KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINA DESTEK İÇİN KULLANILAN BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR DEPOLAMA BİRİMLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

YAĞMUR KIRÇİÇEK

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINA DESTEK İÇİN KULLANILAN BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR DEPOLAMA BİRİMLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

YAĞMUR KIRÇİÇEK

Doç.Dr. Şule ÖZDEMİR
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Doç.Dr. Ercüment KARAKAŞ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Doç.Dr. Bülent VURAL
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 18.01.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Fotovoltaik enerji kaynaklarının güneş enerjisini doğrudan kolayca elektrik enerjisine dönüştürebilmesi gibi avantajları nedeniyle günümüzde kullanımı giderek artmaktadır. Fakat fotovoltaik sistemlerin kesintili ve kararsız elektrik üretimi yapısından dolayı hibrit enerji depolama gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Enerjinin sürekliliğini sağlamak için uygulama alanlarında çeşitli enerji depolama birimleri kullanılmaktadır. Hibrit enerji depolama birimi olarak da bataryalar ve ultrakapasitörlerin birlikte kullanımı araştırılmaktadır. Bu birimleri kontrol eden enerji yönetim algoritmasının kararlı ve düzgün çalışabilmesi için depolama birimlerinin karakteristiklerini doğru okumak gerekir. Bu yüzden depolama birimi olarak kullanılan batarya ve ultrakapasitörün modellenmesi enerji yönetim algoritması için çok önemlidir.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 2211 "Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı" tarafından desteklenmiştir.

TÜBİTAK 113E143 nolu "Fotovoltaik kaynaktan beslenen 3-fazlı 4-telli akıllı mikro şebeke yapısının batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sistemi ile geliştirilmesi" adlı 1001 projesindeki laboratuar ve ekipmanlar bu tezin deneysel çalışmaları boyunca kullanılmıştır.

Tez çalışması, Gebze'de bulunan Mavisis Teknoloji ve Enerji San. ve Tic. A.Ş.'nin TÜBİTAK-TEYDEP 1511 Öncelikli Alanlar Araştırma Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Programı, 1120057 proje numaralı "Depolamalı Güneş Elektriği Santrali Teknolojisi Geliştirme Projesi" adlı projede danışmanlık hizmeti kapsamında ortak çalışma olarak yürütülmüştür.

Tez çalışmalarına ayırdığım zamanı anlayışla karşılayıp beni destekleyen, maddi ve manevi her türlü destekleriyle yanımda olan aileme, bugüne kadar öğrettikleriyle bana katkıda bulunan herkese teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım süresince, çalışmalarıma yön veren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Şule ÖZDEMİR ve Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR'e, deneysel ve simülasyon çalışmalarda yaptıkları katkılardan dolayı Yrd. Doç. Dr. Özcan ATLAM ve Ahmet AKTAŞ'a teşekkür ederim.

Ocak – 2016 Yağmur KIRÇİÇEK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR viii
ÖZET xi
ABSTRACT xii
GİRİŞ 1
1. BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR ÇEŞİTLERİ 3
1.1. Bataryalar 3
1.1.1. Birincil (şarj edilemez) bataryalar 4
1.1.2. İkincil (şarj edilebilir) bataryalar 5
1.1.3. Lityum-iyon bataryaların karşılaştırılması 5
1.1.4. Şarj edilebilir batarya çeşitlerinin karşılaştırılması 8
1.2. Ultrakapasitörler 10
1.2.1. Ultrakapasitörlerin kullanım alanları ve uygulamaları 12
2. BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR TERİMLERİ 15
2.1. Batarya Terimleri 15
2.1.1. Batarya kapasitesi 15
2.1.2. Batarya doluluk durumu (state of charge (SOC)) 17
2.1.3. Sıcaklığın etkisi 19
2.1.4. Deşarj derinliği (depth of discharge (DOD)) 20
2.1.5. Enerji yoğunluğu 21
2.1.6. Güç yoğunluğu 21
2.1.7. Verimlilik 22
2.1.8. Yüksüz deşarj (self discharge) 22
2.1.9. Batarya şarj/deşarj sayısı (çevrim ömrü) 22
2.2. Kurşun-Asit ve $LiFePO_4$ Bataryalar için Güvenli Çalışma Aralığı 23
2.3. Ultrakapasitör Terimleri 26
2.3.1. Ultrakapasitörün iç direnci (ESR) 27
2.3.2. Sıcaklığın ultrakapasitöre etkisi 28
3. BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR MODELLEME YÖNTEMLERİ 30
3.1. Batarya Modelleme Yöntemleri 30
3.1.1. Elektriksel batarya modelleri 31
3.1.1.1. Basit batarya modeli 31
3.1.1.2. Modifikasyon basit batarya modeli 32
3.1.1.3. Gelişmiş basit batarya modeli 33
3.1.1.4. Dirençsel thevenin eşdeğer batarya modeli 34
3.1.1.5. Thevenin batarya modeli 35
3.1.1.6. Reaktif batarya modeli 35
3.1.1.7. Copetti batarya modeli 36
3.1.1.8. Parazitik etki elemanlı dinamik batarya modeli 38
3.1.1.9. Doğrusal elektriksel batarya modeli 39

3.1.1.10. Randle batarya modeli 39
3.1.1.11. İkinci dereceden Randle batarya modeli 40
3.2. Ultrakapasitör Modelleme Yöntemleri 42
3.2.1. Ultrakapasitörde enerji depolama 42
3.2.2. RC eşdeğer devre modelleri 43
3.2.2.1. Basit RC ultrakapasitör devre modeli 43
3.2.2.2. RC paralel kol ultrakapasitör devre modeli 44
3.2.2.3. RC iletim hattı ultrakapasitör devre modeli 45
3.2.2.4. RC seri-paralel kol ultrakapasitör devre modeli 45
3.2.2.5. Çift tabaka yapılı basitleştirilmiş Helmholtz ultrakapasitör modeli 46
4. BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR DENEYSEL ÇALIŞMALARI 47
4.1. Batarya Deneysel Çalışma ve Sonuçları 47
4.1.1. Hyundai marka batarya 1A şarj/deşarj deneyi 53
4.1.2. Hyundai marka batarya 1A ve 3A deşarj deneyi 59
4.1.3. Hyundai marka batarya farklı sıcaklık deşarj deneyi 62
4.1.4. Vision marka batarya sabit 4,4A şarj/deşarj deneyi karşılaştırması 64
4.1.5. Vision marka batarya sabit 4,4A ve 10A deşarj deneyi 69
4.1.6. Hipower batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deneyi karşılaştırması 72
4.1.7. Batarya deneysel çalışmaların özeti 76
4.2. Ultrakapasitör Deneysel Çalışma ve Sonuçları 77
4.2.1. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A şarj deneyi 80
4.2.2. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A deşarj deneyi 83
4.2.3. Ultrakapasitör 1,5A, 3A, 4,5A ve 6A sabit akım şarj deneyi ….. 85
4.2.4. Ultrakapasitör EPR hesaplama deneyi 90
5. BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR MODELLEME ÇALIŞMALARI 93
5.1. Batarya Şarj Durumunda Modelleme Çalışması 93
5.2. Batarya Deşarj Durumunda Modelleme Çalışması 97
5.3. Ultrakapasitör Şarj Durumunda Modelleme Çalışması 99
5.4. Ultrakapasitör Deşarj Durumunda Modelleme Çalışması 101
5.5. Batarya Şarjı Deneysel ve Modelleme Karşılaştırmaları 103
5.6. Batarya Deşarjı Deneysel ve Modelleme Karşılaştırmaları 105
5.7. Ultrakapasitör Şarj/Deşarj Deneysel ve Modelleme Karşılaştırmaları 108
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 112
KAYNAKLAR 116
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 119
ÖZGEÇMİŞ 120

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Bataryanın çalışma prensibi 4
Şekil 1.2. Lityum-iyon bataryaların ölçeklendirmeli olarak karşılaştırılması 7
Şekil 1.3. İkincil bataryaların enerji yoğunluğu açısından karşılaştırılması 8
Şekil 1.4. Şarj edilebilir batarya hücrelerinin deşarj gerilim grafikleri 10
Şekil 1.5. Ultrakapasitör kısımları ve genel görünüşü 11
Şekil 1.6. Farklı tipte enerji depolama sistemleri için Ragone grafiği 12
Şekil 2.1. Deşarj grafiğine bağlı olarak Peukert eğrisi 16
Şekil 2.2. Bataryanın SOC çalışma aralığı 18
Şekil 2.3. Lityum-iyon batarya şarj/deşarjı için hücre gerilimi bandı 19
Şekil 2.4. Kurşun-asit batarya kapasitesinin sıcaklığa göre değişimi 20
Şekil 2.5. Kurşun-asit batarya çevrim sayısı ve deşarj derinliği ilişkisi 21
Şekil 2.6. (a) Akım (b) Sıcaklık (c) SOC ve (d) Çevrim parametrelere göre hücre iç direncinin değişimi 24
Şekil 2.7. $LiFePO_4$ bataryanın güvenli şarj/deşarj çalışma bölgesi 25
Şekil 2.8. Vision 6FM80 kurşun-asit bataryanın güvenli şarj/deşarj bölgesi 25
Şekil 2.9. $LiFePO_4$ bataryanın güvenli sıcaklık çalışma bölgesi 26
Şekil 2.10. Vision 6FM80 kurşun-asit bataryanın güvenli sıcaklık bölgesi 26
Şekil 2.11. Ultrakapasitör iç direnç ΔV_2 gerilim değişimi 28
Şekil 2.12. Ultrakapasitörün sıcaklıkla ESR ve kapasitesinin değişimi 29
Şekil 3.1. Basit batarya modeli 32
Şekil 3.2. Modifikasyon basit batarya modeli 32
Şekil 3.3. Dirençsel Thevenin eşdeğer batarya modeli 34
Şekil 3.4. Thevenin batarya modeli 35
Şekil 3.5. Reaktif batarya modeli 36
Şekil 3.6. Copetti batarya modeli 38
Şekil 3.7. Parazitik etki elemanlı dinamik batarya modeli 38
Şekil 3.8. Doğrusal elektriksel batarya modeli 39
Şekil 3.9. Randle batarya modeli 40
Şekil 3.10. İkinci dereceden Randle batarya modeli 41
Şekil 3.11. Ultrakapasitör devre modeli 43
Şekil 3.12. RC paralel kol modeli 44
Şekil 3.13. RC iletim hat modeli 45
Şekil 3.14. RC seri-paralel kol modeli 46
Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan bataryaların fotoğrafları 47
Şekil 4.2. Deneysel çalışma işlem basamakları 49
Şekil 4.3. Batarya difüzyon modeli 50
Şekil 4.4. $LiFePO_4$ batarya gerilim uçlarındaki değişimi 51
Şekil 4.5. Batarya şarj deneyinin yapılışı ve ölçüm noktaları 52
Şekil 4.6. Batarya deşarj deneyinin yapılışı ve ölçüm noktaları 52
Şekil 4.7. Hyundai marka kurşun-asit batarya 1A şarj deney fotoğrafı 54
Şekil 4.8. Hyundai marka kurşun-asit batarya 1A deşarj deney fotoğrafı 55
Şekil 4.9. Hyundai batarya 1A şarj/deşarj deneyi V_B/t değişimi 56
Şekil 4.10. Hyundai batarya 1A şarj/deşarj deneyi I_B/t değişimi 56

Şekil 4.11. Hyundai batarya 1A şarj/deşarj deneyi $R_{İÇ}$/t değişimi 57
Şekil 4.12. Hyundai batarya 1A şarj/deşarj deneyi VB/SOC değişimi 59
Şekil 4.13. Hyundai batarya 1A ve 3A deşarj deneyi V_B/t değişimi 59
Şekil 4.14. Hyundai batarya 1A ve 3A deşarj deneyi I_B/t değişimi 60
Şekil 4.15. Hyundai batarya 1A ve 3A deşarj deneyi $R_{İÇ}$/t değişimi 61
Şekil 4.16. Hyundai batarya 1A ve 3A deşarj deneyi V_B/SOC değişimi 61
Şekil 4.17. Hyundai batarya farklı sıcaklık deşarj deney fotoğrafı 62
Şekil 4.18. Hyundai batarya farklı sıcaklık deşarj deneyi V_B/°C değişimi 63
Şekil 4.19. Hyundai batarya farklı sıcaklık deşarj deneyi I_B/°C değişimi 63
Şekil 4.20. Hyundai batarya farklı sıcaklık deşarj deneyi $R_{İÇ}$/°C değişimi 64
Şekil 4.21. Vision marka kurşun-asit batarya sabit 4,4A şarj deney fotoğrafı 65
Şekil 4.22. Vision marka kurşun-asit batarya sabit 4,4A deşarj deney fotoğrafı 66
Şekil 4.23. Vision sabit 4,4A deşarj deneyi Chroma arayüz ekranı 67
Şekil 4.24. Vision batarya sabit 4,4A şarj/deşarj deneyi V_B/t değişimi 68
Şekil 4.25. Vision batarya sabit 4,4A şarj/deşarj deneyi $R_{İÇ}$/t değişimi 68
Şekil 4.26. Vision batarya sabit 4,4A şarj/deşarj deneyi V_B/SOC değişimi 69
Şekil 4.27. Vision batarya sabit 10A deşarj akım deneyi Chroma arayüz ekranı 70
Şekil 4.28. Vision batarya sabit 4,4A ve 10A deşarj deneyi V_B/t değişimi 70
Şekil 4.29. Vision batarya sabit 4,4A ve 10A deşarj deneyi $R_{İÇ}$/t değişimi 71
Şekil 4.30. Vision batarya sabit 4,4A ve 10A deşarj deneyi V_B/SOC değişimi 72
Şekil 4.31. $LiFePO_4$ batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deney fotoğrafı 73
Şekil 4.32. $LiFePO_4$ batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deneyi V_B/t değişimi 74
Şekil 4.33. $LiFePO_4$ batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deneyi I_B/t değişimi 74
Şekil 4.34. $LiFePO_4$ batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deneyi $R_{İÇ}$/t değişimi 75
Şekil 4.35. $LiFePO_4$ batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deneyi V_B/SOC değişimi 76
Şekil 4.36. Maxwell marka ultrakapasitör fotoğrafı 77
Şekil 4.37. Ultrakapasitör şarj deneyinin yapılışı ve ölçüm noktaları 79
Şekil 4.38. Ultrakapasitör deşarj deneyinin yapılışı ve ölçüm noktaları 79
Şekil 4.39. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A şarj deney fotoğrafı 81
Şekil 4.40. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A şarj deneyi V_{UK}/t değişimi 82
Şekil 4.41. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A şarj deneyi I_{UK}/t değişimi 82
Şekil 4.42. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A şarj deneyi R_{ESR}/t değişimi 83
Şekil 4.43. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A deşarj deney fotoğrafı 83
Şekil 4.44. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A deşarj deneyi V_{UK}/t değişimi 84
Şekil 4.45. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A deşarj deneyi I_{UK}/t değişimi 85
Şekil 4.46. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A deşarj deneyi R_{ESR}/t değişimi 85
Şekil 4.47. Ultrakapasitör 1,5A şarj osilaskop ekranı 86
Şekil 4.48. Ultrakapasitör 3A şarj osilaskop ekranı 87
Şekil 4.49. Ultrakapasitör 4,5A şarj osilaskop ekranı 87
Şekil 4.50. Ultrakapasitör 6A şarj osilaskop ekranı 88
Şekil 4.51. Ultrakapasitör farklı akımlarda şarj deneyi C_{UK}/V_{UK} değişimi 89
Şekil 4.52. Ultrakapasitör farklı akımlarda şarj deneyi C_{UK}/t değişimi 90
Şekil 4.53. Ultrakapasitör farklı akımlarda şarj deneyi V_{UK}/t değişimi 90
Şekil 4.54. Ultrakapasitör EPR deneyi 91
Şekil 4.55. Ultrakapasitör EPR deneyi V_{UK}/t değişimi 92
Şekil 5.1. Kurşun-asit batarya örnek şarj gerilim grafiği 94

Şekil 5.2. Kurşun-asit batarya örnek deşarj gerilim grafiği 97
Şekil 5.3. Ultrakapasitör örnek şarj gerilim grafiği..... 100
Şekil 5.4. Ultrakapasitör örnek deşarj gerilim grafiği..... 102
Şekil 5.5. Hyundai 12V 1A şarj modelleme karşılaştırması 104
Şekil 5.6. Vision 12V sabit 4,4A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması 104
Şekil 5.7. Hyundai 12V 1A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması..... 105
Şekil 5.8. Hyundai 12V 3A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması..... 106
Şekil 5.9. Vision 12V sabit 4,4A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması 106
Şekil 5.10. Vision 12V sabit 10A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması 107
Şekil 5.11. Hipower 3,2V 15,6A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması 107
Şekil 5.12. Hipower 3,2V 32,5A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması 108
Şekil 5.13. Hipower 3,2V 49,1A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması 108
Şekil 5.14. Ultrakapasitör sabit 1,5A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması 109
Şekil 5.15. Ultrakapasitör sabit 3A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması 109
Şekil 5.16. Ultrakapasitör sabit 4,5A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması 110
Şekil 5.17. Ultrakapasitör sabit 6A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması 110
Şekil 5.18. Ultrakapasitör 1,5A ve 3A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması 111

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Lityum-iyon batarya çeşitlerinin gerilim ve enerji yoğunlukları 6
Tablo 1.2. Şarj edilebilir bataryaların performans karakteristikleri 9
Tablo 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan bataryaların teknik özellikleri 48
Tablo 4.2. 63108A yük modülünün teknik özellikleri 66
Tablo 4.3. Hipower deşarj deney akım ve süre değerleri 72
Tablo 4.4. Hipower deşarj deneylerinde hesaplanan dinamik iç direnç değerleri 75
Tablo 4.5. Batarya şarj ve deşarj deney sonuçlarının tablosu 77
Tablo 4.6. Maxwell marka ultrakapasitörün teknik özellikleri 78
Tablo 5.1. Modelleme çalışma sonucundaki hata oranları 111

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

C : Batarya şarj/deşarj akım oranı,
C_1 : Randle batarya modeli geçici durum kapasitörü, (F)
C_2 : Thevenin batarya modelinde geçici durum kapasitörü, (F)
C_a : RC seri-paralel kol UK modelinde eşdeğer seri kapasite, (F)
C_b : Doğrusal batarya model kapasitörü, (F)
C_B : Bataryanın nominal kapasitesi, (Ah)
C_f : RC paralel kol UK modelinde hızlı-vadeli kapasitör, (F)
C_m : RC paralel kol UK modelinde orta-vadeli kapasitör, (F)
C_N : Batarya geçici durum kapasitörü, (F)
C_p : Peukert'e göre kapasite, (Ah)
C_{pk} : Copetti batarya modelinde polarizasyon kapasitesi, (F)
C_{rb} : Randle batarya modeli kapasitörü, (F)
C_s : RC paralel kol UK modelinde uzun-vadeli kapasitör, (F)
C_{UK} : Ultrakapasitör kapasitesi, (F)
C_y : Reaktif batarya modelinde yayılım kapasitörü, (F)
E_0 : Doğrusal batarya model gerilim kaynağı, (V)
E_d : Ultrakapasitörün depoladığı enerji miktarı, (Wh)
f_3 : Ultrakapasitör deşarj modelleme fonksiyonu
f_D : Batarya deşarj modelleme fonksiyonu
f_{S1} : Batarya şarj modelleme 1. fonksiyonu
f_{S2} : Batarya şarj modelleme 2. fonksiyonu
f_{UKS1} : Ultrakapasitör şarj modelleme 1. fonksiyonu
f_{UKS2} : Ultrakapasitör şarj modelleme 2. fonksiyonu
h_b : Batarya modelleme hata oranı, (%)
h_{uk} : Ultrakapasitör modelleme hata oranı, (%)
I_B : Batarya akımı, (A)
I_{UK} : Ultrakapasitör deşarj akımı, (A)
k : Peukert sabiti
n : Batarya sabiti
R_0 : Bataryanın tam dolu durumundaki iç direnci, (Ω)
R_1 : Thevenin batarya modelinde batarya direnci, (Ω)
R_2 : Thevenin batarya modelinde geçici durum direnci, (Ω)
R_a : RC seri-paralel kol UK modelinde eşdeğer seri direnç, (Ω)
R_c : Şarj durumunda SOC direnci, (Ω)
R_d : Deşarj durumunda SOC direnci, (Ω)
R_{EPR} : Ultrakapasitör eşdeğer paralel direnci, (Ω)
R_{ESRD} : Ultrakapasitör deşarj durumda eşdeğer seri direnci, (Ω)
$R_{ESRŞ}$: Ultrakapasitör şarj durumda eşdeğer seri direnci, (Ω)
R_f : RC paralel kol UK modelinde hızlı-vadeli direnç, (Ω)
$R_{İÇD}$: Batarya deşarj durumunda dinamik iç direnci, (Ω)
$R_{İÇŞ}$: Batarya şarj durumunda dinamik iç direnci, (Ω)
R_m : RC paralel kol UK modelinde orta-vadeli direnç, (Ω)
R_N : Batarya geçici durum direnci, (Ω)

R_s : RC paralel kol UK modelinde kısa-vadeli direnç, (Ω)
SOC : Batarya doluluk durumu, (%)
V_B : Batarya terminal uçlarındaki gerilim, (V)
V_{cp} : Polarizasyon gerilimi, (V)
V_C : Ultrakapasitörün iç kaynak gerilimi, (V)
V_g : Gazlanma gerilimi, (V)
V_K : Kaynak gerilimi, (V)
V_{MBD} : Batarya deşarj modellemede hesaplanan batarya gerilimi, (V)
V_{MBS} : Batarya şarj modellemede hesaplanan batarya gerilimi, (V)
V_{MUKD} : Ultrakapasitör deşarj modellemede hesaplanan UK gerilimi, (V)
V_{MUKS} : Ultrakapasitör şarj modellemede hesaplanan UK gerilimi, (V)
V_{OC} : Batarya açık devre gerilimi, (V)
V_{SOC} : Batarya SOC bağlantılı gerilim, (V)
V_{UK_t2} : Ultrakapasitörün t_2 anında okunan gerilim değeri, (V)
V_{UK_t1} : Ultrakapasitörün t_1 anında okunan gerilim değeri, (V)
V_{UK} : Ultrakapasitör terminal gerilimi, (V)
t : Deşarj zamanı, (dk)
$t_{anlık}$: Periyodik olarak ölçüm alınan zaman dilimi, (dk)
Ti : Batarya deşarj olma süresi, (dk)
t_{son} : Batarya şarj deneyi toplam süresi, (dk)
t_{SOC} : Yüzdelik cinsinden batarya doluluk durum zaman dilimi, (dk)
Q : Deşarj derinliği

Kısaltmalar

Al-Air : Alüminyum-Hava
DOD : Deşarj Derinliği (Depth of Discharge)
EDLC : Elektriksel Çift Tabakalı Kondansatör (Electrical Double Layer Capacitor)
EPR : Ultrakapasitörün Eşdeğeri Paralel İç Direnci
ESR : Ultrakapasitörün Eşdeğeri Seri İç Direnci
HEDS : Hibrit Enerji Depolama Sistemi
HESS : Hybrid Energy Storage System (Hibrit enerji Depolama Sistemi)
Li_2S : Lityum-Sülfür
Li_2TiO_3 : Lityum-Titanat
$Li_4Ti_5O_{12}$: Lityum-Titanat Spinel
$LiCoO_2$: Lityum-Kobalt Oksit
$LiFePO_4$: Lityum-Demir Fosfat
$LiMn_2O_4$: Lityum-Mangan Oksit
$LiNiO_2$: Lityum-Nikel Oksit
$Li(NiCo)O_2$: Lityum-Nikel Kobalt Oksit
$Li(NiCoAl)O_2$: Lityum-Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
Li-ion : Lityum-İyon
NaNiCl : Sodyum-Nikel Klorür
NaS : Sodyum-Sülfür
NiCd : Nikel-Kadmiyum
NiFe : Nikel-Demir
NiMH : Nikel-Metal Hidrür
RES : Renewable Energy Sources (Yenilenebilir Enerji Kaynakları)

SOC	: Batarya Doluluk Durumu (State of Charge)
SOH	: Batarya Sağlığı (Battery of Health)
UK	: Ultrakapasitör
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
Zn-Air	: Çinko-Hava

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINA DESTEK İÇİN KULLANILAN BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR DEPOLAMA BİRİMLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

ÖZET

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından (YEK) üretilen enerjinin elektrik güç sistemlerine eklenmesindeki en önemli sorun, bu kaynaklardan üretilen enerjinin iklim koşullarına bağlı olarak genellikle kararsız ve değişken olmasıdır. Güneş enerjisinden, güneş çok iyi parladığında ve bulutsuz bir günde yüksek miktarda elektrik üretilebilmekte ve en önemlisi enerji üretim değerleri iklim koşullarına (güneş parlaklığı) göre sürekli değişmektedir. Enerji depolama uygulamaları, iklim şartlarına göre değişen ve yalnız gündüz çalışabilen güneş enerji sistemleri gibi yenilenebilir enerji sistemlerinden kaynaklanan güç değerlerindeki değişimle başa çıkılabilir. Enerji depolama uygulamalarının kullanımı, yüklere kaliteli güç sağlanması için mikro şebekelerin kullanılmasıyla zorunlu hale gelmektedir. Tek tip bir enerji depolama ile yenilenebilir güç kullanan mikro şebekede bu işlevlerin tümü etkili/verimli bir şekilde gerçekleştirilemez. Hibrit enerji depolama sistemi güneş enerjisinden elektrik üretim sistemine eklenmesiyle bu probleme çözüm getirebilmektir.

Bu tez çalışmasında, hibrit enerji depolama sistem bileşenleri olan batarya ve ultrakapasitör depolama birimlerinin modelleme çalışmaları yapılmıştır. Laboratuar ortamında batarya ve ultrakapasitör şarj/deşarj deneyleri yapılarak modelleme çalışmaları için gerekli parametreler elde edilmiştir. Deneysel veriler ile MATLAB/M-File programı kullanılarak gerekli grafikler ve sonuçlar alınmıştır. Deneysel ve modelleme sonuçları karşılaştırılarak tez çalışmasında modelleme denklemlerinin doğruluk oranlarına yer verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Batarya Modelleme, Kurşun-asit Batarya, $LiFePO_4$ Batarya, Ultrakapasitör, Ultrakapasitör Modelleme.

MODELLING AND ANALYSIS OF BATTERY AND ULTRACAPACITOR STORAGE UNITS USED FOR SUPPORTING RENEWABLE ENERGY SOURCES

ABSTRACT

The most important problem for providing energy from Renewable Energy Sources (RES) to the electric power system is unstable and variable of the energy generated from these sources by depending on the climatic conditions. When sun is shining and a day without cloud, the more electric power can be produced with solar energy, but the amount of produced electrical energy are fluctuating continuously by depending on the climatic condition and solar irradiation. Energy storage applications can cope with the change in value resulting from the power of renewable energy systems according to climatic conditions and only day that can work as solar energy systems. The use of energy storage applications are become compulsory solutions for providing more power quality to the loads by using micro grids. All these functions are not realized productively and efficiently by using monotype energy storage unit in micro grids using renewable energy sources. A hybrid energy storage system by adding solar energy system is an efficient solution to this problem.

In this thesis, modelling of battery and ultracapacitor that are components of energy storage system have been performed. In the laboratory, battery and ultracapacitor charge/discharge tests were implemented to obtain the necessary parameters for modelling studies. Graphics and results were obtained with MATLAB/M-File program by using experimental results. Experimental and modelling results compared in the thesis are given the accuracy of the modelling equations.

Keywords: Battery Modelling, Lead-acid Battery, $LiFePO_4$ Battery, Ultracapacitor, Ultracapacitor Modelling.

GİRİŞ

Günümüzde enerji stratejik bir değer olup, ülkelerin gelişmişlik düzeyini ortaya koyan bir olgu haline gelmiştir. Dünyada halen enerjinin büyük bir kısmı fosil yakıtlardan sağlanırken günümüzde popülerliği artmakta olan Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK), fosil yakıtlara alternatif bir kaynak olarak sunulmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en yaygın olarak kullanılan sistemler, güneş ve rüzgâr kaynaklı sistemlerdir. Bu yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu ve sürdürülebilir bir yapıya sahip olduklarından kullanım oranı giderek artmaktadır. Fakat her ne kadar çevre dostu ve kullanışlı olsalar bile doğaya bağımlı bir karakteristiğe sahiptirler. Güneşin en parlak olduğu durumda fotovoltaik sistemler kararlı bir şekilde elektrik enerjisi üretirken, bulutlu ve akşam saatlerinde elektrik üretimi durmaktadır. Rüzgâr enerji sistemleri de aynı şekilde rüzgâr hızına bağlı olarak üretim gerçekleştirmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının bu kararsız ve kesintili yapısı enerjinin sürekliliği konusunda önemli problemler ortaya çıkarmaktadır. Böylece YEK'dan üretilen enerji, genel enerji talebi ile örtüşmemektedir. Bundan dolayı kullanıcılar tarafından enerjinin talep edilmediği ve YEK'dan üretilen tepe enerji miktarının çok olduğu durumda enerji depolama sistemlerinin önemi ortaya çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemleri depolama birimleri ile birlikte kullanılırsa, üretilen enerji depolanarak kullanıcılar için enerjinin sürekliliği sağlanmış olacaktır. Böylelikle enerji depolama sistemleri kullanılarak YEK'na bağlı yük talebi sürekli olarak karşılanabilecektir.

Enerji depolama birimleri olarak birçok depolama alternatifi bulunmaktadır. Özellikle bataryalar teknolojinin de gelişmesiyle birlikte depolama birimi olarak vazgeçilmezler arasında yerini almaktadır. Çeşitli kimyasal yapıya sahip birçok batarya çeşidi geliştirilmektedir. Günümüzde çok yaygın olarak kullanılan kurşun-asit bataryalar ve yeni teknolojiye sahip olan lityum-iyon batarya yaygın olarak kullanılmaktadır. Lityum-iyon bataryalar, kurşun-asit bataryalara göre daha yüksek

enerji depolamaktadır. Kurşun-asit bataryalara göre lityum-iyon bataryalar daha az hacim ve ağırlıkta daha fazla enerji depolama kapasitesine sahiptirler. Bir diğer enerji depolama birimi olarak uygulamalarda ultrakapasitör kullanılması yaygın hale gelmektedir. Ultrakapasitörler, bataryalara kıyasla yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler. Bu özelliğinden dolayı ultrakapasitörler anlık olarak çok yüksek bir enerji miktarını depolayıp yüke aktarabilirler. Ultrakapasitör ve bataryaların birlikte kullanılmasıyla, daha uzun süreli enerji talebi ve tepe yük talebinde enerji aktarma özelliğine sahip bir depolama birimi oluşturulmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında kurşun-asit batarya ile lityum demir fosfat batarya tipleri ve ultrakapasitör incelenmiştir.

Yenilenebilir enerji sistemlerinde birden fazla kaynak ve birim olduğundan bunların kontrollü olarak çalıştırılması gerekmektedir. Örneğin; fotovoltaik panellerden sürekli olarak maksimum enerji alabilmek için maksimum güç izleyici takip sistemi olmalıdır. Aynı şekilde depolama birimlerinin doğru zamanlamada devreye girip çıkması için de bir enerji yönetim algoritması çalışmalıdır. Bu depolama birimleri sürekli şarj ve deşarj altında çalışacağından doluluk durumunun bilinmesi önemli hale gelmektedir. Aksi durumda bataryalar kimyasal yapıya sahip olduklarından hücrelerinin ömrünü yitirmesine bir daha kullanılmaz hale gelmesine neden olunabilir. Bu yüzden yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılan enerji yönetim algoritması için batarya ve ultrakapasitör gerilim ve akım değerlerini doğru değerlendirmek önemli hale gelmektedir.

Batarya ve ultrakapasitör elemanlarının doğru şekilde modellenmesi ve parametrelerinin düşük hata oranları ile belirlenerek kontrolünün yapılması, hem batarya ve ultrakapasitörün ömrünü uzatır hem de güvenli olarak çalışmaları sağlanmış olur. Tezin amacı, bu enerji depolama birimlerinin modelleme çalışmalarını yaparak en düşük hata oranlarıyla batarya ve ultrakapasitör parametrelerini belirlemektir.

1. BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR ÇEŞİTLERİ

1.1. Bataryalar

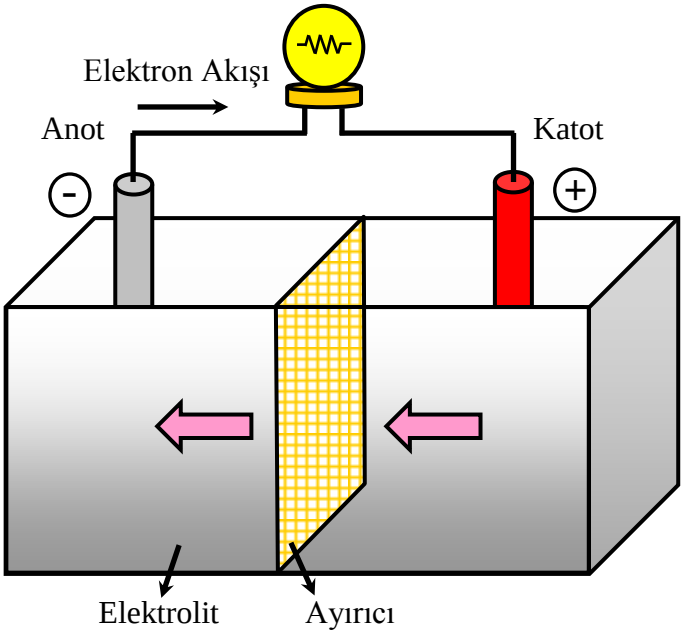
Bataryalar elektrokimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıkan enerjiyi elektrik enerjisi olarak depolayabilen kimyasal devrelerdir. Birim hücrelerden oluşur ve bu hücreler elektrik enerjisine dönüşebilen kimyasal enerji içerirler. Bu elektrolitik hücrelerden bir ya da birden fazlası seri bağlanarak bataryayı oluşturur. Batarya takımı ise, elektronik sürücü sistemine enerji verebilmek için, seri ya da paralel kombinasyonlar şeklinde bağlanmış batarya modüllerinin bir araya gelmesinden oluşur. Batarya hücresinin dört ana bileşeni Şekil 1.1'de gösterilmektedir.

a) Pozitif elektrot: Elektriksel akımın oluşturulmasını sağlayan aktif bir maddedir. Deşarj esnasında azalabilen, oksit, sülfit veya herhangi bir bileşikten oluşan bir elektrottur. Bu elektrot batarya deşarj olurken, dış devreden elektron tüketir. Elektrot malzemeleri katı haldedir.

b) Negatif elektrot: Bu elektrot batarya deşarj olurken, dış devreye elektron verir. Negatif elektrot malzemeleri de batarya hücresinde katı halde bulunur. Bazı lityum-iyon bataryaların negatif elektrotları oksitlenmeyi önlemek için alüminyumdan imal edilmektedir.

c) Elektrolit: Elektriksel akımı iletebilen ve hareket edebilen yüklü parçacıklardan oluşan bir çözeltidir. Elektrolit, elektrot reaksiyonlarında yer alan iyonlar için yüksek ve seçici iletkenlikte olmalıdır ama deşarj olayını engelleyebilmek için elektronları iletmemelidir. Elektrolitler sıvı, jel veya katı maddeler olabilirler, ayrıca bataryanın tipine göre asidik veya alkalin olabilirler.

d) Ayırıcı: Farklı kutuplardaki elektrotları fiziksel olarak ayıran, elektriksel olarak yalıtıcı bir tabakadır. Ayırıcılar, elektrolitlerin iyonlarını geçirmeli ve elektroliti saklayıp hareketsiz tutabilecek fonksiyona sahip olmalıdır.



Şekil 1.1. Bataryanın çalışma prensibi

1.1.1. Birincil (şarj edilemez) bataryalar

Bataryalar elektriksel olarak şarj olabilme yeteneklerine göre birincil (şarj edilemez) ve ikincil (şarj edilebilir) bataryalar olmak üzere iki sınıfta incelenebilir. Birincil tip bataryalar şarj edilemez olduklarından bir kez deşarj olduktan sonra bir daha kullanılamazlar. Birincil bataryalar genelde ucuz olmakla beraber, taşınabilir elektronik ve elektrik cihazlarında kullanılabilmektedir. Birincil bataryaların faydaları; ulaşılmasının kolay olması, basit kullanımı, gerek varsa bile az miktarda bakıma ihtiyaç duyması ve kullanım alanı ile bağlantılı olarak şekillendirilebilmesidir. Diğer genel avantajları ise iyi raf ömürleri, kabul edilebilir enerji ve güç yoğunlukları, güvenilir ve kabul edilebilir maliyete sahip olmalıdır [1].

Yüksek enerji yoğunluğu ile birlikte batarya ağırlığı ve boyutu da azaltılmıştır. Böylece, elektronik teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte düşünüldüğünde, yeni taşınabilir radyo, pratik iletişim ve elektronik cihazları da yapılabilmiştir. Daha yüksek güç yoğunluğu ise bilgisayar, cep telefonları, askeri gözetim sistemleri ve diğer yüksek güç uygulamalarında kullanılan cihazların tasarımını mümkün hale getirmiştir. Şu an pek çok birincil batarya uzun raf ömrüne sahip olması nedeniyle tıbbi elektronik cihazlarda kullanılmaktadır [2].

1.1.2. İkincil (şarj edilebilir) bataryalar

İkincil bataryalar tekrar şarj edilebilme özelliğine sahiptirler. Böylelikle batarya deşarj olduktan sonra yeniden kullanılması için bir enerji kaynağından hücrelerine zarar vermeyecek şekilde kontrollü olarak yeniden doldurulabilmektedir. İkincil bataryaların farklı kimyasal yapıya sahip birçok çeşidi geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak, kurşun-asit (Pb), nikel-demir (NiFe), nikel-çinko (NiZn), nikel-kadmiyum (NiCd), nikel-metal hidrür (NiMH), sodyum-sülfür (NaS), sodyum-nikel klorür (NaNiCl), alüminyum-hava (Al-Air), çinko-hava (Zn-Air), lityum-iyon (Li-ion), lityum-iyon polimer, lityum-demir fosfat (LiFePO4) bataryalardır.

Tez çalışmasında kurşun-asit ve lityum-demir fosfat bataryalar incelenmiştir. Kurşun-asit batarya birçok yıllık bir gelişim evresinden geçmesine rağmen 25-35Wh/kg gibi düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Buna rağmen güç yoğunluğu 150W/kg gibi yüksek bir değerdir. Bir kurşun-asit bataryanın hücre gerilimi 2V'tur. Lityum-iyon bataryaların şarj durumunda iken çalışma sıcaklığı -20°C ile +60°C arasında, deşarj olurken ise -40°C ile +65°C arasındadır. Tipik bir lityum-iyon bataryanın hücre gerilimi 2,5V ile 4,2V'tur ve bu gerilim değeri nikel-kadmiyum nikel-metal hidrür batarya hücre geriliminin yaklaşık olarak üç katıdır [3].

Lityum-demir fosfat bataryalar 220Wh/L ve 100-140Wh/kg'lık yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve ayrıca batarya şarj verimi %90'dan büyüktür. %80'lik derin deşarj oranında çevrim ömrü yaklaşık olarak 2000'dir. Yüksek çalışma sıcaklıklarında iyi performans gösteren lityum-demir fosfat bataryaların çalışma sıcaklıkları -20°C ile +70°C arasındadır [3]. Ticari olarak üretilen lityum-iyon batarya çeşitleri, lityum-kobalt oksit ($LiCoO_2$), lityum-mangan oksit ($LiMn_2O_4$), lityum-nikel oksit ($LiNiO_2$), lityum-demir fosfat ($LiFePO_4$), lityum-titanat (Li_2TiO_3), lityum-titanat spinel ($Li_4Ti_5O_{12}$), lityum-sülfür (Li_2S), lityum-nikel kobalt oksit ($Li(NiCo)O_2$), lityum-nikel kobalt magnezyum oksit ($Li(NiCoMn)O_2$), lityum-nikel kobalt alüminyum oksit ($Li(NiCoAl)O_2$) bataryalardır [4,5].

1.1.3. Lityum-iyon bataryaların karşılaştırılması

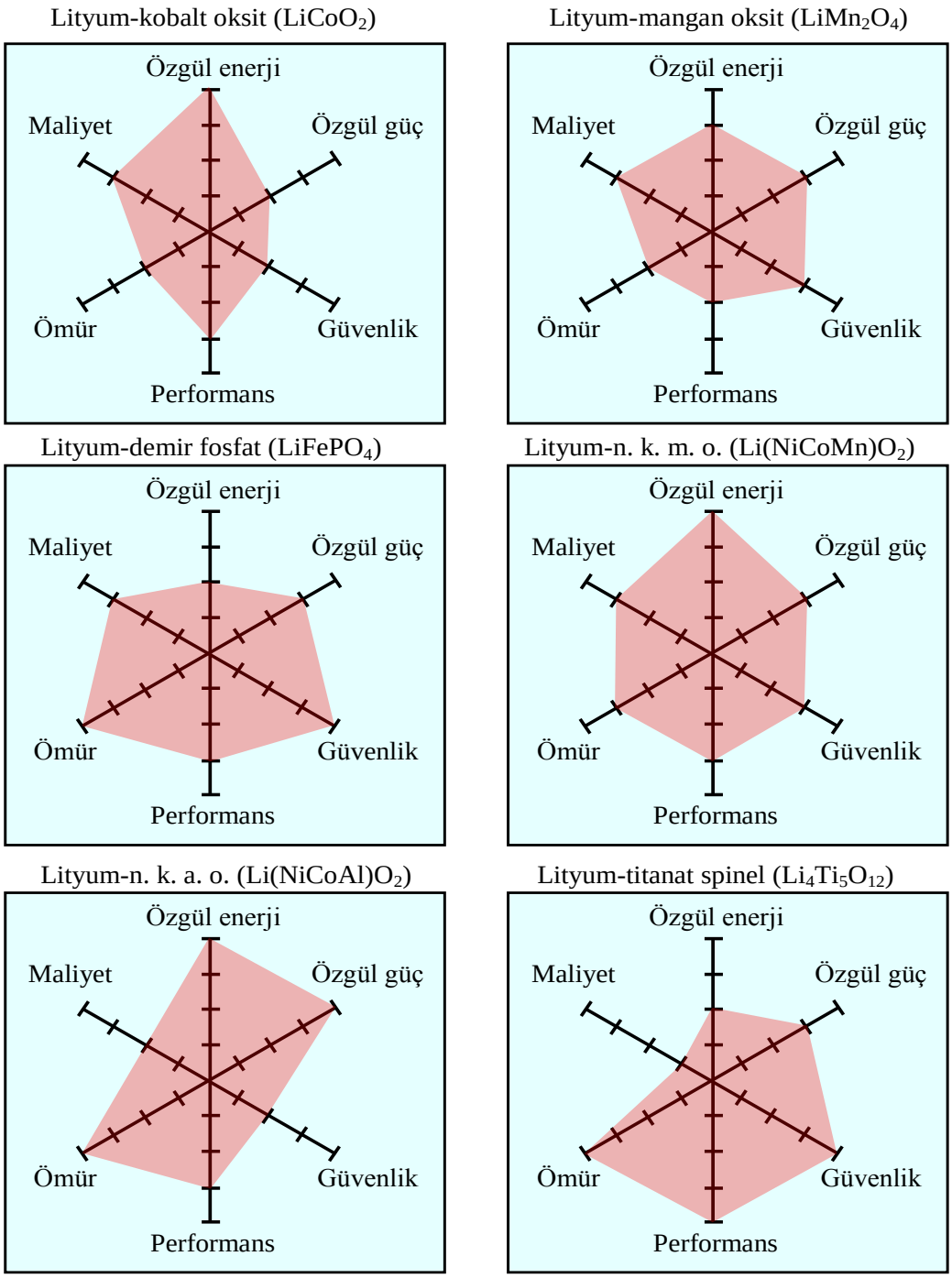
Lityum-iyon batarya çeşitlerinden olan Lityum-kobalt oksit ($LiCoO_2$), Lityum-nikel kobalt alüminyum oksit ($Li(NiCoAl)O_2$), Lityum-nikel kobalt magnezyum oksit

($Li(NiCoMn)O_2$), Lityum-mangan oksit ($LiMn_2O_4$) ve Lityum-demir fosfat ($LiFePO_4$) batarya hücrelerinin terminal gerilimi ve enerji yoğunluğu sayısal verilerle karşılaştırılması Tablo 1.1'de verilmektedir. Lityum-iyon bataryalarda kullanılan farklı kimyasal malzemelere göre bataryaların terminal gerilimleri ve enerji yoğunlukları değişmektedir.

Tablo 1.1. Lityum-iyon batarya çeşitlerinin gerilim ve enerji yoğunlukları [5]

Batarya Çeşitleri	**Gerilimi (V)**	**Enerji Yoğunluğu**	
		Kütlesel (Wh/kg)	**Hacimsel (Wh/L)**
$LiCoO_2$	3,7	195	560
$Li(NiCoAl)O_2$	3,6	220	600
$Li(NiCoMn)O_2$	3,6	205	580
$LiMn_2O_4$	3,9	150	420
$LiFePO_4$	3,2	90-130	333

Lityum-iyon bataryalarda farklı malzemelerin kullanılması bazı batarya çeşitlerinde kütlesel veya hacimsel enerji yoğunluğunu değiştirse de maliyet, güvenlik, batarya ömrü gibi birçok konuda olumlu ya da olumsuz etkilerini göstermektedir. Lityum-iyon batarya çeşitlerinden olan lityum-kobalt oksit ($LiCoO_2$), lityum-mangan oksit ($LiMn_2O_4$), lityum-demir fosfat ($LiFePO_4$), lityum-nikel kobalt magnezyum oksit ($Li(NiCoMn)O_2$), lityum-nikel kobalt alüminyum oksit ($Li(NiCoAl)O_2$) ve lityum-titanat spinel ($Li_4Ti_5O_{12}$) bataryaların ölçeklendirilmiş özgül enerji, özgül güç, güvenlik, performans, ömür ve maliyet konularını ele alarak karşılaştırılması Şekil 1.2'de görülmektedir. Karşılaştırılan bu altı konudan da maksimum şekilde fayda sağlamak için gerekli olan çalışmaların halen devam ettiği ölçeklendirmeli karşılaştırmadan görülmektedir.



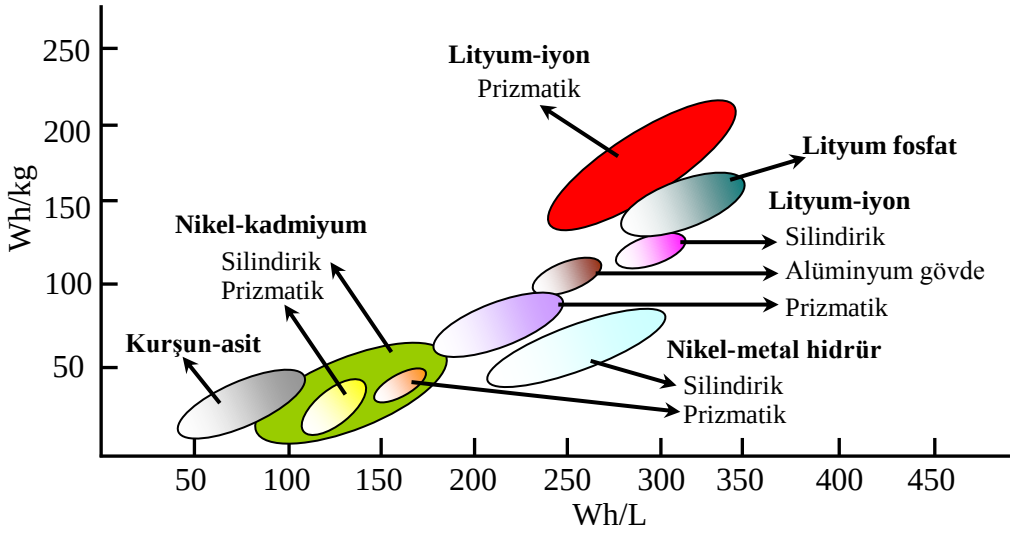
Şekil 1.2. Lityum-iyon bataryaların ölçeklendirmeli olarak karşılaştırılması [6,7]

Lityum-iyon bataryalar, taşınabilir cihazlar ve elektrikli araçlar için ağırlık ve hacim açısından en uygun çözümü sunmaktadır. Günümüzdeki teknolojiyle birim hücre başına en yüksek gerilim ve birim kütle başına en yüksek enerji yoğunluğu (Wh/kg), diğer bir deyişle en yüksek özgül enerji, lityum-iyon bataryalar tarafından sağlanabilmektedir. Ayrıca hafıza etkisi probleminden etkilenmedikleri için verimlidirler ve şarj/deşarj işleminin yarıda kesilmesi olumsuz bir durum oluşturmaz.

Ancak lityum çok çabuk tepkimeye girebilen bir madde olduğu için, lityum içeren pillerin yanma ve patlama riski bulunmaktadır. Şarj işlemi sırasında sabit gerilim yöntemi kullanılmalı ve batarya gerilimi belli bir değere ulaştıktan sonra bu gerilim sabit tutularak şarj akımı azaltılmalıdır. Aksi takdirde aşırı doldurulan bir pil zarar görebilir. Deşarj işlemi sırasında da belirli bir kesme gerilimine ulaşıldığında deşarj durdurulmalıdır. Bu kesme geriliminin altında deşarj edilmeye çalışılan bataryalarda hasar meydana gelir.

