

**BATARYA MODEL PARAMETRELERİNİN, DOLULUK
DURUMUNUN, SAĞLIK DURUMUNUN KESTİRİMİ VE
Nİ-MH BATARYALARA UYGULANMASI**

**ESTIMATION OF BATTERY MODEL PARAMETERS,
STATE-OF-CHARGE, STATE-OF-HEALTH AND
APPLICATIONS TO NI-MH BATTERIES**

CÜNEYT BARLAK

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

DOKTORA TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2009

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI** 'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :
Prof.Dr. Adnan KÖKSAL

Üye (Danışman) :
Yrd.Doç.Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

Üye :
Prof.Dr. Hüseyin DEMİRCİOĞLU

Üye :
Yrd.Doç.Dr. A. Semih BİNGÖL

Üye :
Yrd.Doç.Dr. Timur AYDEMİR

ONAY

Bu tez/...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Erdem YAZGAN
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

BATARYA MODEL PARAMETRELERİNİN, DOLULUK DURUMUNUN, SAĞLIK DURUMUNUN KESTİRİMİ VE Nİ-MH BATARYALARA UYGULANMASI

Cüneyt Barlak

ÖZ

Batarya model parametrelerinin, doluluk durumunun ve sağlık durumunun kestirimi ve Ni-Mh bataryalara uygulanması bu tez çalışmasında incelenmiştir.

Batarya doluluk durumu kestirimi için literatürde mevcut yöntemler ve batarya modelleri incelenmiştir. Batarya modeli olarak, elektriksel bir devre modeli önerilmiştir. Batarya doluluk durumu ve parametre kestirimi için Kalman filtre tabanlı bir kestirim algoritması kullanılmıştır. Önerilen devre modeli ve kestirim algoritması kullanılarak, batarya parametrelerinin ve batarya doluluk durumunun, ayrı ayrı veya birlikte kestiriminin yapılabildiği bilgisayar simülasyonlarıyla ve deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Elde edilen sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, batarya sağlık durumunun, tekli ve çoklu sınıflandırma ile belirlenmesine yönelik yaklaşımlar önerilmiştir. Ni-Mh bataryalar kullanılarak çeşitli sağlık grupları oluşturulmuştur. Verilen bir bataryanın tanımlanan bir sağlık grubuna dahil olup olmadığı sınıflandırma yöntemleri ile incelenmiştir. Önerilen sınıflandırma yöntemlerinin kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca, batarya sağlık durumunun tespiti için batarya kapasitesinin kestiriminde kullanılabilecek çok değişkenli aradeğerleme yaklaşımları önerilmiştir. Ni-Mh bataryalarla yapılan deneysel çalışmalarla, önerilen bu yaklaşımların batarya sağlık durumu kestiriminde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batarya, batarya doluluk durumu, batarya sağlık durumu, batarya modeli, Kalman filtre, kestirim, sınıflandırma yaklaşımı, çok değişkenli aradeğerleme, radyal tabanlı fonksiyonlar.

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Yakup ÖZKAZANÇ, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

ESTIMATION OF BATTERY MODEL PARAMETERS, STATE-OF-CHARGE, STATE-OF-HEALTH AND APPLICATIONS TO NI-MH BATTERIES

Cüneyt Barlak

ABSTRACT

In this thesis study, estimation of battery model parameters, state-of-charge, state-of-health and applications to Ni-Mh batteries are investigated.

State-of-charge estimation methods and battery models in the literature are summarized. An electrical circuit model is proposed as a battery model. A Kalman filter based estimation algorithm is used for the battery state-of-charge and parameter estimation. It is shown by computer simulations and experimental tests that battery parameters and the battery state-of-charge can be estimated separately and together by using the proposed battery model and estimation algorithm. Results are found to be consistent.

In this study, single and multiple classification approaches are proposed to find out the battery state-of-health. Different health classes are formed by using Ni-Mh batteries. Using classification approaches, whether any given battery is a member of a specified health class or not has been investigated. It is shown that the proposed classification methods can be used.

In this work, the battery state-of-health estimation with multivariate interpolation methods are also proposed to estimate the capacity of a battery. Results obtained from Ni-Mh battery experiments show that these proposed methods can be used for the battery state-of-health estimation.

Keywords: Battery, state-of-charge, state-of-health, battery model, Kalman filter, estimation, classification approach, multivariate interpolation, radial basis functions.

Advisor: Yrd.Doç.Dr. Yakup ÖZKAZANÇ, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleŐmesinde, değerli katkıları ve yol gÖstericiliğinden dolayı, tez danıŐmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Yakup Özkazanç'a teşekkür ederim.

Her zaman olduğu gibi, bu tez çalışması sırasında da destekleriyle yanımda olan anneme ve kardeŐime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
İNGİLİZCE-TÜRKÇE TERİMLER SÖZLÜĞÜ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Bataryaların Önemi	1
1.2. Batarya Modelleri	1
1.3. Batarya Doluluk Durumu	2
1.4. Batarya Sağlık Durumu	3
1.5. Tezin Katkısı.....	4
1.5.1. Modelleme	4
1.5.2. Batarya doluluk durumu kestirimi	5
1.5.3. Batarya sağlık durumunun belirlenmesi	5
1.5.4. Batarya sağlık durumu kestirimi	6
1.6. Tezin Yapısı	7
2. BATARYALARIN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ	9
2.1. Bataryaların Kimyasal Yapısı	9
2.2. Batarya Çeşitleri	10
2.2.1. Tek kullanımlık bataryalar	10
2.2.2. Tekrar doldurulabilen bataryalar	11
2.3. Bataryaların Performans Karakterizasyonu	13

2.3.1. Batarya kapasitesi	13
2.3.2. Enerji yoğunluğu	14
2.3.3. Güç yoğunluğu	14
2.3.4. Verimlilik	14
2.3.5. Yüksüz boşalma	15
2.3.6. Batarya dolma-boşalma sayısı	15
2.4. Bataryaların Performansını Etkileyen Etkenler	16
2.4.1. Polarizasyon kayıpları	16
2.4.2. Boşaltma akımı	16
2.4.3. Sıcaklık	18
2.4.4. Boşaltma modu	18
3. BATARYA MODELLERİ VE MODEL PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ	19
3.1. Elektriksel Devre Modelleri	19
3.1.1. Basit batarya modeli	19
3.1.2. Dirençsel Thevenin eşdeğer modeli	20
3.1.3. Thevenin devre modeli	20
3.1.4. Doğrusal elektriksel model	21
3.1.5. Geliştirilmiş elektriksel devre modeli	22
3.1.6. Reaktif batarya modeli	22
3.1.7. Parazitik etki elemanlı dinamik model	23
3.1.8. Dinamik seri devre modeli	24
3.1.9. Kapasite kullanımlı devre modeli	24
3.1.10. RC batarya modeli	25
3.2. Matematiksel Modeller	25
3.2.1. Shepherd modeli	26
3.2.2. Unnewehr modeli	26

3.2.3. Nernst modeli	27
3.2.4. Birleştirilmiş model	27
3.3. Empedans Tabanlı Modeller	27
3.4. Elektrokimyasal Modeller	28
3.5. Önerilen Batarya Modeli	28
3.6. Önerilen Modelin Parametrelerinin Kestirimi İçin Yöntem	31
3.6.1. T_d yayılım zaman sabitinin hesaplanması için önerilen yöntem	32
3.6.2. C_d ve R_b parametrelerinin kestirimi için yöntem	35
3.6.3. Test bataryası için yapılan batarya parametre kestirimi	38
4. BATARYA DOLULUK DURUMU KESTİRİMİ	42
4.1. Batarya Doluluk Durumu Tespinde Kullanılan Yöntemler	42
4.1.1. Boşaltma testi yöntemi	42
4.1.2. Amper-saat sayım yöntemi	42
4.1.3. Açık devre gerilimi yöntemi	43
4.1.4. Empedans ölçümü yöntemi	43
4.1.5. Kalman filtre yöntemi	44
4.1.6. Üretici firma verilerine dayanarak oluşturulan analitik yöntemler	45
4.1.7. Diğer yöntemler	46
4.2. Batarya Doluluk Durumu Kestirimi İçin Önerilen Yöntem	46
4.2.1. Durum denklemleri	46
4.2.2. Batarya doluluk durumu kestirimi için yapılan simülasyon çalışması	48
4.2.3. Test bataryası için yapılan batarya doluluk durumu kestirimi	49
4.2.3.1. Batarya doluluk durumunun başlangıç değerinin hesaplanması	50

5. BATARYA DOLULUK DURUMU VE BATARYA PARAMETRELERİNİN BİRLİKTE KESTİRİMİ	53
5.1. Batarya Doluluk Durumu ve Batarya Parametrelerinin Birlikte Kestirimine Yönelik Simülasyon Çalışması	53
5.1.1. Durum denklemleri	54
5.1.2. Batarya doluluk durumu ve batarya parametrelerinin birlikte kestirim simülasyon sonuçları	56
5.2. Test Bataryası İçin Batarya Doluluk Durumunun ve Batarya Parametrelerinin Birlikte Kestirim Deneysel Sonuçları	64
5.2.1. Durum denklemleri	64
5.2.2. Deneysel sonuçlar	66
6. BATARYA SAĞLIK DURUMUNUN SINIFLANDIRMA YAKLAŞIMLARI İLE BELİRLENMESİ	71
6.1. Batarya Sağlık Durumu ve Sağlık Durumunu Etkileyen Etkenler	71
6.2. Ni-Mh Bataryaların Özellikleri ve Deneysel Çalışma Yöntemleri ..	74
6.2.1. Ni-Mh bataryaların boşalma özellikleri	74
6.2.2. Ni-Mh bataryaların dolum özellikleri	75
6.2.3. Uygulama bataryalarının boşaltımı	76
6.2.4. Uygulama bataryalarının dolumu	77
6.2.5. Uygulama bataryalarında parametre kestirimi	78
6.3. Batarya Sağlık Durumunun Tekli Sınıflandırma Yaklaşımı İle Belirlenmesi	80
6.3.1. Grup 0 (kullanılmamış) bataryalar için sınıflandırma testi ...	83
6.3.2. Grup 1 (yıpratma testleri bir kere uygulanmış) bataryalar için sınıflandırma testi	84
6.3.3. Grup 2 (yıpratma testleri iki kere uygulanmış) bataryalar için sınıflandırma testi	86
6.4. Batarya Sağlık Durumunun Çoklu Sınıflandırma Yaklaşımı İle Belirlenmesi	87
6.4.1. Batarya sağlık durumunun sınıflandırılması	87

6.4.2. Karesel ayırtaç yaklaşımı	88
6.4.3. Sınıflandırma performans sınırları	90
7. BATARYA SAĞLIK DURUMUNUN ÇOKDEĞİŞKENLİ ARADEĞERLEME YÖNTEMLERİ İLE KESTİRİMİ	92
7.1. Ters Uzaklık Ağırlıklı Çokdeğişkenli Aradeğerleme	92
7.2. Ters Uzaklık Ağırlıklı Çokdeğişkenli Aradeğerleme İle Batarya Kapasitesinin Kestirimi	94
7.3. Değiştirilmiş Ters Uzaklık Ağırlıklı Çokdeğişkenli Aradeğerleme ile Batarya Kapasitesinin Kestirimi	96
7.3.1. Mahalanobis uzaklığı kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile batarya kapasitesinin kestirimi	96
7.3.2. Karesel ayırtaç fonksiyonu kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile batarya kapasitesinin kestirimi	99
7.4. Radyal Tabanlı Fonksiyonlarla Çokdeğişkenli Aradeğerleme	101
7.5. Radyal Tabanlı Fonksiyonlarla Çokdeğişkenli Aradeğerleme Kullanılarak Batarya Kapasitesinin Kestirimi	103
8. SONUÇLAR.....	108
KAYNAKLAR DİZİNİ	111
EKLER	116
ÖZGEÇMİŞ	120

İNGİLİZCE-TÜRKÇE TERİMLER SÖZLÜĞÜ

Affine: İlgin.

A priori: Önsel.

Battery: Batarya.

Charge: Yük, şarj, dolum, dolma, doldurma.

Chi-square distribution: Ki-kare dağılımı.

Concentration: Konsantrasyon, derişim.

Diffusion: Difüzyon, yayılım.

Discharge: Deşarj, boşalma, boşaltma.

Discriminant: Ayırtaç.

Estimation: Kestirim.

Hybrid: Hibrit, melez.

Interpolation: Aradeğerleme.

Inverse distance weighting: Ters uzaklık ağırlıklı.

Multi-class classification: Çoklu sınıflandırma.

Multivariate: Çok değişkenli, çok değişirli.

Offline: Çevrimdışı.

One-class classification: Tekli sınıflandırma.

Online: Çevrimiçi.

Primer battery: Tek kullanımlık batarya.

Quadratic: Karesel, kuadratik.

Radial basis: Radyal taban.

Random walk: Rasgele yürüyüş.

Rechargeable battery: Tekrar doldurulabilen batarya.

State-of-Charge: Yük durumu; doluluk durumu.

State-of-health: Sağlık durumu.

White noise: Beyaz gürültü.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- C_d : Batarya yayılım zaman sabiti kapasitörü.
- C_{soc} : Bataryanın amper-saniye cinsinden nominal kapasitesi.
- HEV : Hibrit elektrikli taşıtlar.
- i_b : Batarya terminal akımı.
- K : Kalman kazanç matrisi.
- LiP : Lityum-polimer.
- μ : Ortalama değer.
- Ni-Cd : Nikel kadmium.
- Ni-Mh : Nikel metal hidrid.
- P : Eş-değişke matrisi.
- R_b : Batarya iç direnci.
- R_d : Batarya yayılım zaman sabiti direnci.
- R_L : Batarya yük direnci.
- R_{sd} : Batarya iç boşalma direnci.
- SOC : Batarya doluluk durumu (State-of-Charge).
- SOH : Batarya sağlık durumu (State-of-Health).
- T_d : Batarya yayılım zaman sabiti.
- V_b : Batarya terminal gerilimi.
- V_{cd} : C_d kapasitörü üzerindeki gerilim düşümü.
- V_{oc} : Batarya açık devre gerilimi.
- V_{soc} : C_{soc} kapasitörü üzerindeki gerilim düşümü.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Bir batarya hücresinin temel yapısı	9
Şekil 2.2. Bataryadaki kapasite değişimi	17
Şekil 2.3. Farklı akım değerleri için bataryadaki boşalma eğrileri	17
Şekil 2.4. Batarya kapasitesinin sıcaklığa göre değişimi	18
Şekil 3.1. Basit batarya modeli	20
Şekil 3.2. Dirençsel Thevenin eşdeğer modeli	20
Şekil 3.3. Thevenin devre modeli	21
Şekil 3.4. Doğrusal elektriksel model	21
Şekil 3.5. Geliştirilmiş elektriksel devre modeli	22
Şekil 3.6. Reaktif batarya modeli	23
Şekil 3.7. Parazitik etki elemanlı dinamik model	23
Şekil 3.8. Dinamik seri devre modeli	24
Şekil 3.9. Kapasite kullanımlı devre modeli	25
Şekil 3.10. RC batarya modeli	25
Şekil 3.11. Batarya hücresi için empedans ölçüm modeli	28
Şekil 3.12. Önerilen batarya modeli	29
Şekil 3.13. T_d yayılım zaman sabitinin hesaplanmasında kullanılan devre modeli	33
Şekil 3.14. Önerilen yöntemle hesaplanan T_d yayılım zaman sabiti. $\hat{T}_d(0) = 250s$	34
Şekil 3.15. Batarya parametre kestirimi için yapılan simülasyon çalışması. Gerçek ve kestirilen C_d değerleri	37
Şekil 3.16. Batarya parametre kestirimi için yapılan simülasyon çalışması. Gerçek ve kestirilen R_b değerleri	37
Şekil 3.17. Batarya parametre kestirimi için yapılan simülasyon çalışması. Gerçek ve kestirilen V_{cd} eğrileri	38

Şekil 3.18. Test bataryası için yapılan batarya parametre kestirimi. Hesaplanan C_d değeri	40
Şekil 3.19. Test bataryası için yapılan batarya parametre kestirimi. Hesaplanan R_b değeri	40
Şekil 3.20. Test bataryası için yapılan batarya parametre kestirimi. 2.1A boşalma akımı için ölçülen ve hesaplanan boşalma eğrileri	41
Şekil 4.1. Empedans ölçüm yöntemiyle elde edilen Nyquist diagramı	44
Şekil 4.2. Batarya doluluk durumu kestirimi için yapılan simülasyon çalışması. Gerçek ve kestirilen V_{soc} eğrileri	48
Şekil 4.3. Test bataryası için yapılan batarya doluluk durumu kestirimi	49
Şekil 4.4. Test bataryası için yapılan batarya doluluk durumu kestiriminde ölçülen ve kestirilen batarya terminal gerilimi eğrileri	50
Şekil 4.5. Batarya doluluk durumunun başlangıç değerinin hesaplanmasında kullanılan devre modeli	51
Şekil 4.6. Batarya doluluk durumunun başlangıç değerinin hesaplanması	52
Şekil 5.1. Batarya doluluk durumu ve batarya parametrelerinin birlikte kestirimine yönelik simülasyon çalışmasında kullanılan batarya modeli	53
Şekil 5.2. Birinci simülasyonda elde edilen V_{soc} grafiği	57
Şekil 5.3. İkinci simülasyonda elde edilen V_{soc} grafiği	58
Şekil 5.4. Üçüncü simülasyonda elde edilen V_{soc} grafiği	59
Şekil 5.5. Birinci simülasyonda (4 durum değişkenli model) elde edilen V_{soc} grafiği	62
Şekil 5.6. İkinci simülasyonda (4 durum değişkenli model) elde edilen V_{soc} grafiği	63
Şekil 5.7. İkinci simülasyon sonucunda (4 durum değişkenli model) kestirilen C_d parametresi	63
Şekil 5.8. İkinci simülasyon sonucunda (4 durum değişkenli model) kestirilen R_b parametresi	64
Şekil 5.9. Batarya doluluk durumu ve parametre kestirimi için ölçülen batarya terminal gerilimi ve batarya terminal akımı	67
Şekil 5.10. V_{soc} 'un başlangıç değerinin hesaplanması	67

Şekil 5.11. Test bataryası için batarya doluluk durumunun ve batarya parametrelerinin birlikte kestirim deneysel sonuçları. Batarya doluluk durumu kestirimi	68
Şekil 5.12. Test bataryası için batarya doluluk durumunun ve batarya parametrelerinin birlikte kestirim deneysel sonuçları. C_d kestirimi	68
Şekil 5.13. Test bataryası için batarya doluluk durumunun ve batarya parametrelerinin birlikte kestirim deneysel sonuçları. R_b kestirimi	69
Şekil 5.14. Test bataryası için batarya doluluk durumunun ve batarya parametrelerinin birlikte kestirim deneysel sonuçları. Ölçülen ve kestirim sonucunda hesaplanan batarya terminal gerilimi	69
Şekil 6.1. Ortam sıcaklığının batarya kapasitesi üzerine etkisi	72
Şekil 6.2. Batarya doldurma denetim yöntemlerindeki sıcaklık değişimleri	73
Şekil 6.3. ΔV ve $\Delta T/\Delta t$ batarya doldurma denetim tekniklerinin batarya ömrüne etkisinin karşılaştırılması	73
Şekil 6.4. Ni-Mh bataryaların kapasite-gerilim karakteristikleri. a) 0.2C; b) 1C; c) 2C; d) 3C	74
Şekil 6.5. Ni-Mh ve Ni-Cd bataryaların doluluk-sıcaklık karakteristikleri. Kalın çizgi: Ni-Mh bataryalar için; kesikli çizgi: Ni-Cd bataryalar için	75
Şekil 6.6. Ni-Mh ve Ni-Cd bataryaların doluluk-gerilim karakteristikleri. Kalın çizgi: NiMh bataryalar için; kesikli çizgi: NiCd bataryalar için	75
Şekil 6.7. Bir uygulama bataryasının, 0.4A boşaltma akımındaki boşalma eğrisi	77
Şekil 6.8. Bir uygulama bataryasının, 2.1A doldurma akımındaki dolum eğrisi ...	77
Şekil 6.9. 3 serbestlik dereceli ki-kare dağılımı	83
Şekil 6.10. Grup 0'ı oluşturan 16 örnek üzerinden hesaplanan deneysel birikimli dağılım fonksiyonu ve ki-kare birikimli dağılım fonksiyonu	84
Şekil 6.11. Grup 1'i oluşturan 8 örnek üzerinden hesaplanan deneysel birikimli dağılım fonksiyonu ve ki-kare birikimli dağılım fonksiyonu	85
Şekil 6.12. Grup 2'yi oluşturan 8 örnek üzerinden hesaplanan deneysel birikimli dağılım fonksiyonu ve ki-kare birikimli dağılım fonksiyonu	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Tekrar doldurulabilen bataryaların hücre gerilim değerleri	11
Çizelge 2.2. Tekrar doldurulabilen bataryaların performans karakteristikleri	15
Çizelge 3.1. Tekrar doldurulabilen bataryalar için nominal “m” ve “n” değerleri	30
Çizelge 6.1. Grup 0 (hiç kullanılmamış) bataryalar için hesaplanan parametre değerleri	78
Çizelge 6.2. Grup 1 (birinci eskitme testi sonrası) bataryalar için hesaplanan parametre değerleri	79
Çizelge 6.3. Grup 2 (ikinci eskitme testi sonrası) bataryalar için hesaplanan parametre değerleri	79
Çizelge 6.4. Herbir batarya için hesaplanan karesel ayırtaç değerleri	89
Çizelge 6.5. Sınıflandırma test sonuçları	90
Çizelge 6.6. Sınıflandırma hataları ile teorik sınırların karşılaştırılması	91
Çizelge 7.1. Ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları	95
Çizelge 7.2. Ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları (09Grup2 numaralı batarya hesaplamalara dahil edilmemiştir)	96
Çizelge 7.3. Mahalanobis uzaklığı kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları	97
Çizelge 7.4. Mahalanobis uzaklığı kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları (09Grup2 numaralı batarya hesaplamalara dahil edilmemiştir)	98
Çizelge 7.5. Karesel ayırtaç fonksiyonu kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları	99
Çizelge 7.6. Karesel ayırtaç fonksiyonu kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları (09Grup2 numaralı batarya hesaplamalara dahil edilmemiştir)	100

Çizelge 7.7. Radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme kullanılarak elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları	104
Çizelge 7.8. Radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme kullanılarak elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları (10Grup2 numaralı batarya hesaplamalara dahil edilmemiştir)	105
Çizelge 7.9. Normalize radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme kullanılarak elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları	106
Çizelge 7.10. Normalize radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme kullanılarak elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları (10Grup2 numaralı batarya hesaplamalara dahil edilmemiştir)	107

1. GİRİŞ

Bu bölümde, tezin genel bir açıklaması yapılacak, tezin kapsamı ve bölümleri hakkında bilgi verilecektir. İlk olarak bu tez çalışmasının temel konusunu oluşturan bataryaların önemi açıklanacaktır. Batarya modellerinin özetlenmesinden sonra, batarya doluluk seviyesi ve batarya sağlık durumu hakkında genel bir açıklama yapılacaktır. Bu bölümdeki diğer bir alt başlıkta ise, bu tez çalışmasının, bataryaların incelenmesine yönelik katkıları anlatılacaktır. Son olarak, tezin bölümleri açıklanarak, her bir bölümde hangi konuların incelendiği özetlenecektir.

1.1. Bataryaların Önemi

Günümüzde bataryalar büyük bir önem kazanmıştır. Taşınabilir elektronik cihazların (cep telefonları, bilgisayarlar, ses ve görüntü cihazları vb.) yaygınlaşması, bataryalara olan ihtiyacı çok büyük miktarda arttırmıştır.

Endüstriyel ve ticari uygulamalarda, şebeke elektriğindeki kesintiler sırasında batarya destekli güç sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Otomotiv sektöründe, on yıllardır içten yanmalı motora ilk hareketi sağlayan akümülatör olarak kullanılan bataryaların önemi, günümüzde hibrit veya tamamen elektrikli araçların geliştirilmesine yönelik çalışmaların hızlanmasına bağlı olarak, her geçen gün giderek artmaktadır.

Kullanım alanlarındaki çeşitlilik yüzünden, çok sayıda farklı tip ve özellikte bataryalar imal edilmektedir. Günlük kullanımlı bataryalar, güç yoğunlukları ve kapasiteleri düşük olmasına rağmen, ufak boyuttadırlar ve taşınabilirlik avantajına sahiptirler. Sanayi tipi uygulamalarda, kapasitesi ve güç yoğunluğu yüksek, büyük hacimli batarya blokları kullanılmaktadır ve bu tür bataryalar tekrar doldurulma özelliğine sahiptir. Tek kullanımlık bataryalar günlük kullanımlarda çoğu zaman tercih edilmesine rağmen, yerlerini zamanla tekrar doldurulabilen bataryalara bırakmaktadır.

1.2. Batarya Modelleri

Bir bataryanın, farklı kullanım ve ortam koşullarındaki davranışının incelenmesi için, bir batarya modelinin oluşturulması gereklidir. Oluşturulan modeldeki

parametreler, batarya parametreleri olarak adlandırılır ve çevrimdışı (offline) veya çevrimiçi (online) ölçümlerle hesaplanır.

Batarya modelinden yararlanılarak bataryanın performansı incelenir, batarya doluluk durumu ve batarya sağlık durumu kestirimi yapılabilir.

Batarya parametre değerleri sabit olmayıp, batarya doluluk durumuna, batarya sağlık durumuna, ortam ve batarya sıcaklığına bağlı olarak değişiklik gösterebilirler. Batarya parametre değerlerini etkileyen bu etkenlerin göz önünde bulundurulması, batarya doluluk durumunun ve batarya sağlık durumunun kestirimindeki hata oranını azaltır.

Ölçülen batarya terminal gerilimi ile batarya modelinden hesaplanan batarya gerilimi arasındaki hata oranının azlığı veya fazlalığı, oluşturulan batarya modelinin, dolayısı ile batarya doluluk durumu ve batarya sağlık durumu kestirimlerinin ne derece doğru veya yanlış olduğu hakkında fikir vermektedir.

Batarya araştırmalarında, çok farklı batarya modelleri kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları, elektriksel devre modellerinde olduğu gibi (Salameh et al., 1992; Pang et al., 2001; Barsali and Ceraolo, 2002; Schweighofer et al., 2003; Chiasson and Vairamohan, 2003; 2005; Bhangu et al., 2005; Chen and Rincon-Mora, 2006; Vasebi et al., 2007; 2008), analitik bir öngörü sağlarken, bazı batarya modelleri, kimyasal modellerde olduğu gibi (Rao et al., 2003; Santhanagopalan and White, 2006), karmaşık bir yapıya sahiptirler. Matematiksel batarya modellerinde ise batarya parametreleri, matematiksel bir eşitliğin değişkenleri olarak ifade edilmektedirler (Plett, 2004; thermoanalytics, 2009).

1.3. Batarya Doluluk Durumu

Batarya doluluk durumu (Battery State-of-Charge (SOC)), bataryada mevcut kullanılabilir elektrik enerjisi miktarını ifade eden bir kavramdır. Batarya doluluk durumunun doğru kestirimi, batarya performansını arttırmaktadır. Bu yüzden batarya doluluk durumunun belirlenmesi, batarya yönetim sistemlerinde kullanılan önemli bir özelliktir. Batarya doluluk durumunun doğru kestirimi ile, batarya ömrü uzamakta, bataryadan çekilen elektrik enerjisi miktarı optimum düzeyde

sağlanmakta, daha düşük boyutta ve ağırlıkta bataryalar kullanılabilen ve bunun sonucu olarak da maliyet azalmaktadır.

Batarya doluluk durumu kestirimi ile, bataryada kalan elektrik enerjisi miktarı hakkında kullanıcı için bir ön uyarı sağlanmakta ve gereksiz sürpriz enerji kesintileri önlenmektedir.

Bataryanın aşırı doldurulması, bataryanın aşırı ısınmasına neden olur. Bunun sonucu olarak, bataryadaki elektrolitte meydana gelen gaz oluşumu ve gaz sızıntısı, bataryanın yıpranmasına, kullanılamaz duruma gelmesine ve hatta patlamasına yol açar. Batarya doluluk durumunun kestirimi ile bataryanın aşırı doldurulması ve gereksiz yıpranması da önlenmektedir.

Batarya doluluk durumunun belirlenmesi için literatürde mevcut bir çok yöntem bulunmaktadır. Boşaltma testi (Piller et al., 2001), amper-saat sayımı (Piller et al., 2001), açık devre gerilimi yöntemi (Pang et al., 2001; Chiasson and Vairamohan, 2003), empedans ölçümü (Huet, 1998), Kalman filtre yöntemi (Pang et al., 2001; Plett, 2004; Bhangu et al., 2005; Santhanagopalan and White, 2006; Vasebi et al., 2007; 2008), üretici firma verilerine dayanarak oluşturulan analitik yöntemler (Çadircı and Özkazanç, 2004; Kutluay et al., 2005; Medora and Kusko, 2005; 2006) gibi yöntemlerden yararlanılarak batarya doluluk durumu kestirimi yapılmaktadır.

1.4. Batarya Sağlık Durumu

Batarya teknolojisinin gelişmesiyle, bataryadan en fazla performansın sağlanabilmesi amacıyla, batarya yönetim sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Batarya sağlık durumunun (Battery State-of-Health (SOH)) belirlenmesi de, batarya yönetim sistemlerinin önemli bir fonksiyonunu oluşturmaktadır.

Batarya sağlık durumu, bataryanın maksimum kullanılabilir kapasitesini ifade eden bir kavramdır. Bataryaların fabrika çıkış kapasiteleri, nominal olarak bataryanın üzerinde yazılıdır. Kullanım ve ortam koşullarına bağlı olarak, zamanla batarya kapasitesinde azalma meydana gelmektedir, diğer bir ifade ile batarya sağlık durumu kötüleşmektedir. Çok uzun süreli kullanılmama veya olumsuz çevre

koşullarında depolama gibi durumlarda batarya tamamen kullanılamaz duruma gelebilir.

Batarya sağlık durumunun kestirimi, bataryadan elde edilmesi beklenen performansın karşılanıp karşılanamayacağı konusunda bilgi vermesi nedeniyle önemlidir.

Batarya sağlık durumunun kestirimi için literatürde genellikle, empedans ölçüm ağırlıklı çalışmalar mevcuttur (Huet, 1998). Elektrikli araç teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak son zamanlarda, batarya sağlık durumunun kestirimi için, empedans ölçüm yönteminden farklı çalışmalar da yapılmaktadır (Plett, 2004; Bhangu et al., 2005).

1.5. Tezin Katkısı

Bu tez çalışmasında, bataryaların yapısı ve özellikleri, batarya modelleri, batarya doluluk durumu ve tespit yöntemleri, batarya sağlık durumu ve kestirimi incelenmiştir. İncelenen her bir başlık altında, literatürde yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, batarya doluluk durumunun ve batarya sağlık durumunun kestirimini yapılabilmesi için, generik bir batarya modeli önerilmiştir. Önerilen batarya modeli kullanılarak, Kalman filtre tabanlı bir kestirim algoritması geliştirilmiş ve model parametrelerinin ve batarya doluluk durumunun kestirimi yapılmıştır. Batarya sağlık durumunun tespiti için yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir. Batarya modellenmesi, model parametre kestirimi, doluluk durumu ve sağlık durumu tespiti için geliştirilen yaklaşım ve yöntemler, bir grup Ni-Mh batarya üzerinden deneysel olarak sınanmıştır.

Bu tez çalışmasının katkısı, genel olarak dört başlık altında açıklanabilir. Bu başlıklar, aşağıdaki alt bölümlerde özetlenmiştir.

1.5.1. Modelleme

Bu tez çalışmasında, batarya çalışmasının incelenmesi için, elektriksel bir devre modeli önerilmiştir. Önerilen model, genel bir model olup, bütün batarya çeşitleri için uygulanabilir bir özelliğe sahiptir. Önerilen devre modeli, literatürde mevcut devre

modellerinin bir hibriti olmakla birlikte, literatürde kullanılmış herhangi bir model ile tamamen aynı değildir.

Önerilen batarya modelini oluşturan parametreler direnç, kapasitör ve bağımlı akım ve gerilim kaynakları cinsinden ifade edilmiştir. Model parametrelerinin bir kısmı, bataryanın anma değerlerine dayanılarak sabit olarak seçilmekte, bir kısım parametrenin ise zaman içinde değişebilme esnekliği bulunmaktadır.

Batarya model parametrelerinin kestirimi, Kalman filtre benzeri yöntemlerle gerçek zamanlı olarak yapılabilmektedir. Bu özellikten dolayı, ortam sıcaklığının veya yük akımının parametreler üzerindeki etkisi de anlık olarak hesaba katılabilmektedir.

Batarya sağlık durumu kestirimi ile hesaplanan batarya kapasitesini belirli aralıklarla güncellemek suretiyle, batarya sağlık durumunun batarya parametreleri üzerindeki etkisi de hesaplamalara dahil edilebilmektedir.

1.5.2. Batarya doluluk durumu kestirimi

Bu tez çalışmasında, önerilen batarya modeli kullanılarak, Kalman filtre tabanlı bir batarya doluluk durumu kestirim algoritması önerilmiştir. Batarya terminal gerilimi ölçülerek, önerilen Kalman filtre yaklaşımlı bu algoritma ile gerçek zamanlı olarak batarya doluluk durum kestirimi yapılabilmektedir.

Önerilen Kalman filtre tabanlı kestirim algoritması kullanılarak batarya doluluk durumu ile birlikte aynı anda parametre kestirimi de yapılabilmekte ve bu şekilde batarya parametrelerinde meydana gelebilecek anlık değişimlerin etkisi hesaba katılabilmektedir.

Yapılan bilgisayar simülasyonları ve Ni-Mh bataryalar üzerinde yapılan deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve sonuçların tutarlı olup, önerilen kestirim algoritmasının, batarya durumu ve parametre kestiriminde uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

1.5.3. Batarya sağlık durumunun belirlenmesi

Bu tez çalışmasının, batarya çalışmalarına katkı sağladığı özgün konulardan birisi de batarya sağlık durumunun belirlenmesidir.

Literatürde yapılan çalışmalarda, batarya sağlık durumu tespitinde genellikle empedans ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Son zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda ise, batarya kapasitesi bir batarya parametresi olarak ele alınıp, batarya sağlık durumunun kestirimi yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında ise, tekli ve çoklu olmak üzere iki farklı sınıflandırma yaklaşımı ile batarya sağlık durumunun belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Bu yaklaşım, bu tez çalışmasında önerilen yeni bir yaklaşımdır.

Bu tez çalışmasında, batarya sağlık durumunun belirlenmesinde kullanılan tekli ve çoklu sınıflandırma yaklaşımları ile, verilen herhangi bir bataryanın, kullanılmamış, az kullanılmış veya çok kullanılmış olup olmadığının belirlenmesi sağlanmaktadır. Deneysel ölçüm sonuçları ile önerilen sınıflandırma yaklaşım sonuçları arasındaki kuramsal hata oranları karşılaştırılmış ve batarya sağlık durumunun, sınıflandırma yaklaşımları ile belirlenmesinin, kabul edilebilir hata sınırları içinde mümkün olduğu gösterilmiştir.

1.5.4. Batarya sağlık durumu kestirimi

Batarya sağlık durumunun, çokdeğişkenli aradeğerleme yöntemleri ile kestirimi de bu tez çalışmasında önerilen özgün yaklaşımlardan birisidir.

Batarya kapasitesinde, kullanıma ve ortam koşullarına bağlı olarak azalma meydana gelmektedir. Batarya sağlık durumunun, çokdeğişkenli aradeğerleme yöntemleri ile kestirimi ile, bataryanın ölçülen parametrelerine dayanılarak, batarya kapasitesinin kestirimi yapılmaktadır.

Batarya kapasitesinin, amper-saniye cinsinden kestiriminin yapılabilmesi için, ters uzaklık ağırlığı kullanılarak yapılan çoklu aradeğerleme yöntemi ve radyal tabanlı fonksiyonlar kullanılarak yapılan çoklu aradeğerleme yöntemi önerilmiştir.

Deneysel olarak ölçülen batarya kapasiteleri ile, önerilen yöntemlerle kestirilen kapasite değerleri arasındaki ortalama mutlak hata miktarlarının %1.5 ila %2.2 arasında, düşük değerlerde olduğu gösterilerek, çokdeğişkenli aradeğerleme yöntemleri ile batarya sağlık durumunun kestiriminin mümkün olduğu gösterilmiştir.

1.6. Tezin Yapısı

Birinci bölüm olan bu giriş bölümünde, bataryaların önemi, batarya modelleri, batarya doluluk durumu, batarya sağlık durumu kavramları özetlenmiş ve bu tez çalışmasının, batarya çalışmalarına getirdiği katkılar açıklanmıştır.

Bölüm 2'de, bataryaların yapısı ve özellikleri incelenmiştir. Bataryaların kimyasal yapısı açıklanmış, batarya çeşitleri, batarya performans karakteristikleri ve bunlara etki eden etkenler sunulmuştur.

Bölüm 3'te, literatürde mevcut batarya modelleri incelenmiş ve özetlenmiştir. Bu bölümde batarya modeli olarak, elektriksel bir devre modeli önerilerek; batarya doluluk durumunun bilindiği durumlarda, batarya devre modelinin parametrelerinin kestiriminin yapılabileceği simülasyonlarla ve deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Bölüm 4'te, batarya doluluk durumu konusu incelenmiştir. Batarya doluluk durumu tespitinde kullanılan literatürdeki yöntemler özetlenmiş ve Kalman filtre tabanlı bir kestirim algoritması önerilmiştir. Önerilen kestirim algoritması kullanılarak batarya parametrelerinin bilindiği durumlarda, batarya doluluk durumunun kestiriminin yapılabileceği simülasyon yoluyla ve deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Bölüm 5'te, önerilen batarya modeli kullanılarak, durum değişkenleri belirlenmiş olan modele, Bölüm 4'te önerilmiş olan Kalman filtre tabanlı kestirim algoritması uygulanarak, batarya doluluk durumunun ve batarya parametrelerinin birlikte kestirimi yapılmıştır. Önerilen batarya modeline, önerilen kestirim algoritmasının uygulanması ile batarya doluluk durumu ve batarya parametrelerinin birlikte kestiriminin mümkün olduğu, simülasyon yoluyla ve deneysel çalışmalarla gösterilmiştir.

Bölüm 6'da batarya sağlık durumunun, sınıflandırma yaklaşımları ile belirlenmesi incelenmiştir. Bu bölümde, batarya sağlık durumu kavramı anlatılmış ve batarya sağlık durumuna etki eden etkenler özetlenmiştir. Batarya sağlık durumunun, tekli ve çoklu sınıflandırma yaklaşımları ile belirlenmesi şeklinde iki farklı yöntem önerilmiştir. Deneysel sonuçlarla, önerilen yöntemlerin teorik performansı karşılaştırılmış ve batarya sağlık durumunun, sınıflandırma yaklaşımları ile etkin olarak belirlenebileceği gösterilmiştir.

Bölüm 7'de, batarya sağlık durumunun, çokdeğişkenli aradeğerleme yöntemleri ile kestirimi incelenmiştir. Aradeğerleme yöntemi olarak, ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ve radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme yöntemleri önerilmiştir. Ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme yönteminde, uzaklık fonksiyonu olarak, Mahalanobis uzaklığı ve karesel ayırtaç fonksiyonu kullanılmıştır. Deneysel ölçümler ve önerilen yöntemlerin sonuçları karşılaştırılarak, batarya kapasitesinin, dolayısı ile batarya sağlık durumunun çok değişkenli aradeğerleme yöntemleri ile kestiriminin yapılabileceği gösterilmiştir.

Sonuç bölümü olan Bölüm 8'de, yapılan çalışmalar özetlenmiş, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Ek bölümünde, batarya parametrelerinin ve doluluk durumunun kestiriminde kullanılan kestirim algoritması için, genişletilmiş Kalman filtre denklemleri verilmiştir. Bu bölümde ayrıca, batarya doluluk durumu ve parametrelerinin kestiriminde kullanılan deney düzenekleri anlatılmıştır.

2. BATARYALARIN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde ilk olarak, bataryaların kimyasal yapısı anlatılacaktır. Daha sonra batarya çeşitleri hakkında bilgi verilecektir. Son olarak da batarya performans karakteristikleri ve batarya performansını etkileyen etkenler açıklanacaktır.

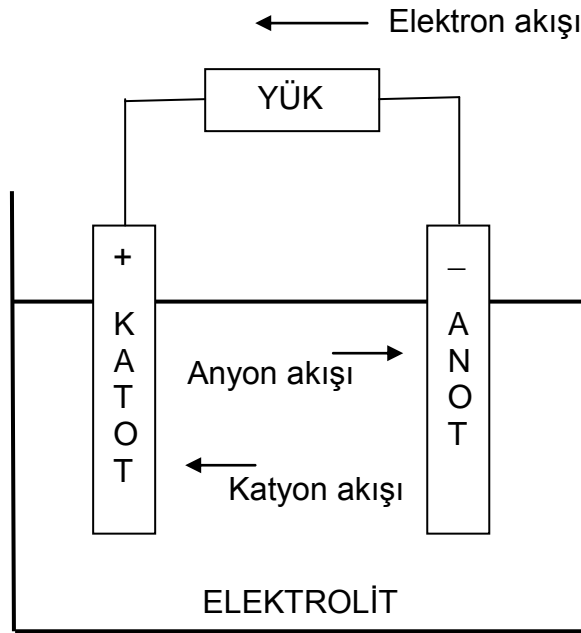
2.1. Bataryaların Kimyasal Yapısı

Bataryalar, elektriksel enerjinin kimyasal tepkimeler vasıtası ile depo edilmesi ve depo edilen enerjinin yine kimyasal tepkimeler ile elektrik enerjisine dönüşmesi için kullanılan enerji düzenekleridir.

Bir batarya hücresi temel olarak 3 bölümden oluşur (Linden, 1995):

- Anot: Negatif elektrottur. Dış devreye elektron verir. Burada oksidasyon tepkimesi oluşur.
- Katot: Pozitif elektrottur. Dış devreden elektron alır. Burada redüksiyon tepkimesi oluşur.
- Elektrolit: Batarya içinde iyon iletimini sağlayan bölümdür.

Bir batarya hücresinin, temel yapısı ve boşalma sırasındaki çalışması Şekil 2.1 'de gösterilmiştir.

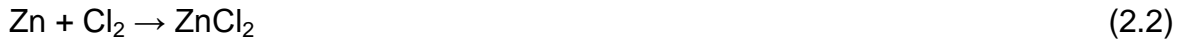


Şekil 2.1. Bir batarya hücresinin temel yapısı.

Anot ve katotta meydana gelen tepkimeler sonucunda batarya hücresinde bir potansiyel farkı oluşur. Oluşan bu potansiyel farkına “standart potansiyel” denir. Standart potansiyel, redüksiyon potansiyeli ve oksidasyon potansiyeli arasındaki farktan kaynaklanır.

$$\text{Standart potansiyel} = \text{Katot(redüksiyon) potansiyeli} - \text{Anot(oksidasyon) potansiyeli} \quad (2.1)$$

Örnek olarak Zn/Cl₂ hücresi ele alınırsa:



$$\text{Standart potansiyel} = 1.36 - (- 0.76) = 2.12\text{V} \quad (2.5)$$

2.2. Batarya Çeşitleri

Bataryalar temelde ikiye ayrılır:

- Tek kullanımlık (primer) bataryalar: Boşaldıktan sonra, tekrar doldurulamayan ve kullanım dışı kalan bataryalardır.
- Çok kullanımlık (sekonder) bataryalar: Boşaldıktan sonra, tekrar doldurulup kullanılabilen bataryalardır.

2.2.1. Tek kullanımlık bataryalar

Tek kullanımlık bataryaların tekrar doldurulma özellikleri yoktur. Bu yüzden bir defa boşaldıklarında bir daha kullanılamazlar. Ucuz ve taşınabilecek ölçüde ufak boyutlara sahip olmalarından dolayı kullanım alanları çok yaygındır. Taşınabilir elektronik cihazlar, aydınlatma cihazları, oyuncaklar, saatler, fotoğraf makinaları, kameralar vb. gibi cihazların çalıştırılmasında günlük hayatta yaygın olarak kullanılırlar. Uzun bekleme ömrü, yüksek enerji yoğunluğu ve bakım gerektirmemeleri tek kullanımlık bataryaların olumlu özelliklerindedir.

Çinko, olumlu elektrokimyasal özellikleri ve dengesi, elektrolitlere olan uyumu, uzun bekleme süresi, düşük fiyatı ve elde edilebilirliği ile tek kullanımlık batarya

çeşitlerinde, anot olarak en çok kullanılan elementtir. Alüminyum ve magnezyum da anot olarak kullanılan diğer maddelerdir.

En yaygın ve genel amaçlı olarak kullanılan tek kullanımlık batarya çeşidi, alkalın bataryadır. Çinko/karbon batarya da yaygın olarak kullanılan diğer bir tek kullanımlık batarya çeşididir. Çinko/cıva oksit, kadmium/cıva oksit, çinko/gümüş oksit, çinko/hava, magnezyum, alüminyum ve lityum bataryalar da diğer tek kullanımlık batarya çeşitleri olarak sayılabilir (Linden, 1995).

2.2.2. Tekrar doldurulabilen bataryalar

Tekrar doldurulabilen bataryalar, tek kullanımlık bataryaların aksine, boşaldıktan sonra tekrar doldurulabilen bataryalardır. Batarya teknolojisinin gelişmesiyle kullanım alanları, kapasiteleri ve özellikleri farklılık gösteren birçok tekrar doldurulabilen batarya çeşidi ortaya çıkmıştır (Linden, 1995; wikipedia, 2009). Çizelge 2.1'de yaygın olarak kullanılan tekrar doldurulabilen bataryaların gerilim değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Tekrar doldurulabilen bataryaların hücre gerilim değerleri.

Batarya çeşidi	Nominal gerilim (V)	Açık devre gerilimi (V)	Çalışma gerilimi (V)	Sonlanma gerilimi (V)
Kurşun-asit	2.00	2.10	2.00-1.80	1.75
Nikel-kadmium	1.20	1.29	1.25-1.00	1.00
Nikel-metal hidrid	1.20	1.40	1.25-1.10	1.00
Nikel-demir	1.20	1.37	1.25-1.05	1.00
Nikel-çinko	1.65	1.73	1.60-1.40	1.20
Çinko-gümüş oksit	1.50	1.85	1.70-1.30	1.00
Kadmium-gümüş oksit	1.20	1.40	1.40-1.00	0.70
Nikel-hidrojen	1.30	1.40	1.30-1.15	1.00
Lityum-iyon	4.00	4.10	4.00-3.00	3.00
Lityum-polimer	3.70	4.20	4.00-3.00	2.70

Kurşun-asit bataryalarda anot Pb, katot PbO₂, elektrolit ise H₂SO₄'den meydana gelmektedir. Kurşun-asit bataryaların kullanım alanı yaygın olup düşük fiyata sahiptirler. Yüksek akımlarda ve düşük sıcaklıklarda çalışabilirler. Kullanım alanları olarak taşıtlar, telefon santralleri, acil durum güç birimleri ve taşınabilir elektriksel cihazlar sayılabilir.

Nikel-kadmium (Ni-Cd) bataryalar, yüksek akım oranı, düşük sıcaklıklarda çalışabilme, uzun ömür gibi özelliklere sahiptir. Anot Cd, katot NiOOH, elektrolit ise KOH'tan oluşmaktadır. Uçaklar, trenler, endüstriyel ve acil-durum güç uygulamaları, taşınabilir elektronik cihazlar, iletişim cihazları Ni-Cd bataryaların kullanım alanları arasındadır.

Nikel-metal hidrid bataryalar (Ni-Mh), Ni-Cd bataryaların aksine bakım gerektirmez ve Ni-Cd bataryadan daha fazla kapasiteye sahiptirler. Ni-Mh bataryalar daha çok, taşınabilir ve elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. Metal hidrid anot elektrodunu oluştururken, katot NiOOH ve elektrolit KOH'tan meydana gelmektedir.

Nikel-demir bataryalar, en eski tekrar doldurulabilen bataryalardan biridir. Bu bataryaların anodu Fe, katodu NiOOH ve elektroliti KOH'tan oluşmaktadır. Dayanıklı yapısı ve uzun ömrü sayesinde, düşük güç ve enerji yoğunluğu dezavantajına rağmen endüstriyel ortamlarda ve demiryolu araçlarında kullanılmaya devam etmektedir.

Nikel-çinko bataryalarda anot Zn, katot NiOOH ve elektrolit KOH'tan meydana gelmektedir. Yüksek enerji yoğunluğu ve düşük sıcaklıklarda çalışabilme gibi özelliklere sahip olan nikel-çinko bataryaların kullanım alanları enerji depolama, acil-durum güç uygulamaları ve taşınabilir cihazlardır.

Çinko-gümüş oksit bataryalar, hafif ağırlıklı taşınabilir elektronik cihazlar ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Anot Zn, katot AgO ve elektrolit KOH'tan oluşmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek boşalma akımı gibi avantajlarına rağmen kısa ömür ve yüksek fiyat gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Kadmium-gümüş oksit bataryalarda çinko-gümüş oksit bataryalar gibi yüksek enerji yoğunluğu, yüksek fiyat özelliğine ve benzer kullanım alanlarına sahiptir. Bu bataryalarda, çinko-gümüş oksit bataryaların aksine kadmium anot bulunmaktadır.

Nikel-hidrojen bataryalarda anot H_2 , katot $NiOOH$ ve elektrolit KOH 'tan meydana gelmiştir. Yüksek enerji yoğunluğu, derin-boşalmada uzun ömür gibi özelliklerinden dolayı uzay uygulamalarında kullanılmaktadırlar.

Lityum-iyon bataryalar yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahiptirler. Taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikli arabalar ve enerji depolama kullanım alanlarıdır. Son yıllarda cep telefonları ve dizüstü bilgisayarlarda nikel türevi bataryalar yerlerini lityum türevi bataryalara bırakılmaktadırlar. Lityum-iyon bataryalarda anot C, katot $LiCoO_2$ ve elektrolit ise organik bir solusyondan meydana gelmektedir.

Lityum-polimer (LiP) bataryalar, lityum-iyon bataryaların geliştirilmiş bir çeşididir. LiP bataryaların enerji yoğunluğu, lityum-iyon bataryalara göre % 20 daha fazladır ve imalatı daha az masraflıdır. LiP bataryalarda, anot lityum veya karbon-lityum alaşımı, katot $LiCoO_2$ veya $LiMnO_4$, elektrolit ise polimerden oluşmaktadır. Bu batarya çeşidi, taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikle çalışan taşıtlar ve uzaktan kumandalı maket uçaklarda kullanılmaktadır.

2.3. Bataryaların Performans Karakterizasyonu

Bataryaların performansını belirleyen temel özellikler, bataryaların kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre farklılıklar gösterir. Kullanım alanına göre, bataryadan en fazla performans elde etmek için, bu özellikler göz önüne alınmalıdır ve batarya seçimi ona göre yapılmalıdır. Batarya performans karakteristikleri, batarya kapasitesi, enerji, yoğunluğu, güç yoğunluğu, verimlilik, yüksüz boşalma ve batarya dolma-boşalma sayısı başlıkları altında aşağıdaki alt bölümlerde incelenmiştir. Tekrar doldurulabilen bataryaların batarya karakteristikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir (Linden, 1995; wikipedia, 2009).

2.3.1. Batarya kapasitesi

Batarya kapasitesi, bataryadaki elektrokimyasal tepkimelerden dolayı ortaya çıkan toplam elektrik miktarı olarak tanımlanır ve amper-saat şeklinde ifade edilir. Örnek olarak 5A-saat kapasiteli bir batarya için, 1C'lik yani 5A'lık sabit bir boşaltma akımı, bataryadan 1 saat süre ile çekilebilir.

2.3.2. Enerji yoğunluğu

Enerji yoğunluğu, bataryanın birim ağırlığı veya birim hacmi başına düşen enerji miktarı olarak belirlenmektedir. Birimi Wh/kg veya Wh/l olarak gösterilir. Bir bataryanın enerji yoğunluğu, teorik ve pratik enerji yoğunluğu olarak iki farklı şekilde hesaplanabilir. Teorik enerji yoğunluğunda, bataryanın sadece elektrokimyasal tepkimesine dahil olan anot, katot ve elektrolitin ağırlığı veya hacmi dikkate alınarak hesaplama yapılır. Pratik enerji yoğunluğunun hesaplanmasında ise bataryanın toplam ağırlığı veya hacmi dikkate alınır. Bu durumda, batarya tipi ve imalat işlemine göre, teorik ve pratik enerji yoğunluğu arasında beş kata kadar fark oluşabilmektedir.

2.3.3. Güç yoğunluğu

Batarya performansını karakterize eden diğer bir özellik ise batarya güç yoğunluğudur. Güç yoğunluğu, bataryanın birim ağırlığı veya birim hacmi başına düşen güç miktarı olarak belirlenmektedir. Birimi W/kg veya W/l'dir. Bir bataryanın güç çıkışı, o bataryanın kimyasal özelliklerinin yanısıra, tasarımı ve fiziksel yapısına da bağlıdır. Bundan dolayı batarya imalat aşamasında, güç yoğunluğu ile enerji yoğunluğu arasında genellikle bir ödünleşme sözkonusudur. Yüksek güç yoğunluğunda bir batarya için, düşük iç direnci ve düşük elektrot polarizasyonu gerekmektedir. Bu durumun sağlanması için, ayraçlar (separatörler) gibi elektrokimyasal tepkimeye girmeyen malzemelerin miktarının artması gerekmektedir. Bu da, bataryanın hacmini ve ağırlığını arttırarak, enerji yoğunluğunda bir azalma meydana getirir.

2.3.4. Verimlilik

Tekrar doldurulabilen bir bataryanın verimliliği, bataryanın boşalması sırasında verdiği toplam enerjinin, bataryanın dolması sırasında aldığı toplam enerjiye oranı şeklinde hesaplanır ve bu oran bataryadaki enerji kayıplarından dolayı 0.6'ya kadar düşebilir. Bataryadaki enerji kayıpları, batarya malzemesinde meydana gelen korozyonlar, elektrolitteki gaz sızıntısı, batarya iç direnci, elektrotlardaki polarizasyon kayıpları gibi nedenlerden meydana gelmektedir. Batarya dolum sayısı ve batarya ömrü de, batarya verimliliğini etkilemektedir.

2.3.5. Yüksüz boşalma

Batarya performansını karakterize eden diğer bir özellik ise bataryanın kullanılmadığı durumlardaki batarya boşalma miktarıdır. Batarya çeşidine ve ortam sıcaklığına göre, bataryaların yüksüz boşalma oranında farklılıklar meydana gelir. Uzun süreli kullanılmama nedeni ile, batarya tamamen boşalabilir ve tekrar doldurulabilen bataryalar tamamen kullanım dışı kalabilir. Bu yüzden tekrar doldurulabilen bataryalar, belli zaman aralıklarında yeniden doldurulmalıdır.

2.3.6. Batarya dolma-boşalma sayısı

Tekrar doldurulabilen bataryalarda, her bir dolma-boşalma işleminde, batarya elektrotlarında aşınmalar ve korozyonlar, elektrolitte ise kimyasal tepkimelerden dolayı gaz birikimleri ve sızıntıları meydana gelmektedir. Batarya dolma-boşalma sayısı arttıkça bu tür yapısal bozukluk ve kayıplardan dolayı batarya iç direncinde artış ve polarizasyon kayıplarından dolayı, batarya yüklü durumda iken çıkış geriliminde büyük düşüşler meydana gelir. Bunun sonucu olarak bataryanın verimi azalır. Belirli bir dolma-boşalma sayısının ardından batarya kullanılmaz duruma gelir. Batarya çeşitlerine göre batarya dolma-boşalma sayısında farklılıklar gözlenir.

Çizelge 2.2. Tekrar doldurulabilen bataryaların performans karakteristikleri.

Batarya çeşidi	Enerji yoğunluğu (Wh/kg)	Güç yoğunluğu (W/kg)	Verimlilik (%)	Yüksüz boşalma (% / ay)	Dolma boşalma sayısı
Kurşun-asit	30-40	180	70-92	3-4	500-800
Nikel-kadmium	40-60	150	70-90	20	1500
Nikel-metal hidrid	30-80	250-1000	66	20	1000
Nikel-demir	50	100	65	20-40	2000-4000
Nikel-çinko	60	900	70	<20	100-500
Çinko-gümüş oksit	130	>1000	70-90	5	50-100
Kadmium-gümüş oksit	70	<1000	90	5	300-800
Nikel-hidrojen	75	<1000	60	Çok fazla	20000
Lityum-iyon	160	1800	99	5-10	1200
Lityum-polimer	130-200	>3000	99	5-10	500-1000

2.4. Bataryaların Performansını Etkileyen Etkenler

Bataryadan beklenen performansın elde edilebilmesi için dikkate alınması gereken bazı hususlar bulunmaktadır. Bunlar polarizasyon kayıpları, boşaltma akımı, ortam sıcaklığı, boşaltma modu gibi etkenlerdir. Bu etkenler dikkate alınarak, bataryadan elde edilen verim yüksek tutulabilir, batarya ömrünün azalması önlenir. Bataryaların performansını etkileyen temel etkenler aşağıdaki alt bölümlerde tartışılmıştır.

2.4.1. Polarizasyon kayıpları

Polarizasyon kayıpları, çıkış gerilimini azaltan önemli bir etkidir. Polarizasyon kayıpları ikiye ayrılır:

- Aktivasyon polarizasyonu: Elektrot yüzeyindeki tepkimelerden dolayı oluşur.
- Konsantrasyon polarizasyonu: Elektrot yüzeylerindeki ve elektrolitteki yoğunluk farkından dolayı oluşur.

Batarya terminal gerilimi şu şekilde hesaplanır:

$$E = E_0 - (\text{Aktivasyon polarizasyonu}) - (\text{Konsantrasyon polarizasyonu}) - i \cdot R \quad (2.6)$$

burada:

E : batarya terminal gerilimini,

E_0 : açık-devre gerilimini,

i : batarya akımını,

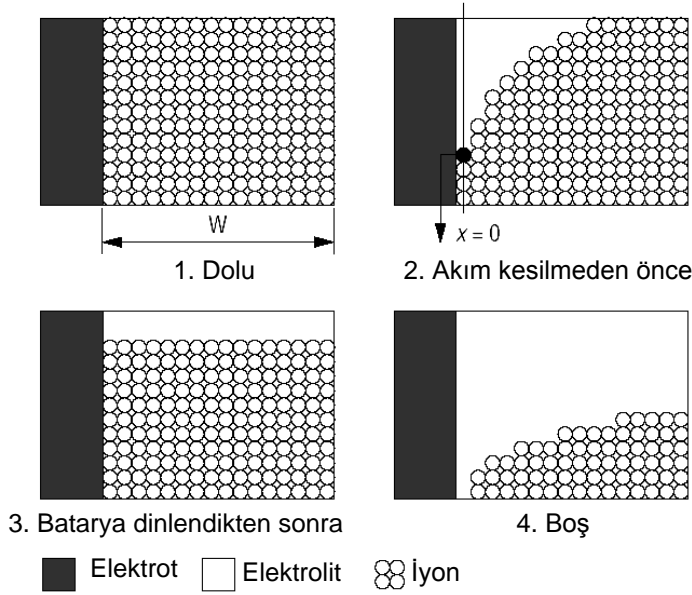
R: batarya iç direncini ifade etmektedir.

Bataryaların kullanım sürecinde elektrot yüzeylerinde ve elektrolitte meydana gelen kimyasal değişimler sonucu bataryalarda polarizasyon kayıpları oluşur.

2.4.2. Boşaltma akımı

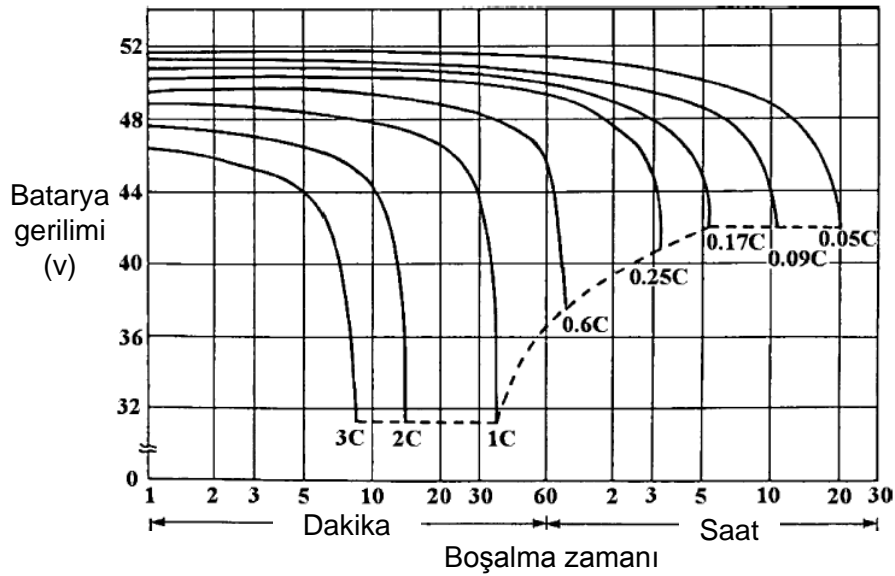
Bataryadan çekilen akım arttıkça batarya kapasitesinde azalma meydana gelir. Akım kesilirse, belli bir dinlenme süresi sonunda batarya kapasitesinde artış

olduğu görülür. Bu durum Şekil 2.2'de temsili olarak gösterilmiştir (Rao et al., 2003).



Şekil 2.2. Bataryadaki kapasite değişimi.

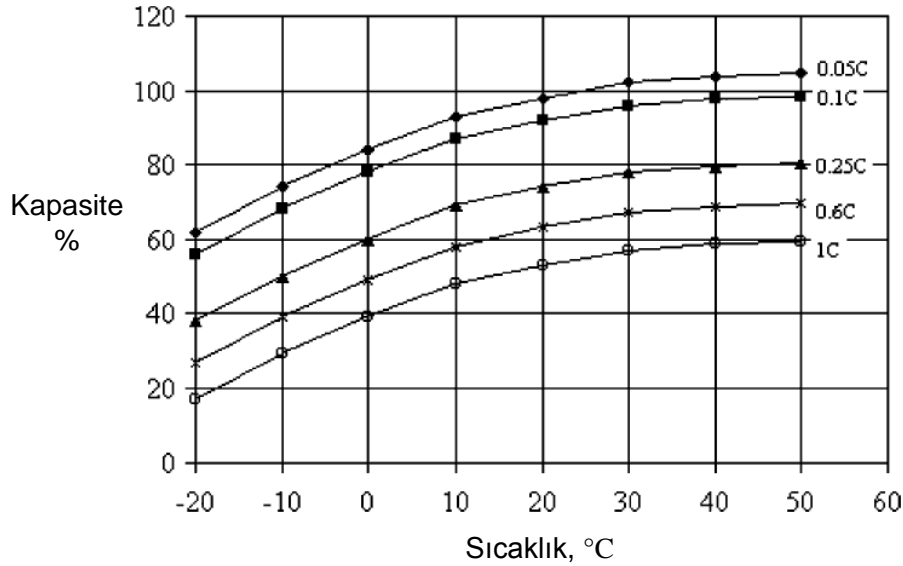
Uzun süreli aşırı boşalma akımları, derin boşalma durumları bataryada kalıcı hasarlar meydana getirir. Farklı boşalma akım değerlerinde, batarya geriliminin zamanla değişimini gösteren bir örnek Şekil 2.3'de verilmiştir (Çadircı and Özkazanç, 2004).



Şekil 2.3. Farklı akım değerleri için bataryadaki boşalma eğrileri.

2.4.3. Sıcaklık

Boşalma sırasında ortam sıcaklığının değeri batarya performansını etkileyen bir etkidir. Ortam sıcaklığının azalmasıyla, çıkış geriliminde kayıplar artmakta ve kapasitede azalma meydana gelmektedir. Bu durum Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Çadırcı and Özkazanç, 2004).



Şekil 2.4. Batarya kapasitesinin sıcaklığa göre değişimi.

2.4.4. Boşaltma modu

Kullanılan boşaltma moduna göre boşalma süresinde farklılıklar oluşur. Aşağıda maddeler halinde, batarya boşaltma modları özetlenmiştir.

- Sabit yük modu: Batarya gerilimi azaldıkça akım da azalır; kullanım süresi artar.
- Sabit akım modu: Ortalama akım büyüklüğü yüksek olduğu için boşalma süresi azalır.
- Sabit güç modu: Batarya gerilimi azaldıkça akım artar, boşalma süresi azalır.

3. BATARYA MODELLERİ VE MODEL PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ

Batarya parametrelerinin tespiti için öncelikle bir batarya modeli oluşturulmalıdır. Literatürde mevcut modellerin bazılarında parametre belirlenmesi çevrimdışı (offline), bazılarında ise çevrimiçi (online) olarak gerçekleştirilmektedir. Modellerin çoğunluğunda batarya parametreleri deneysel sonuçlardan elde edilir ve belirli zaman aralıklarında parametre değerlerinde düzeltmeler yapılması gerekir.

Bu bölümde, literatürde geçen çeşitli batarya modelleri sunulmuş ve ardından yeniden doldurulabilir bataryalar için generik olarak kullanılacak bir devre modeli önerilmiştir. Önerilen devre modelinin durum uzayı denklemleri çıkarılmış ve Kalman filtre yöntemi ile model parametrelerinin kestirimine yönelik bir yaklaşım sunulmuştur.

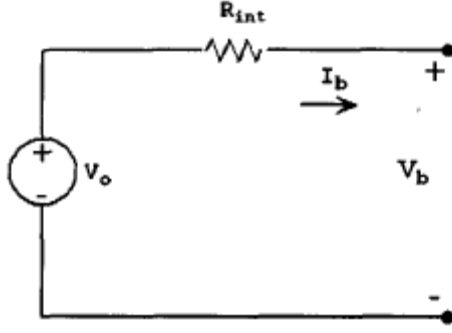
3.1. Elektriksel Devre Modelleri

Bu modellerde, batarya parametreleri, elektriksel devre elemanlarının parametrik değerleri şeklinde modellenir ve bu parametreler batarya testlerinden elde edilir.

Bazı devre modellerinde, devre parametrelerinin sabit olduğu kabul edilmiştir. Gerçekte bu değerler sabit olmayıp batarya doluluk durumu, sıcaklık, batarya akımı, kapasite ve batarya ömrü gibi bataryanın iç dinamiklerine bağlıdır. Bazı devre modellerinde ise, devre parametreleri bu dinamiklerden bir ya da birkaçı göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Aşağıdaki bölümlerde literatürdeki mevcut devre modelleri kısaca sunulmuştur.

3.1.1. Basit batarya modeli

Bu batarya modeli en basit devre modelidir (Chiasson and Vairamohan, 2003). Şekil 3.1'de gösterilen bu devre modeli, V_o gerilim kaynağı ve R_{int} direncinden meydana gelmiştir. Burada batarya direnci olan R_{int} 'in değerinin, dolma ve boşalma durumunda değişmediği kabul edilir. Gerçekte R_{int} , dolma ve boşalma durumunda farklı değerler alır. Ayrıca burada, elektrolit yoğunluğu, batarya plakaları arasındaki maddelerin yayılımı gibi bataryanın iç dinamikleri dikkate alınmamıştır. Batarya terminal gerilimi V_b , R_{int} iç direnci ve batarya akımı I_b arasında doğrusal bir bağıntı vardır.

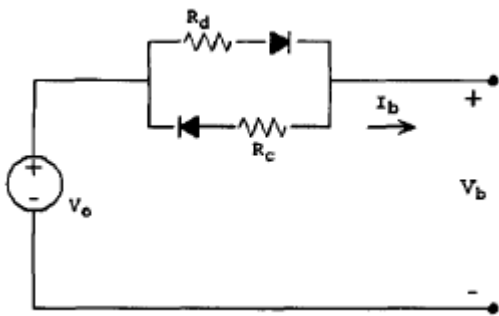


Şekil 3.1. Basit batarya modeli.

3.1.2. Dirençsel Thevenin eşdeğer modeli

Dirençsel Thevenin eşdeğer elektriksel devre modeli Şekil 3.2'de görülmektedir (Pang et al., 2001; Chiasson and Vairamohan, 2003). Bu devre modelinde, Şekil 3.1'de gösterilen basit batarya modelinden farklı olarak batarya direnci, dolum sırasında R_c ve boşalma sırasında R_d gibi farklı iki değer almaktadır. R_c ve R_d değerleri batarya testlerinden bulunur ve bunlar batarya doluluk durumuna (SOC) bağlıdır.

Bu devre modelinde, V_o gerilim kaynağı sabittir. Batarya doluluk durumuna göre batarya direnci değişir. Batarya terminal gerilimi V_b , batarya akımı I_b 'ye, batarya dolma veya boşalma direncine ve batarya doluluk durumu bağlı olarak değişmektedir.

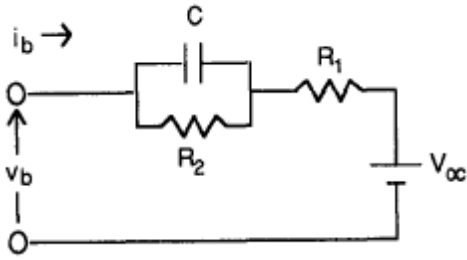


Şekil 3.2. Dirençsel Thevenin eşdeğer modeli.

3.1.3. Thevenin devre modeli

Diğer bir elektriksel devre modeli de Şekil 3.3'te gösterilen Thevenin devre modelidir. Bu model, basit batarya modeline (Şekil 3.1.) ve dirençsel Thevenin eşdeğer modeline (Şekil 3.2.) göre daha doğru sonuçlar vermektedir (Salameh et

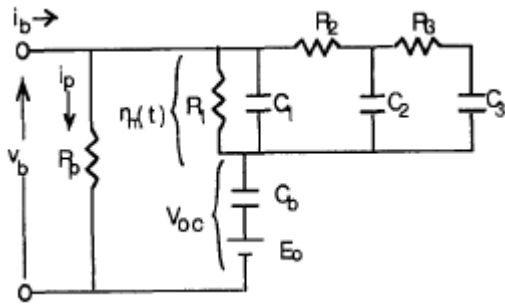
al., 1992). Burada devre elemanları sabit kabul edilmektedir. Bu bir dezavantajdır çünkü gerçekte bunlar, batarya doluluk durumu, batarya sıcaklığı gibi batarya dinamiklerinin fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu devre modelinde R_1 , batarya direncini, R_2 , geçici durum direncini, C ise geçici durum kapasitörünü ifade etmektedir. R_2 geçici durum direncine ve C geçici durum kapasitörüne bağlı olarak V_b batarya terminal geriliminin geçici durum (transient) özelliği modellenebilmektedir.



Şekil 3.3. Thevenin devre modeli.

3.1.4. Doğrusal elektriksel model

Doğrusal elektriksel devre modelinin devre şeması Şekil 3.4'de görülmektedir (Salameh et al., 1992). Bu devre modeli, Thevenin devre modelinin (Şekil 3.3.) bir benzeri olup, direnç ve kapasitör gibi doğrusal devre elemanlarından oluşmaktadır.



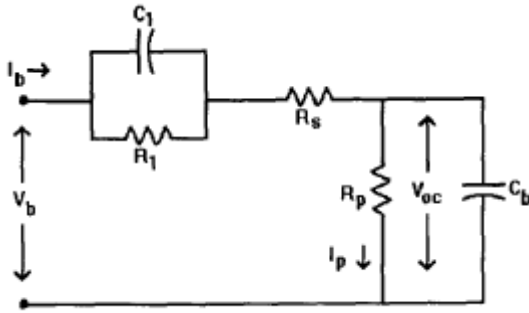
Şekil 3.4. Doğrusal elektriksel model.

R_p , bataryanın iç boşalma direncidir. R_1 , R_2 , R_3 dirençleri ve C_1 , C_2 , C_3 kapasitörleri, V_b batarya terminal geriliminin geçici durum (transient) özelliğini belirleyen devre elemanlarıdır. Batarya açık devre konumundayken, V_{oc} batarya açık devre terminal gerilimi, E_0 gerilim kaynağı ve C_b kapasitörü üzerindeki gerilim düşümünün toplamıyla hesaplanır. Bu devre modelinde, devre elemanları sabit kabul edilmektedir. Bu bir dezavantajdır, çünkü gerçekte bunlar, batarya doluluk

durumuna bağılı olarak değişebilmektedir. Hata oranının azaltılması için, bataryanın doluluk durumu değiştikçe devre elamanlarının değerlerinin de değiştirilmesi gerekmektedir.

3.1.5. Geliştirilmiş elektriksel devre modeli

şekil 3.5'te geliştirilmiş elektriksel devre modeli gürmektedir (Casacca and Salameh, 1992). Bataryanın modellenmesinde, devre sadece direnç ve kapasitörlerden oluşturulmuş, herhangi bir gerilim kaynağı kullanılmamıştır. Batarya parametreleri yapılan testler sonucunda, doğrusal olmayan fonksiyonlar şeklinde modellenmişlerdir. R_p , bataryanın iç boşalma direncidir. V_{oc} batarya ağık devre gerilimi, C_b batarya kapasitörü üzerindeki gerilim dūřümü olarak verilmiştir. R_1 direnci ve C_1 kapasitörü, V_b batarya terminal geriliminin geğici durum özelliğini belirlemede kullanılmaktadır. R_s ise batarya iç direncidir.

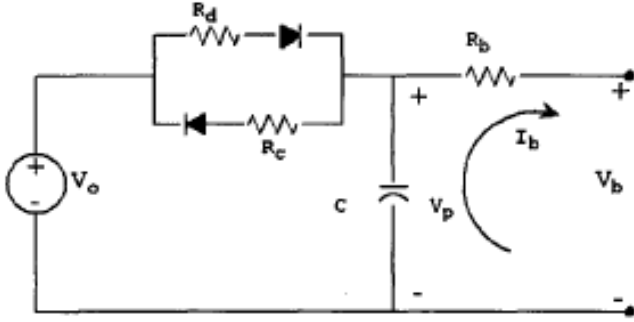


şekil 3.5. Geliştirilmiş elektriksel devre modeli.

3.1.6. Reaktif batarya modeli

şekil 3.6'da gürülen reaktif batarya modeli, dirençsel Thevenin eşdeğer modelinin (şekil 3.2.) geliştirilmiş bir biçimidir. Bataryadaki elektrolit içinde oluşan kimyasal yayılımın ve bunun sonucu olarak ortaya çıkan batarya geğici durum özelliğinin modellenebilmesi için; dirençsel Thevenin eşdeğer modeline, C polarizasyon kapasitörü eklenmiştir (Pang et al., 2001; Chiasson and Vairamohan, 2003; 2005). R_d ve R_c dirençleri de, boşalma ve dolun sırasında meydana gelen geğici durum özelliğinin belirlenmesinde ve yayılım sırasında oluşan enerji kayıplarının modellenmesinde kullanılmaktadır. V_b batarya terminal gerilimi, C yayılım kapasitörü ve R_b batarya iç direnci üzerindeki gerilim dūřümüne bağlı olarak

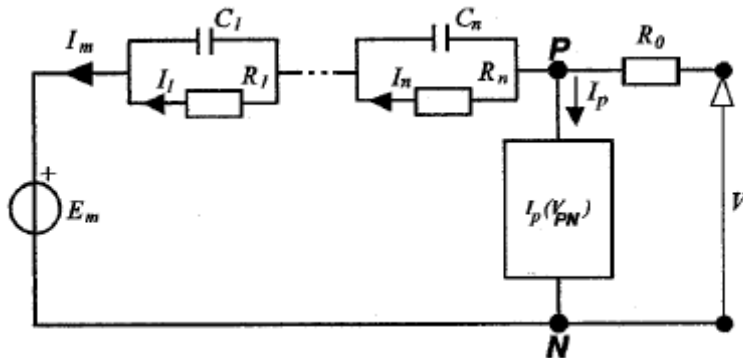
değişmektedir. V_o ise batarya açık devre gerilimidir. Doluluk durumuna bağlı olarak devre parametrelerinin aldıkları değerler değişmektedir.



Şekil 3.6. Reaktif batarya modeli.

3.1.7. Parazitik etki elemanlı dinamik model

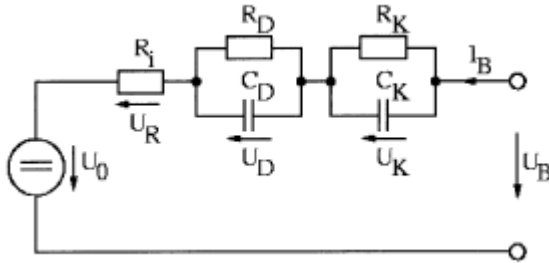
Devre şeması Şekil 3.7’de verilmiş olan parazitik etki elemanlı dinamik modelin P ve N noktaları arasındaki bölüm, parazitik devre elemanıdır ve sadece dolum sırasında aktiftir. Boşalma durumunda, I_p akımı sıfır kabul edilir ve P ve N noktaları arasındaki bölüm açık devre durumuna geldiği için hesaplamalara dahil edilmez. Dolum sırasındaki I_p parazitik etki akımı, P ve N noktaları arasındaki gerilim farkı olan V_{PN} ’nin ve batarya elektrolit sıcaklığının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır (Barsali and Ceraolo, 2002). C_n ve R_n paralel blokları, bataryanın geçici durum özelliğini modelleyen kapasitörler ve dirençlerdir. E_m , batarya açık devre gerilimi ve R_0 batarya iç direncidir. Model parametreleri batarya testlerinden hesaplanır ve bu değerler batarya doluluk durumuna bağlı olarak değişim gösterir.



Şekil 3.7. Parazitik etki elemanlı dinamik model.

3.1.8. Dinamik seri devre modeli

Şekil 3.8'de verilen dinamik seri devre modeli, parazitik etki elemanlı dinamik modelin (Şekil 3.7.) basitleştirilmiş bir biçimidir ve burada parazitik etki elemanı ihmal edilmiştir (Schweighofer et al., 2003). R_D direnci ve C_D kapasitörü, elektrot yüzeyindeki etkileri göstermek için kullanılmaktadır ve bunlar bataryanın kısa süreli geçici durum özelliğini modellemektedir. R_K direnci ve C_K kapasitörü ise, elektrolitteki yayılımı modellemekte kullanılmaktadır. R_K ve C_K 'nin çarpımından, bataryanın uzun süreli geçici durum zaman sabiti hesaplanır. U_0 gerilim kaynağı, bataryanın açık devre gerilimini ifade eder. R_i direnci batarya iç direncidir. Dinamik seri devre modelinin parametre değerleri deneysel testlerden elde edilir.

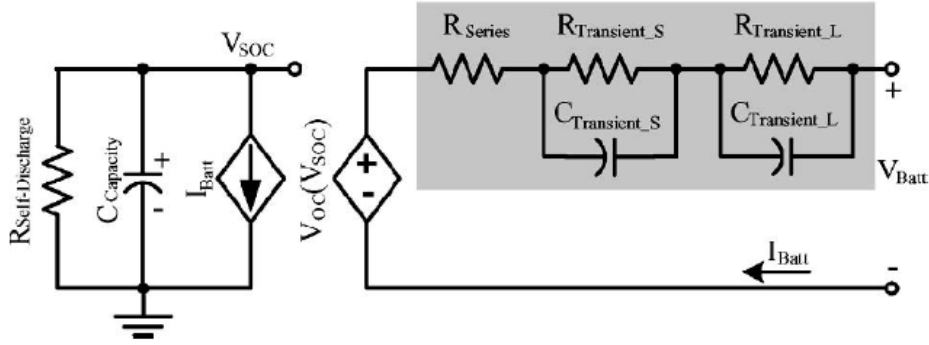


Şekil 3.8. Dinamik seri devre modeli.

3.1.9. Kapasite kullanımlı devre modeli

Şekil 3.9'da kapasite kullanımlı devre modeli görülmektedir. Bu batarya modeli, birbirine bağımlı iki devreden oluşmaktadır. İlk devrede, I_{Bat} batarya akımına bağlı olarak değişen bağımlı bir akım kaynağı bulunmaktadır. $C_{Capacity}$ kapasitörünün değeri, batarya kapasitesinin amper-saniye cinsinden değerine eşittir. V_{soc} gerilimi, bataryanın doluluk durumunu ifade eder ve 0 ile 1V arasında değer alır. $R_{Self-Discharge}$ direnci batarya iç boşalma direncidir. Batarya modelinin ikinci bölümünde, V_{soc} gerilimine bağlı olarak değişen V_{oc} bağımlı gerilim kaynağı bulunmaktadır. Bu bağımlı gerilim kaynağı, bataryanın açık devre gerilimini ifade etmektedir. R_{Series} direnci, batarya iç direncidir. $R_{Transient_S}$ direnci ve $C_{Transient_S}$ kapasitörü, kısa süreli geçici durum etkisini göstermek için kullanılır. $R_{Transient_L}$ direnci ve $C_{Transient_L}$ kapasitörü ile de, uzun süreli geçici durum etkisi zaman sabiti hesaplanmaktadır. Devre parametrelerinin değerleri, batarya testlerinden elde

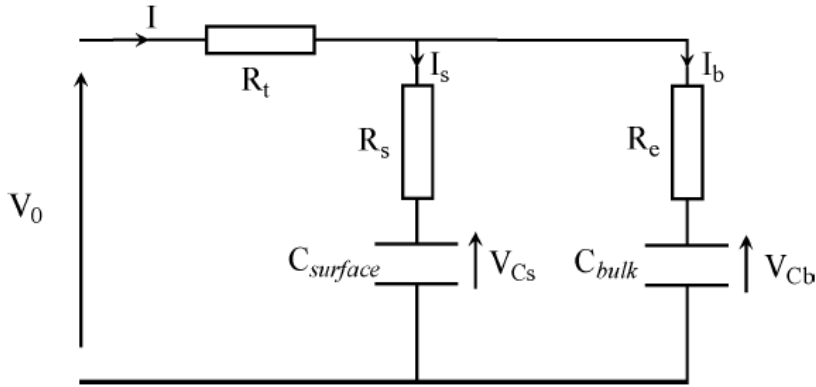
edilmiş ve SOC değerine bağlı fonksiyonlar şeklinde modellenmiştir (Chen and Rincon-Mora, 2006).



Şekil 3.9. Kapasite kullanımlı devre modeli.

3.1.10. RC batarya modeli

RC batarya modeli Şekil 3.10'da verilmiştir. C_{bulk} bataryanın dolma kapasitesini göstermektedir. $C_{surface}$ kapasitörü, yayılım etkisini modellemektedir. R_e ve R_s dirençleri batarya geçici durum özelliğinin modellenmesinde kullanılmaktadır ve yapılan çalışmalarda (Bhangu et al., 2005; Vasebi et al., 2007; 2008) bu direnç değerleri birbirlerine eşit olarak alınmıştır. Batarya parametre değerleri, yapılan testlerin sonucunda hesaplanmaktadır.



Şekil 3.10. RC batarya modeli.

3.2. Matematiksel Modeller

Matematiksel batarya modellerinde, ortada bir devre modeli olmamakla birlikte, batarya gerilimi matematiksel bir eşitlik şeklinde modellenmektedir. Aslında matematiksel modeller, bir çeşit devre modeli olmakla birlikte, devre modellerinin aksine matematiksel modellerde bataryanın görsel bir devre gösterimi

bulunmamaktadır. Model parametreleri batarya testlerinden elde edilir. Hibrit elektrikli taşıt (HEV) alanında yapılan çalışmalarda genellikle matematiksel modeller kullanılmaktadır.

3.2.1. Shepherd modeli

Shepherd modeli, HEV analizlerinde yaygın olarak kullanılan bir modeldir (Thermoanalytics, 2009). Bu batarya modelinde, bataryanın elektrokimyasal davranışı doğrudan gerilim ve akım cinsinden ifade edilmektedir. Modelin gösterimi Eş. 3.1'de verilmektedir.

$$E_t = E_o - R_i \cdot I_b - K_i \cdot \left(\frac{1}{1 - f} \right) \quad (3.1)$$

Batarya terminal gerilimi E_t ve batarya terminal akımı I_b olarak gösterilmiştir. E_o , batarya tam dolu iken bataryanın açık devre gerilimidir. R_i batarya iç direncini, K_i ise polarizasyon direncini ifade etmektedir. f , batarya kapasite düşümünün nominal batarya kapasitesine oranı olarak hesaplanmaktadır. E_o , R_i ve K_i parametrelerinin değerleri, yapılan batarya testlerinin sonucunda belirlenmektedir.

3.2.2. Unnewehr modeli

Shepherd modelinde (Eş. 3.1.), batarya kapasitesi sifıra yaklaştıkça, E_t batarya terminal gerilimindeki düşüşün arttığı görülmektedir. Bu yöntemle bataryanın derin boşalma değeri hesaplanabilir. HEV uygulamalarında, genellikle batarya derin boşalma durumunda çalıştırılmadığı için, Unnewehr ve Nasar, Shepherd denkleminin basitleştirilmiş bir şeklini önermişlerdir (Thermoanalytics, 2009). Unnewehr modelinde, E_t batarya terminal gerilimi, Eş. 3.2'de verilen denklemle hesaplanır.

$$E_t = E_o - R_i \cdot I_b - K \cdot (1 - f) \quad (3.2)$$

E_o , batarya tam dolu iken bataryanın açık devre gerilimidir. Batarya terminal akımı I_b , batarya iç direnci R_i ile gösterilmiştir. f , batarya doluluk durumudur (SOC), 0 ve 1 arasında değerler almakta ve K sabiti ile çarpılarak batarya açık devre gerilimindeki azalma miktarı hesaplanmaktadır. E_o , R_i ve K parametrelerinin değerleri, yapılan batarya testlerinin sonucunda belirlenmektedir.

3.2.3. Nernst modeli

Nernst modeli (Plett, 2004), Unnewehr batarya modelinin (Eş. 3.2.) bir benzeri olmakla birlikte, bu modelde, batarya açık devre geriliminin değişiminin modellenmesinde farklılık görülmektedir (Eş. 3.3.). Bu modelde batarya terminal gerilimi E_t , şu şekilde tanımlanır:

$$E_t = E_o - R_i \cdot I_b + K_1 \cdot \ln(f) + K_2 \cdot \ln(1-f) \quad (3.3)$$

E_o , batarya tam dolu iken bataryanın açık devre gerilimidir. Batarya terminal akımı I_b , batarya iç direnci ise R_i ile gösterilmiştir. f , batarya doluluk durumudur (SOC) ve 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. Batarya açık devre gerilimindeki azalma miktarı, K_1 ve K_2 sabitlerinin sırasıyla “ $\ln(f)$ ” ve “ $\ln(1-f)$ ” terimlerinin çarpımlarının toplamıyla bulunmaktadır. E_o , R_i , K_1 ve K_2 parametrelerinin değerleri, yapılan batarya testlerinin sonucunda belirlenmektedir.

3.2.4. Birleştirilmiş model

Birleştirilmiş matematiksel batarya modeli, Shepherd modelinin, Unnewehr modelinin ve Nernst modelinin birleştirilmiş bir şeklidir (Plett, 2004). Batarya modeli Eş. 3.4'te verilmiştir.

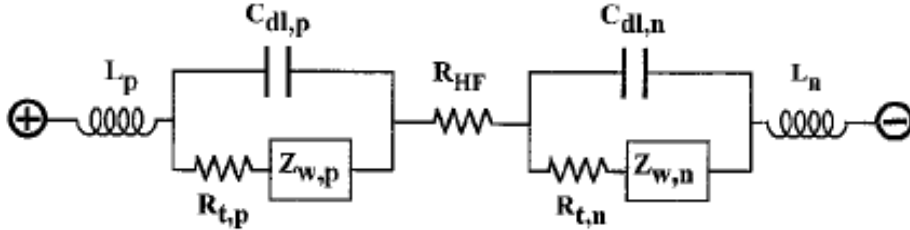
$$E_t = E_o - R_i \cdot I_b - K_1 / f - K_2 \cdot f + K_3 \cdot \ln(f) + K_4 \cdot \ln(1-f) \quad (3.4)$$

Birleştirilmiş matematiksel batarya modelinde, E_t batarya terminal gerilimini, E_o batarya açık devre gerilimini, R_i batarya iç direncini, I_b ise batarya akımını ifade etmektedir. K_1 , K_2 , K_3 ve K_4 değerleri sabit olarak seçilmektedir. f , batarya doluluk durumudur ve 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. E_o , R_i parametreleri ve K_1 , K_2 , K_3 , K_4 sabitleri deneysel testlerle hesaplanır.

3.3. Empedans Tabanlı Modeller

Empedans tabanlı modeller, bataryanın bir empedans olarak modellenmesine dayanmaktadır. Batarya gibi aktif bir düzeneği pasif devre elemanları ile modellemek esas itibarı ile yanlış bir yaklaşım olsa da, bu tür modellere literatürde rastlanmaktadır.

Şekil 3.11’de, L_p ve L_n endüktansları; $R_{t,p}$ ve $R_{t,n}$ elektrot dirençlerini; $C_{dl,p}$ ve $C_{dl,n}$ yük dağılımından kaynaklanan kapasitörleri; R_{HF} omik direnci; $Z_{w,p}$ ve $Z_{w,n}$ warburg empedanslarını ifade etmektedir. Bunlar, elektrolitteki ve elektrot gözeneklerindeki iyon yayılımını modellemek için kullanılmaktadır (Huet, 1998).



Şekil 3.11. Batarya hücresi için empedans ölçüm modeli.

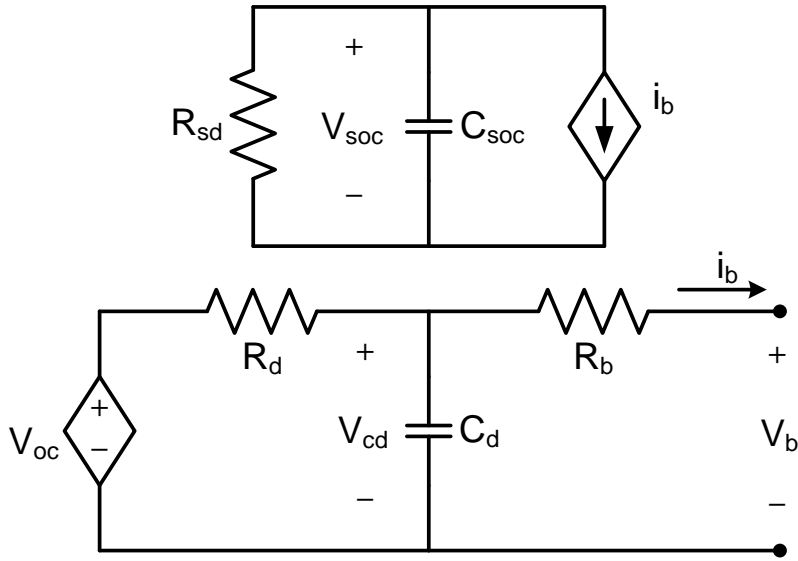
Yapılan çalışmalarda batarya empedansı ile batarya doluluk durumu arasında bağlantı bulunmuştur (Huet, F., 1998; Piller et al., 2001). Empedans ölçümü, sıcaklık değişiminden çok fazla etkilenmektedir ve pratikte batarya doluluk durumu tespitinde tercih edilmemektedir. Bu modelin en büyük dezavantajı, batarya parametrelerinin çevrimdışı olarak ölçülebilmesidir.

3.4. Elektrokimyasal Modeller

Literatürde kimyasal nitelikli birçok elektrokimyasal model de mevcuttur. Bu modellerde çok fazla sayıda kimyasal parametre kullanılmaktadır. Bu yüzden hesaplama yönünden karmaşıktırlar ve batarya tasarımcılarına analitik bir öngörü sağlamazlar. Termal modellerin yanısıra (Rao et al., 2003), elektrolit yoğunluk yöntemleri, tek parçacık yaklaşımı (Santhanagopalan and White, 2006) ve diğer elektrokimyasal modeller (Rao et al., 2003) literatürde mevcuttur.

3.5. Önerilen Batarya Modeli

Batarya parametrelerinin, batarya doluluk durumunun ve batarya sağlık durumunun belirlenebilmesi ve kestirimlerinin yapılabilmesi için bu tez çalışmasında, Şekil 3.12’de görülen batarya elektriksel devre modeli önerilmiştir. Önerilen batarya modeli, Bölüm 3.1.6’de ve Bölüm 3.1.9’da anlatılan reaktif batarya modeli ve kapasite kullanımlı devre modelinin bir melezidir. Önerilen bu hibrit model tüm yeniden doldurulabilir bataryalar için geçerli ve uygulanabilir bir modeldir.



Şekil 3.12. Önerilen batarya modeli.

Önerilen batarya elektriksel devre modeli (Şekil 3.12), birbirine bağımlı iki devreden oluşmaktadır. İlk devre, bağımlı bir akım kaynağı, bir kapasitör ve bir dirençten meydana gelmiştir. Akım kaynağı, batarya terminal akımı i_b 'ye bağımlı olarak çalışmakta ve bataryanın dolma veya boşalma durumuna göre C_{soc} kapasitörünün dolumunu veya boşalmasını sağlamaktadır. C_{soc} kapasitörünün büyüklüğü, amper-saniye cinsinden batarya kapasitesinin değeri olarak seçilmektedir. V_{soc} gerilimi, C_{soc} kapasitörü üzerindeki gerilim düşümüdür ve 0V ile 1V arasında değerler almaktadır. V_{soc} aynı zamanda batarya doluluk durumunu da ifade etmektedir. Buna göre V_{soc} 'un değeri 0V iken batarya tamamen boş, 1V iken batarya %100 dolu konumdadır. R_{sd} direnci, batarya iç boşalma direncini göstermektedir. Yeniden doldurulabilen bataryaların yüksüz durumda iç boşalma süreleri günler, haftalar, hatta aylar mertebesinde olabilmektedir. Bu nedenle, batarya yükte iken, iç boşalma akımı ihmal edilebilir niteliktedir. Bataryanın kullanımda olmadığı zamanlarda, diğer bir ifade ile batarya açık devre konumundayken, C_{soc} kapasitörü R_{sd} iç boşalma direnci üzerinden boşalmaya devam etmekte ve V_{soc} geriliminde azalma meydana gelmektedir. Bataryanın uzun süreli kullanılmaması durumunda (bu süre genellikle haftalar mertebesindedir), V_{soc} gerilimindeki azalma belirgin şekilde artmakta, dolayısıyla batarya doluluk durumunda bir azalma olmaktadır.

Önerilen batarya modelini meydana getiren ve birinci devre ile etkileşimli ikinci devre, bir bağımlı gerilim kaynağı, iki direnç ve bir kapasitörden oluşmaktadır. V_{oc} bağımlı gerilim kaynağı, batarya açık devre gerilimini göstermektedir. V_{oc} batarya açık devre gerilimi, batarya açık devre konumundayken, diğer bir ifade ile i_b batarya terminal akımının 0A olduğu durumda ve batarya geçici durumunun sona ermesinden sonra, batarya terminallerinden okunan gerilim değeridir. V_{oc} bağımlı gerilim kaynağı, V_{soc} batarya doluluk durumu gerilimine bağlı olarak çalışmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda, batarya açık devre gerilimi ile batarya doluluk durumu arasında doğrusal bir bağlantı olduğu belirtilmiştir (Pang et al., 2001; Chiasson and Vairamohan, 2003). Şekil 3.12'deki önerilen batarya modelinde, V_{oc} batarya açık devre gerilimi ile V_{soc} batarya doluluk durumu gerilimi arasındaki bağlantı Eş. 3.5'te verilmiştir.

$$V_{oc} = mV_{soc} + n \quad (3.5)$$

Burada, m ve n sabitleri, bataryaların kimyasal özelliklerine göre değişmektedir. n sabiti, batarya doluluk durumu %0, diğer bir ifade ile V_{soc} geriliminin değerinin 0V olduğu durumdaki V_{oc} batarya açık devre gerilimine eşittir. m sabiti, batarya tam dolu iken hesaplanan batarya açık devre geriliminden bulunur. "m+n" toplamının değeri, batarya doluluk durumu %100, diğer bir ifade ile V_{soc} geriliminin değerinin 1V olduğu durumdaki V_{oc} batarya açık devre gerilimine eşittir. Farklı batarya tipleri için, Çizelge 2.1 kullanılarak elde edilen nominal "m" ve "n" değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Tekrar doldurulabilen bataryalar için nominal "m" ve "n" değerleri.

Batarya çeşidi	$V_{soc}=1V$ için V_{oc} (V)	$V_{soc}=0V$ için V_{oc} (V)	m	n
Kurşun-asit	2.10	1.75	0.35	1.75
Nikel-kadmium	1.29	1.00	0.29	1.00
Nikel-metal hidrid	1.40	1.00	0.40	1.00
Nikel-demir	1.37	1.00	0.37	1.00
Nikel-çinko	1.73	1.20	0.53	1.20
Çinko-gümüş oksit	1.85	1.00	0.85	1.00
Kadmium-gümüş oksit	1.40	0.70	0.70	0.70
Nikel-hidrojen	1.40	1.00	0.40	1.00
Lityum-ion	4.10	3.00	1.10	3.00
Lityum-polimer	4.20	2.70	1.50	2.70

Önerilen batarya modelinde (Şekil 3.12.) C_d kapasitörü, batarya elektrolitinde meydana gelen elektrokimyasal yayılım etkisini modellemektedir. Batarya yük transferinin başlangıcında ve sonlanmasında, elektrolitteki iyonların yayılımından dolayı, batarya terminal geriliminde geçici durum etkisi oluşmaktadır. C_d yayılım kapasitörünün değerinin R_d yayılım direncinin değeriyle çarpımından bataryanın geçici durum tepkimesi zaman sabiti T_d hesaplanır.

Şekil 3.12'deki devrede, R_b direnci bataryanın iç direncidir. Batarya eskidikçe diğer bir deyişle bataryanın sağlık durumunun kötüleşmesiyle, R_b batarya iç direncinin değerinde artış meydana gelir ve V_b batarya terminal gerilimi düşer. Bu durumun sonucu olarak batarya kapasitesi azalır. R_d yayılım direncinin zaman içinde artması da batarya verimini ve kapasitesini zamanla düşürmektedir.

3.6. Önerilen Modelin Parametrelerinin Kestirimi İçin Yöntem

Batarya parametre tespiti için, Şekil 3.12'deki batarya elektriksel devre modeli kullanılmaktadır. V_b batarya terminal gerilimi ve i_b batarya akımı ölçülmektedir. Batarya doluluk durumunun, diğer bir ifade ile C_{soc} kapasitörü üzerindeki gerilim düşümü olan V_{soc} gerilim değerinin bilindiği kabul edilmektedir. C_{soc} kapasitörü, bataryanın amper-saniye cinsinden değeridir. R_{sd} batarya iç boşalma direncinin değeri çok büyük olduğu için ihmal edilmektedir. Batarya parametre kestirimini yapılabilmesi için R_d yayılım direnci ile C_d yayılım kapasitörünün çarpımından elde edilen batarya geçici durum zaman sabiti T_d 'nin bilinmesi gerekmektedir. Bilinmeyen değerler testlerle hesaplandıktan sonra, önerilen batarya modeline, Kalman filtre tabanlı bir algoritma uygulanarak batarya parametrelerinin kestirimi yapılabilmektedir.

Önerilen devre modelinin durum denklemleri şu şekildedir:

$$\dot{V}_{cd} = -\frac{1}{R_d C_d} V_{cd} + \frac{1}{R_d C_d} V_{oc} - \frac{1}{C_d} i_b \quad (3.6)$$

$$\dot{V}_{soc} = -\frac{1}{R_{sd} C_{soc}} V_{soc} - \frac{1}{C_{soc}} i_b \quad (3.7)$$

Burada, “ $V_{oc}=mV_{soc}+n$ ” olarak alınırsa durum denklemleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$\dot{V}_{cd} = -\frac{1}{R_d C_d} V_{cd} + \frac{m}{R_d C_d} V_{soc} + \frac{n}{R_d C_d} - \frac{1}{C_d} i_b \quad (3.8)$$

$$\dot{V}_{soc} = -\frac{1}{R_{sd} C_{soc}} V_{soc} - \frac{1}{C_{soc}} i_b \quad (3.9)$$

Bu dinamik modelde, doğal olarak, batarya terminal akımı batarya yüküne bağlı olarak değişebilecek bir değişken olduğu için durum denklemleri modelinin girdisi olarak alınacaktır. Yine, bataryanın terminalinden ölçülebilecek tek diğer değişken olan batarya terminal gerilimi (V_b) ise modelin çıktı değişkeni olarak alınacaktır.

$$V_b = V_{cd} - R_b i_b \quad (3.10)$$

Eş. 3.8, Eş. 3.9 ve Eş. 3.10 ile tanımlanan durum denklemleri, Eş. 3.8’de yer alan “ $\frac{n}{R_d C_d}$ ” sabit teriminden dolayı doğrusal bir model değildir. Bunun nedeni, “ $V_{oc}=mV_{soc}+n$ ” ile gösterilen ilişkinin, sistem teorik anlamda doğrusal değil, ılgın (affine) bir ilişki olmasından kaynaklanmaktadır.

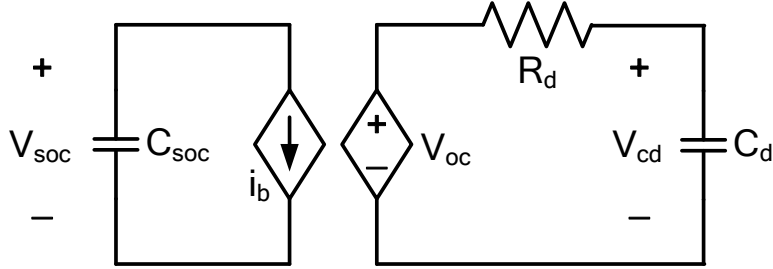
Devre modelinin parametreleri R_{sd} , C_{soc} , m , n , R_d , C_d ve R_b ’dir. İç boşalma akımı yalnızca haftalar mertebesinde etkili olduğu için, çok büyük olan R_{sd} iç boşalma direncinin değeri sonsuz alınarak ihmal edilmiştir. C_{soc} kapasitans değeri, bataryanın nominal kapasitesini tanımlayan amper-saniye değerine eşit olarak seçilmiştir. m ve n parametreleri, bataryanın tipine göre tanımlanmış nominal parametrelerdir.

Böylece, batarya modelini tam olarak tanımlamak için geriye üç parametre kalmaktadır: R_d , C_d ve R_b . Bu parametrelerin belirlenmesi için önce yayılım zaman sabiti $T_d=R_d C_d$ ’nin belirlenmesini içeren ve ardından R_b ve C_d ’nin belirlenmesine dayanan iki aşamalı bir yöntem önerilmektedir.

3.6.1. T_d yayılım zaman sabitinin hesaplanması için önerilen yöntem

T_d yayılım zaman sabitinin hesaplanması için batarya test edilmelidir. Test işlemi batarya açık devre iken yapılır ve batarya doluluk durumunun bilindiği kabul edilir.

Bunu sağlamanın en kolay yolu, bataryayı tam dolu hale getirmek ve $V_{soc}=1V$ almaktır. R_{sd} batarya iç boşalma direncinin değeri çok büyük olduğu için ihmal edilmiştir. T_d değerinin hesaplanması testinde, i_b batarya terminal akımı sıfır olduğu için batarya modeli Şekil 3.13'teki devreye indirgenir.



Şekil 3.13. T_d yayılım zaman sabitinin hesaplanmasında kullanılan devre modeli.

Batarya akımı $i_b=0$ olduğu için, V_{soc} gerilimi sabittir ve devre dinamiği şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{V}_{cd} = -\frac{1}{R_d C_d} V_{cd} + \frac{m}{R_d C_d} V_{soc} + \frac{n}{R_d C_d} \quad (3.11)$$

Eğer yayılım zaman sabitinin tersi bir durum değişkeni olarak seçilirse:

$$x_1 = V_{cd} \quad (3.12)$$

$$x_2 = \frac{1}{T_d} \quad (3.13)$$

durum denklemleri şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{x}_1 = -x_1 x_2 + (m V_{soc} + n) x_2 \quad (3.14)$$

$$\dot{x}_2 = 0 \quad (3.15)$$

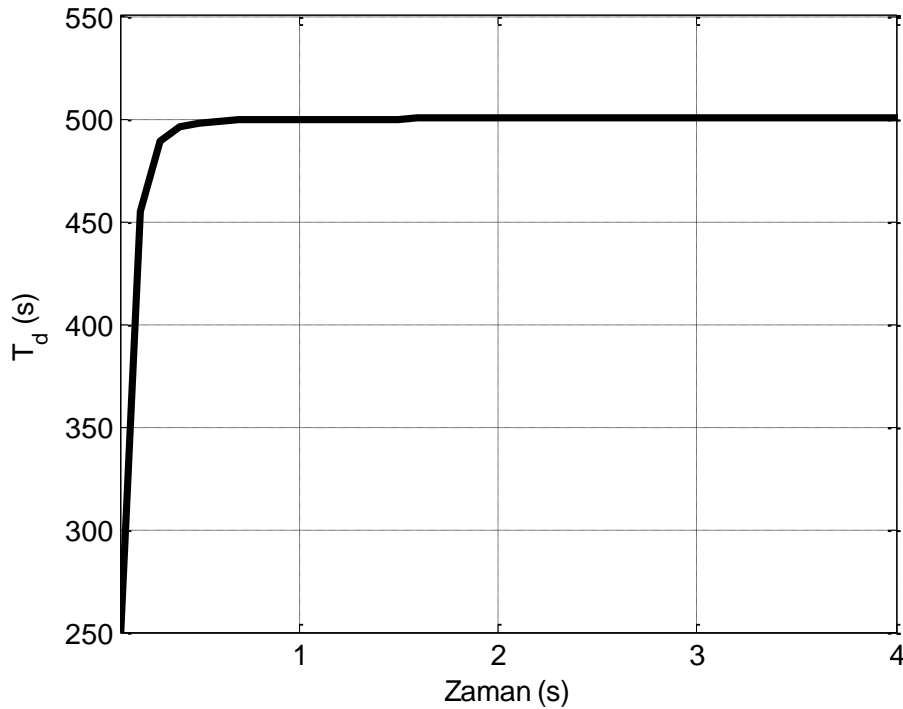
Dinamik modelin çıkış denklemi de şu şekildedir:

$$y = V_b = V_{cd} \quad (3.16)$$

$$y = x_1 \quad (3.17)$$

Eş. 3.14, Eş. 3.15 ve Eş. 3.17'deki denklemler, doğrusal olmayan bir durum uzayı modelidir. Bu model temel alınarak, doğrusal olmayan bir kestirim algoritması olan genişletilmiş Kalman filtre (Ek 1) kullanılarak durum değişkenleri kestirilir. Böylece iki durum değişkeninden birisi olan ve bilmediğimiz bir sabit olarak düşündüğümüz yayılım zaman sabiti (T_d) belirlenmiş olur. Bu yöntemi deneysel olarak uygulamak için, batarya yükte iken batarya terminal gerilimi okunur ve x_1 değişkeninin ilk kestirim değeri olarak ilklendirme yapılır. Ardından yük bataryadan aniden çekilir ve oluşan geçici terminal gerilimi üzerinden genişletilmiş Kalman filtre algoritması çalıştırılır.

Şekil 3.14'te, simülasyon çalışmasında hesaplanan T_d 'nin kestirim grafiği görülmektedir. Bu simülasyon çalışmasında, $T_d=500s$ olan bir model esas alınmıştır. $\hat{T}_d(0) = 250 s$ seçilmiş ve Kalman filtre kestirimi yapılmıştır. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi, T_d yayılım zaman sabitinin gerçek değeri, önerilen yöntemle kısa bir sürede doğru bir şekilde kestirilebilmektedir.



Şekil 3.14. Önerilen yöntemle hesaplanan T_d yayılım zaman sabiti. $\hat{T}_d(0) = 250s$.

3.6.2. C_d ve R_b parametrelerinin kestirimi için yöntem

Bir önceki bölümde kestirim yöntemi verilen yayılım zaman sabiti kullanılarak, batarya dinamik modeli şu şekilde yazılır:

$$\dot{V}_{cd} = -\frac{1}{T_d} V_{cd} + \frac{m}{T_d} V_{soc} + \frac{n}{T_d} - \frac{1}{C_d} i_b \quad (3.18)$$

$$\dot{V}_{soc} = -\frac{1}{R_{sd} C_{soc}} V_{soc} - \frac{1}{C_{soc}} i_b \quad (3.19)$$

Bu modelde, C_d ve R_b parametrelerinin belirlenmesi için yapılacak testin dakikalar mertebesinde olacağı düşünülürse, iç boşalma direncinin sonsuz alınarak ihmal edilmesi gündeme gelir ve

$$\dot{V}_{soc} = -\frac{1}{C_{soc}} i_b \quad (3.20)$$

ilişkisi ortaya çıkar. Test süresince batarya terminal akımını doğrudan kontrol edebileceğimize göre, test süresince hem i_b hem de V_{soc} 'un zamanla değişimi doğrudan bilinecektir. Bu durumda, parametre kestirim modelinde durum değişkenleri,

$$x_1 = V_{cd} \quad (3.21)$$

$$x_2 = \frac{1}{C_d} \quad (3.22)$$

$$x_3 = R_b \quad (3.23)$$

olarak seçilirse, durum denklemleri şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T_d} x_1 - i_b x_2 + \frac{m}{T_d} V_{soc} + \frac{n}{T_d} \quad (3.24)$$

$$\dot{x}_2 = 0 \quad (3.25)$$

$$\dot{x}_3 = 0 \quad (3.26)$$

Batarya terminal gerilimini çıktı olarak tanımlarsak, çıkış denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$y = V_b = x_1 - i_b x_3 \quad (3.27)$$

Görüldüğü gibi, çıktı denklemindeki girdi-durum değişkeni çarpımından dolayı, model doğrusal değildir. Kolaylık olması açısından, test sırasında sabit akımlı bir yük kullanılırsa $i_b(t)=I_b$ olur. Bu durumda, model katsayıları zamanla değişen ılgın bir modele indirgenir.

Yukarıdaki dinamik model, C_d ve R_b parametrelerinin sabit olduğu varsayımına dayanmaktadır. Eğer C_d ve R_b parametrelerinin, bataryanın çalışması süresinde, sıcaklık, aşırı akım çekme vb. nedenlerle oluşabilecek değişimi gösterilmek isteniyorsa, w_C ve w_R sıfır ortalamalı beyaz gürültü sinyalleri olmak üzere

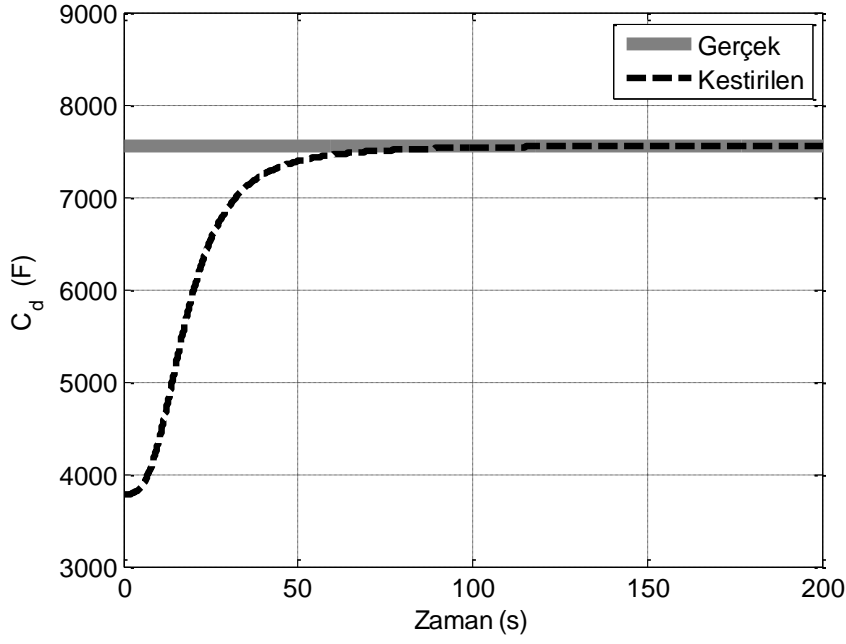
$$\dot{x}_2 = w_C \quad (3.28)$$

$$\dot{x}_3 = w_R \quad (3.29)$$

olarak da modelleme yapılabilir. Böylece ortaya çıkan durum uzayı modeline, genişletilmiş Kalman filtre (Ek 1) algoritması uygulanarak C_d ve R_b parametrelerinin kestirimi gerçekleştirilir.

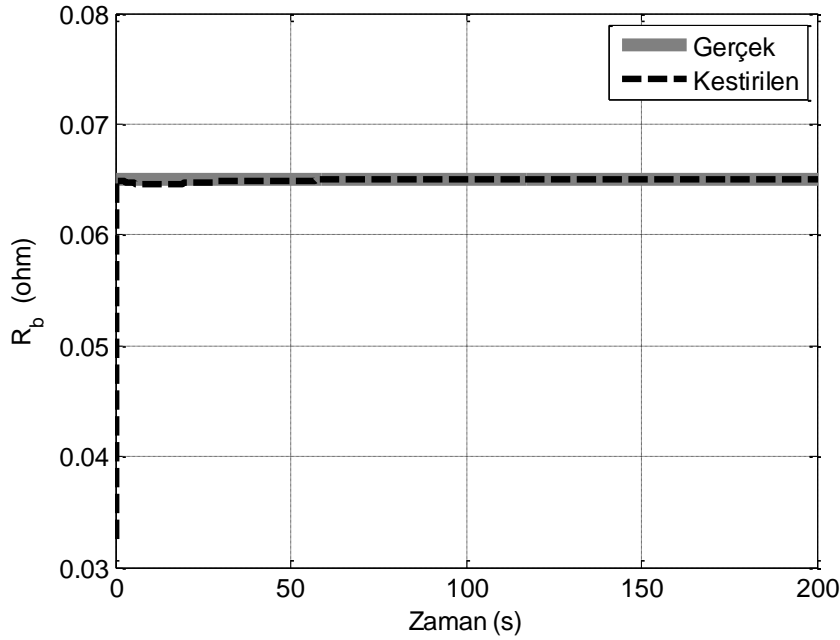
Şekil 3.12'de önerilen batarya modeli için simülasyon çalışması yapılarak batarya parametrelerinin kestirimi yapılmıştır. Burada, C_d ve R_b parametrelerinin sabit olduğu varsayılmıştır. $T_d=500s$, $C_d=7500F$ ve $R_b=65m\Omega$ olarak seçilmiş, $I_b=2A$ batarya boşalma akımı için Şekil 3.12'deki devrenin V_b çıkış gerilimi hesaplanmıştır. Bataryanın Ni-Mh olduğu varsayılarak $m=0.11$ ve $n=1.25$ olarak alınmıştır. Hesaplanan çıkış geriliminin, parametre tespiti için ölçülen değer olduğu kabul edilerek, C_d ve R_b 'nin kestirimi yapılmıştır. Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da C_d 'nin ve R_b 'nin gerçek ve kestirilen değerleri verilmiştir.

Parametre kestirimi sırasında C_d 'nin başlangıç değeri, gerçek değer yarısı kadar alınmıştır. Bu durumda parametre yaklaşık 100 saniyede gerçek değerine yakınsamaktadır. Şekil 3.15'te, kestirilen C_d değerinin, model değerine yakınsadığı görülmektedir.

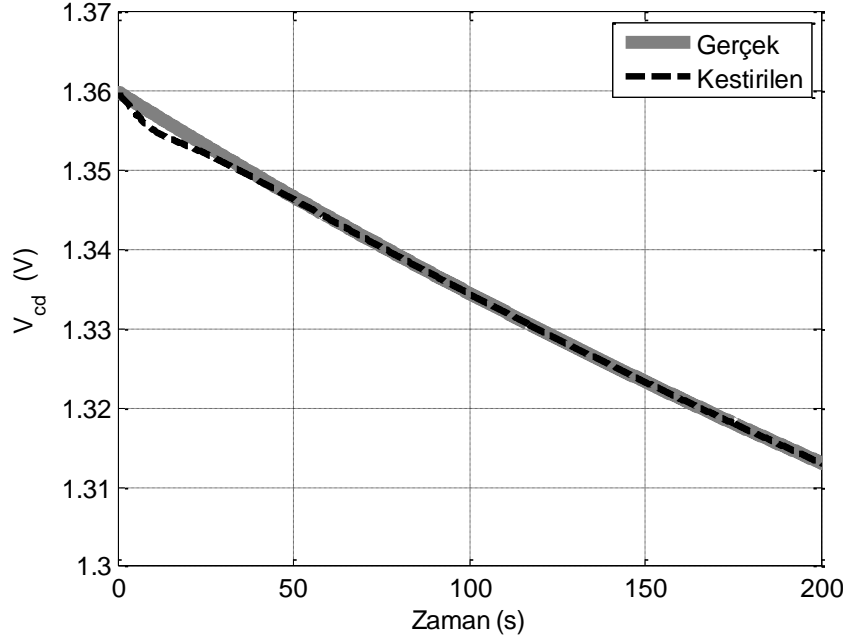


Şekil 3.15. Batarya parametre kestirimi için yapılan simülasyon çalışması. Gerçek ve kestirilen C_d değerleri.

Parametre kestirimi sırasında R_b 'nin başlangıç değeri, gerçek değer yarısı kadar alınmıştır. Bu durumda yaklaşık 40 saniyede gerçek değer kestirilebilmektedir. Şekil 3.16'da, kestirilen R_b değerinin, model değerine yakınsadığı görülmektedir.



Şekil 3.16. Batarya parametre kestirimi için yapılan simülasyon çalışması. Gerçek ve kestirilen R_b değerleri.



Şekil 3.17. Batarya parametre kestirimi için yapılan simülasyon çalışması. Gerçek ve kestirilen V_{cd} eğrileri.

C_d kapasitörü üzerindeki gerilim düşümü olan V_{cd} 'nin gerçek ve kestirim sonucu elde edilen değerleri Şekil 3.17'de verilmiştir. Önerilen batarya modelinin parametrelerinin genişletilmiş Kalman filtre yardımı ile belirlenebileceği simülasyon modeli ile gösterildikten sonra, önerilen yöntemin 2100 mAh kapasiteli bir NiMh batarya için uygulaması gerçekleştirilmiştir.

3.6.3. Test bataryası için yapılan batarya parametre kestirimi

Bu bölümde, Şekil 3.12'de önerilen batarya modeli için test çalışması yapılarak batarya parametrelerinin kestirimi yapılmıştır. Test bataryası olarak 2100mAh Ni-Mh bir batarya kullanılmış ve batarya 2.1A sabit batarya akımıyla boşaltılmıştır. Batarya doluluk durumunun başlangıç değeri $V_{soc}(0)=1.06V$ ve batarya yayılım zaman sabiti $T_d=500$ saniye olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.12'deki devre için, batarya dinamik modeli şu şekilde yazılır:

$$\dot{V}_{cd} = -\frac{1}{T_d} V_{cd} + \frac{m}{T_d} V_{soc} + \frac{n}{T_d} - \frac{1}{C_d} i_b \quad (3.30)$$

$$\dot{V}_{soc} = -\frac{1}{R_{sd}C_{soc}} V_{soc} - \frac{1}{C_{soc}} i_b \quad (3.31)$$

Bu modelde, iç boşalma akımının büyüklüğü i_b batarya akımına kıyasla ihmal edilebilecek seviyede düşüktür. Bunun sonucu olarak, iç boşalma direncinin sonsuz alınarak ihmal edilmesi gündeme gelir ve

$$\dot{V}_{\text{soc}} = -\frac{1}{C_{\text{soc}}} i_b \quad (3.32)$$

ilişkisi ortaya çıkar. Parametre kestirim modelinde durum değişkenleri,

$$x_1 = V_{\text{cd}} \quad (3.33)$$

$$x_2 = \frac{1}{C_d} \quad (3.34)$$

$$x_3 = R_b \quad (3.35)$$

olarak seçilirse ve C_d ve R_b parametrelerinin rasgele yürüyüş süreci şeklinde modellendiği varsayılırsa durum denklemleri şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T_d} x_1 - i_b x_2 + \frac{m}{T_d} V_{\text{soc}} + \frac{n}{T_d} \quad (3.36)$$

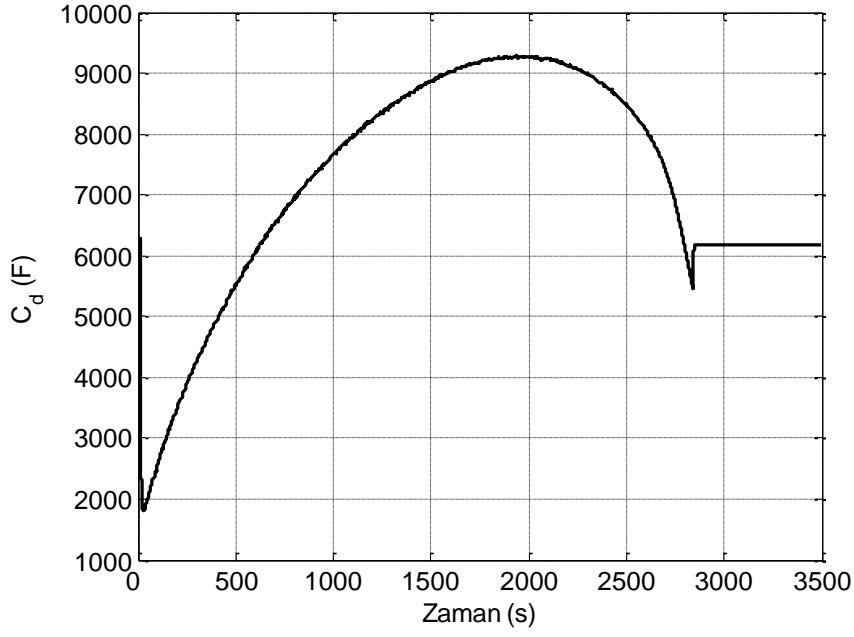
$$\dot{x}_2 = w_C \quad (3.37)$$

$$\dot{x}_3 = w_R \quad (3.38)$$

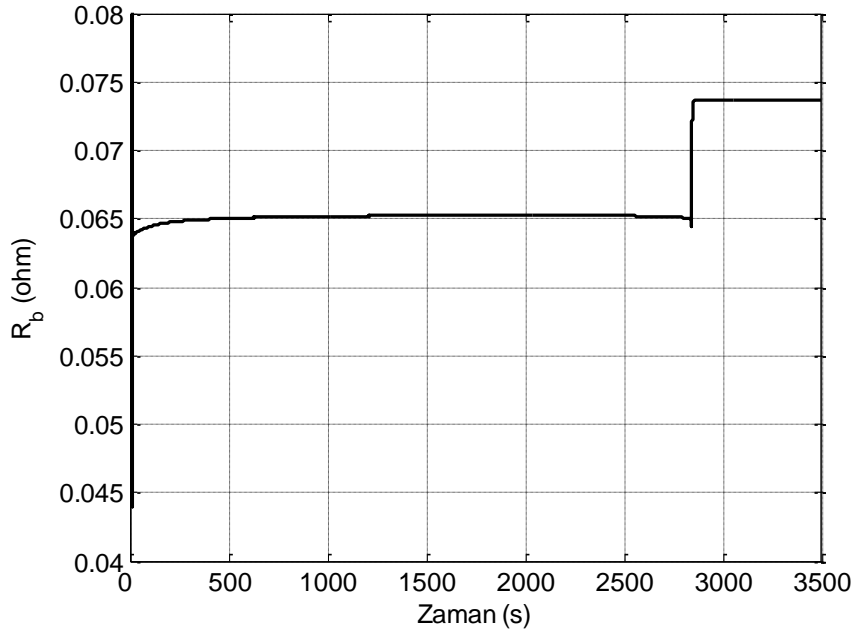
Batarya terminal gerilimini çıktı olarak tanımlarsak, çıkış denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$y = V_b = x_1 - i_b x_3 \quad (3.39)$$

Bu model simülasyon modelinin aynısıdır. Ni-Mh test bataryası 2.1A sabit akımla boşaltılmış ve bu sırada oluşan batarya gerilimi ölçülerek, bu ölçümler üzerinden genişletilmiş Kalman filtre algoritması uygulanmıştır. Şekil 3.12'deki batarya modelinin parametreleri olan C_d ve R_b için elde edilen kestirim değerleri Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.18. Test bataryası için yapılan batarya parametre kestirimi. Kestirilen C_d değeri.

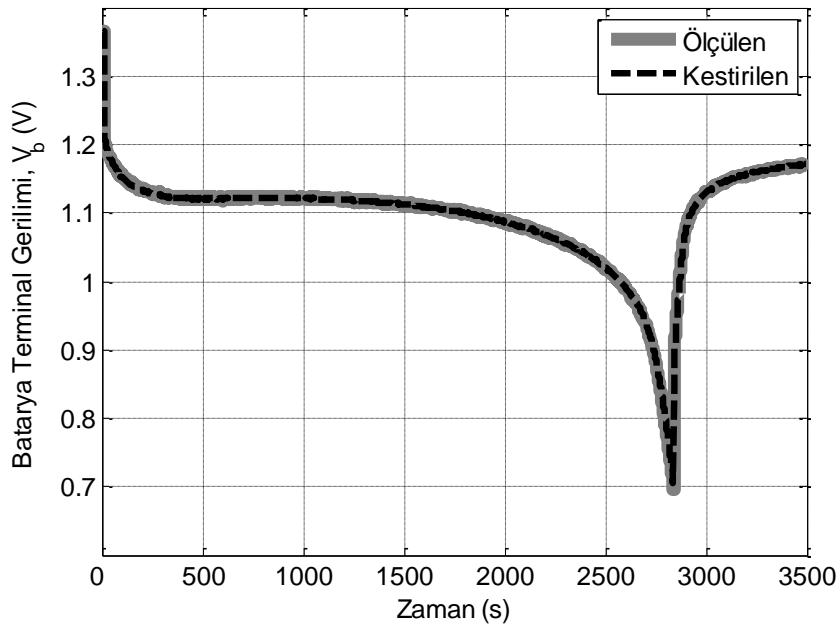


Şekil 3.19. Test bataryası için yapılan batarya parametre kestirimi. Kestirilen R_b değeri.

Şekil 3.18'de yayılım kapasitansının sabit kalmayıp boşalma süresince değişim gösterdiği gözlenmektedir. Yük akımı kesildiğinde ise yayılım kapasitansı sabit bir değere yakınsamaktadır. Şekil 3.19'da bataryadan çekilen akım kesildiğinde R_b

direncinin değeri $65 \text{ m}\Omega$ 'dan $74 \text{ m}\Omega$ 'a yükselmektedir. Bu durumda R_b 'nin değerinin çekilen akımla değiştiği söylenebilir.

Ölçülen batarya terminal gerilimi ile genişletilmiş Kalman filtre ile kestirilen terminal gerilimi arasındaki ortalama hata $\%0.12$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.20). Hatanın bu kadar küçük olması, batarya parametrelerinin değişken olarak kabul edilmesinin, sabit kabul edilmesine göre daha doğru sonuç verdiğini göstermektedir. Ayrıca, Şekil 3.20 önerilen batarya modelinin, Ni-Mh bir bataryanın dinamiğini tutarlı bir şekilde modelleyebildiğinin de bir kanıtı niteliğindedir.



Şekil 3.20. Test bataryası için yapılan batarya parametre kestirimi. 2.1A boşalma akımı için ölçülen ve kestirilen boşalma eğrileri.

4. BATARYA DOLULUK DURUMU KESTİRİMİ

Bu bölümde, batarya parametrelerinin bilindiği durumlarda, batarya doluluk durumunun kestirimi incelenmiştir. Batarya doluluk durumunun kestirimi için öncelikle literatürde bulunan batarya doluluk durumu yöntemleri incelenmiş ve özetlenmiştir. Bu yöntemlerden Kalman filtre ve açık devre gerilimi yöntemleri kullanılarak yeni bir batarya doluluk durumu kestirim algoritması önerilmiştir.

Önerilen Kalman filtre tabanlı batarya doluluk tespiti algoritması, Şekil 3.12'de önerilen batarya modeline uygulanarak simülasyon ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, önerilen Kalman filtre tabanlı algoritmanın batarya doluluk tespitinde kullanılabileceği gösterilmiştir.

4.1. Batarya Doluluk Durumu Tespinde Kullanılan Yöntemler

Batarya doluluk durumu (SOC) kestirimi yapabilmek için, önceki bölümde anlatılan batarya modelleri kullanılarak birçok batarya doluluk durumu tespit yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bazılarının pratik kullanım alanı kısıtlıyken (boşaltma testi yöntemi, empedans ölçüm yöntemi gibi), bazı yöntemlerin kullanımında son zamanlarda artış görülmektedir (Kalman filtre gibi). Literatürde bulunan, batarya doluluk durumu tespinde kullanılan yöntemler aşağıdaki alt bölümlerde anlatılmaktadır.

4.1.1. Boşaltma testi yöntemi

Batarya üreticileri tarafından yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bataryanın toplam kapasitesi bulunur. Herhangi bir batarya modeline ihtiyaç yoktur. Batarya, maksimum doluluk durumundan minimum doluluk durumuna kadar farklı sıcaklık ve boşalma akımlarında boşaltılarak farklı boşalma eğrileri elde edilir. Elde edilen boşalma eğrileri, aynı tip ve özellikteki bataryalar için genel bir referans niteliğini taşır. Boşalma eğrilerindeki her bir nokta, batarya doluluk seviyesinin o andaki değerine karşılık gelmektedir.

4.1.2. Amper-saat sayım yöntemi

Doluluk durumu başlangıç değerinin bilindiği durumlarda herhangi bir batarya modeline ihtiyaç yoktur. Doluluk durumu, batarya akımından aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_{soc}} \int_{t_0}^t i_b(t) dt \quad (4.1)$$

Eş. 4.1'de SOC ve SOC_0 , 't' ve 't₀' anlarındaki batarya doluluk durumunu ifade etmektedir. i_b batarya akımıdır ve C_{soc} , bataryanın toplam kapasitesidir.

Amper-saat sayım yöntemi, basit bir yöntemdir ve bu yöntemle doluluk durumunun tespiti kolaydır. Düşük boşalma akımlarında doğru sonuçlar vermesine rağmen, bataryanın histeresis etkisini dikkate almadığı için yüksek boşalma akımlarında hata oranı artar. Yüksek batarya akımlarında, elektrot yüzeyindeki aktif madde derişiminde azalma meydana gelir. Bu olayın sonucunda bataryanın terminal geriliminde normalden daha fazla azalma olur. Bu durum, bataryanın yüksüz durumda bir süre bekletilmesiyle ortadan kalkar ve terminal gerilimi normal seviyesine yükselir. Buna bataryanın histeresis etkisi denir (Rao et al., 2003).

4.1.3. Açık devre gerilimi yöntemi

Yapılan çalışmalarda, batarya doluluk durumu ile batarya açık devre gerilimi arasında doğrusal bir bağlantı olduğu gösterilmiştir (Pang et al., 2001; Chiasson and Vairamohan, 2003). Belli bir dinlenme süresinden sonra elde edilen denklem şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_{oc} = a * SOC + b \quad (4.2)$$

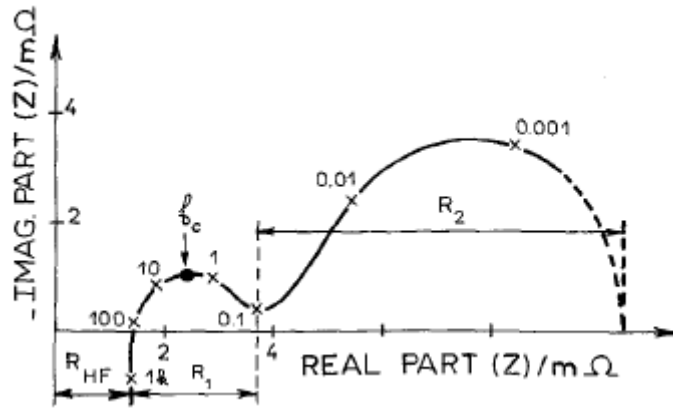
Eş. 4.2'de V_{oc} , batarya açık devre gerilimini, SOC ise batarya doluluk durumunu ifade etmektedir. a ve b sabitleri batarya karakteristiklerinden elde edilmektedir.

4.1.4. Empedans ölçümü yöntemi

Bu yöntemde batarya, empedans ölçüm modeli kullanılarak modellenir. Batarya üzerinde yapılan testler sonucunda Şekil 4.1'de görüldüğü gibi empedans diyagramları elde edilir (Huet, 1998).

Yapılan deneysel çalışmalarda, R_{HF} ve R_1 parametreleri ile bataryanın doluluk durumu arasında bağlantı bulunmuştur (Huet, 1998). Doluluk durumu azaldıkça, Şekil 4.1'deki R_{HF} ve R_1 değerlerinde artış meydana gelir. R_{HF} , elektrolit iletkenliği

ve elektrotlardaki kristalleşme artışını gösterirken, R_1 elektrotlardaki gözeneklenme artışını ifade eder.



Şekil 4.1. Empedans ölçüm yöntemiyle elde edilen Nyquist diagramı.

4.1.5. Kalman filtre yöntemi

Kalman filtre yöntemi, batarya doluluk durumu tespitinde kullanılan dinamik ve çevrimiçi bir yöntemdir. Kalman filtresi, bir optimal özyineli hesaplama algoritmasıdır. Özyineli olduğu için önceki kestirimlerin saklanmasına gerek yoktur (Gelb, 1989). Bu yöntem, en genel olarak dinamik bir sistemin durum-değişkenlerinin aldıkları değerleri kestirmek için kullanılır.

Yapılan bir çalışmada (Pang et al., 2001) Şekil 3.6'da gösterilen devre modeli kullanılmıştır. Burada sistemin durum-denklemleri tanımlanmış ve durum-değişkenleri Kalman filtre yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmadaki temel amaç bataryanın açık devre geriliminin hesaplanmasıdır. Buradan, açık devre gerilim yöntemi kullanılarak bataryanın durumu hesaplanmıştır. Ayrıca model parametreleri de Kalman filtre yöntemi ile hesaplanmış ve iki farklı başlangıç değeri için sonuçlar verilmiştir.

Kalman filtresi kullanılarak yapılan başka bir çalışmada (Plett, 2004), matematiksel bir devre modeli önerilmiştir. Bu model, Shepherd modeli ve Nernst modelinin bir birleşimidir. Ayrıca bu çalışmada batarya doluluk durumu, bir durum-değişkeni olarak alınmış ve Kalman filtresiyle aldığı değer doğrudan kestirilmiştir.

Şekil 3.10'daki RC batarya modeli, yapılan üç farklı çalışmada kullanılmıştır (Bhangu et al., 2005; Vasebi et al., 2007; 2008). Burada batarya, durum

denklemleriyle modellenmiş, açık devre gerilimi ve doluluk durumu Kalman filtresi kullanılarak hesaplanmıştır. Bunlara ek olarak başka bir çalışmada (Vasebi et al., 2007) bataryanın histeresis özelliği de dikkate alınıp yeni bir devre modeli önerilmiştir.

Başka bir çalışmada ise batarya, tek parçacık modeli kullanılarak elektrokimyasal yaklaşımla modellenmiştir (Santhanagopalan and White, 2006). Bir lityum-iyon hücrenin dolma ve boşalma sırasındaki doluluk durumu, Kalman filtresi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada batarya doluluk durumu, elektrot içindeki ortalama lityum derişiminin bu elektrottaki maksimum derişime oranı şeklinde ifade edilmiştir.

4.1.6. Üretici firma verilerine dayanarak oluşturulan analitik yöntemler

Batarya üreticileri, imal ettikleri bataryalarla ilgili teknik verileri yayınlarlar. Bu veriler, farklı batarya akımı ve farklı sıcaklıklar için elde edilen batarya terminal gerilimine karşılık zaman grafikleridir. Bu veriler kullanılarak, bataryanın doluluk durumu hakkında kabaca bir fikir edinilebilir. Bu veriler kullanılarak, batarya doluluk durumu tespiti için bazı çalışmalar yapılmıştır (Çadircı and Özkazanç, 2004; Kutluay et al., 2005). Bu çalışmalarda kullanılan kapasite şu şekilde tanımlanmıştır:

$$Q(t) = \frac{1}{C_{soc}} \int_{t_0}^t k(i) * i * dt \quad (4.3)$$

Eş. 4.3'de 'i', boşalma akımını ve 'k(i)', boşalma akımı etkinlik katsayısını ifade etmektedir. k(i) değeri, bataryanın doluluk durumunun hesaplanmasında önemli bir katsayıdır. Bu değer üretici firma verilerinden yararlanılarak elde edilir. Bu çalışmalarda ayrıca sıcaklık faktörü de dikkate alınmıştır.

Bazı çalışmalarda (Medora and Kusko, 2005; 2006), batarya kapasitesi, Peukert eşitliği kullanılarak şu şekilde hesaplanmıştır:

$$C = K / I_d^{(p-1)} \quad (4.4)$$

Burada 'C', batarya kapasitesini, I_d , boşalma akımını göstermektedir. 'K' ve 'p' değerleri de üretici firma boşalma eğrisinden hesaplanan sabitlerdir. Boşalma eğrileri kullanılarak boşalma gerimili, batarya doluluk durumunun bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar üretici firma verileriyle karşılaştırılmıştır.

4.1.7. Diğer yöntemler

Batarya doluluk durumu tespitinde kullanılan diğer bir yöntem ise yapay sinir ağı yaklaşımıdır. Bu çevrimiçi bir yöntemdir. Bu yöntemde ilk aşamada öğrenme amaçlı verilere ihtiyaç vardır. Literatürde bu yöntemle yapılan çalışmalar bulunmaktadır (Morita et al., 2006).

4.2. Batarya Doluluk Durumu Kestirimi İçin Önerilen Yöntem

Batarya terminal gerilimi V_b ve batarya akımı i_b ölçülmektedir. Batarya parametrelerinin bilindiği durumlarda, Şekil 3.12'deki önerilen batarya modeline Kalman filtre tabanlı bir kestirim algoritması uygulanarak batarya parametrelerinin kestirimi yapılabildiği üçüncü bölümde gösterilmişti. Bu bölümde ise aynı dinamik model esas alınarak batarya doluluk durumu kestirimi yapılabileceği gösterilecektir.

4.2.1. Durum denklemleri

Şekil 3.12'de verilen batarya modelinin durum denklemleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{V}_{cd} = -\frac{1}{R_d C_d} V_{cd} + \frac{m}{R_d C_d} V_{soc} + \frac{n}{R_d C_d} - \frac{1}{C_d} i_b \quad (4.5)$$

$$\dot{V}_{soc} = -\frac{1}{R_{sd} C_{soc}} V_{soc} - \frac{1}{C_{soc}} i_b \quad (4.6)$$

Eğer durum değişkenleri aşağıdaki gibi seçilirse:

$$x_1 = V_{cd} \quad (4.7)$$

$$x_2 = V_{soc} \quad (4.8)$$

ve R_{sd} direnci çok büyük olduğu için ilgili terim ihmal edilirse, durum denklemleri şu şekilde yazılır:

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T_d}x_1 + \frac{m}{T_d}x_2 + \frac{n}{T_d} - \frac{1}{C_d}i_b \quad (4.9)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{C_{soc}}i_b \quad (4.10)$$

Burada, $T_d = R_d C_d$ şeklinde ifade edilen yayılım zaman sabitidir. Devrenin çıkış denklemi de şu şekildedir:

$$y = V_b = x_1 - R_b i_b \quad (4.11)$$

i_b akımı, modelin girdisi olarak alınır ve Eş. 4.9'da yer alan n/T_d terimi de modelin girdisinin sabit bir kısmı olarak yorumlanırsa, durum denklemleri şu şekilde doğrusal bir model olarak ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_d} & \frac{m}{T_d} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{n}{T_d} - \frac{i_b}{C_d} \\ -\frac{1}{C_{soc}}i_b \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - R_b i_b \quad (4.13)$$

Bu modelde,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_d} & \frac{m}{T_d} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$C = [1 \ 0] \quad (4.15)$$

alınarak, gözlenebilirlik matrisi

$$M_O = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{T_d} & \frac{m}{T_d} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

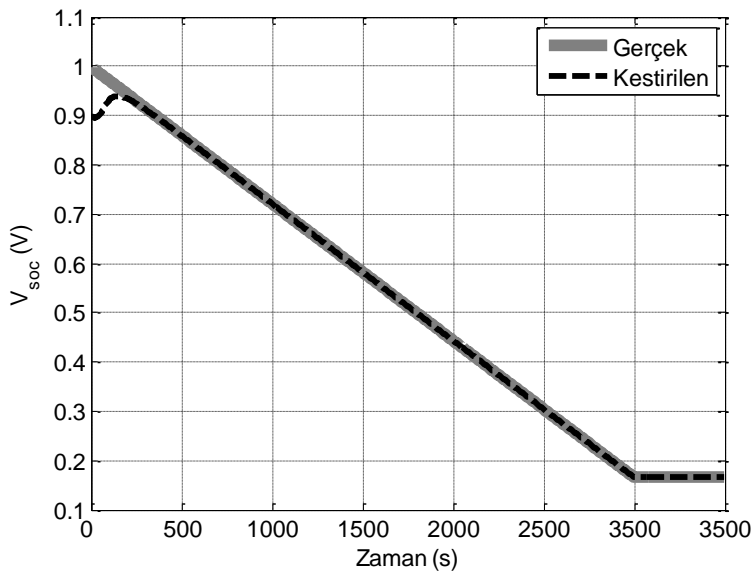
olarak ortaya çıkar. Gözlenebilirlik matrisinin determinanı

$$\det(M_O) = \frac{m}{T_d} \neq 0 \quad (4.17)$$

olduğundan, önerilen batarya modelinin gözlenebilir olduğu ortaya çıkar. Bu husus, yalnızca batarya gerilimini ve batarya akımını gözleyerek durum değişkenlerinin hesaplanabileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, gözetleyici tasarlamak yerine doğrudan Kalman filtre kullanarak durum değişkenlerinden birisi olan batarya doluluk durumu gerilimi (V_{soc}) kestirilmiştir.

4.2.2. Batarya doluluk durumu kestirimi için yapılan simülasyon çalışması

Şekil 3.12'de önerilen batarya modeli için simülasyon çalışması yapılarak batarya parametrelerinin kestirimi yapılmıştır. Burada C_d ve R_b , parametre kestirim simülasyonunda kullanılan sabit değerlerdir. 1C'lik boşalma akımı için V_b batarya terminal geriliminin değeri hesaplanmış ve bu değerlerden batarya doluluk durumu kestirimi yapılmıştır. Şekil 4.2'de V_{soc} 'un gerçek ve kestirilen değerleri verilmiştir.



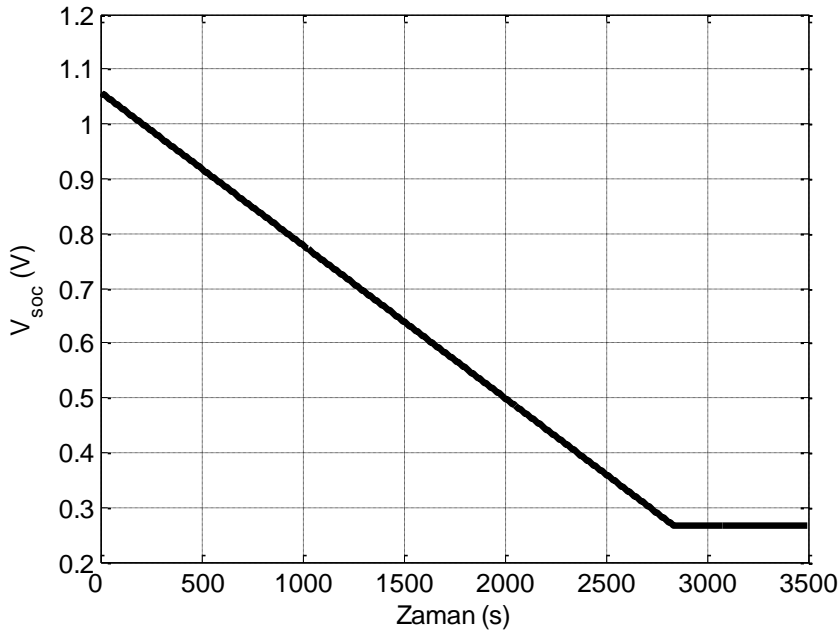
Şekil 4.2. Batarya doluluk durumu kestirimi için yapılan simülasyon çalışması. Gerçek ve kestirilen V_{soc} eğrileri.

Şekil 4.2'de görülen kestirim eğrisinin başlangıç değeri gerçek değerden % 10 hatalı olarak seçilmiştir. Kestirilen değer yaklaşık olarak 400 saniyede, gerçek değeri yakalamaktadır.

4.2.3. Test bataryası için yapılan batarya doluluk durumu kestirimi

Test bataryası için yine 2100mAh nominal güçteki NiMh bir batarya kullanılmıştır. Kestirim için Eş 4.9, Eş 4.10 ve Eş 4.11 ile verilen dinamik model esas alınmış ve Kalman filtre kullanılarak batarya doluluk durumu kestirimi yapılmıştır. Model parametreleri C_d (Şekil 3.18), R_b (Şekil 3.19) ve T_d için, daha önce batarya parametre testinde tespit edilen deneysel değerler kullanılmıştır.

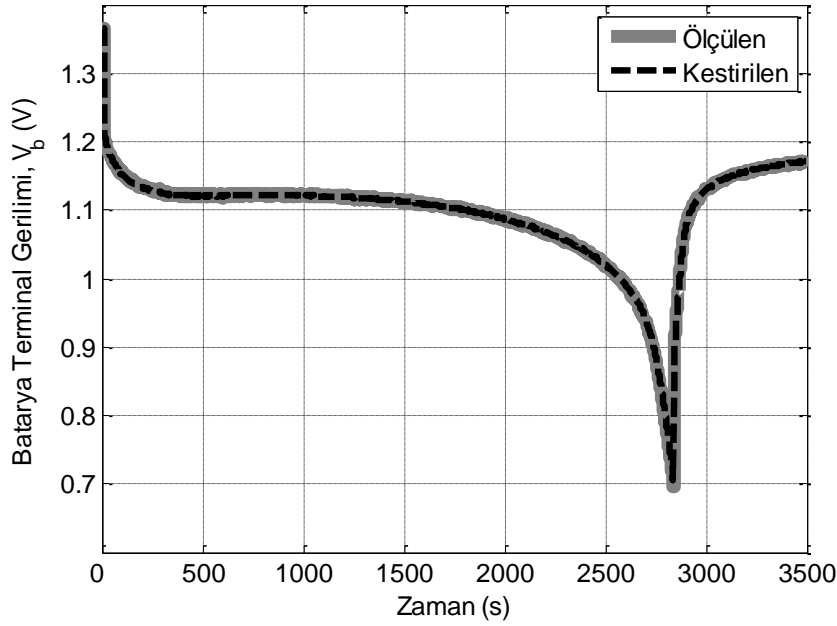
Batarya doluluk durumu kestirimi için, 2.1A boşalma akımı altında batarya terminal gerilimi ölçülmüştür. Kestirim sonucu elde edilen V_{soc} değeri Şekil 4.3'de görülmektedir.



Şekil 4.3. Test bataryası için yapılan batarya doluluk durumu kestirimi.

Kestirilen batarya doluluk durumunun güvenilirliğini sınamak açısından, deney sırasında ölçülen batarya terminal gerilimi ile Kalman filtre ile yapılan kestirim ile hesaplanan batarya terminal gerilimi Şekil 4.4'te verilmiştir. Ölçülen batarya terminal gerilimi ile kestirilen değer arasındaki ortalama hata %0.12 olarak hesaplanmıştır. Hatanın bu kadar küçük olması, kestirilen batarya doluluk

durumunun hata oranının da küçük olduğunun bir göstergesi olarak yorumlanmıştır.

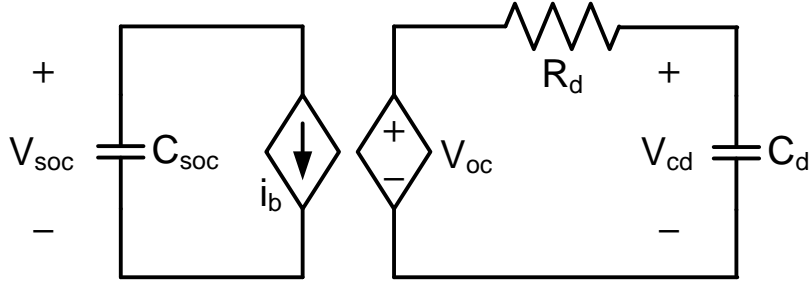


Şekil 4.4. Test bataryası için yapılan batarya doluluk durumu kestiriminde ölçülen ve kestirilen batarya terminal gerilimi eğrileri.

Şekil 4.4'te görülen yüksek kestirim performansı doğrudan batarya doluluk durumunun başlangıç kestirim değerinin doğru seçimine bağlıdır. Batarya doluluk durumunun başlangıç değerininin doğru kestirimi, hata oranını azaltmaktadır. Bu yüzden batarya doluluk durumunun başlangıç değerinin tespiti için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem aşağıdaki bölümde anlatılmaktadır.

4.2.3.1. Batarya doluluk durumunun başlangıç değerinin hesaplanması

Batarya doluluk durumunun başlangıç değerinin doğru tespiti, hata oranını azaltmaktadır. V_{soc} durum değişkenininin başlangıç değerini hesaplamak için Şekil 4.5'teki devre modeli kullanılmaktadır. Batarya açık devre konumundayken, bataryanın uçlarından gerilim ölçümü yapılır ve batarya terminal akımı i_b 'nin değeri sıfırdır. Bölüm 3.6.1'de hesaplanan T_d zaman sabitinin değeri bu testte kullanılmaktadır.



Şekil 4.5. Batarya doluluk durumunun başlangıç değerinin hesaplanmasında kullanılan devre modeli.

Devre modelinin durum denklemleri şu şekildedir:

$$\dot{V}_{cd} = -\frac{1}{R_d C_d} V_{cd} + \frac{m}{R_d C_d} V_{soc} + \frac{n}{R_d C_d} \quad (4.18)$$

$$\dot{V}_{soc} = 0 \quad (4.19)$$

Eğer durum değişkenleri aşağıdaki gibi seçilirse:

$$x_1 = V_{cd} \quad (4.20)$$

$$x_2 = V_{soc} \quad (4.21)$$

durum denklemleri şu şekilde yazılabilir:

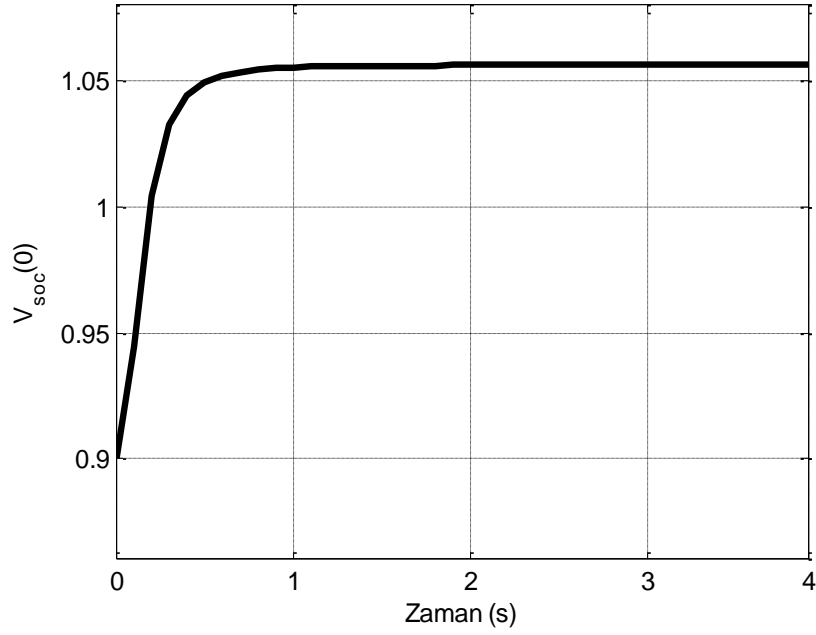
$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T_d} x_1 + \frac{m}{T_d} x_2 + \frac{n}{T_d} \quad (4.22)$$

$$\dot{x}_2 = 0 \quad (4.23)$$

Devrenin çıkış denklemi de şu şekildedir:

$$y = V_b = V_{cd} = x_1 \quad (4.24)$$

Eş. 4.22, Eş. 4.23 ve Eş. 4.24'te verilen denklemlere Kalman filtre uygulanarak hesaplanan V_{soc} 'un başlangıç değeri Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi batarya modelinde $V_{soc}(0)=0.9V$ alınarak hesaplama yapılmıştır. Sistem çok kısa bir sürede, yaklaşık 40 örnekleme zamanında yani 4 saniyede gerçek V_{soc} değeri olan 1.06V'ye yakınsamıştır.



Şekil 4.6. Batarya doluluk durumunun başlangıç değerinin hesaplanması.

Bu bölümde, batarya model parametrelerinin bilindiği durumda Kalman filtre kullanılarak gerçek zamanlı olarak batarya doluluk durumunun kestirilebileceği gösterilmiştir. Ancak, batarya parametrelerinin değerlerinin zaman içinde değişmesi, hatta yük akımına bağlı olarak bile değişim göstermesi nedenleri ile, bu yaklaşımın kullanım etkinliği kısıtlı olacaktır. Bu nedenle, bir sonraki bölümde batarya doluluk durumu ve batarya parametrelerinin birlikte kestirimi konusu ele alınmıştır.

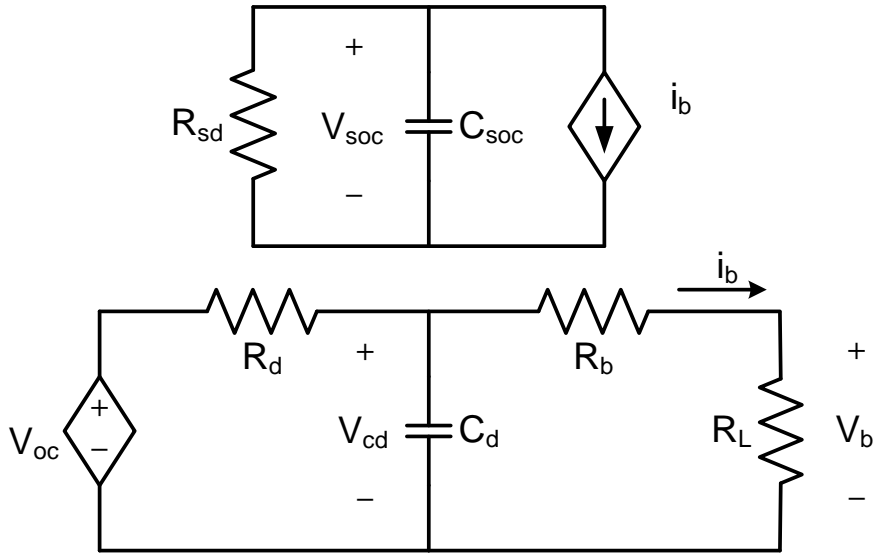
5. BATARYA DOLULUK DURUMU VE BATARYA PARAMETRELERİNİN BİRLİKTE KESTİRİMİ

Bölüm 3'te, parametreleri bilinmeyen bataryaların, batarya doluluk durumunun bilindiği durumlarda, parametrelerinin kestiriminin yapılabileceği gösterilmişti. Bu bölümde ise batarya doluluk durumunun bilinmediği durumlarda da batarya parametrelerinin ve batarya doluluk durumunun birlikte kestiriminin yapılabileceği gösterilecektir.

Bu bölümde ilk olarak, batarya doluluk durumu ve batarya parametrelerinin birlikte kestirimine yönelik simülasyon çalışması yapılmıştır. İkinci olarak 2100mAh'lik bir Ni-Mh test bataryası kullanılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları ve deneysel çalışma ile batarya parametrelerinin ve batarya doluluk durumunun birlikte kestiriminin yapılabileceği gösterilmiştir

5.1. Batarya Doluluk Durumu ve Batarya Parametrelerinin Birlikte Kestirime Yönelik Simülasyon Çalışması

Batarya doluluk durumu ve batarya parametrelerinin birlikte kestirime yönelik simülasyon çalışmasında, Şekil 5.1'de görülen devre modeli kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Batarya doluluk durumu ve batarya parametrelerinin birlikte kestirime yönelik simülasyon çalışmasında kullanılan batarya modeli.

Burada, $R_L=1\Omega$ 'luk sabit yük direnci ile sistemin çalışması incelenmiştir. Batarya terminal gerilimi ve akımı hesaplanmış ve ölçülen değerler olarak kullanılarak,

batarya doluluk durumu ve parametre kestirimi yapılmıştır. Bulunan sonuçlar, gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır.

5.1.1. Durum denklemleri

Şekil 5.1 ile verilen batarya modelinin dinamik denklemleri şu şekildedir:

$$\dot{V}_{cd} = -\frac{1}{R_d C_d} V_{cd} + \frac{m}{R_d C_d} V_{soc} + \frac{n}{R_d C_d} - \frac{1}{C_d} i_b \quad (5.1)$$

$$\dot{V}_{soc} = -\frac{1}{R_{sd} C_{soc}} V_{soc} - \frac{1}{C_{soc}} i_b \quad (5.2)$$

Eğer durum değişkenleri aşağıdaki gibi seçilirse:

$$x_1 = V_{cd} \quad (5.3)$$

$$x_2 = V_{soc} \quad (5.4)$$

$$x_3 = \frac{1}{C_d} \quad (5.5)$$

$$x_4 = \frac{1}{R_b + R_L} \quad (5.6)$$

$$x_5 = \frac{1}{R_d C_d} \quad (5.7)$$

durum denklemleri şu şekilde yazılır:

$$\dot{x}_1 = -x_1 x_5 + m x_2 x_5 + n x_5 - x_3 i_b \quad (5.8)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{C_{soc}} i_b \quad (5.9)$$

$$\dot{x}_3 = 0 \quad (5.10)$$

$$\dot{x}_4 = 0 \quad (5.11)$$

$$\dot{x}_5 = 0 \quad (5.12)$$

Burada bataryanın açık devre durumunda boşalma miktarının çok düşük olduğu varsayılarak, R_{sd} değeri çok büyük kabul edilmiştir. Devrenin çıkış denklemi de şu şekildedir:

$$y = V_b = \frac{R_L}{R_b + R_L} V_{cd} = R_L x_1 x_4 \quad (5.13)$$

Eş. 5.8'den Eş. 5.13'e kadar olan denklemlerle verilen dinamik modelde, C_{soc} ve R_L değerleri bilinen parametrelerdir. Durum değişkenlerinin yukardaki gibi seçilmesinden dolayı durum denklemleri doğrusal değildir. Bu yüzden bu denklemlere doğrusal Kalman filtre metodu uygulanamaz. Bunun yerine genişletilmiş Kalman filtre yöntemi denklemlere uygulanmıştır. İlk olarak durum denklemleri Euler yaklaşımı ile kesikli zamanda ifade edilmiştir.

$$x_{k+1} = f(x_k) + w_k \quad (5.14)$$

$$y_{k+1} = g(x_{k+1}) + v_{k+1} \quad (5.15)$$

Daha ayrıntılı olarak T örnekleme zamanı olmak üzere dinamik model,

$$x_{1,k+1} = x_{1,k} + T(-x_{1,k}x_{5,k} + mx_{2,k}x_{5,k} + nx_{5,k} - i_{b,k}x_{3,k}) \quad (5.16)$$

$$x_{2,k+1} = x_{2,k} - \frac{T}{C_{soc}} i_{b,k} \quad (5.17)$$

$$x_{3,k+1} = x_{3,k} \quad (5.18)$$

$$x_{4,k+1} = x_{4,k} \quad (5.19)$$

$$x_{5,k+1} = x_{5,k} \quad (5.20)$$

$$y_{k+1} = R_L x_{1,k+1} x_{4,k+1} \quad (5.21)$$

olarak kesikli zamanda ifade edilmiştir. Burada w_k ve v_k sıfır ortalamalı beyaz gürültü terimleridir. Bu gürültü terimlerinin eş-değişke değerleri ise genişletilmiş Kalman filtresinin ayar parametreleri olarak kullanılabilir. Kesikli formda elde edilen

durum denklemlerine genişletilmiş Kalman filtre yöntemi (Ek 1) uygulanarak batarya parametrelerinin kestirimi yoluna gidilmiştir.

5.1.2. Batarya doluluk durumu ve batarya parametrelerinin birlikte kestirim simülasyon sonuçları

Önceki bölümde elde edilen dinamik denklemler esas alınarak sistemin simülasyonu yapılmıştır. Örnekleme zamanı, $T=0.1$ saniye olarak alınmıştır. Bölüm 4'teki simülasyon çalışmalarında, eğer R_dC_d 'nin değeri biliniyorsa ve V_{soc} başlangıç değeri doğru veriliyorsa sistem, bataryanın doluluk durumunu belirli bir zaman gecikmesi ile hesaplayabiliyordu. Fakat doğru sonuçlar için, R_dC_d 'nin önceden belirlenmesi gerekmektedir. Önce, birlikte kestirim algoritmasının R_dC_d parametresinin ilk değerine karşı aşırı duyarlı olduğunu ortaya koymak için, Kalman filtre başlangıç değerinde farklı iklendirmeler yaparak üç ayrı simülasyon koşturulmuştur. Bu üç simülasyonda da model başlangıç değerleri aşağıdaki gibi alınmıştır:

$$x_1(0) = 1.36 \quad (5.22)$$

$$x_2(0) = 1 \quad (5.23)$$

$$x_3(0) = \frac{1}{7560} \quad (5.24)$$

$$x_4(0) = \frac{1}{0.065 + 1.00} \quad (5.25)$$

$$x_5(0) = \frac{1}{500} \quad (5.26)$$

R_dC_d 'nin farklı iklendirmeleri için elde edilen simülasyon sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Şekil 5.2'de görülen birinci simülasyonda, bütün durum değişkenlerinin, başlangıç değerleri ile Kalman filtre başlangıç değerleri aynı alınarak batarya doluluk durumunun kestirimi yapılmıştır. Bu durumda, kestirim sonucunda elde edilen batarya doluluk durumu, Şekil 5.1'de görülen devrenin V_{soc} gerilim değerinin

aynısıdır. Şekil 5.2 için durum değişkenlerinin, Kalman filtre başlangıç değerleri şöyledir:

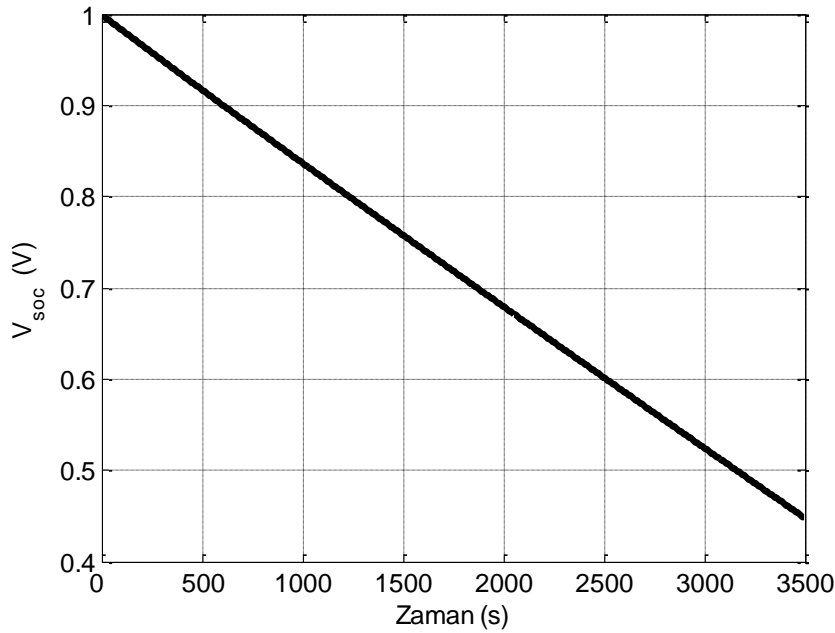
$$\hat{x}_1(0) = 1.36 \quad (5.27)$$

$$\hat{x}_2(0) = 1 \quad (5.28)$$

$$\hat{x}_3(0) = \frac{1}{7560} \quad (5.29)$$

$$\hat{x}_4(0) = \frac{1}{0.065 + 1.00} \quad (5.30)$$

$$\hat{x}_5(0) = \frac{1}{500} \quad (5.31)$$



Şekil 5.2. Birinci simülasyonda elde edilen V_{soc} grafiği.

Şekil 5.3'te görülen ikinci simülasyonda, durum değişkenlerinin, Kalman filtre başlangıç değerleri belirlenirken R_b , C_d ve V_{soc} parametrelerinin değerleri %10 oranında hatalı olarak seçilmiş ve batarya doluluk durumunun kestirimi yapılmıştır. Burada $R_d C_d$ parametresi için Kalman filtre başlangıç değeri, modelin başlangıç değeri ile aynı alınmıştır. Bu durumda, kestirim sonucunda elde edilen batarya doluluk durumu, Şekil 5.1'de görülen devrenin V_{soc} gerilim değerini, yaklaşık 300s

gibi bir zaman gecikmesi ile doğru olarak kestirebilmektedir. Şekil 5.3 için durum değişkenlerinin, Kalman filtre başlangıç değerleri şöyledir:

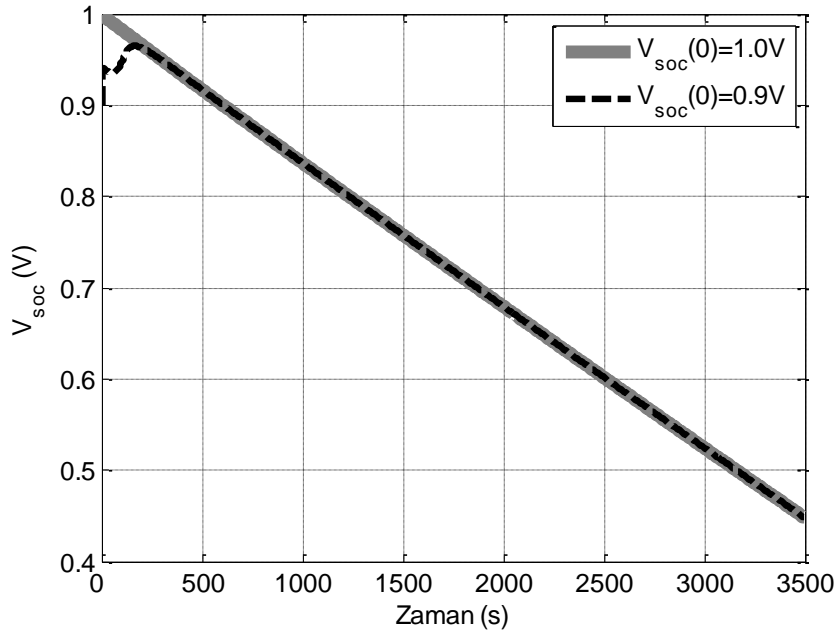
$$\hat{x}_1(0) = 1.36 \quad (5.32)$$

$$\hat{x}_2(0) = 0.9 \quad (5.33)$$

$$\hat{x}_3(0) = \frac{1}{7560 * 0.9} \quad (5.34)$$

$$\hat{x}_4(0) = \frac{1}{(0.065 * 0.9) + 1.00} \quad (5.35)$$

$$\hat{x}_5(0) = \frac{1}{500} \quad (5.36)$$



Şekil 5.3. İkinci simülasyonda elde edilen V_{soc} grafiği.

Şekil 5.4'de görülen üçüncü simülasyonda, durum değişkenlerinin, Kalman filtre başlangıç değerleri belirlenirken R_b , C_d ve V_{soc} parametrelerinin değerleri %10 oranında hatalı olarak seçilmiş ve batarya doluluk durumunun kestirimi yapılmıştır. Burada $R_d C_d$ parametresi için, Kalman filtre başlangıç değeri de %10 hatalı olarak seçilmiştir. Bu durumda, kestirim sonucunda elde edilen batarya doluluk durumu, Şekil 5.1'de görülen devrenin V_{soc} gerilim değerini doğru olarak kestirememektedir. Şekil 5.4 için durum değişkenlerinin, Kalman filtre başlangıç değerleri şöyledir:

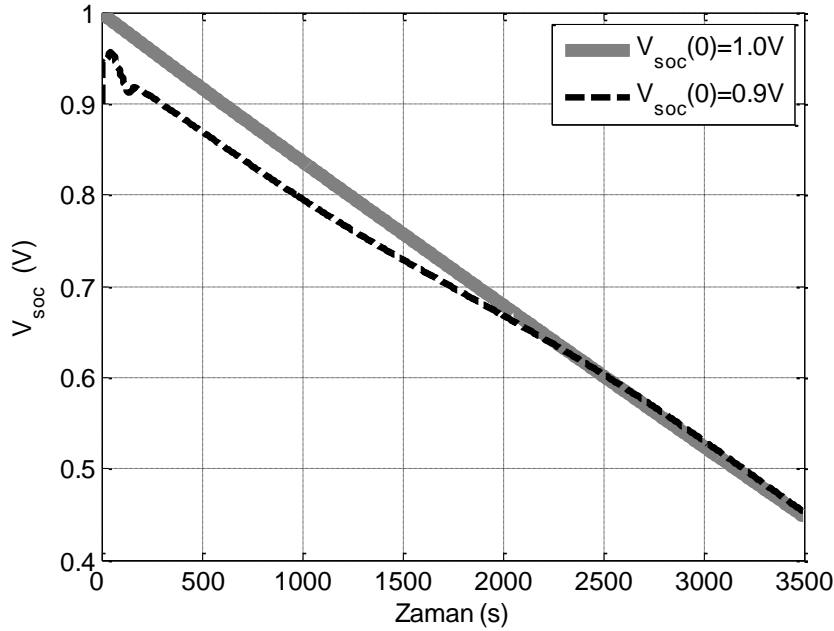
$$\hat{x}_1(0) = 1.36 \quad (5.37)$$

$$\hat{x}_2(0) = 0.9 \quad (5.38)$$

$$\hat{x}_3(0) = \frac{1}{7560 * 0.9} \quad (5.39)$$

$$\hat{x}_4(0) = \frac{1}{(0.065 * 0.9) + 1.00} \quad (5.40)$$

$$\hat{x}_5(0) = \frac{1}{500 * 0.9} \quad (5.41)$$



Şekil 5.4. Üçüncü simülasyonda elde edilen V_{soc} grafiği.

Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü gibi $R_d C_d$ değerinin önceden bilinmediği durumda kestirim algoritmasında yakınsama problemleri görülmüştür. Bu nedenle, Bölüm 3.6.1'de önerilen yöntem ile $T_d=R_d C_d$ parametresinin önceden belirlenebileceği öngörülmüş ve modelde kullanılan durum değişkeni sayısı beşten dörde indirgenmiştir. Sistemin yeni durum denklemleri ve durum değişkenleri şu şekildedir:

$$\dot{V}_{cd} = -\frac{1}{R_d C_d} V_{cd} + \frac{m}{R_d C_d} V_{soc} + \frac{n}{R_d C_d} - \frac{1}{C_d} i_b \quad (5.42)$$

$$\dot{V}_{\text{soc}} = -\frac{1}{C_{\text{soc}}R_{\text{sd}}}V_{\text{soc}} - \frac{1}{C_{\text{soc}}}i_b \quad (5.43)$$

$$x_1 = V_{\text{cd}} \quad (5.44)$$

$$x_2 = V_{\text{soc}} \quad (5.45)$$

$$x_3 = \frac{1}{C_d} \quad (5.46)$$

$$x_4 = \frac{1}{R_b + R_L} \quad (5.47)$$

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T_d}x_1 + \frac{m}{T_d}x_2 + \frac{n}{T_d} - x_3i_b \quad (5.48)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{C_{\text{soc}}}i_b \quad (5.49)$$

$$\dot{x}_3 = 0 \quad (5.50)$$

$$\dot{x}_4 = 0 \quad (5.51)$$

Burada, $T_d=R_dC_d$ şeklinde ifade edilmektedir. Ayrıca m , n , C_{soc} ve R_L parametrelerinin de bilindiği varsayılmaktadır. Devrenin çıkış denklemi de şu şekildedir:

$$y = R_L x_1 x_4 \quad (5.52)$$

Sistemi kesikli formda aşağıdaki gibi gösterirsek,

$$x_{k+1} = f(x_k) + w_k \quad (5.53)$$

$$y_{k+1} = g(x_{k+1}) + v_{k+1} \quad (5.54)$$

durum denklemleri şu şekilde olur:

$$x_{1,k+1} = x_{1,k} + T \left(-\frac{1}{T_d}x_{1,k} + \frac{m}{T_d}x_{2,k} + \frac{n}{T_d} - i_{b,k}x_{3,k} \right) \quad (5.55)$$

$$x_{2,k+1} = x_{2,k} - \frac{T}{C_{soc}} i_{b,k} \quad (5.56)$$

$$x_{3,k+1} = x_{3,k} \quad (5.57)$$

$$x_{4,k+1} = x_{4,k} \quad (5.58)$$

$$y_{k+1} = R_L x_{1,k+1} x_{4,k+1} \quad (5.59)$$

Bu devre modeline, önceki bölümdeki gibi genişletilmiş Kalman filtre yöntemi uygulanabilir. Durum değişkenlerinin hatalı başlangıç değerleri için bile belli bir zaman gecikmesi ile bataryanın doluluk durumu az bir hata ile hesaplanabilmektedir. Kalman filtre başlangıç değerinde farklı iklendirmeler yapılarak iki ayrı simülasyon koşturulmuştur. Bu iki simülasyonda da model başlangıç değerleri aşağıdaki gibi alınmıştır:

$$x_1(0) = 1.36 \quad (5.60)$$

$$x_2(0) = 1 \quad (5.61)$$

$$x_3(0) = \frac{1}{7560} \quad (5.62)$$

$$x_4(0) = \frac{1}{0.065 + 1.00} \quad (5.63)$$

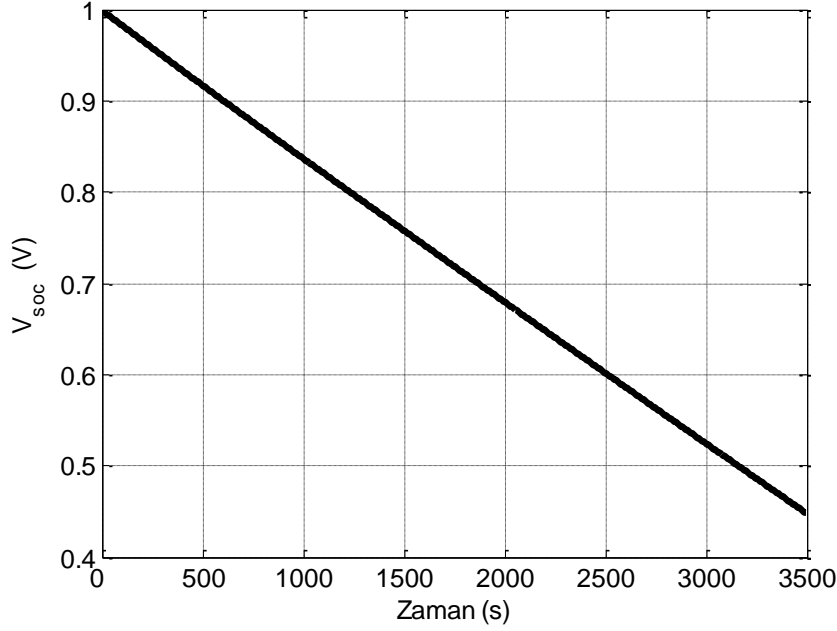
Şekil 5.5'te görülen birinci simülasyonda, bütün durum değişkenlerinin, başlangıç değerleri ile Kalman filtre başlangıç değerleri aynı alınarak batarya doluluk durumunun kestirimi yapılmıştır. Bu durumda, kestirim sonucunda elde edilen batarya doluluk durumu, Şekil 5.1'de görülen devrenin V_{soc} gerilim değerinin aynısıdır. Şekil 5.5 için durum değişkenlerinin, Kalman filtre başlangıç değerleri şöyledir:

$$\hat{x}_1(0) = 1.36 \quad (5.64)$$

$$\hat{x}_2(0) = 1 \quad (5.65)$$

$$\hat{x}_3(0) = \frac{1}{7560} \quad (5.66)$$

$$\hat{x}_4(0) = \frac{1}{0.065 + 1.00} \quad (5.67)$$



Şekil 5.5. Birinci simülasyonda (4 durum değişkenli model) elde edilen V_{soc} grafiği.

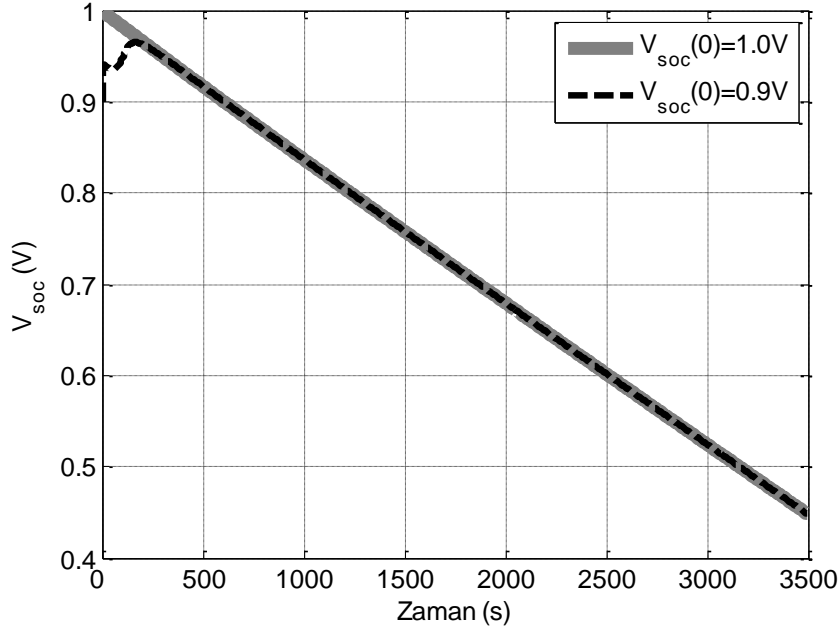
Şekil 5.6'da görülen ikinci simülasyonda, durum değişkenlerinin, Kalman filtre başlangıç değerleri belirlenirken R_b , C_d ve V_{soc} parametrelerinin değerleri %10 oranında hatalı olarak seçilmiş ve batarya doluluk durumunun kestirimi yapılmıştır. Bu durumda, kestirim sonucunda elde edilen batarya doluluk durumu, Şekil 5.1'de görülen devrenin V_{soc} gerilim değerini, yaklaşık 300s gibi bir zaman gecikmesi ile doğru olarak kestirebilmektedir. Şekil 5.6 için durum değişkenlerinin, Kalman filtre başlangıç değerleri şöyledir:

$$\hat{x}_1(0) = 1.36 \quad (5.68)$$

$$\hat{x}_2(0) = 0.9 \quad (5.69)$$

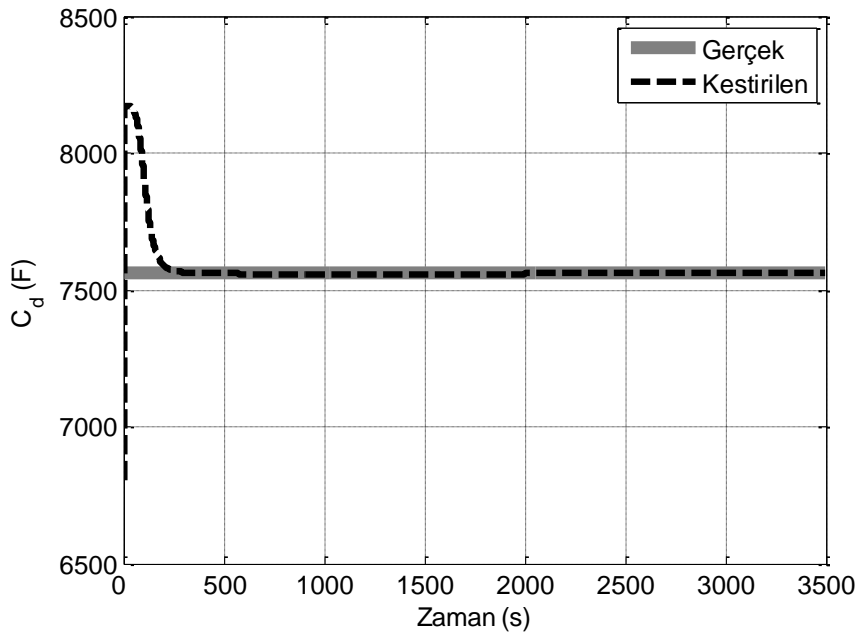
$$\hat{x}_3(0) = \frac{1}{7560 * 0.9} \quad (5.70)$$

$$\hat{x}_4(0) = \frac{1}{(0.065 * 0.9) + 1.00} \quad (5.71)$$



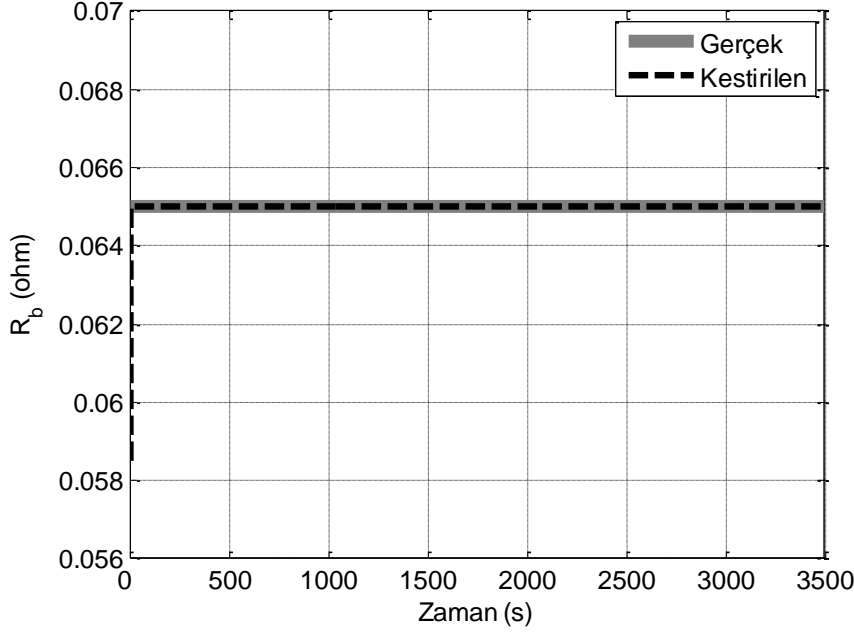
Şekil 5.6. İkinci simülasyonda (4 durum değişkenli model) elde edilen V_{soc} grafiği.

İkinci simülasyon sonucunda elde edilen C_d kestirim değeri Şekil 5.7’de görülmektedir. C_d ’nin Kalman filtre başlangıç değeri %10 hatalı olmasına rağmen, kestirim algoritması, C_d ’nin değerini 300s gibi bir zaman gecikmesi ile doğru olarak kestirebilmektedir.



Şekil 5.7. İkinci simülasyon sonucunda (4 durum değişkenli model) kestirilen C_d parametresi.

İkinci simülasyon sonucunda elde edilen R_b kestirim değeri Şekil 5.8’de görülmektedir. R_b ’nin Kalman filtre başlangıç değeri %10 hatalı olmasına rağmen, kestirim algoritması, R_b ’nin değerini 50s gibi bir zaman gecikmesi ile doğru olarak kestirebilmektedir.



Şekil 5.8. İkinci simülasyon sonucunda (4 durum değişkenli model) kestirilen R_b parametresi.

Burada önerilen birlikte kestirim modeli, Bölüm 3’te önerilen parametre kestirim modeline benzemekle birlikte tamamen aynı değildir. Bölüm 3.6.3’teki simülasyon çalışmasında üç tane durum değişkeni kullanılmıştı. Burada kullanılan durum değişkeni sayısı dördür. Ayrıca Bölüm 3.6.3’te, R_b direnci buradakinden farklı olarak tek başına bir durum değişkeni olarak seçilmişti. Bunların bir sonucu olarak iki kestirim modelinin çıkış denklemleri de birbirinden farklıdır.

5.2. Test Bataryası İçin Batarya Doluluk Durumunun ve Batarya Parametrelerinin Birlikte Kestirim Deneysel Sonuçları

5.2.1. Durum denklemleri

Kullanılan devre modelinin durum denklemleri şu şekildedir:

$$\dot{V}_{cd} = -\frac{1}{R_d C_d} V_{cd} + \frac{m}{R_d C_d} V_{soc} + \frac{n}{R_d C_d} - \frac{1}{C_d} i_b \quad (5.72)$$

$$\dot{V}_{\text{soc}} = -\frac{1}{R_{\text{sd}}C_{\text{soc}}}V_{\text{soc}} - \frac{1}{C_{\text{soc}}}i_b \quad (5.73)$$

Eğer durum değişkenleri aşağıdaki gibi seçilirse:

$$x_1 = V_{\text{cd}} \quad (5.74)$$

$$x_2 = V_{\text{soc}} \quad (5.75)$$

$$x_3 = \frac{1}{C_d} \quad (5.76)$$

$$x_4 = R_b \quad (5.77)$$

durum denklemleri şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T_d}x_1 + \frac{m}{T_d}x_2 + \frac{n}{T_d} - x_3i_b \quad (5.78)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{C_{\text{soc}}}i_b \quad (5.79)$$

$$\dot{x}_3 = 0 \quad (5.80)$$

$$\dot{x}_4 = 0 \quad (5.81)$$

burada, bataryanın açık devre durumunda boşalma miktarının çok düşük olduğu

varsayılarak, R_{sd} değeri çok büyük kabul edilmiş ve “ $-\frac{1}{C_{\text{soc}}R_{\text{sd}}}V_{\text{soc}}$ ” terimi ihmal

edilmiştir. Devrenin çıkış denklemi de şu şekildedir:

$$y = V_b = V_{\text{cd}} - R_b i_b \quad (5.82)$$

$$y = x_1 - x_4 i_b \quad (5.83)$$

Görüldüğü gibi, deneysel çalışmalar için esas alınan modelin dinamik özelliği, simülasyon çalışmalarına esas alınan model ile aynı olmak ile birlikte, yük direncinin bilindiği durumda yük akımı ile yük geriliminin birbirinden bağımsız

olmadığı dikkate alınmış ve yük akımı (i_b) bir girdi değişkeni, yük gerilimi (V_b) ise bir çıktı olarak yazılmıştır. Böylece, dinamik modelin çıktı denklemindeki çarpım türü doğrusal olmama durumu ortadan kalkmıştır. Durum denklemlerinin kesikli zamanda gösterimi ise aşağıdaki gibidir.

$$x_{1,k+1} = x_{1,k} + T \left(-\frac{1}{T_d} x_{1,k} + \frac{m}{T_d} x_{2,k} - i_{b,k} x_{3,k} + \frac{n}{T_d} \right) \quad (5.84)$$

$$x_{2,k+1} = x_{2,k} + T \left(-\frac{1}{C_{soc}} i_{b,k} \right) \quad (5.85)$$

$$x_{3,k+1} = x_{3,k} \quad (5.86)$$

$$x_{4,k+1} = x_{4,k} \quad (5.87)$$

$$y_{k+1} = x_{1,k+1} - i_{b,k+1} x_{4,k+1} \quad (5.88)$$

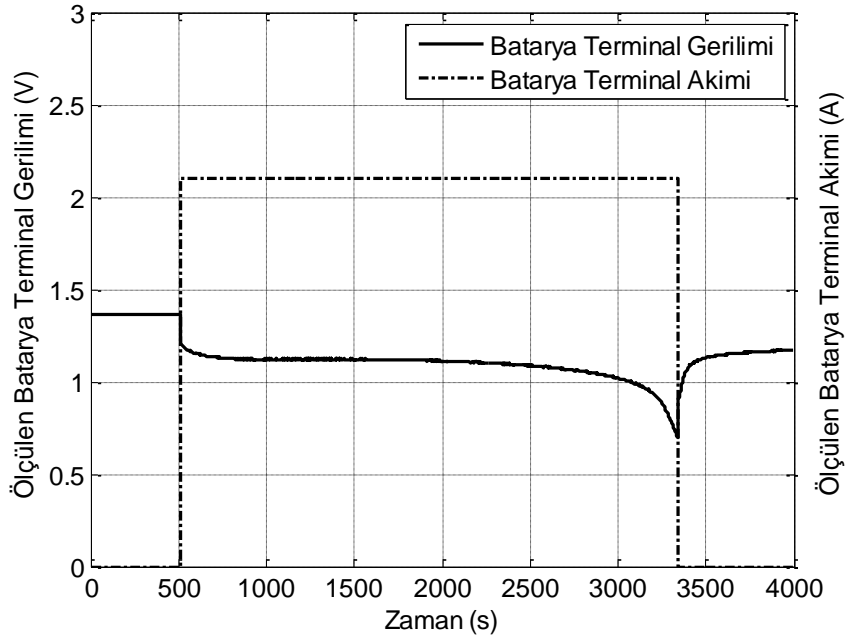
burada, T_d yayılım zaman sabitini ifade etmektedir ve C_d ile R_d 'nin çarpımına eşittir. Bu değer batarya testlerinden elde edilmektedir ve kestirim algoritmasında sabit bir parametre olarak kullanılmaktadır.

5.2.2. Deneysel sonuçlar

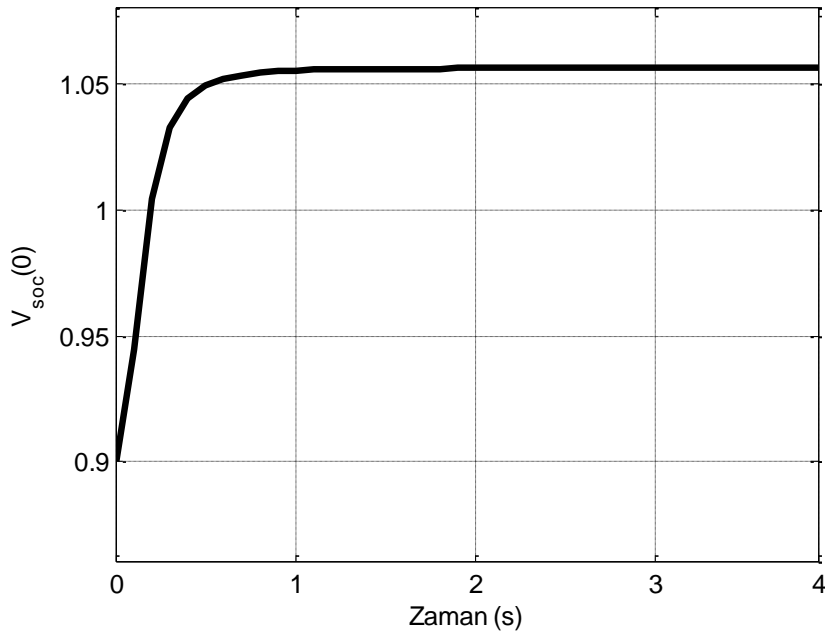
2100mAh'lik, Ni-Mh, 16 adet batarya için yapılan testlerden, ortalama değer olarak, batarya doluluk durumu (SOC) %0 iken, açık devre batarya terminal gerilimi (V_{oc}) 1.25V, batarya doluluk durumu (SOC) %100 iken, açık devre batarya terminal gerilimi 1.36V olarak belirlenmiştir. Bölüm 4.1.2'de önerilen yöntem kullanılarak T_d zaman sabiti 500s olarak hesaplanmıştır.

Batarya doluluk durumu ve parametre kestirimi için, test bataryalarından bir tanesinin ölçülen batarya terminal gerilimi ve batarya terminal akımı Şekil 5.9'da görülmektedir.

Bölüm 4.2.3.1'de önerilen yöntem ve Şekil 5.9'da görülen yükleme verileri kullanılarak, batarya doluluk durumunun başlangıç değeri Şekil 5.10'da görüldüğü gibi kestirilmiştir.

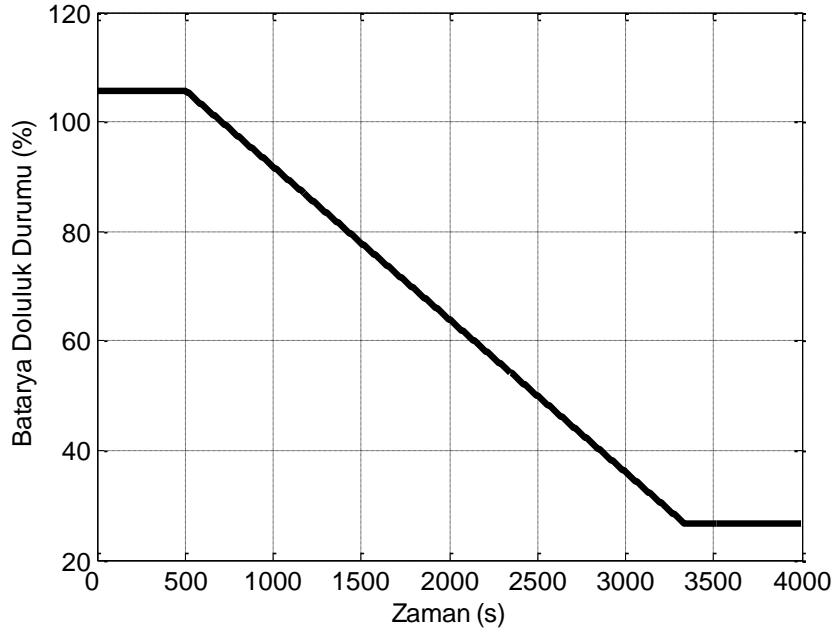


Şekil 5.9. Batarya doluluk durumu ve parametre kestirimi için ölçülen batarya terminal gerilimi ve batarya terminal akımı.

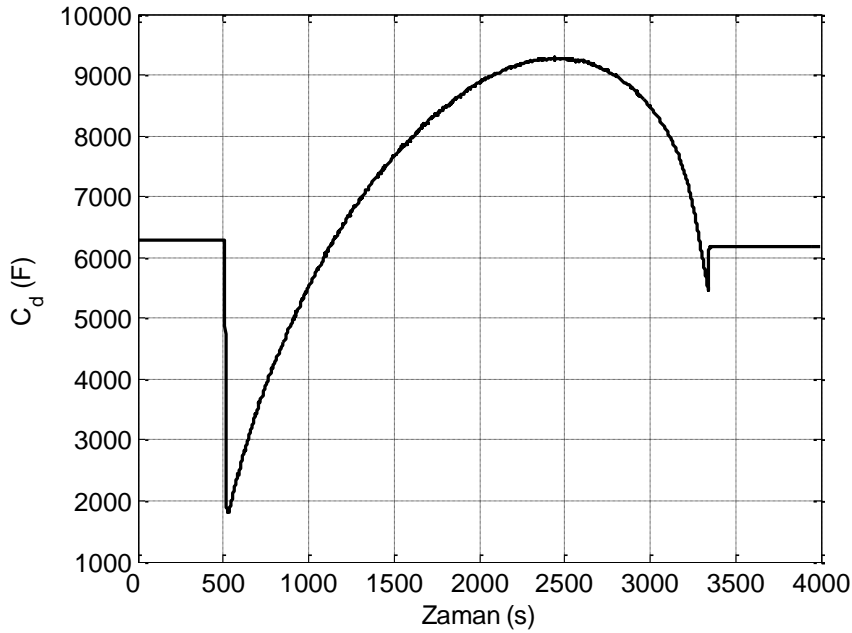


Şekil 5.10. V_{soc} 'un başlangıç değerinin hesaplanması.

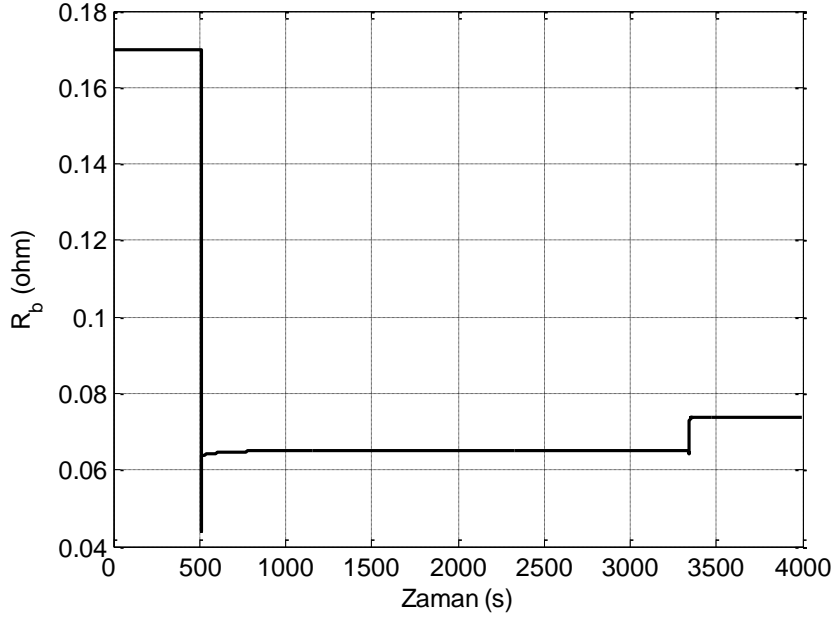
Şekil 3.12'de önerilen batarya modeline, Kalman filtre tabanlı bir algoritma uygulanarak batarya doluluk durumu ve parametre kestirimi birlikte yapılmıştır. Şekil 5.11'te batarya doluluk durumu kestirim eğrisi görülmektedir. Kestirimi sonucunda elde edilen C_d Şekil 5.12'de, R_b ise Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Test bataryası için batarya doluluk durumunun ve batarya parametrelerinin birlikte kestirim deneysel sonuçları. Batarya doluluk durumu kestirimi.

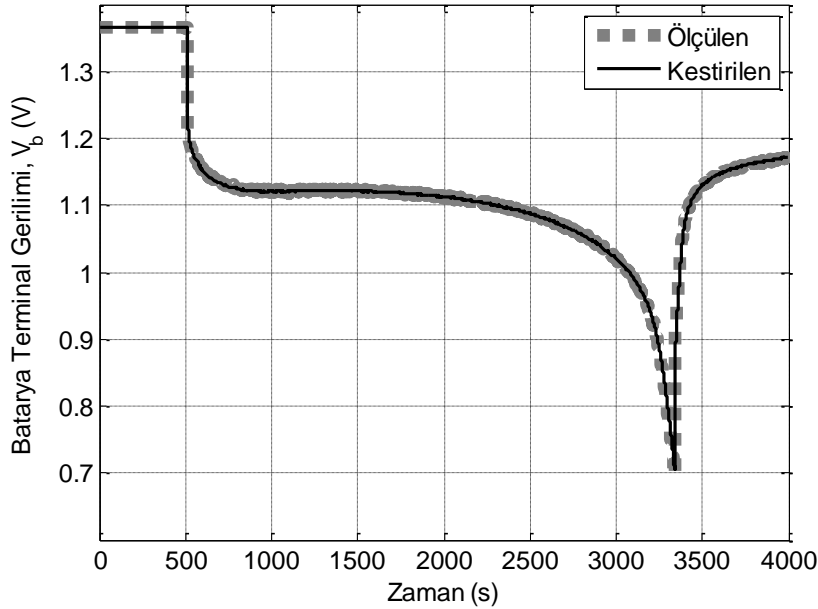


Şekil 5.12. Test bataryası için batarya doluluk durumunun ve batarya parametrelerinin birlikte kestirim deneysel sonuçları. C_d kestirimi.



Şekil 5.13. Test bataryası için batarya doluluk durumunun ve batarya parametrelerinin birlikte kestirim deneysel sonuçları. R_b kestirimi.

Ölçülen ve kestirim sonucunda hesaplanan batarya terminal gerilimi eğrileri ise Şekil 5.14'te verilmiştir. Bu sonuca göre, batarya doluluk durumu ve parametre kestirim sonuçlarının tutarlı olduğu söylenebilir.



Şekil 5.14. Test bataryası için batarya doluluk durumunun ve batarya parametrelerinin birlikte kestirim deneysel sonuçları. Ölçülen ve kestirim sonucunda hesaplanan batarya terminal gerilimi.

Burada önerilen yaklaşım, batarya doluluk durumunu batarya parametreleri ile birlikte kestirmektedir. Bu özelliği nedeni ile, batarya parametrelerinde oluşabilecek değişiklikleri de kendiliğinden izleyebilmektedir. Belirli aralıklarla yayılım zaman sabitinin (T_d) yeniden hesaplanması ile, bu kestirim algoritması çevrimiçi olarak sürekli kullanılabilir niteliktedir. Aşırı akım çekimi, sıcaklık vb. nedenlerle batarya parametrelerinde oluşacak değişiklikler, doluluk durum kestirimini etkilemeyecektir. Önerilen yaklaşımın, bataryanın sürekli olarak yükte olduğu sistemleri gözetlemek için uygun bir yapıda olduğu değerlendirilmektedir.

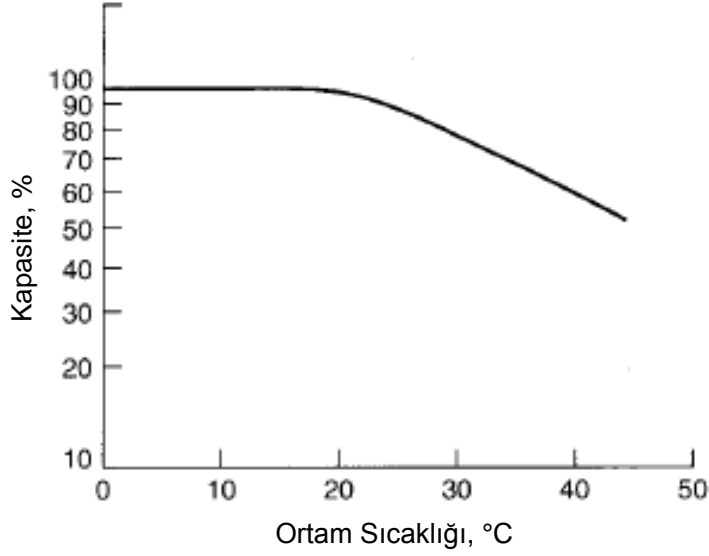
6. BATARYA SAĞLIK DURUMUNUN SINIFLANDIRMA YAKLAŞIMLARI İLE BELİRLENMESİ

Bataryanın sağlık durumu (State-of-Health (SOH)), bataryanın kapasitesini dolayısıyla performansı ve ömrünü etkileyen önemli bir etkidir. SOH tahmini, bataryadan ihtiyaç duyulan performansın sağlanıp sağlanamayacağı veya bataryanın ne kadar yıpranmış olduğunun belirlenmesinde kullanılmaktadır. Batarya sağlık durumunu etkileyen değişik etkenler bulunmaktadır. Bunlar kısaca aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde, batarya sağlık durumunun belirlenmesinde kullanılmak üzere geliştirilen, tekli ve çoklu sınıflandırma yaklaşımları da anlatılmaktadır.

6.1. Batarya Sağlık Durumu ve Sağlık Durumunu Etkileyen Etkenler

Batarya sağlık durumu, bataryanın kapasitesi ve bu kapasitenin ne kadarının kullanılabilir olduğu ile ilgilidir. Diğer bir ifade ile bataryanın sağlık durumu, bataryanın kullanılabilir kapasitesidir. Dolma-boşalma akımının büyüklüğü, bataryayı doldurma-boşaltma sırasındaki ortam sıcaklığı, boşaltma derinliği, batarya doldurma denetim yöntemi, bataryanın aşırı doldurma ve aşırı boşaltmaya maruz kalması, bataryanın depolanması sırasındaki koşullar ve depolama süresi gibi durumlar, batarya sağlık durumunu diğer bir ifade ile batarya kapasitesini etkileyen etkenlerdir. Batarya sağlık durumunu etkileyen bu etkenler, aşağıda maddeler halinde anlatılmaktadır.

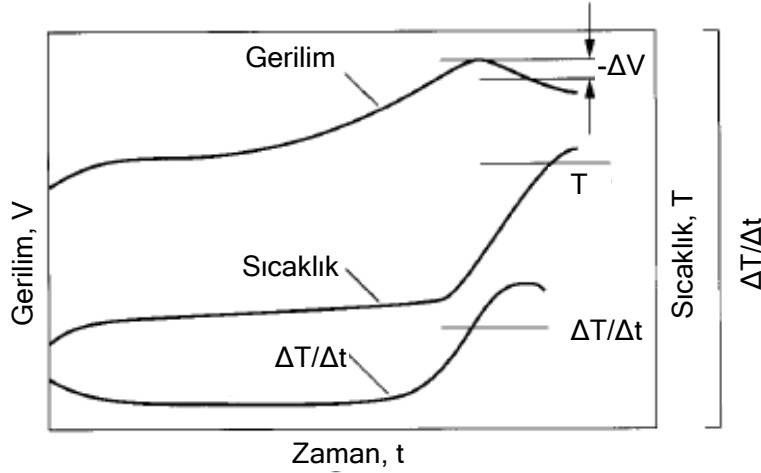
- Dolma-boşalma akımının büyüklüğü: Ni-Mh bataryalarda, yüksek doldurma akımlarında aşırı doluluk durumunda ortaya çıkan oksijen tekrar tepkimeye giremez ve batarya basıncında ve sıcaklığında aşırı artış meydana gelir. Bu durum bataryanın yıpranmasına neden olur.
- Dolma-boşalma sırasındaki ortam sıcaklığı: Bataryalar, genellikle oda sıcaklığı civarında çalışacak şekilde tasarlanırlar. Dolma ve boşalma sırasındaki aşırı sıcaklık, bataryanın kapasitesini olumsuz yönde etkiler. Batarya kapasitesinin, ortam sıcaklığına bağlı olarak değişimini gösteren tipik bir eğri Şekil 6.1'de verilmiştir. Bataryalar için normal ortam sıcaklığı 20°C' dir.



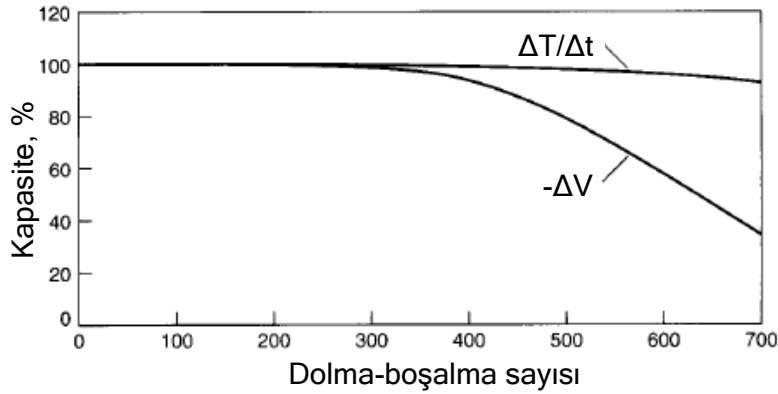
Şekil 6.1. Ortam sıcaklığının batarya kapasitesi üzerine etkisi.

- Boşalma derinliği: Ni-Mh bataryalar gibi bazı bataryalarda sonlanma gerilimine ulaşmadan yapılan kısmi boşaltmalar, bataryanın kapasitesinde azalmaya neden olur. Bu durum, “hafıza” etkisi olarak da adlandırılır. Bu yüzden bu tür bataryaların % 100 boşaltılması batarya ömrünün uzaması açısından yararlıdır. Lityum türevi bataryalarda ise, bataryanın tamamen boşaltılması gerekli değildir.

- Batarya doldurma denetim yöntemi: Bataryalarda hangi doldurma denetiminin yapıldığı da, bataryanın sağlık durumunu etkileyen etkenlerdendir. Aşırı doldurma durumunda ortaya çıkan ani sıcaklık artışı, batarya performansını azaltır. Aşırı sıcaklık artışının önlenmesi için, bataryalar Şekil 6.2’de (Linden, 1995) görüldüğü gibi, batarya terminal geriliminde, ΔV kadarlık bir gerilim düşümü oluşuncaya kadar doldurulabilir. Diğer bir batarya doldurma yöntemi ise yine Şekil 6.2’de görüldüğü gibi, batarya sıcaklığının, T gibi belirlenen bir seviyeye ulaşması durumunda bataryanın doldurulma işlemine son verilmesidir. Başka bir yöntem olarak da, $\Delta T/\Delta t$ batarya sıcaklık değişim hızının takip edilmesidir. Şekil 6.2’de Ni-Mh bataryalarda kullanılan doldurma denetim tekniklerine göre sıcaklık artışı gösterilmiştir. Bu durumun batarya ömrüne etkisi Şekil 6.3’te (Linden, 1995) gösterilmiştir. Buna göre, batarya sağlık durumu açısından $\Delta T/\Delta t$ yöntemi, bataryayı ΔV yönteminden daha az yıpratmaktadır.



Şekil 6.2. Batarya doldurma denetim yöntemlerindeki sıcaklık değişimleri.



Şekil 6.3. ΔV ve $\Delta T/\Delta t$ batarya doldurma denetim tekniklerinin batarya ömrüne etkisinin karşılaştırılması.

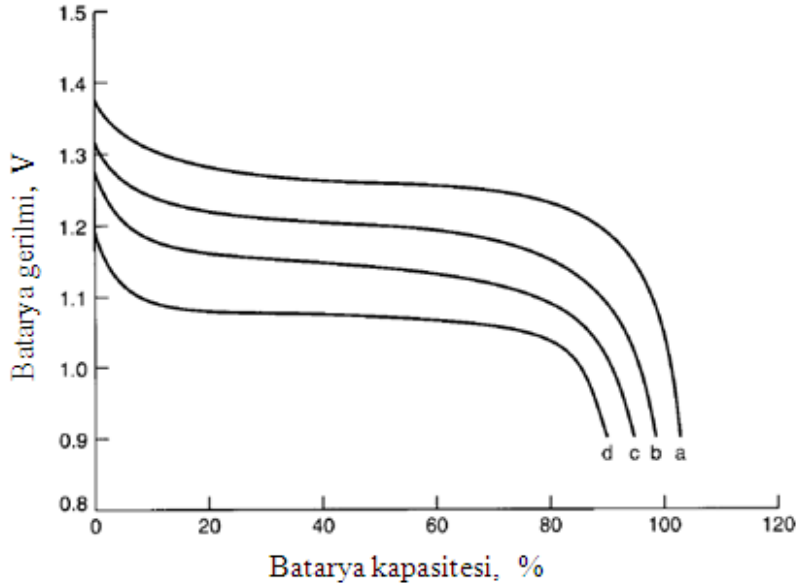
- Aşırı doluluk ve aşırı boşalmaya maruz kalma: Bu gibi durumlarda bataryanın iç yapısında meydana gelen kimyasal ve fiziksel değişimler, bataryanın sağlık durumunu önemli bir şekilde etkilemektedir.

- Depolama koşulları ve süresi: Batarya çeşitlerine göre farklı depolama şekilleri vardır. Kurşun-asit bataryalar tam dolu olarak ve "tapping-charge" uygulanarak depolanırken, lityum ve nikel türevi bataryalar %40 doluluk oranıyla serin bir yerde muhafaza edilir. Depolama süresi Ni-Cd için 5 yıl, Ni-Mh için 3 yıldır. Depolama sonrasında Ni-Cd ve Ni-Mh bataryalar kullanılmadan önce tamamen doldurulmalıdırlar. Lityum bataryaların ise depolama sonrasında tamamen doldurulması gerekli değildir. Çok uzun süreli depolamalarda, bataryanın kapasitesi neredeyse sıfırlanabilir ve batarya tamamen kullanılmaz duruma gelebilir.

6.2. Ni-Mh Bataryaların Özellikleri ve Deneysel Çalışma Yöntemleri

6.2.1. Ni-Mh bataryaların boşalma özellikleri

Ni-Mh bataryalar için farklı boşalma akımlarında elde edilen tipik boşalma eğrileri Şekil 6.4'te (Linden, 1995) görülmektedir. Batarya terminal gerilim değeri, çekilen akımın büyüklüğü, ortam sıcaklığı, bataryanın o andaki doluluk durumu gibi etkenlere bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 6.4. Ni-Mh bataryaların kapasite-gerilim karakteristikleri. a) 0.2C; b) 1C; c) 2C; d) 3C.

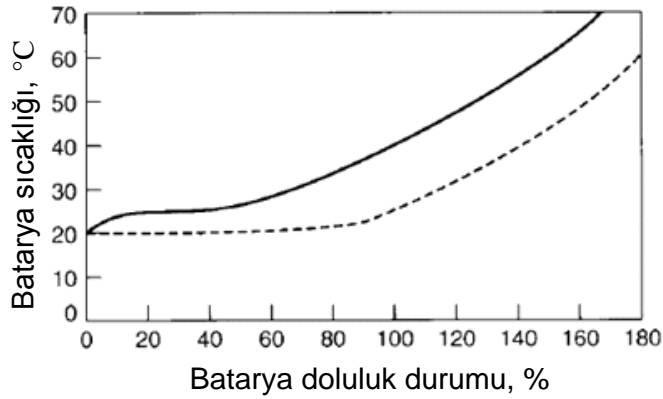
Batarya kapasitesi, çekilen akımın büyüklüğüne, ortam sıcaklığına ve sonlanma gerilimi değerine bağlı olarak değişir. Ni-Mh bataryalar için sonlanma gerilimi 1V'dür. Bu değerin aşağısına inildiğinde kısa vadede nominal kapasite değerinin aşılması mümkün olmasına rağmen, bu durum uzun vadede bataryanın yıpranmasına ve kapasite azalmasına neden olur.

Ni-Mh bataryalarda kapasiteyi etkileyen diğer bir etken de hafıza etkisi olarak bilinen durumdur. Eğer bataryaya sürekli olarak kısmi şekilde dolma-boşalma işlemi uygulanırsa, batarya kapasitesinde azalma meydana gelir. Bunun nedeni, aktif materyalin doldurulmayan bölümünün zaman içinde kristalleşmesi ve bataryanın oluşan bu yeni yapıya bağlı olarak minimum doldurma seviyesini hatırlaması olayıdır. Doldurulmayan yük arttıkça, batarya kapasitesi de azalma eğilimi gösterir.

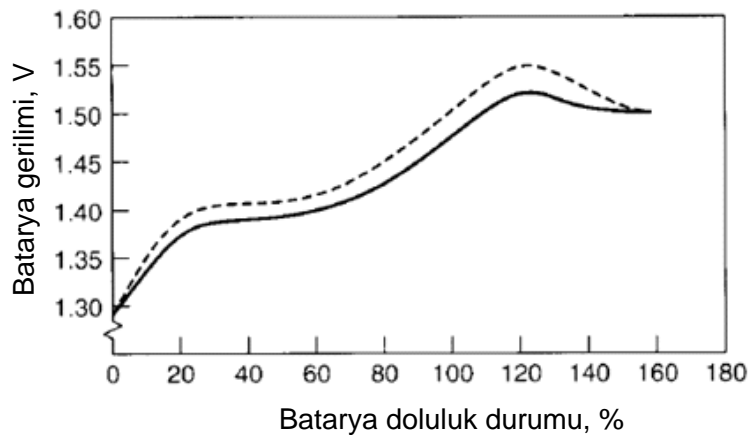
6.2.2. Ni-Mh bataryaların dolum özellikleri

Ni-Mh bataryaların doldurulması işleminde, aşırı doluluk durumu ve buna bağlı olarak ortaya çıkan batarya sıcaklığındaki aşırı artış gibi durumlar batarya sağlık durumunu etkileyen etkenlerdir.

Nikel türevi bataryaların (Ni-Mh ve Ni-Cd bataryalar) dolma özellikleri genel olarak benzer olmalarına rağmen, Ni-Mh bataryalar aşırı doldurulmaya daha duyarlıdır. Bunun sonucu olarak aşırı doluluk durumunda batarya sıcaklığındaki artış çok daha fazladır (Şekil 6.5). Ayrıca batarya terminal gerilimindeki değişim de daha belirgindir (Şekil 6.6) (Linden, 1995).



Şekil 6.5. Ni-Mh ve Ni-Cd bataryaların doluluk-sıcaklık karakteristikleri. Kalın çizgi: Ni-Mh bataryalar için; kesikli çizgi: Ni-Cd bataryalar için.



Şekil 6.6. Ni-Mh ve Ni-Cd bataryaların doluluk-gerilim karakteristikleri. Kalın çizgi: Ni-Mh bataryalar için; kesikli çizgi: Ni-Cd bataryalar için.

Ni-Mh bataryalarda, aşırı dolunun ve batarya sıcaklığındaki aşırı artışın önlenmesi için, dolum denetim teknikleri kullanılmaktadır (Linden, 1995).

- Dolum zamanı denetimi: Belirli bir zaman süresince batarya doldurulur. Bataryanın yük durumu başlangıç seviyesi dikkate alınmalıdır. Genellikle düşük doldurma akımı kullanılır ($<0.2C$).

- ΔV , Gerilim düşüm denetimi: Şekil 6.6'da da görüldüğü gibi batarya dolduktan sonra, terminal geriliminde azalma meydana gelmektedir. Bu denetim tekniğinde, batarya terminal gerilimindeki düşüm $\Delta V=15mV$ mertebesinde olduğu zaman, doldurma işlemi sona erdirilir.

- Sıcaklık denetimi: Bu teknikte batarya sıcaklığı ölçülür. Batarya sıcaklığı belirlenen bir seviyeye geldiğinde (Şekil 6.6) veya sıcaklık artışındaki miktar $\Delta V/\Delta t$, belli bir değere ulaştığında doldurma işlemine son verilir.

Ni-Mh bataryaların doldurulması için farklı yöntemler de mevcuttur (Linden, 1995).

- Yavaş dolum yöntemi: En basit yöntemdir. Batarya yaklaşık $0.1C$ doldurma akımıyla doldurulur. Adaptör benzeri basit DC güç kaynakları kullanılarak, dolum zamanı denetimi uygulanan bir yöntemdir. Piyasada mevcut basit doldurma cihazlarında bu yöntem kullanılır.

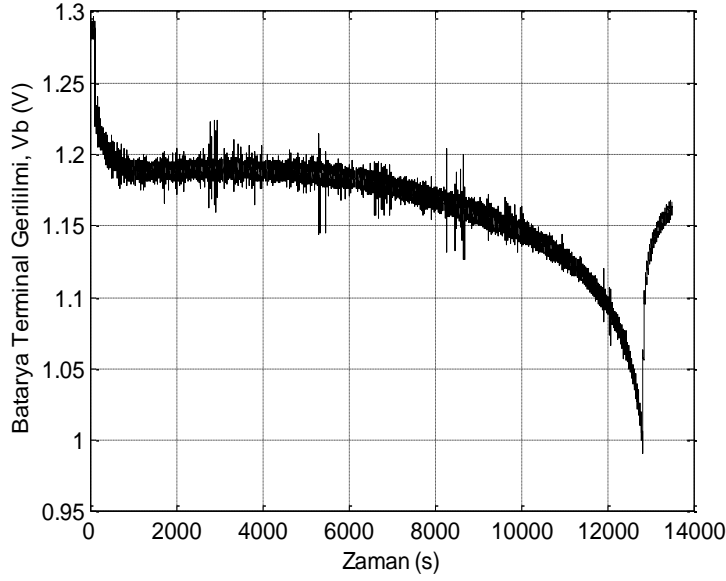
- Hızlı dolum yöntemi: Batarya, $1C$ doldurma akımıyla doldurulur. Aşırı dolunun önlenmesi için ΔV gerilim düşümü denetimi ve/veya sıcaklık denetimi kullanılır. Doldurma süresi bataryanın doluluk seviyesine göre en fazla 1 saattir.

6.2.3. Uygulama bataryalarının boşaltımı

DeneySEL aşamada, 16 adet 2100mAh'lik Ni-Mh batarya temin edilmiş ve batarya doluluk durumu ve parametre kestirimi Bölüm 5'te anlatıldığı gibi yapılmıştır. Bunun için öncelikle bataryalar tamamen boşken ve %100 doluyken terminal gerilimleri ölçülmüştür.

Bataryalar ilk olarak $0.4A$ boşaltma akımında, batarya terminal gerilimi, $1V$ olan sonlanma değerine kadar boşaltılmıştır. Şekil 6.7'de bir uygulama bataryasının, batarya terminal gerilimi ölçülerek elde edilen boşalma eğrisi görülmektedir. Belli

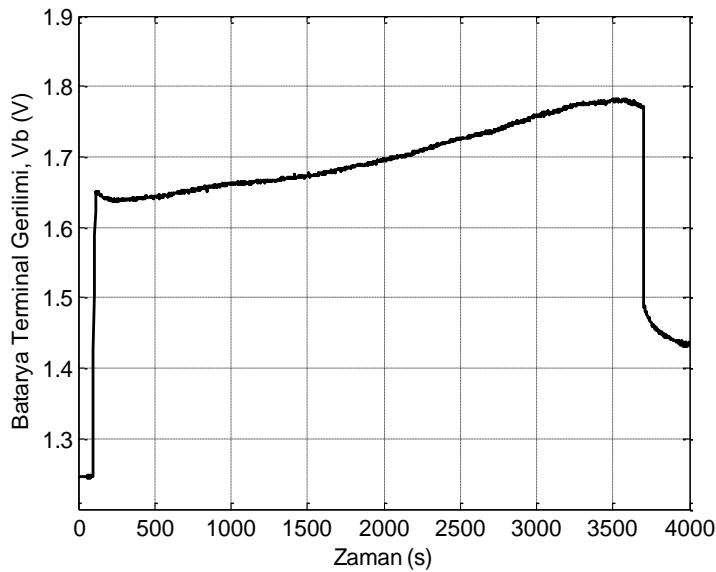
bir dinlenme süresinden sonra batarya terminal gerilimi ölçülmüş ve 1.25V olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.7. Bir uygulama bataryasının, 0.4A boşaltma akımındaki boşalma eğrisi.

6.2.4. Uygulama bataryalarının dolumu

Bataryalar, 2.1A dolum akımıyla tamamen doluncaya kadar doldurulmuştur. Bu işlem sırasında ΔV dolum denetimi yöntemi kullanılmıştır. Şekil 6.8'de, bir uygulama bataryasının dolum eğrisi görülmektedir. Belli bir dinlenme süresinden sonra batarya terminal gerilimi ölçülmüş ve 1.36V olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.8. Bir uygulama bataryasının, 2.1A doldurma akımındaki dolum eğrisi.

Sonuç olarak V_{oc} batarya açık devre gerilimi, batarya tamamen boşken 1.25V, batarya tamamen doluyken 1.36V olarak tespit edilmiştir.

6.2.5 Uygulama bataryalarında parametre kestirimi

Parametre kestirimi için, boş bataryalar 2A doldurma akımıyla 5 dakika doldurulmuştur. 10 dakikalık dinlenme süresinden sonra bu bataryalar 0.5A boşaltma akımıyla 5 dakika boşaltılmıştır. Elde edilen verilere, Bölüm 5.2’te tanımlanan kestirim algoritması uygulanmış ve 16 adet 2100mAh Ni-Mh batarya için batarya R_b , C_d ve T_d parametreleri belirlenmiştir. Hesaplanan batarya parametre değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Hiç kullanılmamış bataryalardan oluşmuş bu batarya grubu, “Grup 0” olarak adlandırılacaktır.

Çizelge 6.1. Grup 0 (hiç kullanılmamış) bataryalar için hesaplanan parametre değerleri.

Batarya	$R_b(m\Omega)$	C_d (F)	T_d (s)
01Grup0	65.53	3607.0	67.11
02Grup0	62.39	3663.1	71.56
03Grup0	57.64	3584.5	86.33
04Grup0	55.42	3595.9	82.89
05Grup0	63.20	3598.6	78.57
06Grup0	58.00	3777.3	77.90
07Grup0	63.50	3788.7	81.28
08Grup0	60.33	3746.5	78.47
09Grup0	57.41	3821.4	75.90
10Grup0	61.92	3391.8	75.11
11Grup0	56.33	3819.1	80.81
12Grup0	55.09	3660.2	71.91
13Grup0	56.90	3658.1	80.50
14Grup0	53.00	3611.0	82.50
15Grup0	54.88	3725.8	80.05
16Grup0	58.56	3698.1	73.90

Batarya sağlık durumunun belirlenmesine yönelik sınamalarda kullanmak amacı ile, Grup 0 içinden seçilen 8 adet bataryaya eskitme testi uygulanmıştır. Eskitme testi prosedürü şu şekildedir: Bataryalar, 4A doldurma akımıyla 5 dakika

doldurulduktan hemen sonra 4A boşaltma akımıyla batarya terminal gerilimi 1.1V olana kadar boşaltılmışlardır. Bu işlem herbir batarya için 10 kez tekrarlanmıştır. Daha sonra bu bataryaların parametre kestirimi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2’de gösterilmiştir. Birinci eskitme testi sonrasında oluşan bataryaların oluşturduğu grup, “Grup 1” olarak anılacaktır.

Çizelge 6.2. Grup 1 (birinci eskitme testi sonrası) bataryalar için hesaplanan parametre değerleri.

Batarya	$R_b(m\Omega)$	$C_d (F)$	$T_d (s)$
09Grup1	106.82	3834.7	62.23
10Grup1	87.65	3775.1	78.79
11Grup1	112.64	3821.3	78.58
12Grup1	63.29	3771.7	80.69
13Grup1	65.71	3801.6	73.42
14Grup1	59.91	4084.5	80.78
15Grup1	63.21	3880.0	84.83
16Grup1	68.22	3887.1	74.25

Eskitme testi uygulanan 8 adet bataryaya, ikinci bir kez aynı eskitme prosedürü uygulanarak, bataryalar daha fazla yıpratılmıştır. bu batarya grubu, “Grup 2” olarak anılacaktır. Daha sonra bu bataryaların parametre kestirimi yapılmıştır. Hesaplanan batarya parametreleri Çizelge 6.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Grup 2 (ikinci eskitme testi sonrası) bataryalar için hesaplanan parametre değerleri.

Batarya	$R_b (m\Omega)$	$C_d (F)$	$T_d (s)$
09Grup2	213.38	4181.5	77.90
10Grup2	207.00	3557.2	73.23
11Grup2	277.19	4037.9	82.81
12Grup2	120.7	4708.0	75.30
13Grup2	71.15	4037.5	60.13
14Grup2	75.47	4293.9	94.69
15Grup2	171.83	3791.9	81.80
16Grup2	101.73	3769.3	82.62

6.3. Batarya Sağlık Durumunun Tekli Sınıflandırma Yaklaşımı İle Belirlenmesi

Tekli sınıflandırma (one-class classification), verilen bir örneğin bir gruba ait olup olmadığı belirlenmesi anlamına gelmektedir. Bu çalışmada, batarya sağlık durumunun tekli sınıflandırma yaklaşımı ile belirlenmesine yönelik bir yöntem önerilmektedir.

Aynı tür ve aynı nominal kapasitede olan ve benzer sağlık durumunda olduğu düşünülen bataryaların oluşturduğu bir grup batarya ele alınsın. Bu durumda aynı tür ve aynı nominal kapasitede olan bir bataryanın, benzer sağlık durumu ile belirlenmiş olan grubun üyesi olarak sayılıp, sayılmayacağı tekli bir sınıflandırma problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Bir önceki bölümde, aynı nominal değere sahip bataryalar ile üç ayrı grup tanımlanmıştı. Bu gruplar sırası ile hiç kullanılmamış bataryalar grubu (Grup 0), yıpratma testleri bir kere uygulanmış bataryalar grubu (Grup 1) ve yıpratma testleri iki kere uygulanmış bataryalar grubudur (Grup 2). Bu gruplar, fabrika çıkışı Ni-Mh bataryalara belirli prosedürlerin uygulanması ile tanımlandığı için, bu grupların kendi içlerinde batarya sağlık durumu açısından benzerlik taşıyacakları konusunda bir kuşku olmasa gerekir. Bu nedenle, daha önceden tanımlanan bu deneysel gruplar, batarya sağlık grupları olarak algılanmış ve verilen bir bataryanın belirli bir sağlık durumuna sahip olup olmadığı belirlenmesi için tekli sınıflandırma yaklaşımı kullanılmıştır.

Bu çalışma, her bir bataryayı parametrik olarak karakterize ettiği için, batarya sağlık gruplarının ölçülen parametrelerinin istatistikleri ile modellenmesi yoluna gidilmiş ve her üç batarya sağlık durumu sınıfının parametre ortalamaları ve parametre eş-değişke matrisleri hesaplanmıştır. x vektörü,

$$x = [R_b, C_d, T_d]^T \quad (6.1)$$

olmak üzere, verili bir bataryanın parametrelerini gösteriyorsa, grup ortalamaları (μ) ve grup eş-değişke matrisleri (P)

$$\mu_i = E(x), \quad x \in \text{grup } i \quad (6.2)$$

$$P_i = E[(x - \mu_i)(x - \mu_i)^T], \quad x \in \text{grup } i \quad (6.3)$$

olarak tanımlanır. Bölüm 6.2.4'te, Çizelge 6.1, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3 ile verilmiş olan parametre değerleri kullanılarak batarya sağlık gruplarına ait parametrik ortalamalar

$$\mu_0 = [0.05876, 3671.7, 77.80]^T \quad (6.4)$$

$$\mu_1 = [0.07843, 3857.0, 76.70]^T \quad (6.5)$$

$$\mu_2 = [0.15481, 4047.2, 78.56]^T \quad (6.6)$$

olarak hesaplanmıştır. Çizelgelerde verilen batarya sağlık sınıflarının eş-değişke matrisleri ise

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1.33 * 10^{-5} & -7.29 * 10^{-2} & -8.82 * 10^{-3} \\ -7.29 * 10^{-2} & 12233 & 46.926 \\ -8.82 * 10^{-3} & 46.926 & 24.62 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 44.73 * 10^{-5} & -78.34 * 10^{-2} & -74.31 * 10^{-3} \\ -78.34 * 10^{-2} & 10288 & 138.17 \\ -74.31 * 10^{-3} & 138.17 & 47.53 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 5.53 * 10^{-3} & -7.11 & 59.46 * 10^{-3} \\ -7.11 & 128320 & 361.7 \\ 59.46 * 10^{-3} & 361.7 & 97.76 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

olarak belirlenmiştir.

Parametreleri "x" ile gösterilen bir bataryanın, belirli bir batarya sağlık sınıfına ait olup olmadığını belirlemek için Mahalanobis uzaklığına dayanan bir ayırtaç fonksiyonu kullanılmıştır. Mahalanobis uzaklığı, x vektörü ile belirlenen bir noktanın, ortalaması (μ) ve eş-değişke matrisi (P) ile istatistiksel olarak karakterize edilmiş olan bir dağılıma olan uzaklığını gösteren bir büyüklüktür ve

$$D(x) = \sqrt{(x - \mu)^T P^{-1} (x - \mu)} \quad (6.10)$$

ile verilir. Bu çalışmada, Mahalanobis uzaklığının karesi

$$d(x) = (x - \mu)^T P^{-1}(x - \mu) \quad (6.11)$$

tek sınıflı sınıflandırma için bir ayırtaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır (Fukunaga, 1990). Bu ayırtaç fonksiyonunun belirli bir eşik (a) değerinden küçük olması, x ile gösterilen ölçümün ilgili sınıfın bir üyesi olduğu, eşğin aşılması durumunda ise x ile gösterilen parametre vektörünün, ilgili sınıfa ait olmadığı şeklinde yorumlanacaktır.

$$d(x) \leq a \Rightarrow x \in \text{Grup} \quad (6.12)$$

$$d(x) > a \Rightarrow x \notin \text{Grup} \quad (6.13)$$

Ayırtaç fonksiyonu olarak, Mahalanobis uzaklığının karesinin seçilmesinin temel nedeni, x değişkeninin gauss dağılımlı olması durumunda $z=d(x)$ değişkeninin dağılımının ki-kare dağılımlı olmasından kaynaklanmaktadır. n-boyutlu bir uzayda, ki-kare dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (pdf)

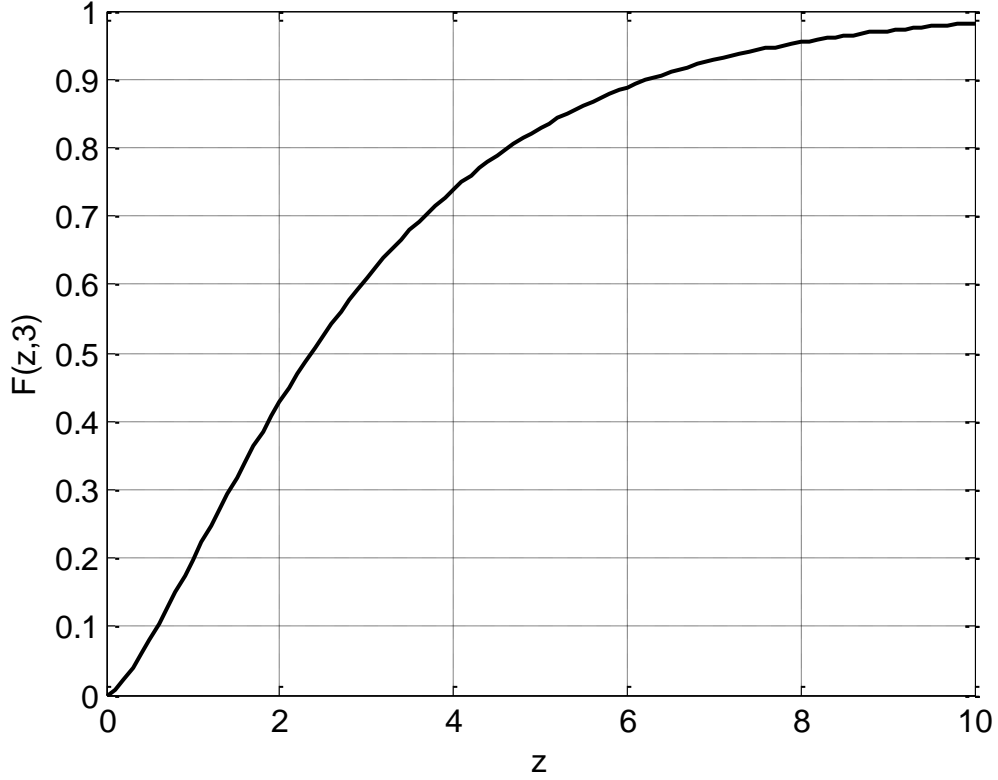
$$f(z,n) = \begin{cases} \frac{1}{2^{n/2} \Gamma(n/2)} z^{(n/2)-1} e^{-z/2}, & z > 0 \\ 0 & z \leq 0 \end{cases} \quad (6.14)$$

ile verilmektedir (Pham, 2006). Burada $\Gamma(\cdot)$ gama fonksiyonudur. n serbestlik dereceli ki-kare birikimli dağılım fonksiyonu ise

$$F(z,n) = \int_0^z f(z,n) dz = P(n/2, z/2) \quad (6.15)$$

ile gösterilir. Burada, $P(\cdot, \cdot)$ regüleleştirilmiş gama fonksiyonudur (Matlab, 2009). ki-kare birikimli dağılım, nümerik olarak hesaplanabilir. ki-kare dağılımını gösteren nümerik tablolar, istatistik kitaplarında yaygın olarak bulunmaktadır, ya da istatistiksel analiz paketleri (Matlab, 2009) kullanılarak grafiksel olarak gösterilebilir.

Bu çalışmada bataryalar, 3 parametre ile karakterize edildiği için, 3 serbestlik dereceli ki-kare birikimli dağılım fonksiyonu Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.9. 3 serbestlik dereceli ki-kare dağılımı.

6.3.1. Grup 0 (kullanılmamış) bataryalar için sınıflandırma testi

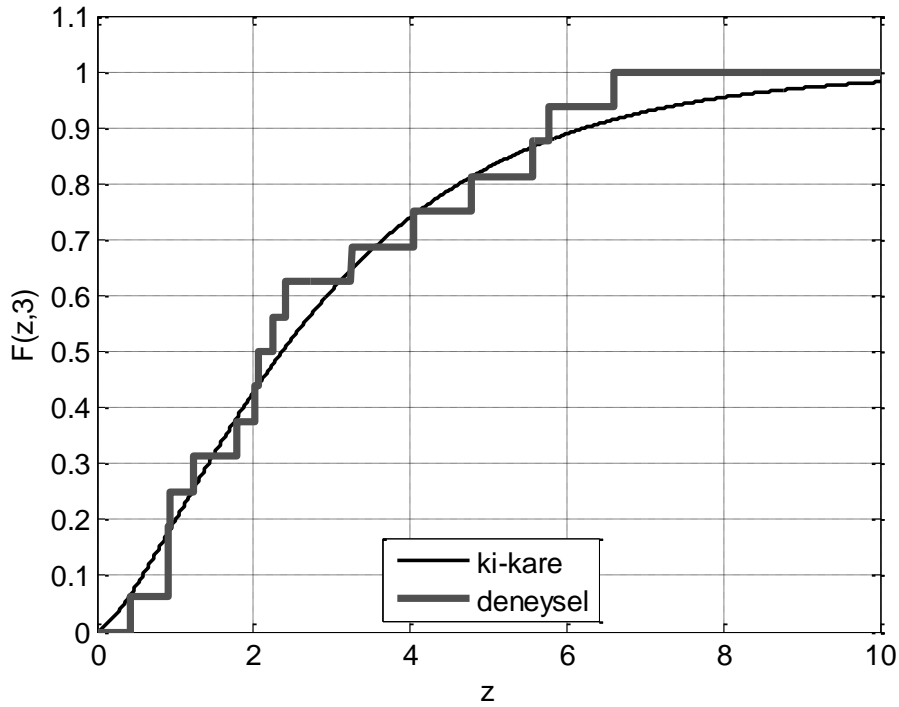
Kullanılmamış bataryaların oluşturduğu grubun istatistiksel karakterizasyonu kullanılarak, Grup 0'a yönelik

$$d_0(x) = (x - \mu_0)^T P_0^{-1} (x - \mu_0) \quad (6.16)$$

fonksiyonu tanımlanmış ve a eşik değeri alınarak

$$d(x) \leq a \Rightarrow x \in \text{Grup 0} \quad (6.17)$$

tekli sınıflandırma algoritması tanımlanmıştır. Aşağıdaki şekilde Grup 0'ı oluşturan 16 örnek üzerinden hesaplanan deneysel birikimli dağılım fonksiyonu ve ki-kare birikimli dağılımı birlikte çizilmiştir.



Şekil 6.10. Grup 0'ı oluşturan 16 örnek üzerinden hesaplanan deneysel birikimli dağılım fonksiyonu ve ki-kare birikimli dağılım fonksiyonu.

Şekil 6.10'da görüldüğü gibi, deneysel dağılım fonksiyonu ile ki-kare dağılım arasında genel bir uyum görülmektedir. İki dağılım arasındaki ortalama mutlak hata 0.0357 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, Grup 0 için önerilen sınıflandırma algoritmasının (Eş. 6.17), Grup 0'dan alınan 16 örneğe uygulanmasında yaklaşık olarak $\pm\%4$ güven aralığı olduğu anlamına gelmektedir. Örneğin,

$$d(x) \leq 6.2514 \quad (6.18)$$

olarak uygulanacak test ideal olarak

$$F(6.25, 3) = 0.90 \text{ (%90)} \quad (6.19)$$

%90 kesinlikle Grup 0'ın üyelerini belirleyecekken, örneklememiz bu testin kesinliğinin $\%90 \pm 4$ mertebesinde olacağını öngörmektedir.

6.3.2. Grup 1 (yıpratma testleri bir kere uygulanmış) bataryalar için sınıflandırma testi

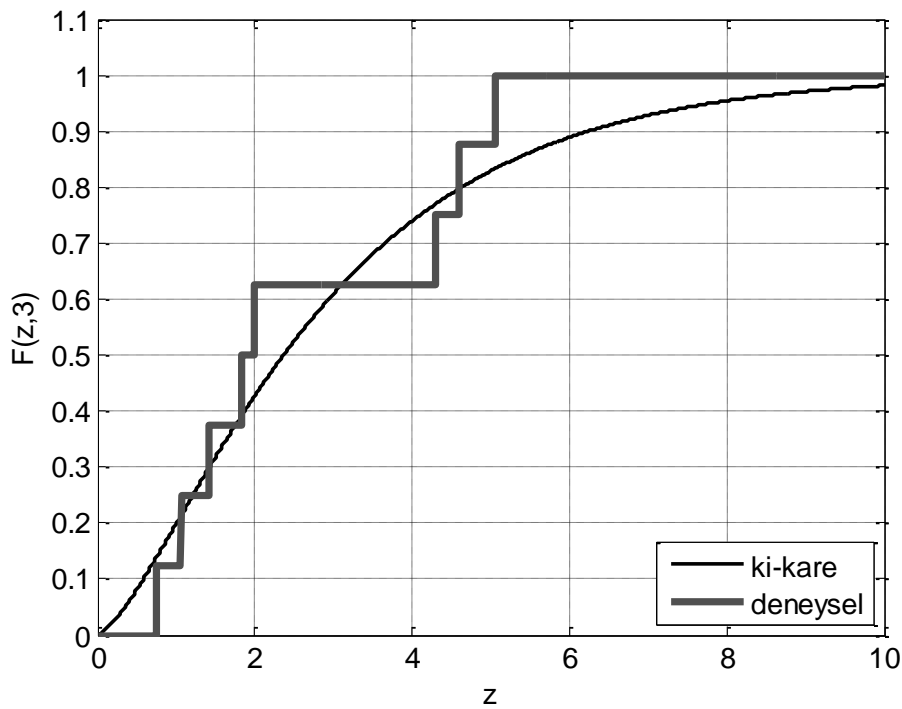
Yıpratma testleri bir kere uygulanmış bataryaların oluşturduğu grubun istatistiksel karakterizasyonu kullanılarak, Grup 1'e yönelik

$$d_1(x) = (x - \mu_1)^T P_1^{-1} (x - \mu_1) \quad (6.20)$$

fonksiyonu tanımlanmış ve a eşik değeri alınarak

$$d(x) \leq a \Rightarrow x \in \text{Grup 1} \quad (6.21)$$

tekli sınıflandırma algoritması tanımlanmıştır. Aşağıdaki şekilde Grup 1'i oluşturan 8 örnek üzerinden hesaplanan deneysel birikimli dağılım fonksiyonu ve ki-kare birikimli dağılımı birlikte çizilmiştir.



Şekil 6.11. Grup 1'i oluşturan 8 örnek üzerinden hesaplanan deneysel birikimli dağılım fonksiyonu ve ki-kare birikimli dağılım fonksiyonu.

Şekil 6.11'de görüldüğü gibi, deneysel dağılım fonksiyonu ile ki-kare dağılım arasında genel bir uyum görülmektedir. İki dağılım arasındaki ortalama mutlak hata 0.0872 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, Grup 1 için önerilen sınıflandırma algoritmasının (Eş. 6.21), Grup 1'den alınan 8 örneğe uygulanmasında yaklaşık olarak $\pm\%9$ güven aralığı olduğu anlamına gelmektedir. Örneğin,

$$d(x) \leq 6.2514 \quad (6.22)$$

olarak uygulanacak test ideal olarak

$$F(6.25, 3) = 0.90 \text{ (%90)} \quad (6.23)$$

%90 kesinlikle Grup 1'in üyelerini belirleyecekken, örneklememiz bu testin kesinliğinin %90±9 mertebesinde olacağını öngörmektedir.

6.3.3. Grup 2 (yıpratma testleri iki kere uygulanmış) bataryalar için sınıflandırma testi

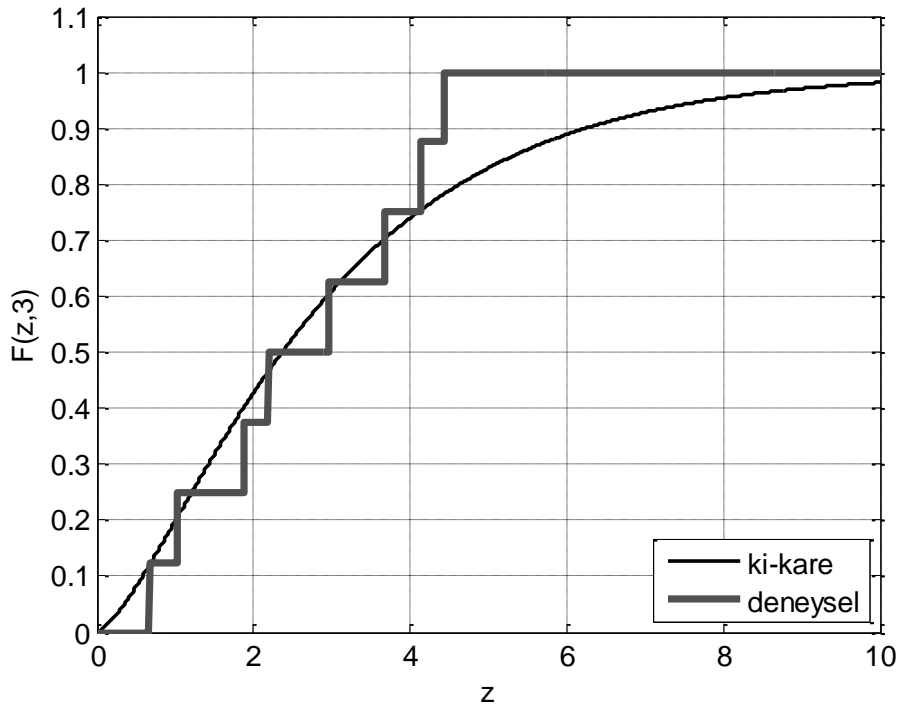
Yıpratma testleri iki kere uygulanmış bataryaların oluşturduğu grubun istatistiksel karakterizasyonu kullanılarak, Grup 2'ye yönelik

$$d_2(x) = (x - \mu_2)^T P_2^{-1} (x - \mu_2) \quad (6.24)$$

fonksiyonu tanımlanmış ve a eşik değeri alınarak

$$d(x) \leq a \Rightarrow x \in \text{Grup 2} \quad (6.25)$$

tekli sınıflandırma algoritması tanımlanmıştır. Aşağıdaki şekilde Grup 2'yi oluşturan 8 örnek üzerinden hesaplanan deneysel birikimli dağılım fonksiyonu ve ki-kare birikimli dağılımı birlikte çizilmiştir.



Şekil 6.12. Grup 2'yi oluşturan 8 örnek üzerinden hesaplanan deneysel birikimli dağılım fonksiyonu ve ki-kare birikimli dağılım fonksiyonu.

Şekil 6.12'de görüldüğü gibi, deneysel dağılım fonksiyonu ile ki-kare dağılım arasında genel bir uyum görülmektedir. İki dağılım arasındaki ortalama mutlak hata 0.065 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, Grup 2 için önerilen sınıflandırma algoritmasının (Eş. 6.25), Grup 2'den alınan 8 örneğe uygulanmasında $\pm\%6.5$ güven aralığı olduğu anlamına gelmektedir. Örneğin,

$$d(x) \leq 6.2514 \quad (6.26)$$

olarak uygulanacak test ideal olarak

$$F(6.25, 3) = 0.90 (\%90) \quad (6.27)$$

$\%90$ kesinlikle Grup 2'nin üyelerini belirleyecekken, örneklememiz bu testin kesinliğinin $\%90\pm6.5$ mertebesinde olacağını öngörmektedir.

Böylece, $x=[R_b, C_d, T_d]^T$ olarak ölçülmüş bir bataryanın ilgili gruba dahil olup olmadığını sınamak için, $d_i(x)$ Mahalanobis uzaklığı olmak üzere,

$$d_i(x) \leq F^{-1}(a,3) \quad (6.28)$$

olarak tanımlanan tek sınıflı sınıflandırma yaklaşımının etkin bir yöntem olabileceği gösterilmiştir. Burada, $a \in [0,1]$ sınıflandırma algoritmasının kesinliğidir. Kuşku yok ki, batarya sağlık sınıflarını istatistiksel olarak karakterize etmek için kullandığımız örnek sayısının azlığı, sınıflandırma algoritmasının kesinliğine bir belirsizlik olarak yansiyacaktır.

6.4. Batarya Sağlık Durumunun Çoklu Sınıflandırmayla Belirlenmesi

6.4.1. Batarya sağlık durumunun sınıflandırılması

Bataryanın dolma-boşalma sayısı arttıkça batarya yaşlanır. Ayrıca uygun olmayan veya kötü kullanım da bataryanın yıpranmasına neden olur. Tipik olarak bataryanın sağlık durumu (SOH), bataryanın gerçek kapasitesiyle bağlantılıdır. Bu bölümde batarya sağlık durumunun belirlenmesinde kullanılabilecek çok sınıflı bir sınıflandırma yöntemi önerilmektedir. Bir önceki bölümde tanımlanan SOH grupları kullanılmış ve test edilen bir bataryanın tanımlanan bu gruplardan hangisine dahil olduğunu belirlemeye yönelik çok sınıflı bir sınıflandırma yaklaşımı uygulanmıştır.

6.4.2. Karesel ayırtaç yaklaşımı

Önceki bölümde yapılan eskitme testlerinin sonucunda toplam 32 adet batarya için parametre değerleri hesaplanmış ve bunlardan batarya sağlık durumu sınıfları oluşturulmuştur. Elde edilen 32 adet parametre vektörünün hangi sınıfa dahil olduğunun incelenmesi için karesel ayırtaç yaklaşımı kullanılmıştır.

Karesel ayırtaç yaklaşımı (Hardle and Simer, 2007), Bayes tabanlı sınıflandırma yaklaşımı olup, ayırtaç fonksiyonu, parametre vektörünün karesel bir fonksiyonu olarak seçilir. Buna göre karesel ayırtaç fonksiyonu her bir sınıf için şu şekilde formüle edilir:

$$d_k(x) = -\frac{1}{2} \log |P_k| - \frac{1}{2} (x - \mu_k)^T P_k^{-1} (x - \mu_k) + \log \pi_k \quad (6.29)$$

Burada, k sınıf indeksini göstermektedir. P_k ve μ_k , k indisli sınıf için sırasıyla eş-değişke matrisi ve ortalama değer vektörüdür. π_k ise k numaralı sınıf için önsel (a priori) olasılık değeridir.

Sınıflandırma işleminde, kestirilen her bir x vektörü için karesel ayırtaç fonksiyonu hesaplanır ve x vektörü, ayırtaç fonksiyonunun en büyük değeri aldığı sınıfa atanır:

$$\hat{d}(x) = \arg(\max_k (d_k(x))) \quad (6.30)$$

Burada, gauss dağılımı ile modellenmiş sınıflar arasında yapılacak en büyük olabilirlik (maximum likelihood) tabanlı kestirimin ayırtaç fonksiyonunda Eş. 6.29 ile ifade edilen karesel ayırtaç olduğunu vurgulamakta yarar vardır.

Bölüm 6.2.5'te tanımlanmış olan, üç adet SOH sınıfına ait karesel ayırtaç fonksiyonu, 32 test bataryasının parametreleri için hesaplanmıştır. Karesel ayırtaç analizi sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.4'te gösterilmiştir. Sınıfların önsel olasılıkları, her bir gruptaki batarya sayısının, toplam batarya sayısına oranı olarak seçilmiştir.

Çizelge 6.4'teki değerler esas alınarak, bataryalar için dört farklı sınıflandırma testi uygulanmıştır. Birinci test, hiç kullanılmamış bataryalar (Grup 0) ile az kullanılmış bataryalar (Grup 1) arasındaki ayırımı; ikinci test, hiç kullanılmamış bataryalar ile

çok kullanılmış bataryalar (Grup 2) arasındaki ayrımı; üçüncü test, az kullanılmış bataryalar ile çok kullanılmış bataryalar arasındaki ayrımı yapmaktadır. Dördüncü teste, batarya sağlık gruplarının her üçü de dahil edilmiştir. Bu testlerin sonuçları Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.4. Herbir batarya için hesaplanan karesel ayırtaç değerleri.

Batarya	$d_0(x)$	$d_1(x)$	$d_2(x)$
01Grup0	-4.02	-10.09	-9.30
02Grup0	-2.13	-7.73	-8.83
03Grup0	-3.26	-10.29	-9.84
04Grup0	-2.25	-9.64	-9.51
05Grup0	-2.44	-8.68	-9.07
06Grup0	-1.70	-5.13	-8.43
07Grup0	-4.12	-4.68	-8.39
08Grup0	-1.70	-5.38	-8.50
09Grup0	-2.36	-4.90	-8.29
10Grup0	-4.53	-18.07	-10.21
11Grup0	-2.27	-4.74	-8.43
12Grup0	-3.63	-8.65	-8.99
13Grup0	-1.45	-7.52	-9.02
14Grup0	-2.86	-9.36	-9.46
15Grup0	-1.85	-6.15	-8.76
16Grup0	-1.70	-6.90	-8.71
09Grup1	-102.88	-6.16	-8.58
10Grup1	-46.37	-4.39	-7.88
11Grup1	-154.37	-6.01	-7.41
12Grup1	-3.60	-4.85	-8.43
13Grup1	-4.25	-4.78	-8.22
14Grup1	-9.09	-6.39	-7.82
15Grup1	-6.94	-4.56	-8.37
16Grup1	-7.82	-4.23	-7.93
09Grup2	-1259.37	-49.45	-7.43
10Grup2	-1082.42	-27.23	-8.01
11Grup2	-2497.95	-84.95	-8.39
12Grup2	-265.45	-54.17	-8.75
13Grup2	-17.31	-10.06	-9.13
14Grup2	-54.25	-18.48	-8.99
15Grup2	-671.58	-20.14	-7.25
16Grup2	-104.99	-5.96	-7.85

Çizelge 6.5. Sınıflandırma test sonuçları.

Testler	Örnek sayısı	Doğru sınıflandırma sayısı	Hatalı sınıflandırma (%)
Grup 0 – Grup 1	24	22	8.3
Grup 0 – Grup 2	24	24	0.0
Grup 1 – Grup 2	16	15	6.3
Grup 0 – Grup 1 – Grup 2	32	29	9.4

Çizelge 6.5'te görüldüğü gibi hiç kullanılmamış ve çok kullanılmış bataryalar arasındaki sınıflandırma testinde hiç hata oluşmamıştır. Diğer testlerde oluşan hata değerlerinin de aşırı olmadığı görülmektedir. Algoritmanın sınıfların istatistiksel özelliklerine bağlı olduğu herhangi bir sınıflandırma işleminde, bu tür sınıflandırma hatalarını önlemek mümkün olamamaktadır. Bu husus bir sonraki alt bölümde ele alınmıştır.

6.4.3. Sınıflandırma performans sınırları

Bir önceki bölümde sınıflandırma testleri yapılmış ve bu testlerde hataların kaçınılmaz olduğu belirtilmişti. Bu bölümde, sınıflandırma performansının ve hata oranının değerlendirilmesinde kullanılacak bir yaklaşım sunulmaktadır. Kullanılacak olan kavram Bhattacharyya uzaklık metriğidir. Bhattacharyya uzaklığı, iki farklı olasılık dağılımı arasındaki uzaklığı belirleyen bir metriktir. Çok-değişkenli Gauss dağılımlarda Bhattacharyya uzaklığı şu şekilde tanımlanmıştır (Kailath, 1967):

$$B = -\frac{1}{8}(\mu_1 - \mu_2)^T P^{-1}(\mu_1 - \mu_2) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{|P|}{\sqrt{|P_1 \cdot P_2|}} \right) \quad (6.31)$$

burada, “ $2P=P_1+P_2$ ” olarak hesaplanır. P_k ve μ_k , k numaralı sınıf için sırasıyla eş-değişke matrisi ve ortalama değer vektörüdür. İstatistiksel olarak karakterize edilmiş iki sınıf arasındaki sınıflandırma hata olasılığı (P_{err}), sınıfların istatistiksel benzerliği ile sınırlanmıştır. Bu durum şu şekilde gösterilebilir (Kailath, 1967):

$$\frac{1}{2}e^{-2B} \leq P_{err} \leq \frac{1}{2}e^{-B} \quad (6.32)$$

Bu eşitsizlik, herhangi bir istatistiksel sınıflandırma algoritmasının performansının, teorik olarak sınırlı olacağını ifade etmektedir. Eğer sınıflandırma algoritmasındaki hata bu sınırlar arasındaysa, mevcut algoritma 'yeterli' olarak ifade edilebilir ve bunun sonucu olarak, daha iyi bir sonuç verecek yeni bir algoritma arayışına girmeye gerek duyulmayabilir. Eğer hata olasılığı üst sınırdan büyük ise sınıflandırma için yeni bir algoritma geliştirme yoluna gidilmelidir.

Bu tez çalışmasında tanımlanan batarya sağlık durumu sınıfları arasındaki Bhattacharyya uzaklıkları hesaplanmış, maksimum sınıflandırma hatası için teorik üst sınır belirlenmiş ve bu sonuçlar bir önceki bölümde kullanılan karesel ayırtaçın sınıflandırma hataları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 6.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.6. Sınıflandırma hataları ile teorik sınırların karşılaştırılması.

Testler	Bhattacharyya Uzaklığı	Maksimum Teorik Sınıflandırma Hatası (%)	Sınıflandırma Hatası (%)
Grup 0 – Grup 1	1.43	12.0	8.3
Grup 0 – Grup 2	2.52	4.0	0.0
Grup 1 – Grup 2	1.18	15.4	6.3

Çizelge 6.6'daki sonuçlara göre, her üç test için de, karesel ayırtaç yaklaşımı sınıflandırıcının sınıflandırma hatası, Bhattacharyya uzaklık yöntemi kullanılarak hesaplanan teorik sınıflandırma hatasının maksimum değerinden küçüktür. Buna göre önerilen karesel ayırtaç yaklaşımı sınıflandırıcının sınıflandırma performansı 'yeterli' olarak ifade edilebilir.

7. BATARYA SAĞLIK DURUMUNUN ÇOKDEĞİŞKENLİ ARADEĞERLEME YÖNTEMLERİ İLE KESTİRİMİ

Bu bölümde bataryaların sağlık durumları, bataryaların kullanılabilen kapasitelerinin kestirimi yönünden incelenecektir. Bataryaların kullanım süreleri arttıkça, ortam ve kullanım koşullarının da etkisiyle, bataryaların kullanılabilen kapasitelerinde azalma meydana gelir. Batarya kapasitesinde meydana gelen azalma ne kadar fazla ise bataryanın sağlık durumunun o derece kötüleştiği söylenebilir. Bu özellik göz önüne alınarak, bu bölümde batarya sağlık durumunun tespiti için, bataryaların kapasitelerinin amper-saniye cinsinden kestiriminde kullanılacak iki farklı yöntem önerilmektedir.

Bunlardan ilki, ters uzaklık ağırlığı kullanılarak yapılan çoklu aradeğerleme yöntemi kapsamındadır. İkinci yöntem ise radyal tabanlı fonksiyonlar kullanılarak yapılan çoklu aradeğerlemedir.

7.1. Ters Uzaklık Ağırlıklı Çokdeğişkenli Aradeğerleme

Çokdeğişkenli aradeğerleme (multivariate interpolation) için kullanılacak yaklaşımlardan birisi ters uzaklık ağırlıklı (inverse distance weighting) aradeğerleme yöntemidir. “u” fonksiyonu, “n” boyutlu doğrusal bir uzay üzerinde tanımlanmış, skaler bir fonksiyon olsun:

$$u: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad u(x) \in \mathbb{R} \quad (7.1)$$

Bu fonksiyonun x_k 'da aldığı değeri u_k ile gösterelim:

$$u_k = u(x_k), \quad x_k \in \mathbb{R}^n, \quad k: 1, 2, 3, \dots, N \quad (7.2)$$

$d(x, y)$, \mathbb{R}^n 'de bulunan x ve y noktaları arasındaki uzaklığı karakterize eden herhangi bir metrik olsun. Bu durumda, u fonksiyonu için

$$u(x) = \frac{\sum_{k=1}^N w_k(x) u_k}{\sum_{k=1}^N w_k(x)}, \quad w_k(x) = d^{-1}(x, x_k) \quad (7.3)$$

şeklinde yazılan aradeğerleme fonksiyonu, ters uzaklık ağırlıklı çok değişkenli aradeğerleme fonksiyonu olarak anılmaktadır (Shepard, 1968; Wikipedia, 2009). Bu aradeğerleme fonksiyonunun $u(x_k)=u_k$ koşulunu sağladığı, formülden kolayca görülebilir. Ters ağırlıklı aradeğerleme fonksiyonu, verilen bir x noktasında fonksiyonu hesaplarken, x noktasının x_k noktasına olan uzaklığını hesaplamakta ve $u(x)$ değerini bu uzaklıkların tersleri ile orantılı olarak u_k değerlerinin ağırlıklı bir toplamı ile ifade etmektedir. Örneğin, $N=2$ alındığında, aradeğerleme fonksiyonu:

$$u(x) = \frac{d^{-1}(x, x_1)}{d^{-1}(x, x_1) + d^{-1}(x, x_2)} u_1 + \frac{d^{-1}(x, x_2)}{d^{-1}(x, x_1) + d^{-1}(x, x_2)} u_2 \quad (7.4)$$

olarak yazılmaktadır. Ters uzaklık ağırlıklı aradeğerleme için, herhangi bir uzaklık fonksiyonundan yararlanılabilir.

Literatürde ilk defa Shepard (1968)'da önerilen bu aradeğerleme yöntemi, günümüzde en çok yer bilimleri alanında, cevher yoğunluğunun modellenmesinde kullanılmaktadır (Davis, 2002). Güncel başka bir uygulama alanı ise iyonosfer elektron yoğunluğunun modellenmesidir (Arıkan et al., 2009).

Bu çalışmada, literatürde yer alan ters ağırlıklı aradeğerleme fonksiyonundan farklı olarak, değiştirilmiş ters ağırlıklı aradeğerleme fonksiyonu da önerilmiş ve kullanılmıştır. Önerilen ters ağırlıklı aradeğerleme fonksiyonu

$$u(x) = \frac{\sum_{k=1}^N w_k(x) u_k}{\sum_{k=1}^N w_k(x)}, \quad w_k(x) = d_k^{-1}(x, x_k) \quad (7.5)$$

olarak verilmektedir. Denklemden görülebileceği gibi, bu aradeğerleme fonksiyonunda aradeğerleme noktasının (x), bilinen ölçümlerin alındığı noktalara (x_k) olan uzaklığı, her bir ölçüm noktası için ayrı bir metrik ile (d_k) belirlenebilmektedir. Bu esneklik, $u_k=u(x_k)$ ölçümlerinin kendilerinin temel ölçümler olmayıp, çoklu ölçümlerin istatistiksel karakterizasyonu ile belirlendiği durumlarda kullanılabilmemesi amacıyla tanımlanmıştır. d_k fonksiyonlarının herbiri birer

uzaklık fonksiyonu olarak alındığı sürece, yukarıdaki aradeğerleme fonksiyonunun $u_k=u(x_k)$ eşitliğini vereceği rahatça görülebilir.

7.2. Ters Uzaklık Ağırlıklı Çokdeğişkenli Aradeğerleme İle Batarya Kapasitesinin Kestirimi

Batarya kapasite kestirimini, bir aradeğerleme problemi olarak formüle edebilmek için, batarya kapasitesinin (C), batarya parametrelerinin bir fonksiyonu olduğu varsayılmıştır:

$$C = C(R_b, C_d, T_d) = C(x) \quad (7.6)$$

Aradeğerlemeye dayanak olarak ise, önceki bölümlerde karakterize edilmiş olan hiç kullanılmamış batarya grubu (Grup 0) ve iki set yıpratılmış olan batarya grubu (Grup 2) ele alınmıştır. Her iki grupta yer alan bataryaların tek tek kapasiteleri ölçülmüş ve her iki grup için ortalama batarya kapasiteleri hesaplanmıştır.

Hiç kullanılmamış bataryalar arasında bulunan sekiz bataryanın ortalama kapasitesi $C_1=5920$ A-saniye olarak belirlenmiştir. İki set yıpratma sonrasında elde edilmiş olan sekiz bataryanın ortalama kapasite değeri ise $C_2=5713$ A-saniye olarak bulunmuştur. Her iki grubun içinde yer alan bataryaların parametreleri de bilindiği için grup parametre ortalamaları (μ) ve grup eş-değişke matrisleri de bilinmektedir. Bu durumda,

$$C_1=C(x_1)=C(\mu_0) \quad (7.7)$$

$$C_2=C(x_2)=C(\mu_2) \quad (7.8)$$

olarak alınmıştır. P_0 ve P_2 sırası ile Grup 0 ve Grup 2'nin eş-değişke matrisleri olmak üzere uzaklık fonksiyonu

$$d(x,y) = (x-y)^T P^{-1} (x-y) \quad , \quad P=(P_1+P_2)/2 \quad (7.9)$$

olarak seçilmiş ve batarya kapasitesi için aradeğerleme fonksiyonu

$$C(x) = \frac{d^{-1}(x,\mu_0)}{d^{-1}(x,\mu_0) + d^{-1}(x,\mu_2)} C_1 + \frac{d^{-1}(x,\mu_2)}{d^{-1}(x,\mu_0) + d^{-1}(x,\mu_2)} C_2 \quad (7.10)$$

olarak belirlenmiştir. Bu aradeğerleme fonksiyonu ile kapasite kestirimi yapılmış ve ölçülen kapasite değeri ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 7.1.).

Çizelge 7.1. Ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları.

Batarya	$d(x, \mu_0)$	$d(x, \mu_2)$	$C_{ölçüm}(A-s)$	$C_{kestirim}(A-s)$	Mutlak Hata (%)
01Grup0	1.92	8.82	5898	5883	0.25
02Grup0	0.62	7.26	5927	5903	0.41
03Grup0	1.43	10.62	5953	5895	0.97
04Grup0	0.59	9.59	5944	5908	0.61
05Grup0	0.09	8.07	5902	5917	0.26
06Grup0	0.17	5.81	5912	5914	0.03
07Grup0	0.39	5.57	5905	5906	0.02
08Grup0	0.09	6.04	5918	5917	0.02
09Grup2	16.56	1.98	5230	5735	9.67
10Grup2	8.66	4.01	5681	5779	1.72
11Grup2	23.65	5.86	5814	5754	1.02
12Grup2	21.22	6.66	5512	5763	4.55
13Grup2	8.39	7.68	5842	5812	0.51
14Grup2	9.87	7.03	5847	5799	0.82
15Grup2	5.77	1.19	5855	5749	1.81
16Grup2	1.27	3.41	5927	5864	1.07

Çizelge 7.1'de verilmiş olan batarya kapasite kestirim değerleri için ortalama mutlak hata oranı %1.48 olarak hesaplanmıştır. Kapasite kestiriminde en büyük hata miktarı 09Grup2 numaralı bataryada hesaplanmıştır. Eğer bu batarya hesaplamalara dahil edilmezse, ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile batarya kapasitesinin kestiriminin 15 test bataryası için ortalama mutlak hata oranı %0.81 olarak bulunmaktadır. Bu durum için hesaplanan yeni kapasite kestirim sonuçları Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları (09Grup2 numaralı batarya hesaplamalara dahil edilmemiştir).

Batarya	$d(x, \mu_0)$	$d(x, \mu_2)$	$C_{ölçüm}(A-s)$	$C_{kestirim}(A-s)$	Mutlak Hata (%)
01Grup0	1.70	7.65	5898	5895	0.05
02Grup0	0.59	6.30	5927	5908	0.32
03Grup0	1.29	9.56	5953	5904	0.83
04Grup0	0.54	8.60	5944	5912	0.54
05Grup0	0.08	7.14	5902	5918	0.28
06Grup0	0.16	5.02	5912	5916	0.06
07Grup0	0.35	4.81	5905	5910	0.09
08Grup0	0.09	5.24	5918	5918	0.01
09Grup2	–	–	–	–	–
10Grup2	8.53	3.48	5681	5822	2.49
11Grup2	24.10	6.68	5814	5812	0.03
12Grup2	20.66	6.43	5512	5815	5.50
13Grup2	7.76	6.49	5842	5845	0.05
14Grup2	8.94	5.94	5847	5837	0.16
15Grup2	5.80	0.95	5855	5802	0.91
16Grup2	1.24	2.78	5927	5878	0.83

7.3. Değiştirilmiş Ters Uzaklık Ağırlıklı Çokdeğişkenli Aradeğerleme ile Batarya Kapasitesinin Kestirimi

Değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile batarya kapasitesinin kestiriminde, iki farklı uzaklık fonksiyonu kullanılmıştır. Mahalanobis uzaklığı ve karesel ayırtaç fonksiyonu kullanılarak yapılan, değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile batarya kapasitesinin kestirimine yönelik çalışmalar aşağıdaki alt bölümlerde anlatılmaktadır.

7.3.1. Mahalanobis uzaklığı kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile batarya kapasitesinin kestirimi

Grup 0 ve Grup 2'ye ait batarya kapasitelerinin grup ortalamaları ile belirlendiği göz önüne alınarak, değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile batarya kapasite kestirimi yeniden yapılmıştır. Yine

$$C_1=C(x_1)=C(\mu_0) \quad (7.11)$$

$$C_2=C(x_2)=C(\mu_2) \quad (7.12)$$

olarak alınmış, ancak her bir destek noktası için uzaklık fonksiyonları

$$d_1(x, x_1) = (x - \mu_0)^T P_0^{-1} (x - \mu_0) \quad (7.13)$$

$$d_2(x, x_2) = (x - \mu_2)^T P_2^{-1} (x - \mu_2) \quad (7.14)$$

olarak seçilmiştir. Görüldüğü gibi, uzaklık fonksiyonları, ölçülen parametre vektörünün ilgili gruba olan Mahalanobis uzaklığıdır. Bu durumda değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme fonksiyonu

$$C(x) = \frac{d_1^{-1}(x, \mu_0)}{d_1^{-1}(x, \mu_0) + d_2^{-1}(x, \mu_2)} C_1 + \frac{d_2^{-1}(x, \mu_2)}{d_1^{-1}(x, \mu_0) + d_2^{-1}(x, \mu_2)} C_2 \quad (7.15)$$

olarak alınmıştır. Bu şekilde yapılan kapasite kestirimi Çizelge 7.3 ile verilmiştir.

Çizelge 7.3. Mahalanobis uzaklığı kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları.

Batarya	$d(x, \mu_0)$	$d(x, \mu_2)$	$C_{ölçüm}(A-s)$	$C_{kestirim}(A-s)$	Mutlak Hata (%)
01Grup0	5.56	4.77	5898	5809	1.51
02Grup0	1.78	3.85	5927	5854	1.22
03Grup0	4.05	5.87	5953	5835	1.97
04Grup0	2.02	5.19	5944	5862	1.38
05Grup0	2.42	4.31	5902	5846	0.95
06Grup0	0.92	3.03	5912	5872	0.68
07Grup0	5.77	2.96	5905	5783	2.06
08Grup0	0.93	3.17	5918	5873	0.76
09Grup2	2516.3	1.03	5230	5714	9.25
10Grup2	2162.4	2.19	5681	5714	0.58
11Grup2	4993.4	2.95	5814	5714	1.73
12Grup2	528.44	3.68	5512	5715	3.68
13Grup2	32.15	4.44	5842	5739	1.77
14Grup2	106.03	4.15	5847	5721	2.15
15Grup2	1340.7	0.67	5855	5714	2.41
16Grup2	207.52	1.88	5927	5715	3.57

Çizelge 7.3'te verilmiş olan batarya kapasite kestirim değerleri için ortalama mutlak hata oranı %2.23 olarak hesaplanmıştır. Kapasite kestiriminde en büyük oransal hata miktarı yine 09Grup2 numaralı bataryada hesaplanmıştır. Eğer bu batarya hesaplamalara dahil edilmezse, Mahalanobis uzaklığı kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile batarya kapasitesinin kestiriminin 15 test bataryası için ortalama mutlak hata oranı %1.35 olarak bulunmaktadır. Bu durum için hesaplanan yeni kapasite kestirim sonuçları Çizelge 7.4'de verilmiştir.

Çizelge 7.4. Mahalanobis uzaklığı kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları (09Grup2 numaralı batarya hesaplamalara dahil edilmemiştir).

Batarya	$d(x, \mu_0)$	$d(x, \mu_2)$	$C_{ölçüm}(A-s)$	$C_{kestirim}(A-s)$	Mutlak Hata (%)
01Grup0	5.56	4.11	5898	5841	0.97
02Grup0	1.78	3.33	5927	5872	0.93
03Grup0	4.05	5.26	5953	5860	1.56
04Grup0	2.02	4.65	5944	5878	1.11
05Grup0	2.42	3.81	5902	5867	0.60
06Grup0	0.92	2.63	5912	5884	0.47
07Grup0	5.77	2.56	5905	5825	1.36
08Grup0	0.93	2.76	5918	5885	0.56
09Grup2	–	–	–	–	–
10Grup2	2162.4	1.87	5681	5783	1.79
11Grup2	4993.4	3.38	5814	5783	0.54
12Grup2	528.44	3.54	5512	5783	4.93
13Grup2	32.15	3.70	5842	5797	0.77
14Grup2	106.03	3.45	5847	5787	1.03
15Grup2	1340.7	0.52	5855	5783	1.24
16Grup2	207.52	1.53	5927	5783	2.42

7.3.2. Karesel ayırtaç fonksiyonu kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile batarya kapasitesinin kestirimi

Değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile batarya kapasitesinin kestiriminde, bu sefer uzaklık fonksiyonu olarak, gruplar üzerinde tanımlanmış karesel ayırtaç fonksiyonunun eksi değeri bir uzaklık fonksiyonu olarak alınmıştır:

$$d_1(x, \mu_0) = \frac{1}{2} \log |P_0| + \frac{1}{2} (x - \mu_0)^T P_0^{-1} (x - \mu_0) - \log \pi_0 \quad (7.16)$$

$$d_2(x, \mu_2) = \frac{1}{2} \log |P_2| + \frac{1}{2} (x - \mu_2)^T P_2^{-1} (x - \mu_2) - \log \pi_2 \quad (7.17)$$

Bu şekilde yapılan kapasite kestirimi Çizelge 7.5 ile verilmiştir.

Çizelge 7.5. Karesel ayırtaç fonksiyonu kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları.

Batarya	$d(x, \mu_0)$	$d(x, \mu_2)$	$C_{ölçüm}(A-s)$	$C_{kestirim}(A-s)$	Mutlak Hata (%)
01Grup0	3.73	9.01	5898	5859	0.65
02Grup0	1.84	8.55	5927	5883	0.74
03Grup0	2.97	9.56	5953	5871	1.38
04Grup0	1.96	9.22	5944	5884	1.01
05Grup0	2.16	8.78	5902	5879	0.39
06Grup0	1.41	8.14	5912	5889	0.38
07Grup0	3.8	8.10	5905	5854	0.87
08Grup0	1.41	8.21	5918	5890	0.48
09Grup2	1259.1	7.14	5230	5715	9.27
10Grup2	1082.1	7.72	5681	5715	0.60
11Grup2	2497.7	8.10	5814	5714	1.72
12Grup2	265.17	8.47	5512	5720	3.77
13Grup2	17.02	8.84	5842	5784	0.99
14Grup2	53.96	8.70	5847	5742	1.79
15Grup2	671.29	6.96	5855	5716	2.38
16Grup2	104.71	7.56	5927	5727	3.37

Çizelge 7.5'te verilmiş olan batarya kapasite kestirim değerleri için ortalama mutlak hata oranı %1.86 olarak hesaplanmıştır. Kapasite kestiriminde en büyük oransal hata miktarı yine 09Grup2 numaralı bataryaya aittir. Eğer bu batarya hesaplamalara dahil edilmezse, karesel ayırtaç fonksiyonu kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile batarya kapasitesinin kestiriminin 15 test bataryası için ortalama mutlak hata oranı %1.05 olarak bulunmaktadır. Bu durum için hesaplanan yeni kapasite kestirim sonuçları Çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7.6. Karesel ayırtaç fonksiyonu kullanılarak yapılan değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ile elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları (09Grup2 numaralı batarya hesaplamalara dahil edilmemiştir).

Batarya	$d(x, \mu_0)$	$d(x, \mu_2)$	$C_{ölçüm}$ (A-s)	$C_{kestirim}$ (A-s)	Mutlak Hata (%)
01Grup0	3.69	8.91	5898	5880	0.31
02Grup0	1.80	8.52	5927	5896	0.52
03Grup0	2.93	9.48	5953	5887	1.10
04Grup0	1.92	9.18	5944	5896	0.80
05Grup0	2.11	8.76	5902	5893	0.15
06Grup0	1.36	8.17	5912	5900	0.20
07Grup0	3.79	8.13	5905	5876	0.49
08Grup0	1.37	8.23	5918	5900	0.30
09Grup2	–	–	–	–	–
10Grup2	1082.1	7.79	5681	5784	1.81
11Grup2	2497.6	8.54	5814	5783	0.53
12Grup2	265.12	8.62	5512	5787	4.99
13Grup2	16.98	8.71	5842	5829	0.22
14Grup2	53.92	8.58	5847	5801	0.78
15Grup2	671.25	7.11	5855	5784	1.21
16Grup2	104.66	7.62	5927	5792	2.28

7.4. Radyal Tabanlı Fonksiyonlarla Çokdeğişkenli Aradeğerleme

Bir önceki bölümde, batarya kapasitesini aradeğerleme ile kestirmek için iki farklı batarya grubunun ortalama kapasiteleri esas alınmıştı. Bu bölümde, kapasitesi ve parametreleri ölçülmüş her bir batarya temel alınarak, batarya kapasitelerinin aradeğerlemesi yoluna gidilmiştir. Buna yönelik olarak, radyal tabanlı fonksiyonlardan yararlanılmıştır.

Radyal tabanlı fonksiyonlar (radial basis functions), aldıkları değerlerin yalnızca fonksiyonun hesaplandığı noktanın uzayın orijininden olan uzaklığına bağlı olduğu skaler fonksiyonlardır. $d(x,y)$, \mathbb{R}^n uzayı üzerinde tanımlanmış bir uzaklık fonksiyonu ise

$$\varphi(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad (7.18)$$

$$\varphi(x) = \Phi(d(x,0)) \quad (7.19)$$

şeklinde ifade edilebilen tüm fonksiyonlar bir radyal fonksiyondur. Doğal olarak, uzaklık fonksiyonu olarak ilgili uzay üzerinde tanımlanmış herhangi bir norm da kullanılabilir:

$$\varphi(x) = \Phi(d(x,0)) = \Phi(\|x\|) \quad (7.20)$$

u fonksiyonu, \mathbb{R}^n üzerinde tanımlanmış bir fonksiyon olsun. u fonksiyonunun \mathbb{R}^n uzayında x_k noktalarında aldığı değerler

$$u_k = u(x_k), \quad k=1,2,\dots,M \quad (7.21)$$

ile gösterilsin. Bu durumda,

$$u(x) = \sum_{k=1}^M a_k \Phi(d(x, x_k)) \quad (7.22)$$

olarak ifade edilen fonksiyon, radyal tabanlı fonksiyon ağı (radial basis function network) olarak anılmaktadır (Buhmann, 2009). Radyal tabanlı fonksiyon ağını bir aradeğerleme fonksiyonu olarak kullanmak için, a_k ile gösterilen ağırlıklandırma katsayılarını

$$u_i = u(x_i) = \sum_{k=1}^M a_k \Phi(d(x_i, x_k)) , \quad i=1,2,\dots,M \quad (7.23)$$

eşitliği sağlanacak şekilde belirlemek gerekmektedir.

$$\Phi(d(x_i, x_k)) = g_{ik} \quad (7.24)$$

şeklinde ifade edilirse; yukarıdaki eşitlik

$$u_i = \sum_{k=1}^M g_{ik} a_k \quad (7.25)$$

olarak yazılabilir. Bu ifade,

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & g_{1M} \\ g_{21} & g_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & g_{2M} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g_{M1} & g_{M2} & \cdot & \cdot & \cdot & g_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_M \end{bmatrix} \quad (7.26)$$

ile gösterilebilecek doğrusal denklem setine eşdeğerdir. Bu eşitliği,

$$\mathbf{u} = \mathbf{Ga} \quad (7.27)$$

şeklinde yazarak, aradeğerleme katsayılarının bulunduğu vektör (**a**)

$$\mathbf{a} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{u} \quad (7.28)$$

şeklinde elde edilir. Böylece, $u_k = u(x_k)$ eşitlikleri sağlanmış olur ve Eş. 7.25 bir aradeğerleme fonksiyonu olarak kullanılabilir. Literatürde,

$$u(x) = \sum_{k=1}^M a_k \left(\frac{\Phi(d(x, x_k))}{\sum_{i=1}^M \Phi(d(x, x_i))} \right) \quad (7.29)$$

olarak tanımlanmış fonksiyon ağırları da önerilmektedir (Wikipedia, 2009). Burada,

$$\Phi_k(x) = \frac{\Phi(d(x, x_k))}{\sum_{i=1}^M \Phi(d(x, x_i))} \quad (7.30)$$

olarak tanımlanan fonksiyonlar ise normalize radyal taban fonksiyonları olarak anılmaktadır.

7.5. Radyal Tabanlı Fonksiyonlarla Çokdeğişkenli Aradeğerleme Kullanılarak Batarya Kapasitesinin Kestirimi

Batarya kapasitesinin radyal tabanlı fonksiyonlarla aradeğerlemesi için, yine daha önce kullanılmış olan iki grup batarya ele alınmıştır. Hiç kullanılmamış bataryaların oluşturduğu grupta 8, iki kere yıpratılmış bataryaların oluşturduğu grupta yine 8 batarya bulunmaktadır. Aradeğerleme yapılırken, bu bataryaların herbirinin ölçülmüş olan parametreleri ve kapasiteleri esas alınmıştır.

Radyal fonksiyon olarak, literatürde yaygın olarak kullanılan gauss fonksiyonu esas alınmış ve radyal taban fonksiyonları

$$\Phi(d(x, x_k)) = \Phi(\|x - x_k\|) = \exp(-\beta\|x - x_k\|^2) \quad (7.31)$$

olarak seçilmiştir. Norm olarak, batarya parametrelerinin uygun şekilde ölçeklenmesi olarak yorumlanabilecek olan

$$\|x\|^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{x - x_i}{\sigma_i} \right)^2, \quad \sigma_i > 0 \quad (7.32)$$

ölçeklenmiş kartezyen norm kullanılmıştır. Böylece batarya kapasitesi için

$$C = C(x) = \sum_{k=1}^M a_k \exp(-\beta\|x - x_k\|^2), \quad \beta > 0 \quad (7.33)$$

şeklinde ifade edebileceğimiz aradeğerleme fonksiyonu elde edilmiştir. Bu aradeğerleme fonksiyonunun başarımını sınamak için, her bir bataryanın kapasitesi, bu bataryayı dışarıda bırakarak oluşturulan 15 bataryalık gruba dayanılarak yapılan aradeğerleme kestirimi ile karşılaştırılmıştır. Böylece 16

bataryanın herbiri için ölçülen ve kestirilen kapasite değerleri Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme kullanılarak elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları.

Batarya	$C_{ölçüm}$ (A-s)	$C_{kestirim}$ (A-s)	Mutlak Hata (%)
01Grup0	5898	5919	0.35
02Grup0	5927	5915	0.20
03Grup0	5953	5918	0.60
04Grup0	5944	5986	0.70
05Grup0	5902	5951	0.83
06Grup0	5912	5904	0.14
07Grup0	5905	5902	0.05
08Grup0	5918	5921	0.04
09Grup2	5230	5216	0.26
10Grup2	5681	5426	4.49
11Grup2	5814	5496	5.47
12Grup2	5512	5519	0.13
13Grup2	5842	6170	5.61
14Grup2	5847	5707	2.40
15Grup2	5855	5940	1.45
16Grup2	5927	5855	1.21

Çizelge 7.7’de verilmiş olan batarya kapasite kestirim değerleri için ortalama mutlak hata oranı %1.50 olarak hesaplanmıştır. Kapasite kestiriminde en büyük oransal hata miktarı 10Grup2 numaralı bataryaya aittir. Eğer bu batarya hesaplamalara dahil edilmezse, radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme kullanılarak batarya kapasitesinin kestiriminde 15 test bataryası için ortalama mutlak hata oranı %0.49 olarak bulunmaktadır. Bu durum için hesaplanan yeni kapasite kestirim sonuçları Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Çizelge 7.8. Radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme kullanılarak elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları (10Grup2 numaralı batarya hesaplamalara dahil edilmemiştir).

Batarya	C _{ölçüm} (A-s)	C _{kestirim} (A-s)	Mutlak Hata (%)
01Grup0	5898	5896	0.03
02Grup0	5927	5927	0.01
03Grup0	5953	5980	0.45
04Grup0	5944	5932	0.20
05Grup0	5902	5922	0.34
06Grup0	5912	5903	0.16
07Grup0	5905	5906	0.02
08Grup0	5918	5918	0.01
09Grup2	5230	5229	0.01
10Grup2	–	–	–
11Grup2	5814	6019	3.52
12Grup2	5512	5523	0.19
13Grup2	5842	5863	0.35
14Grup2	5847	5778	1.17
15Grup2	5855	5820	0.60
16Grup2	5927	5910	0.30

Batarya kapasite kestirim deneyleri, normalize radyal tabanlı fonksiyonlar kullanılarak bir kez daha tekrarlanmıştır. Batarya kapasitesi için

$$C = C(x) = \sum_{k=1}^M a_k \left(\frac{\exp(-\beta \|x - x_k\|^2)}{\sum_{i=1}^M \exp(-\beta \|x - x_i\|^2)} \right) \quad (7.34)$$

olarak ifade edilen normalize radyal tabanlı aradeğerleme fonksiyonu oluşturulmuş ve test grubundaki 16 bataryanın her biri için, ilgili bataryayı dışarıda bırakarak kestirimler yapılmıştır. Kestirilen batarya kapasite değerleri Çizelge 7.9'da verilmiştir.

Çizelge 7.9. Normalize radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme kullanılarak elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları.

Batarya	$C_{ölçüm}$ (A-s)	$C_{kestirim}$ (A-s)	Mutlak Hata (%)
01Grup0	5898	5917	0.32
02Grup0	5927	5917	0.17
03Grup0	5953	5921	0.54
04Grup0	5944	5980	0.61
05Grup0	5902	5943	0.69
06Grup0	5912	5904	0.14
07Grup0	5905	5901	0.07
08Grup0	5918	5921	0.05
09Grup2	5230	5126	1.98
10Grup2	5681	5301	6.69
11Grup2	5814	5815	0.02
12Grup2	5512	5575	1.14
13Grup2	5842	6133	4.98
14Grup2	5847	5685	2.77
15Grup2	5855	5949	1.61
16Grup2	5927	5879	0.80

Çizelge 7.9'da verilmiş olan batarya kapasite kestirim değerleri için ortalama mutlak hata oranı %1.41 olarak hesaplanmıştır. Kapasite kestiriminde en büyük oransal hata miktarı 10Grup2 numaralı bataryaya aittir. Eğer bu batarya hesaplamalara dahil edilmezse, Normalize radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme kullanılarak batarya kapasitesinin kestiriminde 15 test bataryası için ortalama mutlak hata oranı %0.51 olarak bulunmaktadır. Bu durum için hesaplanan yeni kapasite kestirim sonuçları Çizelge 7.10'da verilmiştir.

Çizelge 7.10. Normalize radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme kullanılarak elde edilen batarya kapasite kestirim sonuçları (10Grup2 numaralı batarya hesaplamalara dahil edilmemiştir).

Batarya	$C_{ölçüm}$ (A-s)	$C_{kestirim}$ (A-s)	Mutlak Hata (%)
01Grup0	5898	5895	0.04
02Grup0	5927	5927	0.01
03Grup0	5953	5980	0.45
04Grup0	5944	5932	0.20
05Grup0	5902	5922	0.34
06Grup0	5912	5902	0.17
07Grup0	5905	5906	0.02
08Grup0	5918	5918	0.01
09Grup2	5230	5266	0.7
10Grup2	–	–	–
11Grup2	5814	5995	3.12
12Grup2	5512	5512	0.01
13Grup2	5842	5865	0.40
14Grup2	5847	5766	1.38
15Grup2	5855	5827	0.47
16Grup2	5927	5907	0.33

8. SONUÇLAR

Batarya yönetim sistemlerinin en önemli konularından olan batarya doluluk durumu ve batarya sağlık durumu bu tez çalışmasında incelenmiş; bunların kestirimlerine yönelik yöntemler geliştirilmiştir.

Batarya doluluk durumunun ve batarya sağlık durumunun kestiriminin yapılabilmesi için, bu tez çalışmasında öncelikle bir batarya modeli önerilmiştir. Önerilen batarya modeli, literatürdeki elektriksel devre modellerinin bir benzeri olmakla birlikte, hiç bir modelin bire bir aynısı değildir. Önerilen devre modelinin en önemli özelliği, tüm batarya çeşitleri için geçerli genel bir model olmasıdır. Batarya parametrelerinin belirlenmesi için önce, yayılım zaman sabiti T_d 'nin belirlenmesine yönelik bir yöntem geliştirilmiştir.

Batarya doluluk durumunun ve batarya parametrelerinin kestirimi için, Kalman filtre tabanlı bir kestirim algoritması önerilmiştir. Önerilen bu Kalman filtre tabanlı kestirim algoritması aynı zamanda, açık devre gerilimi yöntemi ve amper-saat sayımı gibi literatürde bulunan batarya doluluk durumu kestirim yöntemlerini de içermektedir. Batarya doluluk durumunun başlangıç değerininin doğru kestirimi, hata oranını azaltmaktadır. Bu yüzden batarya doluluk durumunun başlangıç değerinin tespiti için bir yöntem geliştirilmiştir.

Önerilen batarya modeline, önerilen kestirim algoritması uygulanarak, batarya doluluk durumunun ve batarya parametrelerinin ayrı ayrı ve birlikte kestirimleri bilgisayar simülasyonları ve deneysel çalışmalarla yapılmıştır. Ölçülen batarya terminal gerilim değerleri ile kestirim sonucunda hesaplanan batarya terminal gerilim değerleri arasındaki hata oranının çok düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç, önerilen batarya modelinin ve Kalman tabanlı kestirim algoritmasının, batarya doluluk durumu ve batarya parametre kestiriminde kullanılabileceğini göstermektedir.

Batarya sağlık durumunun tespitinde de önerilen batarya modeli ve kestirim algoritması kullanılarak, test bataryaları için parametre değerleri hesaplanmış ve her bir batarya üç elemanlı bir parametre vektörü olarak karakterize edilmiştir. Batarya sağlık durumunun tespitinde, sınıflandırma yaklaşımları ve çok değişkenli

aradeğerleme yöntemleri önerilmiştir. Önerilen bu yöntemlerle batarya sağlık durumunun tespiti, bu tez çalışmasına özgü, yeni bir yaklaşımdır.

Batarya sağlık durumunun sınıflandırma yaklaşımları ile belirlenmesinde, tekli sınıflandırma yaklaşımı ve çoklu sınıflandırma yaklaşımı kullanılmıştır. Tekli sınıflandırma yaklaşımında, verilen herhangi bir bataryanın, belirli bir sağlık sınıfına ait olup olmadığının belirlenmesi için Mahalanobis uzaklığına dayanan bir ayırtaç fonksiyonu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan deneysel dağılım fonksiyonları ile ki-kare dağılımı arasında genel bir uyum görülmüştür. Bu sonuç, tekli sınıflandırma yaklaşımının, batarya sağlık durumunun belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Batarya sağlık durumunun çoklu sınıflandırma ile belirlenmesinde ise karesel ayırtaç yaklaşımı kullanılarak, verilen herhangi bir bataryanın hangi sağlık sınıfına dahil olduğu incelenmiştir. Sınıflandırma testlerinin performansının ve hata oranının değerlendirilmesinde Bhattacharyya uzaklığı kullanılmıştır. Yapılan sınıflandırma testleri için, karesel ayırtaçın sınıflandırma hatasının, Bhattacharyya uzaklığı kullanılarak hesaplanan teorik sınıflandırma hatasının maksimum değerinden küçük olduğu görülmüştür. Bu sonuç, karesel ayırtaç fonksiyonuna dayanan çoklu sınıflandırma yaklaşımının batarya sağlık durumunun belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Batarya sağlık durumunun, çok değişkenli aradeğerleme yöntemleri ile kestiriminde, ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme, değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerleme ve radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerleme yöntemleri önerilerek, batarya kapasitesinin amper-saniye cinsinden değeri kestirilmiştir. Ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerlemede, uzaklık fonksiyonu olarak Mahalanobis uzaklığı kullanılmış ve ölçülen ve kestirilen batarya kapasiteleri arasındaki ortalama mutlak hata %1.5 olarak bulunmuştur. Değiştirilmiş ters uzaklık ağırlıklı çokdeğişkenli aradeğerlemede, Mahalanobis uzaklığı ve karesel ayırtaç fonksiyonu, uzaklık fonksiyonları olarak kullanılmış ve ölçülen ve kestirilen batarya kapasiteleri arasındaki ortalama mutlak hata oranı sırasıyla %2.2 ve %1.9 olarak hesaplanmıştır. Radyal tabanlı fonksiyonlarla çokdeğişkenli aradeğerlemede ise

bu hata miktarı %1.5 olarak bulunmuştur. Ortalama mutlak hata oranlarının düşük olması, önerilen çok değişkenli aradeğerleme yöntemlerinin, batarya sağlık durumunun kestiriminde kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Alzieu, J., Smimite, H. and Glaize C., 1997, Improvement of intelligent battery controller: state-of-charge indicator and associated functions, *J. Power Sources*, 67, 157-161.
- Anbuky, A.H. and Pascoe, P.E., 2000, VRLA battery state-of-charge estimation in telecommunication power systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47, 3, 565-573.
- Anderson, B.D.O., Moore, J.B., 2005, *Optimal Filtering*, Dover Publications, INC., New York, 357 p.
- Arikan, F., Yilmaz, A., Arikan, O., 2009, Space weather activities of ionlab group: tec mapping, *Geophysical Research Abstracts*, 2, EGU2009-6962.
- Aylor, H.J., Thieme, A. and Johnson, B.W., 1992, A battery state-of-charge indicator for electric wheelchairs, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 39, 5, 398-409.
- Baert, D., Vervaet, A., 1999, lead-acid battery model for the derivation of Peukert's law, *Electrochimica Acta*, 44, 3491-3504.
- Barbarisi, O., Vasca, F. and Glielmo, L., 2006, State of charge Kalman filter estimator for automotive batteries, *Control Engineering Practice*, 14, 267-275.
- Barsali, S. and Ceraolo, M., 2002, Dynamical models of lead-acid batteries: implementation issues, *IEEE transactions on Energy Conversion*, 17, 1, 16-23.
- Benini, L., Castelli, G., Macii, A., Macii, E., Poncino, M. and Scarsi, R., 2000, A discrete-time battery model for high-level power estimation, *IEEE Proceedings, Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition*, 35-39.
- Bhangu, B.S., Bently, P., Stone, D.A. and Bingham, C.M., 2005, Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles, *IEEE Trans Vehicular Technol*, 54,3, 783-794.
- Buhmann, M.D., 2009, *Radial Basis Functions: Theory and Implementation*, Cambridge University Press.
- Cai, C.H., Du, D., Liu, Z.Y. and Zhang, H., 2002, Modeling and identification of Ni-Mh battery using dynamical neural network, *Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 1594-1600.

- Casacca, M.A., Salameh, Z.M., 1992, Determination of lead–acid battery capacity via mathematical modeling techniques, *IEEE Trans. Energy Conv.*, 7, 3, 442–446.
- Ceraolo, M., 2000, New dynamical models of lead-acid batteries, *IEEE Transactions on Power Systems*, 15, 4, 1184-1190.
- Chen, M. and Rincon-Mora, G.A., 2006, Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I–V performance, *IEEE Trans. Energy Conversion*, 21, 2, 504-511.
- Chiasson, J. and Vairamohan, B., 2003, Estimating the state of charge of a battery, *Proc. Amer. Control Conf.*, 2863–2868.
- Chiasson J. and Vairamohan, B., 2005, Estimating the state of charge of a battery, *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 13, 3, 465–470.
- Crompton, T.R., 2000, *Battery Reference Book*, Newnes, Oxford.
- Çadircı, Y., Özkazanç, Y., 2004, Microcontroller-based on-line state-of-charge estimator for sealed lead–acid batteries, *Journal of Power Sources*, 129, 330–342.
- Davis, J., C., 2002, *Statistics and Data Analysis in Geology*, 3rd Ed., John Wiley.
- Dell, R.M. and Rand, D.A.J., 2001, *Understanding Batteries*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 223 p.
- Dhameja, S., 2002, *Electric Vehicle Battery Systems*, Newnes, Boston, 230 p.
- Fukunaga, K., 1990, *Introduction to Statistical Pattern Recognition*, 2nd Ed., Academic Press.
- Gao, L., Liu, S. and Dougal, R.A., 2002, Dynamic lithium-ion battery model for system simulation, *IEEE Transactions on Componentes and Packaging Technologies*, 25, 3, 495-505.
- Gelb, A., 1989, *Applied Optimal Estimation*, The M.I.T.Press, Massachusetts, 374p.
- Glass, M.C., 1996, Battery electrochemical nonlinear/dynamic spice model, *IEEE Energy Conversion Engineering Conference IECEC96*, 1, 292-297.
- Gold, S., 1997, A PSPICE macromodel for lithium-ion batteries, *IEEE Battery Conference on Applications and Advances 12th Annual*, 215-222.
- Hansen, T. and Wang, C.J., 2005, Support vector based battery state of charge estimator, *J. Power Sources*, 141, 351-358.
- Hardle, W., Simer, L., 2007, *Applied Multivariate Statistical Analysis*, 2nd Ed., Springer,.

- Huet, F., 1998, A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries, *Journal of Power Sources*, 70, 59-69.
- Johnson, V.H., 2002, Batter performance models in ADVISOR, *J. Power Sources*, 110, 321-329.
- Kailath, T., 1967, The divergence and Bhattacharyya distance measures in signal selection", *IEEE Transactions on Communication Technology*, 15, 1, 52-60.
- Kiehne, H.A., 2003, *Battery Technology Handbook*, Marcel Dekker Inc., New York.
- Koning, M.F., Veltman, A. and van den Bosch, P.P.J., 2004, Modeling battery efficiency with parallel branches, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 141-147.
- Kutluay, K., Çadırcı, Y., Özkazanç Y. and Çadırcı I., 2005, A new online state-of-charge estimation and monitoring system for sealed lead–acid batteries in telecommunication power supplies, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 52, 5, 1315-1327.
- Larminie, J. and Lowry J., 2003, *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, 296 p.
- Lee, J., Nam, O. and Cho, B.H., 2007, Li-ion battery SOC estimation method based on the reduced order extended Kalman filtering, *J. Power Sources*, 174, 9-15.
- Linden, D., 1995, *Handbook of Batteries*, McGraw-Hill, New-York.
- Lynch, W.A. and Salameh, Z.M., 2006, Electrical component, model for a nickel-cadmium electric vehicle traction battery, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1-5.
- Matlab, 2009, *Matlab Statistical Toolbox User's Guide*, The Mathworks Inc.
- Medora, N.K., Kusko, A., 2005, Dynamic battery modeling of lead-acid batteries using manufacturers' data, *IEEE Telecommunications Conference, INTELEC '05. Twenty-Seventh International*, 227-232.
- Medora, N.K., Kusko, A., 2006, An enhanced dynamic battery model of lead-acid batteries using manufacturers' data," *Telecommunications Energy Conference, INTELEC '06. 28th Annual International*, 1 – 8.
- Miller, J.R., 1999, Development of equivalent circuit models for batteries and electrochemical capacitors, *Battery Conference on Applications and Advances, The Fourteenth Annual*, 107 – 109.
- Morita, Y., Yamamoto, S., Lee, S.H. and Mizuno, N., 2006, On-line detection of state-of-charge in lead acid battery using both neural network and on-line

- identification, IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference, 3379-3384.
- Pang, S., Farrell, J., Du, J. and Barth, M., 2001, Battery state-of-charge estimation, Proc. Amer. Control Conf., 2, 1644–1649.
- Park, S., Savvides, A. and Srivastava, M.B., 2001, Battery capacity measurement and analysis using lithium coin cell battery, IEEE Low Power Electronics and Design, International Symposium, 382 – 387.
- Pham, H., 2006, Springer Handbook of Engineering Statistics, Springer.
- Piller, S., Perrin, M. and Jossen, A., 2001, Methods for state of charge determination and their applications, J. Power Sour., 96, 1, 113–120.
- Pistoia, G., 2005, Batteries for Portable Devices, Elsevier, Amsterdam, 296 p.
- Plett, G.L., 2004, Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 1. Background, J. Power Sources, 134, 2, 252–261.
- Plett, G.L., 2004, Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 2. Modeling and identification, J. Power Sources, 134, 2, 262–276.
- Plett, G., 2004, Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 3. State and parameter estimation, J. Power Sources, 134, 2, 277-292.
- Rao, R., Vrudhula, S. and Rakhmatov, D.N., 2003, Battery modeling for energy-aware system design, Computer, 36, 12, 77–87.
- Rodrigues, S., Munichandraiah, N. and Shukla, A.K., 2000, A review of state-of-charge indication of batteries by means of a.c. impedance measurements, J. Power Sources, 87, 12-20.
- Salameh, Z.M., Casacca, M.A. and Lynch, W.A., 1992, A mathematical model for lead-acid batteries, IEEE Trans. Energy Conversion, 7, 93–97.
- Santhanagopalan, S., White, R.E., 2006, Online estimation of the state of charge of a lithium ion cell, J. Power Sources, 161, 1346–1355.
- Schweighofer, B., Raab, K.M. and Bresseur, G., 2003, Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system, IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 52, 4, 1087-1091.
- Shepard, D., 1968, A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data, Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, 517-524.

- Temkin, D., McVey, M., Carlsson, U., 1990, A spacecraft electrical battery model and simulator, IEEE Energy Conversion Engineering Conference, IECEC90, Proceedings of the 25th Intersociety, 2, 19-26.
- ThermoAnalytics Inc., 2009, Battery modeling for HEV simulation by ThermoAnalyticsInc., <http://www.thermoanalytics.com/support/publications/batterymodelsdoc.html>.
- Valvo, M. and Wicks, F.E., 1996, Development and application of an improved equivalent circuit model of a lead-acid battery, IEEE Energy Conversion Engineering Conference IECEC96, 2, 1159-1163.
- Vasebi, A., Partovibakhsh, M. and Bathaee, S.M.T., 2007, A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filter for hybrid electric vehicle applications, Journal of Power Sources, 174, 30–40.
- Vasebi, A., Bathaee, S.M.T. and Partovibakhsh, M., 2008, Predicting state of charge of lead-acid batteries for hybrid electric vehicles by extended Kalman filter, Energy Conversion and Management, 49, 75–82.
- Wikipedia.org, 2009, Rechargeable_batteries, http://en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable_batteries.
- Wikipedia.org, 01.09.2009, Radial basis function network, http://en.wikipedia.org/wiki/Radial_basis_function_network.
- Wikipedia, 08.12.2009, Inverse distance weighting, http://en.wikipedia.org/wiki/Inverse_distance_weighting.

EKLER

EK 1. Genişletilmiş Kalman Filtre Kestirim Yöntemi

Bu tez çalışmasında batarya parametrelerinin ve doluluk durumunun kestiriminde kullanılan, genişletilmiş Kalman filtre kestirim yöntemindeki denklemler (Gelb, 1989), aşıdaki eşitliklerle verilmiştir.

Durum-uzay modeli:

$$x_{k+1} = f(x_k) + w_k \quad (\text{Ek 1.1})$$

$$y_{k+1} = g(x_{k+1}) + v_{k+1} \quad (\text{Ek 1.2})$$

$$E(w_k) = 0 \quad (\text{Ek 1.3})$$

$$E(w_k w'_m) = Q_k \delta_{km} \quad (\text{Ek 1.4})$$

$$E(v_k) = 0 \quad (\text{Ek 1.5})$$

$$E(v_k v'_m) = R_k \delta_{km} \quad (\text{Ek 1.6})$$

$$\delta_{km} = \begin{cases} 1, & k=m \\ 0, & k \neq m \end{cases} \quad (\text{Ek 1.7})$$

Zaman güncellemesi:

$$\hat{x}_{k+1}^- = f(\hat{x}_k) \quad (\text{Ek 1.8})$$

$$P_{k+1}^- = A_k P_k A'_k + Q_k \quad (\text{Ek 1.9})$$

$$A_k = \left. \frac{\partial f(x_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_k} \quad (\text{Ek 1.10})$$

Ölçüm güncellemesi:

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{C}'_{k+1} (\mathbf{C}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{C}'_{k+1} + \mathbf{R}_{k+1})^{-1} \quad (\text{Ek 1.11})$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{C}_{k+1}) \mathbf{P}_{k+1}^- \quad (\text{Ek 1.12})$$

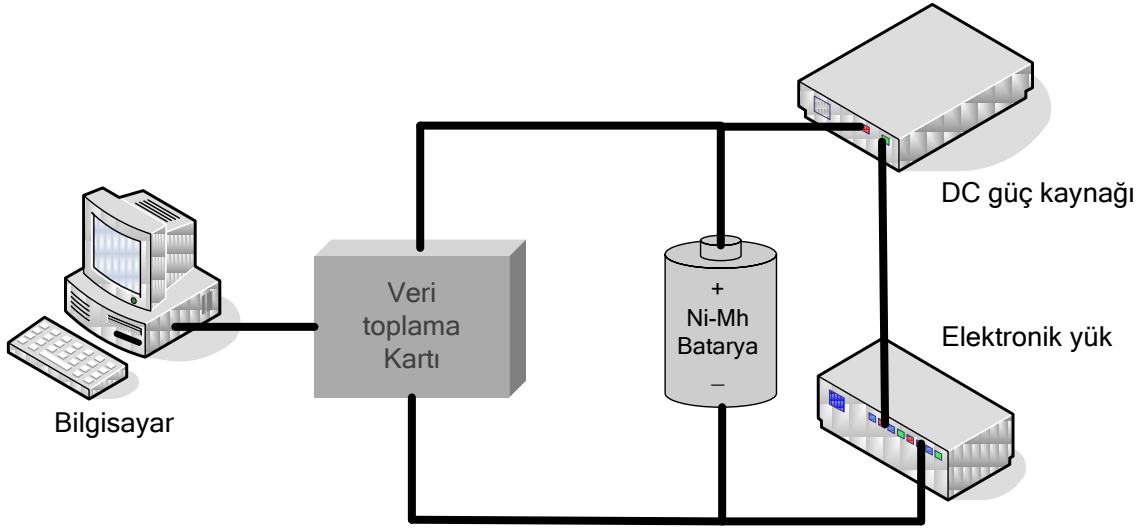
$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-)) \quad (\text{Ek 1.13})$$

$$\mathbf{C}_{k+1} = \left. \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x}_{k+1})}{\partial \mathbf{x}_{k+1}} \right|_{\mathbf{x}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-} \quad (\text{Ek 1.14})$$

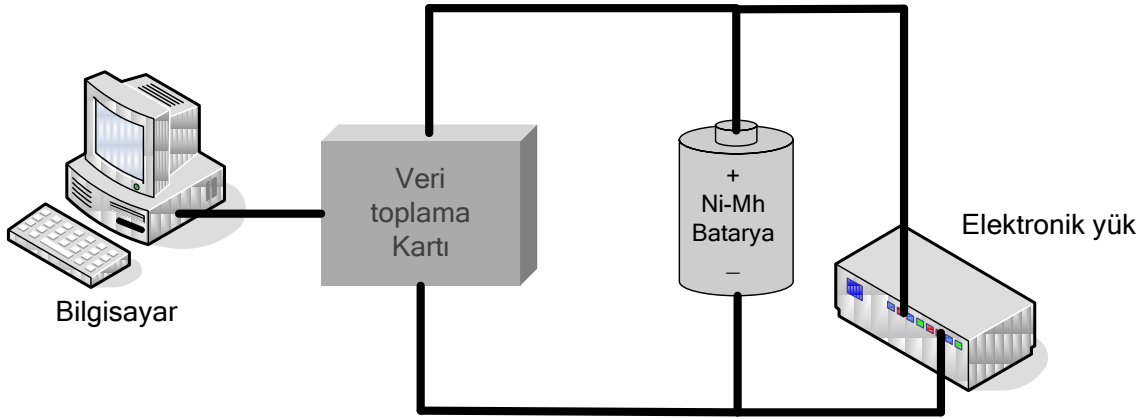
EK 2. Deney Düzenekleri

Batarya doluluk durumu ve parametre kestiriminde kullanılan deney düzenekleri Şekil Ek2.1 ve Şekil Ek2.2'de gösterilmiştir. Testlerde kullanılan cihazlar Őunlardır:

- Bilgisayar: Bataryadan toplanan veriler kullanılarak, batarya ile ilgili tüm hesaplamaların yapılması için PC türü bir bilgisayar kullanılmıştır.
- Veri toplama kartı: Batarya terminal uçlarından alınan gerilim, bir A/D dönüŐtürücü kart (National Instruments, SC2040) kullanılarak sayısal veriye dönüŐtürülmüŐtür. Buradan elde edilen sinyaller "National Instruments MIO-16E Series DAQ boards" veri iŐleme kartı ile bilgisayara aktarılmıŐtır.
- Batarya: Batarya doluluk durumu, batarya sağlık durumu ve batarya parametrelerinin kestirimi ile ilgili deneysel çalışmalarda, silindirik tipte, AA, 2.1Ah kapasiteli doldurulabilir Ni-Mh bataryalar kullanılmıştır.
- Elektronik yük: Bataryanın sabit akımda doldurulması ve boşaltılması için, bataryaya seri olarak elektronik yük baĐlanmıŐtır. "Agilent, N3300A, System DC Electronic Load" markalı bu cihaz, sabit batarya akımının elde edilmesinde kullanılmaktadır.
- DC güç kaynağı: Doldurma testlerinde DC güç kaynağı olarak, "Agilent, E3648A, 0-8V, 5A / 0-20V, 2.5A, Dual Output DC Power Supply" kullanılmıştır.



Şekil Ek2.1: Batarya doldurma testlerinde kullanılan deney düzeneği.



Şekil Ek2.2: Batarya boşaltma testlerinde kullanılan deney düzeneği.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Cüneyt BARLAK

Doğum Yeri : Eskişehir

Doğum Yılı : 1971

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise : 1986-1989, Eskişehir Anadolu Lisesi

Lisans : 1989-1993, Anadolu Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

Y. Lisans : 1994-1996, ODTÜ, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara

Yabancı Dil: İngilizce

İş Tecrübesi:

2000-2001: Araştırma Görevlisi, Anadolu Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

2001-2002: Ürün Geliştirme Mühendisi, Ford-Otosan, Eskişehir

2003-2009: Araştırma Görevlisi, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara