,50
16:50:00	4,00	46,1	87	364,47	4,01	17,52
17:20:00	4,50	45,4	86	407,67	3,90	19,50
17:50:00	5,00	44,5	84	450,15	3,74	21,41
18:20:00	5,50	43,4	82	491,67	3,56	23,23
18:46:00	5,93	42	79	526,55	3,32	24,72

Soğuk deşarj süresince gerilimin zamana bağlı grafiğı Şekil 4.10’da verilmiştir. Akü çıkış gerilimi deşarj süresi boyunca azalmaktadır.



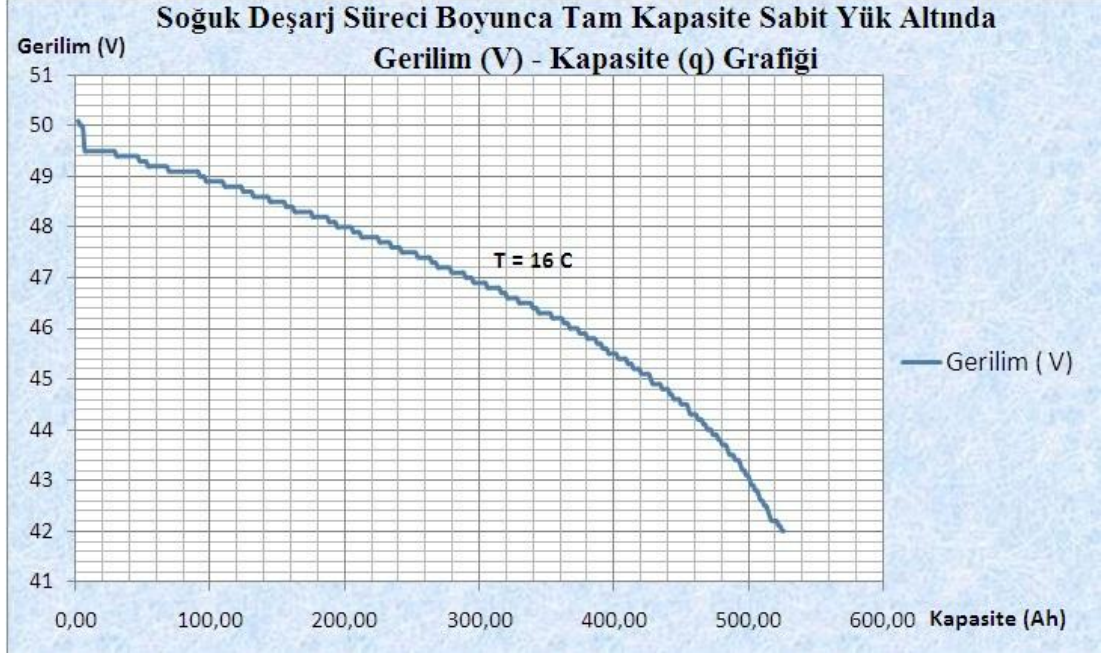
Şekil 4.10 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Zaman (t) Grafiği

Soğuk deşarj süresince gerilimdeki düşüşe bağlı olarak deşarj akımının zaman içerisinde azaldığına ilişkin grafik Şekil 4.11’de verilmiştir.



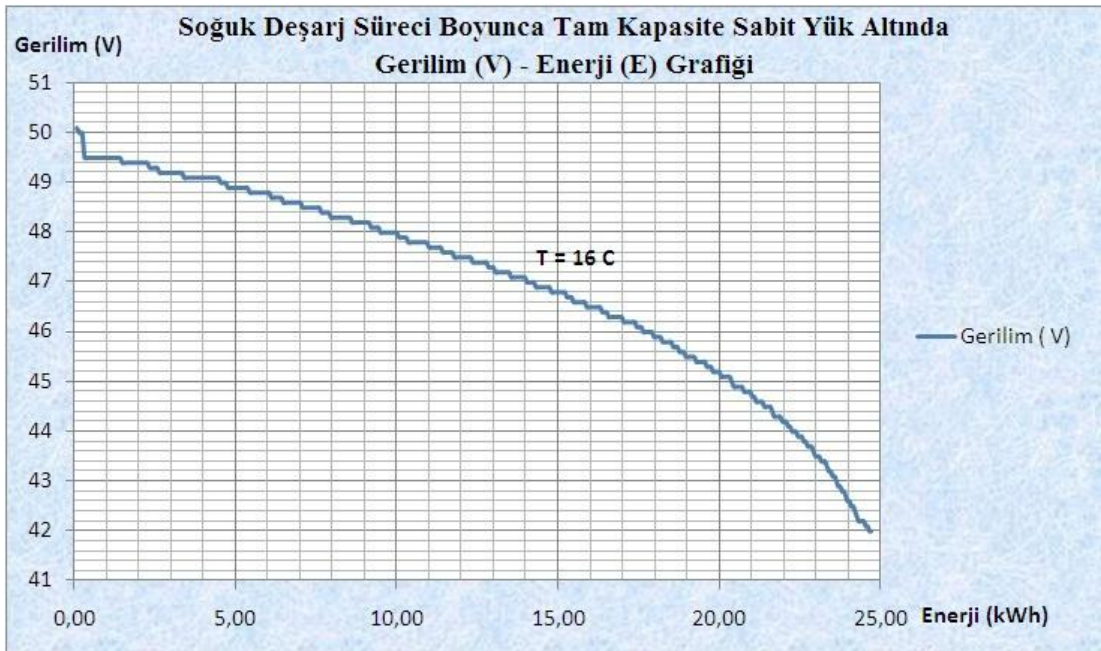
Şekil 4.11 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Akım (I) – Zaman (t) Grafiği

Soğuk deşarj süresince akü kapasitesi azaldıkça gerilimdeki düşüşü veren grafik Şekil 4.12’de sunulmuştur.



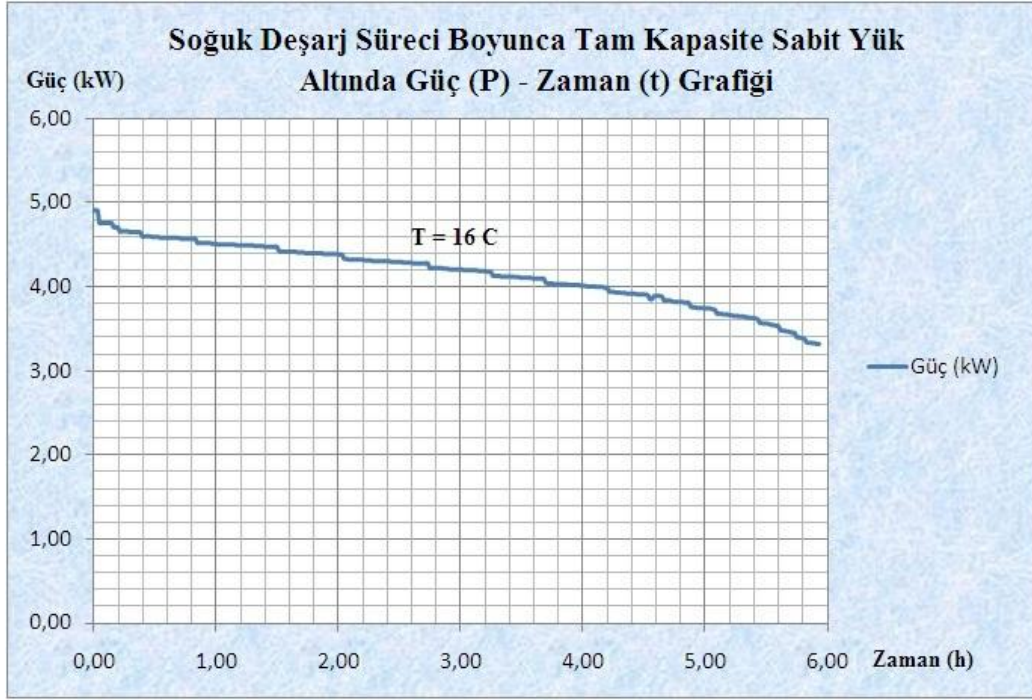
Şekil 4.12 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Kapasite (q) Grafiği

Soğuk deşarj süresince aküden çekilen toplam enerji miktarı arttıkça gerilimde meydana gelen düşüş Şekil 4.13’te görülmektedir.



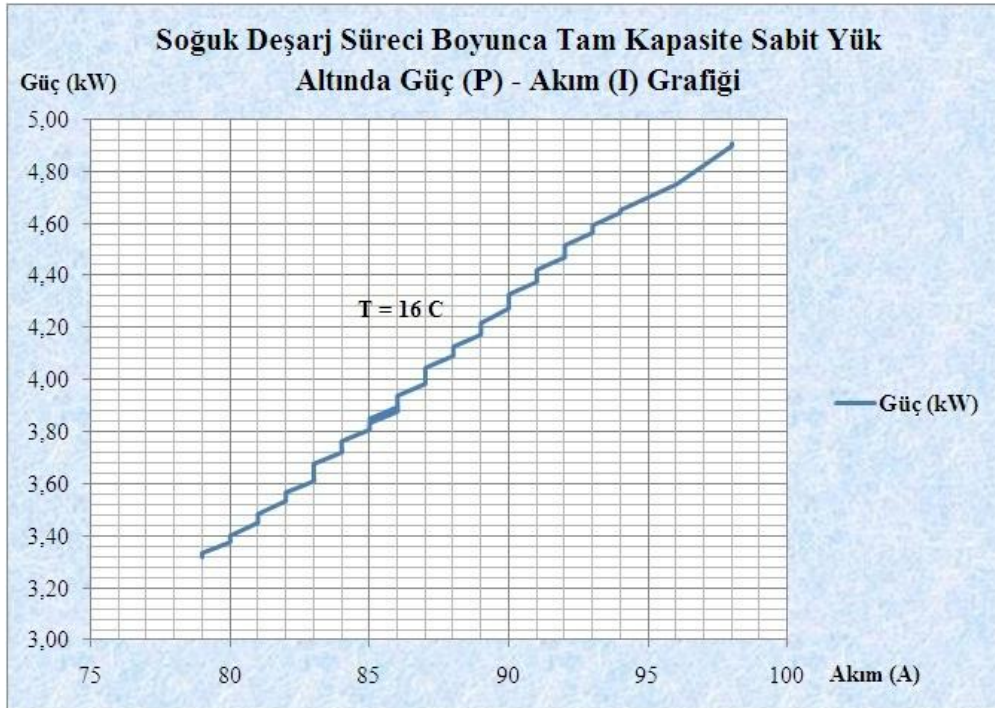
Şekil 4.13 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Enerji (E) Grafiği

Soğuk deşarj süresince anlık gücün zamana göre değişimi Şekil 4.14'te görölmektedir.



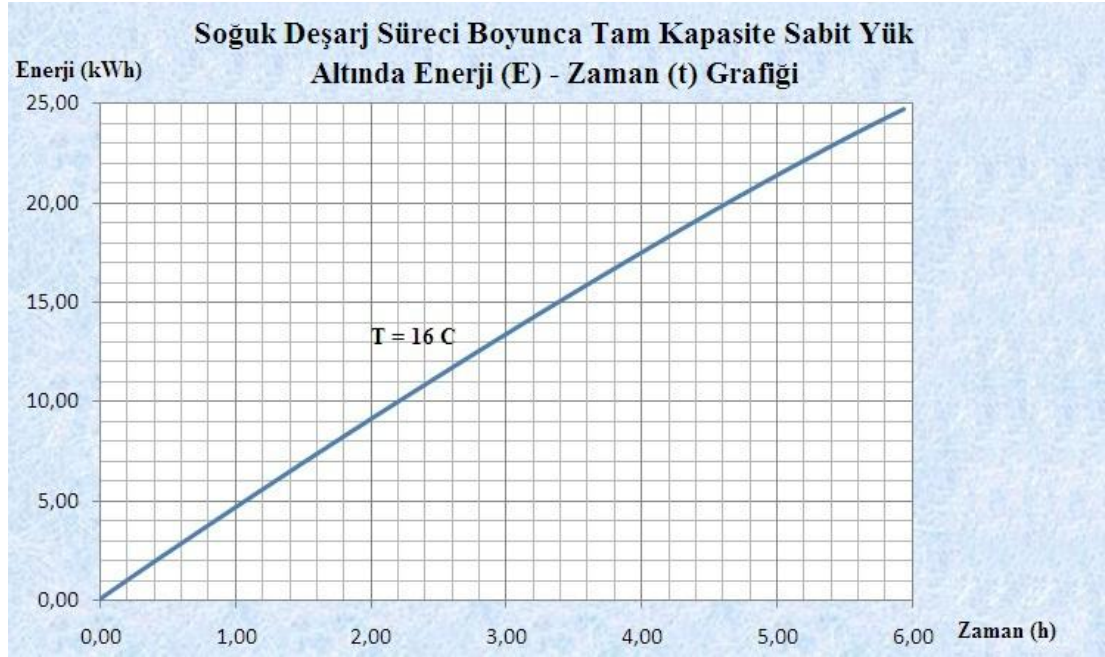
Şekil 4.14 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Güç (P) – Zaman (t) Grafiği

Soğuk deşarj süresince anlık gücün akımla olan ilişkisini gösteren grafik Şekil 4.15'te görölmektedir.



Şekil 4.15 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Güç (P) – Akım (I) Grafiği

Soğuk deşarj süresince aküden çekilen toplam enerjinin zamanla değişimi Şekil 4.16’da görülmektedir.



Şekil 4.16 : Soğuk Deşarj Süreci Boyunca Enerji (kWh) – Zaman (t) Grafiği

4.3 Farklı Doluluk Oranlarında Soğuk Deşarj Karakteristikleri

Vanadium – Redox Akışkan Akü farklı doluluk oranlarındayken farklı direnç kademeleriyle deşarj edilmiş ve gerilim düşümünün zaman içerisindeki değişimi gözlenmiştir. Her anlık yükleme deneyi ve ölçümleri sonrasında akünün toparlanması ve deney başlangıcındaki performansına ulaşması için 3-5 dk. süreyle beklenmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak akünün iç direnci hesaplanmıştır. Akü iç direncinin doluluk oranıyla ve sıcaklıkla nasıl değiştiği araştırılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları Çizelge 4.3’te görüldüğü gibidir.

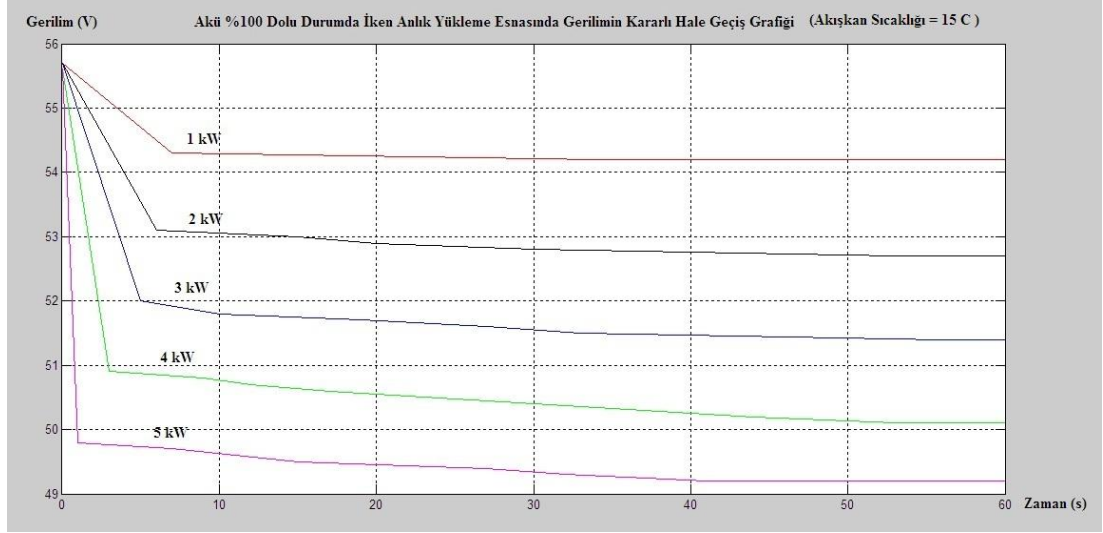
Çizelge 4.3 : Farklı Doluluk Oranlarında Sabit Yükle Soğuk Deşarj Deneyi Ölçüm Sonuçları

	Direnç Kademesi	Ölçülen Akım [A]:	Ölçülen Gerilim [V]:
Akü % 100 Dolu Durumda (T = 15C°)	0	0	55,7
	2	22	54,2
	4	42	52,7
	6	62	51,4
	8	79	50,1
	10	97	49,2

Çizelge 4.3 : (devam) Farklı Doluluk Oranlarında Sabit Yükte Soğuk Deşarj Deneyi Ölçüm Sonuçları

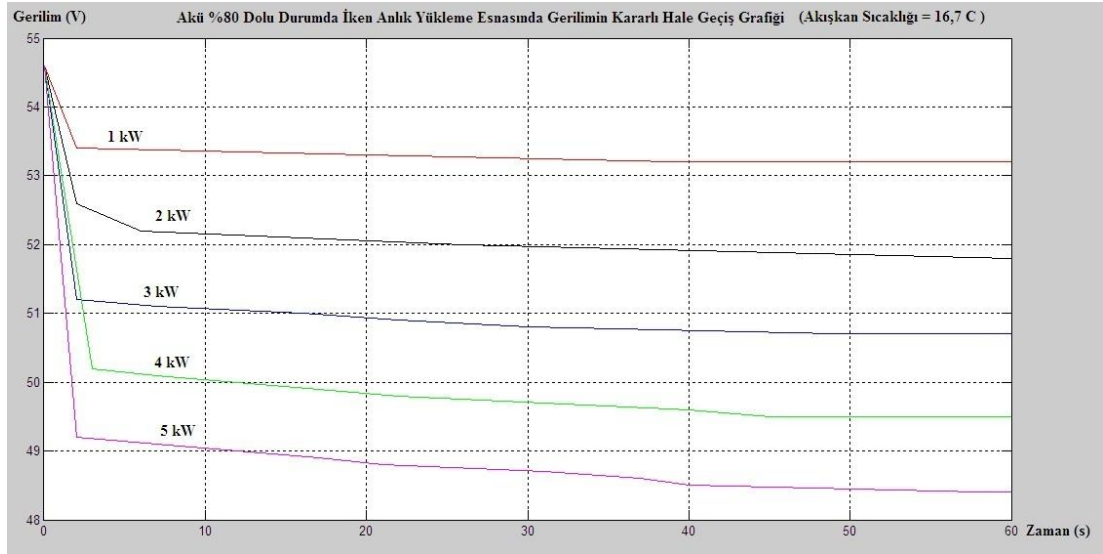
	Direnç Kademesi	Ölçülen Akım [A]:	Ölçülen Gerilim [V]:
Akü % 80 Dolu Durumda (T = 16,7C°)	0	0	55,7
	2	21	53,2
	4	40	51,8
	6	59	50,7
	8	76	49,5
	10	93	48,4
Akü % 60 Dolu Durumda (T = 16,2C°)	0	0	55,7
	2	20	52
	4	39	50,6
	6	57	49,4
	8	75	48,3
	10	91	47,2
Akü % 40 Dolu Durumda (T = 16,5C°)	0	0	55,6
	2	20	50,8
	4	38	49,4
	6	56	48,3
	8	73	47,1
	10	89	46
Akü % 20 Dolu Durumda (T = 16,8C°)	0	0	55,6
	2	19	49,4
	4	37	48
	6	54	46,7
	8	70	45,5
	10	86	44,2

Anlık deneylerin akü kapasitesine olan etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir (<%1). Çizelge 4.3’de belirtilen gerilim değerleri sistem kararsız haldeki süreci tamamlayıp, tamamen kararlı hale oturduktan sonraki değerlerdir. Anlık olarak aküden talep edilen yük arttıkça, sistemin kararlı hale oturma sürecinde ani gerilim düşümlerinin daha hızlı gerçekleştiği görülmüştür. Akü %100 dolu durumda iken farklı sabit yüklerle deşarj edildiğinde gerilimin kararlı hale gelmesi Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



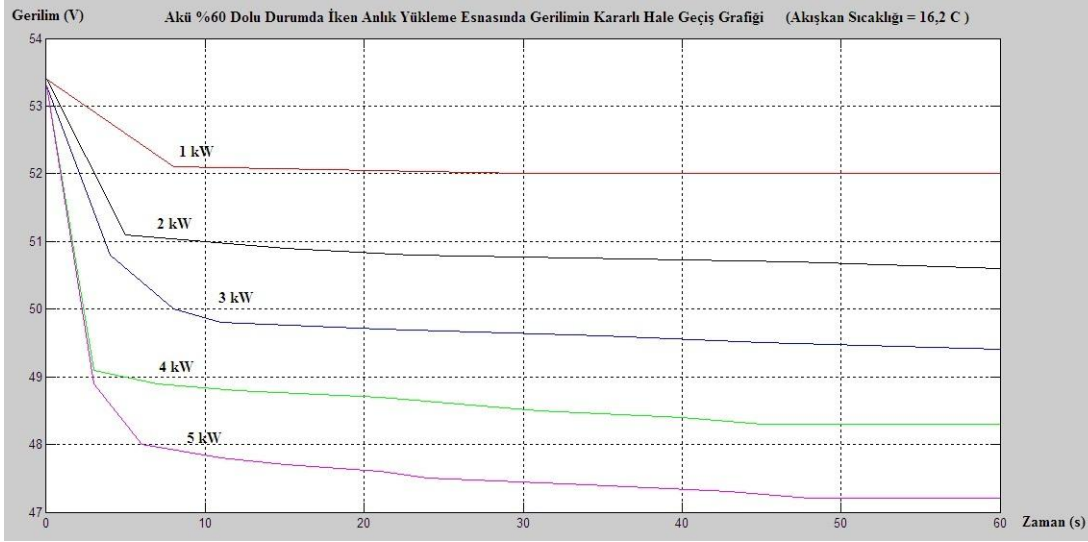
Şekil 4.17 : Akü %100 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği (Akışkan Sıcaklığı = 15 °C)

Akü %80 dolu durumda iken farklı sabit yüklerle deşarj edildiğinde gerilimin kararlı hale gelmesi Şekil 4.18’de sunulmuştur.



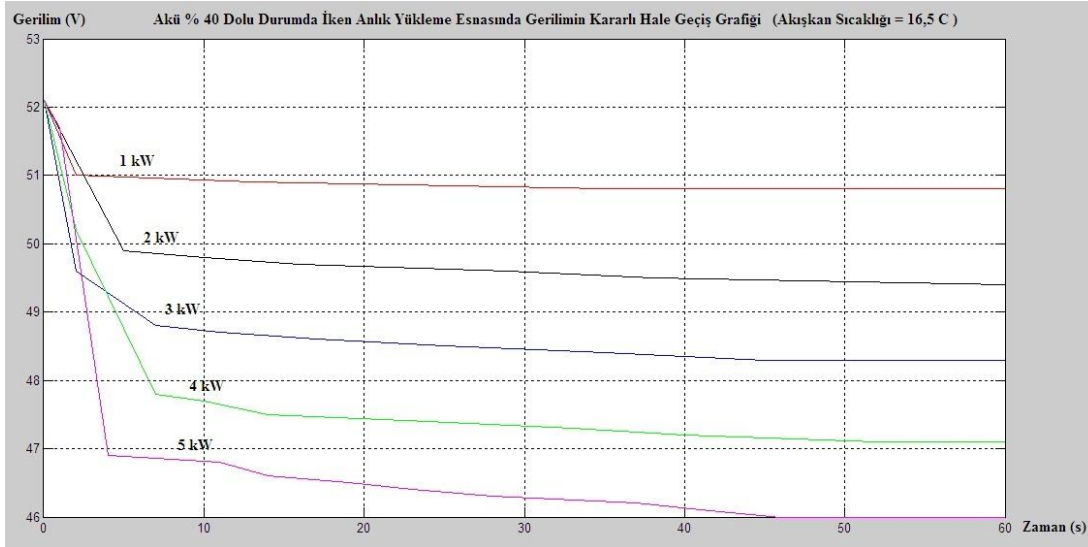
Şekil 4.18 : Akü %80 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği (Akışkan Sıcaklığı = 16 °C)

Akü %60 dolu durumda iken farklı sabit yüklerle deşarj edildiğinde gerilimin kararlı hale gelmesini gösteren grafik Şekil 4.19’deki gibidir.



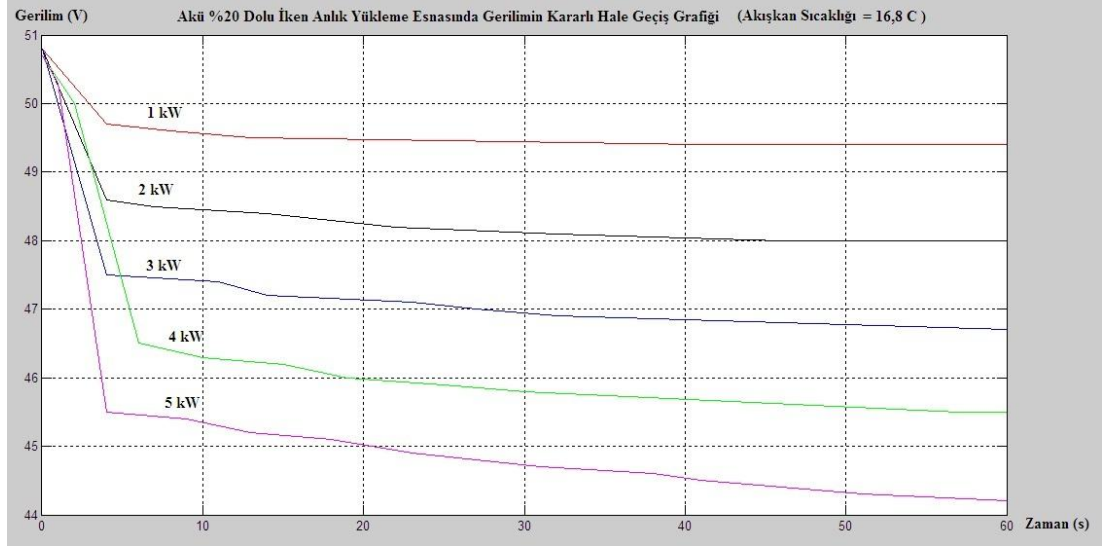
Şekil 4.19 : Akü % 60 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği (Akışkan Sıcaklığı = 16,2⁰C)

Akü %40 dolu durumda iken farklı sabit yüklerle deşarj edildiğinde gerilimin kararlı hale gelmesini gösteren grafik Şekil 4.20'deki gibidir.



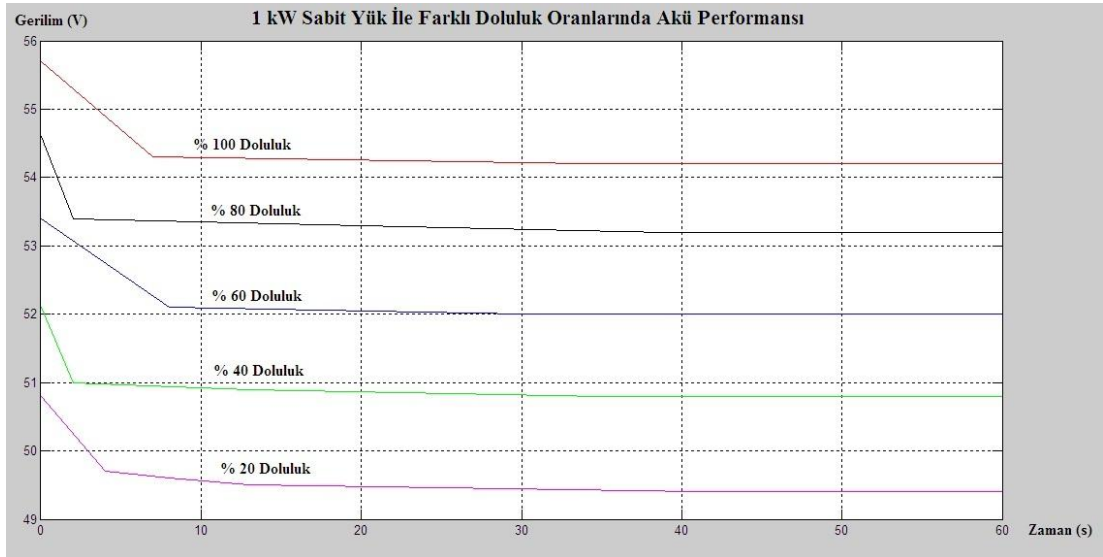
Şekil 4.20 : Akü % 40 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği (Akışkan Sıcaklığı = 16,5⁰C)

Akü %20 dolu durumda iken farklı sabit yüklerle deşarj edildiğinde gerilimin kararlı hale geliş grafiği Şekil 4.21'deki gibidir.



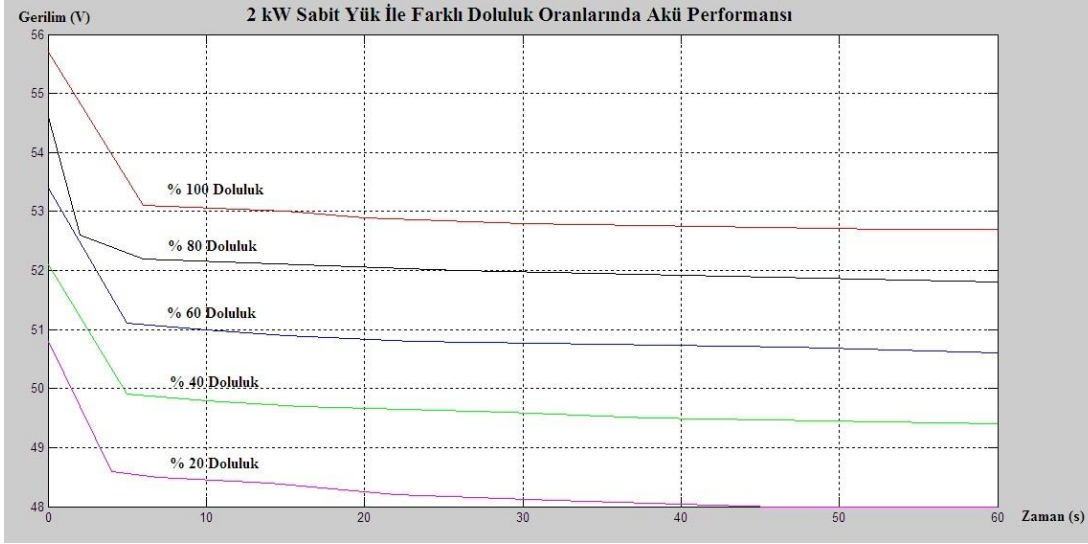
Şekil 4.21 : Akü % 20 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği (Akışkan Sıcaklığı = 16,8 °C)

Aynı sabit yük altında ancak farklı doluluk durumundaki akü performansı eğrileri ise, doluluk oranı azaldıkça daha düşük başlangıç geriliminden başlamıştır. 1 kW sabit yük ile farklı doluluk oranlarında gerilimin zamana göre değişim grafiği Şekil 4.22’de gösterildiği gibidir.



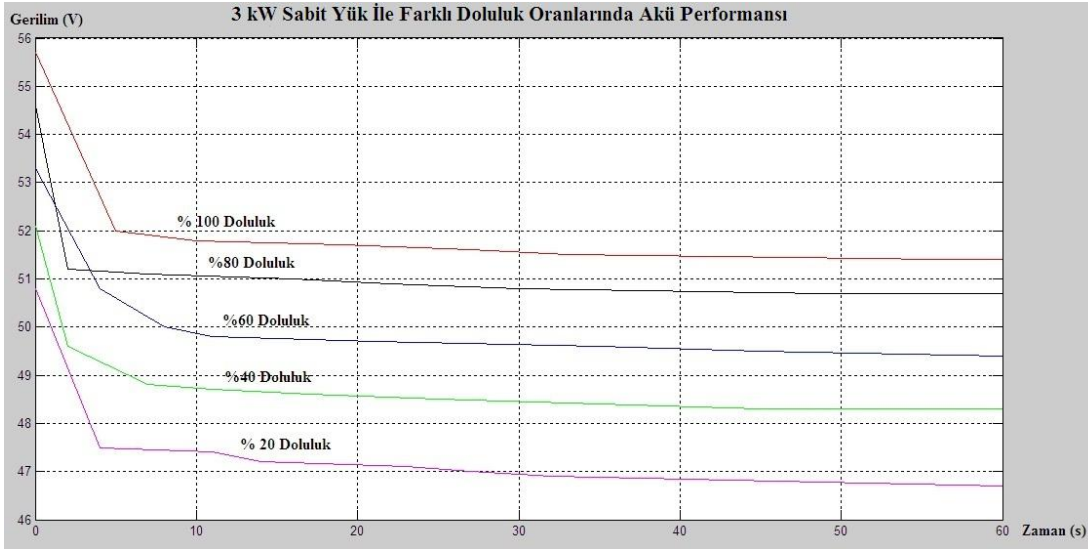
Şekil 4.22 : Sabit İki Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı

2 kW sabit yük ile farklı doluluk oranlarında gerilimin zamana göre değişim grafiği Şekil 4.23’de bulunmaktadır.



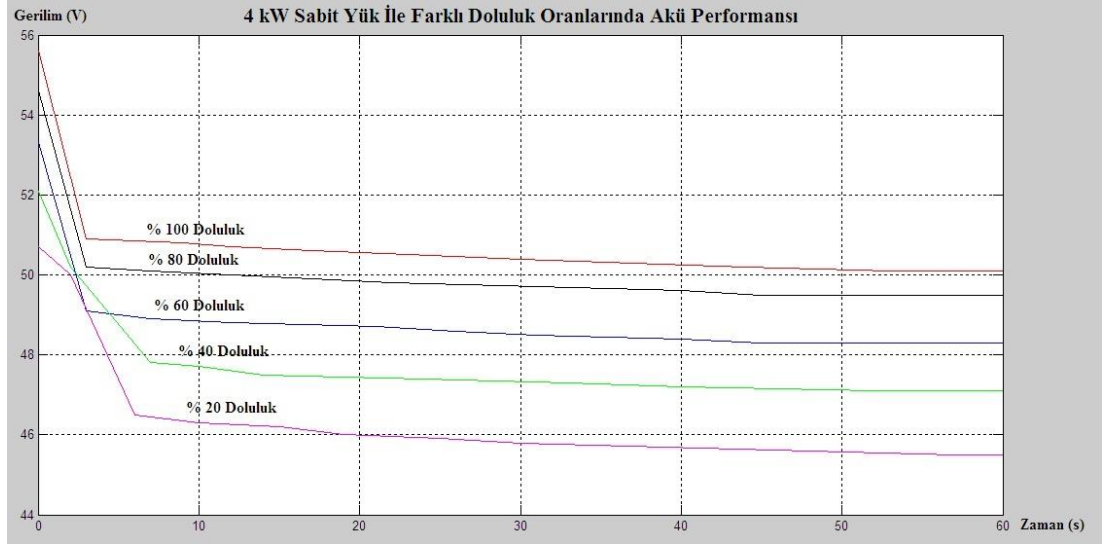
Şekil 4.23 : Sabit Dört Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı

3 kW sabit yük ile farklı doluluk oranlarında gerilimin zamana göre değişim grafiği Şekil 4.24’de verilmiştir.



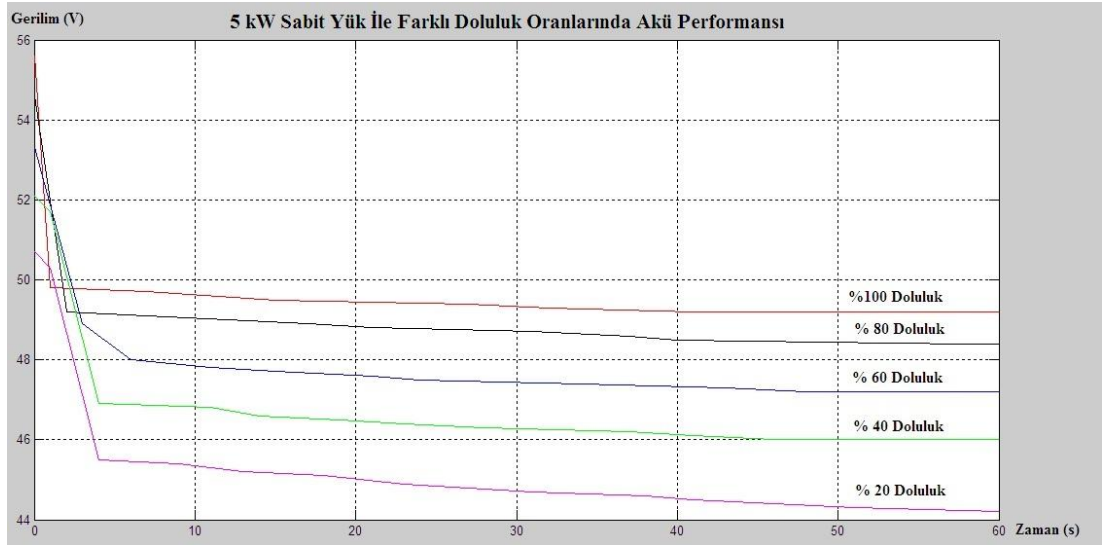
Şekil 4.24 : Sabit Altı Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı

4 kW sabit yük ile farklı doluluk oranlarında gerilimin zamana göre değişim grafiği Şekil 4.25’de sunulmuştur.



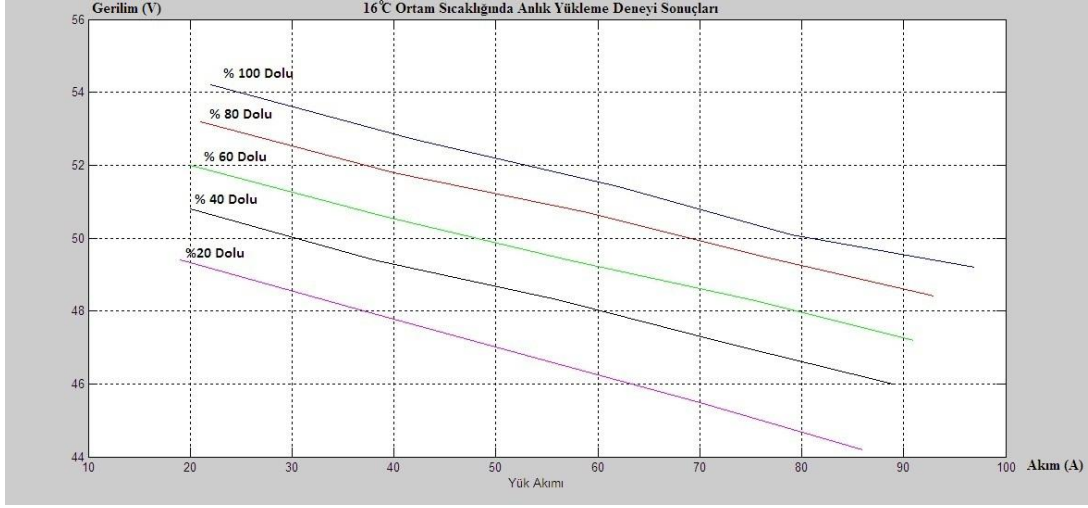
Şekil 4.25 : Sabit Sekiz Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı

5 kW sabit yük ile farklı doluluk oranlarında gerilimin zamana göre değişim grafiği Şekil 4.26'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.26 : Sabit On Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı

Anlık yükleme deneyleri sonucunda elde edilen Akım (I) – Gerilim (V) eğrilerin eğimi, bize akünün bulunduğu doluluk oranındaki açık devre gerilimi ve iç direnci hakkında bilgi vermektedir. Her bir grafiğin tam olarak doğrusal olduğunu kabul edersek oluşturdukları doğru denklemi $V = V_0 - R_i \cdot I$ şeklinde bir denklem olacaktır. Soğuk deşarj deneyleri boyunca farklı doluluk oranlarındaki akım – gerilim eğrileri Şekil 4.27'de verilmektedir.



Şekil 4.27 : 16°C Ortam Sıcaklığında Farklı Doluluk Oranları İçin Akım – Gerilim Karakteristikleri

$$\% 100 \text{ Doluluk Oranı İçin: } V = 55,594 - 0,0674.I \quad @ 15^{\circ}C \quad (4.1)$$

$$\% 80 \text{ Doluluk Oranı İçin: } V = 54,541 - 0,0661.I \quad @ 16,7^{\circ}C \quad (4.2)$$

$$\% 60 \text{ Doluluk Oranı İçin: } V = 53,272 - 0,0669.I \quad @ 16,2^{\circ}C \quad (4.3)$$

$$\% 40 \text{ Doluluk Oranı İçin: } V = 52,117 - 0,0688.I \quad @ 16,5^{\circ}C \quad (4.4)$$

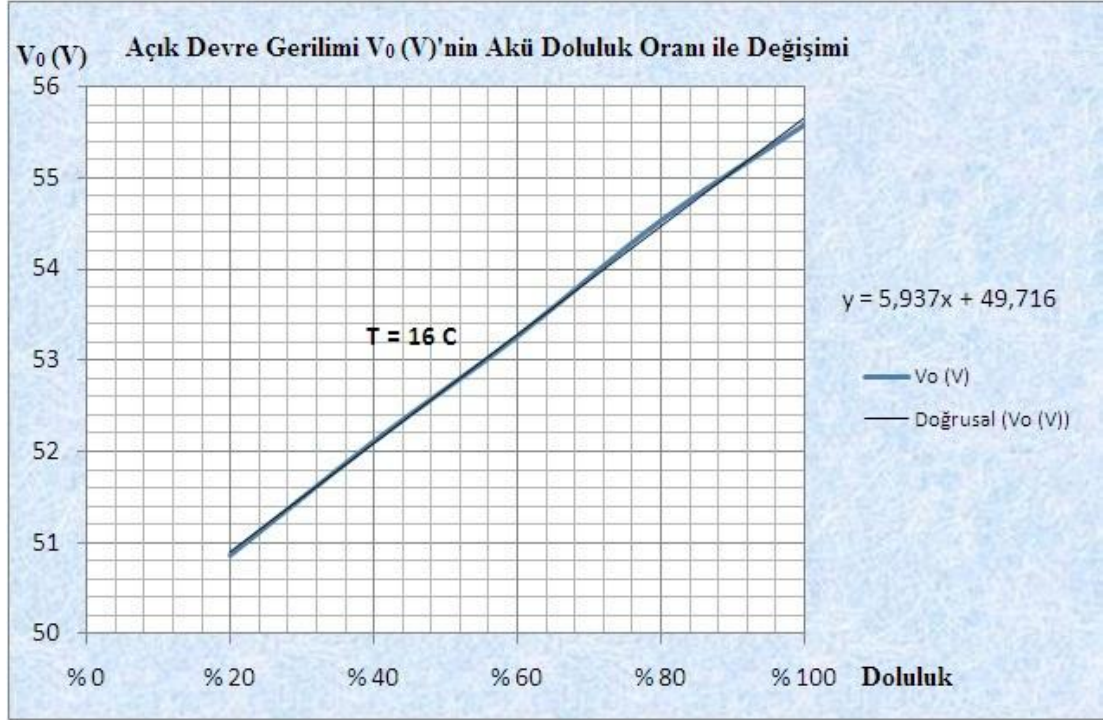
$$\% 20 \text{ Doluluk Oranı İçin: } V = 50,869 - 0,0772.I \quad @ 16,8^{\circ}C \quad (4.5)$$

Farklı doluluk oranları için akım - gerilim karakteristiklerinden (denklem 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5) elde edilen doğru denklemlerinden faydalanılarak akü açık devre gerilimi ve iç direnç değerleri Çizelge 4.4’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.4 : Farklı Doluluk Oranlarında Farklı Sabit Yükle Deşarj Deneyi Ölçüm Sonuçları

Doluluk	V _o (V)	R _i (Ω)	Sıcaklık (C)
% 100	55,594	0,0674	15
% 80	54,541	0,0661	16,7
% 60	53,272	0,0669	16,2
% 40	52,117	0,0688	16,5
% 20	50,869	0,0772	16,8

Elde edilen veriler açık devre geriliminin doluluk oranı ile doğrusal olarak arttığını göstermektedir. Açık devre geriliminin doluluk oranı ile değişim grafiği Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4.28 : Açık Devre Gerilimi $V_0(V)$ 'nin Akü Doluluk Oranı İle Değişimi

$$V_0 = 49,716 + 5,937 \cdot D = 49,716 \cdot \left[1 + \frac{5,937}{49,716} \cdot D\right]$$

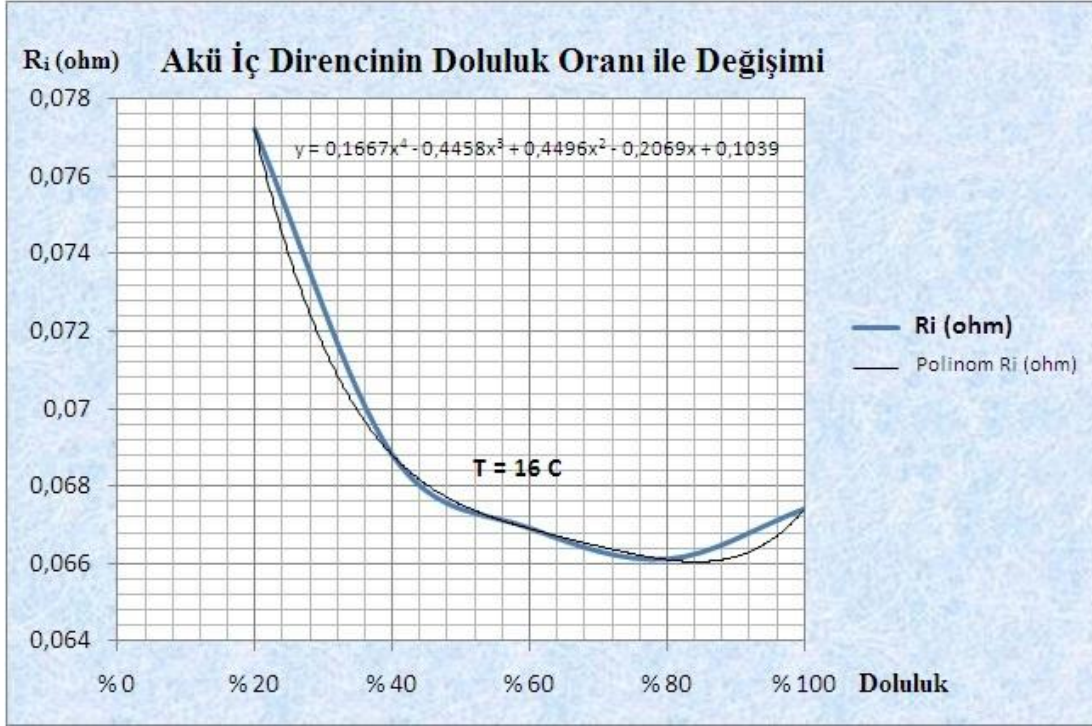
$$D = \text{Doluluk _ Oranı _ (0: Boş - 1: Dolu)}$$

$$c_D^V = \text{Açık _ Devre _ Gerilimi _ Doluluk _ Katsayısı _ (16C^0)} = \frac{5,937}{49,716} = 0,119$$

$$V_{Di} = \text{Boş _ Akü _ Gerilimi} = 49,716$$

$$V_0 = V_{Di} \cdot [1 + c_D^V \cdot D]$$

Çizelge 4.4'deki veriler kullanılarak oluşturulan akü iç direncinin doluluk ile değişim grafiği Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



Şekil 4.29 : Akü İç Direncinin Doluluk Oranı İle Değişimi

$$R_i = 0,1667.D^4 - 0,4458.D^3 + 0,4496.D^2 - 0,2069.D + 0,1039$$

$$R_i = 0,1039.[1 + \frac{0,1667}{0,1039}.D^4 - \frac{0,4458}{0,1039}.D^3 + \frac{0,4496}{0,1039}.D^2 - \frac{0,2069}{0,1039}.D]$$

$$k_i = D^i \text{ _Doluluk _Oranına _Bağlı _İç _Direnc _Katsayısı}$$

$$k_4 = 1,6044$$

$$k_3 = 4,2906$$

$$k_2 = 4,3272$$

$$k_1 = 1,9913$$

$$k_0 = 0,1039$$

$$R_i = k_0.[1 + k_4.D^4 - k_3.D^3 + k_2.D^2 - k_1.D]$$

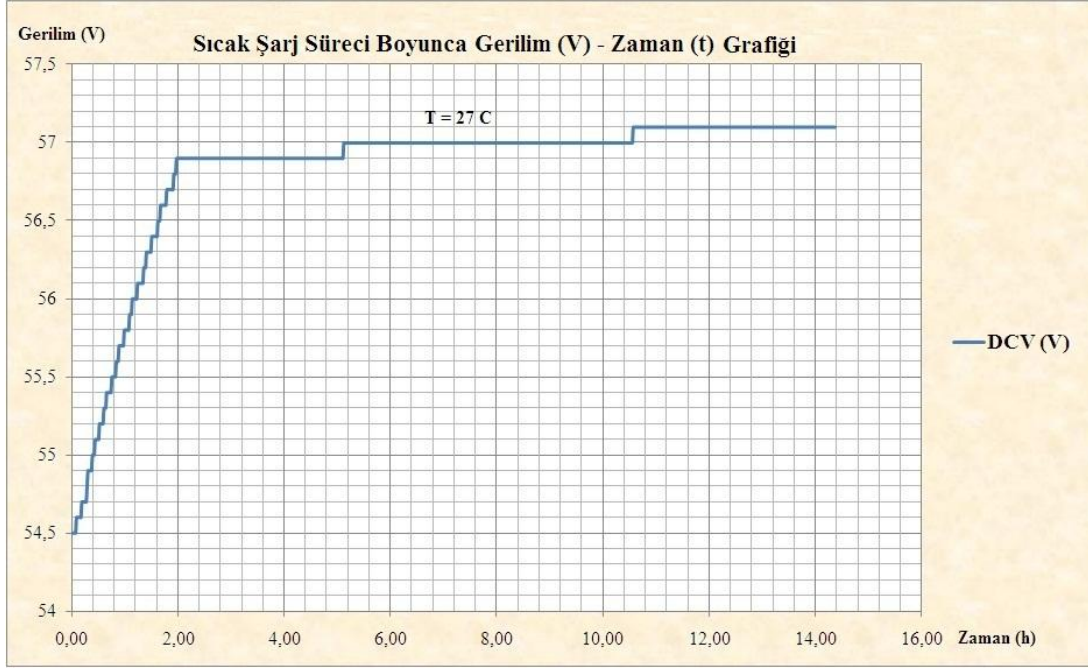
4.4 Sıcak Şarj Karakteristikleri

Tamamen boş durumda olan akü ortalama 27^0C ortam sıcaklığında tam kapasiteye ulaşınca kadar şarj edilmiş ve dakikada bir veri kaydı alınmıştır. Şarj süreci boyunca elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları

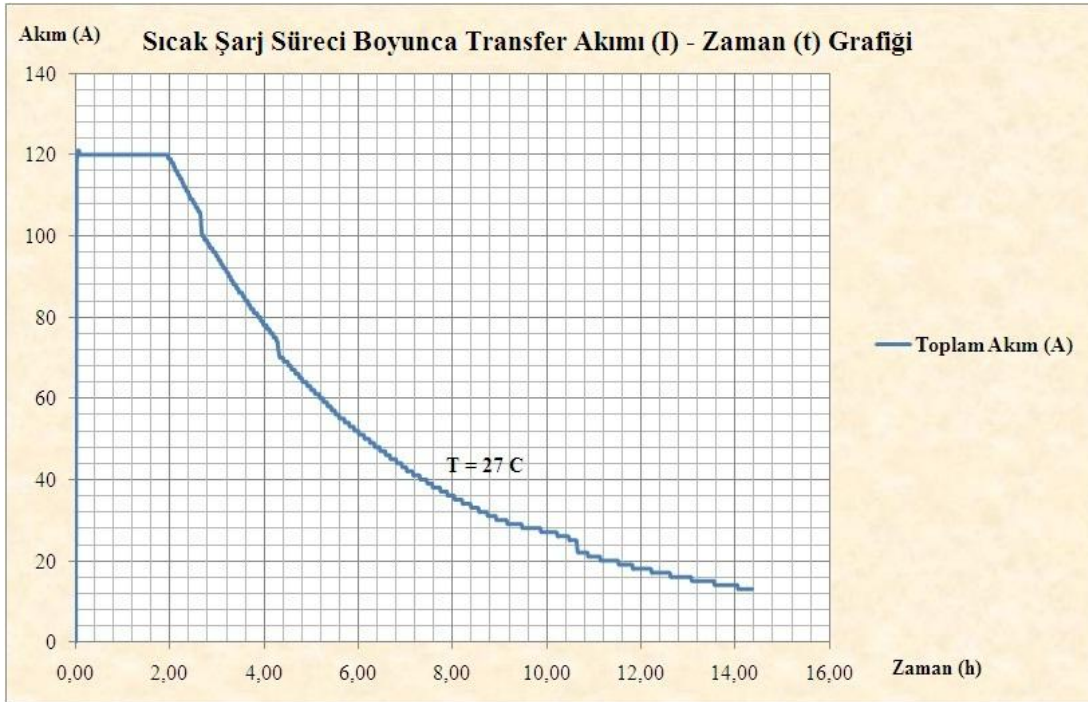
Ölçüm Zamanı	Zaman (h)	Akışkan Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	DC V (V)	Şarj Akımı (A)	Toplam Transfer Edilen Elektrik Yüğü (Ah)	Anlık Güç (kW)	Toplam Transfer Edilen Enerji (kWh)
18:02:00	0,00	30	54,5	0	0,00	0,00	0,00
18:32:00	0,50	30	55,1	120	60,00	6,61	3,29
19:02:00	1,00	30	55,8	120	120,00	6,70	6,62
19:32:00	1,50	31	56,4	120	180,00	6,77	9,98
20:02:00	2,00	31	56,9	119	239,95	6,77	13,38
20:32:00	2,50	32	56,9	108	296,63	6,15	16,60
21:02:00	3,00	31	56,9	95	346,87	5,41	19,46
21:32:00	3,50	30	56,9	86	391,95	4,89	22,02
22:02:00	4,00	30	56,9	78	432,92	4,44	24,36
22:32:00	4,50	30	56,9	69	469,60	3,93	26,44
23:02:00	5,00	29	56,9	62	502,23	3,53	28,30
23:32:00	5,50	29	57	57	531,97	3,25	29,99
00:02:00	6,00	28	57	52	558,95	2,96	31,53
00:32:00	6,50	28	57	47	583,58	2,68	32,94
01:02:00	7,00	28	57	43	606,03	2,45	34,22
01:32:00	7,50	27	57	39	626,45	2,22	35,38
02:02:00	8,00	27	57	36	645,13	2,05	36,44
02:32:00	8,50	27	57	33	662,25	1,88	37,42
03:02:00	9,00	26	57	30	677,95	1,71	38,31
03:32:00	9,50	26	57	28	692,57	1,60	39,15
04:02:00	10,00	26	57	27	706,43	1,54	39,94
04:32:00	10,50	25	57	25	719,62	1,43	40,69
05:02:00	11,00	25	57,1	21	730,90	1,20	41,33
05:32:00	11,50	25	57,1	20	741,03	1,14	41,91
06:02:00	12,00	25	57,1	18	750,37	1,03	42,45
06:32:00	12,50	25	57,1	17	759,08	0,97	42,94
07:02:00	13,00	25	57,1	16	767,20	0,91	43,41
07:32:00	13,50	25	57,1	15	774,77	0,86	43,84
08:02:00	14,00	24	57,1	14	781,82	0,80	44,24
08:24:00	14,37	24	57,1	13	786,63	0,74	44,52

Sıcak şarj süreci boyunca gerilimin zamana göre değişimi Şekil 4.30'da verildiği gibidir.



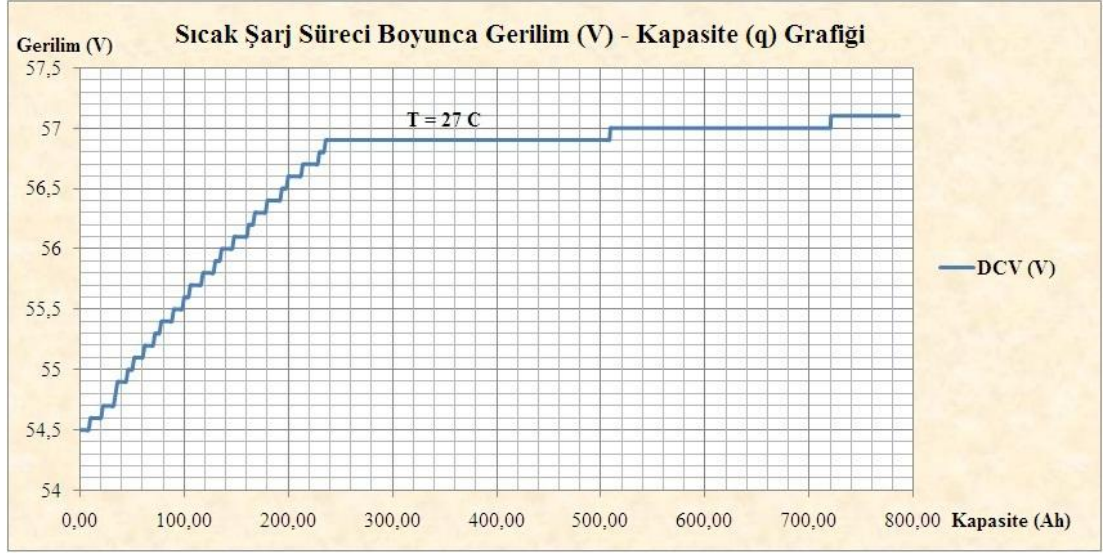
Şekil 4.30 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Zaman (t) Grafiği

Sıcak şarj süreci boyunca transfer akımının zaman içindeki değişimi Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



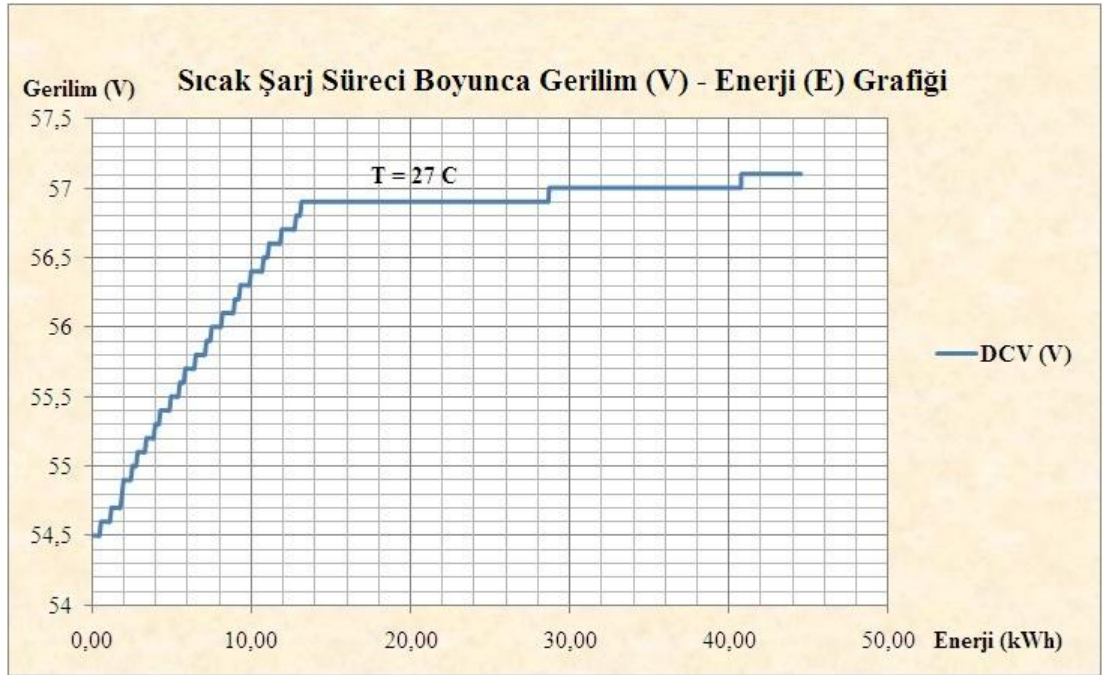
Şekil 4.31 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Akım (I) – Zaman (t) Grafiği

Sıcak şarj süreci boyunca akü kapasitesinin gerilimle olan değişimi Şekil 4.32’de gösterilmiştir.



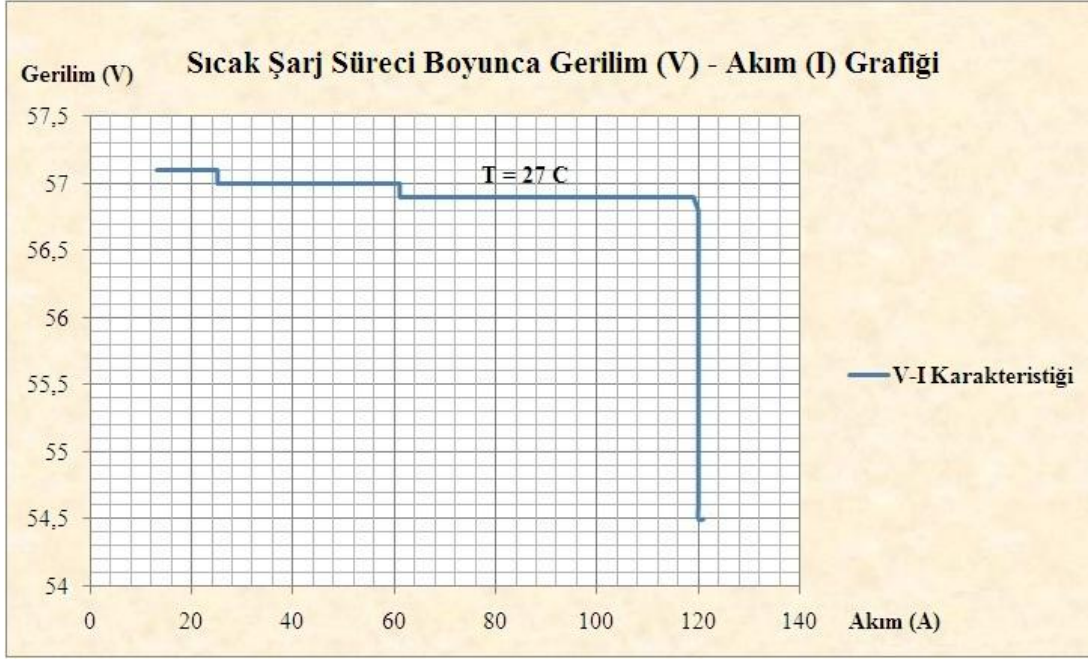
Şekil 4.32 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Kapasite (q) Grafiği

Sıcak şarj süreci boyunca aküdeki toplam enerjinin artmasıyla oluşan gerilim artışı Şekil 4.33’de gösterilmiştir.



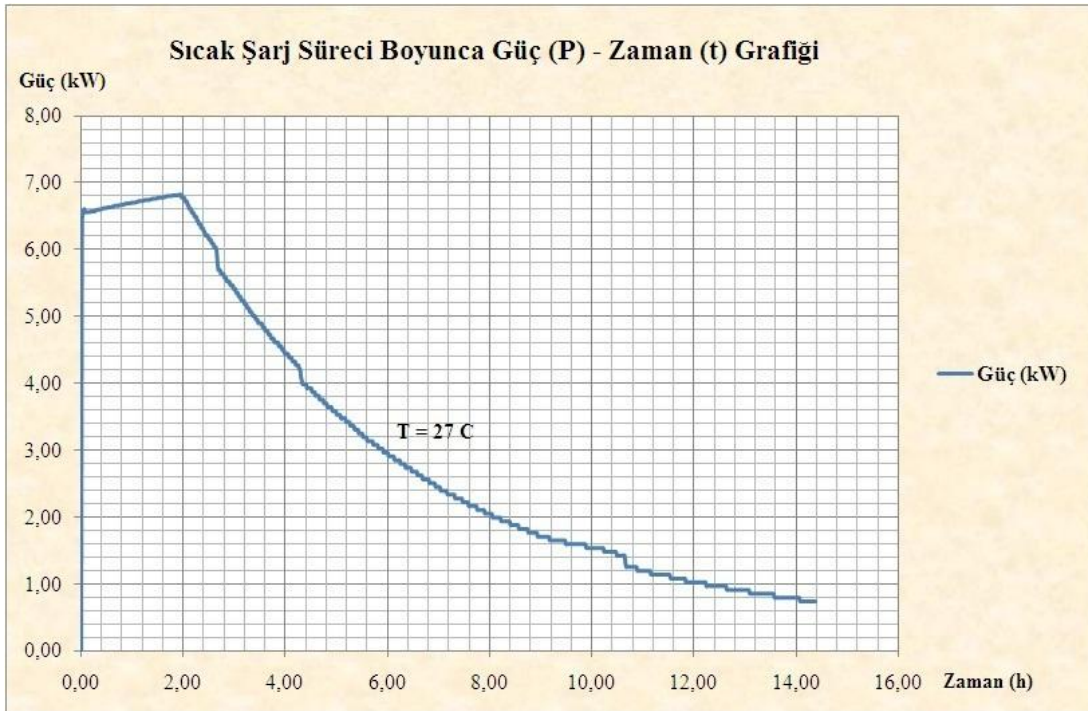
Şekil 4.33 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Enerji (E) Grafiği

Sıcak şarj süreci boyunca transfer edilen toplam akım azalırken akü geriliminin yükseldiği Şekil 4.34’de gösterilmiştir.



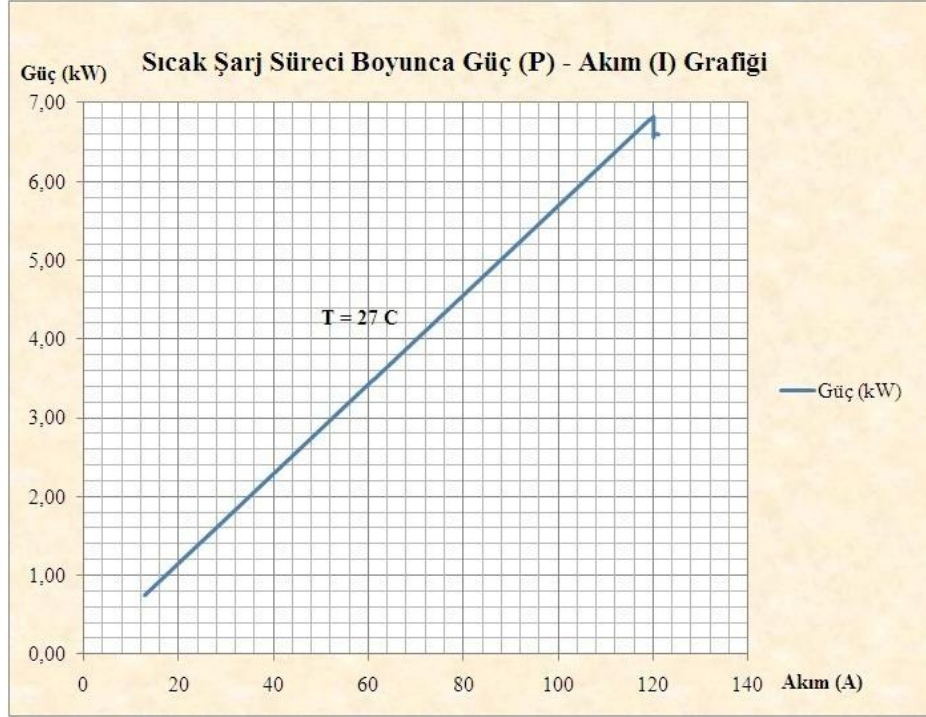
Şekil 4.34 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Akım (I) Grafiği

Sıcak şarj süreci boyunca anlık güç değerinin zaman içerisindeki değişim grafiği Şekil 4.35’de görüldüğü gibi olmuştur.



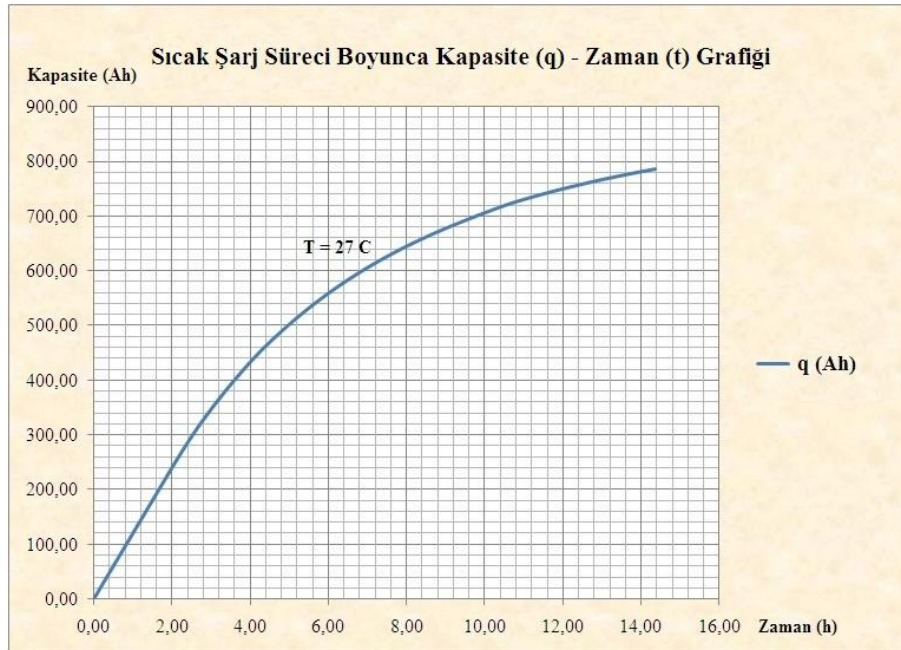
Şekil 4.35 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Elektriksel Güç (P) – Zaman (t) Grafiği

Sıcak şarj süreci boyunca aküye transfer edilen toplam akım azaldıkça anlık elektriksel gücün değişimine ilişkin grafik Şekil 4.36’da belirtilmiştir.



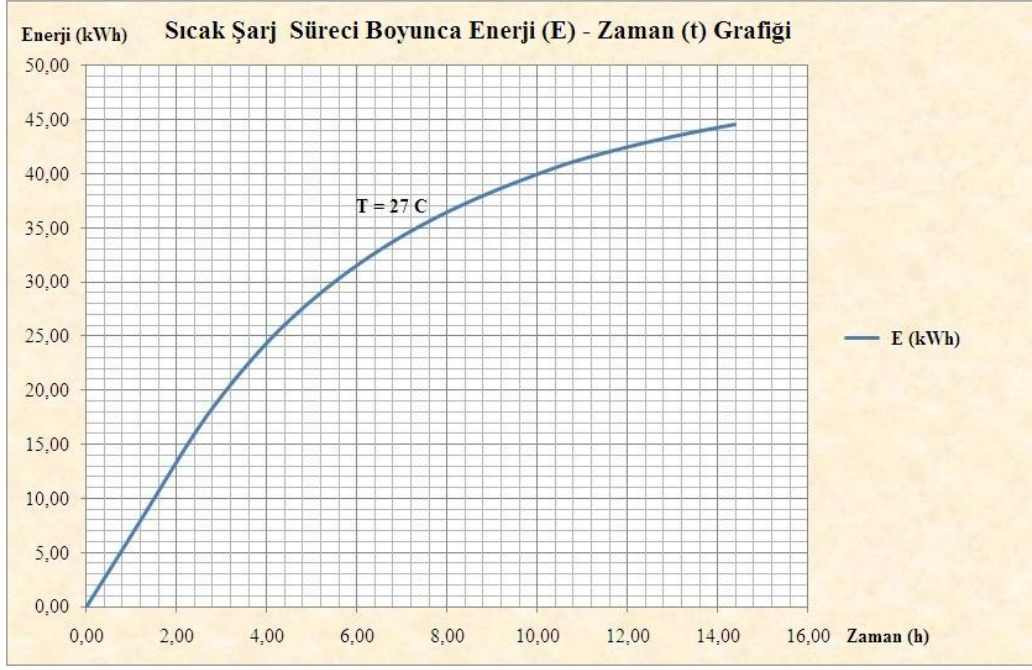
Şekil 4.36 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Elektriksel Güç (P) – Akım (I) Grafiği

Sıcak şarj süreci boyunca akü kapasitesi zaman içerisinde azalan bir artış grafiği sergilemiştir. Aküye transfer edilen elektrik toplam elektrik yükünün zamanla değişim grafiği Şekil 4.37’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.37 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Elektriksel Kapasite (q) – Zaman (t) Grafiği

Sıcak şarj süreci boyunca akü toplam enerjisinin zaman içerisindeki artış grafiği Şekil 4.38’de gösterilmiştir.



Şekil 4.38 : Sıcak Şarj Süreci Boyunca Elektriksel Enerji (E) – Zaman (t) Grafiği

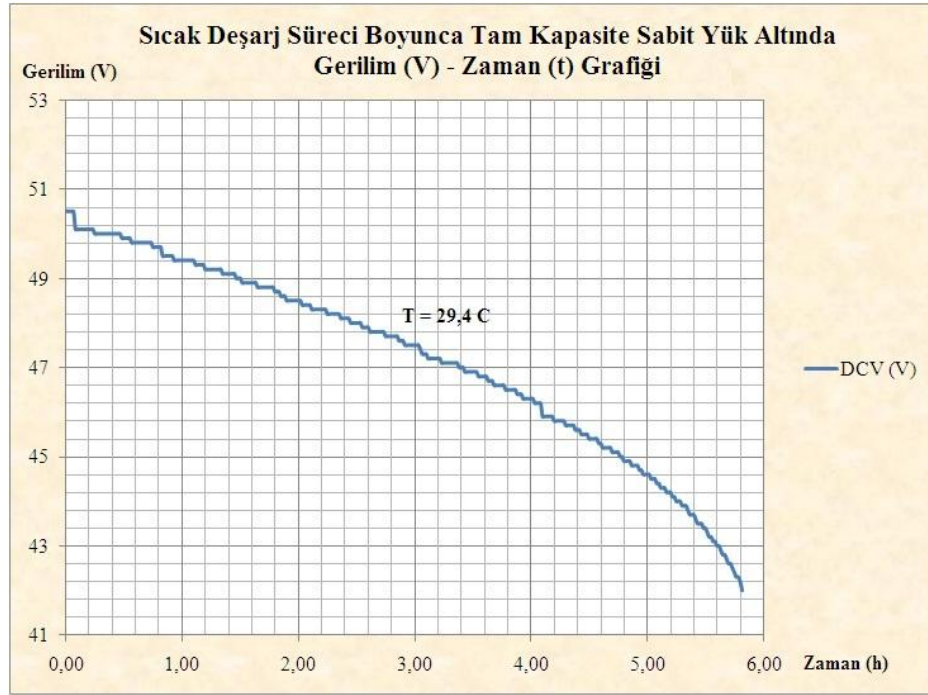
4.5 Sıcak Deşarj Karakteristikleri

Tam kapasite dolu durumda olan akü, 10 adet eşdeğer direnç tam kapasite kullanılarak (toplamda 5 kW sabit yük altında) ortalama $29,4^{\circ}C$ ortam sıcaklığında deşarj edilmiş ve Çizelge 4.6’da belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.6 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları

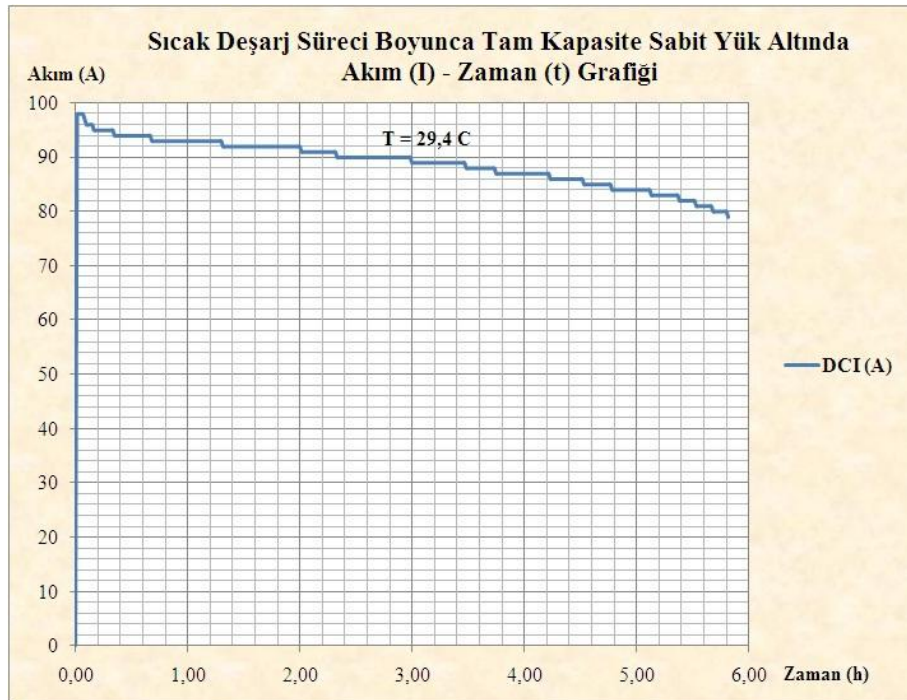
Ölçüm Zamanı	Zaman (h)	DC V (V)	DCI (A)	Transfer Edilen Elektrik Yüğü (Ah)	Anlık Güç (kW)	Toplam Enerji (kWh)
10:30:24	0,00	50,5	0	0,00	0,00	0,00
11:00:24	0,50	49,9	94	47,63	4,69	2,39
11:30:24	1,00	49,4	93	94,30	4,59	4,70
12:00:24	1,50	49	92	140,60	4,51	6,98
12:30:24	2,00	48,5	92	186,60	4,46	9,22
13:00:24	2,50	48	90	231,92	4,32	11,41
13:30:24	3,00	47,5	89	276,90	4,23	13,56
14:00:24	3,50	46,9	88	321,37	4,13	15,65
14:30:24	4,00	46,3	87	365,10	4,03	17,69
15:00:24	4,50	45,4	86	408,32	3,90	19,67
15:30:24	5,00	44,6	84	450,60	3,75	21,57
16:00:24	5,50	43,4	82	492,08	3,56	23,40
16:19:24	5,82	42	79	517,58	3,32	24,49

Sıcak deşarj süreci boyunca akü uç geriliminin zaman içerisindeki değişim grafiği Şekil 4.39’da gösterilmiştir.



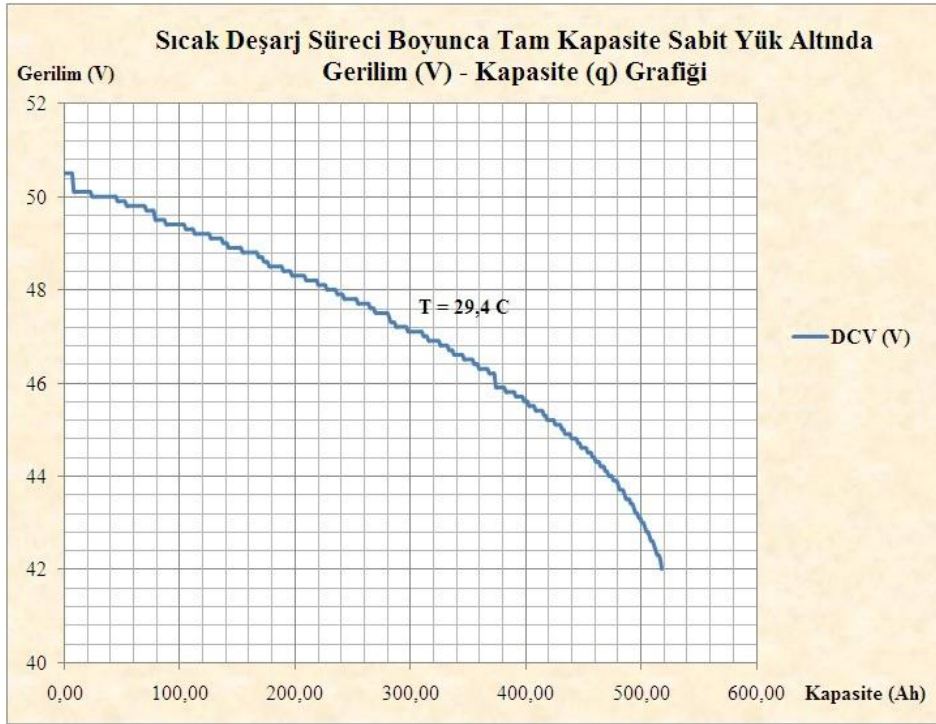
Şekil 4.39 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Zaman (t) Grafiği

Sıcak deşarj süreci boyunca yük akımının gerilimdeki düşüşe bağlı olarak zaman içerisinde azalış eğrisi Şekil 4.40’da gösterilmiştir.



Şekil 4.40 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Akım (I) – Zaman (t) Grafiği

Sıcak deşarj süreci boyunca aküden çekilen toplam elektriksel yük arttıkça akü gerilimindeki azalış grafiği Şekil 4.41’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.41 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Kapasite (q) Grafiği

Sıcak deşarj süreci boyunca toplam transfer edilen enerji miktarı arttıkça akü gerilimindeki azalış grafiği Şekil 4.42’de görüldüğü gibi gerçekleşmiştir.



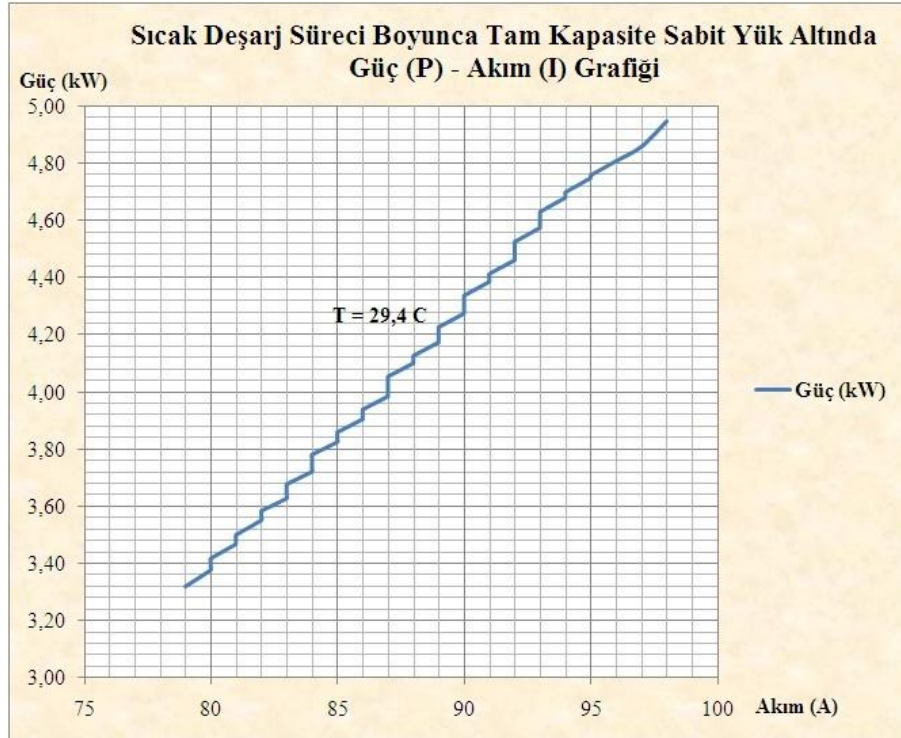
Şekil 4.42 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Gerilim (V) – Enerji (E) Grafiği

Sıcak deşarj süreci boyunca anlık elektriksel gücün zamanla değişim grafiği Şekil 4.43'de görüldüğü gibidir.



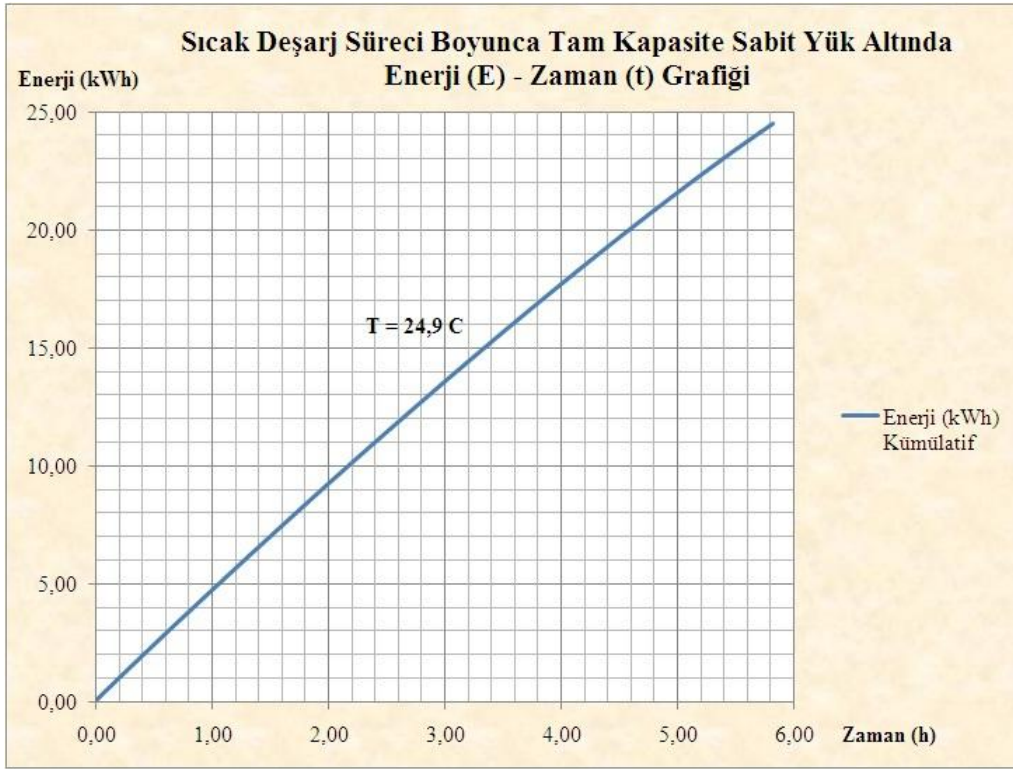
Şekil 4.43 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Güç (P) – Zaman (t) Grafiği

Sıcak deşarj süreci boyunca güç ve akım ilişkişi Şekil 4.44'de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.44 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Güç (P) – Akım (I) Grafiği

Sıcak deşarj süreci boyunca aküden transfer edilen toplam enerjinin zamanla değişim grafiği Şekil 4.45’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.45 : Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Güç (P) – Akım (I) Grafiği

4.6 Farklı Doluluk Oranlarında Sıcak Deşarj Karakteristikleri

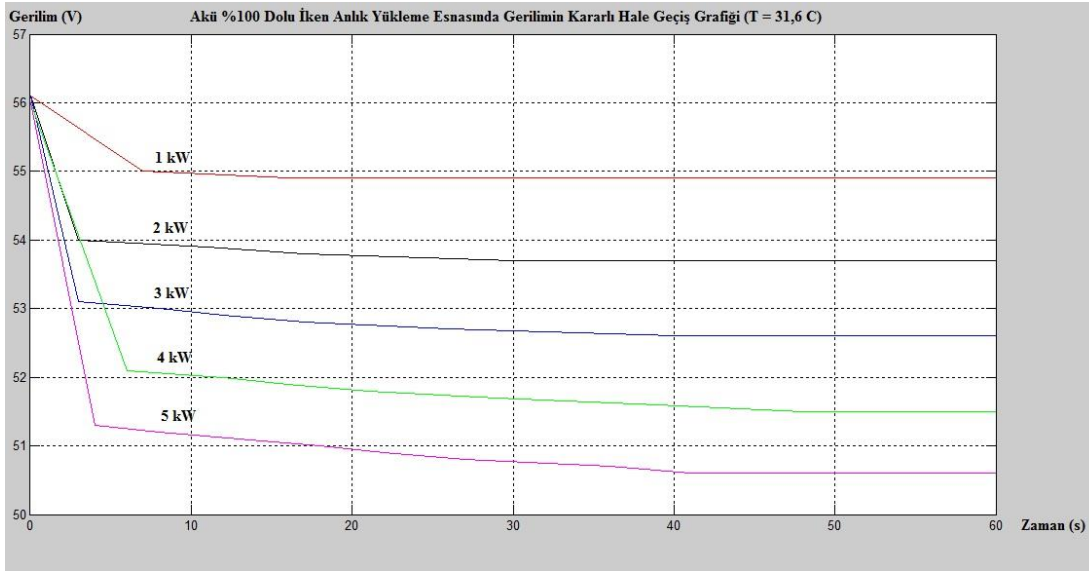
Vanadium – Redox Akışkan Akü farklı doluluk oranlarındayken farklı direnç kademeleriyle deşarj edilmiş ve gerilim düşümünün zaman içerisindeki değişimi gözlenmiştir. Her anlık yükleme deneyi ve ölçümleri sonrasında akünün toparlanması ve deney başlangıcındaki performansına ulaşması için 3-5 dk. süreyle beklenmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak akünün iç direnci hesaplanmıştır. Akü iç direncinin doluluk oranıyla ve sıcaklıkla nasıl değiştiği araştırılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları Çizelge 4.7’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 4.7 : Farklı Doluluk Oranlarında Sıcak Deşarj Süreci Boyunca Elde Edilen Ölçüm Sonuçları

	Direnç Kademesi	Ölçülen Akım [A]:	Ölçülen Gerilim [V]:
Akü % 100 Dolu Durumda (T = 31,6 °C)	0	0	56,1
	2	22	54,9
	4	42	53,7
	6	62	52,6
	8	80	51,5
	10	97	50,6
Akü % 80 Dolu Durumda (T = 30,1 °C)	0	0	54,6
	2	21	53,5
	4	40	52,4
	6	59	51,4
	8	77	50,4
	10	95	49,5
Akü % 60 Dolu Durumda (T = 31 °C)	0	0	53,5
	2	21	52,4
	4	40	51,3
	6	58	50,3
	8	76	49,4
	10	93	48,5
Akü % 40 Dolu Durumda (T = 31,2 °C)	0	0	52,2
	2	20	51,1
	4	39	50,1
	6	57	49,1
	8	75	48,1
	10	91	47,2
Akü % 20 Dolu Durumda (T = 31,7 °C)	0	0	
	2	19	49,9
	4	38	48,9
	6	55	47,8
	8	72	46,9
	10	88	46

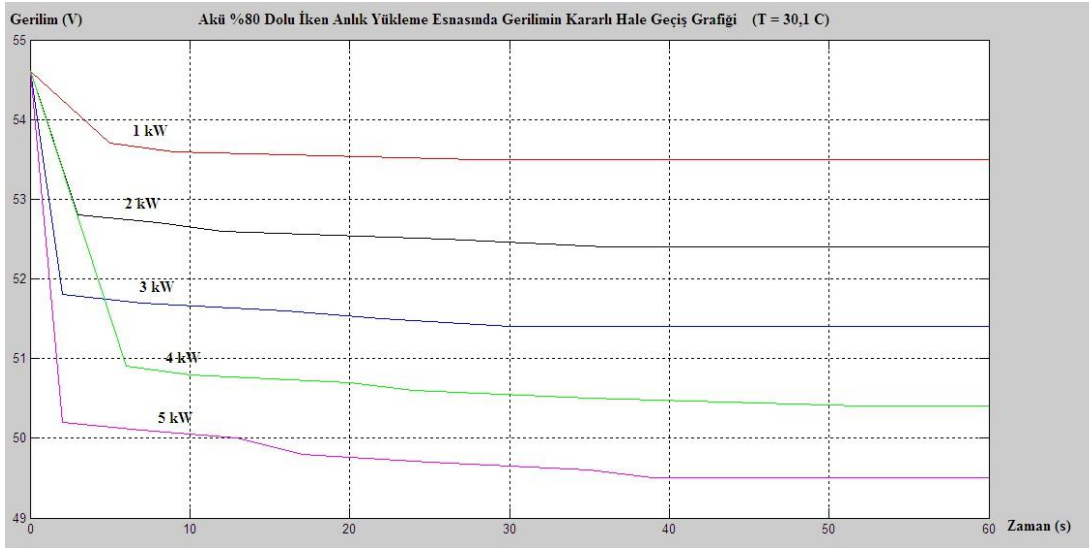
Anlık deneylerin akü kapasitesine olan etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir (<%1). Çizelge 4.7’de belirtilen gerilim değerleri sistem kararsız haldeki süreci tamamlayıp, tamamen kararlı hale oturduktan sonraki değerlerdir. Anlık olarak aküden talep edilen yük arttıkça, sistemin kararlı hale oturma sürecinde ani gerilim düşümlerinin

daha hızlı gerçekleştiği görülmüştür. Akü %100 dolu durumda iken farklı sabit yüklerle deşarj edildiğinde gerilimin kararlı hale gelmesi Şekil 4.46’da gösterilmiştir.



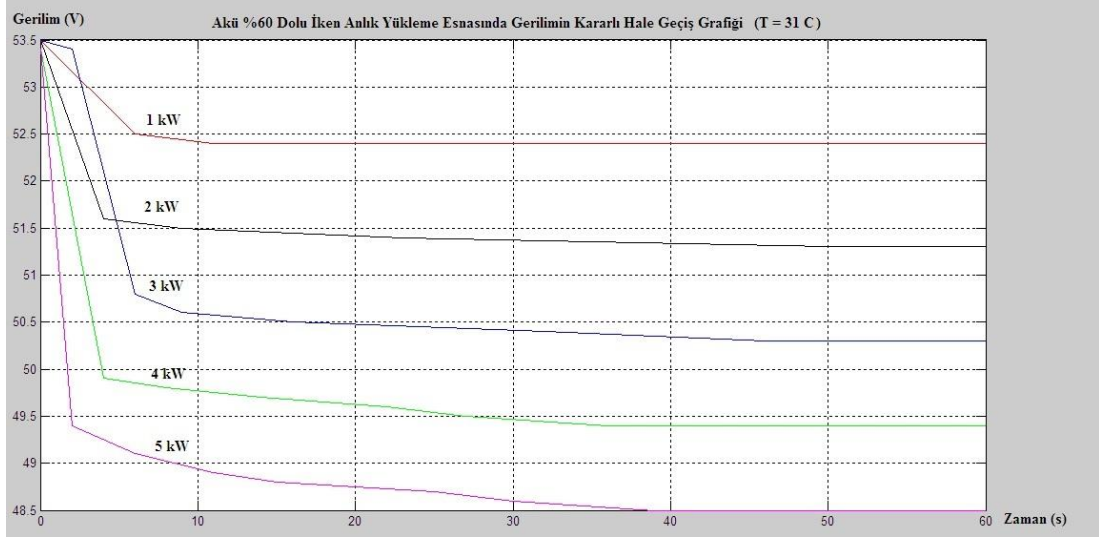
Şekil 4.46 : Akü %100 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği (Akışkan Sıcaklığı = 31,6 °C)

Akü %80 dolu durumda iken farklı sabit yüklerle deşarj edildiğinde gerilimin kararlı hale gelmesini gösteren grafik Şekil 4.47’deki gibidir.



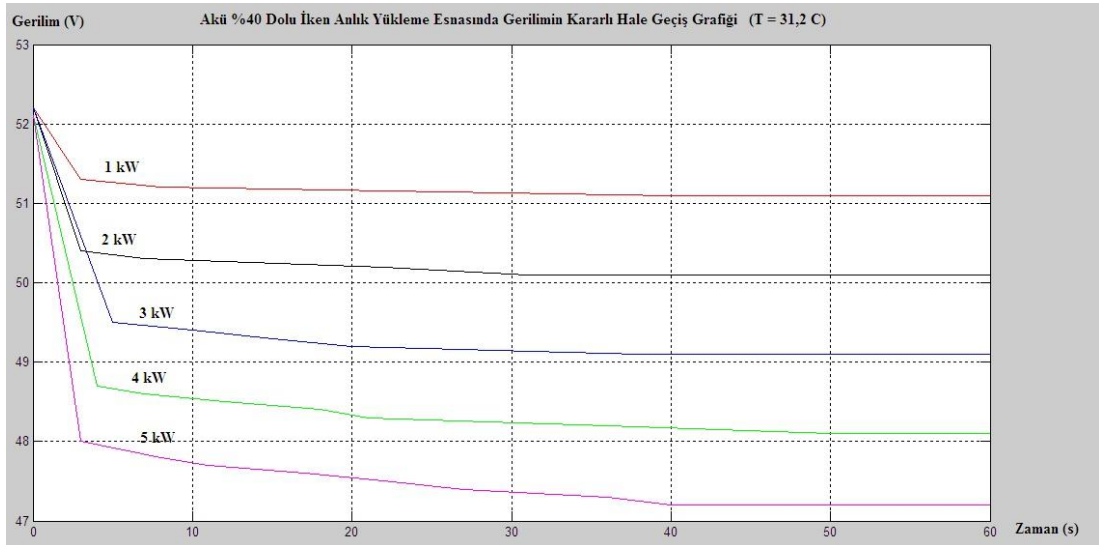
Şekil 4.47 : Akü %80 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği (Akışkan Sıcaklığı = 30,1 °C)

Akü %60 dolu durumda iken farklı sabit yüklerle deşarj edildiğinde gerilimin kararlı hale gelmesini gösteren grafik Şekil 4.48’deki gibidir.



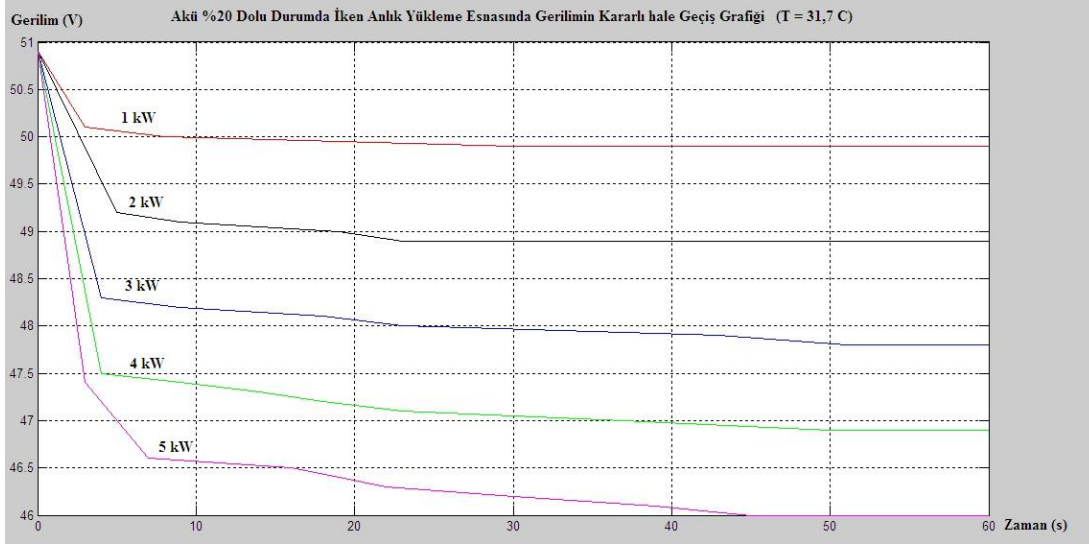
Şekil 4.48 : Akü %60 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği (Akışkan Sıcaklığı = 31 °C)

Akü %40 dolu durumda iken farklı sabit yüklerle deşarj edildiğinde gerilimin kararlı hale gelmesini gösteren grafik Şekil 4.49'deki gibidir.



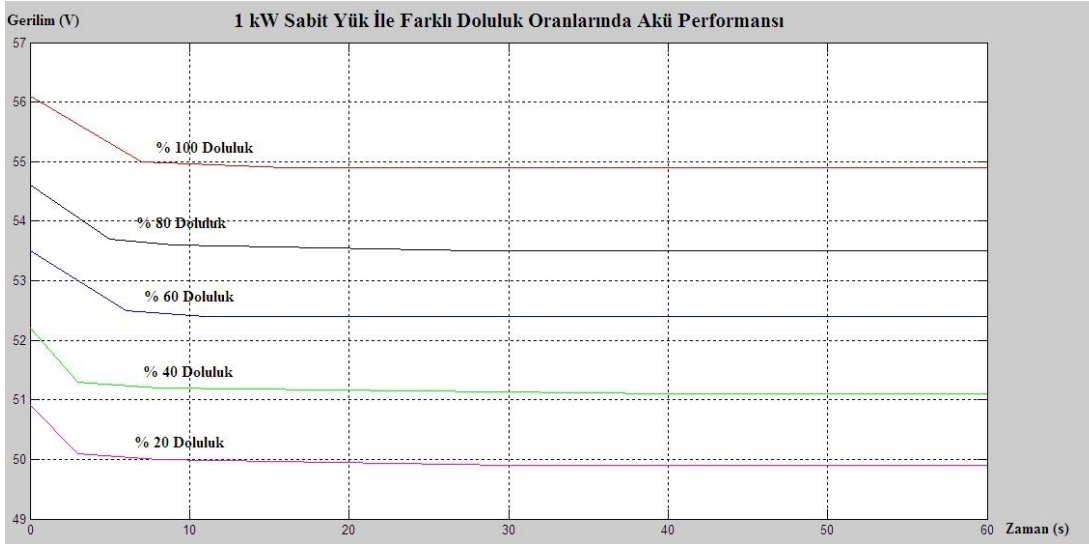
Şekil 4.49 : Akü %40 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği (Akışkan Sıcaklığı = 31,2 °C)

Akü %20 dolu durumda iken farklı sabit yüklerle deşarj edildiğinde gerilimin kararlı hale gelmesini gösteren grafik Şekil 4.50'deki gibidir.



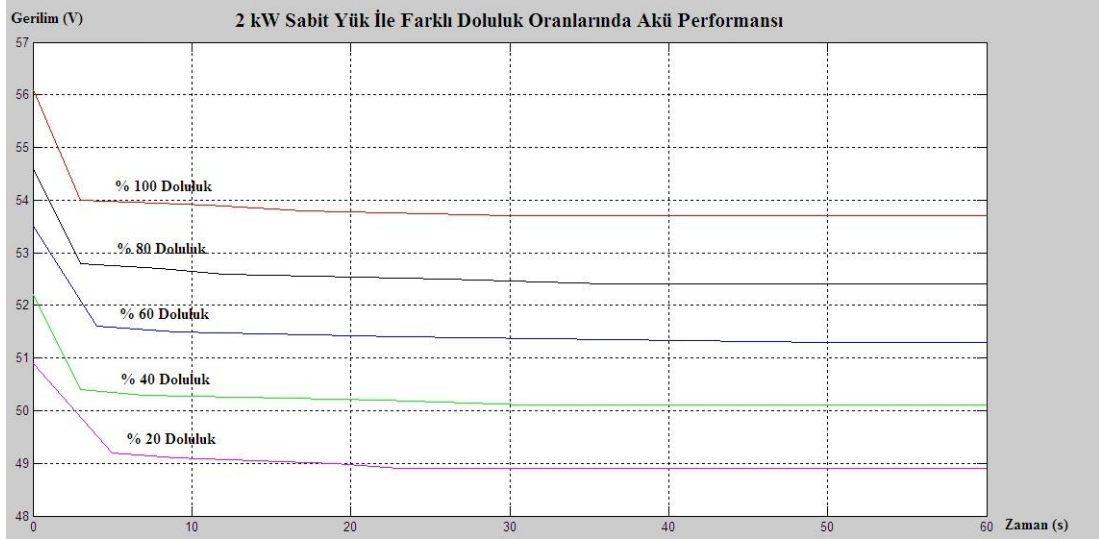
Şekil 4.50 : Akü %20 Dolu Durumda İken Anlık Yükleme Esnasında Gerilimin Kararlı Hale Geçiş Grafiği (Akışkan Sıcaklığı = 31,7 °C)

Aynı sabit yük altında ancak farklı doluluk durumundaki akü performansı eğrileri ise, doluluk oranı azaldıkça daha düşük başlangıç geriliminden başlamıştır. 1 kW sabit yük ile farklı doluluk oranlarında gerilimin zamana göre değişim grafiği Şekil 4.51’de gösterildiği gibidir.



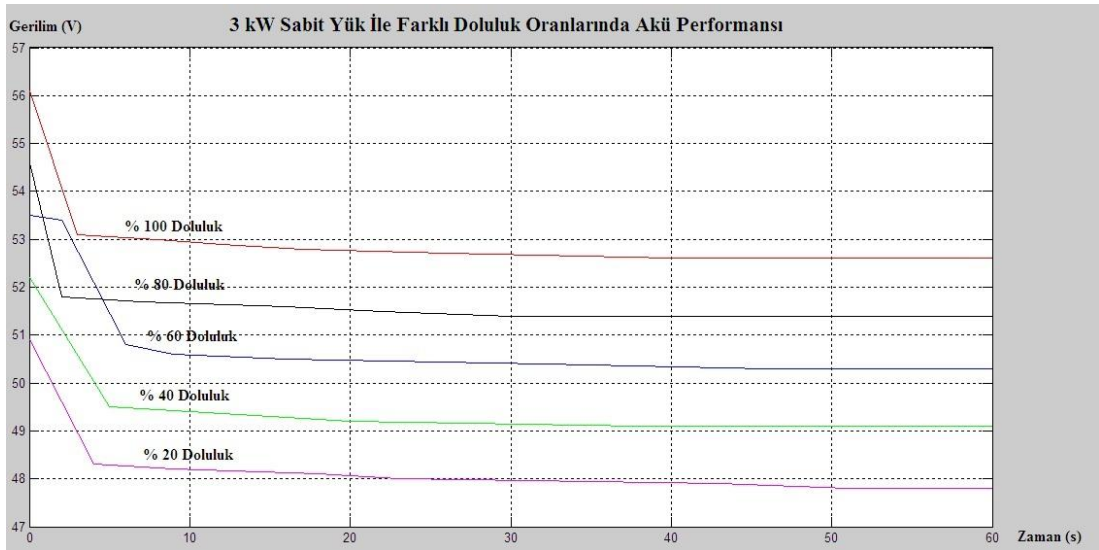
Şekil 4.51 : Sabit İki Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı

2 kW sabit yük ile farklı doluluk oranlarında gerilimin zamana göre değişim grafiği Şekil 4.52’de bulunmaktadır.



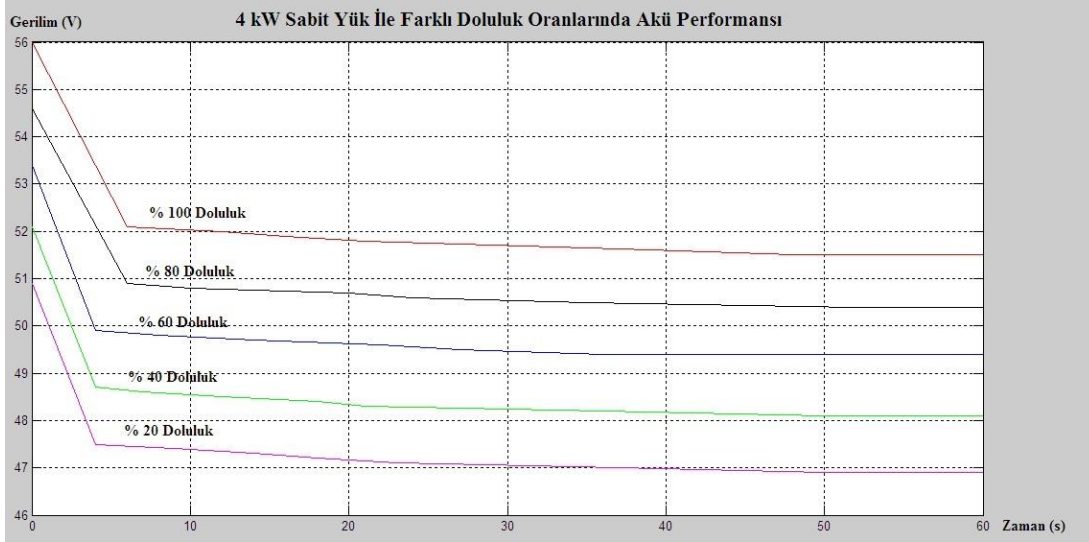
Şekil 4.52 : Sabit Dört Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı

3 kW sabit yük ile farklı doluluk oranlarında gerilimin zamana göre değişim grafiği Şekil 4.53'de bulunmaktadır.



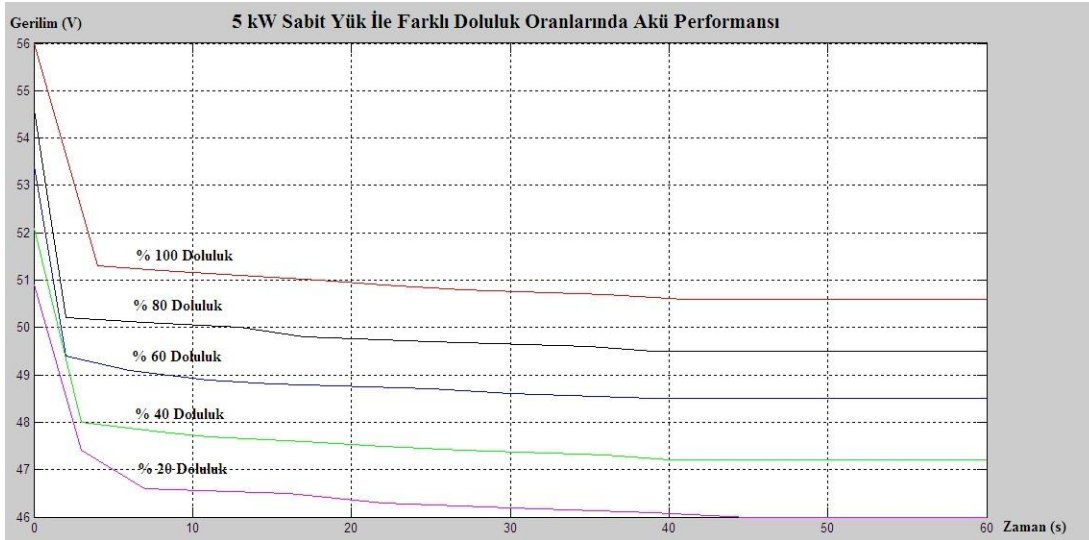
Şekil 4.53 : Sabit Altı Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı

4 kW sabit yük ile farklı doluluk oranlarında gerilimin zamana göre değişim grafiği Şekil 4.54'de bulunmaktadır.



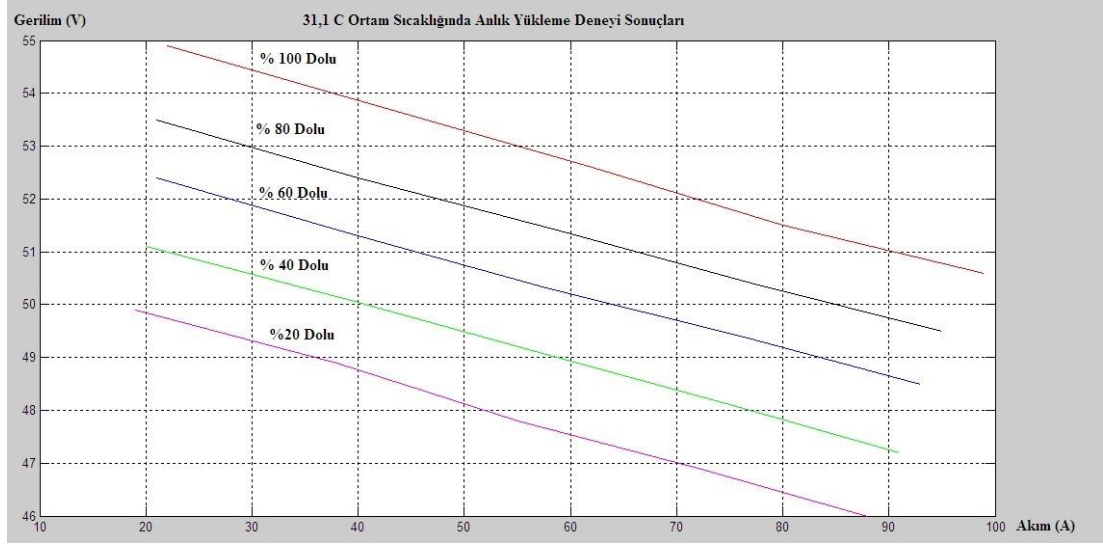
Şekil 4.54 : Sabit Sekiz Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı

5 kW sabit yük ile farklı doluluk oranlarında gerilimin zamana göre değişim grafiği Şekil 4.55’de bulunmaktadır.



Şekil 4.55 : Sabit On Kademe Direnç İle Farklı Doluluk Oranlarında Akü Performansı

Anlık yükleme deneyleri sonucunda elde edilen Akım (I) – Gerilim (V) eğrilerin eğimi, bize akünün bulunduğu doluluk oranındaki açık devre gerilimi ve iç direnci hakkında bilgi vermektedir. Her bir grafiğin tam olarak doğrusal olduğunu kabul edersek oluşturdukları doğru denklemi $V = V_0 - R_i \cdot I$ şeklinde bir denklem olacaktır. Sıcak deşarj deneyleri boyunca farklı doluluk oranlarındaki akım – gerilim eğrileri Şekil 4.56’da verilmektedir.



Şekil 4.56 : 31,1°C Ortam Sıcaklığında Farklı Doluluk Oranları İçin Akım – Gerilim Karakteristikleri

$$\% 100 \text{ Doluluk Oranı İçin: } V = 56,142 - 0,0575.I \quad @ 31,6^{\circ}C \quad (4.6)$$

$$\% 80 \text{ Doluluk Oranı İçin: } V = 54,597 - 0,0541.I \quad @ 30,1^{\circ}C \quad (4.7)$$

$$\% 60 \text{ Doluluk Oranı İçin: } V = 53,485 - 0,0539.I \quad @ 31^{\circ}C \quad (4.8)$$

$$\% 40 \text{ Doluluk Oranı İçin: } V = 52,224 - 0,055.I \quad @ 31,2^{\circ}C \quad (4.9)$$

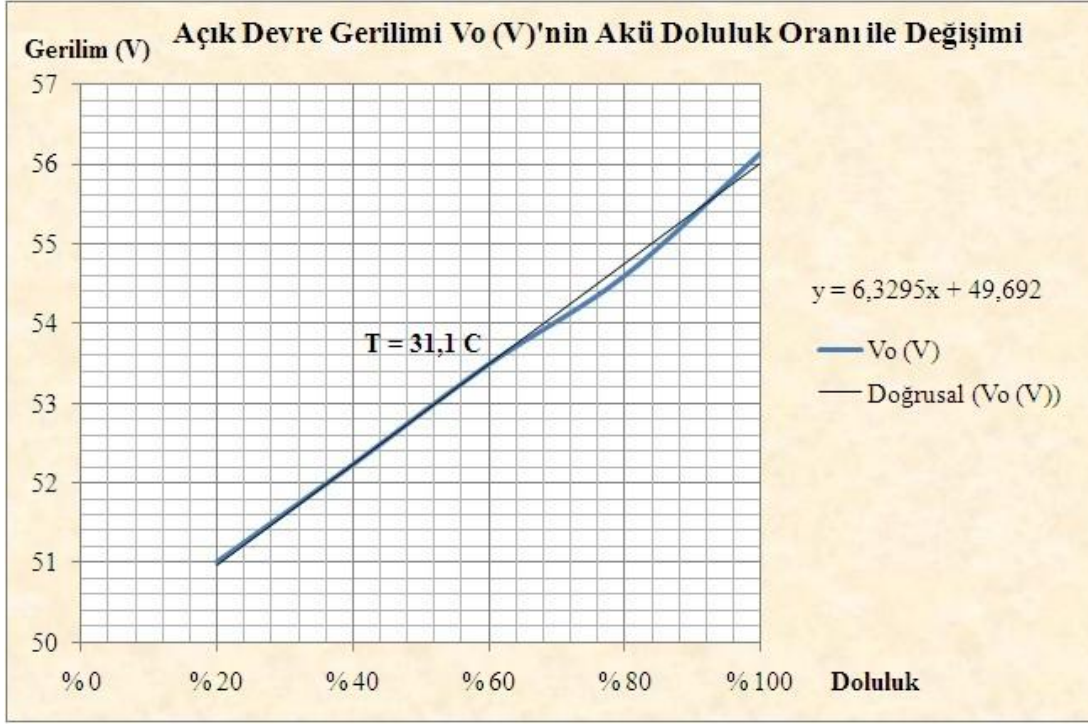
$$\% 20 \text{ Doluluk Oranı İçin: } V = 50,999 - 0,057.I \quad @ 31,7^{\circ}C \quad (4.10)$$

Farklı doluluk oranları için akım - gerilim karakteristiklerinden (denklem 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10) elde edilen doğru denklemlerinden faydalanılarak akü açık devre gerilimi ve iç direnç değerleri Çizelge 4.8’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.8 : Farklı Doluluk Oranlarında Sabit Yükle Deşarj Deneyi Ölçüm Sonuçları

Doluluk	Vo (V)	Ri (Ω)	Sıcaklık (°C)
% 100	56,142	0,0575	31,6
% 80	54,597	0,0541	30,1
% 60	53,485	0,0539	31
% 40	52,224	0,055	31,2
% 20	50,999	0,057	31,7

Elde edilen veriler açık devre geriliminin doluluk oranı ile doğrusal olarak arttığını göstermektedir. Açık devre geriliminin doluluk oranı ile değişim grafiği Şekil 4.57’de gösterilmiştir.



Şekil 4.57 : Açık Devre Gerilimi V_0 (V)'nin Akü Doluluk Oranı İle Değişimi

$$V_0 = 49,692 + 6,3295 \cdot D = 49,692 \cdot \left[1 + \frac{6,3295}{49,692} \cdot D\right]$$

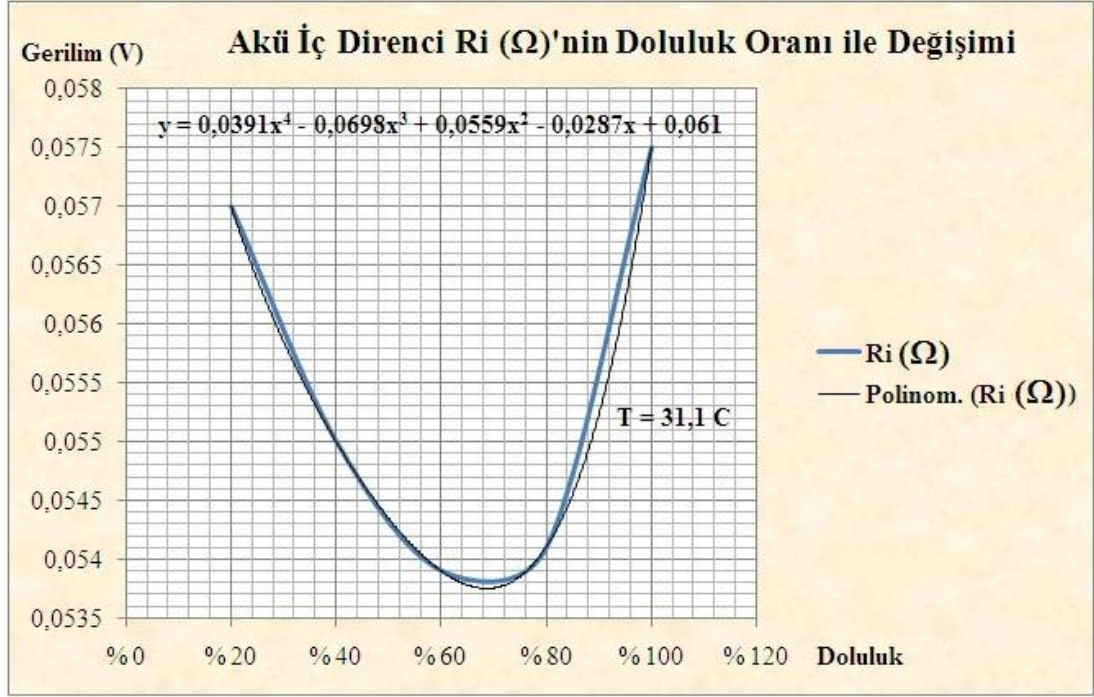
$D = \text{Doluluk_Oranı} \text{ (0: Boş, 1: Dolu)}$

$$c_D^V = \text{Açık_Devre_Gerilimi_Doluluk_Katsayısı} \text{ (31,1C}^0\text{)} = \frac{6,3295}{49,692} = 0,127$$

$$V_{Di} = \text{Boş_Akü_Gerilimi} = 49,692$$

$$V_0 = V_{Di} \cdot [1 + c_D^V \cdot D]$$

Çizelge 4.8'deki veriler kullanılarak oluşturulan akü iç direncinin doluluk ile değişim grafiği Şekil 4.58'de gösterilmiştir.



Şekil 4.58 : Sıcak Deşarj Sürecinde Akü İç Direnci'nin Doluluk Oranı İle Değişimi

$$R_i = 0,0391.D^4 - 0,0698.D^3 + 0,0559.D^2 - 0,0287.D + 0,061$$

$$R_i = 0,061.[1 + \frac{0,0391}{0,061}.D^4 - \frac{0,0698}{0,061}.D^3 + \frac{0,0559}{0,061}.D^2 - \frac{0,0287}{0,061}.D]$$

$k_i = D^i$ _ Doluluk _ Oranına _ Bağlı _ İç _ Direnç _ Katsayısı

$$k_4 = 0,6409$$

$$k_3 = 1,1442$$

$$k_2 = 0,9163$$

$$k_1 = 0,4704$$

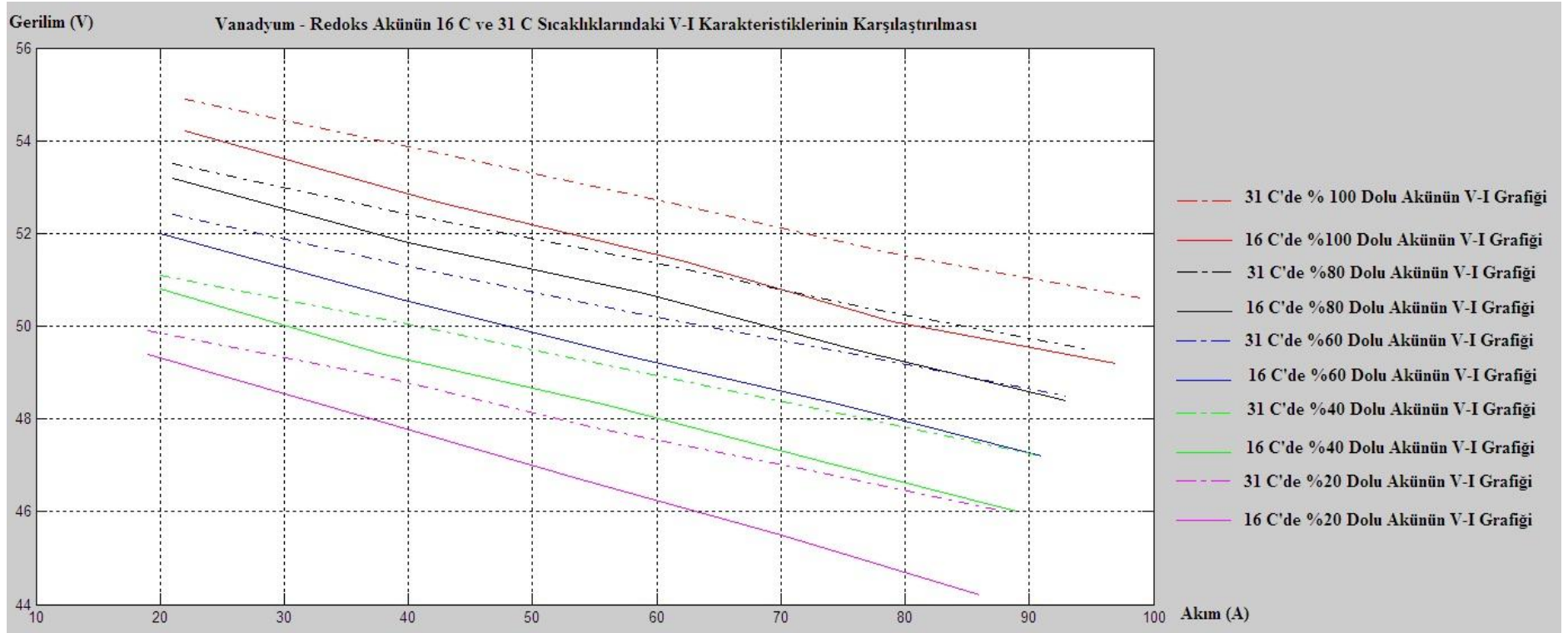
$$k_0 = 0,061$$

$$R_i = k_0.[1 + k_4.D^4 - k_3.D^3 + k_2.D^2 - k_1.D]$$

Burada tanımlanan katsayısına ait değerler daha önce normal sıcaklıkta gerçekleştirilen performans testleri için de hesaplanmıştı. Bu katsayıya ait bir tablo oluşturularak ölçüm yapılmayan, ara sıcaklık değerlerinde iç direncin dolulukla değişimi için bizlere teorik hesap yapmanın mümkün olup olmayacağı konusunda yapılacak araştırmalarda kullanılabilir.

4.7 VRB'nin Farklı Sıcaklıklardaki Performanslarının Karşılaştırılması

Karakterizasyon ölçümü gerçekleştirilen VRB'nin farklı sıcaklıklardaki performanslarına dair önceki bölümlerde elde edilen veriler bu başlık altında mukayese edilecektir. 16,0 °C ve 31,1 °C sıcaklıklarındaki akım-gerilim karakteristiklerine ilişkin grafik Şekil 4.59'da belirtilmektedir.



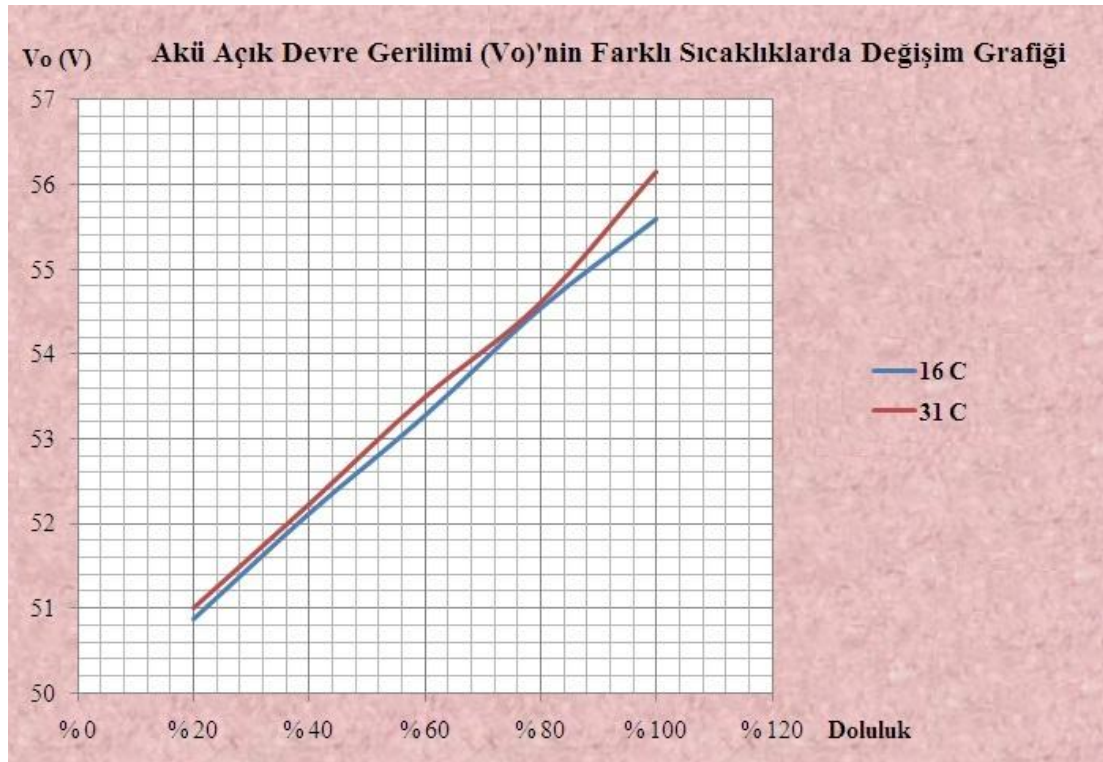
Şekil 4.59 : Farklı Çalışma Sıcaklığı ve Farklı Doluluk Oranlarında Akım-Gerilim Karşılaştırması

Akünün çalıştığı ortam sıcaklığı arttıkça aynı yük koşullarında aküdeki gerilim düşmelerinin daha az olduğu, talebin daha rahat karşılandığı görülmüştür. Çizelge 4.9'dan da anlaşılacağı üzere akü iç direncinin sıcaklık artışıyla azalması, akü uç geriliminin artmasına neden olmuş ve sonuçta daha düşük oranda bir gerilim düşümü meydana gelmiştir.

Çizelge 4.9 : Farklı Sıcaklıklarda Akü Açık Devre Gerilimi ve Akü İç Direnci

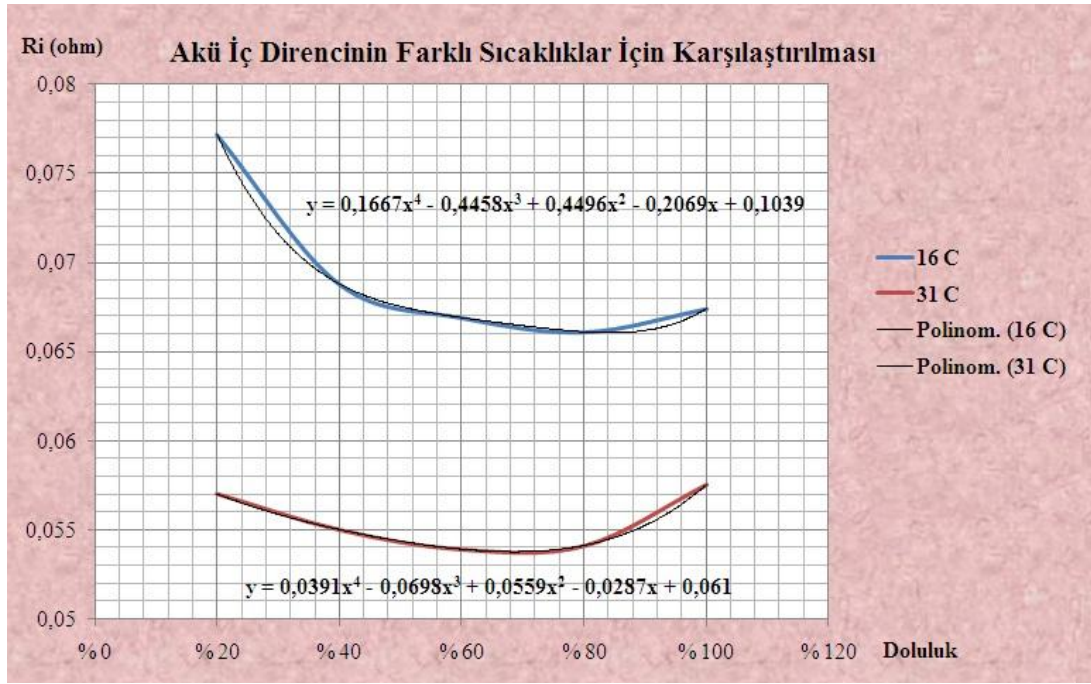
Doluluk	Vo (V)		Ri (Ω)	
	16 °C	31 °C	16 °C	31 °C
% 100	55,594	56,142	0,0674	0,0575
% 80	54,541	54,597	0,0661	0,0541
% 60	53,272	53,485	0,0669	0,0539
% 40	52,117	52,224	0,0688	0,055
% 20	50,869	50,999	0,0772	0,057

Akü açık devre geriliminin farklı doluluk oranlarında 15 °C'lik bir sıcaklık artışıyla nasıl değişim gösterdiği Şekil 4.60'da belirtilmiştir.



Şekil 4.60 : Akü Açık Devre Geriliminin Sıcaklık ve Doluluk ile Değişim Grafiği

Akü açık devre gerilimi sıcaklık değişiminden çok az etkilenmiş, ancak akü iç direncinde sıcaklığa bağlı olarak Şekil 4.61'de gösterilen bir düşüş yaşandığı görülmüştür.



Şekil 4.61 : Akü İç Direncinin Sıcaklık ve Doluluk ile Değişim Grafiği

Karşılaştırmalar sonucu elde edilen iç direnç denklemi denklem (4.1)'de, akü açık devre gerilim denklemi (4.2)'de belirtildiği gibidir.

$$R_i = k_0 \cdot [1 + k_4 \cdot D^4 - k_3 \cdot D^3 + k_2 \cdot D^2 - k_1 \cdot D] \quad (4.1)$$

$$V_0 = V_{Di} \cdot [1 + c_D^V \cdot D] \quad (4.2)$$

Denklem (4.1) ve (4.2) de kullanılan katsayıların sıcaklıkla değişim durumları Çizelge 4.10'da görüldüğü gibidir.

Çizelge 4.10 : Farklı Sıcaklıklarda İç Direnç ve Açık Devre Hesabı Katsayıları

		Vdi	Cvd	(+) k0	(-) k1	(+) k2	(-) k3	(+) k4
SICAKLIK (C)	16 °C	49,716	0,119	0,1039	1,9913	4,3272	4,2906	1,6044
	31,1 °C	49,692	0,127	0,061	0,4704	0,9163	1,1442	0,6409

Her iki sıcaklık için de çevrim başına enerji verimini ve transfer edilen elektrik yükü verimini hesaplırsak;

$$\eta_E(16,0^0 C) = \frac{\Delta E_{deşarj}}{\Delta E_{şarj}} = \frac{24,72}{40,07} = 0,61$$

$$\eta_E(31,1^0 C) = \frac{\Delta E_{deşarj}}{\Delta E_{şarj}} = \frac{24,49}{44,52} = 0,55$$

$$\eta_q(16,0^0 C) = \frac{\Delta q_{deşarj}}{\Delta q_{şarj}} = \frac{526,55}{703,75} = 0,74$$

$$\eta_q(31,1^0 C) = \frac{\Delta q_{deşarj}}{\Delta q_{şarj}} = \frac{517,58}{786,63} = 0,65$$

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında Vanadyum Redoks Akışkan akülerin elektriksel karakterizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiş ve farklı çalışma ve ortam koşullarındaki akü performansı belirlenmeye çalışılmıştır. Tezin başlangıç noktası olan, vanadyum redoks akışkan akülerin daha sıcak ortam koşullarında akü hücreleri içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonun aktivasyon enerjisinin daha rahat aşılmasına bağlı olarak iç dirençlerinin düşeceği savı, deneysel çalışmalar sonucunda doğrulanmıştır.

Bu tez çalışmasında 16,0 °C ve 31,1 °C ortam sıcaklıklarında vanadyum redoks akışkan akü önce tamamen boş konumda iken şarj edilmiş, daha sonra 10 adet 4,61Ω büyüklüğündeki eşdeğer dirençler tam kapasite kullanılarak deşarj edilmiştir. Her iki ortam sıcaklığı için de elde edilen ölçümler kullanılarak gerilim-zaman, akım-zaman, transfer edilen toplam elektriksel yük-gerilim, toplam enerji-gerilim, güç-zaman, kapasite-zaman, enerji-zaman ve güç-akım ilişkisine dair grafikler oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafikler standart olarak bir aküden elde edilmesi beklenen performans eğrileri ile paralellik göstermektedir.

Yapılan deneyler ile akü kapasitesine bağlı olarak akü uç geriliminin lineer olarak değiştiği doğrulanmıştır. Bu durum vanadyum redoks akışkan akülerin referans bir hücre gerilimi üzerinden kapasitelerinin kesin doğrulukta tespit edilebileceğini kanıtlamıştır.

Bu tez çalışmasında elde edilen veriler, akü açık devre geriliminin sıcaklığa olan bağımlılığının düşük olduğunu, ancak akü iç direncinin sıcaklıktan ciddi derecede etkilendiği sonucunu ortaya çıkarmıştır. 15 °C'lik bir sıcaklık artışı için akü iç direnci doluluk oranına bağlı olarak % 14 ile % 26 oranında azalma göstermiştir. Ancak 16,0°C'de çevrim başına toplam enerji veriminin % 6, transfer edilen elektrik yükü veriminin 31,1°C'ye göre % 9 daha fazla olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada dikkati çeken diğer bir önemli husus ise, akü iç direncinin aynı sıcaklık koşullarında akü doluluk oranıyla olan değişimidir. Akü doluluk oranının azalmasıyla akü iç direnci önce azalmakta, daha sonra yine artışa geçmektedir. Hücre yığını içerisindeki iyon konsantrasyonunun azalmasına bağlı olarak düşük doluluk oranlarında akü iç direncinin artacağı öngörülse de, bu değişimin parabolik olması son derece dikkati çeken bir husustur. Bunun nedeni akü iç direncinin sadece elektrolit direnci ile sınırlı olmayıp aynı zamanda membran direnci ve elektrot-elektrolit ara yüzey direncine de bağlı olmasıdır.

Vanadyum redoks akışkan akü teknolojisinin sıcak ve soğuk iklime sahip ülkelerde yüksek kapasiteli enerji depolamada kullanımının avantaj ve dezavantajları bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Enerji ve şarj verimleri sıcaklık arttıkça düşüş göstermektedir. Bu çalışmada 16⁰C'lik bir sıcaklık artışı sonucu enerji ve şarj verimleri sırasıyla % 9 ve % 12 düşüş göstermiştir.

Bu tez çalışmasının daha ileriye taşınması amacıyla vanadyum redoks akülerin daha düşük ve daha yüksek sıcaklıklar da dâhil edilmek suretiyle geniş bir sıcaklık bandında nasıl bir performans ortaya koyacağı araştırılabilir. Bu yönde yapılacak yeni çalışmalar akü açık devre gerilimi ve akü iç direnci hesabında tanımlanan katsayıların ara sıcaklık değerlerindeki değişimlerine de ortaya konulmasına ve bu katsayılar yardımıyla ölçüm gerçekleştirilmeyen bir sıcaklık değerinde bu değerlerin teorik olarak interpolasyon yöntemiyle hesaplanabilir olup olmadığını açığa kavuşturacaktır. Böylece akü davranışının çok daha geniş bir aralıkta öngörülebilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **United Nations – Department of Economic and Social Affairs**, 2004: World Population to 2300, United Nations Publication, New York
- [2] < <http://www.infineon.com/> >, Alındığı Tarih: 26.04.2011
- [3] **Chen L., Huang K., Li X., Liu S., Tan N.**, 2008: Research Progress of Vanadium Redox Flow Battery for Energy Storage in China, *Renewable Energy*, Vol. **33**, pp. 186-192, China
- [4] **Chen J., Gao S., Yi B., Zhang H., Zhao P., Zhou H.**, 2006: Characteristics And Performance Of 10 Kw Class All-Vanadium Redox-Flow Battery Stack, *Journal of Power Sources*, Vol. **162**, pp. 1416-1420, China
- [5] **Fabjan Ch., Garche J., Harrer B., Jörissen L., Kolbeck C., Philipp F., Tomazic G., Wagner F.**, 2004: The Vanadium Redox-Battery: An efficient Storage Unit For Photovoltaic Systems, *Electrochimica Acta*, Vol **47**, pp. 825-831, Austria
- [6] **Hara T., Ikeuchi A., Itou T., Kanno T., Kumamoto T., Shigematsu T., Tokuda N., Tsutsui Y.**, 2000: Development of A Redox Flow Battery System, *SEI Technical Review*, Vol **50**, pp. 88-94, Japan
- [7] **Yıldız T.**, 2006: Kurşun-Asit Akümülatörlerde Geleneksel Tipler ile Gaz Geri Dönüşümlü Sistemin Karşılaştırılması, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli
- [8] **Brain M., Bryant C.W.**, < <http://electronics.howstuffworks.com/battery1.htm> >, Alındığı Tarih: 21.05.2011
- [9] **Sağlam A.**, < <http://www.gunes-pili.com/tr/teknoloji/akumuelatoer> >, 29.05.2011
- [10] **Tombul B.**, 2005: Akülerin Çevreye Zararları ve Geri Kazanılması, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul
- [11] **Linden D.**, 2009: Handbook of Batteries, Second Edition, McGraw-Hill, New York
- [12] **Aydın İ.**, 2010: VRB-ESS Akışkan Aküler, Prudent Energy & Ericom Enerji ve Telekomünikasyon Teknolojileri A.Ş., İstanbul
- [13] < http://en.wikipedia.org/wiki/Vanadium_redox_battery >, Alındığı Tarih: 05.05.2011
- [14] **Prudent Energy VRB Education Seminars**, 2010: VRB-ESS Flow Battery Section D – System Overview, China

[15] **Prudent Energy**, 2010: Specification, Interface Requirements, Electrical and Mechanical - VRB-ESS kW Class, China

[16] **Prudent Energy**, 2010: VRB-ESS kW Class – Operation Manuel, China

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında İstanbul'da doğdu. Bayrampaşa Ahmet Rıfat Canayakın Lisesi (YDA)'nden 2004 yılında mezun oldu. Aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümünü kazandı.

2004 - 2008 yılları arasında lisans eğitimini tamamladığı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Enerji Bilim ve Teknoloji yüksek lisans programına girmeye hak kazandı. 2011 yılında Milli Eğitim Bakanlığı yurt dışı doktora eğitim bursunu kazandı. Doktora eğitimi için 2012 yılında İngiltere'ye gidecek olan Kılavuz, 2009 yılı Şubat ayından itibaren İstanbul Büyükşehir Belediyesi Şehir Aydınlatma ve Enerji Müdürlüğü'nde mimari aydınlatma sistemleri, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji teknolojileri konularında çalışmaktadır.