1.1.4. Şarj edilebilir batarya çeşitlerinin karşılaştırılması

Şarj edilebilir farklı kimyasal yapıya sahip bataryaların enerji yoğunluğu açısından karşılaştırılması Şekil 1.3'te verilmektedir. Geliştirilen batarya teknolojisi giderek daha az hacim ve daha az ağırlık özelliğine sahip olmaktadır. Wh cinsinden verilen karşılaştırmada lityum-iyon teknolojisinin diğer bataryalara kıyasla en iyi durumda olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 1.3. İkincil bataryaların enerji yoğunluğu açısından karşılaştırılması [8]

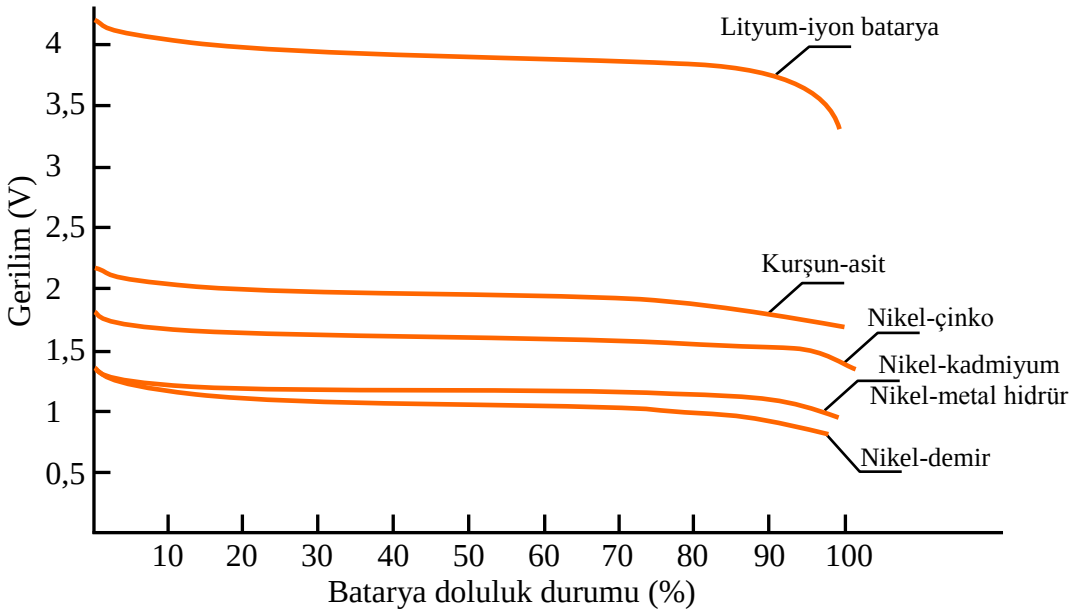
Tablo 1.2'de şarj edilebilir bataryaların enerji ve güç yoğunluğu, verim, yüksüz deşarj olma, şarj/deşarj çevrimi ve nominal çalışma gerilim karşılaştırması verilmektedir. Şarj/deşarj çevrim yönünden lityum-iyon bataryalar, kurşun-asit bataryalara kıyasla 1200 çevrim gibi oldukça yüksek bir değere sahiptirler. Verimlilik açısından incelendiğinde %99'luk bir oranla en verimli batarya lityum-iyon bataryalar olmaktadır. Ayrıca güç ve enerji yoğunluğu açısından incelendiğinde

yine lityum-iyon batarya teknolojisi çok yüksek değerlerle ön sırada yer almaktadır [9-13].

Tablo 1.2. Şarj edilebilir bataryaların performans karakteristikleri [9-13]

Bataryalar	**Enerji yoğunluğu (Wh/kg)**	**Güç yoğunluğu (Wh/kg)**	**Verimlilik (%)**	**Yüksüz deşarj olma (%/ay)**	**Şarj/deşarj çevrimi**	**Nominal çalışma gerilimi (V)**
Kurşun-asit	30-40	180	70-92	3-4	500-800	2,0
Nikel-kadmiyum	40-60	150	70-90	20	1500	1,2
Nikel-metal hidrür	30-80	250-1000	66	20	1000	1,2
Nikel-demir	50	100	65	20-40	2000-4000	1,2
Nikel-çinko	60	900	70	<20	100-500	1,65
Çinko-gümüş oksit	130	>1000	70-90	5	50-100	1,5
Kadmiyum-gümüş oksit	70	<1000	90	5	300-800	1,2
Nikel-hidrojen	75	<1000	60	Yüksek	20000	1,3
Lityum-iyon	160	1800	99	5-10	1200	4,0
Lityum-polimer	130-200	>3000	99	5-10	500-1000	3,7

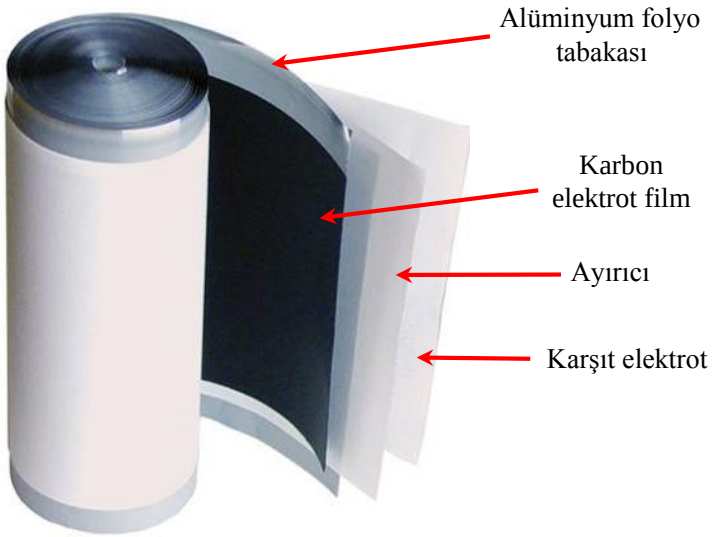
Nominal çalışma gerilim açısından incelendiğinde lityum-iyon batarya teknolojisi 4V ile en yüksek batarya terminal gerilimi olarak gözükmektedir. Şekil 1.4'te şarj edilebilir batarya hücrelerinin deşarj gerilim grafiklerinin batarya doluluk durumuna bağlı olarak değişimi ayrıntılı olarak verilmektedir. En düşük çalışma gerilimi 1,2V seviyesinin altında olan nikel-demir bataryadır. Nikel-kadmiyum ve nikel-metal hidrür batarya çeşidi yaklaşık olarak 1,2V ile aynı deşarj eğrisi çizmektedir [3].



Şekil 1.4. Şarj edilebilir batarya hücrelerinin deşarj gerilim grafikleri [3]

1.2. Ultrakapasitörler

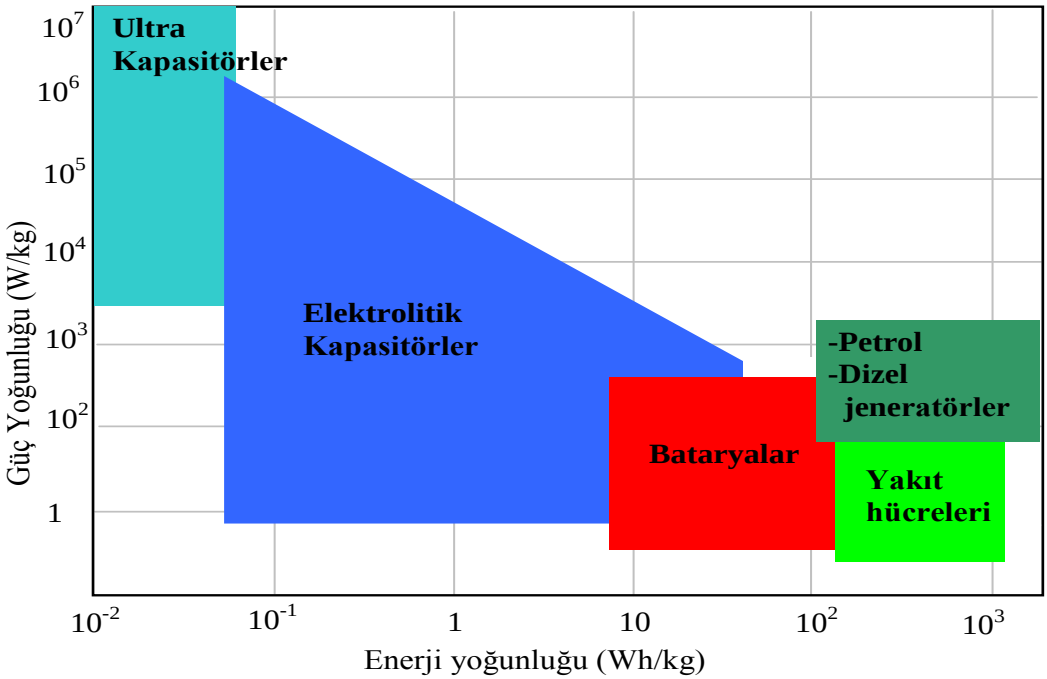
Elektrik enerjisi kondansatörlerde depolanabilir. Kondansatörler enerjiyi pozitif ve negatif elektrostatik yüklerin ayrışmasıyla elektrik alanda depo eden cihazlardır. Kapasitörler iki tane iletken plaka ile bunları ayıran ve dielektrik olarak adlandırılan yalıtkanlardan oluşmaktadır. Dielektrik malzeme iki levha arasında ark oluşmasını önleyerek daha fazla şarj yapılmasına yardım eder. Klasik kapasitörlerin güç yoğunlukları çok yüksektir, fakat enerji yoğunlukları çok düşüktür. Klasik kapasitörler genel olarak elektrolitik kapasitörler olarak adlandırılırlar. Ultrakapasitörler ise klasik kapasitörlerin geliştirilmiş olanlarıdır. Klasik kapasitörlere kıyasla enerji yoğunlukları yüksektir. Enerji yoğunlukları az fakat deşarj süreleri hızlı ve çevrim ömrü daha fazladır (8-15 yıldır). Ancak kapasitörlerin asıl olarak boyut problemleri vardır. Kapasitörlerin kapasitesi ve dielektrik malzeme arasında lineer bir bağlantı vardır. Bu yüzden büyük kapasite gerekli olduğunda zorunlu olarak dielektrik malzeme de büyük olmak zorundadır. Ultrakapasitörler yüksek güç yoğunluğuna sahip depolama birimleridir (5,5kW/kg) [14-17]. Şekil 1.5'de tipik bir ultrakapasitörün kısımları ve genel görünüşü görülmektedir.



Şekil 1.5. Ultrakapasitör kısımları ve genel görünüşü [15]

Ultrakapasitörler, temelde normal kapasitörler gibi davranan fakat yüksek enerji ve güç yoğunluğu bakımından kapasitörlerden ayrılan enerji depolama sistemleridir. Bunun sonucunda süperkapasitör ya da ultrakapasitör diye bilinen bu yeni tip enerji depolama sistemleri çok yoğun bir araştırma konusudur. Ultrakapasitörlerin, pil ve kapasitörlerin kullanılamadığı yüksek enerji ve güç yoğunluğu gerektiren uygulamalar için bir alternatif olarak kullanılmaları önemlerini arttırmaktadır. Ultrakapasitörler 1000000 defadan daha çok doldurulup deşarj edilebilir [14-17].

Şekil 1.6, güç yoğunluğana karşı enerji yoğunluğunu veren tipik Ragone grafiğini göstermektedir [20]. Ragone grafiği çeşitli enerji depolama sistemlerinin enerji yoğunluklarına karşı güç yoğunluklarını karşılaştırmak için kullanılan bir grafiktir.



Şekil 1.6. Farklı tipte enerji depolama sistemleri için Ragone grafiği [20]

Ragone grafiğinde enerji yoğunluğu (yatay eksen) ne kadar enerjinin depolanabileceğini, güç yoğunluğu (dikey eksen) ise depolanan enerjinin ne kadar sürede aktarılabileceğini tanımlamaktadır. Bu grafiğe göre ultrakapasitörler yüksek güç yoğunluğunda düşük enerji yoğunluğuna sahipken, yakıt pilleri ve bataryalar yüksek enerjiye ancak sınırlı güç yoğunluğuna sahiptir. Lityum iyon pilleri ve ileri ikincil bataryaların yavaş güç aktarımına sahip olması, birçok yeni uygulamada daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip sistemlere olan ihtiyacı arttırmıştır. Güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğu skalasında ultrakapasitörler bataryalarla elektrolitik kapasitörlerin arasındaki boşluğu doldurmaktadır.

1.2.1. Ultrakapasitörlerin kullanım alanları ve uygulamaları

Ultrakapasitörlerin ilk örnekleri 1957 yılında General Elektrik tarafından patentlenmiş, fakat kullanıma sunulmamıştır. Daha sonra kullanılan ilk örnek 1978 yılında patentlenen bu kapasitör $5m^3$ ve daha altı boyutlardaki cihazlarda kullanıma uygun olmasının yanında 5V gerilim ve 1F'tan yüksek kapasitans değerlerine ulaşabilmekteydi. Bu kapasitör bilgisayarlarda veri kaybını önlemek amaçlı kullanılmıştır. Ultrakapasitörler 1990'ların başına kadar çok fazla gelişme göstermese de, tasarımcılar kapasitörlerin hücre tasarımı üzerinde durmuşlardır.

Ayrıca çalışma prensiplerinin doğru ve alternatif akımla ilgili işlevlerini araştırmışlardır [14].

1990'ların başında Moskova'da bir şirket kapasitörlerde asimetrik tasarım olarak adlandırdıkları bir yapı geliştirmişler ve bunu tamamı elektrikli bir otobüsün güç sağlayıcısı olarak kullanmışlardır. Şarj süresi yarım saat ve mesafe olarak 15 km ile sınırlandırılmış bir kullanım alanına sahiptir. Kullanılan ultrakapasitörler 8kWh enerji depolayabilmekteydi. Benzer bir çözüm de 2010 yılında Şangay'da kullanılmaya başlanmıştır. Bu otobüsler duraklar arasında sürekli şarj olmaktadır ve şarj süresi yalnızca 20s'dir.

Dünyadaki artan karbondioksit salımı birçok otomobil üreticisini elektrikli hibrit veya sıfır CO_2 salımlı araçlar geliştirmeye itmiştir. Önemli üreticilerden Volvo bataryaların enerji depolamak için çok eski teknolojiler olduğunu söylemiş ve enerji depolamada ultrakapasitörlere yönelmişlerdir. Karbon fiber ve polimer temelli bu ultrakapasitörlerin gövde elemanı olarak da kullanılabilmesi, ek bir ağırlığa sebep olan batarya bölmesine olan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır [15].

Rüzgâr destekli bir otomobil tasarımı için yola çıkan Rory Handel ve Maxx Bricklin, alternatif enerji kullanan Formula aracı, RORMAx Formula AE'yi tasarlamıştır. Konsept otomobilin ultrakapasitör, güneş panelleri ve hava akımı dönüştürücüsü gibi teknolojiler kullanılarak doğaya daha az zarar vermesi amaçlanmıştır. Ultrakapasitörlerden sağlanan enerjiyle harekete geçen araç daha sonra üzerinden geçen rüzgârı kullanarak kendi şarjını yüzde 25'e kadar arttırabilmektedir. Kağıt üzerinde yapılan hesaplamalarla 0-100km hızlanmasını 4 saniyenin altında tamamlaması beklenen bu otomobilin 230km son hıza ulaşabilip 90 dakikalık şarjla 300km ilerleyebileceği düşünülmektedir. Prototip 2009 yılının Ağustos ayında tamamlanmıştır.

Şangay'daki elektrikli otobüsler ultrakapasitörler sayesinde elektrik hattına ihtiyaç duymadan çalışmaktadır. Ultrakapasitörlerin hızlı şarj olabilme özelliği sayesinde sadece duraklarda şarj ederek taşıma yapabilmektedirler [16].

Ultrakapasitör, elektronik alet herhangi bir sebeple kaynaktan ayrılırsa aletin bir süre daha işlev görmesini sağlamakta da kullanılır. Bunlara örnek olarak hoparlörler

verilebilir. Dinlenilen sesin önemli olabileceği düşüncesiyle hoparlörlerde bulunan ultrakapasitörler, kaynak gerilimi kesildiği zaman birkaç saniyeliğine de olsa hoparlörün çalışmasını ve ses kaybı olmamasını sağlarlar. Hoparlörün çalıştığı süre boyunca depolanan ultrakapasitör, kaynağın kesintiye uğramasının ardından depoladığı yükü hoparlöre verir ve böylece ses bir süreliğine kesilmez.

Ultrakapasitörler birçok uygulama alanında kullanılmaktadır ve yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Bu kullanım alanlarından bazıları, vinç, otobüs, troleybüs, araçlarda start-stop ve motor çalıştırma, kesintisiz güç kaynakları, internet sunucuları ve rüzgar türbinlerindeki kanatların kontrolüdür. Almanya'da 2002-2003 yıllarında otobüslerde kullanılmaya başlanmıştır. Aynı şekilde İspanya'da Haziran 2003 ve 2008 yıllarında troleybüs ve otobüs toplu taşıma alanlarında kullanılmaya başlanmıştır [17].

2. BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR TERİMLERİ

2.1. Batarya Terimleri

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 deşarj ve batarya şarj/deşarj sayısı başlıkları altında aşağıdaki alt bölümlerde incelenmiştir.

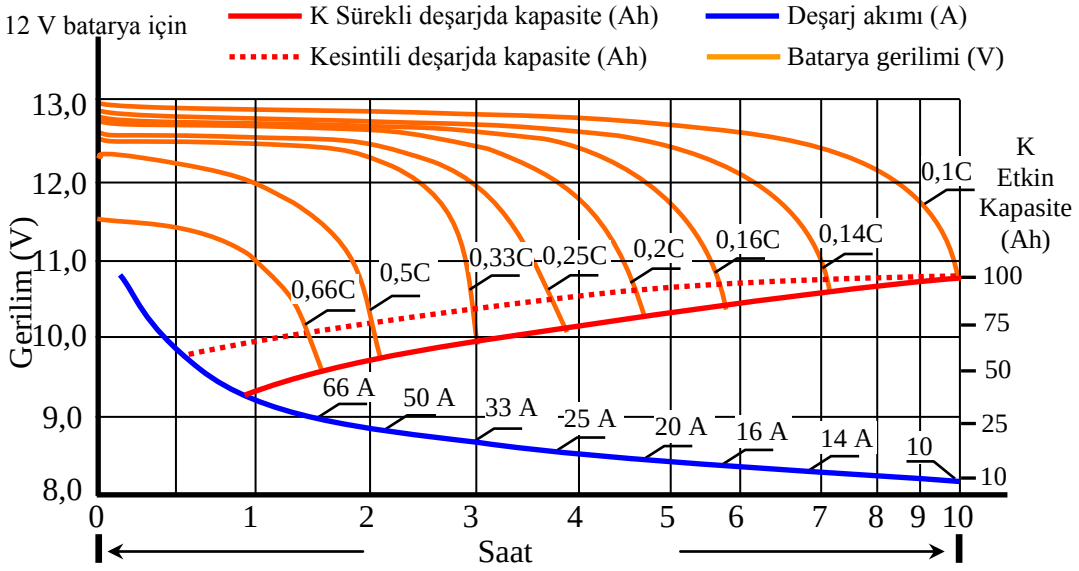
2.1.1. Batarya kapasitesi

Bir bataryanın, şarj işlemiyle kazandığı, esas olarak, deşarj işleminde verebildiği enerjiye bataryanın kapasitesi denir. Diğer bir ifadeyle; batarya kapasitesi, bataryadaki elektrokimyasal tepkimelerden dolayı ortaya çıkan toplam elektrik miktarı olarak tanımlanır. Kapasitenin birimi "Amper Saat"tir ve kısaca "Ah" harfleri ile ifade edilir. Bataryanın etiket değerine anma kapasitesi denir. Örnek olarak; 5Ah kapasiteli bir batarya için, 1C'lik yani 5A'lık sabit bir deşarj akımı, bataryadan 1 saat süre ile çekilebilir. Aynı batarya için 0,1C'lik yani 500mA'lik bir deşarj akımı, bataryadan 10 saat süre ile çekilebilir anlamına gelmektedir. Belirli bir hücre tipi için, aynı C oranı değerine sahip değişik kapasiteli hücrelerin davranışı benzerlik gösterir.

Bir batarya hücresindeki plaka adedinin çokluğu veya boyutunun büyük olması, enerji depolayan aktif maddenin miktarının artması demektir. Plakalardaki aktif madde ne kadar fazla ise, bataryanın enerji depolama veya verme yeteneği, diğer bir ifadeyle kapasitesi o oranda fazla olacaktır. Aynı şekilde bataryaya yüksek yoğunlukta elektrolit konursa kapasite belli oranda yükselir Ancak, yoğunluğun artması diğer taraftan batarya ömrünün kısalması demektir. Bu nedenle, elektrolit yoğunluğu istenildiği kadar artırılamaz.

Yukarıda açıklanan iki etken, bataryanın yapısı ile ilgilidir ve imalatı tamamlanmış bir batarya için, tayin edilmiş durumdadır. Ayrıca, bir bataryanın kapasitesi, yaşına bağlıdır. Batarya kullanıldıkça plakalardan aktif madde dökülmesi, bataryayı oluşturan elemanların eskimesi ve yıpranması sonucu kapasite belli oranda azalır [18].

Şekil 2.1'de bir bataryanın deşarj gerilimi, deşarj akımı ve deşarj kapasitesi arasındaki ilişkileri gösteren grafikler görülmektedir.



Şekil 2.1. Deşarj grafiğine bağlı olarak Peukert eğrisi [19]

En üstteki eğriler, bir batarya, belli bir akımla ve üstünde yazılı sürede deşarj edildiğinde deşarj başlangıcında ve sonunda hücre başına gerilimin kaça düşmesi gerektiğini göstermektedir. Kapasite eğrisi, bir batarya, belli bir akımla ve belli bir süre deşarj edildiğinde, anma kapasitesinin % kaçını vermesi gerektiğini göstermektedir. Deşarj akımı eğrisi ise, belli bir sürede, belli bir kapasiteyi elde etmek için o bataryanın kaç amperle deşarj edilmesi gerektiğini açıklamaktadır. Değerler, nominal sıcaklıkta tam kapasiteli yeni ve 100Ah 'lik bir batarya hücresi için geçerlidir. Bir batarya grubu için, soldaki hücre gerilimi değerleri, hücre sayısı ile çarpılmalı, 100Ah haricindeki bataryalar için sağdaki akım ve kapasite değerleri ise % olarak dikkate alınmalıdır [19].

Şekil 2.1'deki grafik Denklem (2.1)'deki Peukert formülüne dayanmaktadır. Bataryalar ne kadar yüksek akımla deşarj edilirse kapasitesi o kadar azalır. Bu

nedenle bataryaların grafikte görüldüğü gibi şarj ve deşarj grafikleri lineer değil, eksponansiyeldir [20]. Peukert kanunu Denklem (2.1)'de verilmektedir.

$$C_p = I_B{}^k t \tag{2.1}$$

C_p =Peukert'e göre kapasite (Ah)

I_B = Batarya deşarj akımı (A)

t = Batarya deşarj zamanı (saat)

k = Peukert sabiti.

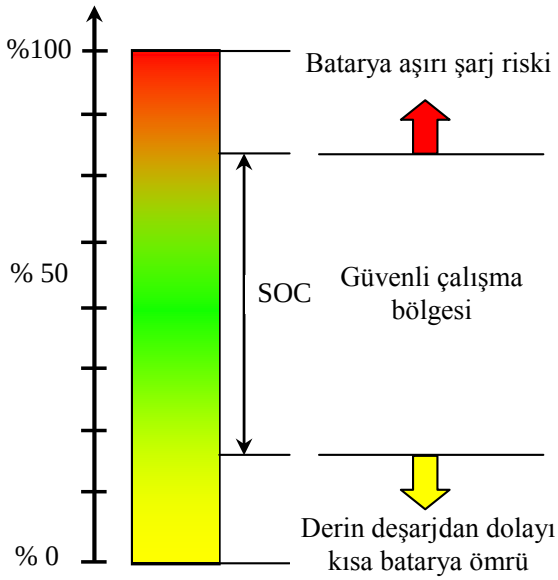
2.1.2. Batarya doluluk durumu (state of charge (SOC))

Bir bataryada ne kadar enerji kaldığını, bataryanın doluluk durumunu öğrenmek kullanıcı ve bataryanın sağlığı açısından oldukça önemlidir. Bataryanın mevcut kapasitesi bir referans yüzdesi olarak SOC ile tanımlanır. Bataryalardaki kalan enerji miktarı genellikle daha kolay anlaşılması için Coulombs, kWh veya Ah cinsinden vermek yerine SOC olarak belirlenmektedir. Tercih edilen SOC referansı yeni bir batarya hücresinin kapasitesi değil mevcut batarya hücresinin SOC referansı olmalıdır. Bir batarya hücresinin kapasitesi kademeli olarak batarya yaşlandıkça azalmaktadır. Örneğin, bir batarya hücresi ömrünün sonuna geldiğinde gerçek kullanılabilen kapasitesi %80'e yaklaşmaktadır. Bu durumda batarya tam olarak şarj edilmiş bile olsa sahip olduğu nominal SOC kapasitesi %80 civarında olacaktır. Sıcaklık ve derin deşarj akımları bataryanın etkin kapasitesini daha da azaltmaktadır. Kullanıcının batarya SOC'ini doğru bir şekilde öğrenebilmesi referans SOC noktaları büyük önem kazanmaktadır. Bu yüzden SOC'nin tam olarak öğrenilmesi gerekmektedir. Batarya SOC hesabı Denklem (2.2) ile verilmektedir [20,21].

$$SOC = 1 - \frac{1}{C_B}\int I_B dt \cdot 100 \tag{2.2}$$

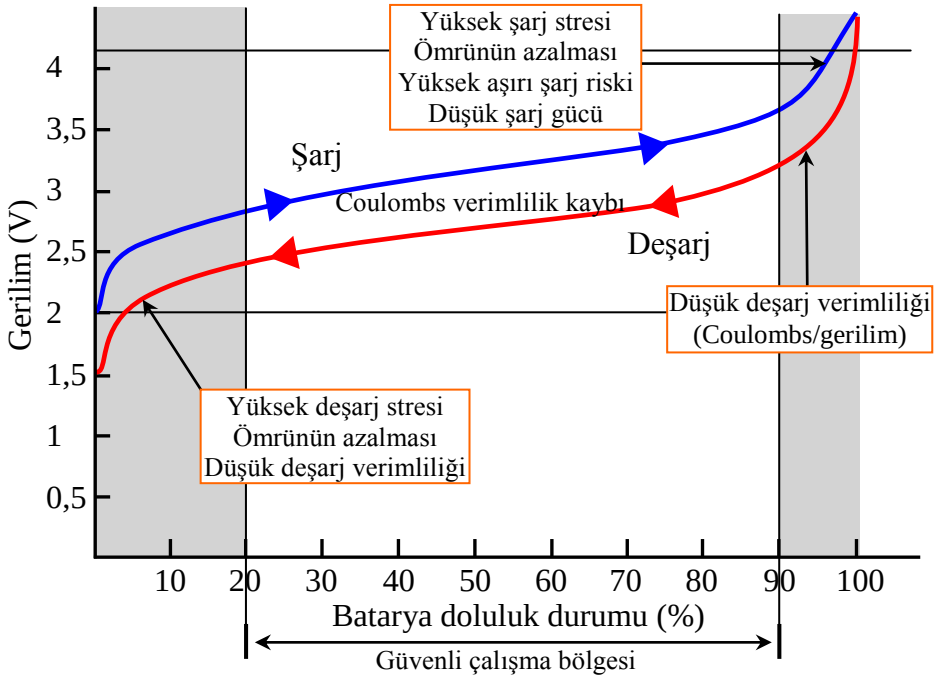
SOC, $0 \le SOC(t) \le 100$ arasında olmalıdır. Buradaki C_B bataryanın nominal kapasitesi, I_B bataryadan çekilen akımdır. Bir bataryanın sağlıklı (Battery of Health (SOH)) bir şekilde şarj/deşarj olması ve ömrünü azaltmadan sağlıklı şekilde

kullanabilmek için bataryanın belli bir SOC aralığında çalıştırılması gerekmektedir. Şekil 2.2'de bir bataryanın kritik SOC çalışma band aralığı verilmektedir. Burada batarya aşırı şarj edildiğinde batarya plakaları için sakıncalı duruma gelmekte aşırı sıcaklığa neden olmaktadır. Bu da batarya hücre plakalarının aşınmasına ve ömrünü azaltarak tekrar şarj tutmama gibi zararlara neden olmaktadır. Aşırı deşarj durumunda ise aynı şekilde batarya hücre plakalarının aşınmasına neden olarak ömrüne zarar verecektir. Bu yüzden bataryanın sağlıklı şekilde çalışması ve ömrünü uzatabilmek için güvenli bir SOC bölgesinde çalıştırılması gerekir. Bu çalışma aralığı batarya çeşidine bataryanın teknik özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Bu aralık elektrikli arabalarda %80 ile %40 arasında tutulmaktadır. Bu güvenli çalışma bölgesinde bataryayı tutabilmek için kontrollü şarj ve deşarj ekipmanına ihtiyaç vardır. Anlık olarak bataryanın sürekli akım ve gerilimini okuyup SOC değerini belirledikten sonra, batarya güvenli SOC aralığında çalıştırılmalıdır.



Şekil 2.2. Bataryanın SOC çalışma aralığı

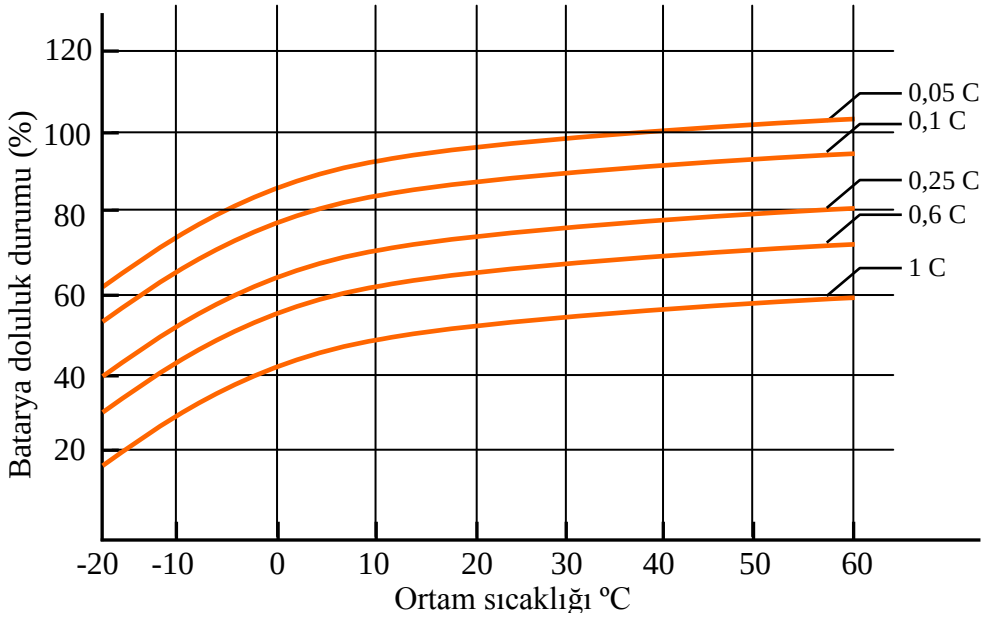
Şekil 2.3'te SOC güvenli çalışma bölgesinin şarj ve deşarj durumları için lityum-iyon batarya hücre gerilimine göre çalışma band aralığı verilmektedir. Batarya şarj olurken güvenli çalışma bölgesinden çıkarak hücre geriliminin artması bataryanın yüksek şarj stresine, ömrünün azalmasına ve ısınmasına neden olmaktadır. Batarya deşarj olurken ise güvenli çalışma bölgesinden çıkarak hücre geriliminin giderek azalması bataryanın yüksek deşarj riskine, ömrünün azalması ve düşük deşarj verimliliğine sebebiyet vermektedir [22].



Şekil 2.3. Lityum-iyon batarya şarj/deşarjı için hücre gerilimi bandı [22]

2.1.3. Sıcaklığın etkisi

Deşarj sırasında ortam sıcaklığının değeri batarya performansını etkileyen bir etkendir. Ortam sıcaklığının azalmasıyla, çıkış geriliminde kayıplar artmakta ve kapasitede azalma meydana gelmektedir. Sıcak bir bataryada kimyasal reaksiyon daha hızlı olacaktır. Yüksek sıcaklık kimyasal reaksiyonu hızlandırarak yüksek performans sağlayabilir fakat aynı zamanda istenmeyen kimyasal reaksiyonlar meydana gelerek batarya ömrünü azaltacaktır. Bataryanın raf ömrü ve şarj tutma özelliği kendi kendine deşarj oranına bağlıdır ve bu istenmeyen bir kimyasal reaksiyon sonucudur. Aynı şekilde elektrotlar, korozyon ve gazlaşma benzer olumsuz kimyasal reaksiyonlar sonucu bataryanın çevrim ömrünü azaltmaktadır. Sıcaklık bu nedenle raf ömrünü ve çevrim ömrünün yanı sıra bataryanın şarj tutma özelliğini de kimyasal reaksiyonlardan dolayı etkiler. Şekil 2.4'te bir kurşun-asit bataryanın ortam sıcaklığına bağlı olarak farklı deşarj durumlarında batarya doluluk oranının değişimi verilmektedir [22-24].

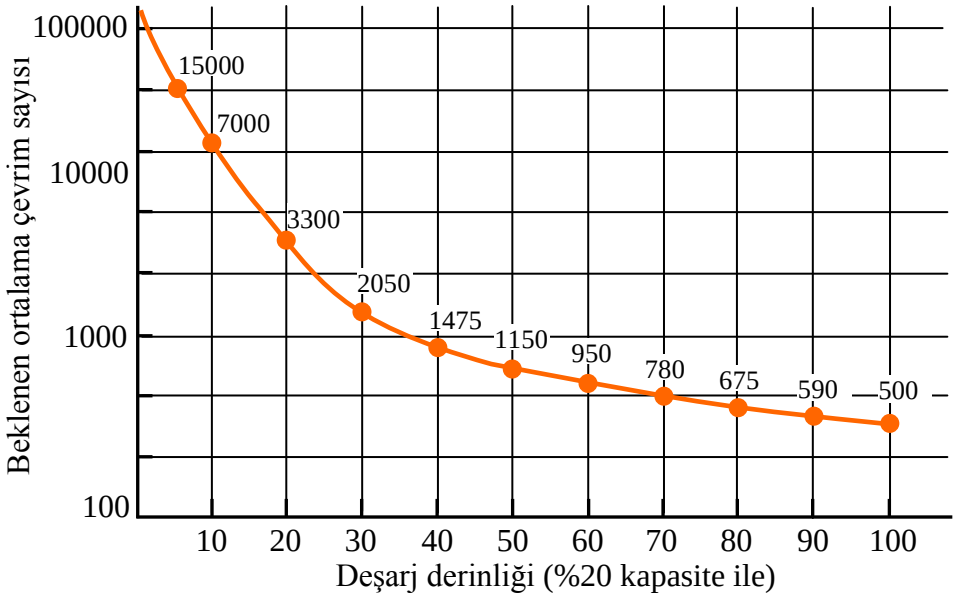


Şekil 2.4. Kurşun-asit batarya kapasitesinin sıcaklığa göre değişimi [24]

2.1.4. Deşarj derinliği (depth of discharge (DOD))

Belirli bir sıcaklık ve deşarj oranıyla, her bir şarj/deşarj çevriminde dönüşen aktif kimyasalların bir kısmı deşarj derinliğiyle orantılı olacaktır. Şekil 2.5'te çevrim sayısı ve deşarj derinliği arasındaki ilişkinin logaritmik olarak değiştiği görülmektedir. Diğer bir deyişle bir bataryadan elde edilen çevrim sayısı deşarj derinliğinin (DOD) üstel fonksiyonu şeklindedir. Bu durum çoğu kimyasal hücreler için aynı şekildedir.

Şekil 2.5 kurşun-asit batarya çeşidi için çevrim sayısı ve deşarj derinliği arasındaki ilişkiyi vermektedir, fakat farklı ölçeklemeyle lityum-iyon bataryalar dahil olmak üzere bütün batarya hücre kimyasalları için tipik bir modeldir. Bunun nedeni ise batarya ömrünün aktif kimyasalların sağlayabildiği toplam enerji verimine bağlı olmasıdır.



Şekil 2.5. Kurşun-asit batarya çevrim sayısı ve deşarj derinliği ilişkisi [24]

Bir bataryanın diğer yaşlanma etkileri dikkate alınmadığında; %100 DOD döngüsü bir çevrim, %50 DOD 2 çevrim, %10 DOD 10 çevrim, %1 DOD 100 çevrim eşdeğer olacak şekilde hesaplandığında toplam enerji akışı sabittir. Ayrıca çevrim ömrü, batarya yaşlanmasına bağlı olarak aktif kimyasalların performansının düştüğünden hücrelerin performansı azalmaktadır [24].

2.1.5. 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 ağılığı 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.

2.1.6. 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 yanı sıra, tasarımı ve fiziksel yapısına da bağlıdır. Bundan dolayı batarya imalat aşamasında, güç yoğunluğu ile enerji yoğunluğu arasında genellikle bir ilişki söz konusudur. 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 [25].

2.1.7. Verimlilik

Tekrar doldurulabilen bir bataryanın verimliliği, bataryanın deşarj olması sırasında verdiği toplam enerjinin, bataryanın şarj olması 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.

2.1.8. Yüksüz deşarj (self discharge)

Batarya performansını karakterize eden diğer bir özellik ise bataryanın kullanılmadığı durumlardaki batarya deşarj olma miktarıdır. Batarya çeşidine ve ortam sıcaklığına göre, bataryaların yüksüz deşarj olma oranında farklılıklar meydana gelir. Uzun süreli kullanılmama nedeni ile batarya tamamen deşarj olabilir ve tekrar doldurulabilen bataryalar tamamen kullanım dışı kalabilir. Bu yüzden tekrar doldurulabilen bataryalar, belli zaman aralıklarında yeniden doldurulmalıdır [26].

2.1.9. Batarya şarj/deşarj sayısı (çevrim ömrü)

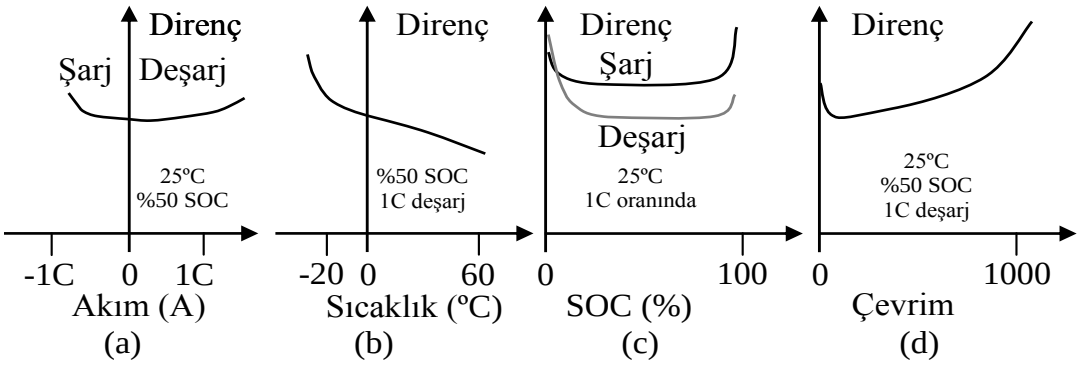
Tekrar doldurulabilen bataryalarda, her bir şarj/deşarj işleminde, batarya elektrotlarında aşınmalar ve korozyonlar, elektrolitte ise kimyasal tepkimelerden dolayı gaz birikimleri ve sızıntıları meydana gelmektedir. Batarya şarj/deşarj sayısı arttıkça bu tür yapısal bozukluk ve kayıplardan dolayı batarya 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 şarj/deşarj sayısının ardından batarya kullanılmaz duruma gelir. Batarya çeşitlerine göre batarya şarj/deşarj sayısında farklılıklar gözlenir [27].

2.2. Kurşun-Asit ve $LiFePO_4$ Bataryalar için Güvenli Çalışma Aralığı

Tipik bir kurşun-asit ve lityum-iyon bataryanın iç direnci birkaç $m\Omega$'dur. Silindirik tip lityum-iyon batarya iç direnci 10-50$m\Omega$, prizmatik tip lityum-iyon batarya iç direnci 0,5-5$m\Omega$'dur. Bu direnç değeri, akım toplayıcı kollektörlerindeki ve terminallerdeki ağır metal direnç ve kimyasal süreçten dolayı etkilenmektedir. Batarya direnç değişiminden dolayı hücre gerilim ve akımı düşmektedir. Burada bahsedilen direnç değeri ohmmetre ile ölçtüğümüz R=V/I direnç değeri değildir. Batarya hücresi için bahsedilen direnç dinamik dirençtir. Dinamik direnç, $R=\Delta V/\Delta I$ olarak tanımlanır. Bu direnç değeri; SOC, sıcaklık, batarya şarj/deşarj akımına ve kullanım ömrüne bağlıdır.

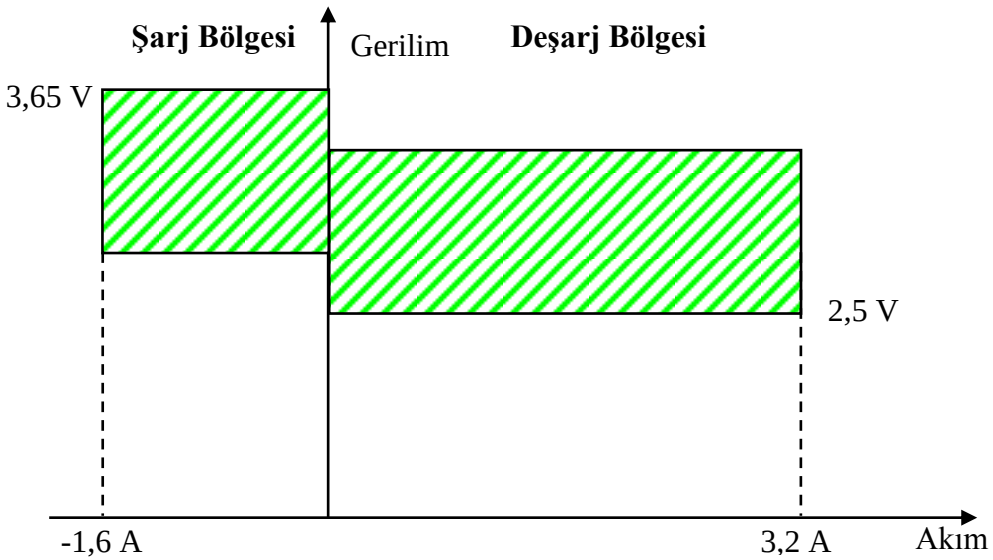
Şekil 2.6'da hücrenin akım, sıcaklık, SOC ve çevrim sayısına göre iç direnç değişimi verilmektedir. Şekil 2.6 (a)'da batarya şarj/deşarj olduğu durumda iç direncinin yüksek şarj/deşarj oranlarında yüksek olduğu görülmektedir. Sıcaklıktaki değişimine baktığımızda ise bataryanın düşük sıcaklık çalışma ortamında yüksek, yüksek sıcaklık ortamında ise oldukça düşük olduğu Şekil 2.6 (b)'de görülmektedir. Fakat bariyer sıcaklık değeri hiçbir zaman aşılmamalıdır aksi takdirde bataryanın aşırı sıcaklıktan patlama veya yanmasına neden olabilir. Bataryanın doluluk oranına SOC'ye göre hücre iç direnci, şarj olurken batarya dolduğunda (%100) ve deşarj olurken batarya boşaldığında (%0) yüksek iç direnç, aktif çalışma bölgesinde diğer durumlara göre düşük iç direnç gösteren grafiği Şekil 2.6 (c)'de verilmektedir. Son olarak bataryanın çevrim ömrüne bağlı olarak iç direnç değişimi Şekil 2.6 (d)'de verilmektedir. Burada hücre çevrim ömrü sonuna yaklaştıkça iç direnci yüksek değerler almakta ve bataryanın ömrünün dolduğu anlaşılmaktadır [28-29].



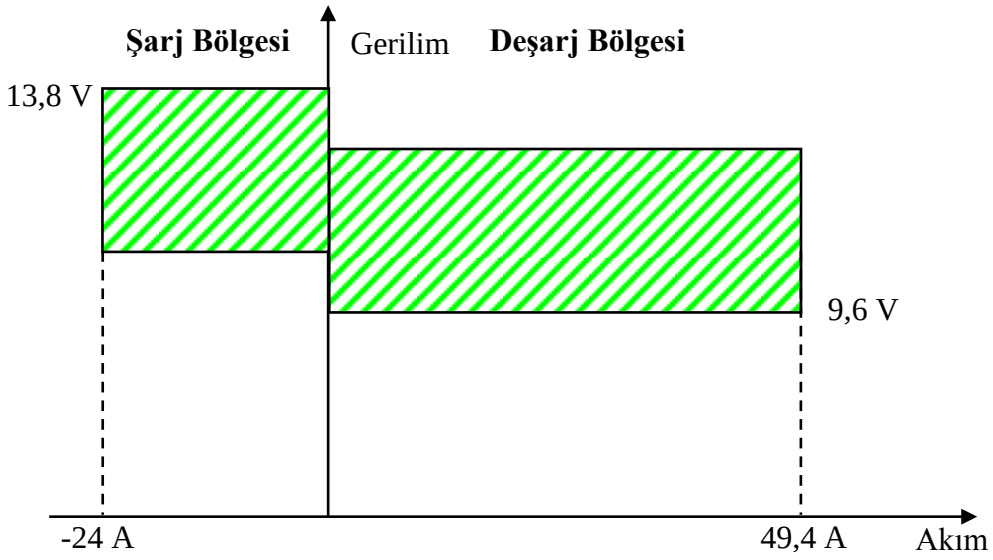
Şekil 2.6. (a) Akım (b) Sıcaklık (c) SOC ve (d) Çevrim parametrelere göre hücre iç direncinin değişimi [29]

Lityum-iyon hücrenin küçük de olsa iç direncinden dolayı hücre içerisinde I^2R kayıp gücü ısı olarak harcanır. Örnek olarak M1 26,500 $LiFePO_4$ hücre modeli için 1C (2,3A) ile yüklendiğinde iç direnci 10mΩ dur. Batarya P=2,3Ax3,2V=7,6W'lık güç verirken hücre içerisinde harcanan kayıp güç $P=2,3A^2x10m\Omega=53mW$ olur. Batarya şarj ve deşarj olurken hücre verimi %99,3 ile %98,6 arasındadır. Aynı işlemleri Vision 6FM80 kurşun-asit batarya modeli için yapacak olursak, batarya katalog değerlerinde verilen 0,125C (10A) ile yüklendiğinde iç direnci 5,5mΩ'dur. Batarya P=10Ax12V=120W'lık güç verirken hücre içerisinde harcanan kayıp güç $P=10A^2x5,5m\Omega=550mW$ olur.

Yüksek akımlarda hücre enerji verimi düşer. Hücre dışarısında iş yapabilmek için mevcut enerjisinin bir kısmını hücre içerisindeki dirençten dolayı kayıp ısı enerjisi olarak boşa harcar. Şekil 2.7'de M1 26,500 $LiFePO_4$ ve Şekil 2.8'de Vision 6FM80 kurşun-asit bataryasının şarj ve deşarj durumunda güvenli çalışma bölgesindeki akım ve gerilim sınırları verilmektedir. Burada hücre şarj/deşarj olurken hücrenin şarj/deşarj olma sınır gerilimi elektrotların sağlığı için aşılmamalıdır [29,30].

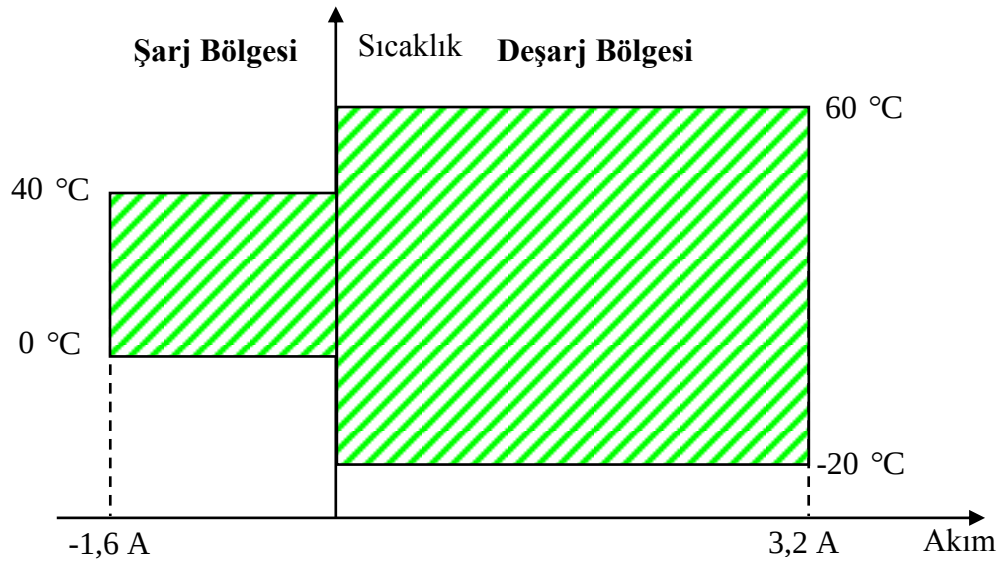


Şekil 2.7. $LiFePO_4$ bataryanın güvenli şarj/deşarj çalışma bölgesi

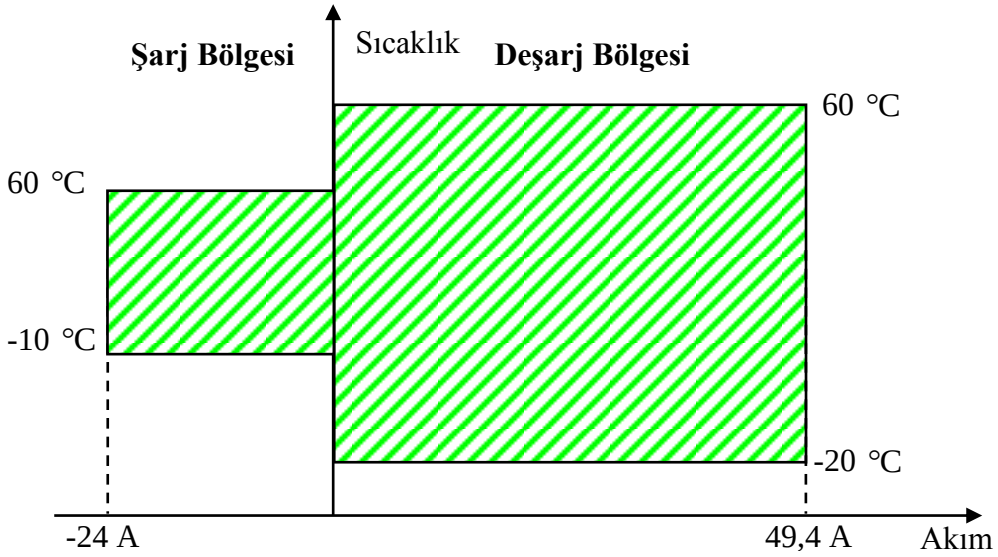


Şekil 2.8. Vision 6FM80 kurşun-asit bataryanın güvenli şarj/deşarj bölgesi

Şekil 2.9'da M1 26,500 $LiFePO_4$ ve Şekil 2.10'da Vision 6FM80 kurşun-asit bataryanın güvenli çalışma bölgesindeki çalışma sıcaklık sınırları verilmektedir. Burada batarya şarj ve deşarj olurken bataryanın zarar görmemesi, patlama ve yangın gibi tehlikeli durumlardan kaçınmak için çalışma sıcaklığı sınır aralığı içerisinde olmalıdır.



Şekil 2.9. $LiFePO_4$ bataryanın güvenli sıcaklık çalışma bölgesi



Şekil 2.10. Vision 6FM80 kurşun-asit bataryanın güvenli sıcaklık bölgesi

2.3. Ultrakapasitör Terimleri

Ultrakapasitörlerde bataryalarda olduğu gibi bazı elektriksel parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler yapısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Elektriksel çift tabaka kapasitörler, pseudokapasitörler ve hibrit kapasitörler gibi çeşitli kimyasal ve fiziksel yapıya sahip ultrakapasitörler ortak özellik olarak her birinin iç direnci depoladığı enerji gibi terimler aynıdır. Bir ultrakapasitörün kapasitesi F cinsinden temsil edilir ve enerjiyi elektrik alan olarak depolarlar. Depoladığı enerji miktarı E_d ile gösterilir ve Wh cinsinden ifade edilir. Bir ultrakapasitörün depoladığı enerji Denklem (2.3)'teki gibi ifade edilir [33].

$$E_d = \frac{1/2\, C_{UK} V_{UK}^{\,2}}{3600} \tag{2.3}$$

Burada C_{UK} ultrakapasitörün kapasitesi V_{UK} ise terminal gerilimidir. Bu tez çalışmasında kullanılan Maxwell marka BMOD0006 E160 B02 modeli için depoladığı enerjiyi hesaplamak istersek [33];

$E_d = \frac{1/2 \cdot 6F \cdot 160^2}{3600}$ = 21,3Wh 'lik bir enerji depolayabilmektedir.

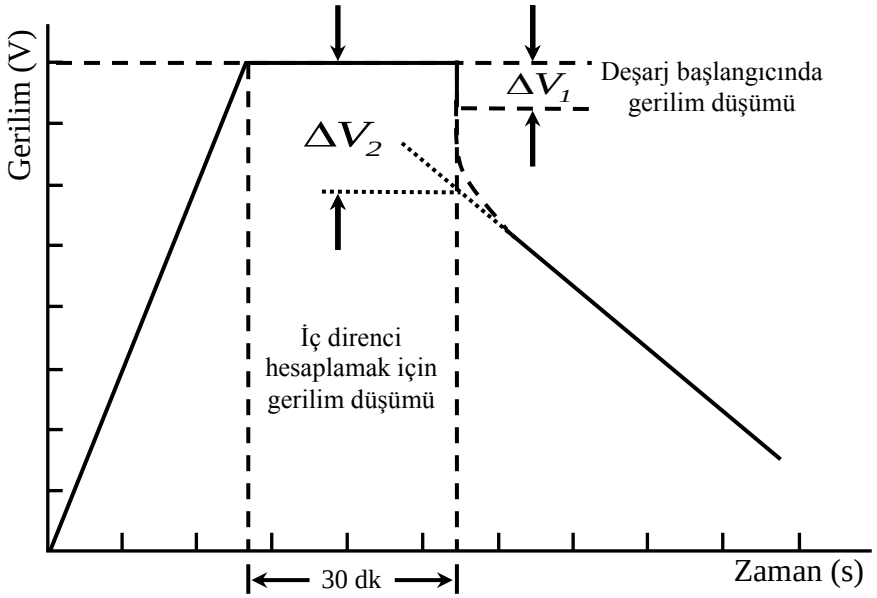
2.3.1. Ultrakapasitörün iç direnci (ESR)

Bir ultrakapasitörün şarj ve deşarjı elektrotlardan elektrolite doğru ayırıcı üzerinden ve onların gözenekli yapısının içinden akan iyonların şarj hareketine bağlıdır. Bu hareket boyunca meydana gelen kayıplar Doğru Akım (DA) direnç olarak ölçülebilir.

Elektrot gözeneklerindeki basamakları elektriksel devre benzetimi yapılarak seri bağlı RC (direnç/kondansatör) elemanlarıyla gösterilebilir. Gözeneklerde bulunan yük taşıyıcı katmanlarının artması iç direncin yani RC seri kaskad bağlantının artmasıyla ifade edilebilir. Dahili DA iç direnci zamana bağlı olarak şarj/dearj sırasında artış göstermektedir. Dahili iç direnç R_{ESR}, deşarj sırasında ΔV_2 gerilim düşümü ve sabit başlangıç akımı I_{UK} ultrakapasitör deşarj akımıyla Denklem (2.4)'teki gibi hesaplanabilir [33,34].

$$R_{ESR} = \frac{\Delta V_2}{I_{UK}} \tag{2.4}$$

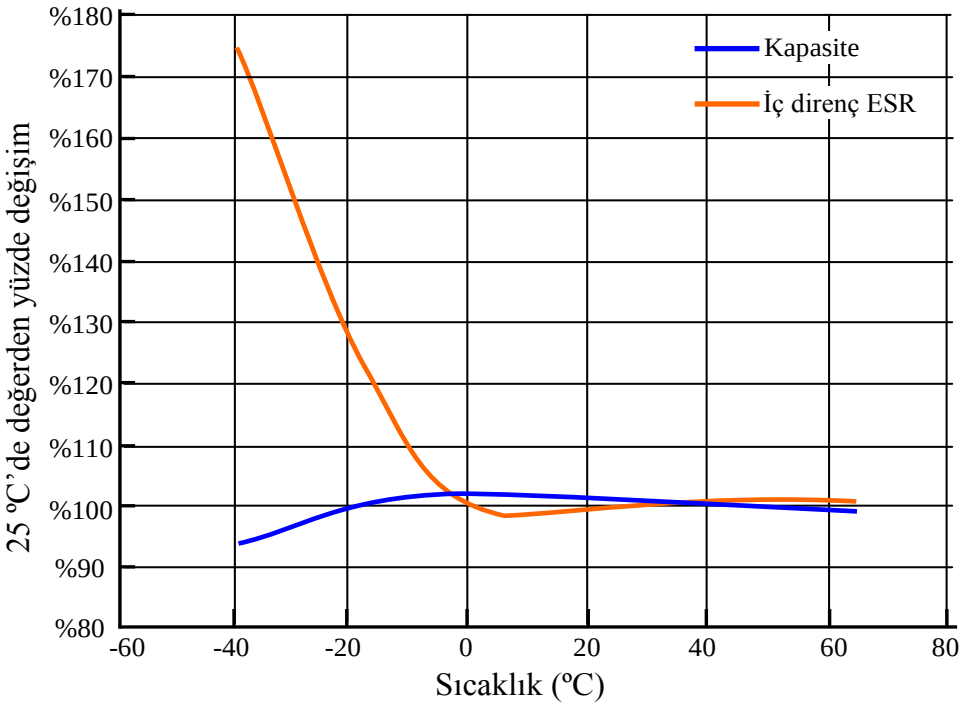
Şekil 2.11'de ultrakapasitör iç direnç hesaplanırken ΔV_2 gerilim değişimi verilmektedir.



Şekil 2.11. Ultrakapasitör iç direnç ΔV_2 gerilim değişimi [31]

2.3.2. Sıcaklığın ultrakapasitöre etkisi

Sıcaklık ultrakapasitörde bataryalarda olduğu gibi iç direncini ve kapasitesini etkilemektedir. Sıcaklığın azalması ultrakapasitörün % kapasite cinsinden değişimini azaltmakta ve ultrakapasitör verimini düşürmektedir. Sıcaklığın artması ise ultrakapasitörün % kapasite cinsinden değişimini büyük oranda etkilememekte fakat belli bir sıcaklık değerinden sonra ultrakapasitör ve ayırıcı plakalara zarar vermektedir. Sıcaklığın ultrakapasitörün iç direncine etkisi ise % kapasite değişiminden oldukça fazladır. Sıfır derece ve üzerinde iç direnç değişmezken sıfırın altındaki sıcaklıkta ultrakapasitör iç direnci % iç direnç cinsinden aşırı derecede artarak neredeyse iki katı bir değere ulaşmaktadır. Şekil 2.12'de sıcaklığa bağlı olarak ultrakapasitörün iç direnç ve kapasitesinin % cinsinden değişimi verilmektedir [32].



Şekil 2.12. Ultrakapasitörün sıcaklıkla ESR ve kapasitesinin değişimi [32]

3. BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR MODELLEME YÖNTEMLERİ

3.1. Batarya Modelleme Yöntemleri

Bataryanın imalatı kadar şarj/deşarj ile işletimi sırasındaki enerji yönetimi de önemlidir. Bataryanın çalışma durumu ve özellikle de doluluk durumunun izlenmesi ve denetimi batarya yönetim sistemiyle yürütülür. Donanım ve yazılımdan oluşan batarya yönetim sistemi bataryanın sağlıklı şekilde kullanılması açısından büyük önem arz etmektedir. Batarya yönetim sisteminin en önemli işlevlerinden birisi ise şarj ve deşarj durumuna göre batarya doluluk durumunun izlenmesi ve denetimidir. Batarya doluluk durumu temelde batarya akım-gerilim karakteristiklerinin bir fonksiyonu olmakla beraber diğer batarya fonksiyonlarıyla da ilişkilidir. Batarya doluluk durumunun ise doğrudan ölçümü bulunmayıp batarya ile ilgili fiziksel, kimyasal ve elektriksel pek çok parametreye bağlı olarak yaklaşık kestirim hesabı mümkündür. Batarya karakteristikleri ve bunlara bağlı olarak batarya doluluk durumunun hesaplanması ile ilgili pek çok batarya modeli geliştirilmiştir. Bataryayı oluşturan hücre bazında yapılan çalışmalarda elektrokimyasal, stokastik ve elektriksel olmak üzere üç farklı model ileri sürülmüştür. Elektrokimyasal modellerin hesaplama doğruluk dereceleri yüksek olmakla birlikte modeli oluşturan denklemler doğrusal olmayan, karmaşık kısmi diferansiyel denklem takımlarından oluşur. Uzun hesaplama süreleri gerektiren bu modelde üretici firma tarafından sağlanması gereken ve sağlanması çok zor olan çok sayıda parametrenin bilinmesi gerekir. Bu modeller batarya tasarımında daha kullanışlı olmaktadır. Birtakım olasılık hesabı formüllerine dayanan stokastik modellerin hesaplama doğruluk dereceleri düşük olup, hücre karakteristiği konusunda açık bilgiler taşımaz. Ayrıca bu modellerin hesaplama zamanları da uzundur. Genelde elektriksel sistemin bir parçası olarak kullanılan bataryanın elektrik devre denkliği biçiminde modellenmesi daha pratik bulunmaktadır. Elektriksel modellerde enerji kaynağı olarak bataryayı oluşturan hücre ve ona seri-paralel bağlı direnç ve kondansatör elemanlarından ibaret bir elektrik devresi ele alınır. Literatürde farklı türden elektriksel modeller tanımlanmış olup bazı modellerde direnç ve kondansatör elemanı yanında indüktör elemanı da yer

alabilmektedir. Bu modellerin hesaplama doğruluk dereceleri elektrokimyasal modellerden biraz düşük kalmakla beraber stokastik modellerden daha iyidir. Hesaplama süreleri diğer modellere göre daha kısa olan bu modeller, batarya yönetim sistemi içinde doluluk durumunun çevrim içi hesaplamasında daha kullanışlıdır. Bir batarya grubu modelini ortaya koyabilmek için ilk etapta bir batarya hücresinin modellenmesi gerekmektedir [34].

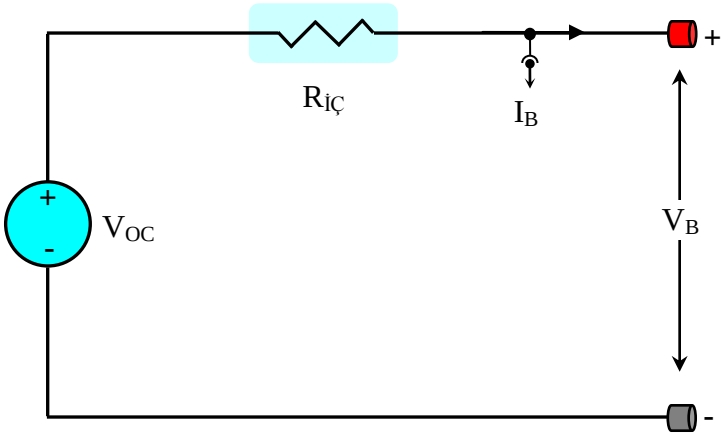
3.1.1. Elektriksel batarya modelleri

Bataryaları elektriksel eşdeğer devreler olarak modellemek oldukça başarılı sonuçlar verir. Bu tip elektriksel eşdeğer devre modellerinde model üzerinden matematiksel hesaplamalar yapma imkânı vardır. Bu yüzden şarj/deşarj veya empedans eğrileri için eşdeğer devreler analiz edilerek modellenmiştir. Bu eşdeğer devre metotlarında genelde istatistiksel veriler kullanılmaktadır. Parametreler basit bir devrenin değişkenleri olarak sisteme yerleştirilmektedir.

Bu elektriksel eşdeğer devreler modellerinde, batarya parametreleri, elektriksel devre elemanlarının parametrik değerleri şeklinde modellenir ve bu parametreler batarya şarj/deşarj testlerinden elde edilmektedir. Bazı elektriksel eşdeğer 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 elektriksel eşdeğer devre modelleri verilmektedir.

3.1.1.1. Basit batarya modeli

Bu batarya modeli en basit devre modelidir. Şekil 3.1'de gösterilen bu devre modeli, V_{OC} gerilim kaynağı ve $R_{İÇ}$ direncinden meydana gelmiştir. Burada batarya direnci olan $R_{İÇ}$'in değerinin, şarj ve deşarj durumunda değişmediği kabul edilir. Gerçekte $R_{İÇ}$, şarj ve deşarj durumunda farklı değerler alır. Ayrıca burada, elektrolit yoğunluğu, batarya plakaları arasındaki maddelerin yayılımı gibi bataryanın iç dinamikleri dikkate alınmamıştır. Batarya terminal gerilimi V_B, $R_{İÇ}$ iç direnci ve batarya akımı I_B arasında doğrusal bir bağıntı vardır.



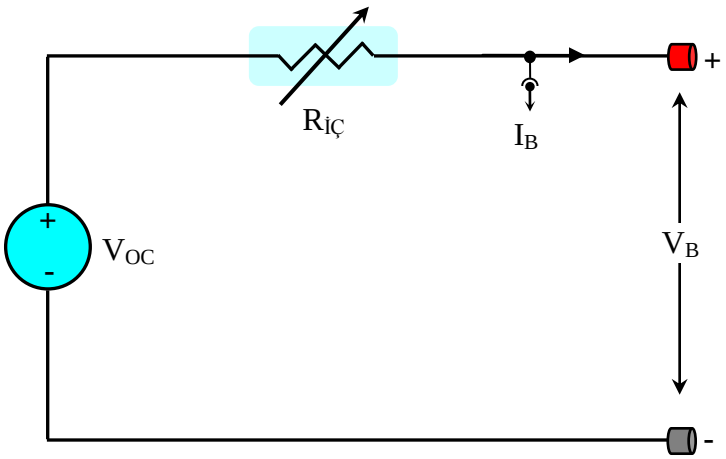
Şekil 3.1. Basit batarya modeli

3.1.1.2. Modifikasyon basit batarya modeli

Bu batarya modeli basit batarya modelinin modifikasyon edilmiş şeklidir. Basit batarya modelindeki sabit direnç duruma bağlı olarak değişen bir dirence dönüşür. Burada iç direnç $R_{İÇ}$ bataryanın doluluk durumuna bağlı olarak değişir.

$$R_{İÇ} = \frac{R_0}{S^k} \tag{3.1}$$

Şekil 3.2'de verilen V_{OC} açık devre gerilimi, Denklem (3.1)'de verilen R_0 bataryanın tam dolu durumundaki iç direnci, k kapasite katsayısı ve S ise 0 ile 1 arasında değişen batarya doluluk durum göstergesidir.



Şekil 3.2. Modifikasyon basit batarya modeli

3.1.1.3. Gelişmiş basit batarya modeli

Şekil 3.1'te verilen basit batarya modeli, gelişmiş basit batarya modelinin elektriksel eşdeğer devresi ile de kullanılmaktadır. Bu modelde bataryanın iç direnci sabit değildir ve bataryanın deşarj derinliğine göre değişkenlik göstermektedir. Bu deşarj derinliği üzerindeki değişim doğrusal ya da doğrusal olmayan olarak belirtilmektedir.

$$V_B = V_{OC} - I_B \cdot R_{İÇ} \tag{3.2}$$

Denklem (3.2)'de verilen V_B çıkış gerilimi, V_{OC} açık devre gerilimi, I_B batarya akımı ve $R_{İÇ}$ iç direnci temsil etmektedir. V_{OC} ve $R_{İÇ}$ deşarj derinliğine göre değişimi Denklem (3.3) ve Denklem (3.4) ile hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{C_B}{C_{Bmak}} \tag{3.3}$$

$$C_B = I_B \cdot t \tag{3.4}$$

Denklem (3.3)'teki Q deşarj derinliği, C_B batarya kapasitesi ve C_{Bmak} batarya maksimum batarya kapasitesidir. Deşarj derinliği üzerindeki değişimleri doğrusal ve doğrusal olmayan durumlar için Denklem (3.5) ve Denklem (3.6) ile inceleyebiliriz.

Doğrusal durumda deşarj derinliği;

V_{OC} ve $R_{İÇ}$ deşarj derinliği (Q) ile doğru orantılı olarak değişir.

$$Voc = a_0 + b_0 Q \tag{3.5}$$

$$R_{İÇ} = a_1 + b_1 Q \tag{3.6}$$

Burada a_0, a_1, b_0 ve b_1 katsayıları ve değerleri deneysel olarak bulunmaktadır. Gelişmiş basit batarya modelinde bataryanın iç direnci Denklem (3.7) ile belirlenmektedir.

$$R_{İÇ} = \frac{V_{OC} - V_B}{I_B} \tag{3.7}$$

Doğrusal olmayan durumda deşarj derinliği;

V_{OC} ve $R_{İÇ}$ deşarj derinliği (Q) ile doğru orantılı olmayarak değişir ve Denklem (3.8) ve Denklem (3.9)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_{OC} = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 + a_3 Q^3 + a_4 Q^4 + a_5 Q^5 \quad (3.8)$$

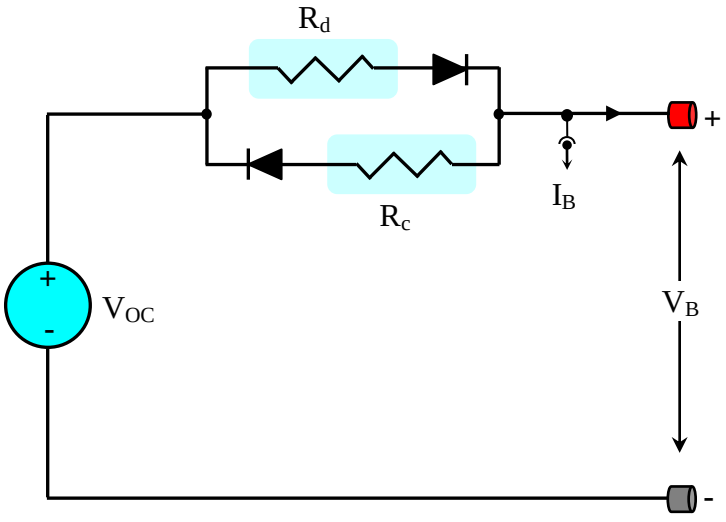
$$R_{İÇ} = b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2 + b_3 Q^3 + b_4 Q^4 + b_5 Q^5 \quad (3.9)$$

Burada a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 ve b_5 katsayıları ve değerleri deneysel olarak bulunmaktadır.

3.1.1.4. Dirençsel thevenin eşdeğer batarya modeli

Dirençsel Thevenin eşdeğer elektriksel devre modeli Şekil 3.3'te görülmektedir. Bu devre modelinde, Şekil 3.1'de gösterilen basit batarya modelinden farklı olarak batarya direnci, şarj sırasında R_c ve deşarj sırasında R_d gibi farklı iki değer almaktadır. R_c ve R_d değerleri batarya testlerinden bulunur ve bunlar batarya doluluk durumuna bağlıdır.

Bu devre modelinde, V_{OC} gerilim kaynağı sabittir. Batarya doluluk durumuna göre batarya direnci değişir. Batarya terminal gerilimi V_B, batarya akımı I_B'ye, batarya şarj veya deşarj direncine ve batarya doluluk durumuna bağlı olarak değişmektedir.



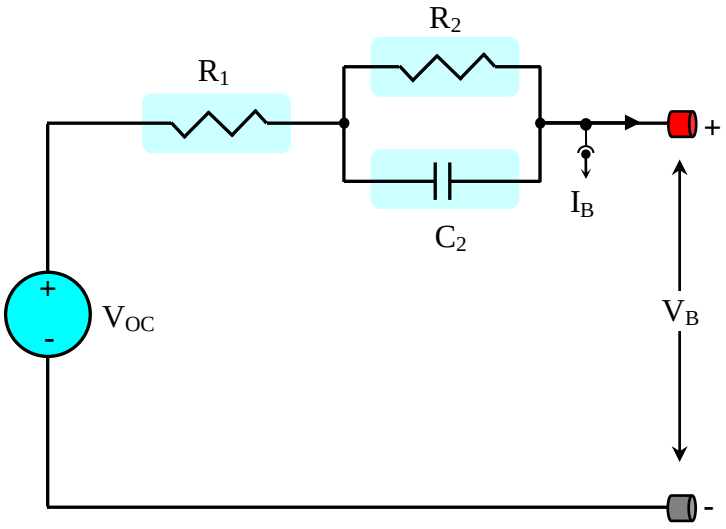
Şekil 3.3. Dirençsel Thevenin eşdeğer batarya modeli

3.1.1.5. Thevenin batarya modeli

Şekil 3.4'te Thevenin batarya modelinin elektriksel devre modeli verilmektedir. Bu model, basit batarya modeline ve dirençsel Thevenin eşdeğer modeline göre daha doğru sonuçlar vermektedir. Burada devre elemanları sabit kabul edilmektedir. Bu bir dezavantajdır çünkü gerçekte bu devre elemanları, batarya doluluk durumu, batarya sıcaklığı gibi batarya dinamiklerinin fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu devre modelinde R_1, batarya direncini, R_2, geçici durum direncini, C_2 ise geçici durum kapasitörünü ifade etmektedir. R_2 geçici durum direncine ve C_2 geçici durum kapasitörüne bağlı olarak V_B batarya terminal geriliminin geçici durum (transient) özelliği modellenebilmektedir. Thevenin batarya modelinde, bataryanın terminal uçlarındaki gerilimi ve açık devre gerilimi Denklem (3.10) ve Denklem (3.11)'de verilmektedir.

$$V_B = V_{OC} - (I_B R_1 + V_{OC}) \tag{3.10}$$

$$V_{OC} = \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{C_2}\right) I_B \tag{3.11}$$



Şekil 3.4. Thevenin batarya modeli

3.1.1.6. Reaktif batarya modeli

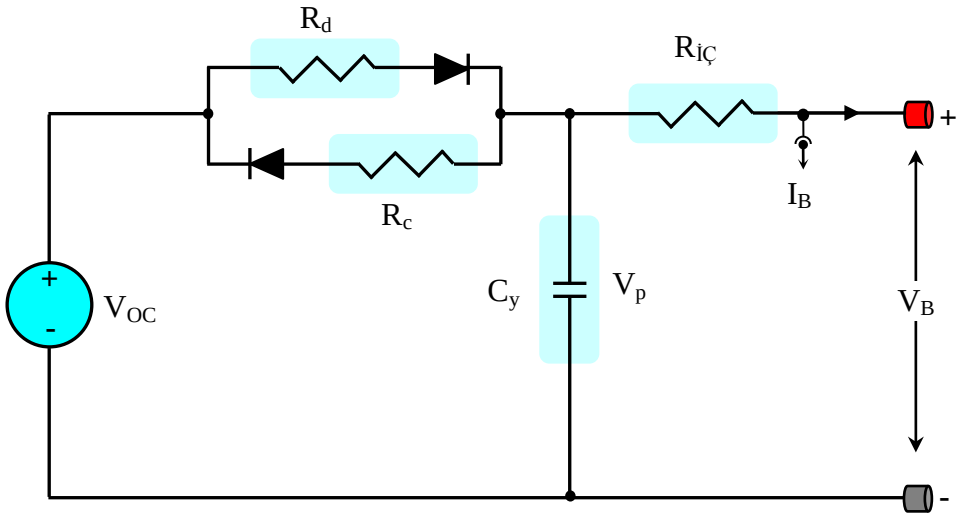
Şekil 3.5'te görülen reaktif batarya modeli, dirençsel Thevenin eşdeğer modelinin geliştirilmiş bir biçimidir. Bataryadaki elektrolit içinde oluşan kimyasal yayılımın ve

bunun sonucu olarak ortaya çıkan batarya geçici durum özelliğinin modellenebilmesi için; dirençsel Thevenin eşdeğer modeline, C_y polarizasyon kapasitörü eklenmiştir. R_d ve R_c dirençleri de, şarj ve deşarj sırasında meydana gelen geçici durum özelliğinin belirlenmesinde ve yayılım sırasında oluşan enerji kayıplarının modellenmesinde kullanılmaktadır. V_B batarya terminal gerilimi, C_y yayılım kapasitörü ve $R_{İÇ}$ batarya iç direnci üzerindeki gerilim düşümüne bağlı olarak değişmektedir. Denklem (3.12) ve Denklem (3.13)'te C_y yayılım kapasitörü üzerindeki gerilim değişimi verilmektedir.

$$\frac{dV_p}{dt} = -V_p \frac{1}{R_d C_y} + V_{OC} \frac{1}{R_d C_y} - I_B \frac{1}{C_y}, V_p \le V_{OC} \tag{3.12}$$

$$\frac{dV_p}{dt} = -V_p \frac{1}{R_d C_y} + V_{OC} \frac{1}{R_d C_y} - I_B \frac{1}{C_y}, V_p > V_{OC} \tag{3.13}$$

V_{OC} ise batarya açık devre gerilimidir. Doluluk durumuna bağlı olarak devre parametrelerinin aldıkları değerler değişmektedir. Bu yapı bataryanın iç direnci şarj ve deşarj davranışını modellemek için kullanılan farklı dirençleri sağlamaktadır.



Şekil 3.5. Reaktif batarya modeli

3.1.1.7. Copetti batarya modeli

Copetti batarya modeli herhangi bir batarya için sabit parametreler ile modellenmiş genel batarya modelidir. Bu batarya modeli basit bir yapıya sahip olduğundan parametrelerin deneysel olarak tanımlanması gerekli değildir. Bataryanın gerilimi

aşağıdaki Denklem (3.14)-Denklem (3.18) ile hesaplanmaktadır. Copetti batarya model eşdeğer devresi Şekil 3.6'da verilmektedir.

Eğer $V_B < nV_g$;

$$V_B = n\left(V_{OC}(t) + V_{cp}(t)\right) \tag{3.14}$$

$$\frac{dV_{cp}}{dt} = -\frac{1}{R(t)C_p}V_{cpk} + \frac{I_B(t)}{C_{pk}} \tag{3.15}$$

Eğer $V_B > nV_g$;

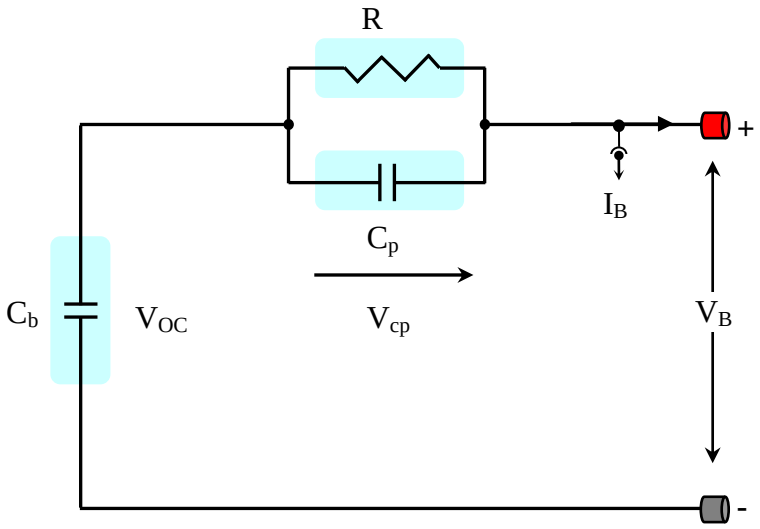
$$V_B(t) = n\left(V_{OC}(t) + R(t)I_B(t)\right) \tag{3.16}$$

$SOC(t) = 1$, $V_B(t) = 2{,}16V$'tur.

$$C_B(t) = \frac{1{,}67C_{10}}{1 + 0{,}67\left(\frac{I_B(t)}{I_{10}}\right)^{0,9}}\frac{1}{n0{,}16} \tag{3.17}$$

$$I_{10} = \frac{C_{10}}{10} \tag{3.18}$$

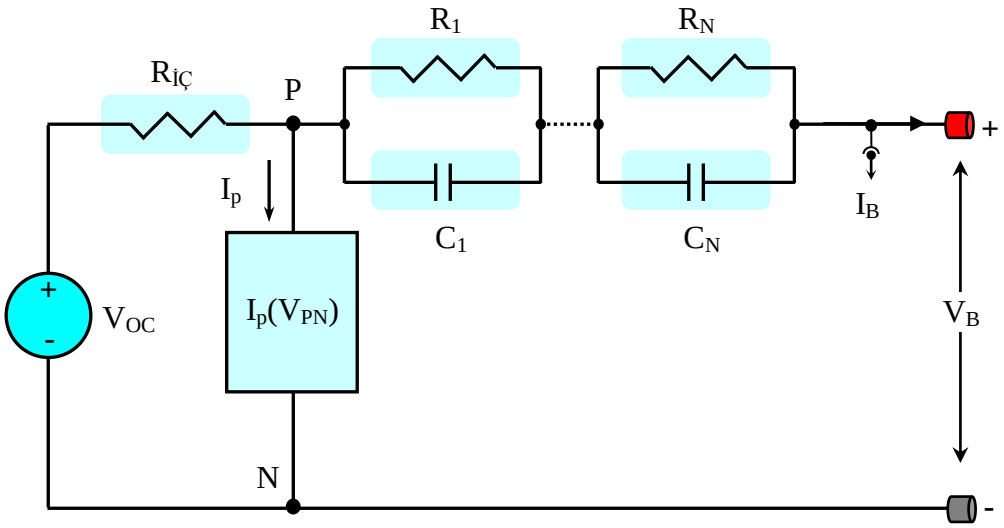
Burada I_B batarya akımı, V_B batarya terminal gerilimi, n hücre sayısı, V_g=2,35V gazlanma gerilimi, V_{cp} polarizasyon gerilimi, V_B elektromotor kuvvet, $R_{İÇ}$ batarya iç direnci, C_{pk} polarizasyon kapasitörü, C_{10} nominal kapasite ve I_{10} batarya şarj akımıdır.



Şekil 3.6. Copetti batarya modeli

3.1.1.8. Parazitik etki elemanlı dinamik batarya modeli

Eşdeğer devre şeması Şekil 3.7'de verilmiş olan parazitik etki elemanlı dinamik modelin P ve N noktaları arasındaki bölüm, parazitik devre elemanıdır. Bu parazitik devre elemanı sadece şarj sırasında aktiftir.



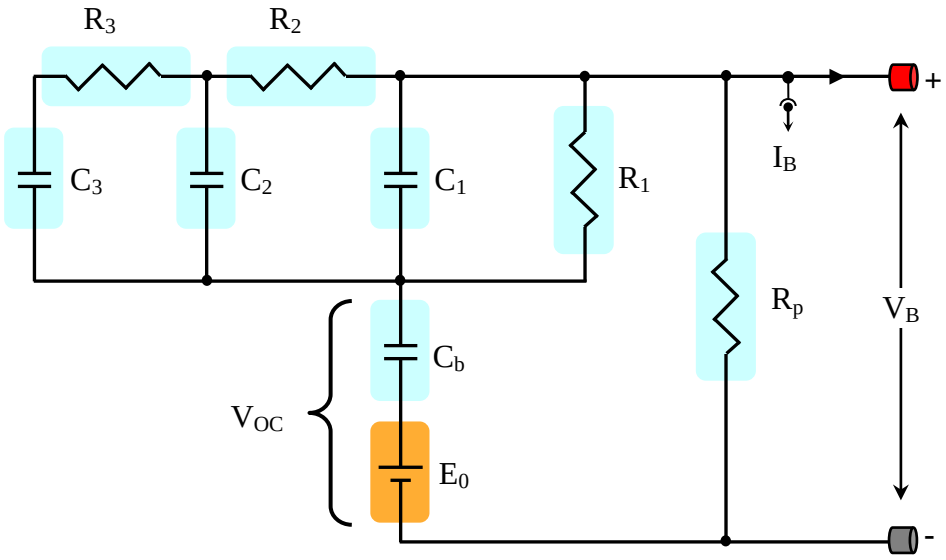
Şekil 3.7. Parazitik etki elemanlı dinamik batarya modeli

Deşarj 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. C_N ve R_N paralel blokları, bataryanın geçici durum özelliğini modelleyen kapasitörler ve dirençlerdir.

V_{OC}, batarya açık devre gerilimi ve $R_{İÇ}$ batarya iç direncidir. Model parametreleri batarya testlerinden hesaplanır ve bu değerler batarya doluluk durumuna bağlı olarak değişim gösterir.

3.1.1.9. Doğrusal elektriksel batarya modeli

Doğrusal elektriksel devre modelinin devre şeması Şekil 3.8'de görülmektedir. Bu devre modeli, Thevenin devre modelinin bir benzeri olup, direnç ve kapasitör gibi doğrusal devre elemanlarından oluşmaktadır.



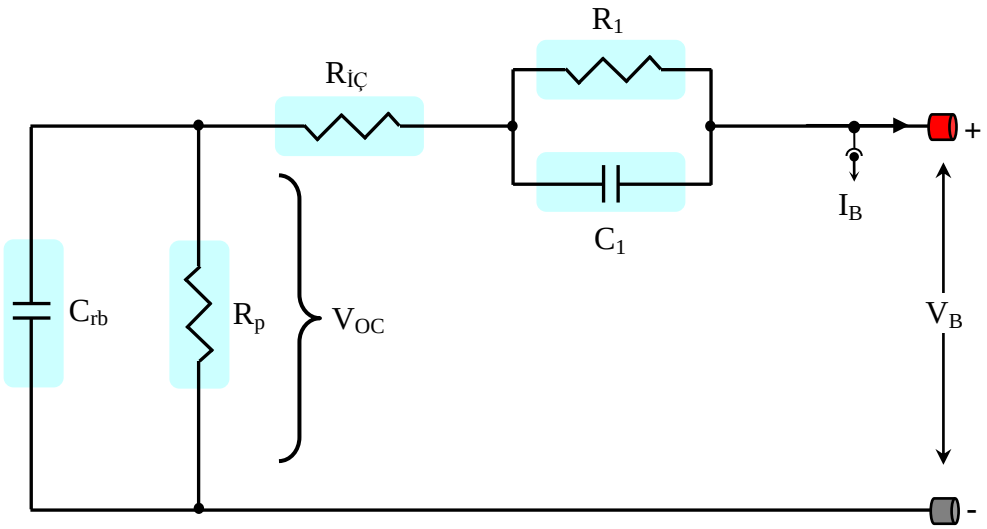
Şekil 3.8. Doğrusal elektriksel batarya modeli

R_p, bataryanın iç deşarj direncidir. R_1, R_2, R_3 dirençleri ve C_1, C_2, C_3 kapasitörleri, Vb 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 bağlı olarak değişebilmektedir. Hata oranının azaltılması için, bataryanın doluluk durumu değiştikçe devre elamanlarının değerlerinin de değiştirilmesi gerekmektedir.

3.1.1.10. Randle batarya modeli

Şekil 3.9'da Randle batarya modelinin elektriksel modeli görülmektedir. Bataryanın modellenmesinde, devre sadece direnç ve kapasitörlerden oluşturulmuş, herhangi bir

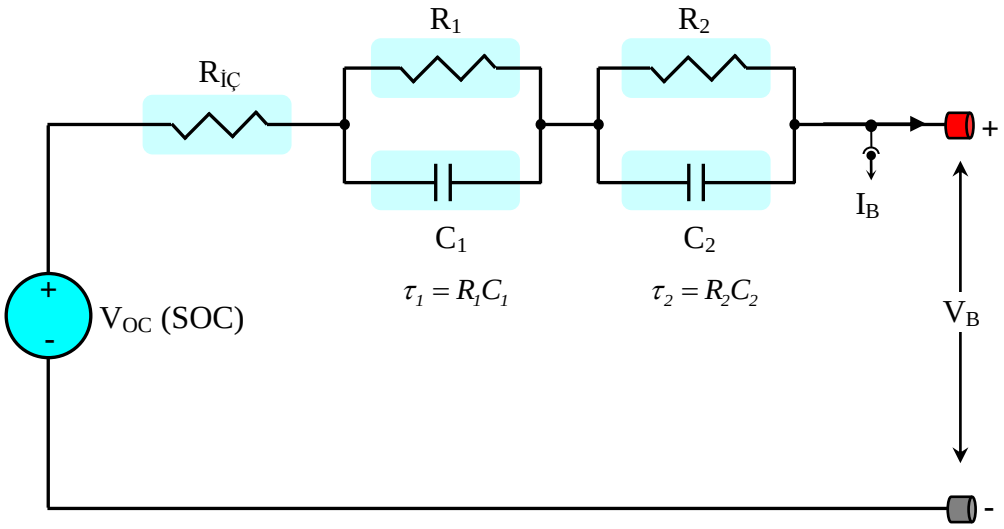
gerilim kaynağı kullanılmamıştır. Batarya parametreleri yapılan testler sonucunda, doğrusal olmayan fonksiyonlar şeklinde modellenmişlerdir. R_p, bataryanın iç deşarj direncidir. V_{OC} batarya açık devre gerilimi, C_{rb} batarya kapasitörü üzerindeki gerilim düşümü olarak verilmiştir. R_1 direnci ve C_1 kapasitörü, V_b batarya terminal geriliminin geçici durum özelliğini belirlemekte kullanılmaktadır. R_s ise batarya iç direncidir.



Şekil 3.9. Randle batarya modeli

3.1.1.11. İkinci dereceden Randle batarya modeli

Şekil 3.10'da gösterilen ikinci dereceden Randle batarya modelinde, batarya generatör kaynağının terminal uçlarına bağlı R_0 iç direnci vardır. Diğer direnç ve kapasitörler hücrenin dinamik modellenmesi için kullanılmaktadır.



Şekil 3.10. İkinci dereceden Randle batarya modeli

Bu model bataryanın şarj durumunu (SOC) ve deşarj derinliğini (DOC) dikkate almaktadır. Buradaki birinci R_1 ve C_1 kolu bataryanın SOC'ni temsil ederken, ikinci koldaki R_2 ve C_2 kolu bataryanın DOC'si ile ilişkilidir. Ayrıca ikinci dereceden Randle modeli bataryanın generatör gerilimi (V_{OC}) açık devre gerilimi olarak modellenmiştir. Bu açık devre gerilimi hücrenin dinlenmiş halde tutulduğunda gerilimi olup SOC'nin bir fonksiyonudur. SOC sıcaklığa ve hücre deşarj akım miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 3.11' de verilen ikinci dereceden Randle batarya modelinin elektriksel eşdeğer devresinin, batarya gerilimini ve doluluk durumunu (SOC) gösteren matematiksel denklemleri Denklem (3.19)-Denklem (3.24)'te verilmiştir [35].

$$V_B = V_{OCV} - I_B\left(R_{İÇ} + \frac{R_1}{1+sR_1C_1} + \frac{R_2}{1+sR_2C_2}\right) \tag{3.19}$$

$$V_B = V_{OCV} - I_B R_{İÇ} - I_B\left(\frac{K(1+sK_1)}{(1+sK_2)(1+sK_3)}\right) \tag{3.20}$$

$$R_1 = R_{10}e(-K_1(1-SOC)) \tag{3.21}$$

$$R_2 = \frac{R_{20}}{DOC} \tag{3.22}$$

$$SOC = 1 - \frac{1}{C_n}\int I_B d\tau \tag{3.23}$$

$$DOC = 1 - \frac{1}{C(i_{avg})}\int I_B d\tau \tag{3.24}$$

3.2. Ultrakapasitör Modelleme Yöntemleri

Ultrakapasitörler literatürde birkaç farklı şekilde modellenmektedir. Modelleme çalışmalarında üç temel yaklaşım modeli mevcuttur. Bunlar matematiksel model, elektriksel devre modeli ve elektriksel olmayan devre modelidir. Her bir modelleme yaklaşımının kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Matematiksel modelleme yöntemi karmaşık hesaplamalar ve deneysel olarak tanımlanmış birçok parametre gerektirmektedir. Buna ek olarak bu matematiksel modeller genellikle fiziksel olarak tanımlanmaz ve hali hazırda devre şeması içerisinde birleştirilemez. Elektriksel olmayan devre modellerinde benzer eksiklikler mevcuttur. Bu nedenle tez çalışmasında elektriksel devre modelleme üzerinde durulacaktır.

3.2.1. Ultrakapasitörde enerji depolama

Denklem (3.25)'te kapasitif ilkesinin formülü verilmektedir. Denklemdeki I_{UK} ultrakapasitör akımı, dt deşarj zamanındaki değişim miktarı, C_{UK} kapasite ve dV_{UK} ultrakapasitör deşarjından dolayı meydana gelen gerilimdeki değişimdir.

$$I_{UK} = C_{UK}\frac{dV_{UK}}{dt} \tag{3.25}$$

$$dV_{UK} = I_{UK}\frac{dt}{C_{UK}} \tag{3.26}$$

Ultrakapasitör terminalinin toplam gerilim değişimi olan dV_{UK} ve eşdeğer seri dirençten dolayı kaynaklanan gerilim düşümü Denklem (3.27)'de verilmektedir.

$$dV_{UK} = I_{UK}\frac{dt}{C_{UK}} + I_{UK}R_{ESR} \tag{3.27}$$

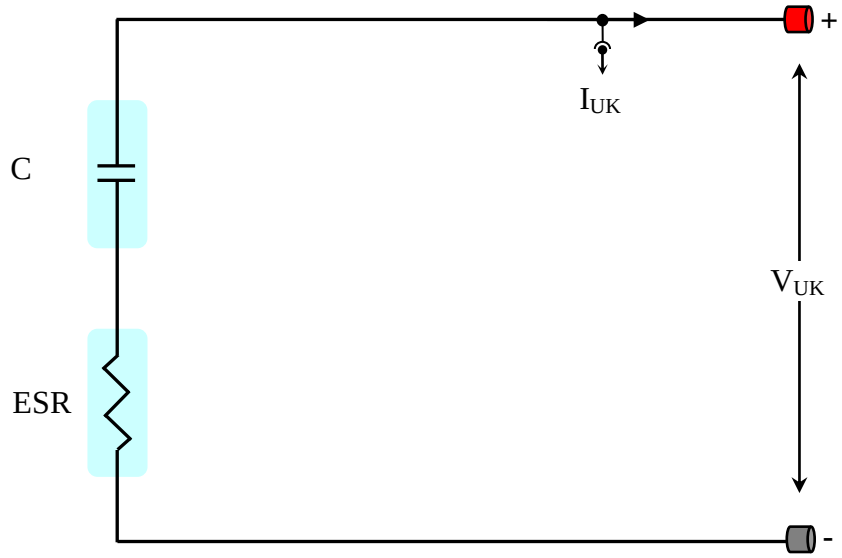
Ultrakapasitörün kapasitesi şarj akımı artmasıyla, ultrakapasitör direnci ve şarj/deşarj akımı değiştiğinden, etkin kapasite kullanımı ve enerji aktarım verimliliği azalır. Bu nedenle sabit şarj modunda, seçilen şarj akımı çok büyük olmamalıdır. Ultrakapasitör sabit şarj akım modunda iken, bu kapasitör C_{UK} değeri terminal gerilim değeri ile değişmez. Ultrakapasitörde depolanan enerji E_d Denklem (3.28)'de verilmektedir [36].

$$E_d = \frac{C_{UK}\left[V_0 + I_{UK}\left(R + \frac{t}{C}\right)\right]^2}{2} \tag{3.28}$$

3.2.2. RC eşdeğer devre modelleri

3.2.2.1. Basit RC ultrakapasitör devre modeli

Basit RC ultrakapasitör devre modelinde yalnızca tek bir RC kolu vardır. Şekil 3.11'de basit RC ultrakapasitör modeli verilmektedir.



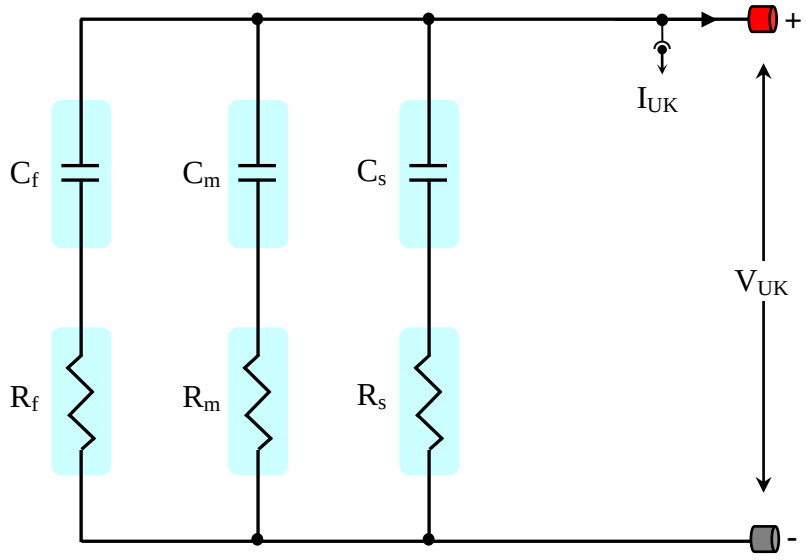
Şekil 3.11. Ultrakapasitör devre modeli

Bu modelde yer alan R direnci ultrakapasitörün omik kayıplarını yani genellikle eşdeğer seri direnç ESR'yi temsil eder. Kapasitör C ise, ultrakapasitörün şarj ve deşarj sırasındaki kapasitansı temsil etmektedir.

3.2.2.2. RC paralel kol ultrakapasitör devre modeli

Bu modelin temel amacı ultrakapasitörün şarj ve deşarj sırasında gerçek davranışını simüle etmektir. Ultrakapasitör şarj olduğunda, terminal uçlarındaki gerilim hızlı bir şekilde artacaktır. Eğer şarj etme işlemi durursa, terminal uçlarındaki gerilim değeri birkaç dakika içinde yavaş yavaş azalacak ve nihayetinde onlarca dakika sonra stabil hale gelecektir. Bu yüzden ultrakapasitörün şarj ve deşarj bölgelerini simüle etmek için üç farklı zaman sabitli RC kolu kullanılmıştır.

İdealde bu RC kol sayısı büyük olmalıdır. Ancak, modelleme sürecini kolaylaştırmak ve tatmin edici doğruluğunu sağlamak için, tipik bir modellemede iki ya da üç RC kol modelleri seçilir. Şekil 3.12'de üçlü RC paralel kol modelinin eşdeğer devresi verilmektedir. Bu üç kol R_f ve C_f'den oluşan hızlı-vadeli, R_m ve C_m'den oluşan orta-vadeli, R_s ve C_s'den oluşan uzun-vadeli kollar olarak adlandırılır.



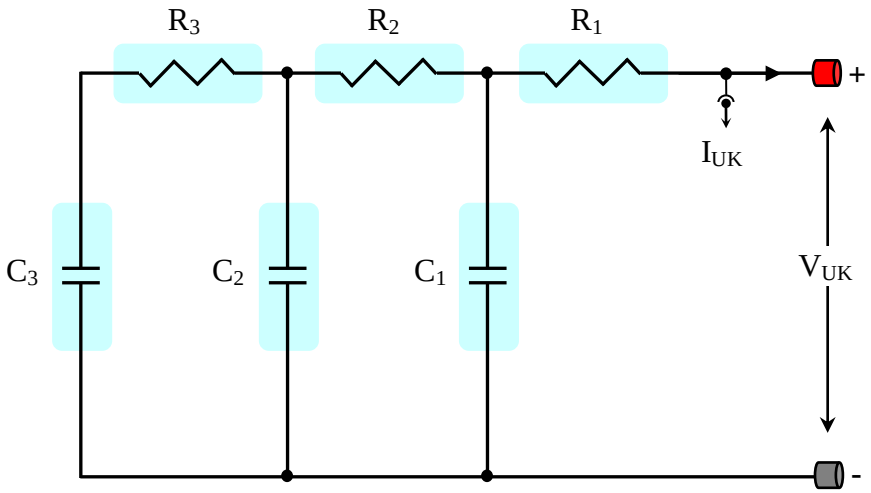
Şekil 3.12. RC paralel kol modeli

Her bir RC kolu farklı zaman sabitine sahiptir. Hızlı-vadeli RC kolu birkaç saniye içerisinde ultrakapasitörün şarj ve deşarj davranışını temsil etmektedir. Orta-vadeli RC kolu dakika ölçeği üzerinden ultrakapasitörün şarj ve deşarj davranışını temsil etmektedir. Son olarak yavaş-vadeli RC kolu genellikle uzun süreli (on dakikadan uzun) ultrakapasitörün şarj ve deşarj karakteristiklerini yönetir.

3.2.2.3. RC iletim hattı ultrakapasitör devre modeli

Ultrakapasitörün fiziksel düzeyde, gözenekli elektrottaki deliklerin her biri, bir iletim hattı olarak modellenebilir. Çift tabakalı kapasitif etkileri tahmin etmek için, düz, aynı çapta silindirik gözenekler ve mükemmel iletken elektrotlar varsayımı yapılarak, potansiyel birçok RC elemanları ile bir merdiven basamağı gibi simüle edilir. Şekil 3.13'te üç kollu RC iletim hattı ultrakapasitör eşdeğer devresi verilmektedir.

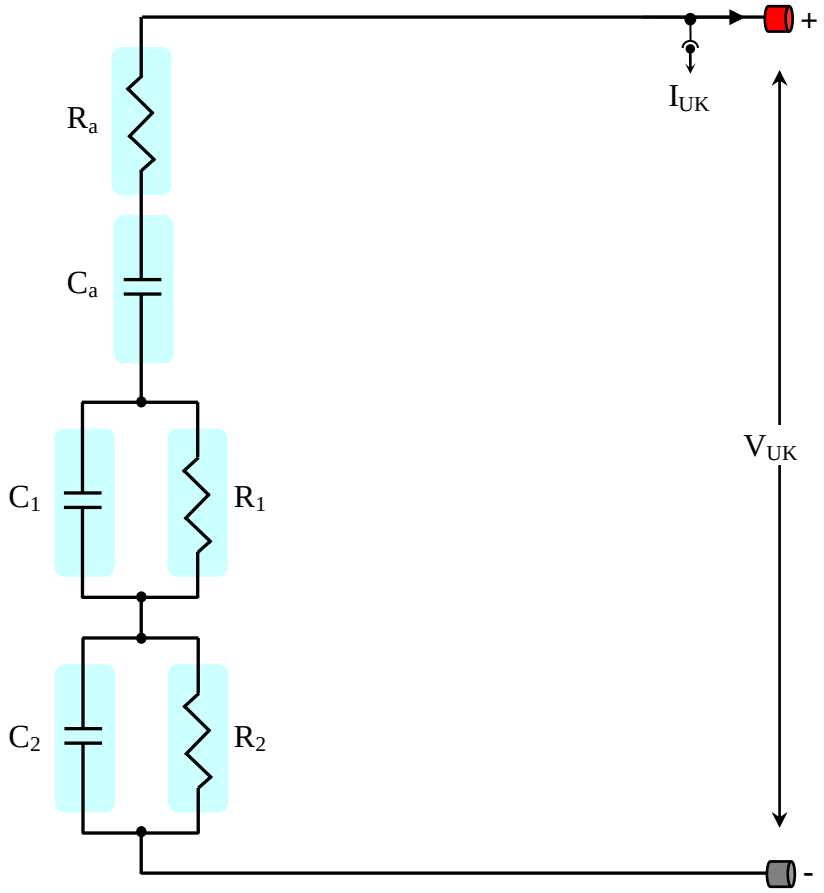
Bu model, doğrudan ultrakapasitörün fiziksel yapısı ve elektromekanik özelliklerini simüle eder. Bu yapının fiziksel anlamı çok açıktır. Bu model hem dinamik hem de uzun süreli davranışların hesabını dikkate alır. Ancak bu iletim hattında kompleks analitik ifadeler vardır ve bu simülasyon için uygun değildir. Buna ek olarak, üçlü RC paralel kol modelinde olduğu gibi, parametreler sabit akım testlerden elde edilir.



Şekil 3.13. RC iletim hat modeli

3.2.2.4. RC seri-paralel kol ultrakapasitör devre modeli

Şekil 3.14'te RC seri-paralel kol ultrakapasitör devre modelinin eşdeğer devresi verilmektedir. Eşdeğer devredeki R_a eşdeğer seri direnci, C_a ve diğer paralel RC kolları ultrakapasitörün gözeneklerindeki empedansı temsil etmektedir. Gelişmiş doğruluk için, bu parametreler ultrakapasitörün sıcaklığına, gerilimine ve çalışma frekansına bağlı olabilir. Empedans spektroskopisi test yöntemi, parametreleri elde etmek için verilir.



Şekil 3.14. RC seri-paralel kol modeli

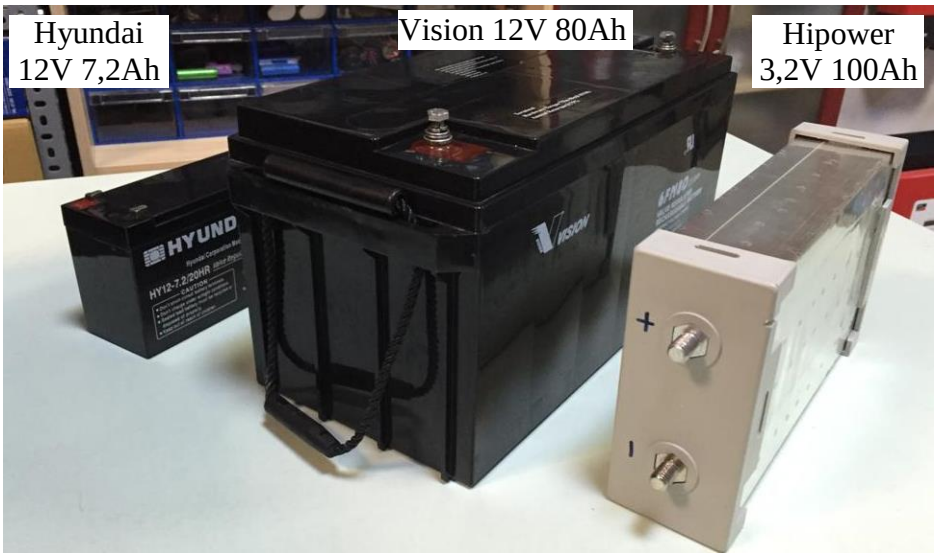
3.2.2.5. Çift tabaka yapılı basitleştirilmiş Helmholtz ultrakapasitör modeli

Ultrakapasitörler, Alman fizikçi Helmholtz'un önerdiği arabirimi çift katmanlı elektrik kapasitörü teorisine dayanmaktadır. Kimyasal olarak elektroliz, elektrotun bir elektrolitik çözelti içine daldırıldığında, bir yük ayrılır ve elektrot yüzeyinin sınırında durarak burada yükler birikir. Ters yüzeydeki elektrolit yüklü iyonlar, elektrot üzerinde biriken tortu yükünü telafi etmek için yüzeye çıkarlar. Bu durum Helmholtz katmanı (Helmholtz layer) olarak adlandırılır. Kapasitans temelinde yüzey yapısında depolanan elektronlar olup, bir kapasitörün dış özelliklerini tam olarak tanımlamak için teorik modeller kapasitörün özelliklerini incelemek üzere Helmholtz çift tabakalı yapısına göre önerilmiştir. Ultrakapasitörün teorik modeli elektrikli çift tabaka özelliklerine odaklanmıştır. Fiziksel anlamını ve kimyasal bileşenlerini incelemek için, basit elektriksel bileşenler kullanılarak, ultrakapasitörlerin giriş ve çıkış karakteristiği çıkarılabilir [36].

4. BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR DENEYSEL ÇALIŞMALARI

4.1. Batarya Deneysel Çalışma ve Sonuçları

Tez kapsamında batarya modelleme çalışması olarak üç farklı batarya ile şarj/deşarj deneyleri yapılmıştır. Bu bataryalar kurşun-asit ve lityum demir fosfat ($LiFePO_4$) yapısına sahiptir. Şekil 4.1'de deneysel çalışmalarda kullanılan bataryaların fotoğrafları verilmektedir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan bataryaların fotoğrafları

Batarya teknik özelliklerinde yazan 20HR ifadesi, bataryayı amper-saat cinsinden verilen kapasitesine oranını yani bataryanın kaç saat boyunca akım verebileceğini anlatmaktadır. Hyundai marka batarya için 7,2Ah/20HR oranı 0,36A'dir. Eğer bataryadan 0,36A deşarj akımı çekilirse 20 saat boyunca toplam kapasitesindeki 7,2Ah enerjiyi sağlayabilir demektir. Bu akım değeri Hyundai marka batarya için 0,36A/7,2Ah oranı bataryanın kaç C ile deşarj edildiğini ifade eder ve 20 saat için Hyundai marka bataryada 0,05C'dir.

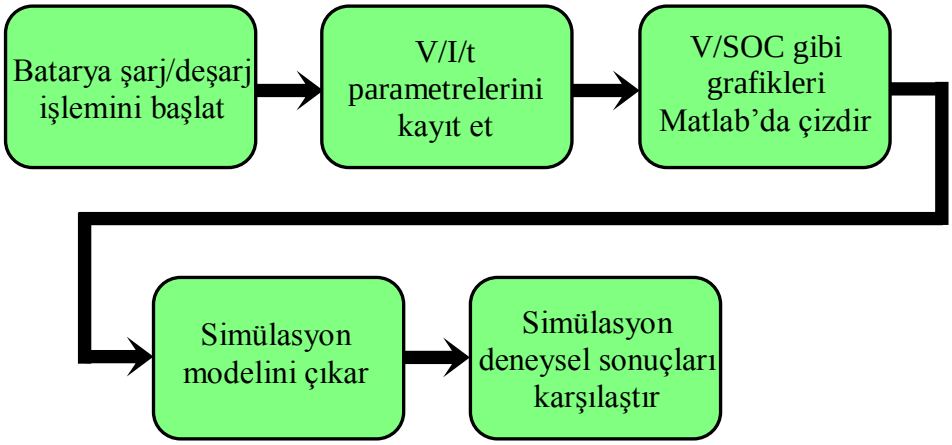
Aynı şekilde Vision marka batarya için 80Ah/20HR oranı 4A'dir. Bu akım değerinde Vision marka batarya için 4A/80Ah oranı 0,05C deşarj oranıdır. Tablo 4.1'de tez çalışmasında kullanılan bataryaların teknik özellikleri ayrıntılı olarak verilmektedir.

Bataryaların teknik özellikleri, üretici firma tarafından verilen katalog değerleridir. Üç farklı batarya marka ve modeli kullanılarak değişik güç yelpazesine sahip yenilenebilir enerji kaynakları uygulamalarında çeşitli depolama birimleri için modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bu batarya tipleri kendi sınıfında olmak üzere seri veya paralel bağlanarak istenilen akım, gerilim ve güç seviyeleri elde edilebilir.

Tablo 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan bataryaların teknik özellikleri

Marka	**Hyundai**	**Vision**	**Hipower**
Batarya Tipi	Kurşun-asit	Kurşun-asit	Lityum demir fosfat
Batarya gerilimi (V)	12	12	3,2
Çalışma Gerilimi (V)	10,5-13,4	10,5-13,4	3,00-3,30
Nominal Kapasite (Ah)	7,2	80	100
Hücre Sayısı (Adet)	6	6	1
Şarj Gerilimi (V)	14,7	14,7	3,65
Şarj Kesme Gerilimi (A)	15	15	3,85
Standart Şarj Akımı (A)	2,16 (C/3,3)	24 (C/3,3)	33,3 (C/3)
Deşarj Gerilimi (V)	12	12	3,2
Deşarj Kesme Gerilimi (V)	10,5	10,5	2,50
Standart Deşarj Akımı (A)	0,36-21,6	4-49,4	33,3
Enerji yoğunluğu (Wh/lt)	33,4	37,1	138,4
İç direnci (mΩ)	22	5,5	≤1
Çevrim Ömrü (%80 DoD)	300	320	2000
Çevrim Ömrü (%100 DoD)	200	250	1000

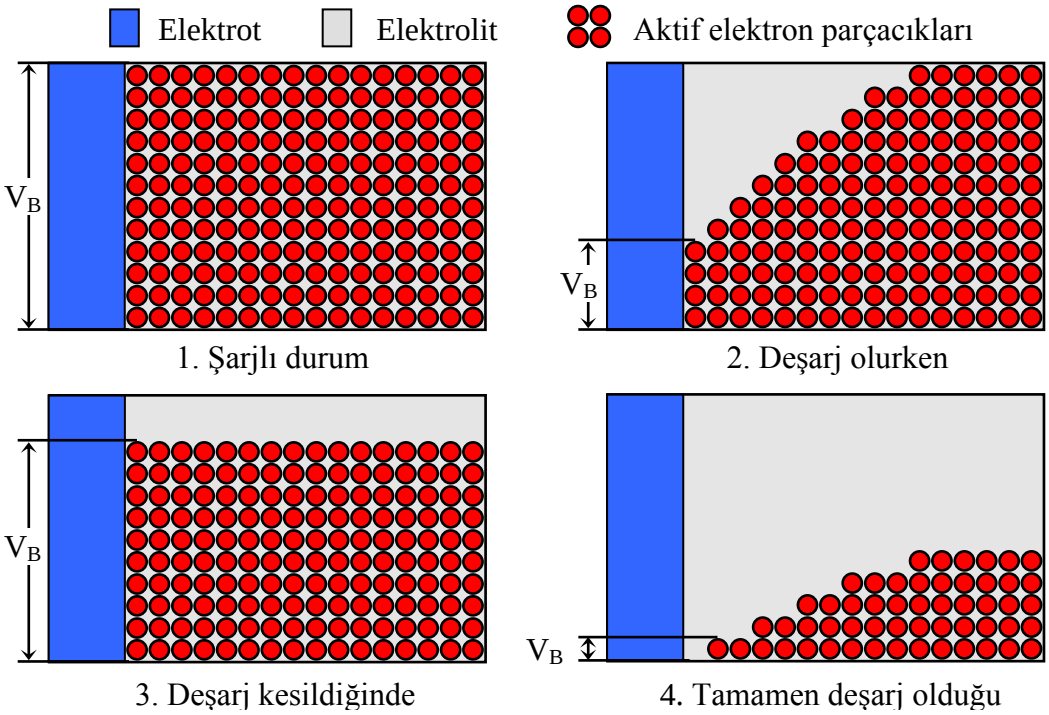
Batarya modelleme çalışmalarının daha kesin sonuçlar vermesi için çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Batarya deşarj deneylerinde, sabit yük ve sabit akımla deşarj deneyleri yapılmıştır. Deneylerde bataryaları şarj etmek amacıyla sabit bir gerilim kaynağı ve sabit akımda şarj etmek için de batarya şarj/deşarj cihazı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar aşağıdaki işlem sırasını gösteren Şekil 4.2'de verilen sıralama ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2. Deneysel çalışma işlem basamakları

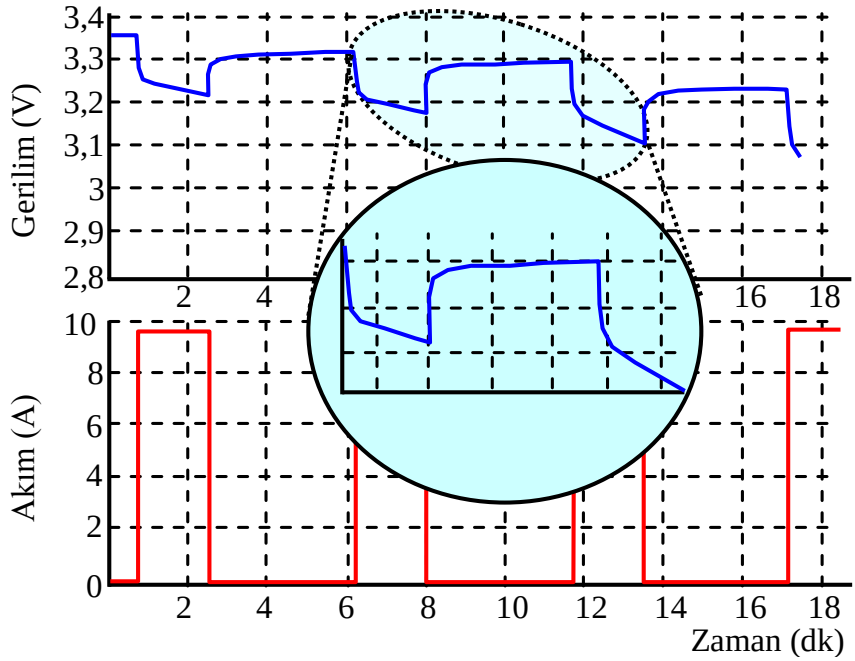
Bataryaların şarj ve deşarj sırasında ortam şartlarına bağlı olarak iç dirençleri dinamik olarak değişim göstermektedir. Değişken olan bu batarya iç direncini en doğru ve yakın şekilde ölçmek için batarya sıcaklığı dikkate alınmıştır. Tez çalışmasında batarya deneysel sonuçlarının 25ºC oda sıcaklığında kayıt altına alınmasına dikkat edilmiştir. Sıcaklığın batarya iç direncine etkisi ayrıca test edilmiştir.

Batarya, kimyasal içyapısından dolayı şarj ve deşarj olurken batarya terminal uçlarındaki gerilim bağlı olduğu duruma göre değişkenlik gösterir. Örneğin batarya şarj olurken bağlı olduğu kaynak gerilim değeri terminal uçlarındaki gerilime eşittir. Fakat bataryaya bağlanan kaynak uçlarındaki terminal uçları çıkarılırsa, bataryanın geriliminde belli bir süre sonra küçük de olsa bir düşüş meydana gelir. Aynı şekilde batarya deşarj esnasında okunan gerilim değeri yük bağlı olmadığı durumdakine göre daha küçüktür. Bu durum batarya difüzyon modeli ile açıklanır [49]. Bu yaklaşıma göre Şekil 4.3'te verildiği gibi batarya ilk durumda tam doludur. İkinci durumda bataryaya yük bağlandığında aktif elektron parçacıkları elektrolit bölgesinden elektrota doğru akar. Yük bataryadan kesildiği üçüncü durumda aktif elektron parçacıkları yüzer seviyeye gelerek bir denge oluşturur. Bu esnada elektrot tarafından baktığımızda aktif elektron parçacık seviyesinin arttığını görülmektedir. Dördüncü durumda da bataryanın tamamen deşarj olduğunu gösteren model verilmektedir.



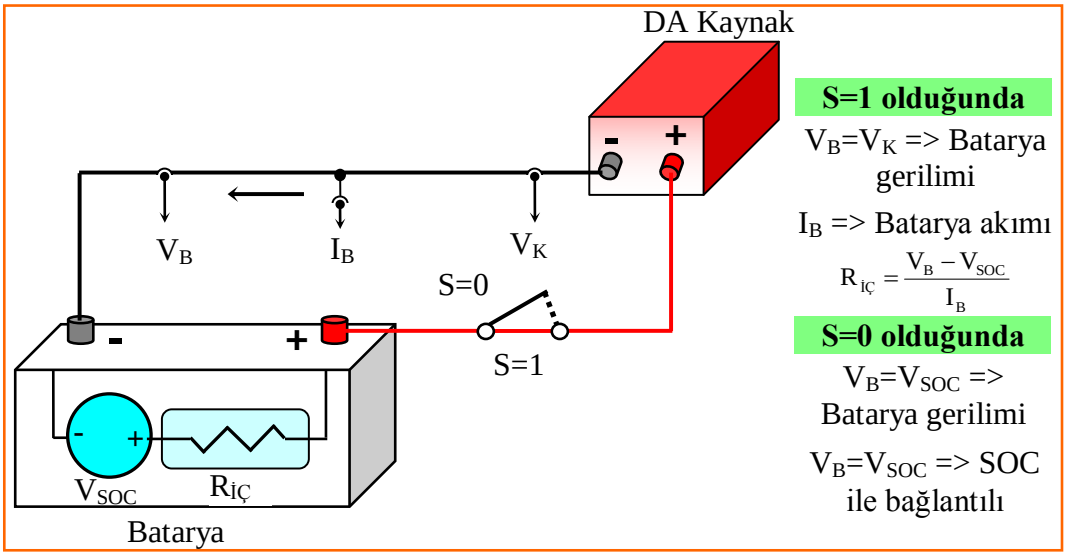
Şekil 4.3. Batarya difüzyon modeli

Batarya difüzyon modelinde oluşan bu etkiyi batarya terminal uçlarındaki gerilim değerinde açıkça görmek mümkündür. Şekil 4.4'te verilen batarya gerilim uçlarındaki değişim grafiğinde deşarj sırasında oluşan terminal uçlarındaki etki açıkça görülmektedir. Batarya yüke bağlandığında terminal uçlarındaki gerilim seviyesi düşmektedir. Batarya uçlarından yük kaldırıldığı andan itibaren batarya kimyasal yapısı kendisini toparlayarak (recovery) terminal uçlarındaki gerilim değeri artmaktadır. Batarya terminal gerilimi belli bir seviyeye çıktıktan sonra sabit kalmaktadır. Tekrar yük bağlandığında batarya terminal gerilimi düşmektedir. Batarya difüzyon modeli bataryanın elektriksel olarak davranış biçimini neden gerilim seviyesinin değiştiğini açıklamaktadır. Aynı durum batarya için şarj olurken geçerlidir ve şarj esnasında batarya terminal gerilim seviyesi yüksek, şarj kesildiği zaman batarya terminal uçlarındaki gerilimi bir miktar düşüktür [37,38].

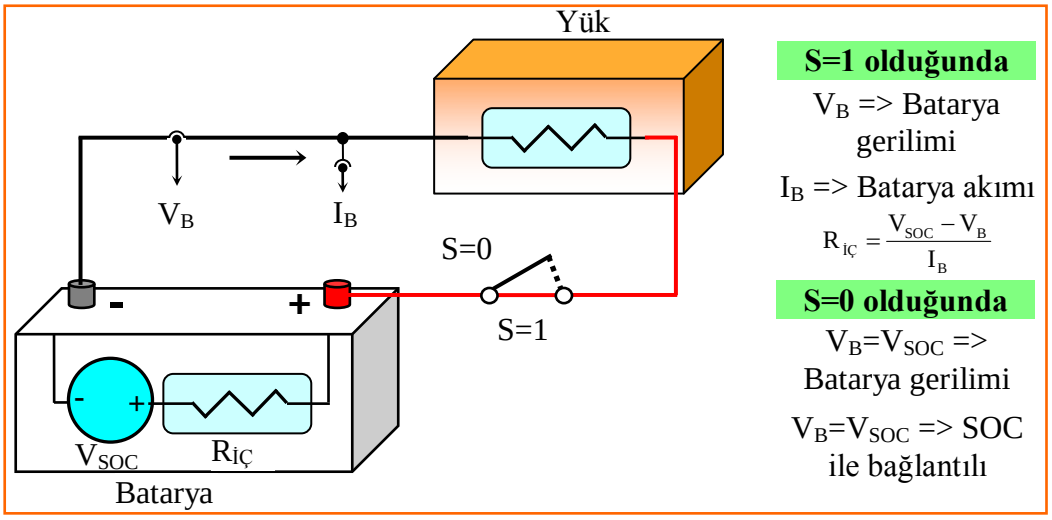


Şekil 4.4. $LiFePO_4$ batarya gerilim uçlarındaki değişimi [38]

Batarya difüzyon model davranışını da dikkate alarak tez çalışmasında batarya modelleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu modelleme çalışmaları esnasında bataryalar şarj ve deşarj edildi. Batarya şarj olurken kaynak gerilimi ve akımı ölçüldü. Bu akım ve gerilim değerleriyle bataryanın dinamik iç direnci hesaplandı. Daha sonra kaynak bağlantısı kesilerek bataryanın hücrelerinin dinlenmesi yani toparlanması (recovery) beklendikten sonra bataryanın uçlarındaki gerilim ölçüldü. Ölçülen bu batarya gerilimi bataryanın doluluk durumu hakkında bilgi vermektedir ve bu gerilim seviyesi doluluk oranı ile orantılıdır. Batarya deşarj sırsında ise yük bağlı iken akım ve gerilim değerleri ölçüldü. Bu akım ve gerilim değerleri bataryanın dinamik iç direnci hakkında bilgi vermektedir. Daha sonra şarj esnasında olduğu gibi deşarj sırasında yük batarya uçlarından ayrılmaktadır. Bataryanın tekrar toparlanma (recovery) süreci beklenmektedir. Bu süre 15-30 saniye arasında olmaktadır. Çünkü bu sürelerden sonra batarya gerilim seviyesi sabit kalmaktadır. Batarya terminal uçları boşta iken bataryanın gerilim seviyesi ölçülerek kayıt edilmektedir. Bu gerilim seviyesi bataryanın doluluk durumunun hesaplanmasını sağlamaktadır. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da batarya şarj ve deşarj deneylerinin, deney sırasında alınan ölçümler ve aralıkları, devre şemasını göstermektedir.



Şekil 4.5. Batarya şarj deneyinin yapılışı ve ölçüm noktaları



Şekil 4.6. Batarya deşarj deneyinin yapılışı ve ölçüm noktaları

Tez çalışması kapsamında bataryaların şarj sonuçlarını aldıktan sonra batarya dinamik iç direncini hesaplamak için Denklem (4.1) kullanılmaktadır. Batarya gerilimi şarj durumunda iken batarya tamamen dolu duruma gelene kadar kaynak geriliminden düşüktür.

$$R_{İÇŞ} = \frac{V_B - V_{SOC}}{I_B} \tag{4.1}$$

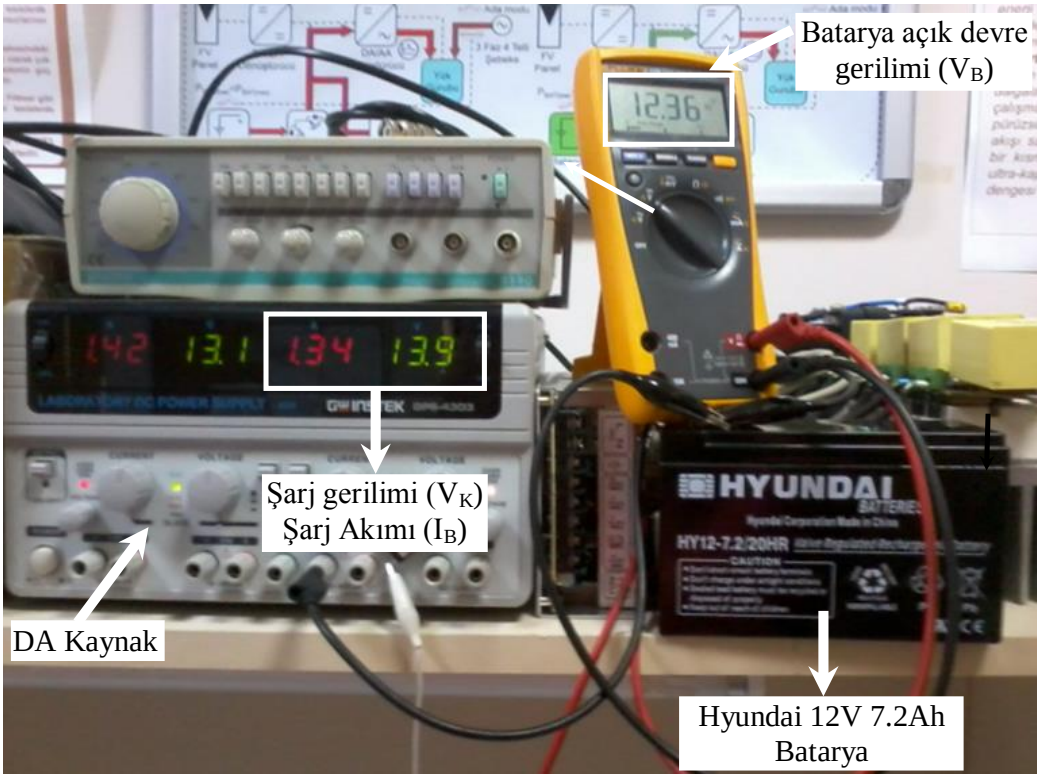
Batarya deşarj durumunda iken yüke bağlı olduğu durumda terminal uçlarındaki gerilim değeri bir önceki değere göre bir miktar düşecektir. Deşarj durumunda iken bataryanın dinamik iç direnci Denklem (4.2) 'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$R_{İÇD} = \frac{V_{SOC} - V_B}{I_B} \quad (4.2)$$

Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'deki V_B bataryanın terminal uçlarındaki gerilim, V_{SOC} batarya ile seri bağlı olarak temsil edilen bataryanın doluluk durumu ile bağlantılı olan bataryanın iç kaynak gerilimi, I_B şarj ve deşarj sırasındaki batarya akımı, $R_{İÇŞ}$ bataryanın şarj durumunda dinamik iç direncini, $R_{İÇD}$ bataryanın deşarj durumunda dinamik iç direncini temsil etmektedir.

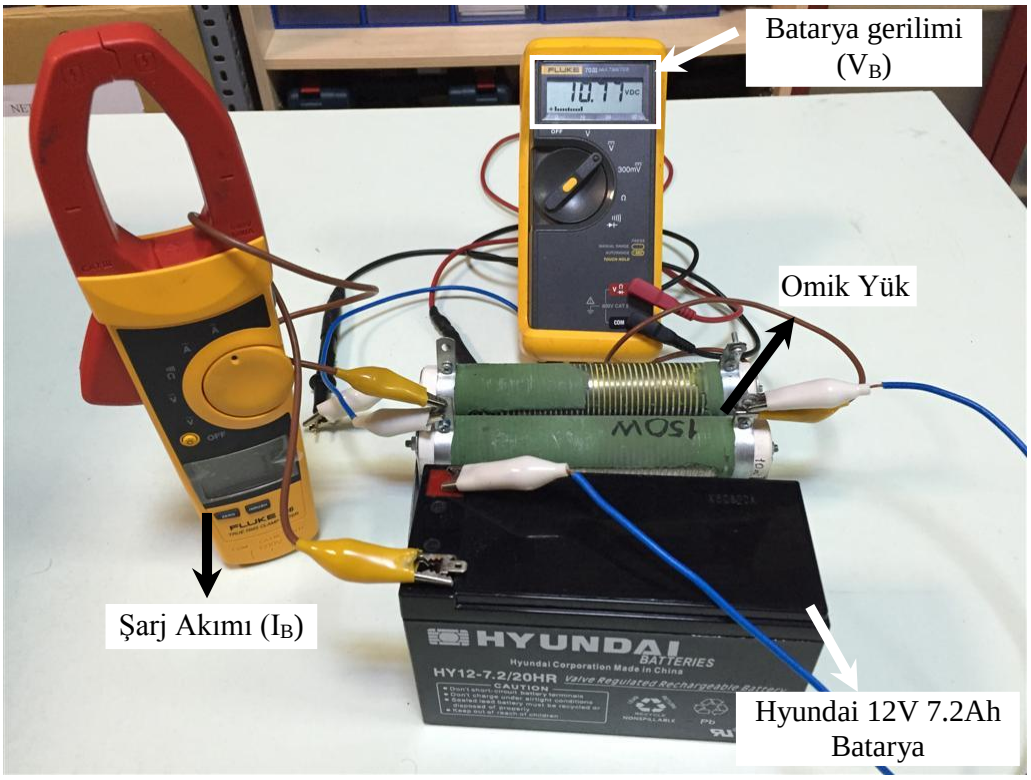
4.1.1. Hyundai marka batarya 1A şarj/deşarj deneyi

Tez çalışmasında ilk olarak Hyundai marka HYT12-7,2 (20HR) modeli olan 12V gerilime ve 7,2Ah kapasiteye sahip kurşun-asit batarya 1A şarj/deşarj deneyi yapılmıştır. Batarya başlangıç olarak 0,13C oranında şarj edilmeye başlanmaktadır. Bataryayı şarj etme yöntemi Şekil 4.5'te verilen sıralama ile gerçekleştirilmiştir. Bu sıralamaya göre ilk olarak S anahtarı 1 olduğunda bataryanın şarj gerilimi ve bataryanın şarj akımı kayıt edilmiştir. Batarya şarj deneyi toplam olarak 330dk sürmüştür. Bu zaman esnasında 3dk periyotlar halinde devre açılarak yani S anahtarı 0 yapılarak bataryanın toparlanma (recovery) süresi kadar (bu süre 20sn) beklenerek o andaki bataryanın açık devre gerilimi ölçülmektedir. Bu işlem sırası batarya tamamen şarj olana kadar devam etmektedir. Batarya şarj etme deneyinde sabit gerilime sahip bir DA güç kaynağı kullanılmıştır. Bu gerilim değeri 14V olarak ayarlanmıştır. Bu değer ürünün katalog bilgilerinden alınarak sağlıklı şekilde şarj etme yöntemi gerçekleştirilmektedir. Böylelikle bataryayı aşırı gerilim ve akımda şarj etmeyerek hücrelerin aynı zamanda bataryanın sağlığı korunmaktadır. Deney test düzeneği Şekil 4.7'de verilen fotoğraftaki gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Hyundai marka kurşun-asit batarya 1A şarj deney fotoğrafı

Hyundai marka kurşun-asit batarya sabit yük 1A deşarj deney fotoğrafı Şekil 4.8'de verilmektedir. Batarya başlangıç olarak 0,13C oranında deşarj edilmeye başlanmaktadır. Bataryayı deşarj etme yöntemi Şekil 4.6'da verilen sıralama ile gerçekleştirilmiştir. Bu sıralamaya göre ilk olarak S anahtarı 1 olduğunda bataryanın deşarj gerilimi ve bataryanın deşarj akımı kayıt edilmiştir. Batarya deşarj deneyi toplam olarak 294dk sürmüştür. Aynı akım değerindeki deşarj süresi, şarj süresine göre uzun olduğu gözlenmiştir. Bu zaman esnasında 3dk periyotlar halinde devre açılarak yani S anahtarı 0 yapılarak bataryanın toparlanma (recovery) süresi kadar (bu süre 20sn) beklenerek o andaki bataryanın açık devre gerilimi ölçülmektedir. Bu işlem sırası batarya tamamen deşarj olana kadar devam etmektedir. Batarya deşarj etme deneyinde sabit direnç değerine sahip bir omik yük kullanılmıştır. Batarya deşarj deneyinde rezistans teli kullanılmıştır ve bu rezistans telin direnci yaklaşık olarak 13,5Ω değerindedir. Bataryadan başlangıçta 1A deşarj akımı geçecek şekilde direnç değeri ayarlanmaktadır. Bu deşarj akımı bataryaya zarar vermeyecek bir akım değerinde seçilmiştir. Böylelikle bataryayı aşırı akımda deşarj etmeyerek hücrelerin aynı zamanda bataryanın sağlığı korunmuştur.

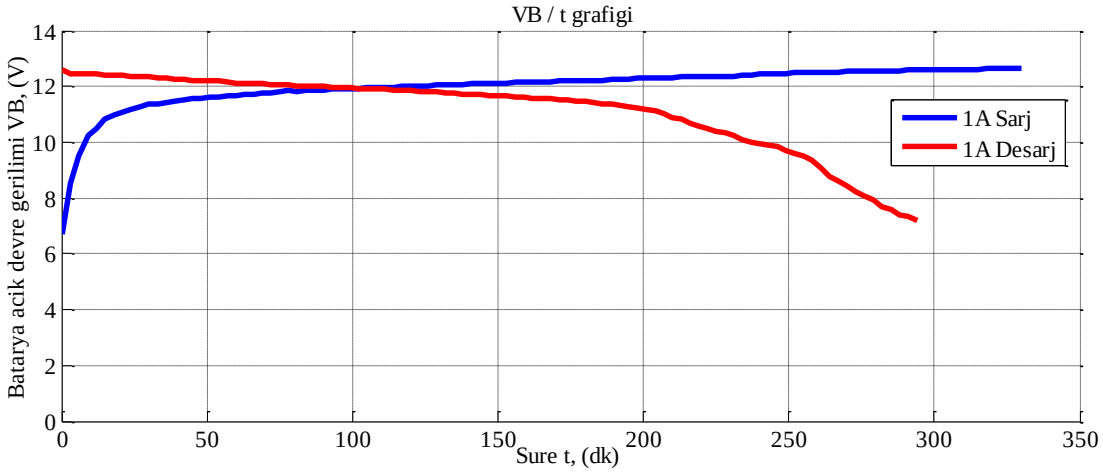


Şekil 4.8. Hyundai marka kurşun-asit batarya 1A deşarj deney fotoğrafı

Tez çalışmasında alınan deneysel sonuçlar MATLAB/M-file programına kaydedilmiştir. M-file dosyasına ölçülen gerilim, akım ve zaman bilgileri yazılarak grafikler çizdirilmektedir.

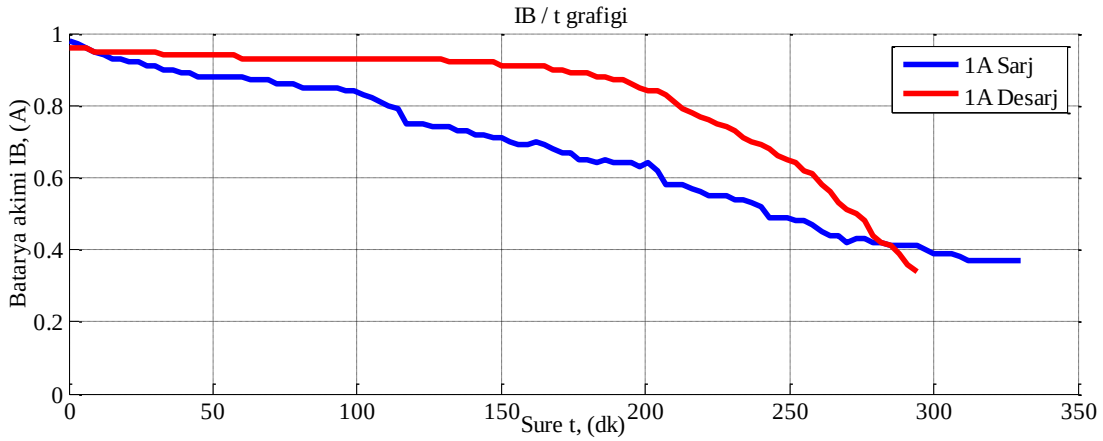
Tez çalışmasında bu bölümde Hyundai marka batarya aynı akımda şarj ve deşarj deneyinin amacı aynı akım değerinde bataryanın dinamik iç direncindeki değişimi gözlemlemektir.

Şekil 4.9'da bataryanın 1A şarj ve deşarj değerinde alınan sonuçların açık devre gerilim karşılaştırılması verilmektedir. Batarya 1A şarj deneyinde ilk olarak boş durumdadır ve açık devre gerilimi 6,5V civarındadır. Batarya şarj oldukça terminal uçlarındaki gerilim artarak 13V olmaktadır. Batarya 1A deşarj deneyinde ise batarya 0,13C oranında deşarj edilmektedir. Batarya 1A deşarj deneyinde ilk olarak tam dolu durumdadır ve açık devre gerilimi 13V civarındadır. Batarya deşarj oldukça terminal uçlarındaki gerilim azalarak 7V olmaktadır.



Şekil 4.9. Hyundai batarya 1A şarj/deşarj deneyi V_B/t değişimi

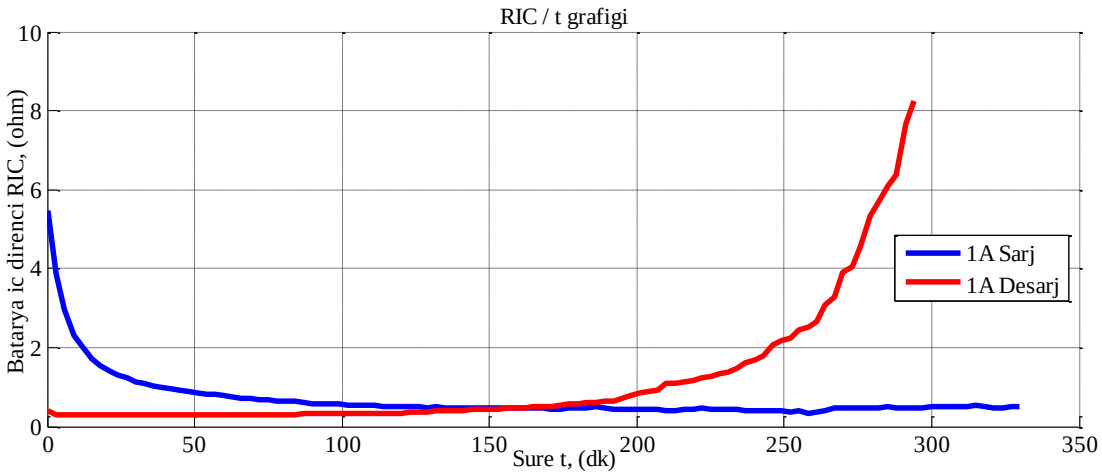
Şekil 4.10'da batarya 1A şarj/deşarj deneyinde bataryanın şarj ve deşarj akım değişimi verilmektedir. Batarya doluluk durumu boş durumda iken şarj deneyinde 1A civarında başlangıç şarj akımı çekmekte ve batarya şarj akımı zamanla azalarak sıfıra gelmektedir. Batarya doluluk durumu tam dolu durumda iken deşarj deneyinde 1A civarında başlangıç deşarj akımı çekilmekte ve bataryanın terminal uçlarındaki gerilim düştüğünden ve yük direnç değeri sabit olduğundan zamanla gerilime bağlı olarak azalmakta 0,3A olmaktadır.



Şekil 4.10. Hyundai batarya 1A şarj/deşarj deneyi I_B/t değişimi

Şekil 4.11'de batarya 1A şarj/deşarj durumunda iken dinamik iç direncinin değişimi verilmektedir. Bataryanın dinamik iç direnci şarj deneyi Denklem (4.1) ile deşarj deneyi ise Denklem (4.2) formülü ile hesaplanarak grafiği çizdirilmektedir. Batarya 1A'de şarj durumunda iken başlangıçta dinamik iç direnci 5,46Ω'dan başlamakta batarya doluluk oranı arttıkça zamanla azalarak 0,48Ω'a düşmektedir. Aynı 1A

deşarj deneyinde ise batarya dinamik iç direnci 0,29Ω'dan başlamakta ve batarya deşarj olduğu süre içinde zamanla artarak 8,23 Ω'a kadar artmaktadır. Bunun sonucu olarak aynı akım değerinde batarya deşarj olurken şarj durumuna göre daha hızlı ve yüksek değerde dinamik iç direnci değişim göstermektedir. Bu durumda bataryanın sıcaklığı gözlenmiştir ve oda sıcaklığında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.11. Hyundai batarya 1A şarj/deşarj deneyi $R_{İÇ}$/t değişimi

Şekil 4.12'de 1A şarj/deşarj durumu için bataryanın açık devre geriliminin batarya doluluk durumuna göre değişimi verilmektedir. Batarya şarj deneyi açık devre gerilimi V_B batarya doluluk duruma göre dağılımı Denklem (4.3)'teki formül ile hesaplanmaktadır.

$$t_{SOC} = \left(\frac{t_{ANLIK}}{t_{SON}} \right) \cdot 100 \tag{4.3}$$

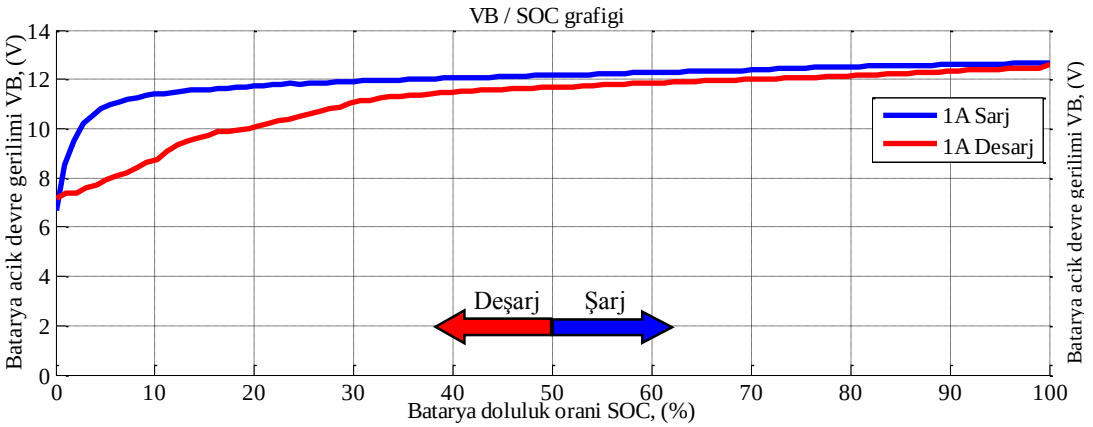
Batarya deşarj açık devre gerilimi V_B batarya doluluk duruma göre dağılımı Denklem (4.4)'teki formül ile hesaplanmaktadır. Burada deşarj durumunda, şarj durumuna göre farklı olarak ilk anda batarya doluluk durumu %100'den başlayarak %0'a inmektedir. Bu yüzden t_{SOC} hesabı Denklem (4.4)'te verilen formüle göre yapılmaktadır.

$$t_{SOC} = \left(1 - \frac{t_{ANLIK}}{t_{SON}} \right) \cdot 100 \tag{4.4}$$

Denklem (4.3) ve Denklem (4.4)'teki t_{ANLIK} belirli periyotlar ile alınan zaman dilimi, t_{SON} batarya şarj ve deşarj deneyi toplam süresi, t_{SOC} yüzdelik cinsinden batarya doluluk durum dilimini temsil etmektedir. Bataryanın açık devre gerilimi deşarj oldukça azalmakta, şarj oldukça artmakta ve bu gerilim değeri batarya doluluk durumu ile ilişkilidir.

Batarya şarj deneyinde batarya doluluk durumu %10 civarında olduğunda batarya gerilimi 11V'a tam dolu olduğunda ise 13V'a ulaşmaktadır. Bataryanın açık devre gerilimi doluluk durumuna bağlı olarak %10 ile %100 arasında toplamda sadece 2V'luk bir gerilim değişimi gözlenmektedir. Bataryanın doluluk durumunu terminal uçlarından öğrenebilmek için okunan gerilim değerinin binde birler ve yüzde birler basamağını okuyarak tespit edilmektedir. Günümüzde kullanılan bataryalı cihazlar doluluk durumunu gerilim değerini hassas bir şekilde okuyarak tespit etmektedir.

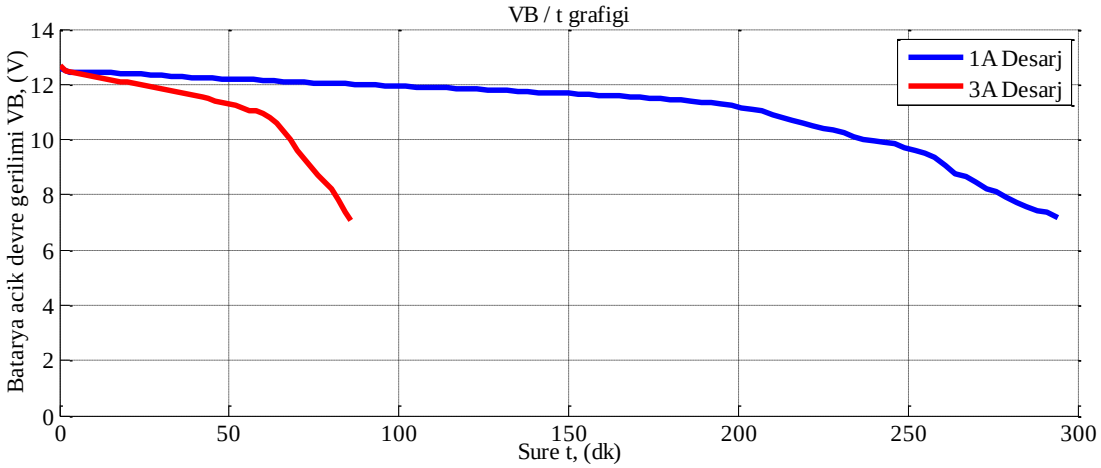
Batarya deşarj deneyinde batarya doluluk durumu %100 olduğunda batarya gerilimi 13V'tur ve deşarj oldukça batarya terminal uçlarındaki gerilim 7V'a kadar düşmektedir. Bataryanın açık devre gerilimi doluluk durumuna bağlı olarak %100 ile %0 arasında toplamda 6V'luk bir gerilim değişimi gözlenmektedir. Batarya katalog bilgilerinde de verildiği gibi bataryanın maksimum deşarj gerilimi 10,5V'tur. Fakat bataryanın dinamik iç direncinin davranışını gözlemek için 7V seviyelerine inilmiştir. Kritik deşarj gerilim seviyesinin altına inildiğinde bataryanın terminal uçlarındaki gerilim değeri ve iç direnci hızlı bir şekilde azalarak bataryanın hücre ve sağlığı açısından olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu yüzden batarya deşarj edilirken batarya doluluk durumu cinsinden maksimum %20 seviyelerine kadar deşarj edilmesi bataryanın çevrim sayısı ve ömrünü arttırmak adına yararlı olmaktadır.



Şekil 4.12. Hyundai batarya 1A şarj/deşarj deneyi VB/SOC değişimi

4.1.2. Hyundai marka batarya 1A ve 3A deşarj deneyi

Bu deney çalışmasında Hyundai marka kurşun-asit batarya 1A ve 3A deşarj durumunda iken karşılaştırılması gözlenmektedir. Batarya başlangıç olarak 0,41C oranında deşarj edilmeye başlanmaktadır. Batarya 3A deşarj deneyi çekilen akım yükseldiğinden toplam süre olarak 86dk sürmüştür.

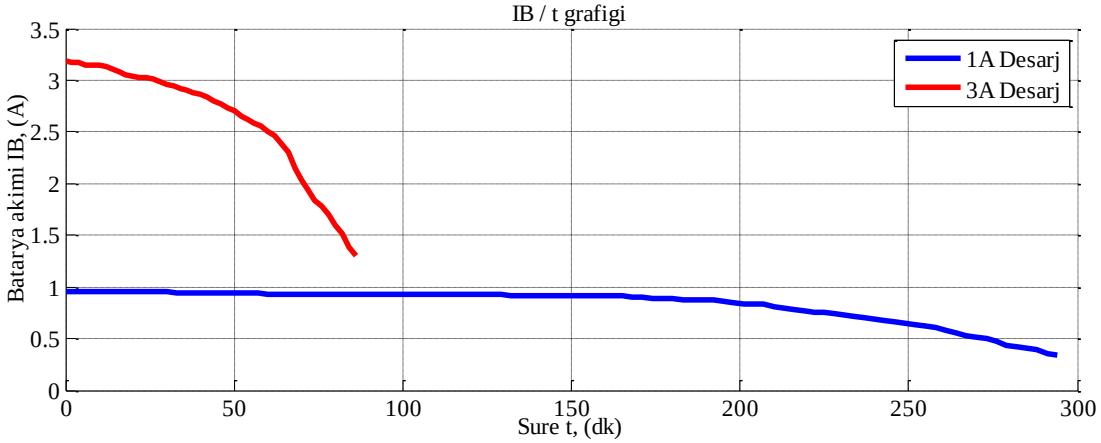


Şekil 4.13. Hyundai batarya 1A ve 3A deşarj deneyi V_B/t değişimi

Batarya ne kadar yüksek akımla deşarj edilirse kapasitesi o kadar azalmaktadır. Bu nedenle bataryaların şarj ve deşarj grafikleri lineer değil, eksponansiyeldir. Bu yüzden aynı şartlar altında akım 3 katına çıkartıldığında deşarj süresi 3'te bir oranından daha az olmakta toplam deşarj süresi 86dk'ya düşmektedir. Bataryanın deşarj süresi kısaldığından ölçüm periyotları daha iyi sonuçlar almak için 2dk olarak seçilmiştir. Batarya deşarj deneyinde 1A deşarj deneyinde olduğu gibi aynı yük tipi yani rezistans teli seçilmiştir. Fakat bataryadan 3A deşarj akımı çekmek için direnç

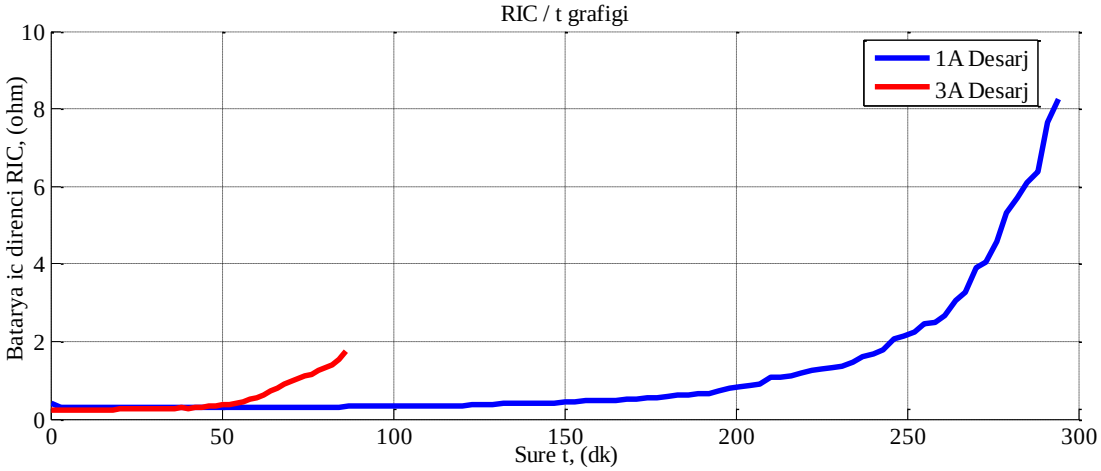
değeri küçültülerek yaklaşık olarak 4Ω değerine ayarlanmıştır. Şekil 4.13'te batarya 1A ve 3A deşarj deney sonucunun gerilim (V_B) zaman ilişkisi verilmektedir. Batarya ilk olarak tam dolu durumdadır ve her iki deşarj deneyinde de açık devre gerilimi 13V civarındadır. Batarya deşarj oldukça terminal uçlarındaki gerilim azalarak 7V olmaktadır ve bu değerde deney sonlandırılmıştır.

Şekil 4.14'te batarya 1A ve 3A deşarj deneylerinde deşarj akım değişimi verilmektedir. Batarya tam dolu durumda iken 0,96A ve 3,18A civarında başlangıç deşarj akımı çekilmekte ve bataryanın terminal uçlarındaki gerilim düştüğünden ve direnç değeri sabit olduğundan zamanla gerilime bağlı olarak azalmakta ve batarya terminal kesme geriliminde 0,43A ve 1,3A olmaktadır.



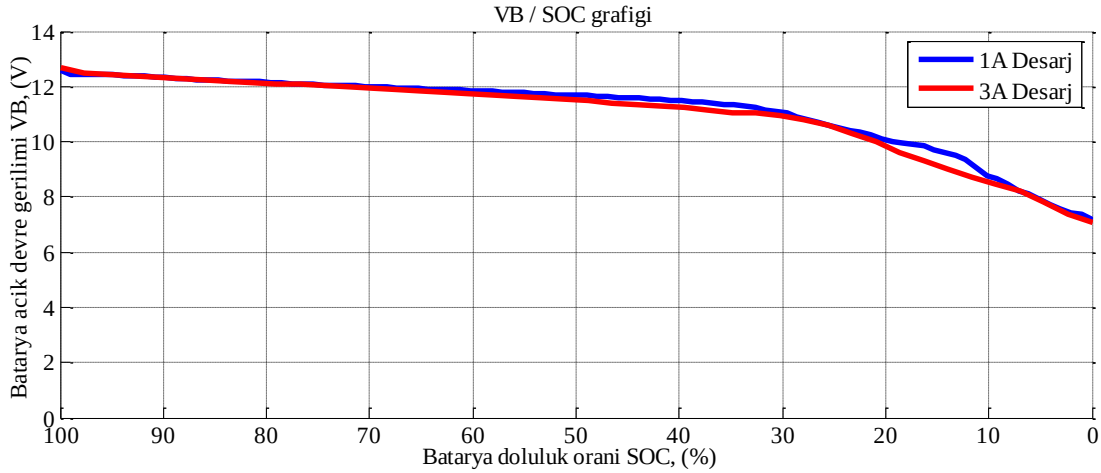
Şekil 4.14. Hyundai batarya 1A ve 3A deşarj deneyi I_B/t değişimi

Şekil 4.15'te batarya 1A ve 3A deşarj deney sonuçları ile hesaplanan bataryanın dinamik iç direnç değişimi verilmektedir. Batarya 1A deşarj deneyine ilk başlangıcında 0,29Ω, 3A deşarj deneyine ilk başlangıçta ise 0,24Ω olarak hesaplanmaktadır ve başlangıçta her iki durumda da dinamik iç dirençleri eşittir. Batarya 3A deşarj deneyinde bataryanın tamamen deşarj olduğundaki dinamik iç direnç değeri 1,73Ω olarak hesaplanmaktadır ve toplam 86dk sürmektedir. Bunun sebebi de yüksek deşarj akımlarında bataryanın terminal uçlarındaki gerilim değerinin çok hızlı bir şekilde düşmesidir.



Şekil 4.15. Hyundai batarya 1A ve 3A deşarj deneyi $R_{İÇ}$/t değişimi

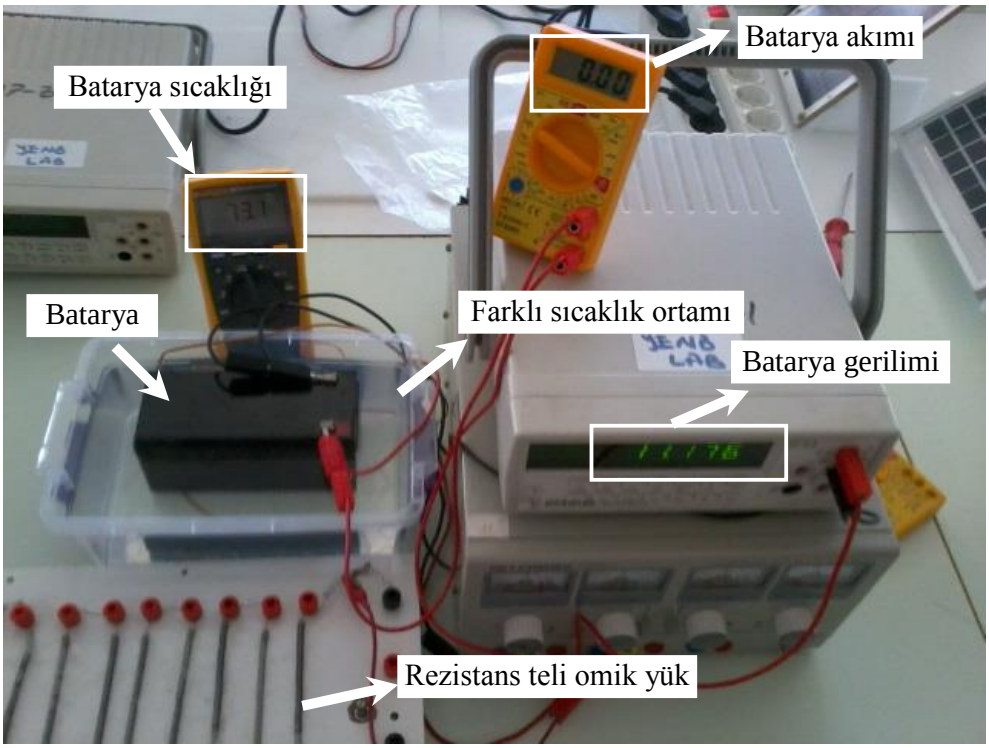
Şekil 4.16'da batarya 1A ve 3A deşarj deney sonuçlarında alınan batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimlerinin batarya doluluk durumuna göre değişimi verilmektedir. Bataryanın sabit yüklerde terminal uçlarındaki geriliminin batarya doluluk durumuna göre değişiminin aynı olduğu gözlenmiştir. Yani batarya deşarj kesme geriliminin sabit yük koşulları altında doluluk durumuna oranı aynıdır. Bu farklı deşarj akım değerlerindeki deney sonucunda Hyundai marka kurşun-asit batarya için kesme gerilimi olan 10,5V değeri iki test sonucu için de aynı batarya doluluk oranında olduğu tespit edilmiştir ve bu değer %29'dur. Bataryanın dinamik iç direnci 3A deney sonucu 1A deney sonucuna göre daha hızlı değiştiği ve zamanla daha çok yükseldiği gözlenmiştir.



Şekil 4.16. Hyundai batarya 1A ve 3A deşarj deneyi V_B/SOC değişimi

4.1.3. Hyundai marka batarya farklı sıcaklık deşarj deneyi

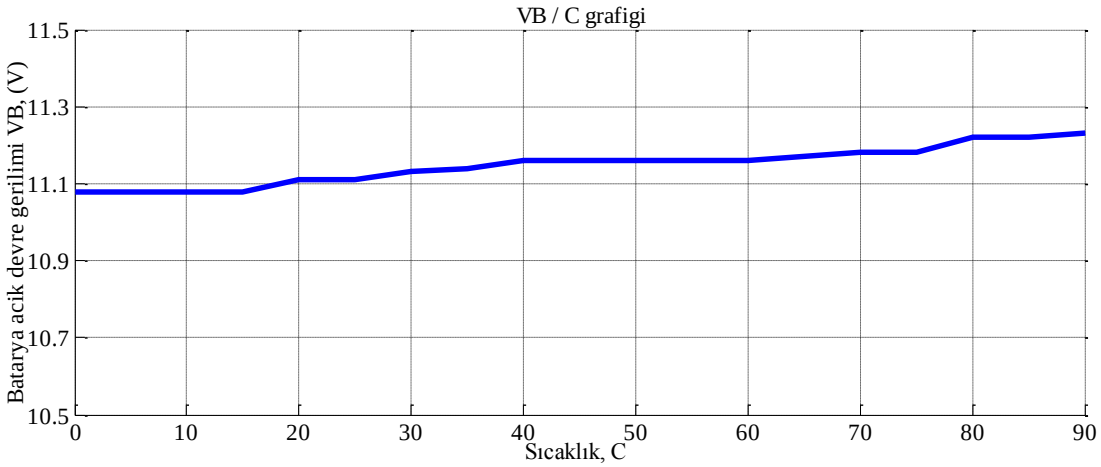
Tez çalışmasında Hyundai marka batarya için farklı sıcaklık değerlerinde bataryanın terminal gerilimi, dinamik iç direnci ve doluluk durum değişimi gözlenmiştir. Bu deney çalışmasında batarya öncelikle bir kap içine yerleştirilerek kaynar su ilave edilmiştir. Daha sonra sıcaklık 10'ar ºC düşürülerek 0ºC'ye ulaşana dek buz ilave edilmiştir. Sıcaklık değeri sürekli olarak ölçü aleti ile ölçülmektedir. Her 10ºC'lik sıcaklık farkında batarya sabit bir omik yüke bağlanarak bataryanın deşarj akım ve gerilimi kayıt edilmektedir. Batarya deşarj süresi, bataryanın doluluk durumunu değiştirmeyecek şekilde çok kısa süreli olarak omik yük devrede kalmaktadır. Deney süresi boyunca batarya doluluk durumu %100 olduğu kabul edilerek test sonuçları alınmaktadır. Yük olarak rezistans teli kullanılmıştır ve yaklaşık 3A geçecek şekilde 4Ω'a ayarlanmıştır. Hyundai marka bataryanın farklı sıcaklık deşarj deney fotoğrafı Şekil 4.17'de verilmektedir.



Şekil 4.17. Hyundai batarya farklı sıcaklık deşarj deney fotoğrafı

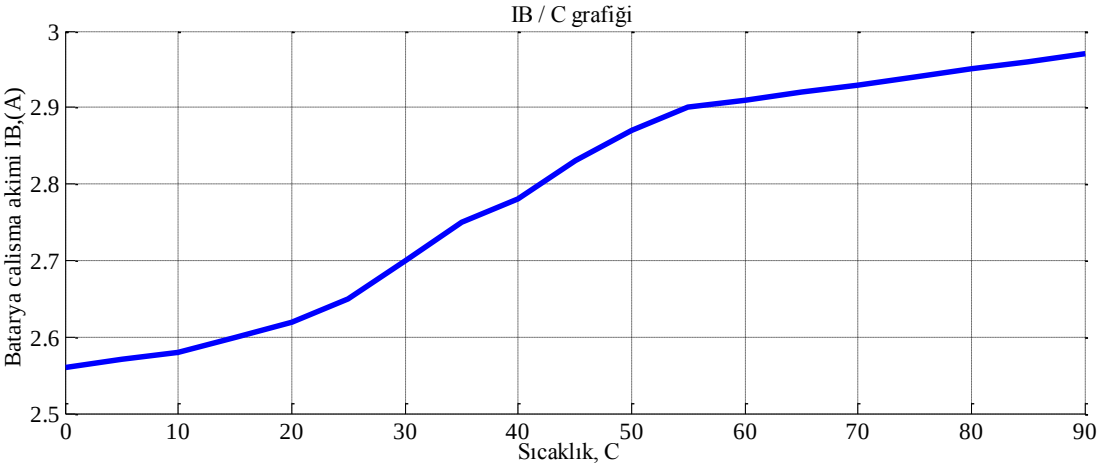
Şekil 4.18'de bataryanın farklı sıcaklık deney sonucunda alınan bataryanın terminal uçlarındaki gerilim değişimi verilmektedir. Bu deney sonucuna göre batarya sıcaklığının artması batarya terminal uçlarındaki gerilim değerini arttırmaktadır. Batarya farklı sıcaklık deneyinde gerçekleştirilen test sonuçlarında batarya terminal

uçlarındaki gerilim değeri 90°C'de 11,23V ölçülmüştür. Sıcaklık azaldıkça batarya terminal uçlarındaki gerilim değeri azalmakta ve 0°C'de 11,08V ölçülmektedir. Sıcak bir bataryada kimyasal reaksiyon daha hızlı olacaktır. Yüksek sıcaklık kimyasal reaksiyonu hızlandırarak yüksek performans sağlayabilir fakat aynı zamanda istenmeyen kimyasal reaksiyonlar meydana gelerek batarya ömrünü azaltacaktır.



Şekil 4.18. Hyundai batarya farklı sıcaklık deşarj deneyi V_B/°C değişimi

Şekil 4.19'da batarya farklı sıcaklık deşarj deneyinde bataryanın deşarj akım değişimi verilmektedir.

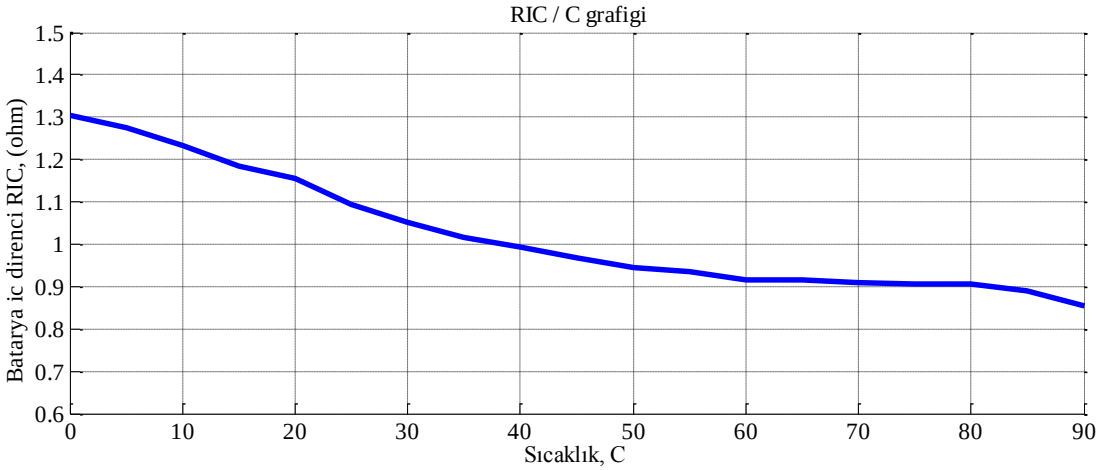


Şekil 4.19. Hyundai batarya farklı sıcaklık deşarj deneyi I_B/°C değişimi

Batarya sıcaklığı arttıkça kimyasal tepkime işlemleri hızlı olduğundan batarya düşük sıcaklığa göre yüksek deşarj akım değeri verdiği gözlemlenmektedir. Batarya 90°C'de deşarj akımı olarak 2,97A değerinde 0°C'de deşarj akımı 2,56A değerinde

ölçülmüştür. Bataryanın çalışma sıcaklığı azaldıkça batarya terminal uçlarındaki gerilim değeri düştüğünden sabit yükte bataryanın verdiği akım da azalmaktadır.

Şekil 4.20'de bataryanın farklı sıcaklık deşarj deneyinde hesaplanan dinamik iç direnç değişimi verilmektedir. Batarya düşük sıcaklıklarda kimyasal reaksiyonu azaldığından dinamik iç direnç değeri 0°C'de 1,3Ω olarak hesaplanmaktadır. Bataryanın çalışma sıcaklığı arttığında bu kimyasal süreç daha kolay ve hızlı olduğundan 90°C'de 0,85Ω olarak hesaplanmaktadır. Bu deney sonucunda bataryanın çalışma sıcaklığı aralığı bataryanın gerilimi, akımı ve dinamik iç direncini değiştirdiği gözlenmektedir. Bu yüzden bataryanın çalışma sıcaklık aralığının iyi tespit edilmesi bataryanın sağlığı açısından çok önemlidir.



Şekil 4.20. Hyundai batarya farklı sıcaklık deşarj deneyi $R_{İÇ}$/°C değişimi

4.1.4. Vision marka batarya sabit 4,4A şarj/deşarj deneyi karşılaştırması

Tez çalışmasında bu bölümde Vision marka 6FM80 (20HR) 12V gerilime ve 80Ah kapasiteye sahip kurşun-asit bataryanın sabit 4,4A şarj/deşarj deney karşılaştırılması yapılmaktadır. Bu deneyin amacı aynı sabit şarj/deşarj akım değerinde bataryanın dinamik iç direncindeki değişimi gözlemlemektir. Bataryayı şarj etme yöntemi bir önceki şarj deneyindeki gibi Şekil 4.5'te verilen sıralama ile gerçekleştirilmiştir. Batarya sabit şarj deneyi toplam olarak 1050dk sürmüştür. Bu zaman esnasında 15dk periyotlar halinde devre açılarak yani S anahtarı 0 yapılarak bataryanın toparlanma (recovery) süresi kadar (bu süre 20sn) beklenerek o andaki bataryanın açık devre gerilimi ölçülmektedir. Bu işlem sırası batarya tamamen şarj olana kadar devam etmektedir. Batarya sabit şarj etme deneyinde Turnigy marka Accucell 6 model

batarya şarj cihazı kullanılmıştır. Cihaz sabit akım vermek için 4,4A'e ayarlanmaktadır. Batarya şarj cihazı sürekli sabit 4,4A verecek şekilde çıkış gerilim ve akımını ayarlamaktadır. Deney test düzeneği Şekil 4.21'de verilen fotoğraftaki gibi gerçekleştirilmiştir.

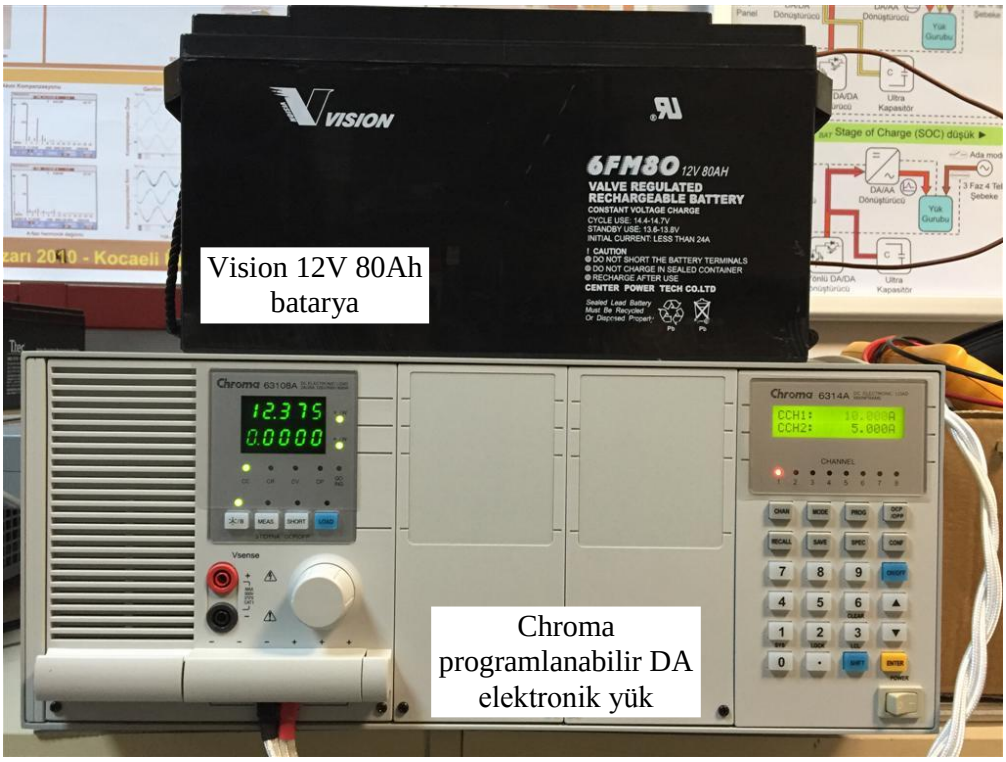


Şekil 4.21. Vision marka kurşun-asit batarya sabit 4,4A şarj deney fotoğrafı

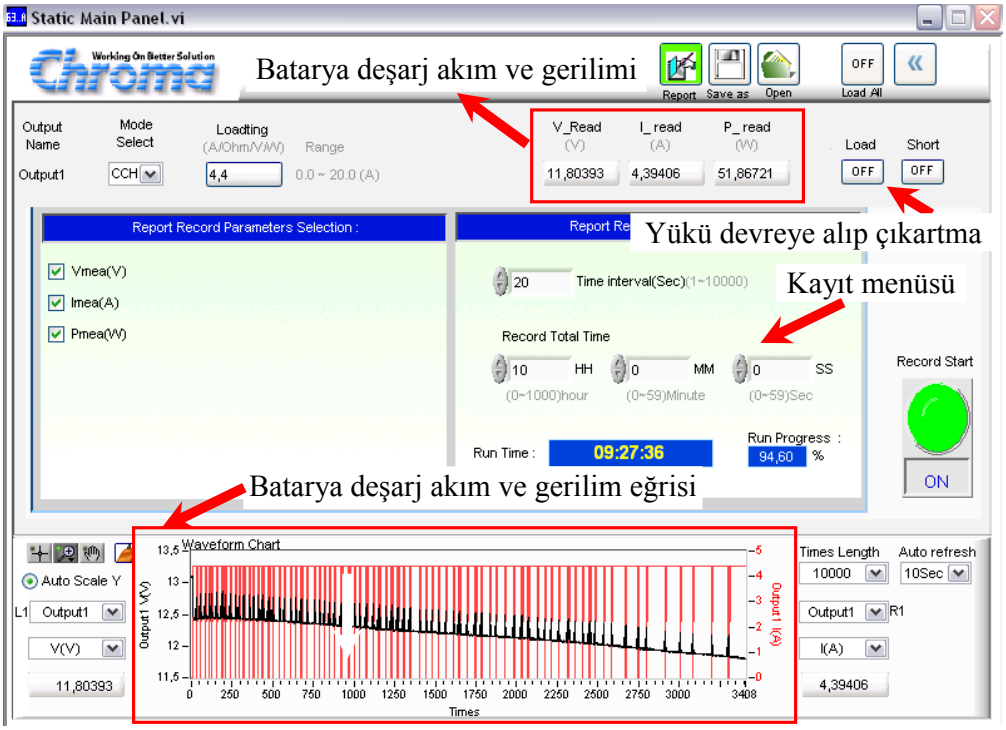
Aynı Vision marka kurşun-asit batarya sabit 4,4A değerinde deşarj deneyi Şekil 4.22'de verilen fotoğraftaki gibi gerçekleştirilmiştir. Batarya bu deşarj deneyinde sürekli olarak 0,055C oranında deşarj edilmektedir. Bataryayı deşarj etme yöntemi Şekil 4.6'da verilen sıralama ile gerçekleştirilmiştir. Bu sabit 4,4A deşarj akımı deneyinde programlanabilir DA elektronik yük ünitesi olarak Chroma marka 6410A ana kontrol ünitesi ve yardımcı 63108A yük modülü kullanılmaktadır. Şekil 4.23'te Chroma DA programlanabilir yük ünitesinin bilgisayar ara yüzü verilmektedir. Programlanabilir DA elektronik yük ünitesi sayesinde istenilen sabit deşarj akım değerinde sürekli olarak bataryadan çekilebilmektedir. 63108A DA elektronik yük modülünün teknik özellikleri Tablo 4.2'de verilmektedir.

Tablo 4.2. 63108A yük modülünün teknik özellikleri [39]

Parametreler	**Chroma 63108A yardımcı yük modül**	
Güç	60 W	600 W
Akım	0-2 A	0-20 A
Gerilim	0-500 V	
Sabit Akım Modu		
Akım Aralığı	0-2 A	0-20 A
Çözünürlük	0,5 mA	5 mA
Sabit Direnç Modu		
Direnç Aralığı	25 Ω – 100 kΩ	
Çözünürlük	10 µS	
Sabit Gerilim Modu		
Gerilim Aralığı	0-500 V	
Çözünürlük	125 mV	
Sabit Güç Modu		
Güç Aralığı	0-60 W	0-600 W
Çözünürlük	15 mW	150 mW

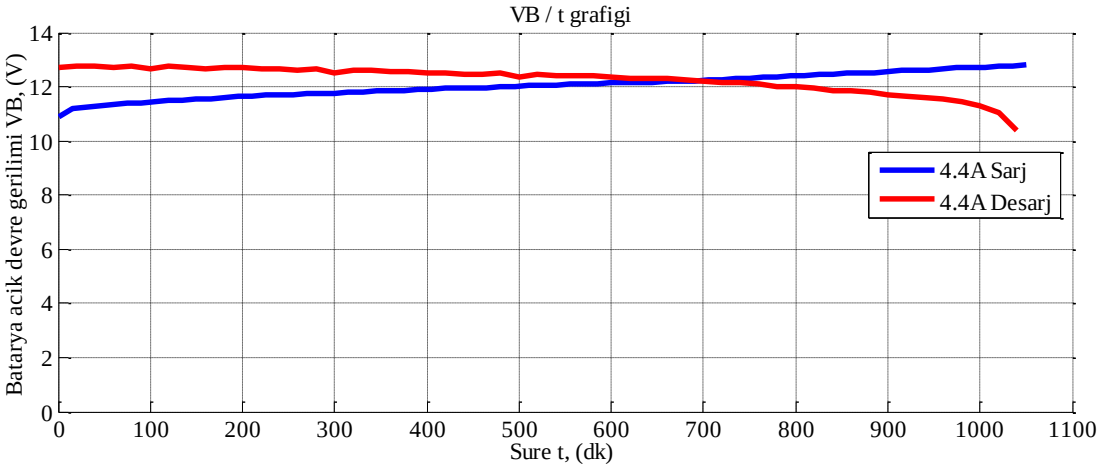


Şekil 4.22. Vision marka kurşun-asit batarya sabit 4,4A deşarj deney fotoğrafı



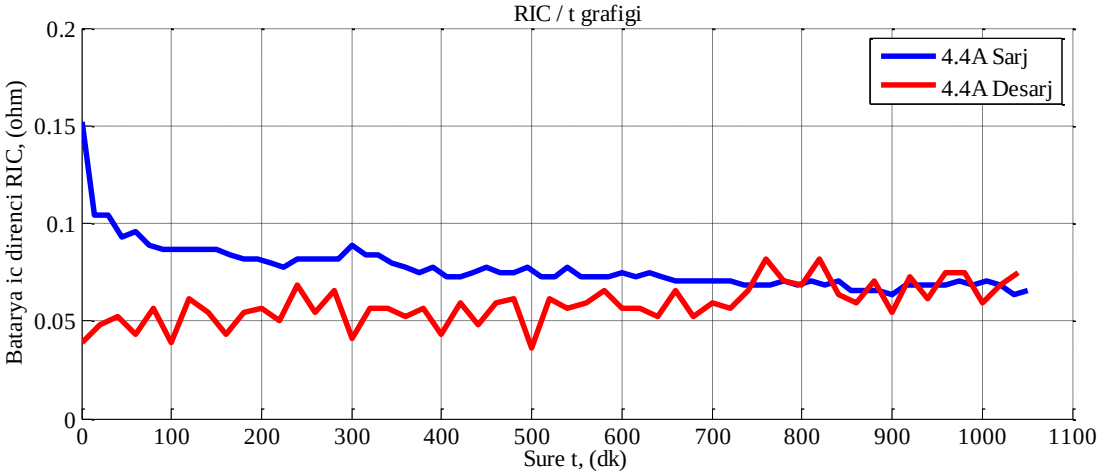
Şekil 4.23. Vision sabit 4,4A deşarj deneyi Chroma arayüz ekranı

Programlanabilir DA elektronik yük modül ara yüzü ile bataryadan yük grubu 20dk periyotlar ile devreye alınıp devreden çıkartılmıştır. Bataryanın toparlanma (recovery) süresi deşarj deneyi kısa sürdüğünden 20sn'ye program arayüzü ile ayarlanmaktadır. Batarya şarj cihazının Vision marka bataryaya maksimum 4,4A değerinde akım ile şarj etmesinden dolayı her iki işlemde akım değeri 4,4A'de yapılmaktadır. Şekil 4.24'te bataryanın sabit 4,4A şarj ve deşarj değerinde alınan sonuçların V_B zaman ilişkisi karşılaştırılması verilmektedir. 4,4A akım değerinde batarya şarj süresi 1050dk (17,5 saat) sürerken aynı sabit akım değerinde deşarj süresi 1040dk (18,2 saat) sürmektedir. 4,4A akım değerinde bataryanın şarj deşarj arasındaki süre farkı bataryanın bu akım değeri için verimini temsil etmektedir. Batarya şarj deneyinde ilk olarak boş durumdadır ve açık devre gerilimi 10,9V civarındadır. Batarya şarj oldukça terminal uçlarındaki gerilim artarak 12,81V olmaktadır. Batarya kapasitesi 80Ah olduğundan dolayı şarj etme işlemi daha uzun vakit almaktadır. Batarya deşarj deneyinde ilk olarak tam dolu durumdadır ve açık devre gerilimi 13,09V civarındadır. Batarya deşarj oldukça terminal uçlarındaki gerilim azalarak 10,44V'a düşmekte ve programlanabilir DA elektronik yük modül bataryadan ayrılmaktadır.



Şekil 4.24. Vision batarya sabit 4,4A şarj/deşarj deneyi V_B/t değişimi

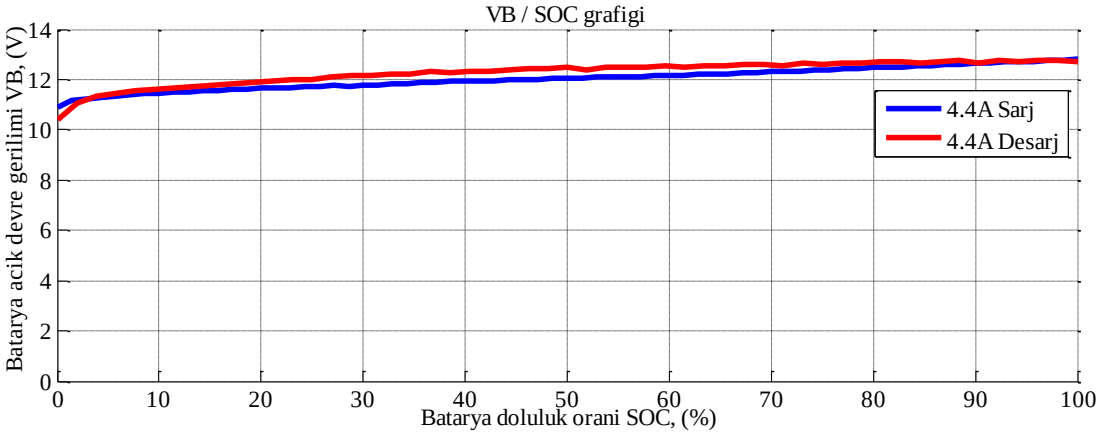
Şekil 4.25'te Vision marka bataryanın sabit 4,4A şarj/deşarj deneyi için dinamik iç direnç değişimi verilmektedir. Batarya 4,4A'de şarj durumunda iken başlangıçta dinamik iç direnci 0,152Ω'dan başlamakta batarya doluluk oranı arttıkça zamanla azalarak 0,065Ω'a düşmektedir. 4,4A deşarj deneyinde ise batarya dinamik iç direnci 0,038Ω'dan başlamakta ve batarya deşarj olduğu süre içinde zamanla artarak 0,075Ω'a kadar artmaktadır. Bunun sonucu olarak aynı sabit akım değerinde batarya deşarj olurken şarj durumuna göre daha hızlı ve yüksek değerde dinamik iç direnci değişim göstermektedir. Batarya deşarj deneyinde, batarya kapasitesi yüksek olduğundan ve çekilen deşarj akımı düşük olduğundan bataryanın dinamik iç direncinde fazla bir değişim gözlenmemektedir.



Şekil 4.25. Vision batarya sabit 4,4A şarj/deşarj deneyi $R_{İÇ}$/t değişimi

Şekil 4.26'da sabit 4,4A şarj/deşarj durumu için bataryanın açık devre geriliminin batarya doluluk durumuna göre değişimi verilmektedir. Batarya şarj deneyinde

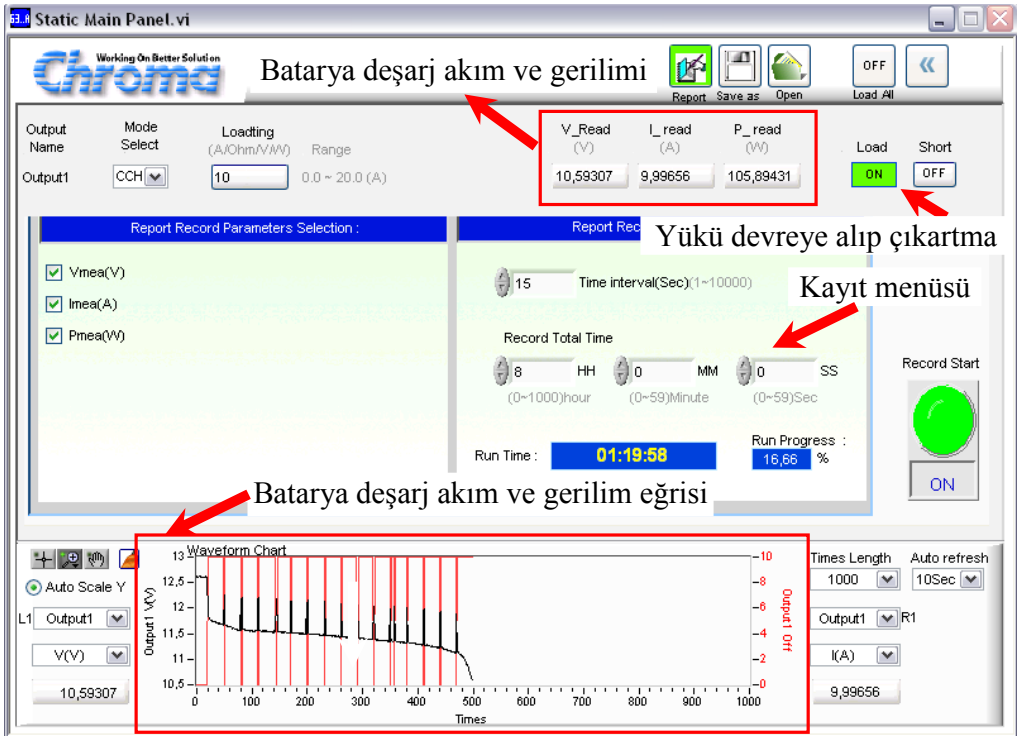
bataryanın açık devre gerilimi şarj oldukça artmakta ve bu gerilim değeri batarya doluluk durumu ile ilişkilidir. Batarya terminal uçlarındaki gerilim başlangıçta 10,9V'tur ve şarj işlemi tamamlandığında yani batarya doluluk durumu %100 olduğunda batarya gerilimi 12,81V olarak ölçülmektedir. Batarya deşarj deneyinde batarya doluluk durumu %100 olduğunda batarya gerilimi 13,09V'tur ve deşarj oldukça batarya terminal uçlarındaki gerilim 10,38V'a kadar düşmektedir. Batarya sabit 4,4A deşarj deneyinde çekilen akım değeri düşük seviyelerde olduğundan batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi stabil olarak azalmaktadır.



Şekil 4.26. Vision batarya sabit 4,4A şarj/deşarj deneyi V_B/SOC değişimi

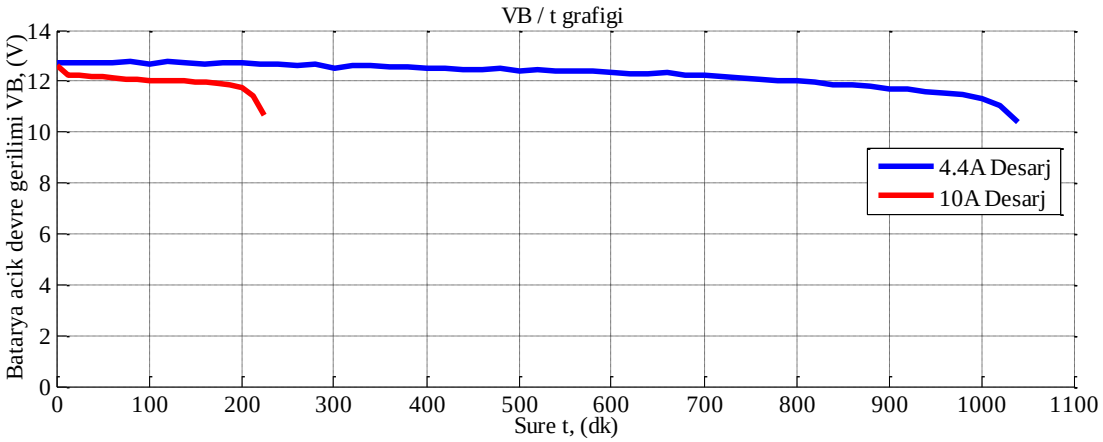
4.1.5. Vision marka batarya sabit 4,4A ve 10A deşarj deneyi

Bu deney çalışmasında batarya sabit 4,4A ve 10A deşarj durumunda iken gerilim ve dinamik iç direnç karşılaştırılması gözlenmektedir. Sabit 10A deşarj akımı deneyinde programlanabilir DA elektronik yük ünitesi kullanılmaktadır. Şekil 4.27'de programlanabilir DA elektronik yük modülünün sabit 10A deşarj deney çalışması sırasında alınan arayüz ekranı verilmektedir. Deney çalışması toplam 225dk sürmüştür ve 12dk aralıklarla ölçüm alınmaktadır. Bu süre içinde bataryadan 50Ah kapasitede enerji alınmaktadır. Batarya deşarj oranı 0,125C olduğundan ve sürekli olarak sabit 10A deşarj akımı çekildiğinden toplam kapasite verimi düşmektedir. Batarya toplam kapasitesi 80Ah'tir fakat deşarj akım değeri sürekli ve yüksek olduğundan toplamda bataryadan 37,5Ah enerji alınmakta 42,5Ah kayıp söz konusudur.



Şekil 4.27. Vision batarya sabit 10A deşarj akım deneyi Chroma arayüz ekranı

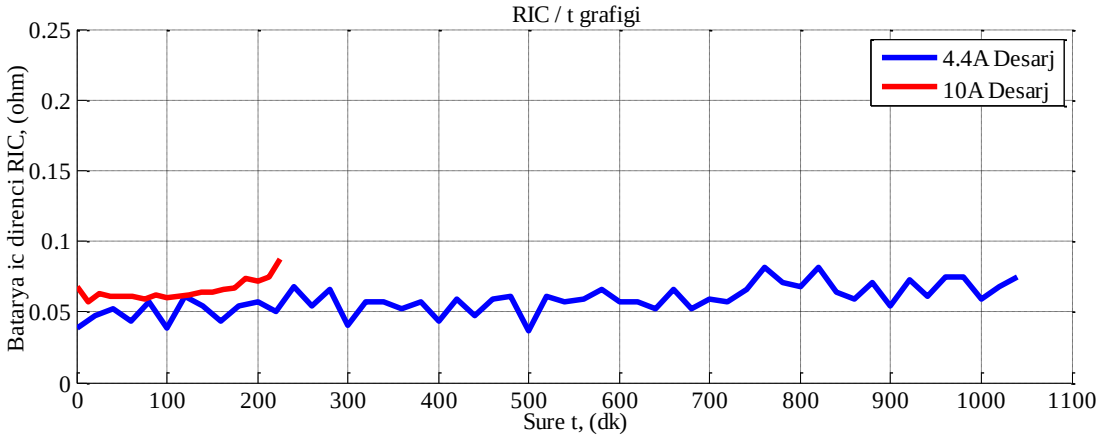
Şekil 4.28'de bataryanın 4,4A ve 10A deşarj deneyinde alınan batarya terminal uçlarındaki değişim grafiği verilmektedir. Batarya 4,4A ile deşarj olduğunda toplamda 1040dk 10A ile deşarj edildiğinde toplamda 225dk sürmektedir. Batarya akım miktarına göre oranlandığında 10A deşarj süresi 480dk sürmesi beklenmektedir. Fakat batarya ne kadar yüksek akımla deşarj edilirse kapasitesi o kadar azalmaktadır. Bu yüzden bu deşarj süresi 255dk daha kısa sürmektedir.



Şekil 4.28. Vision batarya sabit 4,4A ve 10A deşarj deneyi V_B/t değişimi

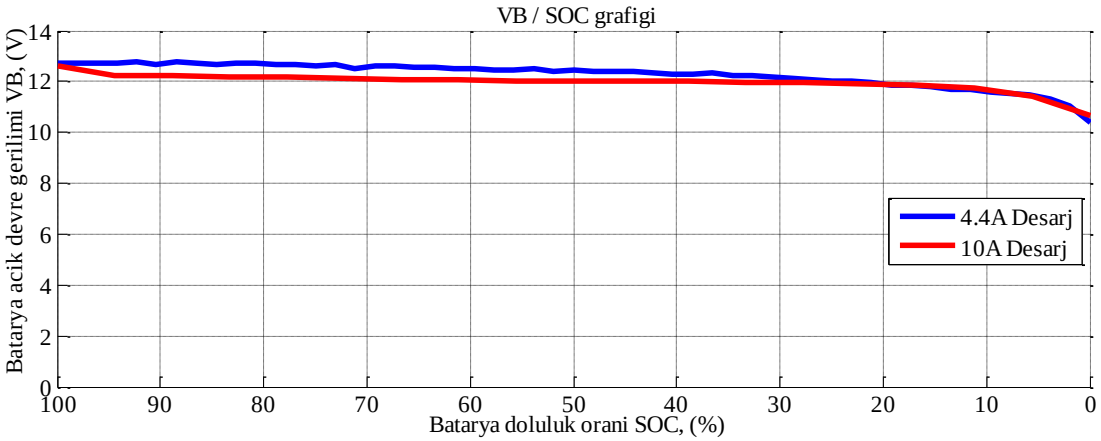
Şekil 4.29'da batarya sabit 4,4A ve sabit 10A deşarj deney sonuçları ile hesaplanan bataryanın dinamik iç direnç değişimi verilmektedir. Batarya sabit 4,4A deşarj

deneyine ilk başlangıcında 0,038Ω, sabit 10A deşarj deneyine ilk başlangıçta ise 0,068Ω olarak hesaplanmaktadır ve başlangıçta her iki durumda da dinamik iç dirençleri yaklaşık olarak eşittir. Batarya sabit 10A deşarj deneyinde bataryanın tamamen deşarj olduğundaki dinamik iç direnç değeri 0,087Ω olarak hesaplanmaktadır ve toplam 225dk sürmektedir. Fakat batarya sabit 4,4A deşarj deneyinde bu direnç değeri düşük deşarj akımı olduğundan çok küçük bir değişim göstermektedir. Bunun sebebi de yüksek deşarj akımlarında bataryanın terminal uçlarındaki gerilim değerinin çok hızlı bir şekilde düşmesidir.



Şekil 4.29. Vision batarya sabit 4,4A ve 10A deşarj deneyi $R_{İÇ}$/t değişimi

Şekil 4.30'da batarya sabit 4,4A ve sabit 10A deşarj deney sonuçlarında alınan batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimlerinin batarya doluluk durumuna göre değişimi verilmektedir. Bataryanın sabit deşarj akımlarında terminal uçlarındaki geriliminin batarya doluluk durumuna göre değişiminin aynı olduğu gözlenmiştir. Yani batarya deşarj kesme geriliminin sabit deşarj akım koşulları altında doluluk durumuna oranı aynıdır. Bu farklı sabit deşarj akım değerlerindeki deney sonucunda Vision marka kurşun-asit batarya için kesme gerilimi olan 10,5V değeri iki test sonucu için de sabit 4,4A ve 10A'de %5 değerindedir.



Şekil 4.30. Vision batarya sabit 4,4A ve 10A deşarj deneyi V_B/SOC değişimi

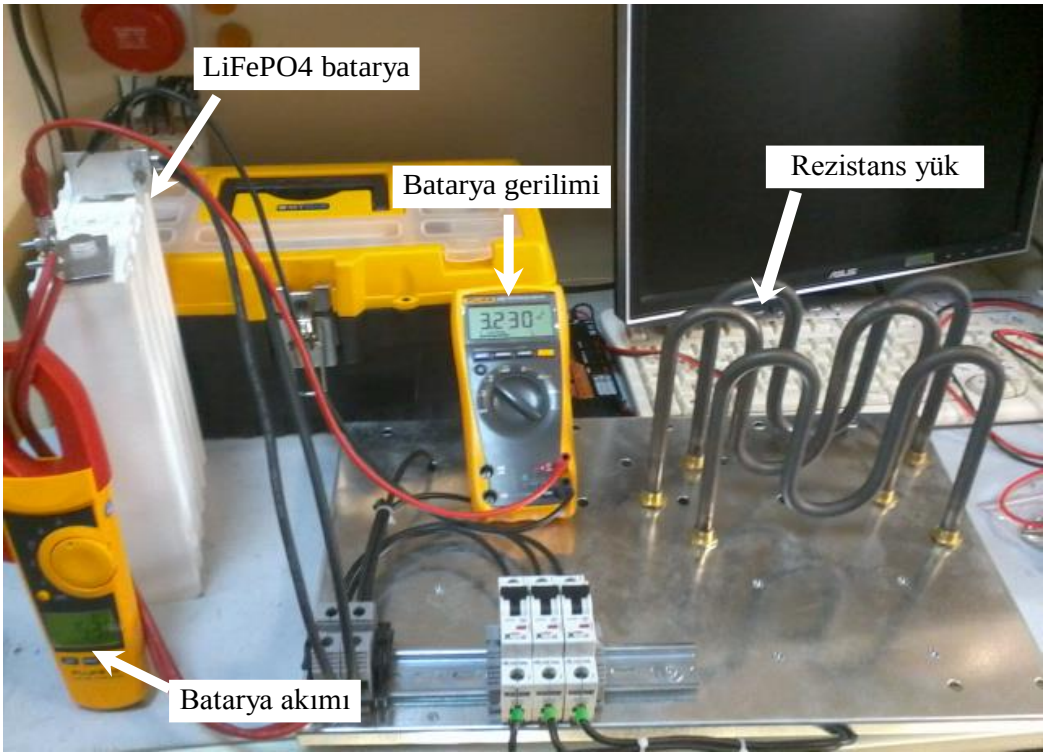
4.1.6. Hipower batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deneyi karşılaştırması

Bu bölümde HP-PW100AH 3,2V gerilime ve 100Ah kapasiteye sahip lityum demir fosfat batarya 15,6A, 32,5A ve 49,1A deşarj değerleri için karşılaştırılması verilmektedir. $LiFePO_4$ batarya lityum-iyon batarya çeşitlerinden biridir. Fakat $LiFePO_4$ batarya tipi diğer türlerine göre batarya terminal gerilimi düşüktür ve nominal çalışma gerilimi 3,2V'tur. Bu tip bataryalar gerilim seviyesi düşük olduğundan genellikle birbirleri ile seri bağlanarak kullanılmaktadır. Bataryayı deşarj etme yöntemi bir önceki deneylerde olduğu gibi Şekil 4.6'da verilen sıralama ile gerçekleştirilmiştir. Bu deşarj deneyleri sabit yük kullanılarak 20A, 40A ve 60A başlangıç deşarj akım değeri olacak şekilde sırasıyla rezistans telleri 0,16Ω, 0,08Ω, ve 0,05Ω'a ayarlanıp gerçekleştirilmiştir. Batarya deşarj işlemleri toplamda sırasıyla 15,6A için 27dk, 32,5A için 21dk ve 49,1A için 12dk sürmekte ve 3dk periyotlar halinde devre açılıp bataryanın toparlanma (recovery) süresi kadar (bu süre 20 sn) beklenerek o andaki bataryanın açık devre gerilimi ölçülmektedir. Tablo 4.3'te Hipower deşarj deney akımları, süreleri ve ölçüm periyotları verilmektedir.

Tablo 4.3. Hipower deşarj deney akım ve süre değerleri

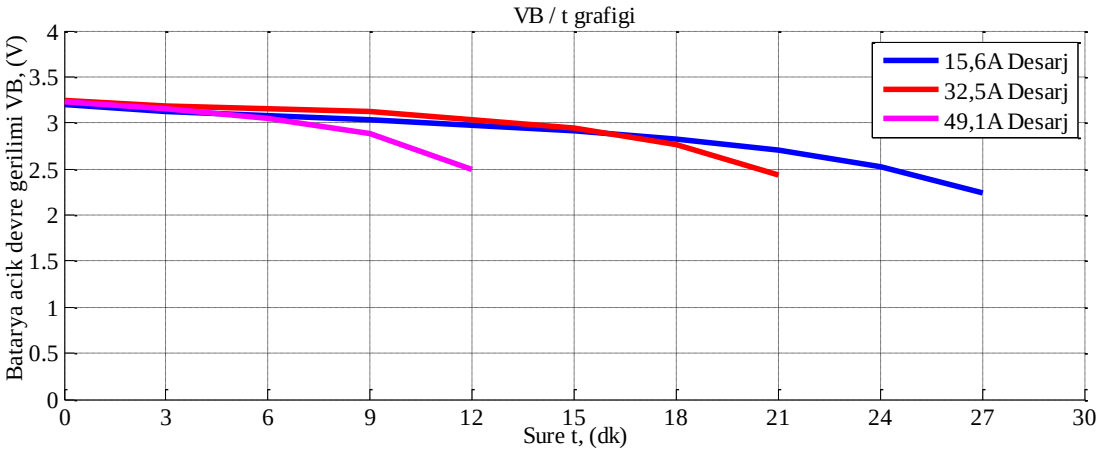
Hipower deşarj deneyi		
Deşarj akımı	Deney süresi	Ölçüm periyodu
15,6 A	27 dk	3 dk
32,5 A	21 dk	3 dk
49,1 A	12 dk	3 dk

Bu işlem sırası batarya tamamen deşarj olana kadar devam etmektedir. Deney test düzeneği Şekil 4.31'de verilen fotoğraftaki gibi gerçekleştirilmiştir.



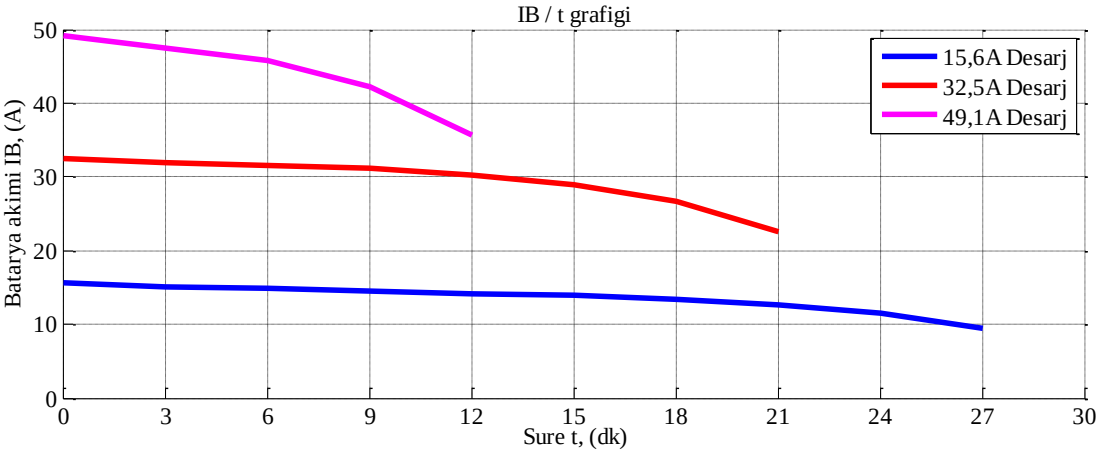
Şekil 4.31. $LiFePO_4$ batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deney fotoğrafı

Şekil 4.32'de bataryanın 15,6A, 32,5A ve 49,1A deşarj deneyinde alınan batarya terminal uçlarındaki değişim grafiği verilmektedir. Batarya ilk olarak tam dolu durumdadır ve açık devre gerilimi 3,24V civarındadır. Batarya deşarj oldukça terminal uçlarındaki gerilim azalarak 2,24V, 2,43V ve 2,50V olmaktadır. $LiFePO_4$ bataryanın katalog deşarj kesme gerilimi 2,5V'tur. Batarya terminal uçlarındaki gerilim 2,5V olana kadar deşarj deney çalışmaları gerçekleştirilerek, bataryaya zarar vermeyecek şekilde deşarj edilmiştir.



Şekil 4.32. $LiFePO_4$ batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deneyi V_B/t değişimi

Şekil 4.33'te batarya deşarj deneylerinde ölçülen yükün çektiği batarya deşarj akımı verilmektedir. Batarya deşarj akımının başlangıç değeri 15,6A, 32,5A ve 49,1A'dir. Batarya deşarj akımı Şekil 4.71'deki batarya deşarj kesme gerilim değerine kadar gerilimle orantılı olarak stabil şekilde devam etmektedir. Bu batarya deşarj akım değeri arttıkça bataryanın deşarj olma süresi kısalmaktadır.



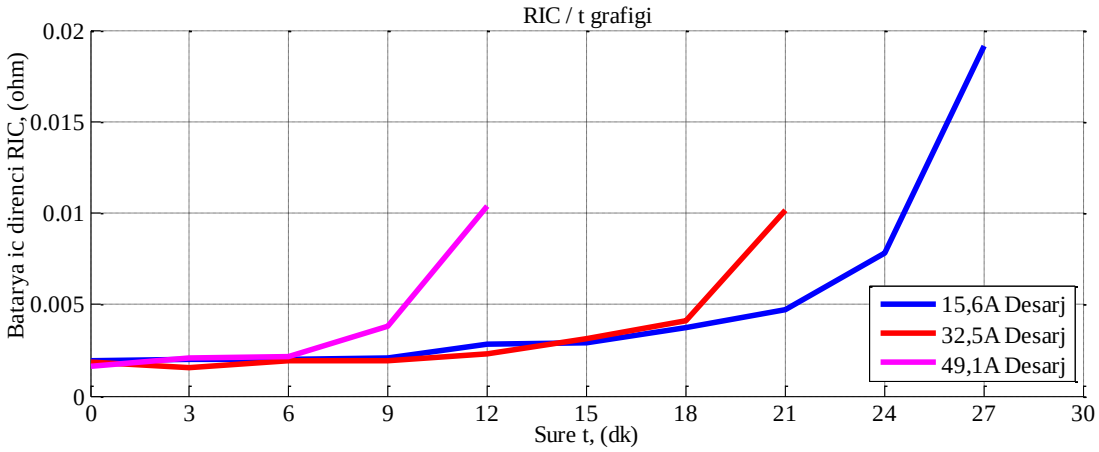
Şekil 4.33. $LiFePO_4$ batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deneyi I_B/t değişimi

Şekil 4.34'te batarya 15,6A, 32,5A ve 49,1A deşarj deney sonuçları ile hesaplanan bataryanın dinamik iç direnç değişimi verilmektedir. Batarya 15,6A deşarj deneyine ilk başlangıcında 0,0019Ω, 32,5A deşarj deneyine ilk başlangıçta 0,0018Ω ve 49,1A deşarj deneyine ilk başlangıçta ise 0,0016Ω olarak hesaplanmaktadır ve başlangıçta her üç durumda da dinamik iç dirençleri yaklaşık olarak eşittir. Tablo 4.4'te Hipower deşarj deney sonuçlarında hesaplanan dinamik iç direnç değerleri verilmektedir

Tablo 4.4. Hipower deşarj deneylerinde hesaplanan dinamik iç direnç değerleri

Deşarj akımı	Hesaplanan dinamik iç direnç
15,6 A	0,0019 Ω
32,5 A	0,0018 Ω
49,1 A	0,0016 Ω

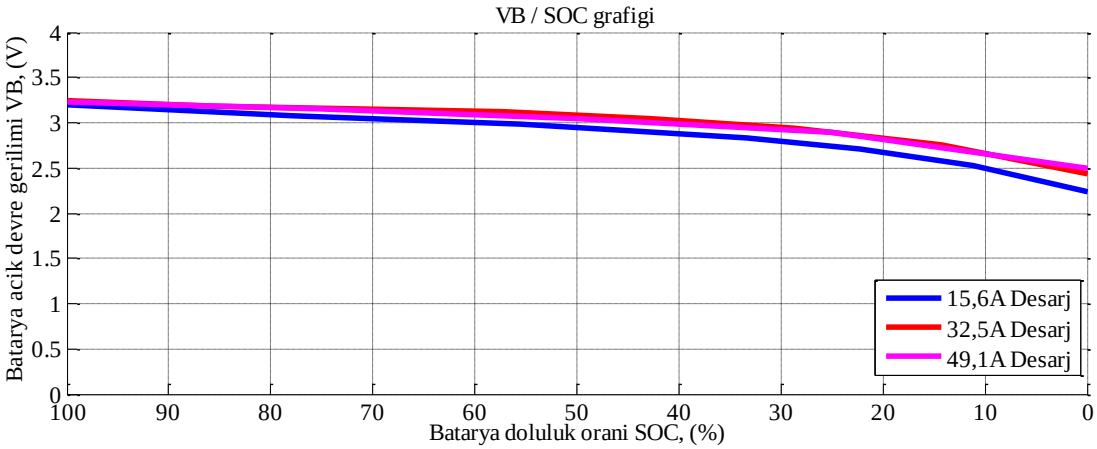
Batarya deşarj deneylerinde batarya dinamik iç direnç değerleri 15,6A deşarj için 21.dk'ya kadar, 32,5A deşarj için 18.dk'ya kadar ve son olarak 49,1A deşarj için 9.dk'ya kadar yaklaşık olarak eşit değerlerde devam etmektedir bu sürelerden sonra batarya dinamik iç direnci hızlı bir şekilde artmaktadır. Her üç deneyde de aynı dinamik iç direnç değerleri yüksek deşarj akımları çekilen testlerde daha kısa sürdüğü tespit edilmiştir. Bunun sebebi de yüksek deşarj akımlarında bataryanın terminal uçlarındaki gerilim değerinin çok hızlı bir şekilde düşmesidir.



Şekil 4.34. $LiFePO_4$ batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deneyi $R_{İÇ}/t$ değişimi

Şekil 4.35'te batarya 15,6A, 32,5A ve 49,1A deşarj deney sonuçlarında alınan batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimlerinin batarya doluluk durumuna göre değişimi verilmektedir. Batarya açık devre gerilimi V_B batarya doluluk duruma göre dağılımı Denklem (4.4)'teki formül ile hesaplanmaktadır. Bataryanın sabit yüklerde terminal uçlarındaki geriliminin batarya doluluk durumuna oranı aynı olduğu gözlenmiştir. Yani batarya deşarj kesme geriliminin sabit yük koşulları altında doluluk durumuna oranı aynıdır. Bu farklı deşarj akım değerlerindeki deney sonucunda $LiFePO_4$ batarya için kesme gerilimi olan 2,5V değeri üç test sonucu içinde aynı batarya doluluk oranında olduğu tespit edilmiştir. Batarya doluluk durumu %100 olduğunda batarya gerilimi 3,24V'tur ve deşarj oldukça batarya terminal uçlarındaki gerilim 15,6A'de 2,24V'a, 32,5A'de 2,43V'a ve 49,1A'de

2,50V'a kadar düşmektedir. Batarya katalog bilgilerinde de verildiği gibi bataryanın maksimum deşarj gerilimi 2,5V'tur. Batarya deşarj kesme gerilim seviyesine ulaşıldığında batarya gerilim değeri hızlı bir şekilde düşmektedir.



Şekil 4.35. $LiFePO_4$ batarya 15,6A-32,5A-49,1A deşarj deneyi V_B/SOC değişimi

4.1.7. Batarya deneysel çalışmaların özeti

Tez çalışmasında yapılan üç farklı batarya şarj ve deşarj deneysel çalışma sonuçlarının özeti bu bölümde verilmektedir. Her bir bataryanın gerilimi, Ah cinsinden toplam kapasitesi, şarj ve deşarj akımları, şarj ve deşarj C oranları, bataryaya verilen ve bataryadan alınan Ah cinsinden kapasite miktarları, şarj ve deşarj deney süreleri ve ölçüm periyot aralıkları Tablo 4.5'te ayrıntılı olarak verilmektedir.

Bu tablo ile bataryalara verilen ve bataryalardan çekilen akım değerleri, kapasite miktarları incelenebilmektedir. Tez çalışmasında batarya şarj ve deşarj deney sonuçlarında, batarya katalog bilgilerinde verilen standart şarj ve deşarj akımlarında üzerinde yazılan toplam kapasite miktarını tam olarak verebildiği gözlenmiştir. Fakat batarya deşarj akım miktarı arttığında, batarya üzerinde yazan toplam kapasite miktarından daha az miktarda bir kapasitede enerji vermektedir. Bir batarya aynı akımda şarj ve deşarj edildiğinde toplam şarj süresinin toplam deşarj süresinden uzun olduğu gözlenmiştir.

Peukart eğrisinin açıkladığı gibi batarya ne kadar yüksek akımla deşarj edilirse kapasitesi o kadar azalmaktadır. Bu yüzden akım arttığında deşarj testlerindeki süre kısalmaktadır.

Tablo 4.5. Batarya şarj ve deşarj deney sonuçlarının tablosu

Batarya tipi	Deney akımı (A)	Toplam kapasite (Ah)	Deney süresi (dk)	Ölçüm periyodu (dk)	C oranı (C)	Verilen/ Alınan kapasite (Ah)	Yük (Ω)
Hyundai							
Şarj	1	7,2	330	3	0,13	5,5	
Deşarj	1	7,2	294	3	0,13	4,9	12
	3	7,2	86	2	0,41	4,29	4
Vision							
Şarj	Sabit 4,4	80	1050	15	0,055	77	
Deşarj	Sabit 4,4	80	1040	20	0,055	76,12	<2,72
	Sabit 10	80	225	12,5	0,125	37,5	<1,2
$LiFePO_4$							
Deşarj	15,6	100	27	3	0,156	7,02	0,205
	32,5	100	21	3	0,325	11,375	0,098
	49,1	100	12	3	0,491	9,82	0,065

4.2. Ultrakapasitör Deneysel Çalışma ve Sonuçları

Tez çalışmasının bu bölümünde bir diğer enerji depolama birimi olan ultrakapasitörün modellemesine yönelik deneysel sonuçları verilmektedir. Ultrakapasitör şarj ve deşarj deneyleri bataryada olduğu gibi deneysel düzenek hazırlanarak test sonuçları kayıt altına alınmaktadır. Tez çalışması boyunca Maxwell marka BPAK0058 B01 modeli 15V 58F kapasite değerine sahip ultrakapasitör kullanılmıştır. Şekil 4.36'da kullanılan ultrakapasitörün fotoğrafı verilmektedir.



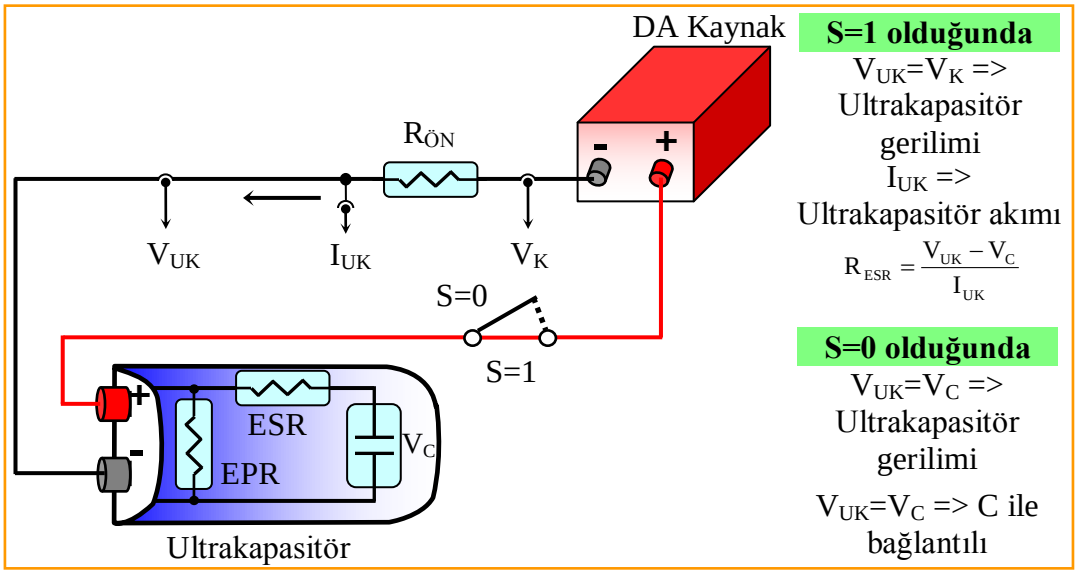
Şekil 4.36. Maxwell marka ultrakapasitör fotoğrafı

Tablo 4.6'da deneysel çalışmalarda kullanılan Maxwell marka ultrakapasitörün teknik özellikleri verilmektedir.

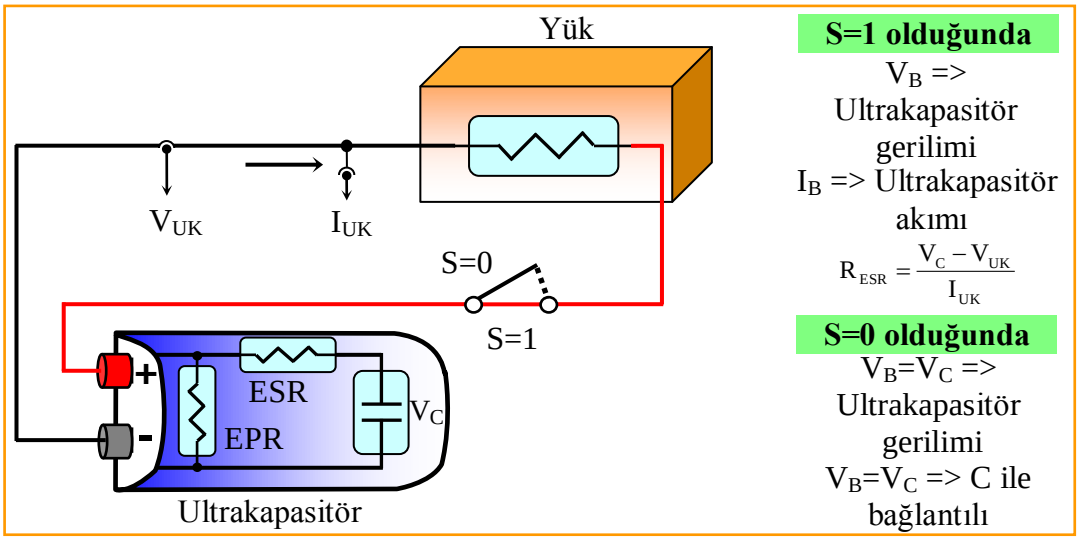
Tablo 4.6. Maxwell marka ultrakapasitörün teknik özellikleri [33]

Parametreler	**Ultrakapasitör BPAKK0058 B01 (15V)**
Nominal Kapasite	58 F
Kapasite Toleransı	±% 20
Gerilim	15 V
Maksimum İşletme Gerilimi	50 V
İzolasyon Gerilimi	1100 V
Direnç (ESR), DA	19 mΩ
Direnç Toleransı	±% 25
Isıl Direnç (Rth)	1,8 ºC/W
Çalışma Sıcaklığı	-40 ºC ~ 65 ºC
Güç (Pd)	3000 W/kg
Güç (Pmak)	11200 W/kg
Enerji (Emak)	3,63 Wh/kg
Sızıntı Akımı	1 mA
Kısa Devre Akımı (Isc)	1500 A
Maksimum Sürekli Akım	20 A
Maksimum Tepe Akım	80 A
Gerilim Dengeleme	Aktif
Ağırlık	560 g

Ultrakapasitörler yapısı itibariyle kondansatörler gibi davranmaktadır. Bu yüzden elektriksel açıdan bakıldığında devrede bulunduğu kaynaktan ilk anda çok yüksek akım çeker. Şekil 4.37'de ultrakapasitörün şarj testleri için yapılan deneyin elektriksel bağlantısı verilmektedir. Şekil 4.38'de ultrakapasitörün deşarj deneyi sırasında kullanılan elektriksel bağlantısı verilmektedir.



Şekil 4.37. Ultrakapasitör şarj deneyinin yapılışı ve ölçüm noktaları



Şekil 4.38. Ultrakapasitör deşarj deneyinin yapılışı ve ölçüm noktaları

Tez çalışması kapsamında ultrakapasitörlerin şarj sonuçlarını aldıktan sonra ultrakapasitör eşdeğer seri iç direncini hesaplamak için Denklem (4.5) kullanılmaktadır.

$$R_{ESRŞ} = \frac{V_{UK} - V_C}{I_{UK}} \tag{4.5}$$

Ultrakapasitör deşarj deneylerinde ise bataryada olduğu gibi ultrakapasitör yükten ayrıldığında terminal uçlarındaki gerilim değeri bir önceki değere göre yüksek

olmaktadır. Bu nedenle ultrakapasitör deşarj durumunda iken eşdeğer seri iç direncini hesaplamak için Denklem (4.6) kullanılmaktadır.

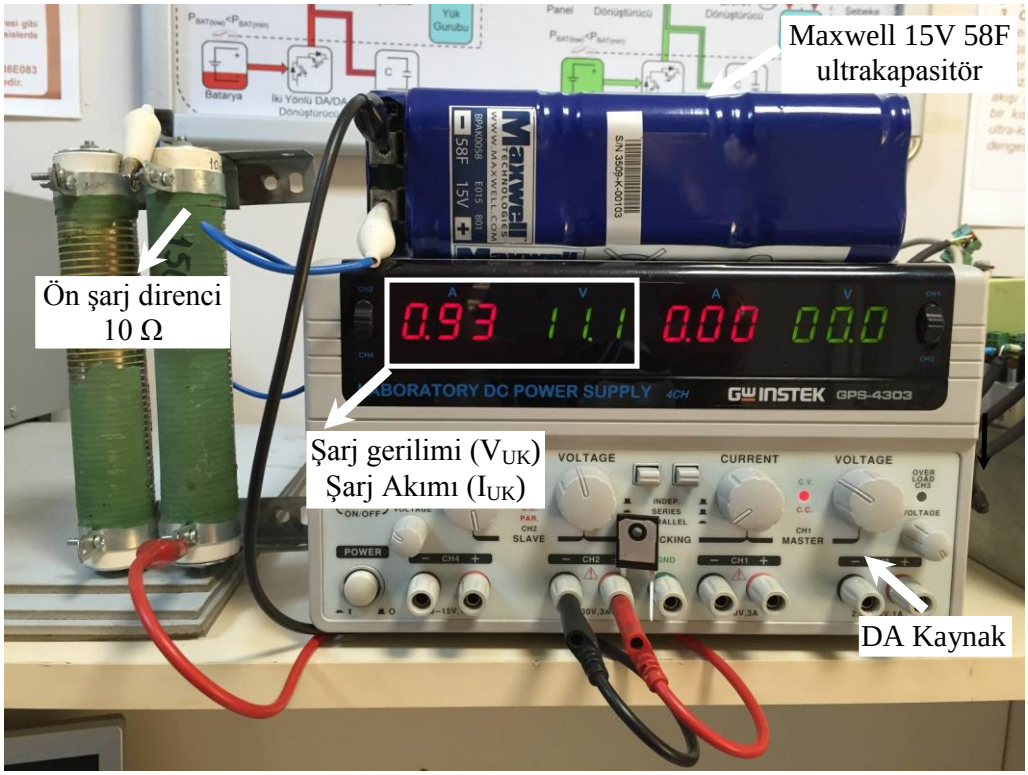
$$R_{ESRD} = \frac{V_C - V_{UK}}{I_{UK}} \tag{4.6}$$

Denklem (4.5) ve Denklem (4.6)'daki V_{UK} ultrakapasitörün terminal uçlarındaki gerilim, V_C ultrakapasitör ile seri bağlı olarak temsil edilen ultrakapasitörün kapasitesi ile bağlantılı olan ultrakapasitörün iç kaynak gerilimi, I_{UK} şarj ve deşarj sırasındaki ultrakapasitör akımı, $R_{ESRŞ}$ ultrakapasitörün şarj durumundaki eşdeğer seri iç direncini, R_{ESRD} ultrakapasitörün deşarj durumundaki eşdeğer seri iç direncini temsil etmektedir.

Ultrakapasitörler bataryalar gibi şarj ve deşarj işlemleri sırasında kaynak ve yükten ayrıldıklarında terminal uçlarındaki gerilim değeri şarj durumunda düşer, deşarj durumunda artar. Bataryalarda toparlanma (recovery) olarak adlandırılan bu olay ultrakapasitörler için de geçerlidir.

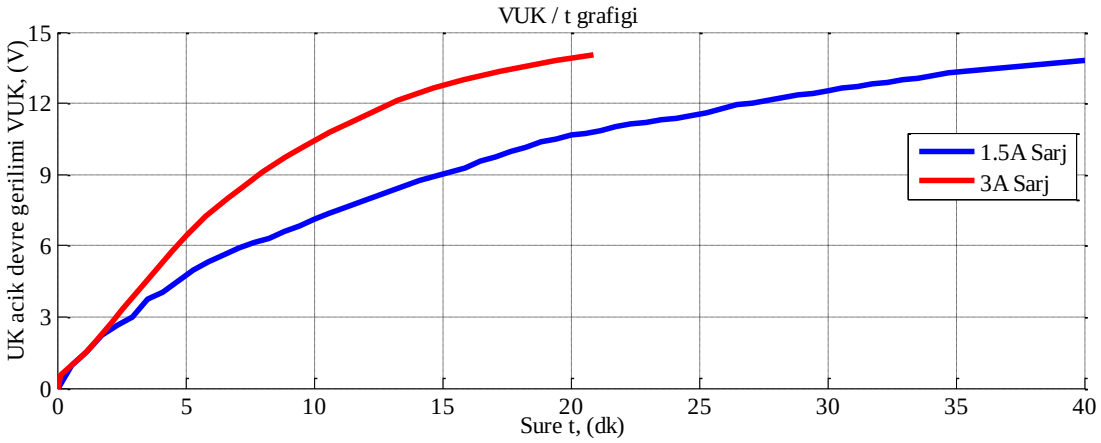
4.2.1. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A şarj deneyi

Tez çalışmasında ultrakapasitör ile ilk olarak sabit 15V sabit gerilim değerine sahip DA güç kaynağı kullanılarak 1,5A ve 3A şarj deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu gerilim değeri 15V olarak ayarlanmıştır. Bu değer ultrakapasitörün nominal çalışma gerilimidir. Ultrakapasitör şarj etme yöntemi Şekil 4.37'de verilen sıralama ile gerçekleştirilmiştir. Bu sıralamaya göre ilk olarak S anahtarı 1 olduğunda ultrakapasitörün şarj gerilimi ve ultrakapasitörün şarj akımı kayıt edilmiştir. Bu işlem sırası ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilim değeri 14V olana kadar devam etmektedir. Ultrakapasitör şarj deney test düzeneği Şekil 4.39'da verilen fotoğraftaki gibi gerçekleştirilmiştir.



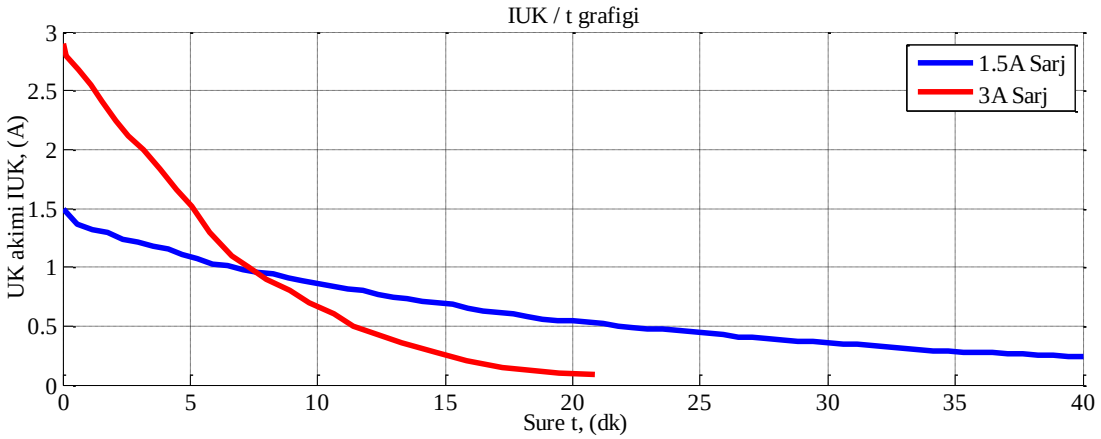
Şekil 4.39. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A şarj deney fotoğrafı

Şekil 4.40'da ultrakapasitör şarj deney sonucunun V_{UK} zaman ilişkisi verilmektedir. Ultrakapasitör 1,5A şarj deneyi toplam olarak 40dk 3A şarj deneyi ise toplam olarak 20,8dk sürmüştür. Bu zaman esnasında ultrakapasitör modelleme çalışmalarının daha doğru olması için ultrakapasitörün terminal uçlarındaki gerilim değeri her 0,5V değişim miktarında toparlanma (recovery) süresi kadar beklenmektedir. Bu süre bataryalara göre ultrakapasitörlerde çok kısa olmaktadır ve yaklaşık olarak 5sn toparlanma süresi kadar beklenerek o andaki ultrakapasitörün açık devre gerilimi ölçülmektedir. Bu ölçüm noktası S anahtarının 0 olduğu yani bataryanın DA kaynaktan ayrıldığı zamanda alınmaktadır. Bu anda $V_{UK}=V_C$ olmaktadır yani ultrakapasitör kapasite oranını gösteren gerilim değerindedir. Ultrakapasitör terminal gerilimi ilk olarak 0V'tur ve zamanla şarj oldukça ultrakapasitör gerilimi artarak 14V olmaktadır.



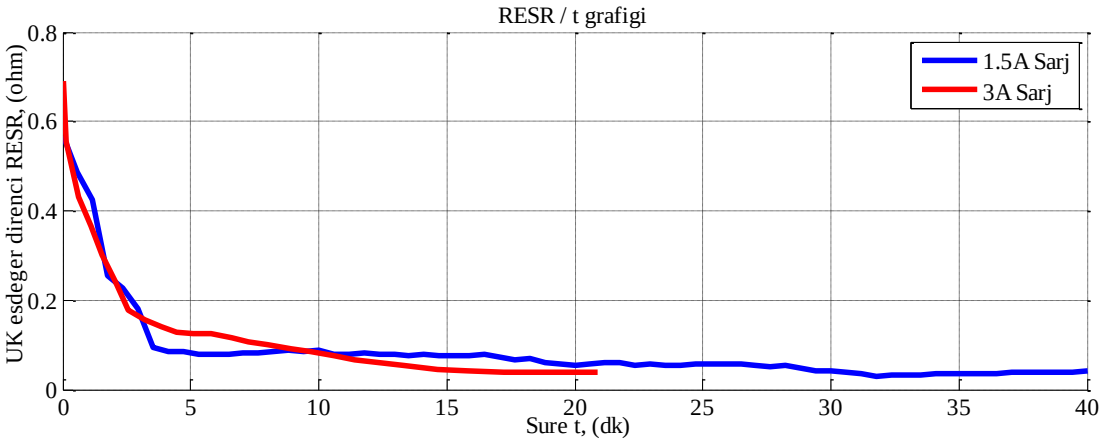
Şekil 4.40. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A şarj deneyi V_{UK}/t değişimi

Şekil 4.41'de ultrakapasitör şarj olurken çektiği şarj akımı verilmektedir. Ultrakapasitör DA kaynaktan çektiği akım değeri S anahtarının 1 olduğu durumda kayıt edilmektedir. Ultrakapasitörde depolanan kapasite miktarı boş durumda iken 1,5A ve 2,9A civarında başlangıç şarj akımı çekmekte zamanla azalarak sıfıra gelmektedir.



Şekil 4.41. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A şarj deneyi I_{UK}/t değişimi

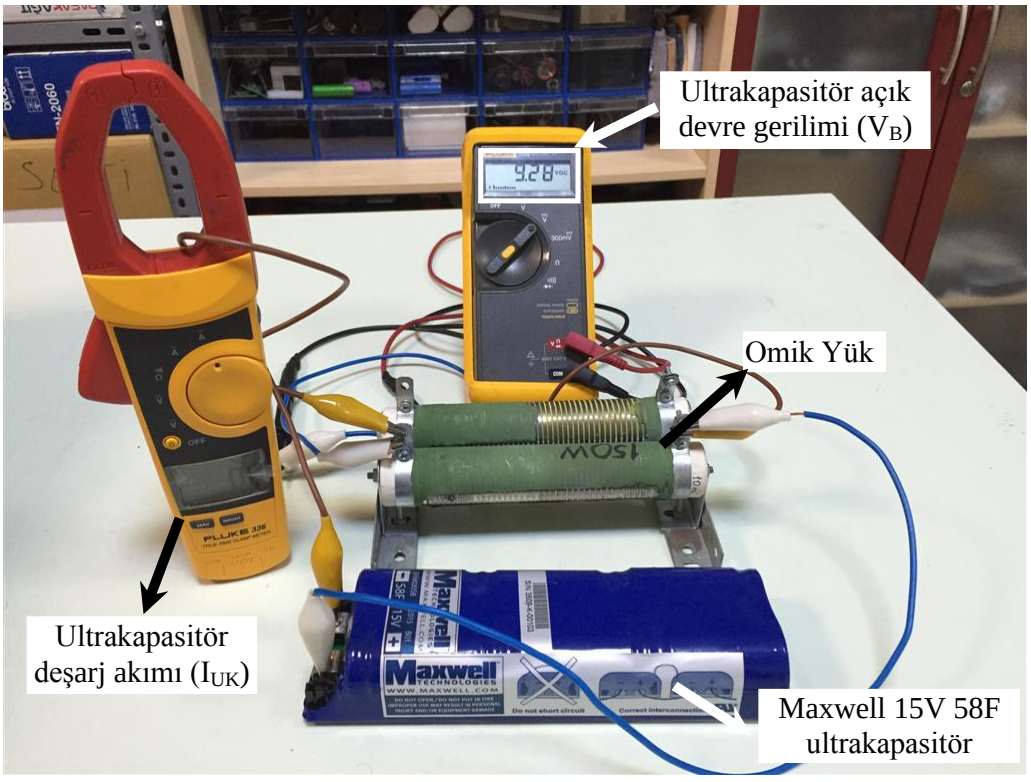
Şekil 4.42'de ultrakapasitör şarj durumunda iken eşdeğer seri iç direnç ESR'nin değişimi görülmektedir. Ultrakapasitör ESR iç direnci Denklem (4.5) formülü ile hesaplanarak grafiği çizdirilmektedir. Ultrakapasitörde depolanan kapasite miktarı düşük iken ultrakapasitörün ESR iç direnci 1,5A'de 0,566Ω, 3A'de 0,691Ω civarında hesaplanmaktadır. Ultrakapasitör kapasite miktarı yükseldikçe ESR iç direnci düşmekte ve 1,5A'de 0,041Ω, 3A'de 0,038Ω değerine kadar inmektedir.



Şekil 4.42. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A şarj deneyi R_{ESR}/t değişimi

4.2.2. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A deşarj deneyi

Bu deney çalışmasında, sırasıyla ultrakapasitör 1,5A ve 3A deşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ultrakapasitör deşarj deney test düzeneği Şekil 4.43'te verilen fotoğraftaki gibi gerçekleştirilmiştir.

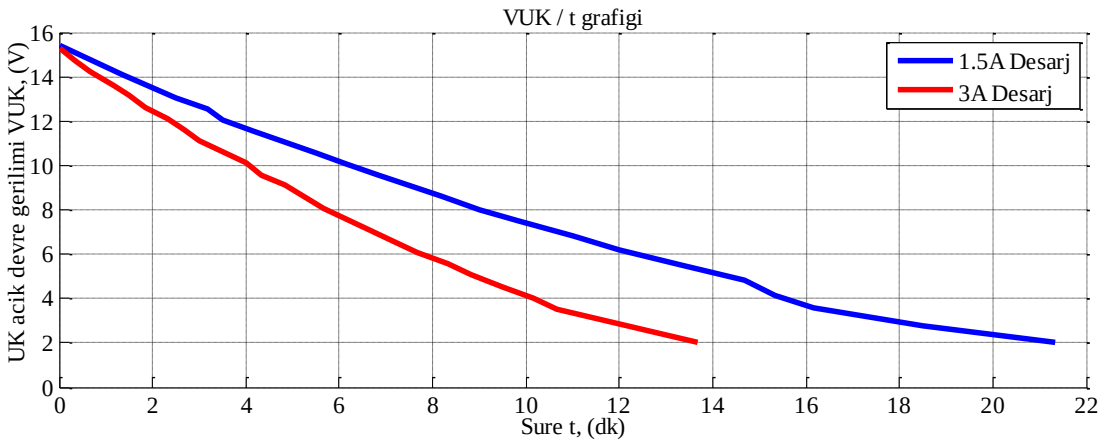


Şekil 4.43. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A deşarj deney fotoğrafı

Ultrakapasitör deşarj etme yöntemi Şekil 4.38'de verilen sıralama ile gerçekleştirilmiştir. Bu sıralamaya göre ilk olarak S anahtarı 1 olduğunda

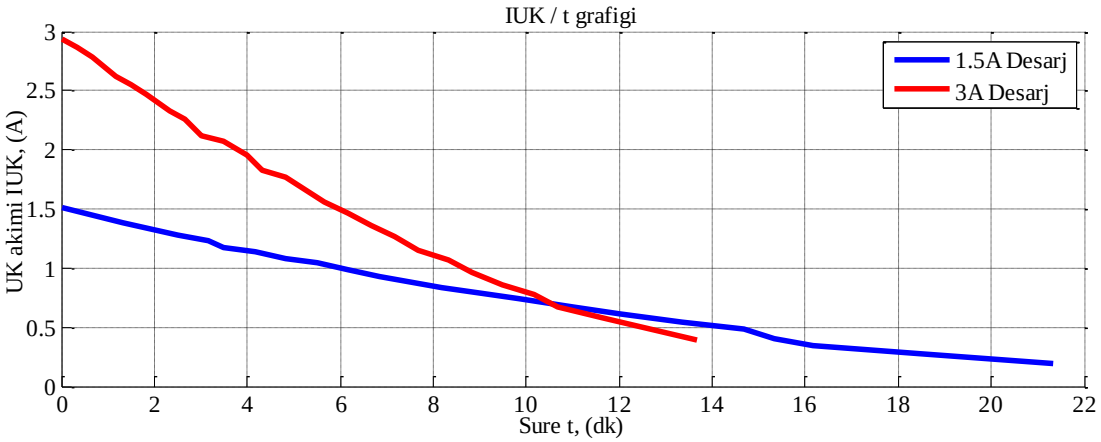
ultrakapasitörün deşarj gerilimi ve ultrakapasitörün deşarj akımı kayıt edilmiştir. Bu zaman esnasında ultrakapasitör modelleme çalışmalarının daha doğru olması için ultrakapasitörün terminal uçlarındaki gerilim değeri her 0,5V değişim miktarında toparlanma (recovery) süresi kadar beklenmektedir. Bu işlem sırası ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilim değeri 2V olana kadar devam etmektedir. Ultrakapasitör deşarj etme deneyinde sabit bir yük direnci kullanılmıştır.

Şekil 4.44'te ultrakapasitör deşarj deney sonuçlarının V_{UK} zaman ilişkisi verilmektedir. Deney çalışması toplam 1,5A'de 21,3dk, 3A'de 13,6dk sürmüştür ve 0,5V değişim aralıklarında ölçüm alınmaktadır. Ultrakapasitör terminal gerilimi ilk olarak 15,4V ve 15,27'tur ve zamanla deşarj oldukça ultrakapasitör gerilimi azalarak 2V olmaktadır.



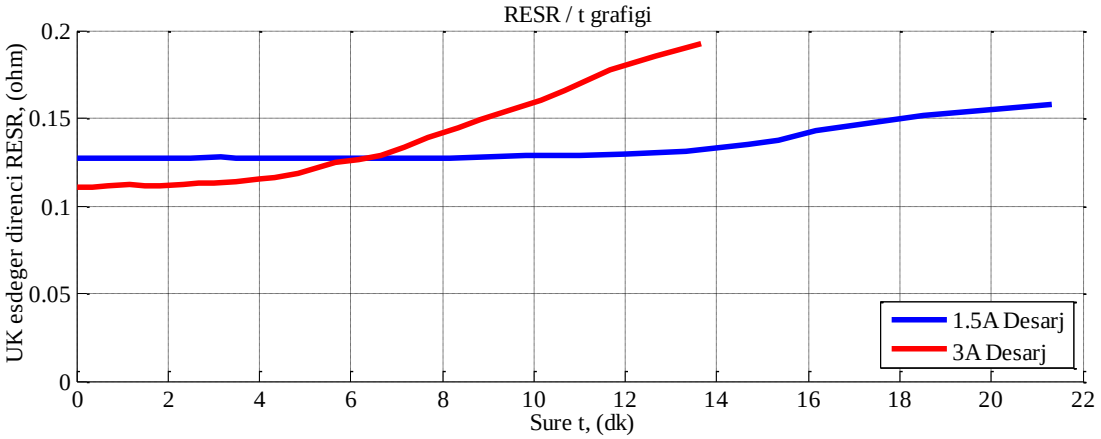
Şekil 4.44. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A deşarj deneyi V_{UK}/t değişimi

Şekil 4.45'te ultrakapasitör deşarj olurken yüke aktarılan deşarj akımı verilmektedir. Ultrakapasitörde depolanan kapasite miktarı tam dolu durumda iken 1,5A ve 3A civarında başlangıç deşarj akımı yüke aktarılmakta zamanla azalarak sıfıra gelmektedir.



Şekil 4.45. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A deşarj deneyi I_{UK}/t değişimi

Şekil 4.46'da ultrakapasitör deşarj durumunda iken eşdeğer seri iç direnç ESR'nin değişimi görülmektedir. Ultrakapasitör deşarj durumunda iken ESR iç direnci Denklem (4.6) formülü ile hesaplanarak grafiği çizdirilmektedir. Ultrakapasitörde depolanan kapasite miktarı yüksek iken ultrakapasitörün ESR iç direnci 1,5A'de 0,127Ω ve 3A'de 0,110Ω civarında hesaplanmaktadır. Ultrakapasitör kapasite miktarı düştükçe ESR iç direnci artmakta ve 1,5A'de 0,157Ω, 3A'de 0,192Ω değerine kadar inmektedir. Ultrakapasitör 3A deşarj akım değerindeki eşdeğer seri iç direnç ESR, 1,5A deşarj akım değerine göre daha hızlı bir şekilde yükseldiği görülmektedir.

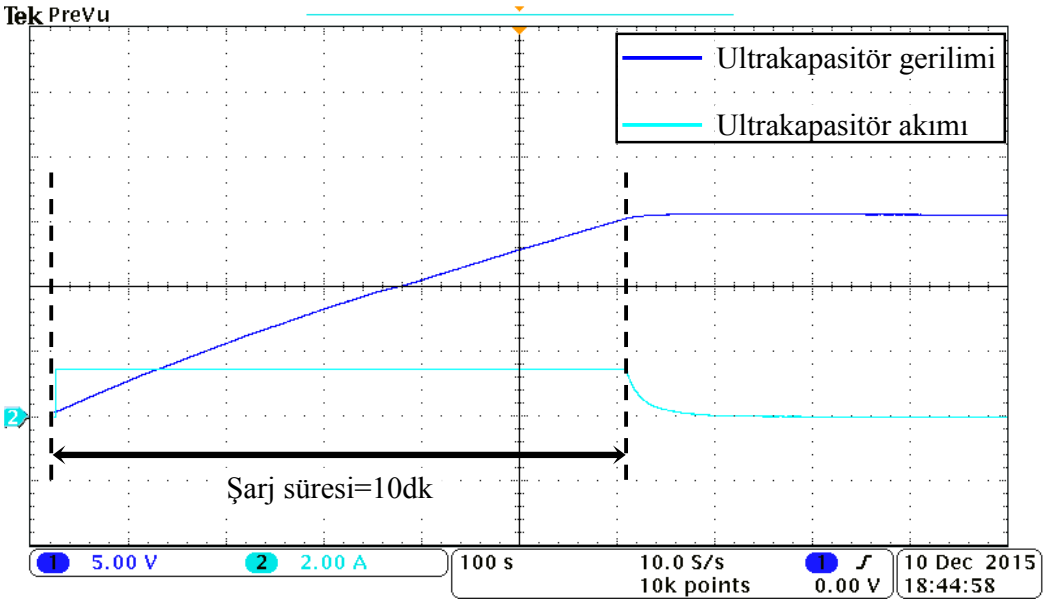


Şekil 4.46. Ultrakapasitör başlangıç 1,5A ve 3A deşarj deneyi R_{ESR}/t değişimi

4.2.3. Ultrakapasitör 1,5A, 3A, 4,5A ve 6A sabit akım şarj deneyi

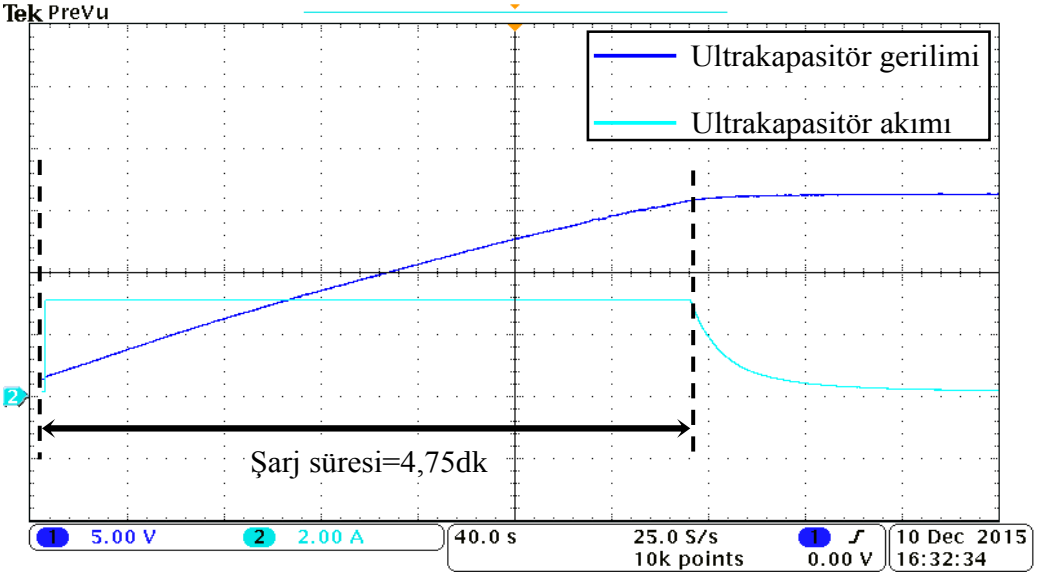
Bu bölümde ultrakapasitör dört farklı sabit akım değerinde şarj deneyi gerçekleştirilmektedir. Bu deneyde DA kaynak 15V gerilim değerine ve sırasıyla

1,5A, 3A, 4,5A ve 6A sabit akım verecek şekilde ayarlanarak ultrakapasitöre bağlantısı yapılmaktadır. Farklı akım değerlerindeki ultrakapasitör şarj deneyi ile ultrakapasitörün terminal uçlarındaki gerilim değişimi ve ultrakapasitörün kapasite miktar karşılaştırılması yapılmaktadır. Bu ultrakapasitör şarj deney sonuçları osilaskop ile kayıt edilerek ultrakapasitörün akım ve gerilim değişimi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Şekil 4.47'de 1,5A şarj akımı ile ultrakapasitör deneyinin osilaskop sonuç ekranı görülmektedir. Ultrakapasitör 1,5A şarj deneyinde ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilim değerinin 15V'a ulaşması yani tamamen dolu olması yaklaşık olarak 10dk sürmektedir. Bu süre sonrasında ultrakapasitör şarj akımının zamanla azalarak sıfıra gittiği görülmektedir.



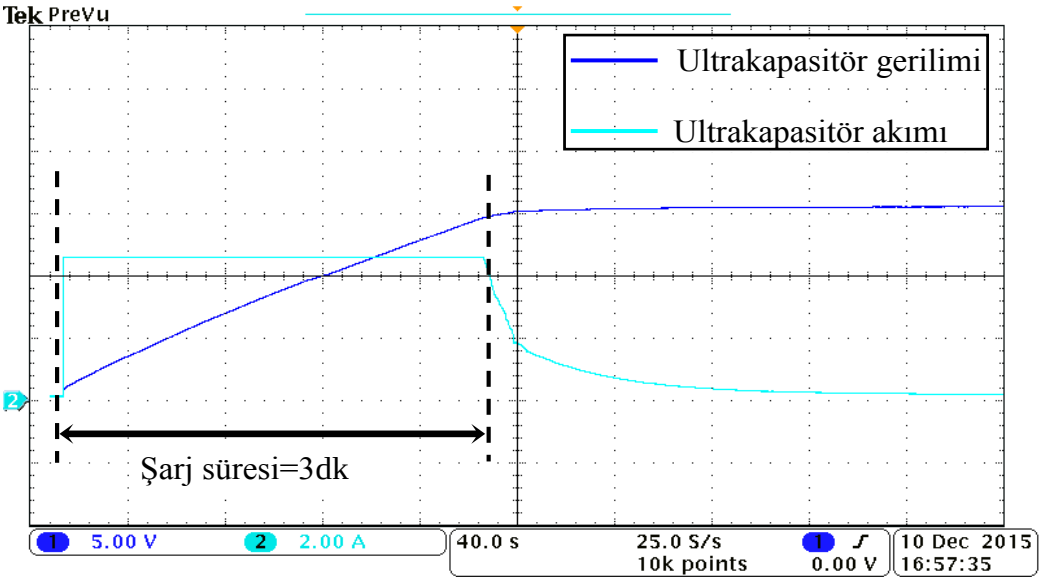
Şekil 4.47. Ultrakapasitör 1,5A şarj osilaskop ekranı

Şekil 4.48'de 3A şarj akımı ile ultrakapasitör deneyinin osilaskop sonuç ekranı görülmektedir. Ultrakapasitör 3A şarj deneyinde ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilim değerinin 15V'a ulaşması yaklaşık olarak 4,75dk sürmektedir. Şarj süresi bir önceki 1,5A şarj deneyine göre yarısı kadar sürdüğü gözlenmektedir. Bu süre sonrasında ultrakapasitör şarj akımının zamanla azalarak sıfıra gittiği görülmektedir.



Şekil 4.48. Ultrakapasitör 3A şarj osilaskop ekranı

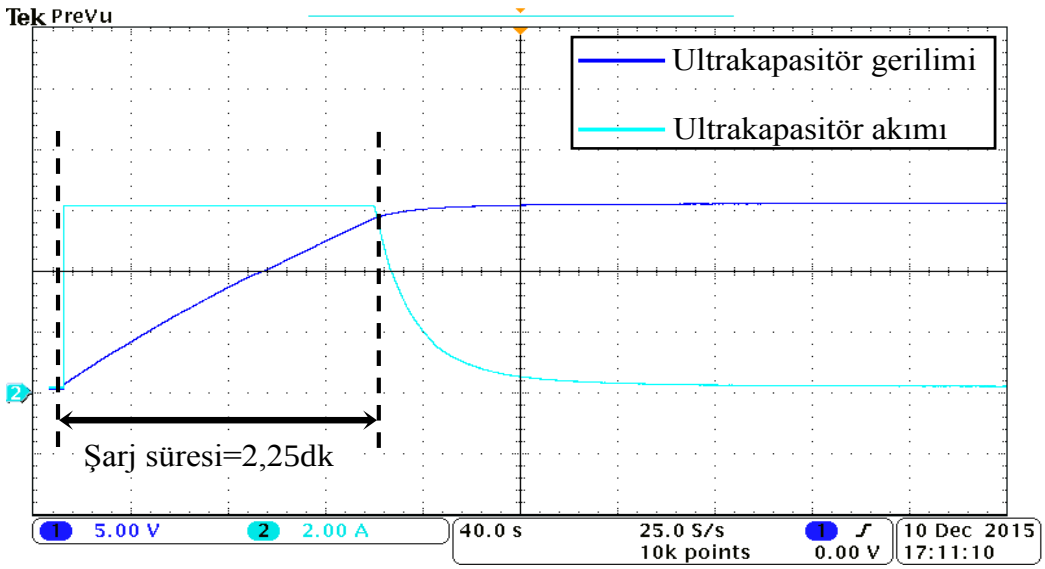
Şekil 4.49'da 4,5A şarj akımı ile ultrakapasitör deneyinin osilaskop sonuç ekranı görülmektedir. Ultrakapasitör 4,5A şarj deneyinde ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilim değerinin 15V'a ulaşması yaklaşık olarak 3dk sürmektedir. Şarj süresi bir önceki deneylere göre daha da kısaldığı gözlenmektedir. Bu süre sonrasında ultrakapasitör şarj akımının zamanla azalarak sıfıra gittiği görülmektedir.



Şekil 4.49. Ultrakapasitör 4,5A şarj osilaskop ekranı

Şekil 4.50'de 6A şarj akımı ile ultrakapasitör deneyinin osilaskop sonuç ekranı görülmektedir. Ultrakapasitör 6A şarj deneyinde ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilim değerinin 15V'a ulaşması yaklaşık olarak 2,25dk sürmektedir. Şarj süresi

1,5A şarj deneyine göre dörtte biri kadar sürdüğü gözlenmektedir. Bu süre sonrasında ultrakapasitör şarj akımının zamanla azalarak sıfıra gittiği görülmektedir.



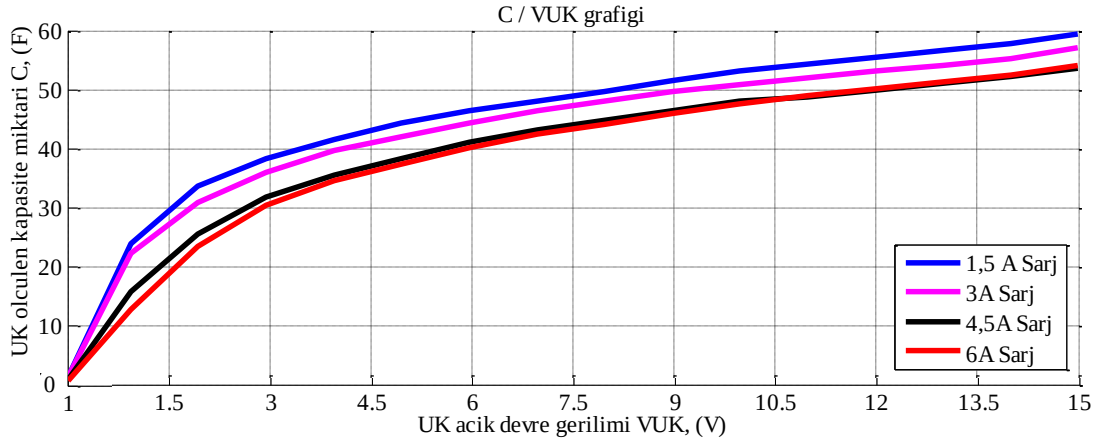
Şekil 4.50. Ultrakapasitör 6A şarj osilaskop ekranı

Şekil 4.51'de dört farklı şarj durumu için ultrakapasitörün terminal uçlarındaki gerilim değerinin kapasite miktarına göre değişimi verilmektedir. Ultrakapasitör kapasite miktarının terminal uçlarındaki gerilimi V_{UK} ile ilişkisi Denklem (4.7)'deki formül ile hesaplanmaktadır [40].

$$C_{UK} = \left(\frac{dt}{dV_{UK}} \right) \cdot I_{UK} \tag{4.7}$$

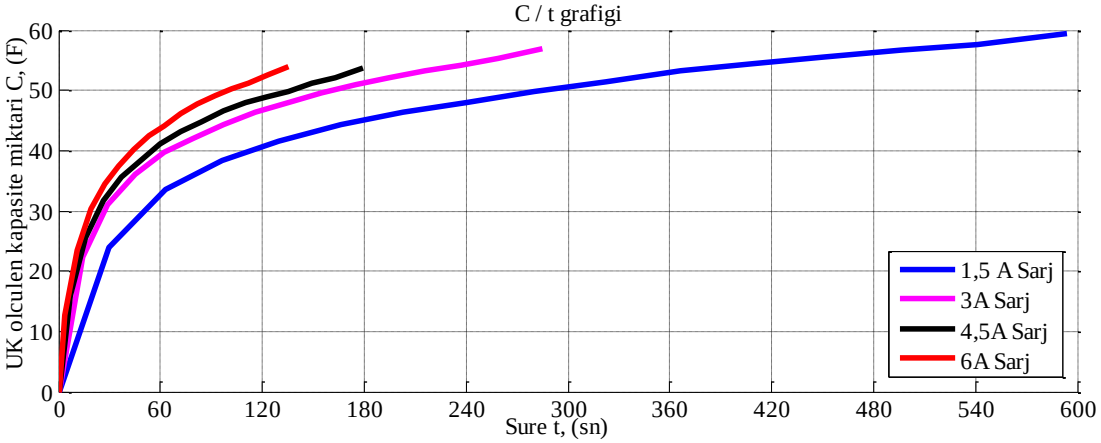
Denklem (4.7)'deki C_{UK}, F cinsinden ultrakapasitörün ölçülen kapasite miktarı, V_{UK} ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilimi, I_{UK} ultrakapasitör akımını temsil etmektedir. Ultrakapasitör terminal gerilimi şarj oldukça artmakta ve bu gerilim değeri ultrakapasitör kapasite miktarı ile ilişkilidir. Ultrakapasitörler kondansatör gibi davrandığından bataryalar gibi doluluk durum miktarı yerine ultrakapasitörün üzerinde depolanan enerji miktarı F cinsinden ifade edilmektedir [40]. Depoladığı enerji miktarı bilinen bir ultrakapasitörün deşarj olurken yüke aktaracağı enerji miktarı ultrakapasitörün kapasitesini belirlemektedir. Farklı şarj değerlerindeki deney çalışmasında ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilimi arttıkça ultrakapasitörün kapasitesi Denklem (4.7)'deki formül ile arttığı Şekil 4.51'de görülmektedir. Yüksek akım değerinde ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilim değeri daha hızlı

yükselmekte fakat depoladığı enerji miktarı düşük olmaktadır. Bunun nedeni ultrakapasitör şarj süresinin yüksek akım değerlerinde kısa olmasıdır. Örneğin; ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilim 1V değerine, 1,5A şarj deneyinde 30sn'de, 3A şarj deneyinde 14sn'de, 4,5A şarj deneyinde 6,6sn'de, 6A şarj deneyinde ise 4sn gibi kısa sürede ulaşmaktadır. Her akım değeri için ultrakapasitör 15V gerilim değerine ulaştığında 1,5A şarj durumunda 59,4F, 3A şarj durumunda 57F, 4,5A şarj durumunda 53,7F ve 6A şarj durumunda 54F enerji depoladığı ölçülmektedir.



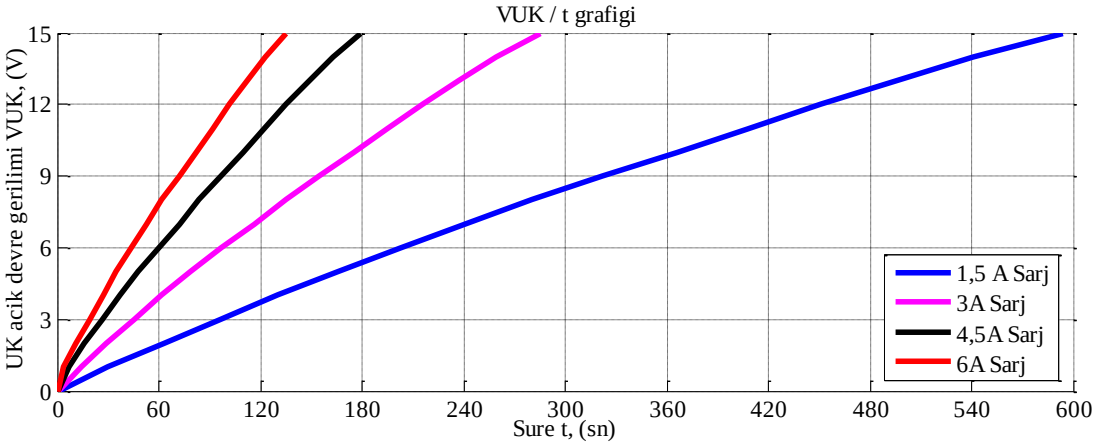
Şekil 4.51. Ultrakapasitör farklı akımlarda şarj deneyi C_{UK}/V_{UK} değişimi

Şekil 4.52'de şarj süresine göre ultrakapasitör ölçülen kapasite değişimi verilmektedir. Ultrakapasitör şarj akım miktarı arttıkça depoladığı kapasite miktarını daha kısa sürede doldurduğu gözlenmektedir. Ultrakapasitör 1,5A şarj deneyinde 59,4F değerine 594sn'de, 3A şarj deneyinde 59,4F değerine 285sn'de, 4,5A şarj deneyinde 59,4F değerine 179sn'de ve 6A şarj deneyinde 59,4F değerine 5135sn'de ulaşmaktadır.



Şekil 4.52. Ultrakapasitör farklı akımlarda şarj deneyi C_{UK}/t değişimi

Şekil 4.53'te ultrakapasitörün şarj süresine göre terminal uçlarındaki gerilim değişimi verilmektedir. Ultrakapasitörün akım miktarı arttıkça terminal uçlarındaki gerilimin hızlı bir şekilde arttığı gözlenmektedir. Ultrakapasitör 15V gerilim değerine 1,5A şarj deneyinde 594sn'de, 3A şarj deneyinde 285sn'de, 4,5A şarj deneyinde 179sn'de ve 6A şarj deneyinde 5135sn'de ulaşmaktadır.

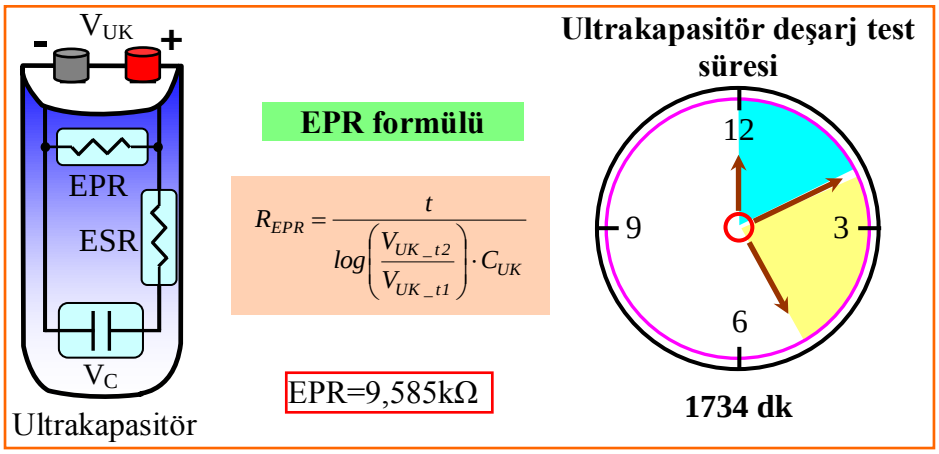


Şekil 4.53. Ultrakapasitör farklı akımlarda şarj deneyi V_{UK}/t değişimi

4.2.4. Ultrakapasitör EPR hesaplama deneyi

Ultrakapasitör kullanılmadığı zaman kendi kendine enerjisi azalarak terminal uçlarındaki gerilim değeri sıfıra düşer. Bu durum ultrakapasitörde içerisinde paralel olarak bağlı bir direnç ile eşdeğer paralel direnç (EPR) ile temsil edilir. Tez çalışmasında şarj ve deşarj işlemlerinde kullanılan ultrakapasitörün eşdeğer paralel direnç değeri EPR hesaplama deneyi yapılmıştır. İlk olarak ultrakapasitör 15V gerilim seviyesinde şarj edilmektedir. Daha sonra belli zaman periyotları ile terminal

uçlarındaki gerilim değeri kayıt edilmektedir. Bu periyot aralıkları 10dk olarak seçilmiştir. Şekil 4.54'te de belirtildiği gibi toplamda 1734dk boyunca gerilim değerleri kayıt edilmiştir.



Şekil 4.54. Ultrakapasitör EPR deneyi

Ultrakapasitördeki EPR direncinden dolayı zamanla azalan gerilim değeri Denklem (4.8)'deki formül ile hesaplanmaktadır [30].

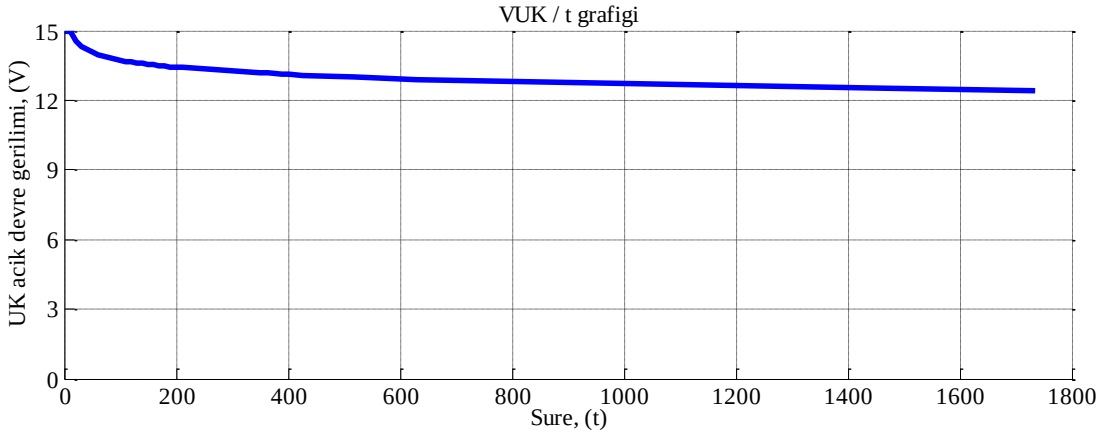
$$V_{UK_t2} = V_{UK_t1} \cdot e^{-\frac{t}{R_{EPR} \cdot C_{UK}}} \tag{4.8}$$

Denklem (4.8)'deki V_{UK_t2} ultrakapasitörün t_2 anında okunan gerilim değeri, V_{UK_t1} ultrakapasitörün t_1 anında okunan gerilim değeri, t toplam deney zamanı, R_{EPR} ultrakapasitör eşdeğer paralel direnci EPR, C_{UK} ultrakapasitörün F cinsinden toplam kapasite miktarıdır. Ultrakapasitör elektriksel devresinde bulunan bu eşdeğer paralel direnç değeri EPR, Denklem (4.8) kullanılarak Denklem (4.9)'daki formül ile hesaplanmaktadır [40].

$$R_{EPR} = \frac{t}{\log\left(\frac{V_{UK_t2}}{V_{UK_t1}}\right) \cdot C_{UK}} \tag{4.9}$$

Deney çalışmalarında kullanılan 15V 58F kapasiteye sahip ultrakapasitörün eşdeğer paralel direnç değeri EPR Denklem (4.9) formülü ile 9,585kΩ olarak hesaplanmıştır. Bu eşdeğer direnç, ultrakapasitörden sürekli sızıntı akımı akmasına ve zamanla ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilimin bitmesine neden olmaktadır.

Şekil 4.55'te ultrakapasitörün EPR direncinden dolayı terminal uçlarındaki gerilim değerinin zamanla azaldığı görülmektedir. Başlangıçta 15V olan gerilim değeri ilk anlarda hızlı bir şekilde düşmekte fakat daha sonra bu azalma miktarı küçülmektedir ve 1734dk sonunda terminal uçlarındaki gerilim değeri 12,44V'a inmektedir. Ultrakapasitörlerde EPR direnci ne kadar büyük olursa ultrakapasitör sızıntı akımı o kadar küçük olur ve ultrakapasitör uçlarındaki gerilim değeri zamanla o miktarda azalmış olur. Bu aynı zamanda ultrakapasitörün depoladığı kapasite miktarının ne kadar süre üzerinde tutabildiğini belirlemektedir. Yapılan EPR ölçüm deney sonucunda ultrakapasitörün 1734dk içinde toplamda 2,56V gerilim düşümü olduğu gözlenmiştir. Ultrakapasitör uçlarındaki terminal geriliminin 0V'a ulaşması genel bir orantı kurulduğunda yaklaşık olarak depolanan kapasite miktarının bitmesi 7,05 gün sürmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan ultrakapasitör tamamen şarj edildiğinde yani 15V terminal gerilim değerinde iken bir hafta sonra terminal uçlarındaki gerilim 0V olmaktadır.



Şekil 4.55. Ultrakapasitör EPR deneyi V_{UK}/t değişimi

5. BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖR MODELLEME ÇALIŞMALARI

Tez çalışmasının bu bölümünde deneysel sonuçları alınan bataryalar ve ultrakapasitör için temel modelleme denklemleri çıkartılarak deneysel sonuçlar ile karşılaştırılacaktır.

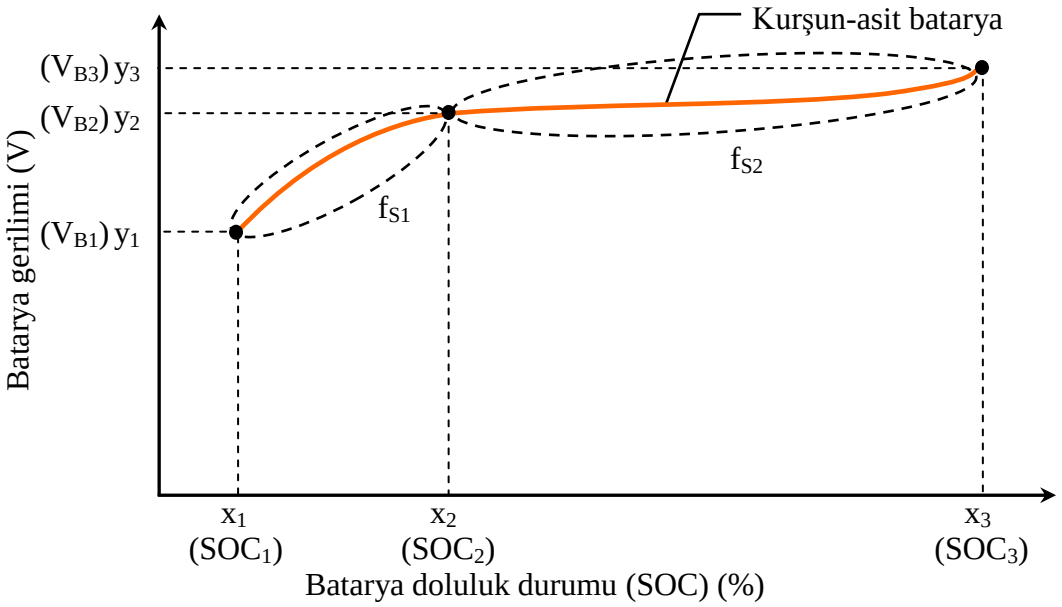
Batarya ve ultrakapasitör modelleme yönteminde elde edilen şarj ve deşarj eğrileri temel matematiksel denklemlere dönüştürülerek batarya ve ultrakapasitörün anlık durumu ile ilgili bilgi verecektir. Bu modelleme çalışması eğri uydurma "curve fitting" yöntemi ile elde edilmektedir. Bataryalar için şarj ve deşarj durumunda batarya terminal uçlarındaki gerilim değerine bağlı olarak bataryanın doluluk durumunu gösteren modelleme çalışmaları yapılmaktadır. Bataryanın şarj/deşarj durumlarında farklı akım değerlerinde terminal uçlarındaki gerilim değişim eğrisi modelleme yönteminde dikkate alınarak her farklı şarj ve deşarj akım değerinde modelleme çalışmaları yapılmaktadır. Aynı şekilde ultrakapasitör şarj/deşarj deneyleri için terminal uçlarındaki gerilim değerine bağlı olarak ultrakapasitörün kapasite durumu modellenmektedir. Ultrakapasitör modelleme çalışmalarında bataryalarda olduğu gibi farklı akım değerlerindeki kapasite durumu belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında batarya modelleme yöntemi olarak basit batarya model eşdeğer devre yöntemi kullanılmıştır. Aynı zamanda ultrakapasitör modelleme çalışmaları yapılmıştır.

5.1. Batarya Şarj Durumunda Modelleme Çalışması

Batarya şarj modelleme çalışmalarında Şekil 5.1'de verilen örnek batarya şarj eğrisi kullanılmıştır. Bu eğride örnek bir kurşun-asit bataryanın şarj durumunda terminal uçlarındaki gerilimin batarya doluluk durumuna göre değişimi verilmektedir. Tez çalışması kapsamında yapılan bütün bataryaların şarj eğrileri temel yapı itibariyle bu eğri tipinde çıkmaktadır. Bu yüzden böyle bir eğrinin model denkleminin çıkartılması bu çalışmadaki şarj modelleme çalışmalarının temelini oluşturmaktadır.

Örnek şarj grafiğinde verildiği gibi eğri modellenirken f_1 ve f_2 fonksiyonu olarak iki parçaya ayrılmaktadır.



Şekil 5.1. Kurşun-asit batarya örnek şarj gerilim grafiği

Şekil 5.1'de verilen örnek bir batarya şarj eğrisinde modelleme denklemini oluştururken daha basite indirgeyerek doğruluğunu arttırmak için iki ayrı fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Bu fonksiyonlar f_{S1} ve f_{S2} olarak temsil edilmektedir. Batarya şarj eğrisinde bulunan ilk f_{S1} fonksiyon Denklem (5.1)'deki ifade ile tanımlanmaktadır. f_{S1} fonksiyonun aralığındaki x değerleri $x_1<x<x_2$ aralığındadır.

$$f_{S1} = y_0 + m_1 x \tag{5.1}$$

Denklem (5.1)'deki y_0, f_{S1} fonksiyon aralığında bulunan başlangıç anındaki y değeridir, m_1 f_{S1} fonksiyonun eğimi, x ise fonksiyondaki bulunan bütün x_1 ile x_2 arasındaki değerlerdir. Denklem (5.1)'deki m_1, f_{S1} fonksiyonunun eğimini belirlemektedir ve Denklem (5.2) formülü ile açıklanmaktadır.

$$m_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{5.2}$$

Batarya şarj eğrisinde bulunan ikinci f_{S2} fonksiyonunu tanımlarken Denklem (5.3)'teki ifade ile tanımlanmaktadır.

$$f_{S2} = y_{02} + m_2 x \tag{5.3}$$

Denklem (5.3)'teki y_{02}, f_{S2} fonksiyon aralığında bulunan başlangıç anındaki y değeridir, m_1 f_{S2} fonksiyonun eğimi, x ise fonksiyonda bulunan bütün x_2'den büyük olan değerlerdir. Denklem (5.3)'teki m_2, f_{S2} fonksiyonunun eğimini belirlemektedir ve Denklem (5.4) formülü ile açıklanmaktadır.

$$m_2 = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \tag{5.4}$$

Bataryanın şarj grafiği iki parçaya bölünerek modelleme çalışması için denklemleri oluşturulmaktadır. Batarya şarj modellemesinde bulunan f_{S1} ve f_{S2} denklemleri bir bütün olarak ifade edilerek toplam şarj grafiği oluşturulmaktadır. Bu toplam şarj grafiğinin formülü f_{S1} ve f_{S2} denklemleri kullanılarak Denklem (5.5)'teki gibi ifade edilmektedir. Böylelikle batarya şarj eğrisinin grafiği tek bir temel matematiksel formül ile ifade edilecektir.

$$y = \left(f_{S1} - f_{S2}\right) \cdot e^{-5\left[\frac{x}{x_3}\right]} + f_2 \tag{5.5}$$

Denklem (5.5)'teki y batarya şarj eğrisinin fonksiyonu, f_{S1} ilk eğri f_{S2} ikinci durumdaki eğri fonksiyonlarıdır. Bu denklemde ilk bölümde bulunan f_{S1} ve f_{S2} fonksiyonlarının farkı eksponansiyel bir katsayı ile çarpılmaktadır. Buradaki e^{-5} değeri sıfıra yakın bir değer olduğu için bu katsayı seçilmektedir. f_{S1} ve f_{S2} fonksiyonlarının büküm noktasına en yakın değeri e^{-5} katsayısı verdiği için bu değer -5 seçilmiştir. Denklemde ilk olarak x_1 başlangıç değerleri için f_{S1} fonksiyonun çizdirilmesi sağlanacak daha sonra x_3 değerine gelindiğinde e^{-5} değeri sıfıra yaklaşacaktır. Böylece denklemde sadece f_{S2} fonksiyonu kalacak eğri çizimi tamamlanacaktır.

Batarya şarj deneylerinde aynı batarya tipleri farklı akım değerlerinde testlere tabi tutulmaktadır. Farklı akım değerlerinde bataryanın terminal uçlarındaki gerilim değeri bataryanın doluluk durumuna göre farklılık göstermektedir. Bu grafiklerdeki farklılık aslında Denklem (5.2) ve Denklem (5.4)'te verilen m_1 ve m_2 değerlerindeki değişikliktir. Böylece bataryanın şarj akımı değişmesi durumunda deneysel

sonuçlardan alınan veriler doğrultusunda aynı denklem yapısı ile farklı akımlardaki batarya doluluk durum değişimi tahmini yapılabilmektedir.

Batarya şarj modelleme çalışmaları için Denklem (5.5)'teki formül kullanılmaktadır. Denklem (5.5)'te bulunan fonksiyonlar batarya şarj modeline uyarlandığında Denklem (5.6) ve Denklem (5.7) elde edilmektedir.

$$f_{S1} = V_{B0} + \left[\frac{V_{B2} - V_{B1}}{SOC_2 - SOC_1} \right] \cdot SOC \tag{5.6}$$

$$f_{S2} = V_{B02} + \left[\frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \right] \cdot SOC \tag{5.7}$$

Denklem (5.6) ve Denklem (5.7)'de verilen V_{B0} f_{S1} fonksiyonundaki başlangıç anındaki batarya terminal gerilimi, V_{B02} f_{S2} fonksiyonundaki başlangıç anındaki batarya terminal gerilimi, V_{B1}, V_{B2} ve V_{B3} fonksiyonları tanımlarken alınan batarya gerilim ara değerleri, SOC % cinsinden batarya doluluk durum oranı, SOC_1, SOC_2 ve SOC_3 % cinsinden fonksiyonları tanımlarken alınan batarya doluluk durum oranının ara değerleridir. f_{S1} ve f_{S2} fonksiyonlarında bulunan eğim formülleri batarya şarj modelleme çalışmalarına göre uyarlanarak Denklem (5.8) ve Denklem (5.9) elde edilmektedir.

$$m_1 = \frac{V_{B2} - V_{B1}}{SOC_2 - SOC_1} \tag{5.8}$$

$$m_2 = \frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \tag{5.9}$$

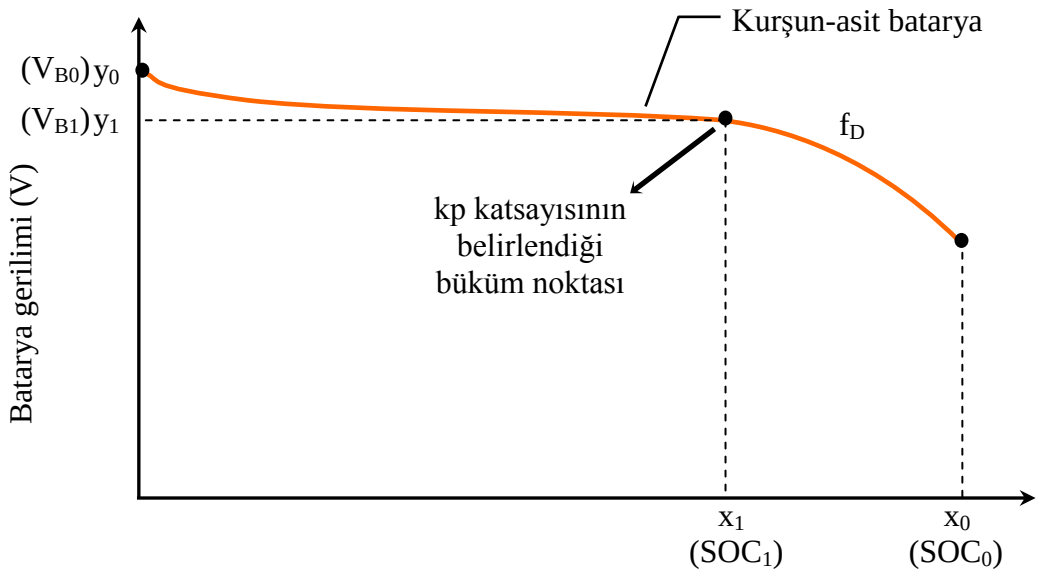
Denklem (5.5) batarya şarj modelleme çalışmaları için uyarlandığında bataryanın şarj gerilim değeri ve batarya doluluk durumuna göre değişimi Denklem (5.10) formülü elde edilmektedir. Batarya şarj modelleme çalışmalarında hesaplanan bataryanın gerilimi V_{MBS} ile temsil edilmektedir. Batarya şarj modelleme çalışmalarında elde edilen V_{MBS} gerilim matris ile deneysel sonuçlardan alınan değerler aynı grafik üzerinde çizdirilerek karşılaştırılması yapılmaktadır.

$$V_{MBS} = \left[V_{B0} + \left[\frac{V_{B2} - V_{B1}}{SOC_2 - SOC_1} \right] \cdot SOC - V_{B02} + \left[\frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \right] \right] \cdot e^{-5\left[\frac{SOC}{SOC_3}\right]}$$

$$+ V_{B02} + \left[\frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \right] \cdot SOC \qquad (5.10)$$

5.2. Batarya Deşarj Durumunda Modelleme Çalışması

Batarya deşarj modelleme çalışmalarında Şekil 5.2'de verilen örnek bir kurşun-asit bataryanın deşarj durumunda terminal uçlarındaki gerilimin batarya doluluk durumuna göre değişimi verilmektedir. Tez çalışması kapsamında yapılan bütün bataryaların deşarj eğrileri temel yapı itibariyle bu eğri tipinde çıkmaktadır. Bu yüzden böyle bir eğrinin model denkleminin çıkartılması şarj modelleme çalışmalarında olduğu gibi bütün deşarj modelleme çalışmalarının temelini oluşturacaktır. Bu deşarj durumunda grafikte verildiği gibi eğri modellemek için şarj modelleme çalışmalarından farklı olarak tek bir fonksiyon ile tanımlanmaktadır.



Şekil 5.2. Kurşun-asit batarya örnek deşarj gerilim grafiği

Batarya deşarj modelleme için kullanılan f_D fonksiyonu Denklem (5.11)'de verilmektedir.

$$f_D = y_0 - y_0 \cdot e^{kp\left(\frac{x}{x_0} - 1\right)} + y_0 \cdot e^{-kp} \qquad (5.11)$$

Denklem (5.11)'deki y_0, deşarj eğrisinin batarya terminal uçlarındaki gerilimin başlangıç noktasıdır, kp değeri batarya deşarj eğrisinin x_1 ve y_1 noktalarının kesişimi olan eğrinin bükülme açısını belirleyen parametredir, x deşarj eğrisinin batarya doluluk durum değerleridir.

Denklem (5.11)'deki denklemin ilk bölümünde bulunan y_0 ve y_0 eksponansiyel katsayılı ifade x değerinin maksimum olduğunda, yani x değerinin x_0'a eşit olduğu durumda eksponansiyelin üzeri sıfıra eşit olur. Eksponansiyel üzeri sıfırda bire eşit olur ve y_0 ve y_0 eksponansiyel katsayılı ifade değeri birbirini götürerek fonksiyonda sadece y_0 eksponansiyel katsayılı –kp değeri kalır. Bu değerde eğrinin başlangıç konumu olan y_0 noktasını işaret etmektedir. Daha sonra x'in zamanla değişen değerlerine bağlı olarak batarya deşarj eğrisi aşağıya doğru inerek x_0 değerine gelmektedir.

Batarya şarj deneylerinde olduğu gibi deşarj deneylerinde de aynı batarya tipleri farklı akım değerlerinde testlere tabi tutulmaktadır. Farklı deşarj akım değerlerinde bataryanın terminal uçlarındaki gerilim değeri bataryanın doluluk durumuna göre farklılık göstermektedir. Yani batarya deşarj eğrisinin x_0 değeri küçülmektedir. Bu grafiklerdeki farklılık aslında Denklem (5.11)'de verilen x_0 değerinin ve kp katsayısının değişimidir. Farklı deşarj değerlerinden elde edilen sonuçlar ile bu x_0 ve kp katsayıları belirlenmektedir. Böylece bataryanın deşarj akımı değişmesi durumunda deneysel sonuçlardan alınan veriler doğrultusunda aynı denklem yapısı ile farklı akımlardaki batarya doluluk durum değişimi tahmini yapılabilmektedir. Batarya deşarj modelleme çalışma sonuçları deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak modellenen denklemlerin % hata oran sonuçları verilmektedir.

Batarya deşarj modelleme çalışmaları için Denklem (5.11)'deki formül kullanılmaktadır. Denklem (5.11)'de bulunan fonksiyonlar batarya deşarj modeline uyarlandığında Denklem (5.12) elde edilmektedir.

$$V_{MBD} = V_{B0} - V_{B0} \cdot e^{kp\left(\frac{SOC}{SOC_0}-1\right)} + V_{B0} \cdot e^{-kp} \tag{5.12}$$

Denklem (5.12)'de verilen V_{B0} başlangıç anındaki batarya terminal gerilimi, SOC % cinsinden batarya doluluk durum oranı, SOC_0 % cinsinden fonksiyonu tanımlarken

alınan son değeri, kp batarya deşarj eğrisinin büküm noktasını belirleyen katsayıdır. Batarya deşarj modelleme çalışmalarında hesaplanan bataryanın gerilimi V_{MBD} ile temsil edilmektedir. Batarya deşarj modelleme çalışmalarında elde edilen V_{MBD} gerilim matris ile deneysel sonuçlardan alınan değerler aynı grafik üzerinde çizdirilerek karşılaştırılması yapılmaktadır.

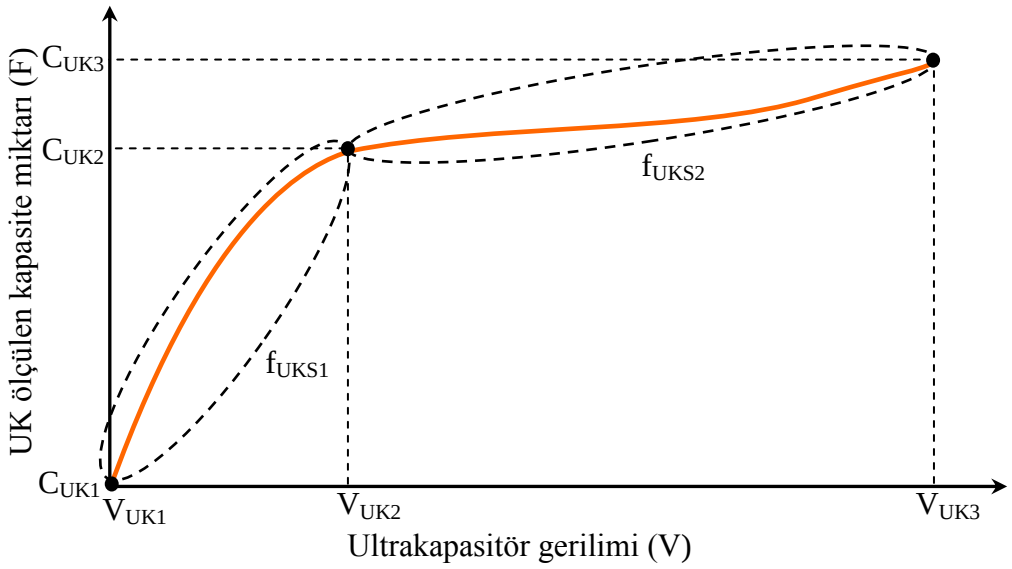
Batarya şarj ve deşarj deneylerinde alınan veriler ile modellemede hesaplanarak çizdirilen grafiklerin hata oran miktarları Denklem (5.13)'te verilen formül ile belirlenmektedir.

$$h_B = \left(\frac{V_B - V_{MB}}{V_B} \right) \cdot 100 \tag{5.13}$$

Denklem (5.13)'teki h_B modelleme sonucundaki karşılaştırma hata oranı, V_B batarya terminal gerilimi, V_{MB} modelleme sonucunda hesaplanan batarya terminal gerilim değeridir. Bu gerilim değeri şarj modelleme değeri için V_{MBS} deşarj modelleme değeri için V_{MBD} alınmaktadır.

5.3. Ultrakapasitör Şarj Durumunda Modelleme Çalışması

Ultrakapasitör şarj modelleme çalışmaları için Şekil 5.3'te verilen örnek ultrakapasitör şarj eğrisi kullanılmaktadır. Bu modelleme çalışması eğri uydurma "curve fitting" yöntemi ile elde edilmektedir. Bu eğride ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilimin ultrakapasitörün ölçülen kapasite miktar değişim durumu görülmektedir. Tez çalışması kapsamında yapılan bütün ultrakapasitörlerin şarj eğrileri temel yapı itibariyle bu eğri tipinde çıkmaktadır. Bu ultrakapasitör şarj durumunda grafikte verildiği gibi eğri modellemek f_{UKS1} ve f_{UKS2} fonksiyonu şeklinde iki parçaya ayrılmaktadır.



Şekil 5.3. Ultrakapasitör örnek şarj gerilim grafiği

Ultrakapasitör şarj grafiğinin formülü f_{UKS1} ve f_{UKS2} fonksiyonları kullanılarak Denklem (5.14)'teki gibi ifade edilmektedir. Böylelikle ultrakapasitör şarj eğrisinin grafiği tek bir temel matematiksel formül ile ifade edilecektir.

$$y = \left(f_{UKS1} - f_{UKS2}\right) \cdot e^{-5\left[\frac{x}{x_3}\right]} + f_{UKS2} \tag{5.14}$$

Şekil 5.3'te verilen örnek bir ultrakapasitör şarj eğrisinde modelleme denklemini oluştururken daha basite indirgemek doğruluğunu arttırmak adına iki fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Bu fonksiyonlar f_{UKS1} ve f_{UKS2} olarak temsil edilmektedir. Denklem (5.14)'te bulunan fonksiyonlar ultrakapasitör şarj modeline uyarlandığında Denklem (5.15) ve Denklem (5.16) elde edilmektedir.

$$f_{UKS1} = V_{UK0} + \left[\frac{C_{UK2} - C_{UK1}}{V_{UK2} - V_{UK1}}\right] \cdot V_{UK} \tag{5.15}$$

$$f_{UKS2} = V_{UK02} + \left[\frac{C_{UK3} - C_{UK2}}{V_{UK3} - V_{UK2}}\right] \cdot V_{UK} \tag{5.16}$$

Denklem (5.15) ve Denklem (5.16)'da verilen V_{UK0} başlangıç anındaki ultrakapasitör terminal gerilimi, C_{UK1}, C_{UK2} ve C_{UK3} fonksiyonları tanımlarken ölçülen ultrakapasitör kapasite miktarları, V_{UK} ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilim,

V_{UK1}, V_{UK2} ve V_{UK3} cinsinden fonksiyonları tanımlarken alınan ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilim değerleridir.

Ultrakapasitörde depolanan kapasite miktarı Denklem (5.17) ile hesaplanmaktadır.

$$C_{UK} = \left(\frac{dt}{dV_{UK}} \right) \cdot I_{UK} \tag{5.17}$$

Denklem (5.17)'deki C_{UK}, F cinsinden ultrakapasitörün ölçülen kapasite miktarı, V_{UK} ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilimi, I_{UK} ultrakapasitör akımını temsil etmektedir.

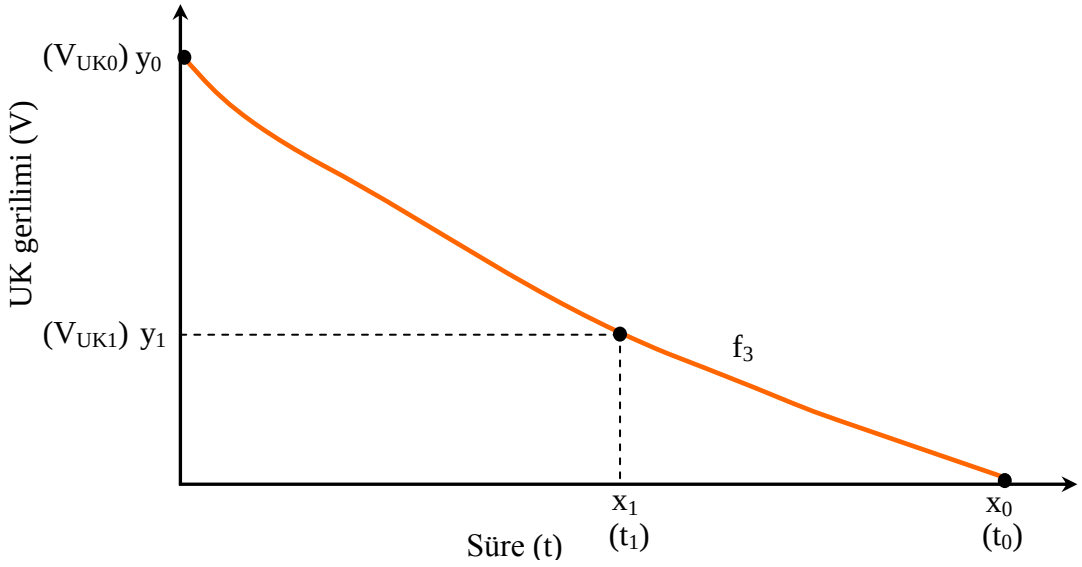
Denklem (5.14) ultrakapasitör şarj modelleme çalışmaları için uyarlandığında ultrakapasitörün şarj gerilim değeri ve ölçülen ultrakapasitör kapasite miktarına göre değişimi Denklem (5.18) formülü elde edilmektedir. Ultrakapasitör şarj modelleme çalışmalarında hesaplanan ultrakapasitör gerilimi V_{MUKS} ile temsil edilmektedir. Ultrakapasitör şarj modelleme çalışmalarında elde edilen V_{MUKS} gerilim matris ile deneysel sonuçlardan alınan değerler aynı grafik üzerinde çizdirilerek karşılaştırılması yapılmaktadır.

$$V_{MUKS} = \left[C_{UK0} + \left[\frac{C_{UK2} - C_{UK1}}{V_{UK2} - V_{UK1}} \right] \cdot V_{UK} - C_{UK02} + \left[\frac{C_{UK3} - C_{UK2}}{V_{UK3} - V_{UK2}} \right] \right] \cdot e^{-5\left[\frac{V_{UK}}{V_{UK3}} \right]}$$

$$+ V_{UK02} + \left[\frac{C_{UK3} - C_{UK2}}{V_{UK3} - V_{UK2}} \right] \cdot V_{UK} \tag{5.18}$$

5.4. Ultrakapasitör Deşarj Durumunda Modelleme Çalışması

Ultrakapasitör deşarj durumunda için modelleme çalışmalarında Şekil 5.4'te verilen örnek bir ultrakapasitörün deşarj durumunda terminal uçlarındaki gerilimin kapasite miktarına göre değişimi verilmektedir. Bu deşarj durumunda grafikte verildiği gibi eğri modellemek için tek bir f3 fonksiyonu ile tanımlanmaktadır.



Şekil 5.4. Ultrakapasitör örnek deşarj gerilim grafiği

Ultrakapasitör deşarj eğrisi logaritmik olarak azaldığından Denklem (5.7)'deki formül ortaya çıkmaktadır.

$$f_3 = y_0 - y_0 \cdot \log^{kp\left(\frac{x}{x_0}-1\right)} + y_0 \cdot e^{-kp} \tag{5.19}$$

Denklem (5.19)'daki y_0, deşarj eğrisinin ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilimin başlangıç noktasıdır, kp değeri ultrakapasitör deşarj eğrisinin x_1 ve y_1 noktalarının kesişimi olan eğrinin bükülme açısını belirleyen parametredir, x ultrakapasitör deşarj eğrisinin deşarj deneyinin zaman değerleridir. Modelleme çalışmalarında kp değeri 1,5 olarak alınmıştır.

Ultrakapasitör şarj deneylerinde olduğu gibi deşarj deneylerinde de farklı akım değerlerinde testlere tabi tutulmaktadır. Farklı deşarj akım değerlerinde ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilim değeri zamana bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yani ultrakapasitör deşarj eğrisinin x_0 değeri küçülmektedir. Bu grafiklerdeki farklılık aslında Denklem (5.19)'da verilen x_0 değerinin ve kp katsayısının değişimidir. Farklı deşarj değerlerinden elde edilen sonuçlar ile bu x_0 ve kp katsayıları belirlenmektedir. Böylece ultrakapasitörün deşarj akımı değişmesi durumunda deneysel sonuçlardan alınan veriler doğrultusunda aynı denklem yapısı ile farklı akımlardaki ultrakapasitör deşarj deneylerindeki gerilimin zamana göre değişimi tahmini yapılabilmektedir.

Ultrakapasitör deşarj modelleme çalışmaları için Denklem (5.19) ultrakapasitör değerleriyle uyarlandığında Denklem (5.20) formülü elde edilmektedir.

$$V_{MUKD} = V_{UK0} - V_{UK0} \cdot e^{kp\left(\frac{t}{t_0}-1\right)} + V_{UK0} \cdot e^{-kp} \tag{5.20}$$

Denklem (5.20)'de verilen V_{UK0} başlangıç anındaki ultrakapasitör terminal gerilimi, t ultrakapasitör deşarj deney süresindeki periyodik zaman dilimleri, t_0 ultrakapasitör deşarj deney süresi, kp ultrakapasitör deşarj eğrisinin büküm noktasını belirleyen katsayıdır. Ultrakapasitör deşarj modelleme çalışmalarında hesaplanan bataryanın gerilimi V_{MUKD} ile temsil edilmektedir. Batarya deşarj modelleme çalışmalarında elde edilen V_{MUKD} gerilim matris ile deneysel sonuçlardan alınan değerler aynı grafik üzerinde çizdirilerek karşılaştırılması yapılmaktadır.

Ultrakapasitör şarj ve deşarj deneylerinde alınan veriler ile modellemede hesaplanarak çizdirilen grafiklerin hata oran miktarları Denklem (5.21)'de verilen formül ile belirlenmektedir.

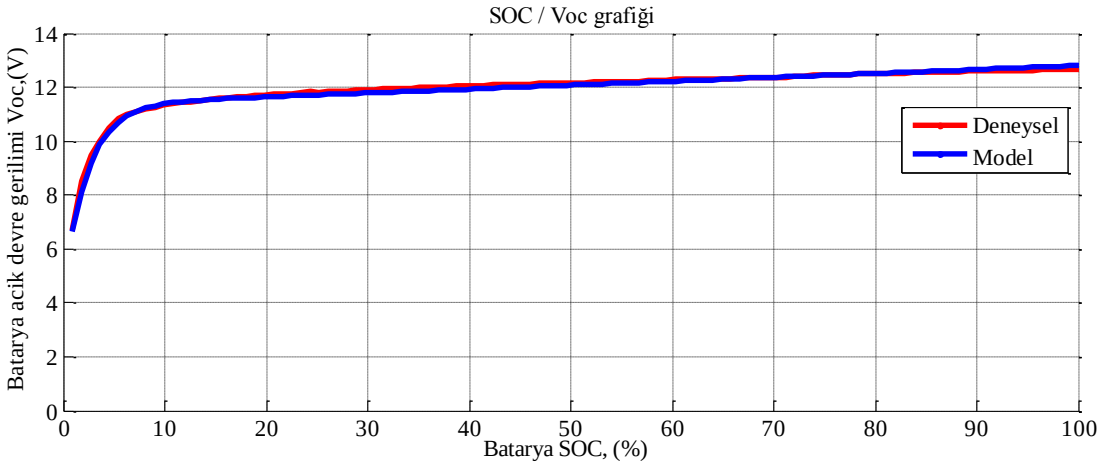
$$h_{UK} = \left(\frac{V_{UK} - V_{MUK}}{V_{UK}}\right) \cdot 100 \tag{5.21}$$

Denklem (5.21)'deki h_{UK} modelleme sonucundaki karşılaştırma hata oranı, V_{UK} ultrakapasitör terminal gerilimi, V_{MUK} modelleme sonucunda hesaplanan ultrakapasitör terminal gerilim değeridir. Bu gerilim değeri şarj modelleme değeri için V_{MUKS} deşarj modelleme değeri için V_{MUKD} alınmaktadır. Ultrakapasitör şarj modelleme çalışma sonuçları deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak modellenen denklemlerin % hata oran sonuçları verilmektedir.

5.5. Batarya Şarjı Deneysel ve Modelleme Karşılaştırmaları

Şekil 5.5'te deneysel çalışmalarda kullanılan Hyundai marka 12V 7,2Ah kurşun-asit bataryanın 1A şarj deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir. Batarya 1A şarj modelleme çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (5.10)'da verilen formül ile çizdirilmektedir. Modelleme çalışmaları deneysel çalışmalardaki gibi Matlab/M-file arayüzü kullanılarak yapılmaktadır. Batarya 1A şarj modelleme

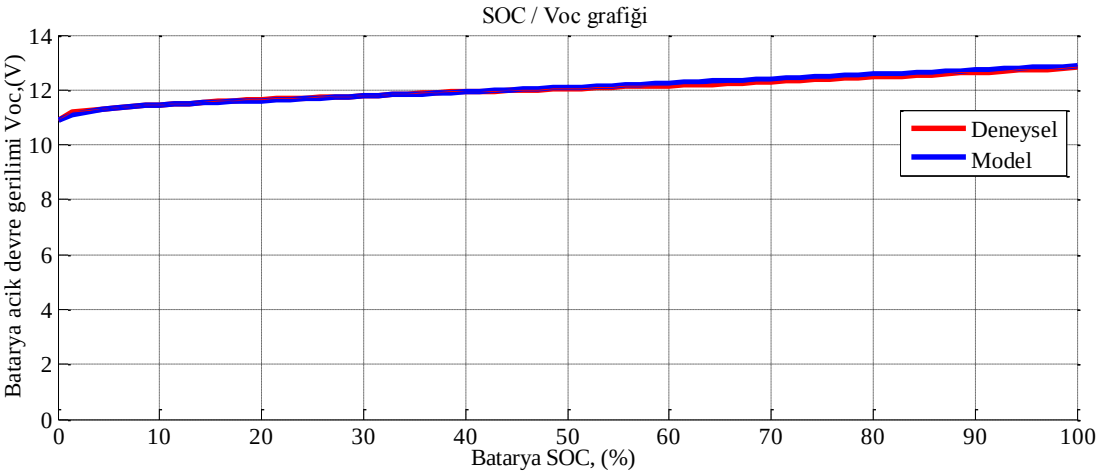
çalışmaları deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında çok yakın tahmin değerleri elde edildiği görülmektedir. Şekil 5.5'te verilen modelleme ve deneysel karşılaştırma sonucunda hata oranının %4,3 olduğu görülmektedir.



Şekil 5.5. Hyundai 12V 1A şarj modelleme karşılaştırması

Hyundai marka 12V batarya 1A şarj modelleme çalışmaları sonucunda Denklem (5.13) kullanılarak hata oranı maksimum %4,3 olarak hesaplanmaktadır. Bu hata oran sonucu modelleme çalışmalarının deneysel sonuçlara çok yakın ve kararlı olduğu görülmektedir.

Şekil 5.6'da deneysel çalışmalarda kullanılan Vision marka 12V 80Ah kurşun-asit bataryanın deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir..



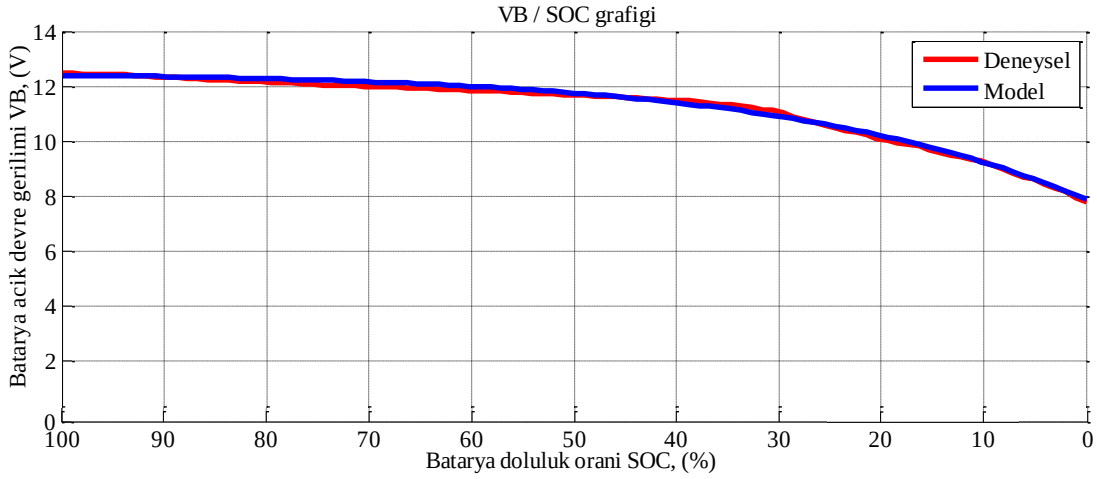
Şekil 5.6. Vision 12V sabit 4,4A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

Batarya sabit 4,4A şarj modelleme çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (5.10)'da verilen formül ile çizdirilmektedir

Vision marka 12V batarya sabit 4,4A şarj modelleme çalışmaları sonucunda 1A şarj modelleme çalışmasında kullanılan Denklem (5.13) ile hata oranı maksimum %0,9 olarak hesaplanmaktadır. Bu hata oran sonucu modelleme çalışmalarının deneysel sonuçlara çok yakın ve kararlı olduğu görülmektedir. Batarya şarj modelleme çalışmalarında elde edilen denklemin her iki batarya için de düşük hata oranıyla sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

5.6. Batarya Deşarjı Deneysel ve Modelleme Karşılaştırmaları

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de deneysel çalışmalarda kullanılan Hyundai marka 12V 7,2Ah kurşun-asit bataryanın sırasıyla sabit yük 1A ve 3A deşarj deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir.

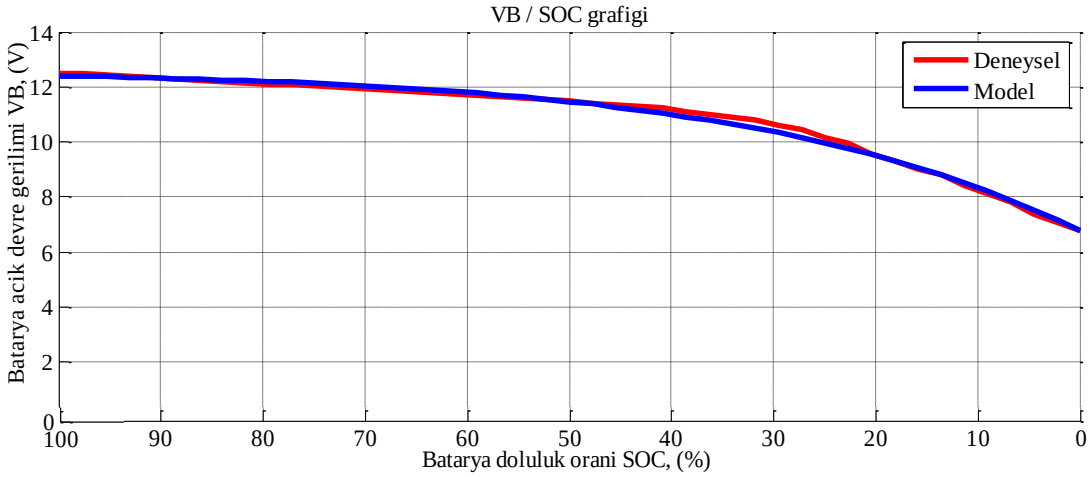


Şekil 5.7. Hyundai 12V 1A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

Batarya 1A ve 3A deşarj modelleme çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (5.12)'de verilen formül ile çizdirilmektedir.

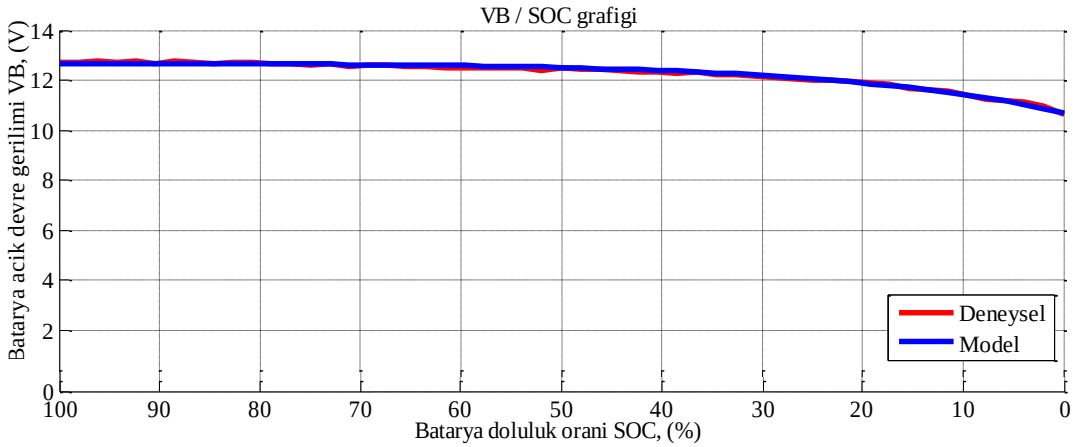
Hyundai marka 12V batarya 1A şarj modelleme çalışmaları sonucunda Denklem (5.13) kullanılarak hata oranı maksimum %4,1 olarak hesaplanmaktadır. Şekil 5.8'de Hyundai marka kurşun-asit bataryanın 3A deşarj deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir. Batarya 3A deşarj modelleme

çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (5.12)'de verilen formül ile çizdirilmektedir. Hyundai marka 12V batarya 1A şarj modelleme çalışmaları sonucunda Denklem (5.13) kullanılarak hata oranı maksimum %8,6 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 5.8. Hyundai 12V 3A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

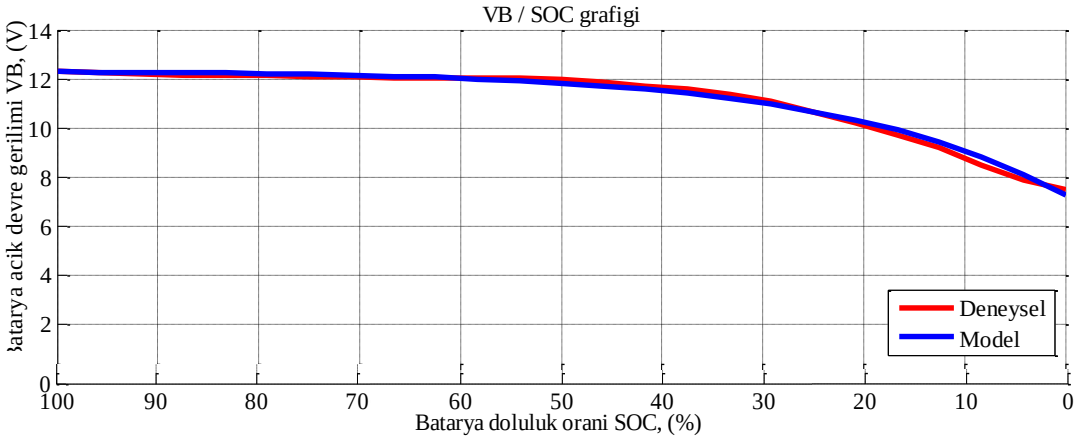
Şekil 5.9'da Vision 12V bataryanın terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit 4.4A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Şekil 5.9'da verilen deneysel ve model karşılaştırmaları çok düşük hata oranı ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,18 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 5.9. Vision 12V sabit 4,4A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

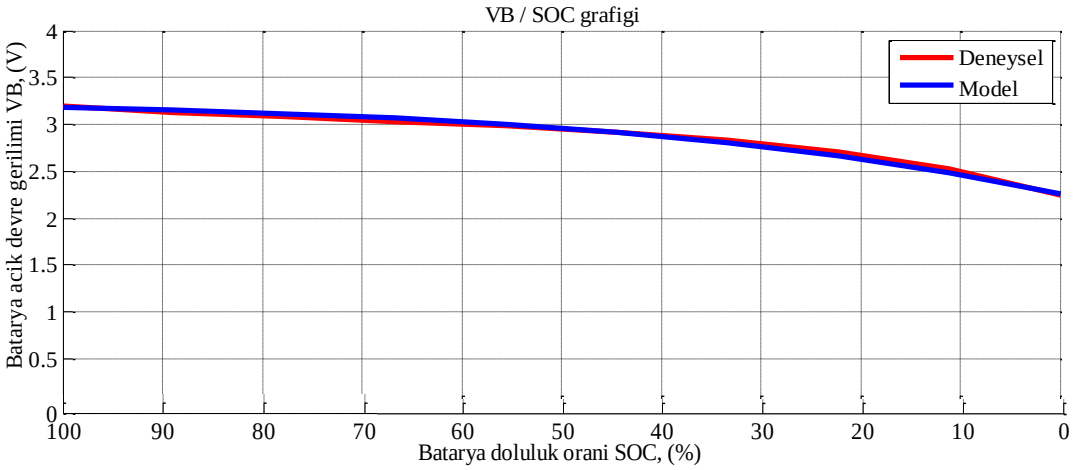
Şekil 5.10'da aynı Vision 12V batarya tipinin sabit 10A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları verilmektedir. Şekil 5.13'te verilen deneysel ve modelleme

karşılaştırma sonucunda maksimum %3,6'lık hata oranı ile başarılı bir modelleme çalışması yapıldığı görülmektedir.



Şekil 5.10. Vision 12V sabit 10A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

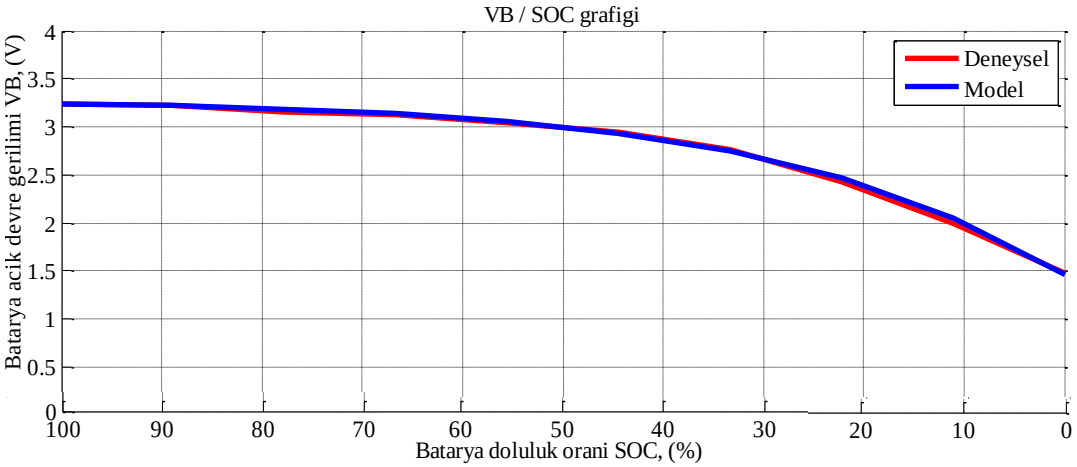
Şekil 5.11'de Hipower marka 3,2V 100Ah kapasiteye sahip $LiFePO_4$ bataryanın terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit yük 15,6A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Bir önceki deşarj modelleme çalışmalarında olduğu gibi Denklem (5.12)'de verilen formül kullanılmaktadır. Şekil 5.11'de verilen deneysel ve model karşılaştırmaları çok düşük hata oranı ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,17 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 5.11. Hipower 3,2V 15,6A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

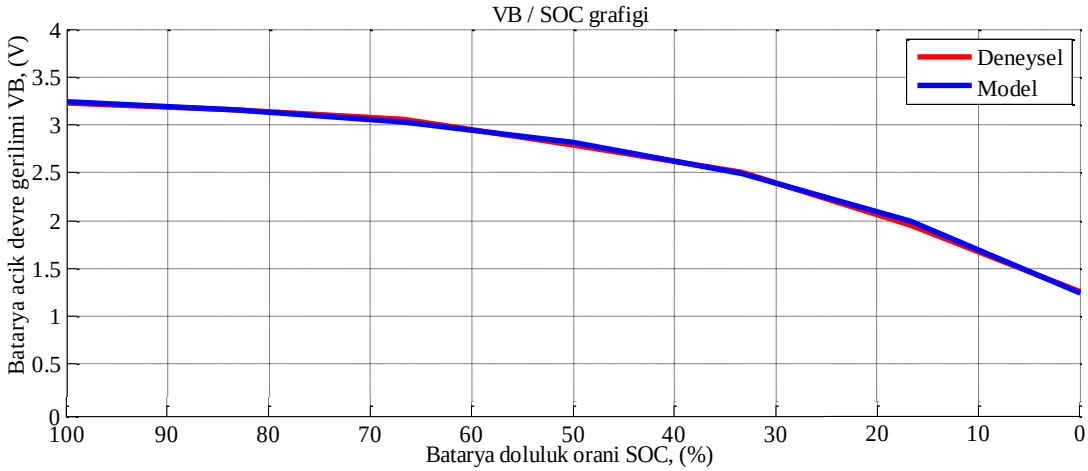
Şekil 5.12'de Hipower marka $LiFePO_4$ bataryanın terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit yük 32,5A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Şekil 5.12'de verilen deneysel ve model karşılaştırmaları

çok düşük hata oranı ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,39 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 5.12. Hipower 3,2V 32,5A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

Şekil 5.13'te aynı Hipower marka batarya için son deney çalışması olan terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit yük 49,1A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Şekil 5.13'te verilen deneysel ve model karşılaştırmaları çok düşük hata oranı ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,93 olarak hesaplanmaktadır.

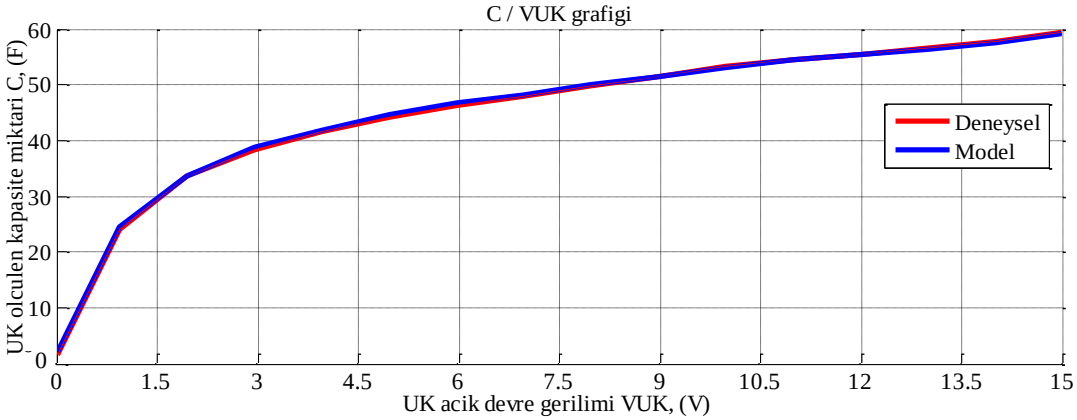


Şekil 5.13. Hipower 3,2V 49,1A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

5.7. Ultrakapasitör Şarj/Deşarj Deneysel ve Modelleme Karşılaştırmaları

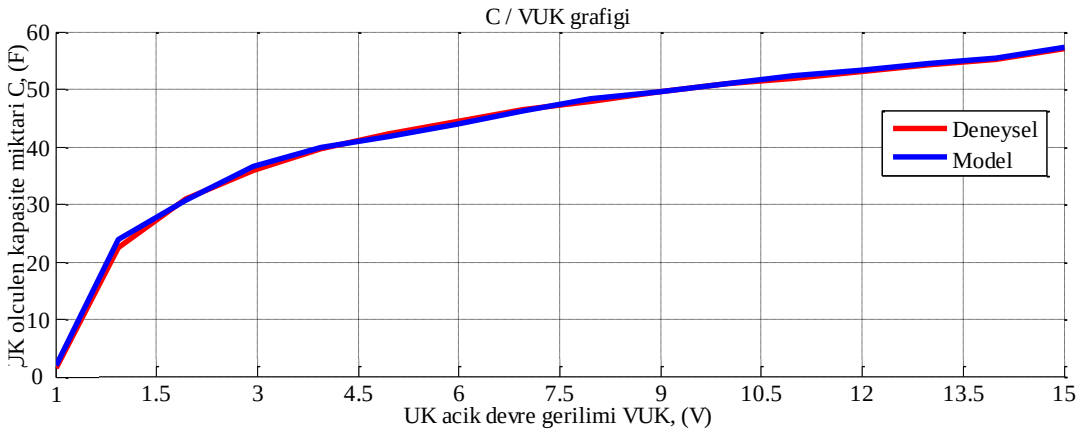
Tez çalışmasının bu bölümünde enerji depolama birimlerinden bir diğeri olan Maxwell marka 15 V 58 F kapasite değerine sahip ultrakapasitör şarj deneylerinin modelleme çalışmaları verilmektedir. Ultrakapasitör şarj modelleme çalışmaları

yapılırken Denklem (5.18) formülü kullanılmaktadır. Bu denklem ve sabit 1,5A şarj deneysel sonuçları kullanılarak Şekil 5.14'teki grafik elde edilmektedir.



Şekil 5.14. Ultrakapasitör sabit 1,5A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

Ultrakapasitörlerde bataryalara kıyasla doluluk durumunu öğrenmek için toplam depolanan kapasite miktarı kullanılmaktadır. Ultrakapasitör sabit 1,5A şarj modelleme sonucunda ultrakapasitör açık devre gerilimi deneysel çalışmalara yaklaşım hata oranı Denklem (5.21) ile maksimum %1,06 olarak hesaplanmaktadır.

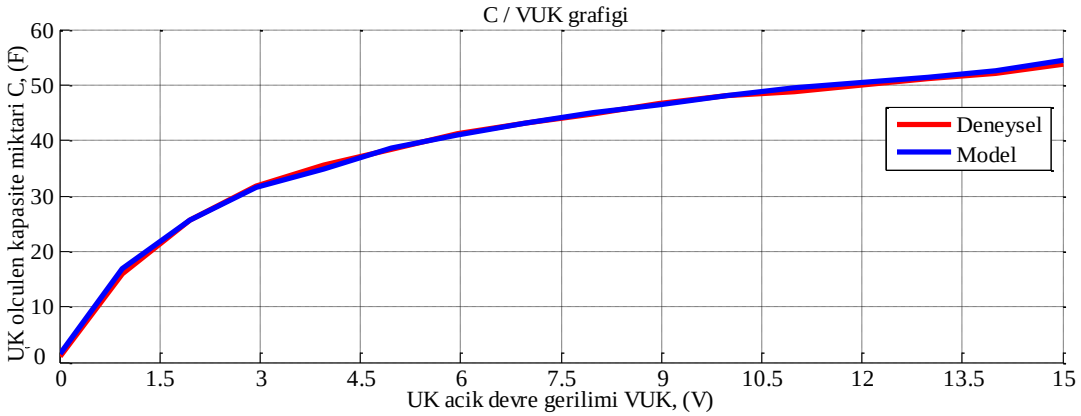


Şekil 5.15. Ultrakapasitör sabit 3A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

Ultrakapasitör sabit 3A şarj modelleme çalışmaları sonucu Şekil 5.15'te verilmektedir. Bu modelleme çalışması sonucunda da ultrakapasitör açık devre gerilimi deneysel sonuçlarına maksimum %3,10 hata oranı ile tespit edilmektedir.

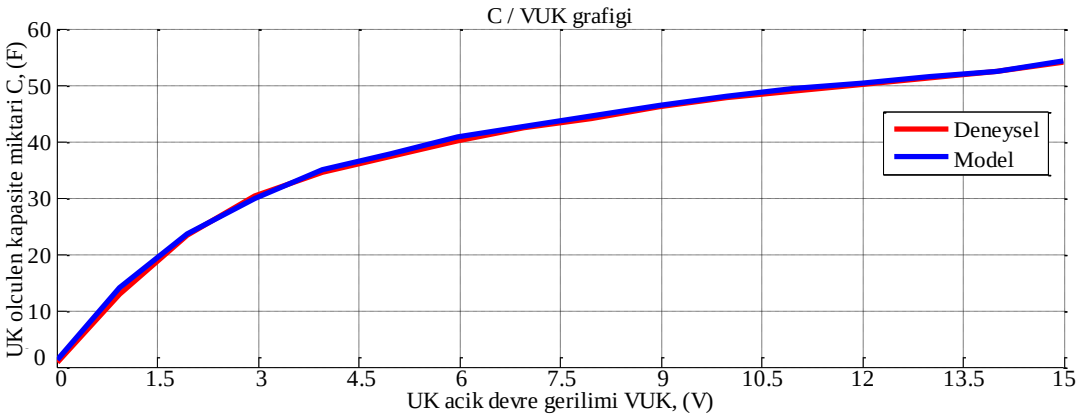
Şekil 5.16'da ultrakapasitör sabit 4,5A şarj deney sonuçları ve modelleme karşılaştırma sonucu verilmektedir. Yapılan ultrakapasitör sabit 4,5A şarj modelleme

çalışması sonucunda Denklem (5.21) formülüyle hesaplanarak, ultrakapasitör açık devre gerilimi deneysel değerlere maksimum %2,07 hata oranı ile yaklaşılmaktadır.



Şekil 5.16. Ultrakapasitör sabit 4,5A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

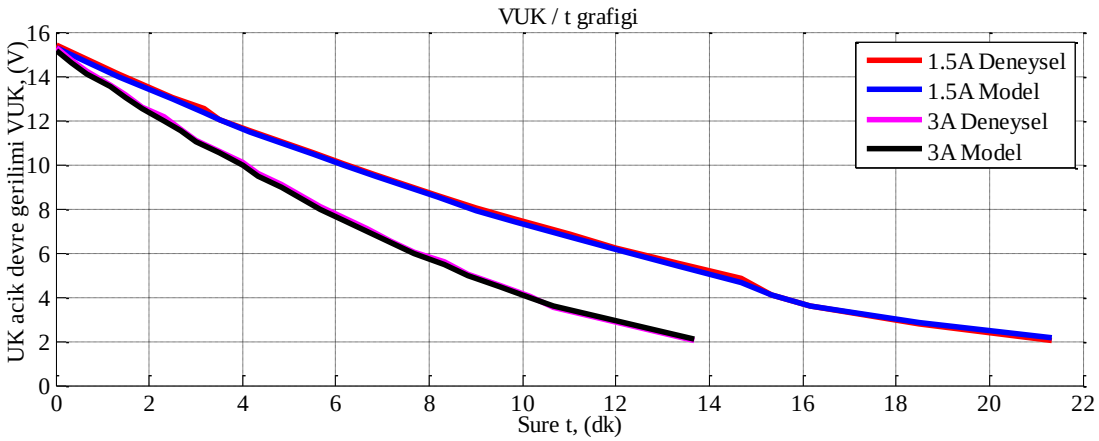
Şekil 5.17'de son ultrakapasitör şarj deneyi olan sabit 6A şarj deney sonuçları ve modelleme sonuçları verilmektedir. Ultrakapasitör şarj modelleme çalışmalarının tamamı Denklem (5.18)'de verilen formül ile elde edilmektedir. Bu modelleme çalışması sonucunda da ultrakapasitör açık devre gerilimi deneysel sonuçlarına maksimum %1,86 hata oranı ile yaklaşılmaktadır.



Şekil 5.17. Ultrakapasitör sabit 6A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

Tez çalışmasının bu bölümünde ultrakapasitör deşarj deneylerinde alınan sonuçların modelleme çalışmaları verilmektedir. Ultrakapasitör deşarj modelleme çalışmaları Denklem (5.20)'de verilen formül ile elde edilmektedir. Ultrakapasitör deşarj deney sonuçlarında zamana bağlı olarak ultrakapasitör terminal uçlarındaki gerilimin değişimi incelenmektedir. Şekil 5.18'de ultrakapasitör 1,5A ve 3A deşarj deney sonucu ve modelleme çalışmaları verilmektedir. Yapılan 1,5A ve 3A ultrakapasitör

deşarj modelleme sonuçları Denklem (5.21) formülüyle hesaplanarak, deneysel değerlere maksimum 1,5A'de %4,12, 3A'de %4,95 hata oranı ile yaklaşmaktadır. Modelleme denkleminde değişen bu süre değerleri eğrinin eğimini belirlemekte ve hangi amper değerinde deşarj olursa olsun elde edilen denklem deneysel sonuçlar ile maksimum %4,12 ve %4,95 hata oranı ile örtüşmektedir.



Şekil 5.18. Ultrakapasitör 1,5A ve 3A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması

Tez çalışmasında sonuç olarak yapılan batarya ve ultrakapasitör şarj/deşarj deneyleri, modelleme çalışmalarına alınarak batarya için doluluk durumu, ultrakapasitör için kapasite miktar değişim miktarı tahmini yapılmıştır. Tablo 5.1'de tez çalışmasında deneysel ölçümler ile modelleme denklem sonuçlarının karşılaştırma sonucunda hata oran miktarları verilmektedir. Önerilen modelleme denklemleri batarya ve ultrakapasitör için farklı şarj/deşarj deneyleriyle kıyaslama imkânı sağlanmaktadır. Farklı akım değerlerindeki batarya ve ultrakapasitör şarj/deşarj modelleme çalışmaları yapılarak denklemlerin doğruluğu kıyaslanmıştır ve sonuç olarak kabul edilebilir hata oranlarına sahip bir matematiksel denklem oluşturulmuştur.

Tablo 5.1. Modelleme çalışma sonucundaki hata oranları

Şarj Modelleme Çalışmaları Hata Oranları							
Batarya	Hyundai 1A			Vision basit 4,4A			
Hata (%)	4,3			0,9			
UltraKp.	1,5 A		3 A	4,5 A		6 A	
Hata (%)	1,06		3,10	2,07		1,86	
Deşarj Modelleme Çalışmaları Hata Oranları							
Batarya	Hyundai 1A	Hyundai 3A	Vision Sabit 4,4A	Vision Sabit 10A	Hipower 15,6A	Hipower 32,5A	Hipower 49,1A
Hata (%)	4,1	8,6	1,18	3,6	1,17	1,39	1,93
UltraKp.	1,5A			3A			
Hata (%)	4,12			4,95			

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında yenilenebilir enerji kaynakları için önemli bir yeri olan batarya ve ultrakapasitör depolama birimlerinin modelleme çalışmaları yapılmıştır. Kesintili ve kararsız olan fotovoltaik panellerde üretilen enerjinin depolanması için uygulamalarda batarya ve ultrakapasitörler kullanılmaktadır. Batarya ve ultrakapasitör depolama birimlerinin kontrolü, depolama birimlerinin sağlığı ve ömrü açısından önemlidir. Bataryayı aşırı şarj ve deşarj etmek hücrelerin zarar görmesine, yıpranmasına ve bataryanın ön görülen çevrim sayısı ve ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Aynı şekilde ultrakapasitörleride üretici tarafından belirlenen çalışma şartları altında kullanmak ve çalışma gerilim değerinin üzerine çıkılmamaya özen göstermek gerekir. Hibrit enerji depolama sistemlerinde kullanılan enerji yönetim algoritmasının doğru ve kararlı çalışması kontrol algoritmasına girilen verilere bağlıdır. Bu yüzden depolama birimlerinin doğru bir şekilde modellenmesi enerji yönetim algoritması için önemlidir. Bu tez çalışmasının amacı, batarya ve ultrakapasitörlerin modelleme çalışmaları yapılarak enerji yönetim algoritmalarının geliştirilmesine yardımcı olmaktır.

Tez çalışmasında, batarya ve ultrakapasitör şarj ve deşarj edilerek modelleme çalışması için gerekli parametreler ölçülmüştür. Batarya modelleme çalışmaları için iki çeşit kimyasal yapıya sahip batarya incelenmiştir. İlk olarak çok yaygın olarak kullanılan kurşun-asit batarya incelenmiştir. Bunlardan ilki Hyundai marka 12V (20Hr) 7,2Ah kapasiteye sahip kurşun-asit bataryadır. Bu batarya düşük enerji kapasitesine sahip ve küçük depolama uygulamalarında kullanılmaktadır. Bir diğer batarya Vision 12V (20Hr) 80Ah kapasiteye sahip kurşun-asit bataryadır. Bu bataryanın enerji depolama kapasitesi yüksek olduğundan uzun süreli enerji gereksinimi olan uygulamalarda kullanılmaktadır. Bir diğer tip batarya olan $LiFePO_4$, kurşun-asit bataryalara göre daha fazla enerji depolama kapasitesine sahiptir. Bu batarya çeşidi de telekomünikasyon uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Tez çalışmasında bataryalar ile farklı değerlerde şarj ve deşarj deneyleri yapılmıştır. Bataryayı şarj ve deşarj ederken sabit gerilim ile şarj, sabit akım ile şarj, sabit yük ile deşarj ve sabit akım ile deşarj deneyleri yapılmıştır. Tez çalışmasında yapılan şarj deneylerinde bataryayı şarj ederken özellikle bataryaya uygulanan gerilim değerinin batarya sağlığı açısından önemli olduğu gözlenmiştir. Eğer batarya katalog bilgilerinde verilen şarj etme gerilim değerini aşarsa batarya aşırı şarjdan dolayı fiziksel olarak hücrelerin aralarındaki uzaklığın arttığı gözlenmiştir. Batarya şarj işlemlerinde bataryanın boş olduğu durumda dinamik iç direncinin çok yüksek olduğu şarj oldukça batarya dinamik iç direncinin düştüğü gözlenmektedir. Hyundai marka batarya için bu dinamik iç direnç değeri 0,29Ω - 8,23Ω arasında bir değerdedir. Aynı batarya deşarj işlemleri sırasında dinamik iç direncinin 0,29Ω - 8,23Ω arasında olduğu gözlenmiştir. Vision marka bataryada dinamik iç direnç değeri şarj deneylerinde 0,152Ω - 0,065Ω, deşarj işlemlerinde 0,025Ω - 0,536Ω olarak hesaplanmıştır. $LiFePO_4$ batarya deşarj deneyinde batarya dinamik iç direnci 0,0016Ω - 0,1143Ω olarak bulunmuştur. Özellikle batarya deşarj deneylerinde katalog bilgilerinde yer alan 20Hr ifadesi yani bataryanın 0,05C oranında ve 0,036A ile deşarj edildiğinde 20 saat enerji verebildiği, bu akım değerinin üzerine çıkıldığında Peukart eğrisinin de açıkladığı gibi batarya toplam kapasitesinin çok altında bir enerji verdiği gözlenmiştir. Batarya sabit deşarj akımında yapılan deneylerde, aynı başlangıç akımındaki sabit yük deşarj deneylerine göre bataryanın doluluk durumunun daha çabuk bittiği gözlenmektedir. Hyundai marka kurşun-asit bataryada 3A deşarj için sabit yük altında 86dk iken, sabit deşarj akım deneyinde bu süre 38dk olarak hesaplanmıştır. Bunun da sebebi batarya hücrelerinin sabit akım değerinde daha çok zorlanmasıdır. Bu yüzden toplam kapasite miktarı düşmektedir. Ayrıca batarya sıcaklık deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Batarya sıcaklık deneyleri sonucunda bataryanın sıcaklığı azaldıkça kimyasal reaksiyon hızının düştüğü bataryanın daha düşük gerilim değerinde çalıştığı gözlenmektedir. Batarya sıcaklığı arttıkça kimyasal reaksiyon hızı arttığından batarya terminal uçlarındaki gerilim değerinin yükseldiği fakat yüksek sıcaklıklarda hücrelerin zarar gördüğü tespit edilmektedir.

Bu deneyler doğrultusunda batarya şarj ve deşarj modelleme çalışmalarında toplam kapasite değişimi belirlenerek parametreler elde edilmiştir. Belirlenen parametreler

doğrultusunda bataryanın şarj ve deşarj modelleri çıkartılmaktadır. Bu modelleme çalışmaları eğri uydurma "curve fitting" yöntemi ile elde edilmektedir. Şarj modelleme çalışmalarında elde edilen model denklemi ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hyundai marka batarya 1A şarj modelleme çalışmasında maksimum %4,3 ve Vision marka batarya sabit 4,4A şarj modelleme çalışmasında maksimum %0,9 hata oranları ile sonuçlandığı gözlenmiştir. Aynı şekilde deşarj modelleme çalışmalarında deşarj denklemi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu deşarj modeli ile deneysel sonuç karşılaştırılmıştır ve bu modellemelerde Hyundai marka 1A deşarj deneyinde maksimum %4,1'lik hata oranı çıktığı gözlenmiştir.

Tez çalışmasında, diğer bir depolama birimi olan ultrakapasitör şarj ve deşarj deneyleri yapılmıştır. Ultrakapasitörler, bataryalar ile karşılaştırıldığında enerji yoğunluğu düşük, maliyetleri yüksektir. Fakat cevap sürelerinin kısa olması ile düşük enerji ve yüksek güçlü uygulamalarda önemli bir yere sahiptirler. Yapılan şarj ve deşarj deney sonuçlarında ultrakapasitörün, elektriksel olarak yüksek kapasiteli bir kondansatör gibi davrandığı gözlenmiştir. Ultrakapasitörün bataryalara kıyasla çok hızlı bir şekilde şarj ve deşarj olduğu tespit edilmiştir. Ultrakapasitörlerde bataryalarda olduğu gibi değişen bir eşdeğer seri devre direnci bulunmaktadır. Ön dirençli şarj deneylerinde bu eşdeğer seri iç direnç değeri 0,038Ω - 0,691Ω olarak hesaplanmıştır. Deşarj deneylerinde ise eşdeğer seri iç direnç değeri 0,110Ω - 0,192Ω olarak belirlenmiştir. Ultrakapasitörlerde ayrıca eşdeğer paralel iç direnç değeri bulunmaktadır ve deney sonucunda bu direnç değeri 9,585kΩ olarak hesaplanmıştır. Ultrakapasitör şarj modelleme çalışmaları ultrakapasitör açık devre gerilim deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında maksimum %3,10 hata oranı ile yaklaşık değerler tespit edilmiştir. Aynı şekilde deşarj modelleme çalışmaları da deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında deneysel değerlere maksimum %4,95 hata oranı ile yaklaşmaktadır.

Tez çalışmasında batarya ve ultrakapasitör modelleme çalışmaları gerçekleştirilerek matematiksel denklemler elde edilmiştir. Böylelikle batarya ve ultrakapasitör şarj/deşarj işlemleri sırasında doluluk oranı ve kapasite miktarı doğrulukla tespit edilebilmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda özellikle şarj deneyleri sırasında yüksek akım değerlerinde kontrollü akım kaynağı kullanılarak daha fazla sayıda deneysel sonuçlar alınabilir. Aynı şarj modelleme denklemlerinin bu deney sonuçlarına uygulanmasıyla düşük hata oranları ile yaklaşım gerçekleştirileceği öngörülmektedir. Ultrakapasitör şarj deneysel çalışmalarında ön şarj direnci kullanılmıştır. Bunun sebebi ölçümleri doğru bir şekilde okuyabilmektir. "Datalogger" cihazı ile ön şarj direnci olmadan ultrakapasitörün akım ve gerilim değerleri daha hızlı bir şekilde kayıt edilebilir.

Bataryaların dinamik iç direnci ultrakapasitörlere kıyasla sıcaklıkla çok fazla değişim göstermektedir. Bu yüzden çok sıcak ve çok soğuk iklim koşulları altındaki enerji depolama uygulamaları için ultrakapasitörler tercih edilmelidir. Ultrakapasitörler hızlı bir şekilde şarj/deşarj akım kapasitesine sahip olduğundan ani yük talebi olan uygulamalarda tercih edilebilir. Bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna, ultrakapasitörler yüksek güç yoğunluğuna sahip depolama birimleridir. Uzun süreli enerji talebini karşılamak için bataryalar, kısa süreli ani yük ihtiyacını karşılamak için ultrakapasitör depolama birimleri kullanılmalıdır.

Kurşun-asit bataryalı depolama sisteminin ilk kurulum maliyeti lityum-iyon bataryalara kıyasla daha düşüktür. Fakat batarya çevrim ömrü, batarya deşarj derinliği, düşük hacimsel alanda yüksek kapasite miktarı açısından lityum-iyon bataryalar kurşun-asit bataryalara kıyasla daha çok avantaja sahiptirler. Bundan dolayı kurulumu yapılacak enerji depolama sisteminin öncelikli olan ihtiyaca göre batarya tercihi yapılmalıdır.

Bataryalar, günümüzde üretimi giderek yaygınlaşan elektrikli araçlarda birincil enerji kaynak olarak kullanılmaktadır. Elektrikli araç uygulamalarında batarya enerji kapasitesinin (SOC) ne kadar kaldığı, batarya sağlığının (SOH) ne durumda olduğu sürücüyü doğru bir şekilde bilgilendirmek önemlidir. Tez çalışmasında bataryanın doluluk durumu (SOC) ile ilgili modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bataryanın sağlığı ile ilgili çalışmalar yapılarak elektrikli araç uygulamalarına da katkıda bulunulabilir.

KAYNAKLAR

[1] Atabay M., Lityum-İyon Bataryaların Fotovoltaik Sistemlerde Uygulanabilirliliğinin Diğer Batarya Tipleri ile Karşılaştırılmalı Olarak Araştırılması, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006, 197358.

[2] Kayıklı T., Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum-Polimer Batarya için Şarj Cihazı Geliştirme, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2008, 373287.

[3] Linden D., Reddy T. B., *Handbook of Batteries*, 3d ed, McGraw-Hill Press, New York, 2001.

[4] Swierczynski M., Store I. D., Stan I. A., Teodorescu R., Vikelgaard H., Selection and impedance based model of a lithium ion battery technology for integration with Virtual Power Plant, *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, Germany, 2-6 September 2013.

[5] http://www.mpoweruk.com/lithiumS.htm (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2015).

[6] http://batteryuniversity.com/learn/article/explaining_lithium_ion_chemistries (Ziyaret tarihi: 25 Ekim 2015).

[7] Moshirvaziri A., Lithium-Ion Battery Modeling for Electric Vehicles and Regenerative Cell Testing Platform, Master Thesis, University of Toronto, Graduate Department of Electrical and Computer Engineering, Canada, 2013.

[8] http://www.mpoweruk.com/chemistries.htm (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2015).

[9] Ceylan M., Lityum-İyon Tabanlı Pillerin Elektriksel Eşdeğer Modelinin Çıkartılması, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2013, 341434.

[10] Zupa T., Liska O., Charging module for newest types of rechargeable batteries $LiFePO_4$, *8th IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*, Herlany, Slovakia, 28-30 January 2010.

[11] Sinkaram C., Asirvadam V. S., Nor N. B. M., Capacity Study of lithium ion Battery for Hybrid Electrical Vehicle (HEV) A Simulation Approach, *IEEE International Conference on Signal and Irnage Processing Applications (ICSIPA)*, Melaka, Malaysia, 8-10 October, 2013.

[12] Chih A., Hua C., Zong B., Syue W., Charge and Discharge Characteristics of Lead-Acid Battery and $LiFePO_4$ Battery, *International Power Electronics Conference*, Sapporo, Japan, 21-24 June 2010.

[13] Barlak C., Batarya Model Parametrelerinin, Doluluk Durumunun, Sağlık Durumunun Kestirimi ve Ni-MH Bataryalara Uygulanması, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009, 270212.

[14] Maxwell Technologies, Enabling Energy's Future Value Proposition Product and Services, *Ultracapacitor Seminar*, Istanbul, 09 February 2012.

[15] Maxwell Technologies, Enabling Energy's Future Technology at Glance, *Ultracapacitor Seminar*, Istanbul, 09 February 2012.

[16] Maxwell Technologies, Enabling Energy's Future Experience, Results and Benefits, *Ultracapacitor Seminar*, Istanbul, 09 February 2012.

[17] Maxwell Technologies, Enabling Energy's Future Experience, Applications, *Ultracapacitor Seminar*, Istanbul, 09 February 2012.

[18] Whittingham M. S., History, Evolution, and Future Status of Energy Storage, *Proceedings of the IEEE Issue Special Centennial*, 2012, **100**, 1518-1534.

[19] Özermiş M. E., Kurşun Asit Akülerin Optimum Şarj Olmasını Sağlayan Şarj Devresi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2010, 275329.

[20] http://www.mpoweruk.com/performance.htm (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2015).

[21] http://www.mpoweruk.com/soc.htm (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2015).

[22] http://www.mpoweruk.com/bms.htm (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2015).

[23] http://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2015).

[24] Rao R., Vrudhula S., Rakhmatov D. N., Battery Modeling for Energy-Aware System Design, *IEEE on Computer*, 2003, **36**, 77-87.

[25] http://www.mpoweruk.com/life.htm (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2015).

[26] http://www.mpoweruk.com/soh.htm (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2015).

[27] http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_define_battery_life (Ziyaret tarihi: 20 Eylül 2015).

[28] Chiasson J., Vairamohan B., Estimating the State of Charge of a Battery, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, **13**, 465-470.

[29] Andrea D., *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*, 1st ed, Artech House Press, USA, 2010.

[30] Islam S., Hossain B., Hossain N., Alam S. B., Chowdhury E. H., Modeling of a Double-Layer Capacitor with Individual Branch Response, *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco*, USA , 20-22 October 2010.

[31] Shi L., Crow M. L., Comparison of Ultracapacitor Electric Circuit Models, *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, 20-24 July 2008.

[32] Spyker R. L., Nelms R. M., Classical Equivalent Circuit Parameters for a Double-Layer Capacitor, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,* 2000, **36,** 829-836.

[33] Maxwell Technologies, 15V Power and Energy Series Ultracapacitor Packs, *Maxwell Technologies Data Sheet*, BPAK0058 B01, 1-3, 2013.

[34] Sayın A. A., Yüksel İ., Elektrikli Renault Fluence Aracı, Lityum-İyon Bataryasının Modellenmesi ve Batarya Yönetimi, *12. Otomotiv ve Üretim Teknolojileri Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 13-14 Mayıs 2011.

[35] Bajrachatya Q., Dynamic Modeling, Monitoring and Control of Energy Storage System, Master thesis, University of Karlstads, Faculty of Technology and Science, Department of Pysics and Electrical Engineering, Karlstad, 2013.

[36] Xing W. W., Research on Energy Storage of Super Capacitor, Accumulator and Lithium Batteries in Distributed Systems, *International Frequency Sensor Association (IFSA), Sensors & Transducers Journal*, 2014, **173**, 204-209.

[37] Jongerden M. R., Haverkort . R., Which battery model to use?, *24th UK Performance Engineering Workshop*, London, UK, 3-4 July 2008.

[38] Bae K., Choi S., Kim J., Won C., Jung Y., $LiFePO_4$ Dynamic Battery Modeling for Battery Simulator, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Busan, Korea, 26 February-1 March 2014.

[39] Chroma, Programmable DC Electronic Load, *Chroma Operation & Programming Manual*, 6310A Series, 1-204, 2013.

[40] Hadartz M., Battery-Supercapacitor Energy Storage, Master thesis, Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Division of Electrical Engineering, Göteborg, Sweden, 2008.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

[1] **Kırçiçek Y.,** Aktaş A., Uçar M., Özdemir Ş., Özdemir E., Modeling and Analysis of a Battery Energy Storage System Supplied from Photovoltaic Power Source, *7th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Uşak, Turkey, 18-20 June 2014.

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Gaziantep'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli'de tamamladı. 2009 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden 2013 yılında mezun oldu. 2013 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı.