



**SİMETRİK SÜPERKAPASİTÖR CİHAZ
PERFORMANSLARI VE ANALİZLERİ**

Selin AKTAŞ

Yüksek Lisans Tezi

**Kimya Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Murat ATEŞ
2020**

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SİMETRİK SÜPERKAPASİTÖR CİHAZ PERFORMANSLARI VE
ANALİZLERİ**

Selin AKTAŞ

KİMYA ANABİLİM DALI

Prof. Dr. Murat ATEŞ

TEKİRDAĞ-2020

Her hakkı saklıdır.



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde eksiksiz biçimde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Selin AKTAŞ

İMZA



Bu tez TÜBİTAK tarafından 117M042 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Prof. Dr. Murat ATEŞ danışmanlığında, Selin AKTAŞ tarafından hazırlanan “Simetrik Süperkapasitör Cihaz Performansları ve Analizleri” başlıklı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından 02.03.2020 tarihinde Kimya Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı : Doç. Dr. Haydar ÖZKAN

İmza:

Üye : Prof. Dr. Murat ATEŞ

İmza:

Üye : Doç. Dr. Yelda Yalçın GÜRKAN

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Doç. Dr. Bahar UYMAZ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SİMETRİK SÜPERKAPASİTÖR CİHAZ PERFORMANSLARI VE ANALİZLERİ

Selin AKTAŞ

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat ATEŞ

Sentezlenen rGO/RuO₂/PVK, rGO/MnO₂/PTTh ve rGO/TiO₂/PEDOT nanokompozit malzemelerin DV, GCD, EES gibi çeşitli yöntemlerde çalışmalar yapılarak elde edilen nanokompozit malzemelerin spesifik güçleri ve enerji yoğunlukları, ve stabiliteleri hakkında bilgiler edinildi. Elektrokimyasal performans ölçümleri sırasında 1 M H₂SO₄ elektrolit çözeltisi kullanıldı. Bu çeşitli yöntemler sonucunda EES değerlerine ulaşıldı bu değerlerden yola çıkılarak ZSimpWin simülasyon devre programı kullanıldı. Bu programdaki verilerden yararlanılarak nanokompozitlerde uygulanabilecek gerçek devreler kuruldu. Tezde, ileride ticari süperkapasitörler de de uygulanabilecek devre modelleri hakkında bilgiler verilmektedir. rGO / RuO₂ / PVK nanokompozit için LR₁Q(CR₂), LR₁(QR₂(C_{d1}R₃)), LR(QR), LRQ(CR), R(CR) ve LR(CR)(QR) gerçek devre modelleri ile uygulandı. rGO/MnO₂/PTTh nanokompozit için ise; R(QR), R(CR), RQ, LR(QR) devre modelleriyle uyumlu olduğu tespit edildi. Son olarak rGO/TiO₂/PEDOT nanokompozitler için; R(CR), R(QR), LR₁(C₁(R₂(C₂R₃))), LR₁Q(CR₂), LR₁(QR₂), LR(Q(R(CR))) devre modeli ile uyumlu olduğu sonucuna varıldı .

Anahtar kelimeler: Süperkapasitör, Nanokompozit, Gerçek devre, ZSimpWin devre programı

2020, 140 sayfa

ABSTRACT

MSc. Thesis

SYMMETRICAL SUPERCAPACITOR DEVICE PERFORMANCES AND ANALYSIS APPLICATIONS

Selin AKTAŞ

Tekirdağ Namık Kemal University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Chemistry

Supervisor: Prof. Dr. Murat ATEŞ

The specific strengths and energy densities and the stability of the nanocomposite materials obtained from rGO/RuO₂/PVK, rGO/MnO₂/PTTh and rGO/TiO₂/PEDOT nanocomposite materials were studied by various methods, such as DV, GCD and EES. 1 M H₂SO₄ electrolyte solution was used during electrochemical performance measurements. As a result of these various methods, EES values were reached and ZSimpWin simulation circuit program was used based on these values. By using the data in this program, simulations of real circuit models that can be applied in nanocomposites are shown. It also provides information about circuit models that can be applied to commercial supercapacitors in the future. For rGO/RuO₂/PVK nanocomposites, LR1Q(CR₂), LR₁(QR₂(C_{d1}R₃)), LR(QR), LRQ(CR), R(CR) and LR(CR)(QR) can be applied with real circuit models. For rGO/MnO₂/PTTh nanocomposite; It is found to be compatible with R(QR), R(CR), RQ, LR(QR) circuit models. Finally R(CR), R(QR), LR₁(C₁(R₂(C₂R₃))), LR₁Q(CR₂), LR₁(QR₂), LR(Q(R(CR))) models were applied for rGO/TiO₂/PEDOT nanocomposites.

Keywords: Supercapacitor, Nanocomposite, Real circuit, ZSimpWin circuit programme

2020, 140 pages

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xiii
TEŞEKKÜR.....	xvii
ÖNSÖZ	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	6
2.1. Kapasitörler.....	6
2.1.1. Elektrostatik Kapasitör	7
2.1.2. Elektrolitik Kapasitör.....	8
2.1.3. Elektrokimyasal Kapasitör.....	8
2.2. Süperkapasitörler	8
2.2.1. Elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EÇKK)	11
2.2.2.Pseudo (Yalancı) Süperkapasitörler	15
2.2.2. Hibrit Süperkapasitörler.....	20
2.3. Süperkapasitör Cihaz Tasarımı.....	23
2.3.1. Akım Toplayıcı.....	24
2.3.2. Ayırıcılar.....	25
2.3.3. Elektrolit	26
2.4. Enerji Depolama Sistemleri	30
2.4.1. Batarya Sistemleri.....	30
2.4.2. Güneş Sistemleri.....	31
2.4.3. Yakıt Sistemleri	32
2.5. Elektrokimyasal Ölçüm Teknikleri.....	34
2.5.1. Döngülü Voltametri (DV) Metodu	35
2.5.2. Galvanostatik Yükleme/Boşalma (GCD) Metodu.....	36
2.5.3. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES).....	37
2.6. Süperkapasitörler İçin Hesaplamalar ve İfadeler.....	38
2.7. Eşdeğer Devre Modeli	40
2.7.1. Süperkapasitörlerin Basit Modeli	41

2.7.2. Süperkapasitörlerin İletim Hattı Modeli.....	42
2.7.3. Süperkapasitörlerin Kinetik Parametrelere Dayalı Modeli.....	42
3. MATERYAL ve YÖNTEM	44
3.1. Kullanılan Materyaller.....	44
3.2. Kullanılan Cihazlar	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	45
4.1. rGO/TiO ₂ /PEDOT, rGO/RuO ₂ /PVK ve rGO/MnO ₂ /PTTh Nanokompozitlerinin Ragon Grafiklerinin Karşılaştırılması	45
4.2. Malzemelerin ZSimpWin programı ile Devre Analizleri	48
4.2.1. rGO/RuO ₂ Nanokompozitin Devre Analizleri.....	48
4.2.2. rGO/RuO ₂ /PVK Nanokompozitin Devre Analizleri	53
4.2.3. rGO/RuO ₂ ve rGO/RuO ₂ /PVK Nanokompozitin Devre Modelleri	63
4.2.4. rGO Nanokompozitin Devre Analizleri	64
4.2.5. rGO/MnO ₂ Nanokompozitin Devre Analizleri.....	64
4.2.6. rGO/MnO ₂ /PTTh Nanokompozitin Devre Analizleri	67
4.2.7. rGO, rGO/MnO ₂ ve rGO/MnO ₂ /PTTh Nanokompozitin Devre Modelleri	77
4.2.8. rGO/ TiO ₂ Nanokompozitin Devre Analizleri.....	78
4.2.9. rGO/TiO ₂ /PEDOT Nanokompozitin Devre Analizleri.....	78
4.2.10. rGO/TiO ₂ ve rGO/TiO ₂ /PEDOT Nanokompozitin Devre Modelleri	85
4.3. Ticari Süperkapasitörlerin Performans Sonuçları.....	86
4.3.1. Şarj İşlemi Sonuçları.....	86
4.3.2. Deşarj İşlemi Sonuçları.....	88
4.3.3. Tezde Kullanılan Süperkapasitörlerin Şarj- Deşarj İşlemi Sonuçları.....	90
4.4. rGO/TiO ₂ /PEDOT, rGO/RuO ₂ /PVK ve rGO/MnO ₂ /PTTh Nanokompozitlerinin Gerçek Devre Uygulamaları	90
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	94
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ	122

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1. Pil ve Süperkapasitörün özellikleri (Das ve Mandal, 2018).	31
Çizelge 2.2. Farklı çeşitlerde yakıt pillerin çalışma sıcaklıkları ve verimlilikleri (Keskin, 2014).	33
Çizelge 4.1. TiO ₂ kullanılan nanokompozitlerin enerji-güç ve kapasitans değerleri.	46
Çizelge 4.2. RuO ₂ kullanılan nanokompozitlerin enerji-güç ve kapasitans değerleri.	47
Çizelge 4.3. MnO ₂ kullanılan nanokompozitlerin enerji-güç ve kapasitans değerleri.	48
Çizelge 4.4. [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:1 nanokompozitin LR(CR)(QR) devre ölçümünün sonuçları.	49
Çizelge 4.5. [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:1 nanokompozitin LRQ(CR) devre ölçümünün sonuçları.	49
Çizelge 4.6. [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:1 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.	50
Çizelge 4.7. [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:1 nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre ölçümünün sonuçları.	51
Çizelge 4.8. [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:1 nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.	51
Çizelge 4.9. [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:2 nanokompozitin LRQ(CR) devre ölçümünün sonuçları.	52
Çizelge 4.10. [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:3 nanokompozitin LRQ(CR) devre ölçümünün sonuçları.	52
Çizelge 4.11. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:1 nanokompozitin LR(QR(CR)) devre ölçümünün sonuçları.	53
Çizelge 4.12. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[PVK] _o = 1:1:1 nanokompozitin LR(CR)(QR) devre ölçümünün sonuçları.	54
Çizelge 4.13. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:1 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.	54
Çizelge 4.14. [rGO] _o / RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:1 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün	55
Çizelge 4.15. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o =1:1:1 nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.	56
Çizelge 4.16. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:3 nanokompozitin LR(QR(CR)) devre ölçümünün sonuçları	56
Çizelge 4.17. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:3 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları	57
Çizelge 4.18. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:3 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.	57
Çizelge 4.19. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:3 nanokompozitin LR(CR)(QR) devre ölçümünün sonuçları	58
Çizelge 4.20. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o =1:1:3 nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.	58
Çizelge 4.21. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:5 nanokompozitin LR(QR(CR)) devre ölçümünün sonuçları	59

Çizelge 4.22. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:5 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.	59
Çizelge 4.23. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:5 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.	60
Çizelge 4.24. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:5 nanokompozitin LR(CR)(QR) devre ölçümünün sonuçları.	61
Çizelge 4.25. [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o =1:1:5 nanokompozitin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.....	61
Çizelge 4.26. [rGO] _o /[RuO ₂] _o ve [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o =1:1:1, 1:1:3, 1:1:5 nanokompozitlerinin LR(CR)(QR) devre ölçümünden elde edilen sonuçları.....	62
Çizelge 4.27. rGO nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.....	64
Çizelge 4.28. rGO/MnO ₂ nanokompozitin R(QR) devre ölçümünün sonuçları.	65
Çizelge 4.29. rGO/MnO ₂ nanokompozitin RQ devre ölçümünün sonuçları.....	65
Çizelge 4.30. rGO/MnO ₂ nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.....	66
Çizelge 4.31. rGO/MnO ₂ nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.....	66
Çizelge 4.32 [rGO] _o /[MnO ₂] _o =1:1 nanokompozitin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.	67
Çizelge 4.33. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:1 nanokompozitin R(QR) devre ölçümünün sonuçları.	67
Çizelge 4.34. [rGO] _o /[MnO ₂] _o =1:1:1 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları .	68
Çizelge 4.35. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:1 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.	69
Çizelge 4.36. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:1 nanokompozitin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.....	69
Çizelge 4.37. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:2 nanokompozitin RQ devre ölçümünün sonuçları.	69
Çizelge 4.38. rGO/MnO ₂ /[TTh] _o =1:1:2 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.	70
Çizelge 4.39' da [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:2 nanokompozitin R(QR) devre ölçümünün sonuçları.	71
Çizelge 4.40. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:2 nanokompozitin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.....	71
Çizelge 4.41. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:3 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.	72
Çizelge 4.42. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:3 nanokompozitin R(QR) devre ölçümünün sonuçları.	72
Çizelge 4.43. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:3 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.	73
Çizelge 4.44. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:3 nanokompozitin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.....	73

Çizelge 4.45. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:5 nanokompozitin R ₁ (QR ₂) devre ölçümünün sonuçları.	74
Çizelge 4.46. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:5 nanokompozitin RQ devre ölçümünün sonuçları.	74
Çizelge 4.47. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:5 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.	75
Çizelge 4.48. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:5 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.	75
Çizelge 4.49. [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:5 nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.....	76
Çizelge 4.50. R(QR) eşdeğer devre modelinin rGO/MnO ₂ ve [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o = 1/1/1, 1/1/3, 1/1/5 oranlarındaki nanokompozitlerdeki analizi.....	77
Çizelge 4.51. [rGO] _o /[TiO ₂] _o =1:1, nanokompozitin devre analizi. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiği nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.	78
Çizelge 4.52. [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1 nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre ölçümünün sonuçları.	79
Çizelge 4.53. [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o = 1:1:1 nanokompozitin LR ₁ (QR ₂) devre ölçümünün sonuçları.	79
Çizelge 4.54. [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1 nanokompozitin LR ₁ Q(CR ₂) devre ölçümünün sonuçları.	80
Çizelge 4.55. [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1 nanokompozitin LR(C(R(CR))) devre ölçümünün sonuçları.	81
Çizelge 4.56. [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.	81
Çizelge 4.57. [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1 nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.....	82
Çizelge 4.58. [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:2:1 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.	82
Çizelge 4.59. [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:5:1 nanokompozitin R(QR) devre ölçümünün sonuçları.	83
Çizelge 4.60. [rGO] _o / [TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:5:1 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları	83
Çizelge 4.61. [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o = 1:5:1 nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerler.	84
Çizelge 4.62. rGO/TiO ₂ /PEDOT nanokompozitlerinin R(CR) devre ölçümünden elde edilen sonuçları.	85
Çizelge 4.63. Ticari süperkapasitörlerin dirençsiz olarak şarj işlemlerinin sonuçları.....	88
Çizelge 4.64. Ticari süperkapasitörlerin 10Ω'luk direnç kullanarak şarj işlemlerinin sonuçları Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
Çizelge 4.65. Ticari süperkapasitörlerin 330 Ω'luk dirençli olarak lambanın yanma süreleri sonuçları	89

Çizelge 4.66. Ticari süperkapasitörlerin 1 k Ω 'luk dirençli olarak lambanın yanma süreleri .89

Çizelge 4.67. Tezde kullanılan nanokompozitlerin LED kırmızı lambanın yanma süreleri90



ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2.1. Kapasitörlerin sınıflandırılması.....	7
Şekil 2.2. Süperkapasitörlerin tarihi gelişimi (Conte, 2010).....	8
Şekil 2.3. Helmholtz Modeli, Gouy ve Chapman Modeli, Stern Modeli.....	10
Şekil 2.4. Süperkapasitörlerin Sınıflandırılması.....	11
Şekil 2.5. Grafenin farklı ebatlarda şekilleri (Geim ve Novoselov, 2007).....	14
Şekil 2.6. Pseudo (Yalancı) süperkapasitörlerin sınıflandırılması.	15
Şekil 2.7. Hibrit süperkapasitörlerin sınıflandırılması.	20
Şekil 2.8. a) Üç elektrotlu (yarı hücreli) sistemli süperkapasitör, b) iki elektrotlu hücreli süperkapasitör, c) esnek katı halindeki süperkapasitör, d) fiber süperkapitör, e) düzlemsel (mikro) süperkapitörün (Ji, Mi ve Yang, 2019).	24
Şekil 2.9 a) İdeal çift tabakalı süperkapasitörün b) pseudo(yalancı) süperkapasitörün DV grafikleri.	36
2.10. a) GCD uyarılma işlemi sırasındaki potansiyel ile zamana karşı oluşan değişim b) GCD uyarılmadan sonra akım ile zamana karşı oluşan değişimi	37
Şekil 2.11. Randles devresinin şematik gösterimi.....	38
Şekil 2.12. Süperkapasitörlerdeki basit eşdeğer modeli.....	42
Şekil 2.13. Süperkapasitörlerdeki üç aşamalı eşdeğer modeli	42
Şekil. 2.14. Çift tabakalı süperkapasitörün kinetik parametrelere dayalı eşdeğer modeli	43
Şekil 4.1. a) rGO/TiO ₂ /PEDOT, b) rGO/RuO ₂ /PVK, c) rGO/MnO ₂ /PTTh ve nanokompozitlerinin Ragon grafikleri.....	45
Şekil 4.2. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:1 nanokompozitin LR(CR)(QR) devre analizi.	49
Şekil 4.3. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:1 nanokompozitin LRQ(CR) devre analizi.....	49
Şekil 4.4. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:1 nanokompozitin LR(QR) devre analizi.	50
Şekil 4.5. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:1 nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre analizi.....	51
Şekil 4.6. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:2 nanokompozitin LRQ(CR) devre analizi.....	52
Şekil 4.7. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:3 nanokompozitin LRQ(CR) devre analizi.....	52
Şekil 4.8. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:1 nanokompozitin LR(QR(CR)) devre analizi.	53
Şekil 4.9. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:1 nanokompozitin LR(CR)(QR) devre analizi.	54
Şekil 4.10. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:1 nanokompozitin LR(CR)(QR) devre analizi.....	54

Şekil 4.11. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1$ nanokompozitin R(CR) devre analizi.....	55
Şekil 4.12. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:3$ nanokompozitin LR(QR(CR)) devre analizi.....	56
Şekil 4.13. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:3$ nanokompozitin R(CR) devre analizi.	56
Şekil 4.14. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:3$ nanokompozitin LR(QR) devre analizi.	57
Şekil 4.15. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:3$ nanokompozitin LR(CR)(QR) devre analizi.....	57
Şekil 4.16. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:5$ nanokompozitin LR(QR(CR)) devre analizi.....	59
Şekil 4.17. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:5$ nanokompozitin R(CR) devre analizi.	59
Şekil 4.18. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:5$ nanokompozitin LR(QR) devre analizi.....	60
Şekil 4.19. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:5$ nanokompozitin LR(CR)(QR) devre analizi.	61
Şekil 4.20. ZSimpWin kullanılarak sırasıyla; a) $[rGO]_o/[RuO_2]_o = 1/1$, b) $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1$, c) $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:3$, d) $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:5$ oranlarındaki rGO/RuO ₂ /PVK nanokompozitlerinden elde edilen eşdeğer LR(CR)(QR) devre modeli.	62
Şekil 4.21. $[rGO]_o/[RuO_2]_o$ ve $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1, 1:1:3, 1:1:5$ nanokompozitin devre modellerinin isimleri; a) LR ₁ Q(CR ₂), b) LR ₁ (QR ₂ (C _{d1} R ₃)), c) LR(QR), d) LRQ(CR), e) R(CR), f) LR(CR)(QR) ve devre modellerinin şekilleri.	63
Şekil 4.22. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; rGO nanokompozitin LR(QR) devre analizi.	64
Şekil 4.23. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; rGO/MnO ₂ nanokompozitin R(QR) devre analizi.....	65
Şekil 4.24. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; rGO/MnO ₂ nanokompozitin RQ devre analizi.	65
Şekil 4.25. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; rGO/MnO ₂ nanokompozitin R(CR) devre analizi.	66
Şekil 4.26. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; rGO/MnO ₂ nanokompozitin LR(QR) devre analizi.	66
Şekil 4.27. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[MnO_2]_o/[TTh]_o=1:1:1$ nanokompozitin R(QR) devre analizi.	67
Şekil 4.28. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[MnO_2]_o/[TTh]_o=1:1:1$ nanokompozitin LR(QR) devre analizi.....	68
Şekil 4.29. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[MnO_2]_o/[TTh]_o=1:1:1$ nanokompozitin R(CR) devre analizi.	68

Şekil 4.30. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:2 nanokompozitin RQ devre analizi.....	69
Şekil 4.31. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o = 1:1 2 nanokompozitin LR(QR) devre analizi.....	70
Şekil 4.32. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o = 1:1 2 nanokompozitin R(QR) devre analizi	70
Şekil 4.33. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o nanokompozitin LR(QR) devre analizi.	71
Şekil 4.34. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o nanokompozitin R(QR) devre analizi.....	72
Şekil 4.35. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:3 nanokompozitin R(CR) devre analizi.	73
Şekil 4.36. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:5 nanokompozitin R(QR) devre analizi.	74
Şekil 4.37. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:5 nanokompozitin RQ devre analizi.....	74
Şekil 4.38. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:5 nanokompozitin R(CR) devre analizi.	75
Şekil 4.39. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:5 nanokompozitin LR(QR) devre analizi.....	75
Şekil 4.40. R(QR) eşdeğer devre modelinin, a) rGO/MnO ₂ , b) [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o = 1/1/1, c) [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o = 1/1/2, d) [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1/1/3, e) [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o = 1/1/5 oranlarındaki nanokompozitlerdeki analizi.....	76
Şekil 4.41. rGO, rGO/MnO ₂ , [rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:1, 1:1:2, 1:1:3, 1:1:5 nanokompozitin devre modellerinin isimleri a) R(QR), b) R(CR), c) RQ, d) LR(QR) devre modellerinin şekilleri.....	77
Şekil 4.42. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[TiO ₂] _o =1:1 nanokompozitin R(CR) devre analizi.	78
Şekil 4.43. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1 nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre analizi.	78
Şekil 4.44. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1 nanokompozitin LR ₁ (QR ₂) devre analizi.	79
Şekil 4.45. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1 nanokompozitin LR ₁ Q(CR ₂) devre analizi.....	80
Şekil 4.46. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1 nanokompozitin LR(C(R(CR))) devre analizi.....	80
Şekil 4.47. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1 nanokompozitin R(CR) devre analizi.....	81
Şekil 4.48. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:2:1 nanokompozitin R(CR) devre analizi.....	82
Şekil 4.49. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:5:1 nanokompozitin R(QR) devre analizi.	83

Şekil 4.50. Bode-magnitide ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:5:1 nanokompozitin R(CR) devre analizi.....	83
Şekil 4.51. ZSimpWin kullanılarak a) [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1/0/1, b) [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1/1/1, c) [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1/2/1, d) [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1/5/1 oranındaki rGO/TiO ₂ /PEDOT nanokompozitlerinden elde edilen eşdeğer R(CR) devre modelleri.....	84
Şekil 4.52. rGO/TiO ₂ ve [rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1/1/1, 1/2/1, 1/5/1 a) R(CR), b) R(QR), c) LR ₁ (C ₁ (R ₂ (C ₂ R ₃))), d) LR ₁ Q(CR ₂), e) LR ₁ (QR ₂), f) LR(Q(R(CR))) devre modellerinin şekilleri.	85
Şekil 4.53 Süperkapasitör şarj-deşarj işlemleri için gerçekleştirilen elektrik bağlantı şeması.....	86
Şekil 4.54. Kurulan gerçek devrede a) 10 F, b) 25 F, c) 50 F, d) 100 F'lık ticari süperkapasitörlerin dirençsiz olarak şarj işlemi.....	87
Şekil 4.55. Kurulan gerçek devrede a) 10 F, b) 25 F, c) 50 F, d) 100 F'lık ticari süperkapasitörlerin 10 Ω direncin üzerinde geçirilerek şarj işlemi. Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
Şekil 4.56. Kurulan gerçek devrede a) 10 F, b) 25 F, c) 50 F'lık ticari süperkapasitörleri 330 Ω direncin üzerinden akım geçirilerek yapılandeşarj işlemi.	88
Şekil 4.57. Kurulan gerçek devrede a) 10 F, b) 25 F, c) 50 F'lık ticari süperkapasitörleri 1kΩ direncin üzerinden akım geçirilerek yapılandeşarj işlemi.	89
Şekil 4.58. Gerçek devre uygulamaları için kurulmuş a) dirençsiz, b) 20 Ω'luk düşük dirençli devre modeli.	91
Şekil 4.59. Şarj işlemi sonunda a) dirençsiz, b) 20 Ω'luk düşük direnç ile yanan lambalar. ..	91
Şekil 4.60. Şarj işlemi sonunda rGO/MnO ₂ /PTTh a) 330 Ω'luk düşük dirençli, b) 1 kΩ'luk yüksek dirençle yanan lamba, Şarj işlemi sonunda rGO/RuO ₂ /PVK, c) 330 Ω'luk düşük dirençli, d) 1 kΩ'luk yüksek dirençle yanan lamba, Şarj işlemi sonunda rGO/TiO ₂ /PEDOT, e) 330 Ω'luk düşük dirençli, f) 1 kΩ'luk yüksek dirençle yanan lambaların görselleri.....	93

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Amper
AC	: Aktif karbon
ACN	: Asetonitril
AKF	: Aktif karbon fiber
AN	: Asetonitril
C _{d1}	: Çift katman kapasitans
cm	: Santimetre
CNT	: Karbon nanotüp
Co	: Kobalt
Co(OH) ₂	: Kobalt (II) hidroksit
Co ₃ O ₄	: Kobalt (II, III) oksit
Cr	: Krom
C _{d1}	: Çift tabaka kapasitörü,
C _{sp}	: Spesifik kapasitans
CuMn ₂ O ₄	: Bakır manganit
CV	: Döngülü Voltametri
DC	: Doğru akım
DSSC	: Boyaya duyarlı güneş piller
ΔV	: Uygulanan potansiyel aralığı
Δt	: İlk boşalma süresindeki eğimi
E	: Enerji yoğunluğu
EDLC	: Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitör
EİS	: Elektrokimyasal empedans spektroskopisi
EKSK	: Elektrokimyasal süperkapasitör
ESR	: Eş değer seri direnci
F	: Farad
<i>f</i>	: Frekans
Fe	: Demir
Fe ₃ O ₄	: Demir (II, III) oksit

FSI	: Florosülfonil
g	: Gram
GCD	: Galvanostatik şarj-dışarj
GMO	: Geçiş metali oksitler
H ₂ SO ₄	: Sülfürik asit
HSC	: Hibrit süperkapasitörler
IHP	: İç Helmholtz düzlemi
IL	: İyonik sıvı
İ	: Uygulanan akım yoğunluğu
KCl	: Potasyum klorür
Kg	: Kilogram
KNT	: Karbon nanotüp
KOH	: Potasyum hidroksit
KTK	: Karbon Türevi Karbon
Kw	: Kilowatt
L	: Litre
LIB	: Lityum- İyon piller
LiCoO	: Lityum kobalt oksit
LiFePO ₄	: Lityum, demir fosfat
LiMn ₂ O ₄	: Lityum mangan oksit
LiOH	: Lityum hidroksit
Li-S	: Lityum-sülfür
Li _x Mn _y Co _z O ₂	: Lityum nikel mangan kobalt oksit
LOB	: Lityum-oksijen piller
LT	: Lityum titanat
m	: Metre
m	: Malzemenin kütlesi
M	: Molarite
mA	: Miliamper
Mn	: Mangan
Mn ₃ O ₄	: Mangan tetroksit
MnCo ₂ O ₄	: Mangan okzalit

MnO ₂	: Mangan dioksit
MnO ₄	: Mangan (IV) oksit,
Na ₂ SO ₄	: Sodyum sülfat
NaOH	: Sodyum hidroksit
Ni(OH) ₂	: Nikel (II) hidroksit
NiMn ₂ O ₄	: Nikel manganit
η:	: Coulomb verimliliği
NiO	: Nikel oksit
NTF ₂	: Tri floro metan sülfonil
OH	: Hidroksil
OHP	: Dış Helmholtz Düzlemi
PA	: Poliasetilen
PAN	: Poliakrilonitril
PANI	: Polianilin
PC	: Propilen karbonat
PEDOT	: Poli (3,4-etilendioksitiyofen)
PF	: Polifenilen
PF ₆	: Heksa floro fosfat
PFu	: Polifuran
PIn	: Poliinden
PInd	: Poliindol
P _{max}	: Maksimum güç
PPP	: Poli (para-fenilen)
PPy	: Polipirol
PTTh	: Politiyofen
PTTh	: Politertiyofen
PVC	: Poli(vinil klorür)
PVCz	: Poli(vinilkarbazol)
PVK	: Poli(9-vinilkarbazol)
PVSC	: Perovskite güneş piller

P	: Güç yoğunluğu
R_{ct}	: Şarj transfer direnci
R_s	: Çözelti direnci
R_p	: Eşdeğer paralel dirençten
rGO	: İndirgenmiş grafen oksit
RuO_2	: Rutenyum oksit
Si	: Silikon güneş piiler
SWCNT	: Tek duvarlı karbon nanotüp
TEABF ₄	: Tetra etil amonyum tetra floro borat
TEMABF ₄	: Tetraetil metil amonyum tetra floro borat
TEPBF ₄	: Tetraetil potasyum tetra floro borat
TiO ₂	: Titanyum oksit
t_d	: Boşalma süresi
t_c	: Şarj süresi
η	: Coulomb verimlilik
V	: Volt
V ₂ O ₅	: Vanadyum oksit
VO _x	: Vanadyum oksit
V _r	: Voltaj düşüşü
W	: Watt
W	: Warburg Empedans
WO ₃	: Wolfgang (III) oksit
ZnCo ₂ O ₄	: Çinko okzalat
Z	: Hayali empedans

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğreniminin kapılarını açan ve her daim gerek öğrenim süresince bildiklerinin en iyi şekilde aktarmaya çalışan gerekse hayatımızda karşımıza çıkabilecek olan sorunlara karşı neler yapmamız konusunda kendi tecrübelerinden yola çıkarak bize yol gösteren çok değerli ve benim için iyi ki hocam olarak tanımışım diyebileceğim Sayın Prof. Dr. Murat ATEŞ'e, öğrenim süresince bilgilerini en iyi şekilde aktaran değerli üniversite hocalarıma, maddi manevi her daim yanımda olduğunu bana hissettiren annem Cumaziye AKTAŞ ve diğer aile fertlerime ve benim için değerli olan arkadaşlarıma saygı, sevgi, şükran ve teşekkürlerimi sunuyorum. İyi ki varsınız.

Tezimin oluşmasında katkı sağlayan TÜBİTAK 1001 (117M042) numaralı proje ile TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı ayrıca teşekkürü bir borç bilirim.

Mart, 2020

Selin AKTAŞ

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi kapsamında süperkapasitör elektrot materyali olarak kullanılmak üzere karbon bazlı indirgenmiş grafen oksit çeşitli metal oksit (RuO_2 , TiO_2 ve MnO_2) ve çeşitli polimerler (Polivinil karbazol (PVK), polietilendioksitiyofen (PEDOT), politertiyofen (PTTh)) ile birleştirilerek 3 yeni nanokompozitin ($\text{rGO/TiO}_2/\text{PEDOT}$, $\text{rGO/RuO}_2/\text{PVK}$ ve $\text{rGO/MnO}_2/\text{PTTh}$) sentezlerinden yararlanılmıştır. Süperkapasitör elektrot materyallerine DV, GCD, EES ve stabilite testleri uygulandı ve bu metodlar ışığında nanokompozitlerin sahip oldukları spesifik kapasitans (C_{sp}), enerji yoğunlukları (E), güç yoğunlukları (P) ve stabilite değerleri bulundu. Ayrıca bu süperkapasitör nanokompozitlerinden EES analizlerinden elde edilen sonuçlardan ZSimpWin programından yararlanılarak simülasyon devre modelleri çizildi. Elektrokimyasal performans ölçümleri ise 1 M H_2SO_4 elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. ZSimWin program sonuçlarından elde edilen veriler gerçek devre modellerinin uygulanmasına ışık tutmuştur. Simülasyon programında çizilen devre modelleri [$\text{LR}_1\text{Q}(\text{CR}_2)$, $\text{LR}_1(\text{QR}_2(\text{C}_d\text{R}_3))$, $\text{LR}(\text{QR})$, $\text{LRQ}(\text{CR})$, $\text{R}(\text{QR})$, RQ , $\text{LR}_1(\text{C}_1(\text{R}_2(\text{C}_2\text{R}_3)))$, $\text{LR}_1(\text{QR}_2)$, $\text{LR}(\text{Q}(\text{R}(\text{CR})))$, $\text{R}(\text{CR})$ ve $\text{LR}(\text{CR})(\text{QR})$] gerçek devre modeli ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Herbir süperkapasitör cihaz için gerçek devre düzenekleri kurularak devrenin çalışıp çalışmadığı ve LED lambayı yakıp yakmadığı tespit edilip, raporlanmıştır.

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstrinin oldukça yaygınlaşması ve gelişmesinden dolayı enerjiye olan ihtiyacın artması da kaçınılmazdır. Doğal enerji kaynaklarından olan fosil yakıt rezervleri veya güneş, rüzgar ve su gibi sınırsız olduğunu düşündüğümüz hazır kaynaklar olmasına rağmen, aslında bu kaynaklar dünyanın başlangıcından beri oldukça fazla tüketilmişlerdir ve sınırlıdır (Yu, Xie, Pan, Bao ve Cui, 2013). Bu yüzden sürekli olarak artan enerji ihtiyacını karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarına ve yeni nesil enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Wang vd., 2017; Rafiq vd., 2019). Son zamanlarda en çok tercih edilen elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinde güç kaynağı olarak lityum iyon pilleri, dielektrik kapasitörler ve süperkapasitörlerin olduğu bilinmektedir (Wang, Zhang ve Zhang 2012). Piller, enerjiyi kimyasal olarak biriktirdiğinden dolayı yüksek enerji yoğunluğa sahiptirler. Pillerin şarj süresince elektrotlarda ve elektrolitlerde oluşan fizikokimyasal değişimlerden dolayı şarj süresinin az olması, düşük güç yoğunluğuna sahip olması ve çevrim ömrünün kısa olması dezavantajlarıdır (Syasta, Negroiu ve Vasile, 2017). Piller, orta zamanlı çalışılacak elektrik depolama sistemlerinde tercih edilirken, dielektrik kapasitörler kısa zamanlı ve mikro büyüklükte çalışılacak elektroniklerde tercih edilmektedirler. Süperkapasitörler ise enerji ve güç değerleri açısından bu iki elektronik teknolojinin arasında yer alırlar. Süperkapasitörler yüksek enerji yoğunluğuna sahipken, dielektrik kapasitörler daha düşük güç yoğunluğuna sahiptir. Süperkapasitörler, pillerle kıyaslandığında ise güç yoğunluklarının ve kararlılıklarının yüksek olmasından dolayı daha iyi performans gösterirler (Nikolaidis ve Poullikkas, 2018). Bu yüzden süperkapasitörler pillere göre anlık enerji ve güç performansı bakımından daha çok tercih edilmektedirler (Simon ve Gogotsi, 2008).

Süperkapasitörler, dielektrik kapasitörlere ve pillere göre daha fazla yükleme/boşalma kararlılığına sahip olduklarından dolayı yüksek enerji yoğunluğu depolayan cihazlardır (Ran, Yang ve Shao, 2018). Süperkapasitörlerin hızlı şarj-deşarj edilebilir olması, yüksek güç yoğunluğuna sahip olması, uzun kullanım ömrü, geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilmesi ve çevre dostu olması, güvenli ve maliyet açısından ekonomik olması gibi bir çok dikkat çeken avantajları vardır (Feng vd., 2018; Zhao, Sanchez, Dobson ve Grant, 2011). Süperkapasitörlerin kullanım yerleri; arıtım tesisleri (Suss vd., 2015), aktif karbon (AC) hattı filtreleme (Sellam, Jenjeti ve Sampath, 2018), taşınabilir yedekleme cihazları (Aytug vd., 2018), uçakların acil çıkış kapıları (Zhang ve Zhao, 2009), hibrit taşıtların fren sistemeleri (Kauchachvili, Yaici ve Entchev, 2008), liman vinçleri (Miller ve Burke, 20018), rüzgar

türbini sistemlerde tercih edilir (Yassine ve Fabris, 2017). Süperkapasitörlerin performanslarını belirlemek için kullanılan elektrot aktif malzemeler çok önemli bir rol oynar (Arico, Bruce, Scrosati, Tarascon ve Schalkwijk Van, 2005). Elektrot malzemeleri üç başlık altında sınıflandırabiliriz.

- Karbon malzemeler (Xia vd., 2018).
- İletken polimerler (Snook, Kao ve Best, 2015).
- Metal oksitler (Zhao vd., 2016).

Ticari süperkapsitörlerde aktif karbon bazlı malzemeler elektrot malzemesi olarak en çok tercih edilenlerdir. Karbon malzemelerin avantajları; kararlı yapısı, yüksek iletkenliği, yüzey alanının genişliği, seri üretimlerde kullanılabilirliği ve düşük maliyetli olmalarıdır (Xia vd., 2018). Örneğin, Aktif karbon fiber (AKF) malzemeler hafif ve yüksek gerilme mukavemeti, kontrol edilebilir gözenek büyüklüğü, geniş spesifik yüzey alanına sahip olmalarından dolayı elektrot aktif malzemesi olarak süperkapasitörler de kullanılırlar (Xu vd., 2008). Bu özellikleri ve kolay ve kullanışlı olmalarından dolayı elektronik sektöründe tercih edilmektedirler (Yu vd., 2016). Grafen, geniş bir yüzey alanı, esneklik, iyi elektriksel iletkenlik, kimyasal, termal ve elektrokimyasal stabilite, ve bol miktarda yüzey fonksiyonel grubu gibi çeşitli ilginç özellikler gösterir (Pumera, 2010). Grafen, süperkapasitörler için ümit verici bir elektrot malzemesi olarak tanımlanmıştır ve üretiminin endüstriyel ölçekte uygun maliyetli olduğu anda ticari cihazlarda kullanılması beklenmektedir (Bonaccorso vd., 2015; Chen, Liu, Xue ve Komarneni, 2015).

İletken polimerler tek başlarına kapasitif davranışlar sergilediğinden dolayı, karbon bazlı malzemelerle birleştirildiğinde daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olurlar (Snook, Kao ve Best, 2011). İletken polimerlerin esnekliği, yinelenen birimlerindeki defectler ve şişmeleri neticesinde döngü sayıları ve kullanım ömürleri kısılacığından dolayı kapasitans değerleri karbon bazlı malzemelere göre daha düşüktür. Tek atomlu malzeme olarak kullanmak yerine mekanik kararlılığını ve güç yoğunluklarını yükseltebilecek karbon bazlı malzemeler/metal oksitler ile birleştirilerek nanokompozit haline getirilip kullanılmalıdır (Li, Wu, Yuan ve Zhang, 2014).

İletken polimer olarak polipirol (PPy), Poli(3,4-etilendioksitiyofen) (PEDOT), Polianilin (PAni) gibi bir çok örnekler verilebilir. İletken polimerler sınıfında yer alan polipirol (PPy), mekanik esnekliği, ayarlanabilir elektrik iletkenliği, yüksek kapasitans

(redoks özelliklerine bağlı olarak), düşük maliyet, düşük çevresel etki ve üretim kolaylığından dolayı oldukça önemli bir kapasitif malzemedir (Huang vd., 2016). Polipirol (PPy) benzer şekilde, Poli(3,4-etilendioksitiyofen) (PEDOT) ayrıca iyi elektriksel iletkenlik sergiler (okside olduğunda; indirgenmiş form zayıf iletkenliğe sahiptir). Yapıda p veya n doplama işlemi mümkündür, geniş voltaj pencere (1.2-1.5 V) düşük oksidasyon potansiyeli ve termal ve kimyasal stabilitesi yüksektir (Sun vd., 2015). Elektrokimyasal performans açısından, literatürde Liu ve ark. (Liu, Cho ve Lee, 2008) ve Rajesh ve ark. (Rajesh, vd., 2017), Poli(3,4-etilendioksitiyofen) ve PEDOT/nanotüp konularında çalışmalar yaptılar. Raporladıkları güç yoğunlukları sırasıyla $P = 25 \text{ kW/kg}$ ve $P = 40 \text{ kW/kg}$ ile enerji yoğunlukları sırasıyla $E = 5.6 \text{ Wh/kg}$ ve $E = 4.4 \text{ Wh/kg}$ 'dir.

Nanotüplerin pozitif ve negatif yüklerden dolayı yönlü durumu hızlı iyonik taşınmaya izin verirken, nanotüp duvarının doğası gereği karşı iyonlara kısa difüzyon mesafesi sağlar ve hızlı redoks işlemlerine imkan verir. Bisiklete binme sırasındaki kapasitansın muhafaza edildiğine dair herhangi bir gösterge olmadığını Liu ve ark. bildirirken Rajesh ve ark. 12.000 döngüden sonra başlangıç kapasitansının %86 korunduğunu bildirmiştir. Metal oksitler, yüksek enerji yoğunluğa ve yüksek özgül kapasitanslara sahiptirler (Zhao vd., 2016). Karbon malzemelerden daha fazla enerji yoğunluğa ve polimer malzemelerden daha iyi elektrokimyasal kararlılık sağlamaktadırlar. Yüksek spesifik kapasitans ve düşük direnç özellikleri sayesinde yüksek enerji ve güç özelliklerinde üretilecek yalancı süperkapasitörler de tercih edilirler (Sallanne vd., 2016). Örnek olarak bilinen Rutenyum oksit (Ru_2O), Kobalt oksit (Co_3O_4), Nikel oksit (NiO), Mangan (IV) oksit, Titanyum oksit (TiO_2), Vanadyum oksitler (V_2O_5) en çok tercih edilen metal oksitlerdendir (Toupin, Brousse ve Belanger, 2002).

Metal oksitler, düşük döngüsel kararlılığı ve düşük güç yoğunluğu içermelerinden dolayı Faradik reaksiyonlarla birlikte diğer malzemelerle beraber kullanılarak elektrokimyasal performansın artırılması sağlanabilir (Kalantar vd., 2016). Bu açıdan metal oksit ve iletken polimer kompozit malzeme olarak birlikte kullanıldıklarında uzun şarj-deşarj sürelerinde yüksek spesifik kapasitansa sahip süperkapasitörler elde edilebilir (Zhang, Uchaker, Candelaria ve Cao, 2013). Süperkapasitörler genel olarak üç ana sınıfa ayrılırlar:

1- Elektrokimyasal çift tabakalı süperkapasitörler (EDLC) (Wen, Li, Chend, 2016)

2- Pseudo (Yalancı) süperkapasitörler (Gonzalez, Goikolea, Barrena ve Mysyk, 2016)

3- Hibrit süperkapasitörler olmak üzere adlandırılmaktadır (Majumber, Maiyalagan ve Jiang, 2019).

Elektrokimyasal çift tabakalı süperkapasitörler (EDLCler) elektrot olarak karbon ve türevlerinin kullanıldığı elektrik enerjisini iletken elektrot ile elektrolitin ara yüzeyinde ayrılan çift tabakada yükün elektrostatik olarak depolanması sonucu elde edilir. Kısacası enerjinin depolanmasındaki olay elektrot-elektrolit ara yüzeyindeki yük ayırımıdır. Burada nanokarbonlar, grafen, karbon nanotüpler, nano lifler içeren karbon bazlı malzemelerin geniş yüzey alana ve elektriksel yükü aktarması özelliklerinden dolayı elektrokimyasal çift tabakalı süperkapasitörlerde (EDLC) en çok elektrot olarak tercih edilmektedir (Wen, Li, Chend, 2016; Wang, Yan ve Fan , 2016):

Pseudokapasitörler (yalancı) elektrot olarak metal oksitler ve iletken polimerlerin kullanıldığı elektrot yüzeyinin yakınılarında gerçekleşen hızlı, tersinir ve Faradik redoks reaksiyonları sonucunda yükün birikmesiyle enerji depolanır (Gonzalez, Goikolea, Barrena ve Mysyk, 2016). Özellikle, geçiş metal oksitleri (GMO) ve bunların oksitleri; mangan dioksit (MnO_2), Wolfgang (III) oksit (WO_3), Vanadyum oksit (VO_x), Demir (II, III) oksit (Fe_3O_4), Rutenyum oksit (RuO_2), Kobalt (II) hidroksit ($Co(OH)_2$), Kobalt (II, III) oksit (Co_3O_4), Nikel (II) hidroksit ($Ni(OH)_2$), Nikel oksit (NiO) tercih edilirdir (Wang, Chen, Cao, Wang ve Yin, 2015). Bu elektrot malzemelerinin tercih edilmesinin nedeni, termal ve mekanik stabiliteleri artırarak yüksek performanslı pseudokapasitörler elde edilebiliyor olmasıdır (Asono, Komatsu, Murashiro ve Hoshino, 2011; Gao, Chen, Cao, Wang ve Yin, 2010).

İletken polimerler süperkapasitörler için aktif bir bileşendir ve elektrot materyali olarak hem elektrokimyasal çift tabakalı süperkapasitörlerde (EDLC) hem de pseudokapasitör (yalancı) olarak (konjuge polimer halkalarındaki hızlı oksidasyon redüksiyon işlemlerinden dolayı) kullanılabilir (Kim, Lee, Sharma ve Liu, 2006). Pseudokapasitörlerin spesifik kapasitansları elektrokimyasal çift tabakalı süperkapasitörlere (EDLC'lere) göre daha yüksektir ancak güç yoğunluklarına göre kıyaslandığında daha düşüktür (Gonzalez, Goikolea, Barrena ve Mysyk, 2016). Bir hibrid kapasitörde, bir elektrot, bir enerji kaynağı olarak pil tipi bir Faradaik elektrot, diğeri ise bir güç kaynağı olarak bir kapasitif elektrottur (Sevilla ve Mokaya, 2014). Elektrotlar karbonun metal oksitler veya iletken polimerlerle kompozit haline getirilmesi ile hazırlanmaktadır (Lota ve Frackowiak, 2014). Elektrotlar hem çift tabaka (EDLC) kapasitans hem de Pseudokapasitörlerin (yalancı) kapasitans özelliği göstermektedir.

Bu yüksek lisans tezinde $rGO/RuO_2/PVCz$, $rGO/TiO_2/PEDOT$, $rGO/MnO_2/PTTh$ nanokompozitler sentezi sonucu elde ettiğimiz simetrik süperkapasitörlerimiz kullanılarak cihaz performanslarının gösterilmesi ve gerçek devre kurularak süperkapasitörlerimizin performansları hakkında bilgiler verilmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kapasitörler

Geleneksel kapasitörler dielektrik malzeme tarafından ayrılmasıyla beraber iki ayrı elektrotları bulunan ve elektrostatik enerjiyi bünyesinde depolayan cihazlardır (Humayun, Khan, Muhammad, Xu ve Zhang, 2020). Piyasada kullanılan birçok cihazda kapasite, kondansatör, sığa kullanılmaktadır. Bu cihazlar arasında sistematik olarak elektronik devre sistemleri ile elektrik yükü depolama, reaktif güç depolama, alternatif akım (AC)/ doğru akım (DC) arasında dönüşüm işlemleri bulunmaktadır.

Kapasitörler ilk olarak 19. yüzyılın başlarında 1745 yılında, Pieter Van Musschenbroek tarafından icat edilmiş olup ve bu icatın adına "Leyden kavanozu" denilmektedir. Leyden cam kavanozunun içinde metal çubukların olduğu ve içerisine su veya cıva ile doldurulmaktadır. Dielektrik ortamında bu cam kavanozun hızla döndürülerek statik elektrik yükünün biriktirilmesi sağlanmıştır. Kapasitans hesaplama denklem (2.1)' de hesaplama şekli gösterilmiştir

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

Bir kapasitörün kapasitans değeri (C), iletken elektrot malzemenin alanı (A) ve dielektrik malzemenin dielektrik sabiti (ϵ) ile doğru orantılıdır. İletken elektrotlar arası mesafe (d) için ise ters orantılıdır. Diğer bir şekilde kapasitans hesaplanması denklem (2.2)' de ve dielektrik sabitinin bulunmasının gösterim şekli denklem (2.3)' te gösterilmiştir.

$$C = \frac{\epsilon}{d} \times A \quad (2.2)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r \quad (2.3)$$

Burada ϵ dielektrik sabiti, ϵ_0 boşluğun geçirgenliği ve ϵ_r dielektriğin malzemenin geçirgenliğinin çarpımıdır.

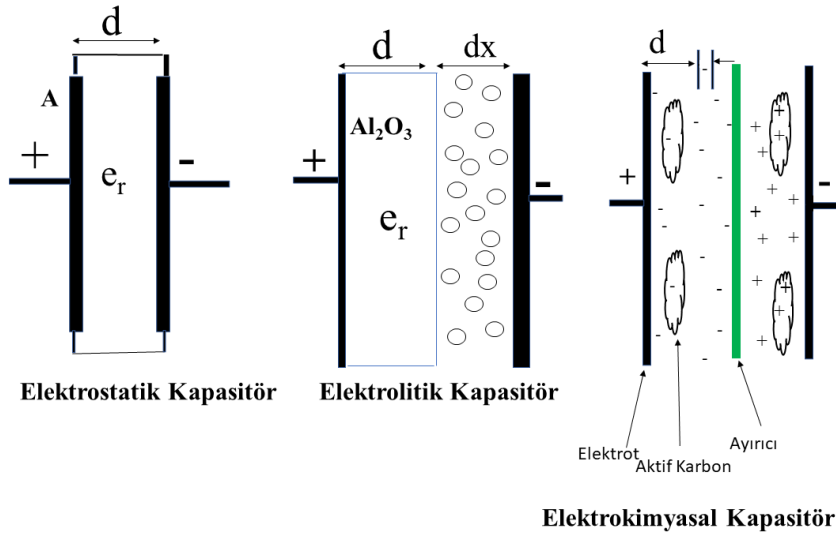
Kapasitörün gücü bulmak istenirken, kapasitörün iç dirençleri dikkate alınmalıdır. Kapasitörün iç dirençlerini ESR (elektrik seri direnç) adı altında birleştirerek dikkate alınacaktır. Kapasitörün seri direnci voltajı belirli bir miktarda düşüreceği için bu durumda denklem aşağıdaki gibi olacaktır. Güç yoğunluğunun hesaplanması işlemi denklem (2.4)' te gösterilmiştir.

$$P_{max} = \frac{V^2}{4ESR} \quad (2.4)$$

Kapasitörün içerisinde tuttuğu enerji E ile kapasitörün içerisindeki kapasite C ve voltaj V miktarı ile doğru orantılıdır. Depolanan enerji miktarının bulunmasını ise denklem (2.5)'te gösterilmiştir.

$$E = \frac{1 \times C \times V^2}{2} \quad (2.5)$$

Kapasitör, elektrolitik, elektrostatik, elektrokimyasal kapasitör olmak üzere üçe ayrılır.



Şekil 2.1. Kapasitörlerin sınıflandırılması

2.1.1. Elektrostatik Kapasitör

Elektrostatik kapasitörde, iki iletken plaka vardır. Üzerinde artı yüklerin ve negatif yüklerin birbirinden ayrılmasıyla ve ortalarında yalıtkan malzemenin oluşmasıyla enerjiyi

depolayan önemli elektrik parametreleridir (Arslan, 2012). Dielektrik alanında hava ve mika bulunmaktadır (Du ve Pan, 2007). Şarj süresi bakımından 10^{-9} değerinde en düşük enerjiyi depolayan cihazlardır. Kapasitans değerleri genellikle mikro ve mili Farad aralığındadır (Kotz ve Carlen, 2000). Bu kapasitörler sinyal filtreleme ve radyo frekanslarını aramak için tercih edilmektedir.

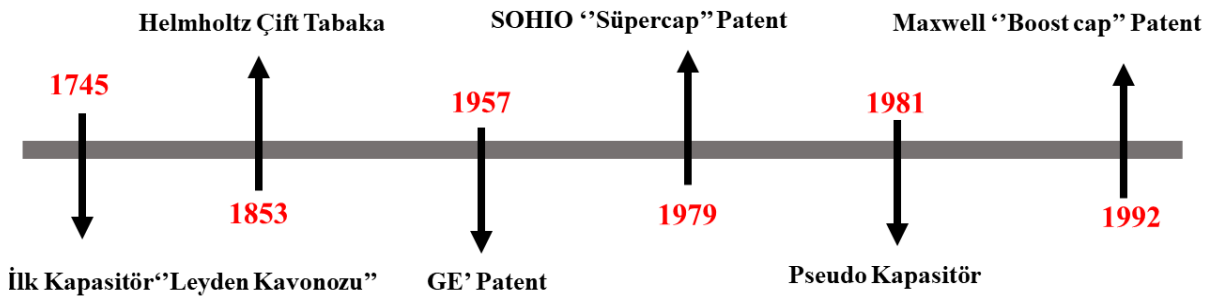
2.1.2. Elektrolitik Kapasitör

Elektrolitik kapasitörler, kaliteli pürüzlü bir metal üzerinde oluşan geniş ve dar dielektrik malzemelerden üretilir (Hong ve Chumming, 2014). Şarj süresi 10^{-4} değerinde en yüksek enerjiyi depolayan cihazlardır. Elektrolitik kapasitörler otomobiller, uçaklar, uzay araçları, güç filtreleme sistemleri, bilgisayarlar, monitörler, kişisel bilgisayarların ana kartları ve diğer elektronikler için güç kaynağı olarak kullanılmaktadır (Jayalakshmi ve Balasubramanian, 2008; Laadjal, Sahraoui, Cardoso ve Rap, 2008). Küçük ölçekli elektronik cihazlar ile ticari amaçlı olarak çok tercih edilirler (Kim, Wada, Kim ve Kato, 2014).

2.1.3. Elektrokimyasal Kapasitör

Elektrokimyasal kapasitörler, grafen bazlı malzeme ile birlikte kullanılmasından dolayı yüksek yüzey alanına sahiptirler. Bu özelliğinden dolayı diğer kapasitörlere göre 10.000-15.000 kat daha fazla enerji depolayabilen cihazlardır. Ayrıca kapasitans çalışma aralığı kilo Farad seviyesindedir (Alpayım, 2014).

2.2. Süperkapasitörler



Şekil 2.2. Süperkapasitörlerin tarihi gelişimi (Conte, 2010).

Süperkapasitörler hakkında ilk icat edildiği 1853 yılında Von Helmholtz tarafından ileri sürülen görüşe göre, elektriksel enerjinin sadece iletken yüzeylerin üzerinde birikmesi

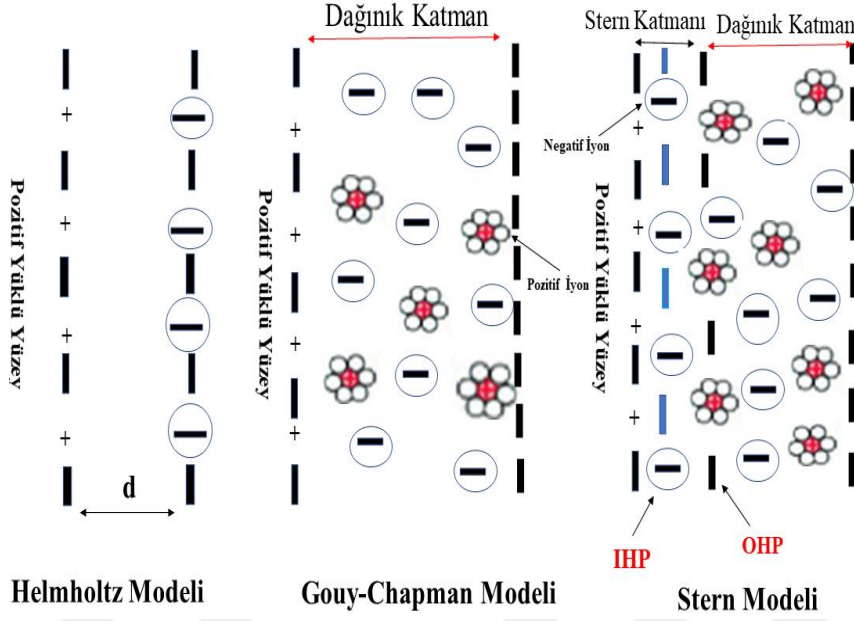
sonucu yüklenmediği, elektrot ile elektrolit arasındaki çift tabaka üzerinde de enerjinin birikebileceği ifade edilmiştir (Conte, 2010). Von Helmholtz ileri sürdüğü görüşe göre elektrot yüzeyindeki artı yük elektrolit ara yüzeyindeki eksi yüklerin eşit bir şekilde birbirinden ayrışması sonucu, iki zıt tabaka oluşarak enerji depolandığını anlatmıştır (Gongadze, Petersen, Beck ve Rienen, 2009).

İlk elektrokimyasal kapasitör ise, sülfürik asit elektrolitinin içinde karbon elektrotların kullanılarak enerjinin depolandığını gösteren araştırmacı General Electric'ten Howard Becker tarafından icat edilmiştir. Daha sonra 1957 yılında ise patenti alınmıştır. Ayrıca bu patent hiçbir zaman ticari amaçla kullanılmamıştır (Zuo vd., 2017).

1970 yılında ise farklı şirketlerin (Sohio, Corning Glass ve NEC) Sohio'nun karbon bazlı elektrotlar kullanılarak elektrolitik süperkapasitörlerin üzerinde yeni bilgiler edinildi. İlerleyen zamanlarda 1978 yılına gelindiğinde ise Nippon elektrik şirketi NEC (Japonya), ve SOHIO'nun "Süpercap" ismi altında patentini alarak ilk kez karbon elektrotlu süperkapasitör ticaret hayatına girmiş olmaktadır. Karbon bazlı elektrotlu süperkapasitör yedekleme sistemi (bellek ismiyle) olarak karşımıza çıkmıştır (Sani, 2015).

20.yüzyıla gelindiğinde 1919 yılında Gouy, Chapman, Stern ve Grahame adlarındaki araştırmacıların EDLC kapasitörü hakkında çalışmalarında yeni bilgilere ulaşmışlardır. Araştırmacılardan isimleri Gouy ve Chapman üzerinde çalıştıkları konu çift katman içinde bulunan gelişmiş iyonların biriktiği elektrotların yüzeylerinde ısı alışveriş olaylarının nasıl olduğunu açıklamıştır.

1924 yılında ise diğer araştırmacı olan Stern'in çalışmasında Helmholt ve Gouy ile Chapman çalışmalarından yararlanarak ikisinin karışımından yola çıkarak elektrot ve elektrolitlerin yüzeylerindeki fiziksel durumlarını açıklamışlardır (Shao vd., 2018). Elektrot yüzeyinde iyonların çok miktarda görüldüğü ve iyonların elektrolitlerin içine doğru yayıldığını açıklamışlardır. Ayrıca elektrotların yüzeyinde iyonların fazla miktarda olduğu yere İç Helmholtz (IHP), iyonların elektrolitlerin içine doğru aktığı yere Dış Helmholtz Düzlemi (OHP) denir ve **Şekil 2.3.**'te gösterilmiştir (Conway, 1991).



Şekil 2.3. Helmholtz Modeli, Gouy ve Chapman Modeli, Stern Modeli

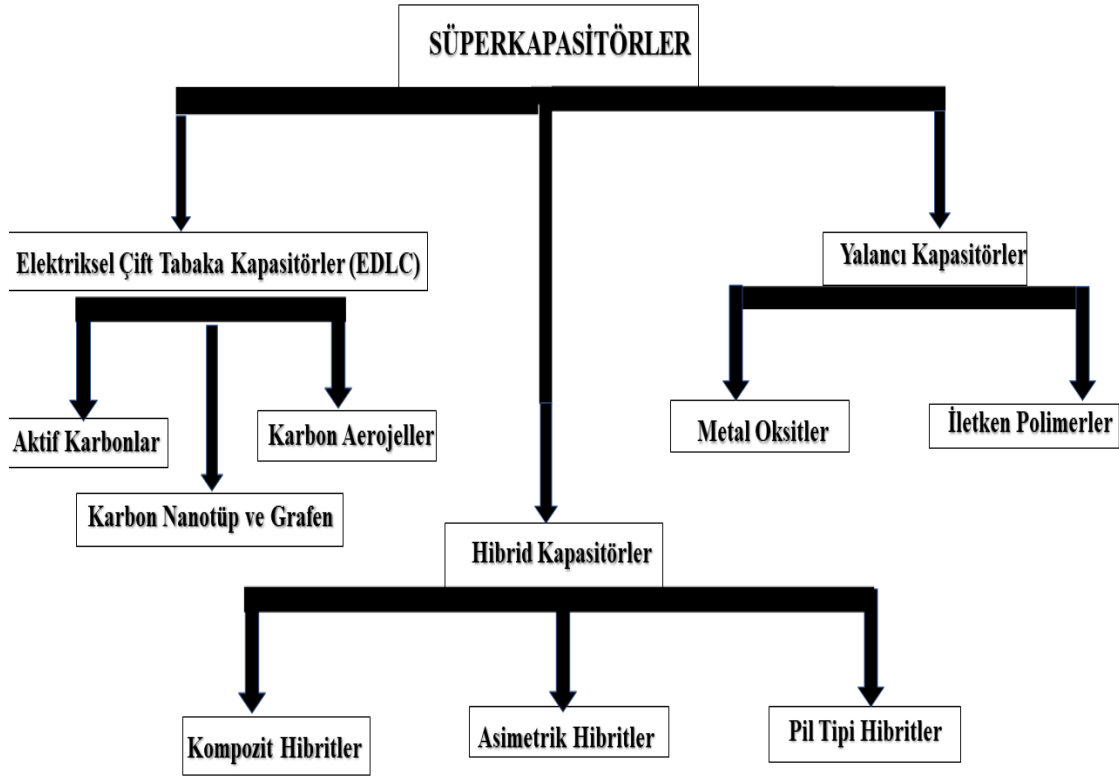
20.yüzyılın son zamanlarına gelindiğinde daha yüksek performans gösteren süperkapasitörler üretilerek ticarete önemli olarak kullanılmışlardır. 1971 yılında Faradik reaksiyonlar kullanılarak ve RuO₂ elektrot içeren yalancı süperkapasitörler bulundu (Miller, Dunn, Tran ve Pekala, 1997).

1989'da ise MP Pulsar tarafından yalancı süperkapasitörlerin model olarak yapılmasını gerektiği düşüncesini söylemiştir. Bu fikrin hayata geçirilmesi 1992'de Maxwell sayesinde Boost Caps ismiyle yalancı süperkapasitörlerin üretimi yapılmıştır (Byungwoo, Haegeun ve Woong, 2012). 1990 yılından sonra süperkapasitörlerin gelişmesindeki çalışmalar devam etmiştir. Çalışmalar neticesinde daha yüksek kaliteye, çevreye karşı duyarlılığı, daha ucuza maliyetle üretilebilmesi, maksimum seviyelerde enerjiye ulaşması için süperkapasitörlerin geliştirilmesinde araştırmalar hızla devam etmektedir (Ojha vd., 2019).

Yapılan bu çalışmalar sonucunda süperkapasitörler farklı çeşitlere ayrıldığı görülmüştür. Bu çeşitlere ayrılmalarının nedeni ise içerisinde bulunduğu elektrot olarak kullandığı malzemenin farklı özelliklerde olmasından dolayıdır. **Şekil 2.4.**'te süperkapasitörler üç farklı sınıflara ayrılmıştır. Bu süperkapasitörler;

- Elektrokimyasal çift tabakalı süperkapasitörler (EDLC) (Yan vd., 2019).
- Pseudo (Yalancı) süperkapasitörler (Zhou vd., 2014).

- Hibrit süperkapasitörler (Kshetri vd., 2019).



Şekil 2.4. Süperkapasitörlerin Sınıflandırılması

2.2.1. Elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EÇKK)

Elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EDLC)'ler, yüksek güç yoğunluğu, kısa zamanda şarj olmaları, sınırsız döngüsel çevrime sahip olmalarından dolayı hibrit elektrikli taşıtlar, yeni nesil elektrikli taşıtlar, uzay ekipmanları, askeri ekipmanlar, ve gezdirilebilir bellek yedekleme sistemlerinde kullanılması açısından ilk sırada tercih edilen enerji kaynaklarının başında kabul edilmektedir. Enerji depolayabilen piller ile karşılaştırıldığında, yüksek oranlarda güç bünyesinde biriktirdiğini ve hızlı bir şekilde enerjiyi iletilebildiği bilinmektedir. Elektrikli çift katmanlı kapasitörlerde (EDLC), şarj-deşarj işlemi gerçekleştiği zaman bünyesinde yeterli miktarda enerji yoğunluğunu korumaktadır. Hızlı bir şekilde şarj vedeşarj olayı ve yüksek güç yoğunluğunu sağlayan sınırsız döngüsel çevrimi tekrarlayabilmektedirler (Yan, Ju, Hsieh, Lin ve Hsieh, 2019).

Elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EDLC)'ler genellikle geniş gözenekli yapısı olan nano karbon bazlı elektrotlar ile sıvı elektrolitin arasındaki ara yüzeyinde iyonların

birikmesiyle oluşan elektriksel çift tabakada elektriksel yükü bünyesinde hapsederek enerjiyi depolayan cihazlardır (Miller ve Simon, 2008).

Elektrikli çift katmanlı kapasitörlerde (EDLC)'lerde kullanılacak olan elektrot malzemelerin özellikleri çok önemlidir. Çünkü elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EDLC)'ler yüksek enerji yoğunluklarına ulaşabilmesi için yüksek bir spesifik yüzey alanına sahip elektrotları kullanması gerekmektedir. EDLC'lerde uygulanan maksimum voltajda biriken enerji miktarı aktif malzemeli elektrotların kapasitansları ile doğrusal olarak orantılıdır ve malzemenin özelliklerine bağlıdır. Bu yüzden EDLC'lerde karbon bazlı malzemeler elektrot olarak en fazla tercih edilenlerdir.

EDLC'le aygıtlarında aktif karbon elektrot malzemesinin yüzey alanında biriktiği en yüksek kapasitans değeri gram başına yüzlerce metrekarede Farad değerine karşılık gelirken dielektrik kapasitörlerde ise gram başına mikroFarad gelmektedir (Ji vd., 2014). Diğer bir nedeni ise bol miktarda gözenekli olması, geniş yüzey alanlara ulaşarak yüksek miktarda spesifik kapasitanslara çıkabilmesi ve son derece dirençli mekanik mukavemete sahip olmalarıdır. EDLC'lerde kapasitans hesaplama denklem (2.6)' da hesaplama şekli gösterilmiştir (Chmiola, Yushin, Portet, Simon ve Taberna, 2006).

$$C = \frac{\epsilon x A x \epsilon_0}{d} \quad (2.6)$$

Burada C: kapasitans değerini, ϵ : dielektrik malzemenin nispi geçirgenliği, ϵ_0 :boş alanın geçirgenliği, A: elektrolit iyonlara erişebilen elektrot yüzey alanı ve d: karşılıklı olan elektrotların arasındaki yük ayrımı mesafesini göstermektedir. Verilen denkleme göre kapasitansı arttırmak istenilirse; dielektrik sabiti, malzemenin yüzey alanında büyüme ve düzlem kalınlığında değişiklikler yapılarak kapasitansında artışlar gözlemlenebilir.

Aktif karbon bazlı elektrotlar, asidik ve bazik sulu elektrolitler, organik elektrolitler ve iyonik sıvı (IL'ler) gibi birden fazla elektrolitler ile beraberinde çalışmalar yapılmaktadır (Frackowiak ve Beguin, 2001; Wang, Mu, Zhang, Wang ve Zhang, 2020).

Elektrikli çift katmanlı kapasitörlerin (EDLC)'lerin olumsuz bir yanı da elektrot malzemelerinin çeşitlilik bakımından sınırlı olmasıdır. Bu olumsuzluğu düzeltmek için yüksek iletken elektrotların kullanılması gerekmektedir. İşte bu yüzden metal iyon katkısı sağlayan demir (Fe), mangan (Mn), krom (Cr) ve kobalt (Co) gibi takviyeler kullanılarak,

elektrot malzemesinin elektrik iletkenliğini artırılır ve böylece kapasitansı da artar (Kwon, Kim, Jung, Lee ve Choi, 2018). EDLC'ler şarj olma ve deşarj süresince Faradaik olmayan reaksiyonlar sonucunda enerjiyi depoladığı için geri dönüşüm miktarı çok fazladır. Bu aynı zamanda 10^6 veya daha fazla devire kadar son derece kararlı bir bisiklet kabiliyeti, yüksek şarj ve deşarj oranı ve son olarak çok az bozulma olduğu gözlemlenmektedir (Anothumakkool v.d., 2016). Karbon bazlı malzemenin özellikleri morfoloji, hibridizasyon ve yapısal kusurları bakımında üç farklı EDLC çeşitlere ayrılır;

- Karbon aerojelleri (nanoporlar), karbon köpükleri (mikroporlar) ve karbür türevli karbon (KTK) (kontrol edilebilir gözenek boyutu) (Sun, Xu ve Gao, 2015)
- Karbon nanotüpler (KNT'ler) ve grafen (Geim ve Novoselov, 2007)
- Aktif karbon (Zhang, vd., 2018)

Grafen ve indirgenmiş grafen oksit (rGO), karbür türevli karbon (KNT), karbon köpükleri gibi karbon malzemeler EDLC'lerin genel özellikleri göstermektedir. Ayrıca Elektrikli çift katmanlı kapasitörlerde (EDLC)'lerde kullanılan maddelerin redoks aktif maddelerle birlikte hibritleşmesi ile daha yüksek enerji yoğunluğuna erişilmektedir (Zang, Shen, Sanghadas ve Lin, 2018).

2.2.1.1. Karbon Aerojelleri, Karbon Köpükleri ve Karbon Türevi Karbon

Karbon aerojeller kovalent bağlarla bağlı nanometre büyüklüğünde adsorbent malzemeli yapılardır. Karbon aerojeller, dünyada bulunan malzemeler arasında en hafif katı malzemelerdir. Termal ve mekanik özellikleri, yüksek yüzey alanı, 100 nanometre boyuttan daha ufak gözenekli ebatları düşük elektrik iletkenliği, gözenek yapısının kontrol edilebilirliği ve fiziksel dayanımının yüksek olması gibi üstün özelliklerinden dolayı çok fazla kullanım alanına sahiptirler (Sun, Xu ve Gao, 2015).

Gözenek ebatları katı, toz ve yaprak görünümlü formatlarda üretimi gerçekleştirilmektedir. Karbon aerojelleri inert gaz yapıda, zararlı toksit özelliği olmayan ve çevreye karşı duyarlı olan malzemelerdir (Tillotson ve Fricke, 1997).

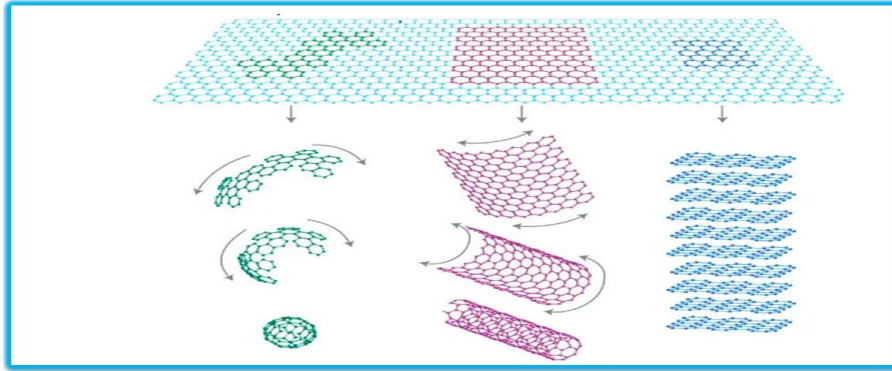
Aerjojeller, genellikle sol-jel tekniği kullanılarak jel hazırlama, jelin yaşlandırılması ve kurutulması olmak üzere üç aşamada üretilmektedir. Jelin sıvı fazının gaz fazı ile yer değiştirmesiyle elde edilen düşük yoğunluktaki malzemelerdir. Farklı hazırlama yöntemleri

konsantrasyonun kontrolünü sağlar bağımsız olarak gözenekleri açarak karbon arojeli uygun bir elektrot malzemesi haline getirir (Moreno-Castilla ve Maldonado- H'odar, 2005).

2.2.1.2. Grafen ve Karbon Nanotüpler

Grafen, sigma bağı ile birlikte 2D sp^2 yapısı olan düz karbon atomunun tek tabakasına verilen isimdir. Grafit malzemeler içinde temel bir yapıtaşını ifade eder. İleri düzeyde elektriksel iletkenliği, yüksek boyutlara çıkabilen yüzey alanı ve son derece elektrokimyasal kararlılığa sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı grafen, indirgenmiş grafen oksit (rGO) aktif madde olarak enerji depolama cihazlarında ve iletken katkı maddesi olarak en çok tercih edilme nedenidir (Gao vd.,2015). Grafen çelikten 100 kat daha sağlam bir malzemedir. Grafen, diğer tüm boyutlardaki karbon malzemeler için 2D yapı malzemesidir ve 0D buckyball'lara sarılabilir, 1D nanotüplere yuvarlanabilir veya 3D grafitte istiflenebilir (Geim ve Novoselov, 2007).

Süperkapasitörler de kullanılan grafen malzemeler sulu elektrolitler birlikte kullanıldığı zaman $120 F \times g^{-1}$ ve $205 F \times g^{-1}$ kadar kapasitans değerlerine çıktığı görülmüştür (Wang vd., 2009). Ayrıca organik elektrolitlerde ise $75 F / g$ kapasitans değerine ulaşmıştır (Vivekchand, Rout, Subrahmanyam, Govindaraj ve Rao, 2008).



Şekil 2.5. Grafenin farklı ebatlarda şekilleri (Geim ve Novoselov, 2007).

Karbon nanotüpler, sp^2 hibritleşme yapısına sahip silindirik bir karbonlu yapı olup altıgen düzenli hibritize karbon atomlarından teşekküldür. Karbon nanotüp (KNT) yüksek spesifik yüzey alanına, istenen elektronik iletkenliğe, yüksek korozyon direncine ve mükemmel mekanik stabiliteye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca elektrik enerjisini yüzeyinde tutma özelliği oldukça yüksektir. Bu özellikler karbon nanotüpün nanoelektronik için öncü yapıtaşındır (Zhang, Cao ve Yang, 2009). Ayrıca, yüksek yüzey alanı ve iyi

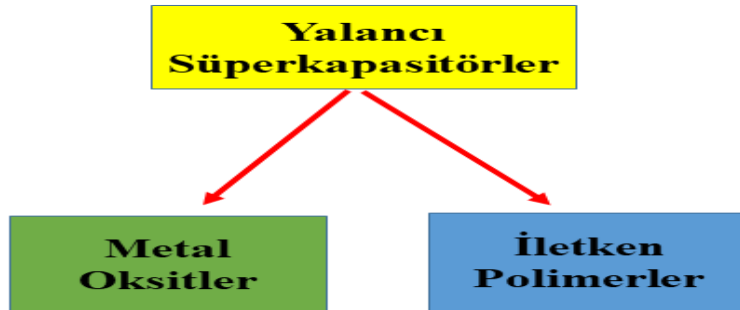
iletkenliği sayesinde, karbon nanotüp son yıllarda, psodokapaktif materyalleri desteklemek ve eklenen materyallerinin kapasitif performansını artırmak için iskelet yapı olarak tercih edilir.

Karbon nanotüpler grafen tabakalı tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) den oluşmaktadır (Yuan vd., 2011). Karbon nanotüp (KNT) / polimer kompozit malzemelerin sentezi, karbon nanotüplerin aygıtların içine yerleştirmek için etkili bir yaklaşımdır (Chen, 2000). İletken polimerlerin üstün özellikleri ile karbon nanotüplerin kombinasyonu sonucu bu materyaller süperkapasitör (Zheng vd., 2011), sensör (Harper ve Anderson, 2010), transistör (Kim, Lee ve Kim, 2019), fotovoltaik hücre (Ayoub ve Lagowski, 2019) gibi birçok uygulamada büyük potansiyel olarak kullanılabilir (Baıbarac vd., 2006).

2.2.1.3. Aktif Karbon

Aktif karbonlar (AK) üstün elektrokimyasal performans, geniş yüzey alana sahip olması ve oksitleyici özelliklerinden dolayı EDLC süperkapasitörlerde elektrot olarak tercih edilmektedir. Gözenek büyüklüğü dağılımı, spesifik yüzey alanı ve karbon elektrotun yüzey özellikleri, süperkapasitörlerin elektrokimyasal performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Zhang, vd., 2018). Yüksek karbon yüzeyli yüzey alanı elektriksel çift katman oluşumunu sağlarken, gözenek büyüklüğü dağılımı iyon difüzyon yollarını belirler. İdeal olarak elektrolit iyonları ile eşleşen 1 nm'den küçük gözenek boyutunun şarjı etkili bir şekilde depolayabildiğini ve böylece EDLC kapasitesini iyileştirdiğini bildirmişlerdir (Zhao vd., 2015).

2.2.2.Pseudo (Yalancı) Süperkapasitörler



Şekil 2.6. Pseudo (Yalancı) süperkapasitörlerin sınıflandırılması.

Pseudokapasitör (yalancı), metal oksit malzeme ile iletken polimerlerin bir arada kullanılarak enerjinin depolanması işlemidir. Metal oksitler ve iletken polimerlerin arasında elektrot ile elektrolitin ortasında Faradik reaksiyon sonucunda iyonların ayrışmasıyla yüklerin birikmesidir (Zhang vd., 2009). Birden fazla farklı metotlar kullanılarak redoks ve birleşmeleri sağlanır. Faradik reaksiyonlar sonucunda enerji yoğunlukları bakımından daha yüksektirler. Pseudokapasitörler düşük potansiyel aralıklarda çalışılma imkanları sağlarlar (Vangari, Pryor ve Jiang, 2013).

Pseudokapasitörlerde metal oksit elektrot kullanılmaya başlanmasıyla; EDLC’de kullanılan karbon elektrotla aynı yüzey alanına sahip metal oksit elektrodun yük depolama miktarının 3 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Bundan hareketle elektriksel çift tabaka kapasitör ve pseudokapasitör aynı kapasitansa sahip olacak şekilde hücre tasarlandığında, psödokapasitörlerin EDLC’ye göre %40 oranında daha az hacme sahip olacağı görülmüştür (Nathan, 2008). Literatürde bu tür EDLC ve pseudpkapasitörden oluşan sistemlere hibrit süperkapasitörler denir.

Pseudokapasitörlerde iletken polimer olarak tercih edilen karbon bazlı malzemelerin yüzeyinde çok sayıda oksijen grubu bakımında zengin hidroksil, karboksil ve karbonil grubuna girmektedir (Zielke, Huttinger ve Hoffman, 1996). Bu hidroksil ve karbonil grupları elektrolit iyonları etkileşime girerek pseudokapasitörün spesifik kapasitans elde edilir (Figuerido, Pereira, Freitas ve Orfao, 1999). Karbon bazlı malzemelerin elektriksel iletkenliği metal oksitlerden daha iyi durumdadır. Karbon bazlı malzemelerde elektriksel iletkenliği yüksek olmasından dolayı spesifik kapasitans değeri yüksek çıkmaktadır (Zhu, Wang, Yang ve Yang, 2011). Örnek olarak verilecek olursa polianilin (PANI) elektrot olarak kullanılması, ucuz olarak temin edilmesi, kolay sentezlenmesi, elektriksel iletkenliğinin yüksek olması ve kolay bir şekilde farklı özelliklerle karıştırılabilir olması özelliklerine sahip olmasından dolayı en tercih edilen iletken polimerlerden biridir. Ayrıca spesifik kapasitansı ($C_{sp}= 500-222 \text{ F}\times\text{g}^{-1}$) değerine sahiptir (Bhadra, Khastgir, Singha ve Lee, 2009).

Pseudokapasitörlerin performanslarının yüksek olması ve defalarca şarj edilebilme özellikleri sayesinde uzun yıllar hayatımızda kullanabileceğimiz aygıtlardır. Pseudokapasitörler güç kaynağı, taşınabilir bilgisayarlarda, iletişim araçları gibi birçok alanlarda kullanabilmektedir (Zhou vd., 2014).

2.2.1.4. Metal Oksitler

Enerji depolama ve dönüşümü uygulamaları için aktif malzemeler olarak geçiş metal oksitleri (GMO) geniş bir inceleme alanına sahiptir. Metal oksitler doğada bulunma yüzdesi fazla olması, sentez kolaylığı, ucuz olması ve yüksek foto ve elektrokimyasal kararlılığa sahip olmaları nedeniyle elektrokimyasal enerji depolama, dönüşüm ve kataliz uygulamaları için önemli bir malzeme türü haline gelmişlerdir (Kim, Park ve Chung, 2020).

Metal oksitlerin zayıf elektriksel iletkenliği, elektrokimyasal enerji depolama ve elektrokimyasal kataliz için performanslarını da etkiler. Oldukça dirençli metal oksitler genellikle şarj depolama cihazları ve katalitik reaksiyonlar için yüksek kapasiteleri ancak düşük hızlarda sağlarlar, bunun nedeni iç dirence bağlı olarak enerjinin büyük bir kısmı kaybolur (Wang, Yang, Han ve Li, 2017). Geçiş metal oksitler (GMO), yani rutenyum oksit (RuO_2), mangan dioksit (MnO_2), kobalt (II, III) oksit (Co_3O_4), demir (II, III) oksit (Fe_3O_4) süperkapasitörler için elektrot malzemesi olarak kullanılmaktadır (Wiston ve Ashak, 2019). Mangan okzalit (MnCO_2O_4), çinko okzalit (ZnCO_2O_4), mangan tetraoksit (Mn_3O_4), bakır manganit (CuMn_2O_4), nikel manganit (NiMn_2O_4) gibi elektrotlar geniş spesifik yüzeye sahip, ucuz olarak temin edilebilecek, redoks davranışı yüksek, spesifik kapasitans değerleri tespit edilmektedir. Örnek olarak literatürde görülen kobalt (II, III) oksit (Co_3O_4) için spesifik kapasitans değeri ($C_{sp} = \sim 3560 \text{ F} \times \text{g}^{-1}$), mangan dioksit (MnO_2) için spesifik kapasitans değeri ($C_{sp} = \sim 1370 \text{ F} \times \text{g}^{-1}$) raporlanmıştır (Huang, Li, Dong, Zhang ve Zhang, 2015; Liu, Li, ve Zhu, 2015).

Titanyum oksit (TiO_2), ucuz, hazır, toksik olmayan, kimyasal ve mekanik açıdan stabildir ve yüksek bir ekonomik değere sahiptir. Bu ince fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, kompozitlerin korozyon direncini, mikro sertliğini ve aşınma direncini arttırmak için metalik matrislerde takviye olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Spanou ve Pavlatou, 2010).

Literatürde, karbon bazlı malzemeler üzerinde yalancı kapasite olarak kullanılan rutenyum oksit (RuO_2) nanoparçacıkları, protonların rutenyum oksit'nin (RuO_2) iç kısmına erişebilmesinde dolayı, artan bir kapasitans değeri göstermektedir (Yan vd., 2014). Bu nedenle RuO_2 süperkapasitörler için nanokompozit elektrot malzemelerinin kapasitansını artırır (Pan, Li ve Feng, 2010). Pseudokapasitörler kullanılan rutenyum oksit (RuO_2) potansiyel çalışma aralığı yüksek olması, uzun yıllar kullanılabilirliği ve elektriksel iletkenliği

çok iyi düzeydedir (Wang ve Zhang, 2012). Rutenyum oksit (RuO_2) metal oksitin yapısında çok sayıda hidroksil (OH) iyon grubunun olmasından dolayı hidrofilikliğı özelliğı gösterir. Bu özelliğinden yararlanılması açısından sulu elektrolit çözeltilerle etkileşime sokularak daha fazla spesifik kapasitans değerleri göstermektedirler. Bir diğere özelliğı de kısa süre şarj ve deşarj olabiliyor olmasıdır (Hu, Chang, Lin ve Wu, 2006; Trasatti, 1991).

Mangan dioksit (MnO_2), süperkapasitörler alanındaki birçok uygulamada en yaygın kullanılan malzemelerden biri olmuştur (Ghodbane, Pascal ve Favier, 2009). MnO_2 bir geçiş metal oksididir ve düşük maliyetli, yüksek yüzey alanı, çevre güvenliğı, iyi iyon difüzyonu ve doğal bolluğaa sahip olması MnO_2 'ye birçok avantaj sağlar (Liu, Li, Li, Yin ve Liu, 2016). Pil malzemelerinde, süperkapasitörler de ve kataliz olarak MnO_2 endüstriyel uygulama alanlarına sahiptirler (Qu vd., 2014; Zhang, Jamal, Zhao, Wang ve Abdiryim, 2015).

2.2.1.5. İletken Polimerler

İletken polimerler, yüksek iletkenlik, hafiflik, düşük maliyet, esneklik gibi özelliklere sahip olmaları nedeniyle süperkapasitörler, piller, güneş pilleri vb. uygulamalarda sıklıkla kullanılırlar (Yoo, Kim ve Kim, 2014).

İletken polimer çeşitleri başlıca; poliasetilen (PA), polianilin (PANI), polipirol (PPy), politiyofen (PTP), polifuran (PFu), polifenilen (PP), poli(para-fenilen) (PPP), poli(vinil klorür) (PVC), poliinden (PIn) ve poliindol (PInd) olarak sayılabilir (Ateh, Navsaria ve Vadgama, 2006).

Poliasetilen (PA) elektrokimyasal yöntemlerle hem anyonik hem de katyonik olarak katkılanabilir. Bu özelliğıyle doldurulabilir pillerde elektrot malzemesi olarak kullanılır. Kurşun asitli aküyle karşılaştırıldığında poliasetilen (PA) pilinin çok hafif olduğı ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğı anlaşılmıştır (Bahceci ve Esat, 2013).

İletken polimerleri diğere polimerlerden ayıran en önemli özellik tek ve çift bağılardan oluşan konjuge zincir yapısına sahip olmalarıdır. Uzun konjuge çift bağılı zincirler sayesinde iletkenlik kazanırlar (Wallace ve Spinks, 2007).

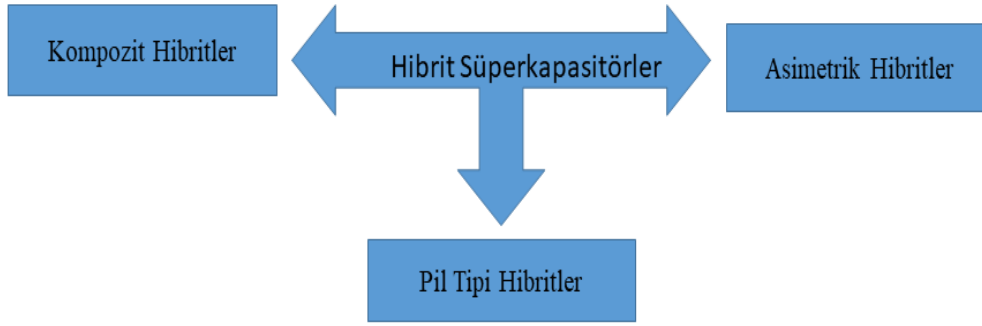
Poli(9-vinilkarbazol) (PVK), serbest radikal, şarj transfer ve katyonik polimerizasyon işlemine sahip olabilen, şekilsiz delik iletimli bir vinil polimerdir (Natori, 2006). Literatürde farklı uygulamalarda (pillerden, güneş pillerine ve süperkapasitörlere) PVK üzerine birçok

çalışma vardır (Zhang vd., 2018; Ates, Yıldırım ve Kuzgun, 2019; Aashish, Ramakrishnan ve Sudha, 2016). Ramakrishnan ve arkadaşları PVK/ ZnO hibrit nanokompozitlerini hafıza cihazları geliştirmek için sentezlenmişlerdir (Ramakrishnan, Jinesh, Devaki ve Varma, 2016). Bunun yanında Aashish ve arkadaşları yeni foto PVK/ Titanyum nanokompozit geliştirmişlerdir (Aashish, Ramakrishnan, Sudha, Sankaran ve Krishnapriya, 2016). Çinko (Zn)/ Kükürt (S) /PVK nanokompozit ise hibrit malzemelerin optik özelliklerini incelemek için sentezlenmiştir. (Benchaabane vd., 2014). Bu çalışmada por çapı yaklaşık 500 nm olarak porlu yüzey olarak elde edilmiştir. Ayrıca organik ışık yayan diyot cihazlarda kullanılmak amacıyla rGO/PVK nanokompozitler sentezlemiştir (Liu vd., 2014 ; Aleshin, Sokolovskaya, Shcherbakov, Brunkov ve Ulin, 2013).

Poli(3,4-etilendioksitiyofen) (PEDOT), uzun süreli elektriksel stabilitesi (Groenendaal, Zotti, Aubert ve Waybright, 2003), düşük bant aralığı, daha iyi mekanik özellikleri, mükemmel şeffaflık ve iyi elektrokimyasal aktivite gibi polimerlerin iletkenlik özellikleri arasında birçok avantaja sahiptirler (Jin vd., 2013). PEDOT yapısındaki Azot (N) ve Kükürt (S) atomlarının elektronca zengin olup olmaması ile karbon malzemelerinin kapasitif performanslarına etki eder (Zhao vd., 2012). Doplama işlemi ile karbon malzemelerin elektronik ve kimyasal özellikleri iyileşmektedir (Wang, Yan ve Fan, 2016; Kong, Zhu, Zhang, Liu ve Hu, 2018).

Endüstriyel uygulamalarda, politertiyofen (PTTh) ve poliaminonaftalenler kullanılır PTTh uzun süreli stabilite ve artmış elektrokimyasal olarak aktif alan gösterir (Heinze, Frontana-Urbe ve Ludwigs, 2010). Politertiyofen (PTTh), yüksek iletkenlik ve çevresel stabilite gösterir ve 3' pozisyonunda sübtitüe edilirken, 2' ve 5" pozisyonlarında hızlıca polimerize olur (Ju, Xia ve Elioff, 2016). Politertiyofen türevleri ve süperkapasitör uygulamaları üzerine redoks aktif elektrot olarak literatürde çalışmalar vardır. Poli (3',4'-bis(alkiloksi) tertiyofen türevleri olarak PTT0oct- bazlı elektrotlarda en yüksek enerji yoğunluğu E=60,7Wh/kg olarak elde edilmiş 10000 yükleme / boşalma döngüsü ile stabilite testleri yapılmıştır (Yiğit, Aykan ve Güllü, 2018).

2.2.2. Hibrit Süperkapasitörler



Şekil 2.7. Hibrit süperkapasitörlerin sınıflandırılması.

Daha önceden kullanılan süperkapasitörlerin özelliklerinden daha üstüne koyarak bir üst modelini elde etmek için ve üretimindeki harcanan mali değerini daha da altına inilmesini istediklerinden dolayı son yıllarda süperkapasitörlerin üzerine çok fazla araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarında neticesinde araştırmacılar tarafından elde ettikleri süperkapasitörlerin daha geliştirerek farklı modeller kullanılarak hibrid süperkapasitörü icat edilmek istenmiştir.

EDLC'lerde defalarca çevrim döngüsünü ilerletmesini ve güç yoğunluğu bakımından yüksek olması ve pseudokapasitörlerin üretiminde harcanan miktarı daha azaltmayı ve enerji yoğunluğu açısından daha yüksek değerlerde olması beklenilmektedir (Conte 2010). Birbirinden ayrı özelliklere sahip pseudokapasitörler ile elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EDLC) sahip olduğu performansların karışımından elde edilen süperkapasitördür. Böylece hibrid süperkapasitörün en büyük avantajı ortaya çıkmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek güç yoğunluğu, aynı zamanda yüksek stabiliteye sahip kapasitörlerdir. (Du, Wang, Chen, Jiao ve Wang, 2009; Zhao vd., 2010).

Hibrit süperkapasitörlerde (HSC'de), elektrotlar iki farklı malzemeden oluşmaktadır. Bir elektrodu negatif ve diğeri pozitif elektrottur. Pozitif elektrot olarak geçiş metali oksitler (GMO) kullanılır. Geçiş metallerinin kuvvetli tersinir oksidasyon ve düşürme tepeleri olan farklı yapılara ve fazlara sahiptirler. Negatif elektrot olarak karbon bazlı elektrotlar tercih edilir. Karbon bazlı maddeler bol miktarda gözenekli yapısı sayesinde elektrolit iyonlarının yüzey alanına ulaşip kolayca tutunabilmesiyle elektriksel iletkenliği yüksektir. Bir diğeri özelliği potansiyel penceresini ve şarj transfer prosesini genişleterek enerji yoğunluğunda artış sağlanabilir (Kshetri vd., 2019).

İletken polimerlerle birleştirilerek yapılan karbon nanotüp (KNT) kompozit malzemeler hibrid süperkapasitörlere örnektir (Liu vd., 2020; Wei, Bi, Jiao ve He, 2020). Bu malzemeler yükleme ve boşaltım depolama mekanizmalarından dolayı çok ilgi çekmektedir (Wu vd., 2005). Hibrit kapasitörler çalışma mekanizmasına göre 3 farklı sınıfa ayrılıyor:

- Kompozit hibritler (Zhi, Xiang, Li, Li ve Wu, 2013).
- Asimetrik hibritler (Najib ve Erdem, 2019).
- Pil tipi hibritler (Hong ve Lin, 2019).

2.2.2.1. Kompozit Hibritler

Kompozit hibritler, pozitif elektrotlar ile negatif elektrotların birleştirilmesiyle tek tip elektrot materyali olarak kullanılmasıdır. Kompozit hibritler daha yüksek spesifik kapasitans daha kararlı bir yapı ve daha iletken bir yapıya sahip olması istenmesinden dolayı karbon bazlı malzeme ve metal oksit malzemelerinin özelliklerinin karıştırılmasıdır (Zhi, Xiang, Li, Li ve Wu, 2013).

Karbon bazlı malzemelerin, kuvvetli mekanik dayanımı, düşük dirençli olması ve geniş yüzey alanı sayesinde kolaylıkla yük transferi gerçekleştirilebilir. Metal oksitlerin redoks reaksiyonları yardımıyla yüksek enerji yoğunluğu ve spesifik kapasitansa ulaşılır, böylece enerjiyi bünyelerinde hapsedebileceklerdir (Zhu vd., 2018).

2.2.2.2. Asimetrik Hibritler

Asimetrik süperkapasitörler ise iki farklı elektrot kullanılır. Bunlardan biri Faradik olmayan çift tabakalı süperkapasitör diğeri ise yalancı süperkapasitördür. Çalışma mekanizması ise bu iki farklı elektrotların aynı zamanda çalıştırılmasıyla enerji ve güç yoğunlukları değerleri elde edilir. Negatif bir elektrot olarak genellikle karbon bazlı materyaller tercih edilir bazen de metal oksitler anot olarak kullanılabilir. Ara sıra metal oksitlerin anot görevinde tercih edilmesinin nedeni yüksek iç hacimsel kapasiteye sahip olmasından dolayı enerji yoğunluklarında da yükselmeler olabileceği düşünülmektedir (Najib ve Erdem, 2019).

Süperkapasitörlerin durduk yere şarjlarının hızlı boşalması olayı istenmeyen bir durumdur. Bu durumun üstesinden gelmenin en iyi yolu basit sallanan sandalye mekanizması

üzerinden asimetrik süperkapasitör sistemin çalıştırılmasıdır. Basit sallanan sandalye mekanizmasının olduğu yerde sıfır akımda maksimum değerlerde potansiyele ulaşılır. Ayrıca karbon bazlı negatif elektrotlarda bu yöntem kullanılarak çalışma geniş voltaj aralığına çıkarılarak daha yüksek enerji ve güç yoğunlukları elde edilebilir (Yoo vd., 2016).

Asimetrik süperkapasitörler enerji ve güç yoğunlukları açısından EDLC'e göre daha yüksek değerlere sahip olabilirler. Ayrıca, yalancı süperkapasitörlere göre döngüsel çevrim stabilitesi daha yüksek olduğu bilinmektedir (Gao, Xiao, Ching ve Duan, 2012).

Sulu elektrolit çözeltisi kullanan simetrik kapasitörler: tip I simetrik kapasitörler olarak, organik elektrolit kullanan simetrik kapasitörler ise tip II simetrik kapasitörler olarak bilinirler. Benzer şekilde sulu elektrolit kullanan asimetrik kapasitörler tip III asimetrik kapasitörler olarak ve organik elektrolit kullananları ise tip IV simetrik kapasitör olarak bilinir (Conway, 1996).

2.2.2.3. PİL Tipi Hibritler

Pil tipi hibrit kapasitörler ise süperkapasitör elektrotu ile pil elektrotun karıştırılması sonucu elde edilir. Böylelikle yüksek enerji yoğunluğuna ve yüksek güç yoğunluğuna sahip piller üretilir (Halper ve Ellenbogen, 2006).

Pillerin yüksek enerji-güç yoğunlukları ve defalarca şarj edilebilir durumu olan süperkapasitörler, pil tipi hibritlerin kullanım bakımından en iyi olan enerji depolama cihazları arasında yerini almıştır.

Pil tipi hibrit süperkapasitörlerde enerji yoğunluğunu ve spesifik kapasitans değerlerini yükseltmek için elektrot olarak kullanılacak aktif malzemelerin seçiminde dikkatli olunmalıdır. Bu durumun dikkate alınması neticesinde nikel kobalt malzemesi elektrot olarak seçilerek, yüksek iletkenliği ve birden fazla geçiş metotları özelliklerinden yararlanır (Hong ve Lin, 2019).

Pil tipi hibrit süperkapasitörlerde elektrot olarak geçiş metal oksitler, hidrositler ve sülfürler ve fosfatlar kullanılır. Böylece yalancı süperkapasitörlerden daha yüksek değerlerde enerji yoğunluğuna ulaşılabilir. Ayrıca döngülü çevrim stabiliteyi defalarca tekrarlanarak güç yoğunlukları da artırılarak elektronik cihaz sistemlerin kullanılması kaçınılmaz olur. Yüksek değerlerde özgül kapasitans, ucuz maliyetli ve zehirleyici olan metal fosfatlar

elektriksel iletkenliğinin iyi olmasının yanı sıra ileri düzeyde elektrokimyasal kararlılığa sahiptirler (Tao vd., 2018).

2.3. Süperkapasitör Cihaz Tasarımı

Süperkapasitörler ikili ve üçlü elektrot sistemleri kullanılarak cihaz tasarlanmaktadır. İki elektrotlu süperkapasitör, esnek katı hal süperkapasitör, fiber süperkapasitör ve düzlemsel (mikro) süperkapasitörler olarak adlandırılmaktadır. İki elektrotlu bir sistemin yapısı gerçek bir süperkapasitöre daha yakın olarak çalışmaktadır. Böylece deneysel çalışmalar sonrası ticari ürün elde edilmeleri açısından kolaylıklar sağlanabilmektedir.

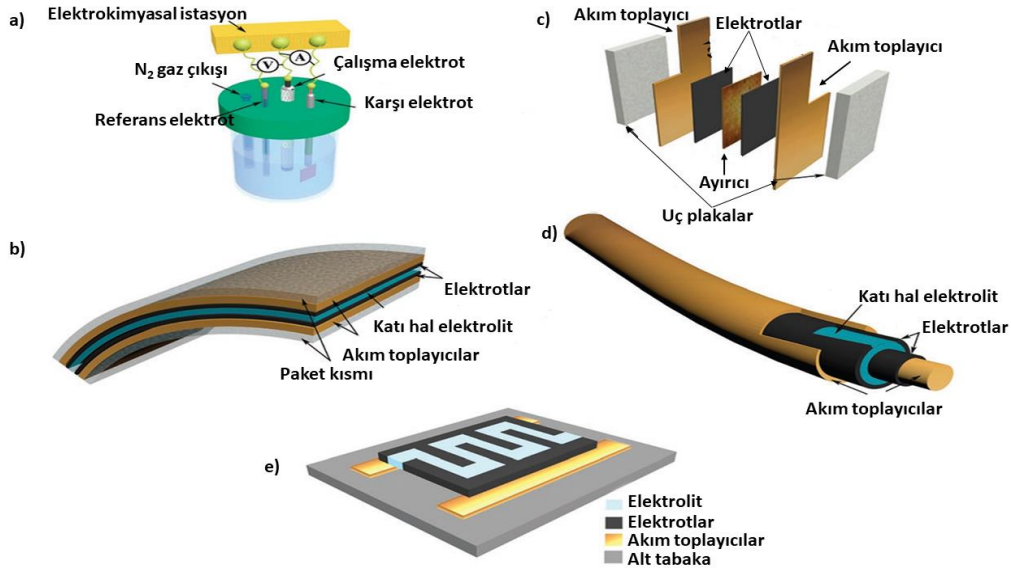
Süperkapasitörler çalışma mekanizmalarında ikili elektrotlar kullanılarak enerjiyi depolayan sistemlerdir. Elektrolit iki elektrot arasında anot ve katot bölmelerine mikropipet aracılığıyla konulurken, araya iyon geçişini sağlamak için membran ayırıcı konulur ve birbirleriyle elektriksel akımın olması önlenerek akım toplayıcılar tarafından yükün depolanması sağlanır. İkili elektrotlar ya birbirinin aynısı ya da birbirinde farklı nanokompozit malzemelerden oluşmaktadır. Süperkapasitörlerin çalışma mekanizması simetrik süperkapasitörler hem pozitif hem de negatif elektrot için aynı elektrot materyalini kullanır. Asimetrik süperkapasitörler pozitif ve negatif elektrotlar için farklı elektrot materyali kullanılır. İki elektrotlu sistemlerde yalnızca bir tane elektrottan (anot veya katot) yararlanılarak elektrokimyasal performans özelliklerinin değerlendirilmesi yapılmaktadır (Ji, Mi ve Yang, 2019).

Tezimde ikili elektrotlu süperkapasitörün çalışma mekanizmasından yola çıkılarak spesifik enerji ve güç yoğunlukları incelendi ve gerçek devre kurularak elde edilen verilerle Led lambanın ne kadar sürede yanabildiği gözlenmiştir.

Üçlü elektrot ile çalışılan süperkapasitörlerde ise; ilk elektrot çalışan elektrot, diğeri karşı elektrot ve en sonuncusu ise referans elektrot olarak adlandırılmaktadır. Üç elektrotlu hücre, elektrot malzemelerini karakterize etmek veya elektrokimyasal depolama işlemlerini araştırmak tercih edilmektedir (Xie vd., 2018). Üçlü elektrotlu süperkapasitörlerin elektrokimyasal performanslarını değerlendirilmesi sırasında çalışma elektrotunun karşı elektrottan kopmasıyla reaksiyon güvenli bir şekilde enerjiyi depolamaktadır. Üçlü elektrotlu süperkapasitörlerde elektrokimyasal performansları ve karakteristik özelliklerinin incelenmesi

sadece çalışma elektrotundan yararlanılarak yapılmaktadır. Üçlü elektrotlarının düzeğinin kurulması ikili elektrotlara göre daha zordur (Saranya, Rameez ve Subramania, 2015).

İkili ve üçlü elektrotlu süperkapasitörlerin spesifik enerji olarak karşılaştırılması yapılacak olursa üçlü elektrotlu süperkapasitörlerin daha yüksek değerlerde enerji depolandığını söyleyebiliriz (Khamenko ve Frackowiak, 2015). Ayrıca fiziksel özelliklerini, volt ve şarj akımları sırasındaki davranışları en iyi şekilde gözlemlenmesine imkan sağlamaktadır (Stoller ve Radney, 2010). İkili elektrotlu ve üç elektrotlu olarak çalışan süperkapasitörlerin şematik gösterimi Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. a) Üç elektrotlu (yarı hücreli) sistemli süperkapasitör, b) iki elektrotlu hücreli süperkapasitör, c) esnek katı halindeki süperkapasitör, d) fiber süperkapasitör, e) düzlemsel (mikro) süperkapasitörün (Ji, Mi ve Yang, 2019).

2.3.1. Akım Toplayıcı

Enerji depolama cihazlarında kullanılan süperkapasitörlerde kullanılan elektrotların sahip oldukları özellikleri yeteri kadar yerine getirebilmesi için akım toplayıcılardan yardım alınmaktadır. Akım toplayıcılar sayesinde ileri derece de kararlı kimyasal, termal kararlılığa ve döngüsel çevrimde istikrarlı şarj ve deşarj olayları gerçekleşmektedir (Yavuz vd., 2019). Farklı modeller olan süperkapasitör cihazlarında akım toplayıcılar olarak metal (paslanmaz çelik, Ni köpük vb.) ve karbon akım toplayıcılar üzerinden sistem çalışmaktadır (Zhang vd., 2019).

2.3.1.1. Metal Akım Toplayıcılar

Metal akım toplayıcılar olarak nikel köpük, alüminyum, platin, bakır, gümüş, altın titanyum ve oksitlenmez çelik gibi farklı materyaller tercih edilir (Wang vd., 2013). Oksitlenmez çelik malzemeler maliyet olarak ekonomik ve enerji depolama cihazlarında kolay kullanım olanakları olmasından dolayı en çok tercih edilen materyallerdir (Prasad ve Munichandraiah, 2002).

Nikel köpükler ise çok küçük mikrometre ölçekli akım toplayıcılardır. Şarj olayının gerçekleşmesi sırasında direnci düşürerek iyonların hareketliliğini sağlayarak elektrokimyasal performansta iyileşmeler kazandırır. Nikel köpükler kullanılarak toplayıcılar ile aktif materyallerin ortasındaki elektronların hareketleri kolaylaşır ve daha geniş yüzey alanına sahip olmalarıda diğer bir avantajdır (Kim, Kim, Kim ve Jang, 2017).

2.3.1.2. Karbon Akım Toplayıcılar

Karbon akım toplayıcılar olarak; karbon fiber kağıtlar, elyaf kağıtlar, elastik özellikli pamuklu kıyafetler ve karbon giysiler gibi karbon bazlı malzemeler kullanılır (Wang ve Dryfe, 2013). Grafen malzemesi ile karbon fiber kağıtların birbiriyle etkileşime girerek süperkapasitörün yüksek iletkenliği sağlanır (Zou ve Wang, 2015).

2.3.2. Ayırıcılar

Süperkapasitörlerde kullanılan ayırıcılar iki farklı elektrotun birbiriyle dokunmasını ve çalışma mekanizması sırasında kısa devre yapılmasını engelleyen bir aparatır. Ayırıcıların seçilmesinde dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır. İlk olarak bol gözenekli yapıya ve yüksek mekanik dayanıma sahip olmalı ki böylelikle elektrolitlerin içindeki iyonların kolay doldurulması sağlanır. Bir diğer önemli özelliği deşarj işlemi sırasında ise elektrolitlerin içindeki iyonların rahatlıkla ilerleyebilmesi için ince bir yapıya sahip olunmalıdır.

Süperkapasitörlerin çalışma mekanizmasında sırasında güvenli olması için gerilme sırasında yırtılmayan ayırıcılar kullanılarak büyük ölçü de tebbirler alınabilir. Poliakrilonitril (PAN) malzemesi ayırıcı olarak kullanılabilir. Tercih edilme nedeni yüksek miktarda karbon içermesi, dönme yeteneği ve ucuz elde edilmesindedir (Bon vd., 2018).

Süperkapasitörler ayırıcı aparat olarak kullanılan materyallerin başında polivinil alkol (PVA) gelmektedir. Doğada bol miktarda olması, maliyet açısından ekonomik, ince film ayırıcıların imalatlarının kolay yapılması ve herhangi bir zehirleyici özelliği bulunmadığından çevreye karşı sorun teşkil etmemesi ve bunun gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Ayrıca parçalanmalara karşı dirençli ve sulu çözeltilerde esneyebilmesi olmasından dolayı giyilebilir sistemlerde ve titreşimli elektrikli elektronik sistemler güvenli kullanımı sağlamaktadır (Li, Zhang, Xu ve Zhang, 2000).

Süperkapasitörlerde organik elektrolitler kullanıldığında polimer ya da kağıt ayırıcılar tercih edilirken, sulu elektrolitlerde ise seramik veya cam elyaf bazlı ayırıcılar tercih edilir (Chandra, 2012).

2.3.3. Elektrolit

Süperkapasitörlerde enerjinin depolanmasında elektrolit materyaller çok önemli yere sahiptirler. Yüksek çalışma voltajları ile fiziksel, kimyasal ve elektrokimyasal özelliklerini kararlı bir şekilde koruyabilecek elektrolitler gerekmektedir. Elektrolitlerin yardımıyla elektrotlar arasındaki iyonların aktarılmasıyla elektriksel iletkenliği sağlamaktadırlar. Enerji yoğunluğu (E); elektrolitin çalışma voltaj aralığı karesiyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Voltaj değeri, bir elektrolitin elektrotların bünyesindeki potansiyel çalışma aralığından geçmektedir. (Chen, Zhaoen, Jiang ve Zhou, 2019). Bunun sonucu olarak süperkapasitörler yüksek spesifik değerlere ulaşırlar (Orikasa vd., 2014; Fic, Grzegorz, Mikoloj ve Elzbieta, 2012).

Elektrolitler pozitif elektrot (katot) ile negatif elektrotların (anot) aralarında reaksiyona girmesiyle yüksek güç yoğunluğunda süperkapasitör sistemlerin güvenli bir şekilde çalışmasına yardımcı olurlar. Süperkapasitörlerde elektrolitler sulu elektrolit ve organik elektrolit olmak üzere iki çeşide ayrılır. Süperkapasitör sistemlerin elektrolit olarak seçilmesi için taşıması gereken özellikler şunlardır;

- Yüksek çalışma voltaj aralığına sahip olmalı
- Maliyet açıdan uygun olmalı
- Yüksek iyonik iletkenliği olmalı
- Çevreye karşı duyarlı ve güvenilir olması

- Fiziksel, kimyasal, termal kararlılığı
- Kimyasal olarak inert özelliği

Redoks reaksiyonu sırasında iyonların adsorpsiyonunu indükleyip elektriksel yükün oluşturulmasını sağlar. Elektrolitin redoks reaksiyonu ile beraber çalıştırılıp Faradaik redoks reaksiyonlar oluşarak süperkapasitörlerin spesifik kapasitansları değerlerinde artışlar olur. Elektrolitler sıvı katı ve jel şeklinde olabilir. Elektrolitlerin viskozitesi, iyonik elektriksel iletkenliği sayesinde süperkapasitörlerin döngüsel çevrim stabilitesi üzerinde kararlılığını göstermektedir (Lin, Lin ve Hong, 2019). Batarya gibi enerji depolamalarda Alessandro Volta araştırmacı tarafından geliştirilen elektrolit olarak tuzlu su seçilmiştir. Süperkapasitör cihazlarında en çok tercih edilen sulu elektrolit materyallerdir (Xia, Yu, Hu ve Chen, 2017).

2.3.3.1. Sulu Elektrolitler

Sulu elektrolitler tuzlar, iyonik sıvı, saf tuz olarak karşımıza çıkabilir. (Aurbach vd., 2004; Palomares vd., 2012). Sulu elektrolitler, ileri düzeyde iyonik iletkenliği, ekonomik oluşu, kolay temin edilmesi, güvenli olması, pH oranları bakımından avantajlı olması, basit kullanımı ve küçük değerlerde viskoziteye sahiptirler (Beguin, Presser, Balducci ve Frackowiak, 2014).

Sulu elektrolitler kullanılan süperkapasitörlerin enerji yoğunlukları bakımından düşüktürler. Sulu elektrolitler üç kategoriye ayrılırlar: (1) alkalın, (2) nötr ve (3) asidik çözeltiler. Süperkapasitörlerde en sık kullanılan sulu elektrolit materyalleridir (Kaempgen, Chan, Ma, Cui ve Gruner, 2015).

Süperkapasitörlerde elektrolitler; sulu elektrolit ve katı elektrolit olarak olmak üzere iki grupta incelenir. Sulu elektrolitler, pillerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Katı elektrolitler süperkapasitörlerde polimer bazlıdır. Katı elektrolitlerin alçak buhar basıncına sahip olmasından dolayı yüksek sıcaklık değerlerinde çalışılmaktadır ve kolay kullanıma sahiptirler. Literatürde, süperkapasitör cihazlarında kullanılan katı elektrolitler olarak polimer bazlı materyallerden yararlanılır (Choudhury, Sampath ve Shukla, 2009).

Katı elektrolitler oksitlenmemesi, sızdırmaması, yanmaması gibi özelliklere sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı sıvı elektrolitlere göre daha güvenilir elektrolitlerdir (Baek, Hınma, Kim ve Rangappa, 2017).

Elektrokimyasal süperkapasitörlerde elektrolitler olarak sulu ve susuz elektrolitler ve iyonik sıvılar kullanılmaktadır. Su elektrolitlerinin avantajı, daha yüksek elektriksel iletkenliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum ise spesifik gücün en yüksek değerlerini elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Sulu olmayan elektrolitler ve iyonik sıvılar içeren elektrokimyasal süperkapasitörler, yüksek gerilim değerleri nedeniyle ve ayrıca doğru akım enerjisinin maksimum değerinin kare maksimum gerilim ile orantılı olması nedeniyle daha yüksek spesifik enerji değerlerine sahiptirler (Chen vd., 2019).

2.3.3.2. Organik Elektrolitler

Organik elektrolitler tuzların seyreltilmesine yardımcı olan tuz ve çözücü materyallerden meydana gelir. Dielektrik gibi parametrelerden dolayı C ve O polar ve $C\equiv N$ grupları içeren kuvvetli çözücüler kullanılır. Süperkapasitörlerde kullanılan organik elektrolitlerin tercih edilirken dikkat edilmesi gereken önemli noktalar bulunmaktadır. İlk olarak elektrotların yüzeylerinde elektrokimyasal iletkenliklerinin yüksek olması, ikincisi ise iyonların transferinin kolayca gerçekleşmesi istenir bunun içinde düşük viskozite değerlere sahip organik elektrotlar tercih edilirler (Yao, Pham ve Lee, 2015).

Bir organik elektrolitin hücre voltajı geniş tutularak daha yüksek enerji yoğunlukları elde edilebilir. Bu nedenden dolayı süperkapasitör gibi enerji depolama sistemlerinde organik elektrot olarak kullanılacak materyaller şunlardır: Tetraetilamonyum tetrafloroborat ($TEABF_4$), tetraetilfosfor tetrafloroborat ($TEPBF_4$) ve ortrietilmetilamonyum tetrafloroborat ($TEMABF_4$), genellikle organik tuzlar olarak kullanılmaktadırlar (Yan, Wang, Wei ve Fan, 2014).

Propilen karbonat (PC) ve asetonitril (AN) materyaller organik elektrolitler olarak en çok kullanılanlardır. Elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EDLC)'de organik elektrolit olarak genellikle asetonitril (AN) tercih edilir. Asetonitril (AN) EDLC'de tercih edilmesinin nedeni yüksek elektriksel iletkenliğe ve düşük viskoziteye sahip olmasındandır. Bunun sonucu olarak EDLC'de daha yüksek performanslara ulaşılmaktadır (Liu, Liu, Yi ve Hu, 2019). Ticari EDLC süperkapasitörler de organik elektrolit olarak asetonitril (AN) kullanılarak enerji yoğunlukları 2.7 ile 3.0 V yüksek enerji voltaj penceresine kadar çıkıldığı görülmektedir (Dou vd., 2019).

Ticari süperkapasitörler ve diğer enerji cihazları için tipik organik elektrolitler, iletken tuzlardan ve bir organik karbonat çözücüsünden oluşur (Raza vd., 2018). Organik çözücülerin yanıcılığı ve uçuculuğu nedeniyle, süperkapasitörler ve diğer enerji depolama aygıtları için bu tür elektrolitler kullanılırken güvenlik konularına öncelik verilmelidir (Na vd., 2018).

2.3.3.3. İyonik Sıvı

Ticari süperkapasitörlerin çalışma mekanizmalarında organik elektrolitlerin voltaj çalışma aralıkları olan 2,5 V ile 2,8 V değerleri arasında olmaları yeterli değildir. Daha yüksek voltaj aralıklarına çıkabilecek materyallere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle son yıllarda süperkapasitörlerde elektrolit olarak iyonik sıvılar kullanılarak voltaj aralıkları 3V değerinin üstüne çıkabilmektedir (Nanbu, Ebina, Uno, Ishizawa ve Saki, 2006). İyonik sıvı olarak kullanılan materyaller; tetrafloroborat gibi imidazolyum ve pirolidinyum ve anyonlar olarak katyonlar $[BF_4]^-$, bis(triflorometansülfonil) amid $[NTF_2]^-$, bis (florosülfonil) imid $[FSI]^-$ ve heksaflorofosfat $[PF_6]^-$ tercih edilmektedir (Wang ve Zhang, 2012).

İyonik sıvılar 100°C'nin altında eriyebilen ve bu değerden sonra tek iyon materyalleri olan likitlerdir. İyonik sıvılar oksijen ve suyla kararlı bir şekilde reaksiyon oluşturduktan sonra anyon ve katyon olmak üzere iki farklı çeşitlerde sentezlenmeleri bulunmaktadır (Wilkes, Zawonotko, 1992).

Grafen materyalinde kullanılan kapasitörler elektrolit olarak iyonik sıvı kullanıldığında 80°C sıcaklıkta, spesifik enerjisi ($E= 136 \text{ Wh}\times\text{kg}^{-1}$) elde edildi. Bu enerjiye sahip olmasının nedeni iyonik sıvının 4.0V'luk yüksek çalışma voltajında çalışabiliyor olmasından dolayıdır (Liu, Neff, Zhamu ve Jang, 2010).

Günümüzde iyonik sıvılar katyon ve anyon olarak polimer bazlı materyallere eklenmiştir. İyonik sıvılar, katyon ve anyon olarak kimyasal ve fiziksel olarak farklılaştırılan iyonların oda sıcaklığında eritilerek tuz oluşturulur (Macfarlane vd., 2014).

İyonik sıvılar su ve organik çözücü materyalleri ile reaksiyona sokulduğunda az miktarda uçuculuk ve yüksek termal kararlılığa sahip olmalarını sağlar. İyonik sıvılardan çok az değerinde buhar basıncı, yüksek termal kararlılığı, geniş voltaj sıcaklığı aralığı, organik ve inorganik materyaller değiştirilebilir çözünürlüğü, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin

değiştirilebilir olması süperkapasitörlerde ilgi odağı haline gelmesine neden olmaktadır (Liu ve Yu, 2019).

2.4. Enerji Depolama Sistemleri

2.4.1. Batarya Sistemleri

Günümüz koşullarında enerji depolama sistemlerinde kolay kullanım açısından en çok batarya sistemlerinden lityum pilleri genellikle tercih edilmektedir. Lityum pilleri, lityum-iyon piller (LIB'ler), lityum-sülfür (Li-S) piller veya lityum-oksijen piller (LOB'ler) farklı isimleriyle farklı karşımıza çıkmaktadırlar. Bunların arasında en iyi spesifik enerji ve güç yoğunlukları bakımında lityum-iyon pilleri (LIB'ler) tarafından enerji depolanacağı beklenmektedir (Pham vd., 2019). Lityum-iyon pilleri (LIB'ler) enerji depolama sırasında lityum iyonlarının negatif elektrotlardan geçirilip çıkmasıyla enerji elde edilir. Lityum-iyon pillerinin (LIB'lerinin) yüzeyinde veya aktif maddenin kütlesinde Faradaik reaksiyonlar oluşmasıyla yüksek spesifik kapasitanslar elde edilerek şarj işlemi gerçekleşir.

Lityum-iyon piller (LIB'ler) anot ve katot olarak malzemelerden oluşmaktadır. Ticari olarak kullanılan katot malzemeler; lityum kobalt oksit (LiCoO_2), lityum, demir fosfat (LiFePO_4), lityum manganez oksit (LiMn_2O_4), lityum nikel manganezkobalt oksit ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$) ve grafit, lityum titanat (LT), sert karbon, kalay/kobalt alaşımı, silikon/karbon materyalleri anot olarak tercih edilirler (Sagadale, 2019).

Lityum-iyon piller (LIB'ler), yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü özellikleri nedeniyle, güç kaynaklarında kullanım bakımından önemli aygıtlardır (Chen, Lou ve Shen, 2018).

Enerji yoğunluğu, bir pilin belirli bir kütle için depolayabileceği toplam enerji miktarının bir ölçüsüdür. Bu elemanlar önemli miktarda enerji depolayabilirler. Diğer özellikler arasında uzun servis ömrü, düşük başlangıç ve değiştirme maliyetleri, yüksek güvenilirlik, geniş çalışma sıcaklığı aralığı ve sağlamlık sayılabilir (Ghossein, Sari ve Venet, 2019).

Enerji depolama sistemleri, boşalma süreleri bakımından iki gruba ayrılırlar. Bunlar; yüksek enerji yoğunluğu enerji depolaması ve yüksek güç yoğunluğu enerji depolamasıdır. Tipik bir yüksek enerji yoğunluklu enerji deposu olarak, mikro pillerde ve küçük sistemlerde

birincil frekans tepkimesi için kimyasal piller kullanılmıştır. Pillerle karşılaştırıldığında, elektrikli çift katmanlı süperkapasitörler daha yüksek güç yoğunluğuna, ancak daha kısa boşalma süresine sahiptirler. Ayrıca daha yüksek çalışma verimi, daha kısa şarj ve süresi, daha düşük eşdeğer seri direnç ve uzun çevrim ömrüne sahiptirler.

Geleneksel kapasitörler ile karşılaştırıldığında, süperkapasitörler daha yüksek enerji kapasitelerine sahiptirler (You vd., 2018). Pil ve süperkapasitörlerin özellikleri bakımında karşılaştırılmasını **Çizelge 2.1.**'de gösterilmiştir (Das ve Mandal, 2018).

Çizelge 2.1. Pil ve Süperkapasitörün özellikleri (Das ve Mandal, 2018).

Özellikler	Pil	Süperkapasitör
Güç yoğunluğu (W/kg)	100	3000
Enerji yoğunluğu (g/kg)	100	3
Şarj süresi (s)	>1000	0,3-30
Boşaltma süresi (s)	1000-10,000	0,3-30
Dönelirlik (W/kg)	1000	106
Tipik ömür (yıl)	5	30
Verimlilik (%)	70-85	85-98

2.4.2. Güneş Sistemleri

Son yıllarda, enerji depolama sistemleri üzerine, ekonomik üretilmemesinden dolayı yeniden araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu araştırmalar neticesinde güneş enerjisinden enerji elde edilmesinin kolay, ekonomik olması ve elektriksel güç olarak yüksek verimliliğe sahip olmasından dolayı güneş pillerinden enerji üretilmeye başlanmıştır.

Güneş pilleri çok çeşitli olarak enerjiyi üretmektedirler. Silikon güneş piller (Si), boyaya duyarlı güneş pilleri (DSSC'ler), organik güneş pilleri ve yeni ortaya çıkan perovskite güneş pilleri (PVSC'ler) dahil yeni nesil güneş pilleri, yüksek verimlilik, kolay üretim, düşük maliyet ve esneklik avantajlarına sahiptirler (Law, Greene, Johnson, Saykally ve Yang, 2005). Güneş pilleri çeşitleri süperkapasitörlere ilave edilerek enerji depolama cihazlarında daha yüksek verimlilikte çalışması sağlanır (Liu, Lee ve Sun 2014; Yang, Zhang, Kintner-Meyer, Lu ve Choi, 2011).

Güneş pilleri enerjiyi depolamasının yanında ışık aydınlatma teknolojilerinde de kullanılmaktadırlar (Winter ve Brodd, 2004). Ayrıca elyaf şeklindeki güneş pilleri çeşitli özelliklere sahip akıllı kıyafetlerin üretimlerinde tercih edilmektedirler (Zhou vd., 2016).

Güneş enerjilerinin çalışma mekanizması; Işıkla aydınlatma üzerine, güneş enerjisini elektrokimyasal yöntem yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürür ve genellikle süperkapasitörleri şarj eder bu olaya foto şarj işlemi denilmektedir. Boşaltma işlemi, kondansatörler bağlandığında gerçekleşir. Işık altında veya karanlıkta güç sağlamak için harici bir yüke ihtiyaç vardır (Liu, Liu, Zou, Songü ve Sun, 2017).

Gibson ve Kelly demir fosfat tipi Li-iyon batarya ve ince amorf yapılı silikon güneş piliyle (Si) beraber çalışan bir mekanizma kurdu. Bu pilde, toplam güneş enerjisi dönüşümü %14,5'lük bir depolama verimliliğini göstermektedir. Organik güneş pillerinin çeşitli ıslak kaplama işlemleriyle esnek yüzeylerde üretilmesi kolaydır. Bu özelliğinden yararlanılarak Lee ve arkadaşları bir organik güneş pili ve bir Lityum-iyon pillerini birleştirerek iyi mekanik stabiliteye sahip giyilebilir bir tekstil foto-şarj edilebilir pil geliştirdiler (Luo ve Wang, 2017).

2.4.3. Yakıt Sistemleri

Günümüzde birbirinden farklı enerji depolama sistemleri kullanılmaktadır. Bunlardan birisi de hidrojen ile beraber çalışan yakıt pilleridir. Yakıt pilleri şuanki koşullar içinde değerlendirildiğinde çevreye karşı zararı olmayan, ses bakımından son derece çok düşük desibellerde çalışabilen, güvenilir çalışma koşulları, kesintisiz olarak enerji üretebilen ve yüksek güç yoğunluklarına sahip sistemlerdir (Mahmood, Zhang, Yin ve Hou, 2014). Son zamanlarda otomobil sanayisinde üretilen elektrikli araçlar yakıt pillerinden yararlanılarak geliştirilmiştir.

Yakıt pilleri kimyasal enerjiyi direk olarak elektrik enerjisine dönüştürmesiyle enerjiyi depalayabilen sistemlerdir. Enerji üretimi sırasında hidrojen ve oksijen materyallerinin yardımıyla enerji ortaya çıkmaktadır. Çalışma mekanizması sırasında herhangi bir kimyasal yanma olayı gerçekleşmemektedir. Yanma sırasından hidrojen gazından yararlanılarak enerji ortaya çıkar, ayrıca enerjinin yanında su (H₂O) materyali de oluşur (Li, Jang ve Song, 2017). Yakıt hücrelerinin verimliliğini %35-%70 değerlerinde koruduğu görülmektedir (Li, Song ve Yang, 2015). Elektrikli araçlar normal binek araçlara göre fazla enerji sağladıklarından dolayı ekonomik oldukları görülmüştür. Elektrikli araçların 70-100°C'lerde çalışabilmesi ve üretilen

enerjinin % 45– %55 değerlerinde enerjiyi koruyabilmesi görülmektedir (Robert, Wang ve Alam 2011; Novoselov, Falko ve Colombo, 2012).

Yakıt pilleri çeşitlilik bakımından sınıflandırılmaktadırlar. Bunlar; Proton geçirgen zarlı yakıt pilleri, direk metanol yakıt pilleri, fosforik asit yakıt pilleri, katı oksitli yakıt pilleri, erimiş karbonatlı yakıt pilleri, rejeneratif yakıt pilleri, silindirik yakıt pilleri ve alkali yakıt pilleridirler (Pollet, Staffell ve Shang, 2012). Farklı yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları ve verimlilikleri bakımından karşılaştırılması **Çizelge 2.2.**'de gösterilmektedir (Keskin, 2014).

Çizelge 2.2. Farklı çeşitlerde yakıt pillerin çalışma sıcaklıkları ve verimlilikleri (Keskin, 2014).

Yakıt Pili Çeşidi	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Verimliliği (%)
Alkali Yakıt Pili	70-100	50-70
Erimiş Karbonat Yakıt Pili	650	40-55
Fosforik Asit Yakıt Pili	160-210	35-50
Katı Oksit Yakıt Pili	800-1000	45-60
Proton Geçirgen Zarlı Yakıt Pili	50-100	35-60

Çizelge 2.2' de görüldüğü gibi alkali yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları 70-100°C de elde edilen enerjinin korunma oranı ise %50-%70 arasındadır. Erimiş karbonatlı yakıt pillerinde ise çalışma sıcaklığı 650°C'de olduğunda enerjinin verimliliği %40-%55 olarak görülmüştür. Proton geçirgen zarlı yakıt pillerine bakıldığında ise 50-100°C'de gibi düşük sıcaklıklarda çalışabilen ve enerjisinin %35-%60 olarak koruduğu görülmektedir. Kıyaslanma yapılacak olunursa sıcaklık değerleri bakımından katı oksit yakıt pilleri yüksek sıcaklıklarda çalışma imkanı sunmaktadır. Yüksek verimlilik elde edilmek istenildiğinde ise alkali yakıt pillerinin tercih edilmesi gerekmektedir (Liu, 2013).

Proton geçirgen zarlı yakıt pilleri yüklerin transferi seri bir şekilde reaksiyonu başlatılabilmektedir. Sessiz çalışabilen, yüklerin birbirleriyle yer değiştirmelerinin çok kısa sürede oluşması, ağırlık bakımından hafif ve basit bir şekilde üretilebilme özelliklerine sahiptir. Proton geçirgen zarlı yakıt pilleri otomobil sanayisinde (otobüs, tranvay, otomobil), yedekleme güç sistemleri, taşınabilir depolama sistemleri ve vinç sistemlerinde kullanılmaktadır (Wang, Chen, Mishler, Cho ve Adroher, 2011).

Süperkapasitörler ile yakıt pillerinin özellikleri bakımından karşılaştırılması **Çizelge 2.3.**'te gösterilmiştir (Luta ve Raji, 2019).

Çizelge 2.3. Süperkapasitör ile yakıt hücresinin karşılaştırılması (Luta ve Raji, 2019).

	Yakıt Hücresi	Süperkapasitör
Güç Derecesi	0-50,000 kW	0-300 kW
Depolama Süresi	1 gün ve sonrası- Saniye	3 Saat- 60 Dakika
Deşarj Süresi	Sıfıra çok yakın değerinde	%20-%40 değerinde
Gün içinde kendiliğinden boşalma süresi	Aylar- Saatler aralığında	Saat – Saniye

Yakıt hücreleri ile süperkapasitörlerin karşılaştırılmasına **Çizelge 2.3.**'te görülüyor ki yakıt pillerinin güç yoğunluğu, deşarj süresi ve kendiliğinden gün içinde boşalma durumları gibi özellikleri bakımından süperkapasitörlere göre daha avantajlı olduğu anlaşılmaktadır.

2.5. Elektrokimyasal Ölçüm Teknikleri

Enerji depolayan piller, bataryalar ve süperkapasitörlerin sahip oldukları karakteristik özellikleri ve sahip oldukları performans kabiliyetleri bakımından değerlendirilmesi ve analizleri için üç farklı metot kullanılmaktadır. Bu metotlar sırasıyla şöyledir;

- Döngülü voltametri (DV) metodu (Sagadevan vd., 2020).
- Galvanostatik şarj-deşarj (GCD) metodu (Mofrad, Payami ve Ahadzadeh, 2019).
- Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES) metodu (Noori, El-Kady, Rahmanifar, Kaner ve Mousavi, 2019).

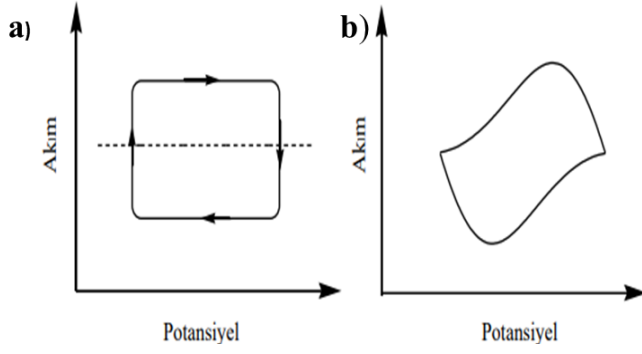
Bu metotlar kullanılarak enerji depolama sistemlerinin, spesifik kapasitans, çalışma voltaj aralığı, döngüsel çevrim kararlılığı, enerjinin ne kadar korunabildiği, enerji ve güç yoğunlukları ve eşdeğer modelleme şekilleri hakkında bilgiler edinilmektedir (Xie vd. 2018).

2.5.1. Döngülü Voltametri (DV) Metodu

Döngülü voltametri (DV) kimya sektöründe nanokompozit materyallerin elektrokimyasal özelliklerinin ortaya çıkması için kullanılmaktadır. Bu metot nanokompozit malzemelerin elektrotlar ile elektrolit ara yüzeyinde meydana gelebilecek ürün veya reaksiyon sonunda oluşan yan ürün hakkında bilgiler veren önemli bir metottur. Ayrıca, elektrotlarda oluşan ürünlerin reaksiyon bitiminde reaksiyon mekanizmalarının araştırılmasında, farklı tarama hızlarında polimer veya kompozit malzemelerin kinetik davranışlarının anlaşılmasında da kullanılır. Ölçümlerde tek bir döngü veya çoklu döngü alınarak uygulanan akımın bir sonucu olarak çalışma elektrodunun yüzeyi ile çözeltideki türler arasında elektron ve iyon hareketine bağlı olarak oluşan akımın, uygulanan potansiyalin fonksiyonu olarak değişimini gösteren voltamogramlar elde edilir. Reaksiyonların adsorpsiyon, difüzyon ve elektron aktarım reaksiyonlarına bağlı olan kimyasal reaksiyonları belirlenebilir (Orbay, 2013). Bu işlemin sonunda nanokompozit materyale farklı değerlerde akımlar uygulanarak ve taranan potansiyele (E) karşı akım (I) çizilip, kapasitans değerleri için döngüsel voltamogram (DV) eğrileri çizilmektedir (Kim, Chabot ve Yu, 2013).

Elektrokimyasal ölçümler potansiyostat / galvanostat cihazı kullanılarak üçlü veya ikili elektrot sistemi kullanılarak çeşitli elektrolit sistemleri kullanılarak çeşitli elektrolit sistemleri içerisinde (1M H₂SO₄, 6M KOH veya 1M Na₂SO₄ gibi) çalışılmaktadır. Üçlü elektrot sistemleri laboratuvar ortamında ikili elektrot sistemleri ise daha çok ticari çalışmalarda kullanılmaktadır. Üçlü elektrotlu süperkapasitörler voltaj uygulanması ise çalışma elektrotu ile karşıt elektrot arasında gidip akım değerleri bulunmaktadır. Akımda ise çalışma elektrotu ile karşıt elektrot arasında gerçekleşmektedir. İkili elektrotlu süperkapasitörlerde voltaj işlemi elektrot yüzeylerinde meydana gelmektedir (Zhang ve Pan, 2014).

Literatürde görüldüğü gibi süperkapasitör çalışan araştırmacılar döngüsel voltametri metodu sonucunda elde edilen DV eğrilerinin dikdörtgen şeklinde olması beklenir. Bu durumda, süperkapasitörün ideal olduğu kabul edilir. Fakat bu grafik bazen istenildiği gibi çıkmamaktadır. O zaman ideal olmayan yalancı süperkapasitör (pseudocapacitör) elde edilebilir. Yalancı süperkapasitörler Faradaik reaksiyonlardan meydana geldiğinden dolayı nanokompozitte malzeme bozulmalar olur ve DV eğrileri dikdörtgen olmaktan çıkabilmektedir. İdeal süperkapasitör ile psudokapasitörün döngülü voltametri eğrileri **Şekil 2.9'**da gösterilmektedir (Taberna ve Simon, 2013).



Şekil 2.9 a) İdeal çift tabakalı süperkapasitörün **b)** pseudo(yalancı) süperkapasitörün DV grafikleri.

İleri yöndeki gerilim taraması sırasında oluşan elektrot tepkimesi tersinir ise, geri yöndeki taraması sırasında gözlenen pik akımı ileri yöndeki gerilim taraması sırasında gözlenen pik akımına eşit alır (Demir, 2008). Dönüşümlü Voltametri de ileri yöndeki pik akımı için taramalı voltametri de uygulanan tüm eşitlikler aynıdır. Tersinir bir sistem için geri yöndeki pik gerilimi **denklem 2.7** ile **2.8**'de gösterilmektedir.

$$E_p = E_{1/2} + 0,0285/n \quad (2.7)$$

$$E_{pa} = E_{pk} + 0,059/nV \quad (2.8)$$

Süperkapasitörlerde kullanılan DV metodunu göre formülleri denklem 2.9'da gösterilmektedir.

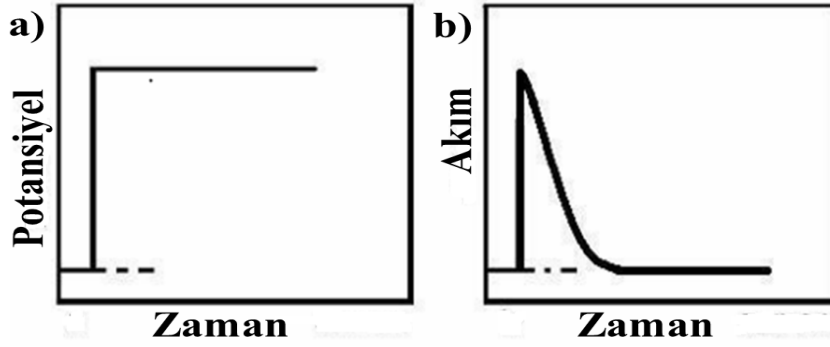
$$C_{sp} = \frac{\int i \times dV}{m \times v \times \Delta V} \quad (2.9)$$

Bu formülde spesifik kapasitans (C_{sp}), tarama hızı (v), $\int i \times dV$, I-V eğrisinin altında kalan alanın integrali, ΔV ise potansiyel penceresidir (Meher ve Rao, 2011).

2.5.2. Galvanostatik Yükleme/Boşalma (GCD) Metodu

Belirli değişken akımlar sabit voltaj altında uygulanarak sistemin termodinamik dengesi bozulur. Sistemde buna tepki olarak elektrodun daldırıldığı çözeltilerde bulunan maddenin elektrot yüzeyinde indirgenmesi veya yükseltgenmesi sonucu bir akım oluşur. GCD metodunun temeli bu akımın ölçülmesi esasına dayanır. GCD işlemi sırasında elde edilen

Potansiyel-zaman, Akım-zaman grafikleri Şekil 2.10'da verilmiştir.



2.10. a) GCD uyarılma işlemi sırasındaki potansiyel ile zamana karşı oluşan değişim **b)** GCD uyarılmadan sonra akım ile zamana karşı oluşan değişimi

Süperkapasitör uygulamalarda kullanılan spesifik kapasitans formülü denklem 2.10'da gösterilen formülle ile hesaplanır;

$$C_{sp} = \frac{ix\Delta t}{\Delta Vxm} \quad (2.10)$$

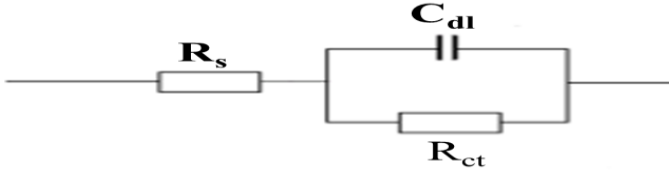
Bu formülde i : uygulanan akım yoğunluğu, m : elektroakti malzemenin toplam kütlesi, Δt : boşalma süresi ve ΔV : uygulanan potansiyel aralığıdır (Justin, Meher ve Rao, 2010). Genellikle GCD ölçümlerinde boşalma akımı uygulanırken ani bir voltaj alçalması meydana gelebilmektedir. Bu durum kapasitans değerinin düşmesine neden olabilmektedir (Meher, Justin ve Rao, 2010; Justin ve Rao, 2010; Meher, Justin ve Rao, 2011).

2.5.3. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES)

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) metodu denge veya sabit halde küçük boyutta bir dalga sinyali ölçülen elektrokimyasal hücrenin pertürbasyonuna dayanmaktadır. Pertürbasyon uygulanan potansiyel, uygulanan akım veya hidrodinamik elektrotlarda konveksiyon hızı gibi parametrelerin geniş bir aralığı olabilir. Bu tekniğin temel avantajı pertürbasyonlar yeterince küçük olduğu sürece cevabın yaklaşık olarak lineer olmasıdır (Bard ve Faulkner, 2001).

Impedans spektroskopinin temelinde yüksek frekanslar uygulandığında kapasitans ve indüktif değişikliklerden etkilenen direncin ölçümüne dayanmaktadır. Biyosensörlerde, yakıt hücrelerinde, pillerde korozyon uygulamalarında ve süperkapasitörlerde kullanılmaktadır.

EES verilerinin doğru olup olmadığı, denk olabileceği düşünülen çeşitli elektriksel devreler ile özdeşleştirilmek suretiyle kontrol edilir. Model devrelerin en temelinde en basit devre olan Randles devresi gelmektedir. Randles devresinin modelinin **Şekil 2.11**'de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Randles devresinin şematik gösterimi

Bu devre sisteminde R_s :çözelti direnci, C_{dl} :Çift tabaka kapasitörü, R_{ct} :yük transferi veya polarizasyon kapasitörü bulunmaktadır. Araştırmalarda, çoğu zaman yapılan çalışmadaki mekanizmanın nasıl yürüdüğü kesin olarak bilinemez. Elektrokimyasal ölçümlerde, birçok karmaşık işlem dizisinde bile (elektron transferi, kütle transferi, kimyasal reaksiyon mekanizması gibi) olumlu sonuçlar verir. EES metodu DV metoduna göre daha avantajlıdır. Çünkü bu yöntem, film yoğunluğunu ve elektron transfer kinetiğinin dönüşümlü voltametreye göre daha iyi değerlendirir. Bazen yüzey difüzyon direnci olarak Warburg empedansta devre elemanı olarak devreye eklenebilir. Empedans spektroskopisi değerlendirilirken elektronik iletkenlik ve iyonik iletkenlik ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Wei, Chen, Chang, Lu ve Hu, 2009; Frackowiak ve Beguin, 2001).

Deneysel olarak empedans verilerinin spesifik kapasitansa çevrildiğini gösteren denklem 2.11'de gösterilmiştir (Conway, 1999).

$$C_{sp} = \frac{1}{2\pi f \times Z''} \quad (2.11)$$

2.6. Süperkapasitörler İçin Hesaplamalar ve İfadeler

Süperkapasitörlerin elektrokimyasal performansları hakkında bilgi edinilmek için spesifik kapasitans, enerji ve güç yoğunluğu ile Coulomb verimliliği değerlerinin hesaplanması yapılmaktadır.

Süperkapasitörlerde depolanan spesifik kapasitans değerinin belirleme için döngülü voltametri (DV) metodu kullanılır. Bu değeride bulmada kullanılan formül denklem 2.12' de verilmiştir (Boota, Chen, Aken, Jiang ve Gogotsi, 2019).

$$C_{sp} = \frac{\int_{V_1}^{V_2} i \times dV}{2v \times m \times \Delta V} \quad (2.12)$$

Süperkapasitörün sahip olduğu hücrelerin kapasitans (C) değerleri, yükleme–boşalma piklerinden yardım alınarak hesaplanmasında kullanılan formül denklem 2.13'te gösterilmiştir (Yu, 2011).

$$C = I \times \Delta t / \Delta V \times m \quad (2.13)$$

Süperkapasitörlerde kullanılan elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) ölçüm metodunda belirli bir voltaj genliği aralığı ile belirli frekans değerlerinden yararlanılarak spesifik kapasitans (C_{sp}) değerini hesaplayabiliriz. Bu hesaplamada kullanılacak olan formülün denklemi 2.14'de verilmiştir (Wei, Fang, Iwasa ve Kumagai, 2005).

$$C_{sp} = -1/2\pi \times f \times Z \times m \quad (2.14)$$

Süperkapasitörlerde elektrot olarak tercih edilen parametrelere bağlı olarak enerji miktarları (E) değişmektedir. Enerjinin birimi Wh/kg olarak ifade edilir. Enerji yoğunluğunun bulunmasında kullanılan formül denklem 2.15'te gösterilmiştir (He, Shu, Li ve Liu, 2019).

$$E = \frac{1}{2m} \times C_{sp} \times \Delta V^2 \quad (2.15)$$

Enerji depolayan piller, bataryalar, süperkapasitörlerin birbirinden farklı güç yoğunluklara (P) sahiptirler. Bu güç yoğunlukları elektrot olarak kullanılan materyallerin kütlesiyle doğru orantılıdır. Güç yoğunluğunun birimi W/kg olarak belirtilir. Güç

yoğunluğunun bulunmasında kullanılan formül denklem 2.16'da ifade edilmiştir (Muzaffer, Ahamed, Deshmukk ve Thirumalai, 2019).

$$P = E / \Delta t \times m \quad (2.16)$$

Süperkapasitörlerde kullanılan nanokompozitlerin iç dirençleri (ESR) vardır. Bu iç direncin hesaplanmasındaki formül denklem 2.17'de gösterilmiştir (Wang, Een, Jayaram, Yu ve Wong, 2014).

$$ESR = V_{drop} / 2 \times i_{app} \quad (2.17)$$

Süperkapasitörlerin yükleme ve boşalma olaylarında yani elektrotların döngüsel ömrü sırasında enerjii ne kadar koruyabildiği hakkında fikir vermektedir. Elektrotların döngüsel stabilitesini ilk ve son çevrimi karşılaştırılarak sahip oldukları verimliliği öğrenilmesini sağlar. Coulomb verimlilik (η) hesaplanması için kullanılacak formül denklem 2.18'de verilmiştir (Balbaşı ve Şahin, 2015).

$$\eta = td / tc \times 100 \quad (2.18)$$

Yukarıda verilen formüllerin içinde bulunan değerlerin anlamları şöyledir; i : uygulanan akım yoğunluğu, m : elektro aktif malzemenin kütlesi, ΔV : uygulanan potansiyel aralığı, Δt : ilk boşalma süresindeki eğimi, f : frekansı ve Z : hayali empedansı, C_{sp} : spesifik kapasitans, P : güç miktarını, E : depolanan enerji miktarını, ESR : eşdeğer iç direnç, t_d : boşalma süresi, t_c : şarj süresini ifade eder.

2.7. Eşdeğer Devre Modeli

Enerji depolayabilen batarya, piller ve süperkapasitörlerin elektriksel olarak göstermiş oldukları hallerini ve performansları hakkında bilgiler öğrenebilmek için birbirinden farklı eşdeğer modellere sahiptirler. Süperkapasitörler için eşdeğer elektrik devresi olarak literatür de de karşımıza en çok çıkan üç çeşit model bulunmaktadır. 1. Basit modeli, 2. İletim hattı

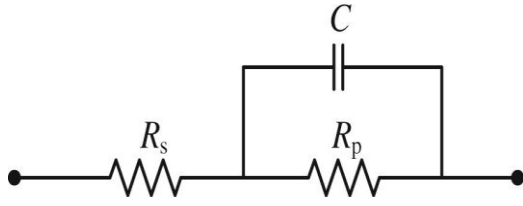
modeli ve son olarak 3. kinetik parametrelere dayalı modeli olarak karşımıza çıkmaktadır (Decillers, Jemei, Pera, Beinaime ve Gustin, 2014).

Süperkapasitörlerdeki elektrolitik parametresi üzerinden zaman için davranışlarını incelenilmesi üzerinden yola çıkılarak geliştirilen eşdeğer modellemeye standart R-C modelidir (Rafik, Gualous, Gallay, Crausaz ve Berthon, 2006). Bu model en çok süperkapasitörlerde tercih edilen ve anlaşılması açısından en kolay modeldir. R-C modeli süperkapasitörün seri veya paralel bağlanması sonucundan R-C dallarına ayrılmaktadırlar (Zubieta ve Bonert, 2005).

Süperkapasitörlerdeki elektriksel olarak gösterdikleri tutumları ve o anki durumda yük bakımından dağılımını en iyi şekilde gösterebilen iletim hattı eşdeğer modelidir (Belhachemi, Raël ve Davat, 2000). Bu modeli basit eşdeğer modele göre daha karmaşık olmasından dolayı anlaşılması biraz güçtür (Lajnef, Vinassa, Briat, Azzopardi ve Woïrgard, 2007). Eğer birden fazla R-C modelini kullanılarak daha basit şekilde anlatımda yapılabilir. Ayrıca yükleme ve boşalma süresince iletim hattı eşdeğer modellerin yüklerin yayılmasını ifade eder.(Rizoug, Bartolomeus ve Moigne, 2010). Son olarak süperkapasitörlerde kullanılan Süperkapasitörlerin kinetik parametrelere dayalı modelinde ise karmaşık modellerde ve analitik modellerin çiziminde kullanılmaktadır (Marie- Françoise, Guabus ve Berthon, 2006).

2.7.1. Süperkapasitörlerin Basit Modeli

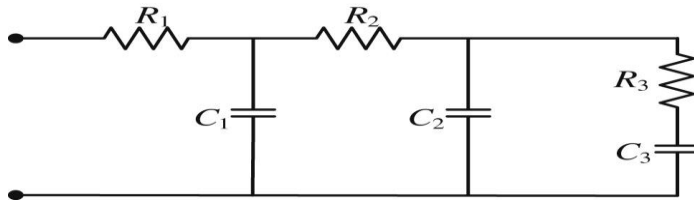
Süperkapasitörlerde çok tercih edilen ve anlaşılması kolay olan eşdeğer devre modelidir. Kapasitör (C), eşdeğer seri direnç (R_s) ve eşdeğer paralel dirençten (R_p) parametlerinden oluşmaktadır (Faranda, 2010). Bu devre modelinde kullanılan parametreler de süperkapasitörlerin kapasitansını (C), ohmik kayıpların olmasından dolayı (R_s) ve süperkapasitörlerin kendiliğinden deşarj olmasından dolayı paralel direnç oluşur buda (R_p) şeklinde modelde gösterildi. Bu modelin bir diğer çok tercih edilme nedeni çok hızlı bir şekilde sonuca götürmesi ve çeşitli boyutlarda süperkapasitörleri görsel olarak görmemizi sağlamaktadır (Berrueta, Martin, Hernandez, Ursua ve Sanchis, 2014). Süperkapasitörlerde uygulanan basit devre modelinde elektrik parametrelerinde oluşan gerilim olaylarından yola çıkılarak kurulan bir elektrik devresidir. (Zhang, Wang, Hu, Sun ve Dorrell, 2015). Süperkapasitörlerde uygulanan basit eşdeğer devre modeli **Şekil 2.12**'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Süperkapasitörlerdeki basit eşdeğer modeli

2.7.2. Süperkapasitörlerin İletim Hattı Modeli

Süperkapasitörlerde kullanılan elektrokimyasala empedans (ESS) yönteminde elde edilen verilerden yola çıkılarak gözenekli yapıya sahip nano kompozit elektrotları hakkında bilgi edinilmek için kullanılan iletim hattı eşdeğer modeli kullanılmaktadır (Zubieta ve Bonert, 1997). Süperkapasitörün içindeki elektro materyallerine kademeli olarak dolun işlemi gerçekleşmektedir (Pean, Rotenberg, Simon ve Salanne, 2016). Bu süre zarfında gelişen kapasitans ve direnç olaylarını açıklanması için en çok bu devre tercih edilir (Taberna, Simon ve Fauvarque, 2003). Süperkapasitörlerde kullanılan elektrotların fiziksel özellikleri hakkında bilgiler vermektedir. Birden fazla RC dalları kullanılabilen ve frekans çalışma koşulları bakımından geniş aralıklar sunmaktadır (Pean, 2014). İletim hattı eşdeğer devre modelinin bir diğer adı çok merdivenli devre olarak bilinmektedir (Zhang, Wang, Hu, Sun ve Donell, 2015). Süperkapasitörlerdeki üç aşamalı eşdeğer modeli Şekil 2.13'de gösterilmiştir.

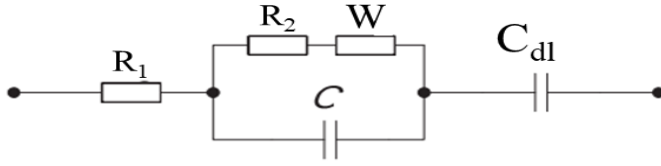


Şekil 2.13. Süperkapasitörlerdeki üç aşamalı eşdeğer modeli

2.7.3. Süperkapasitörlerin Kinetik Parametrelere Dayalı Modeli

Süperkapasitörlerinde elektrokimyasal empedans spektroskopisindeki değerlerden yola çıkılarak elde edilen eşdeğer devredir. Çözelti direnci (R), bir çift tabaka kapasitörün kapasitansı (C_{dl}), elektrotların kapasitansı (C), bir yük transfer veya polarizasyon direncine ve Faradaik reaksiyonlarda empedans olarak isimlendirilen Warburg elemanı (W) adı verilen spesifik bir elektrokimyasal difüzyon elemandan oluşmaktadır (Obeidat ve Rastogi, 2018).

Çift tabakalı süperkapasitörün kinetik parametrelere dayalı eşdeğer modeli **Şekil 2.14**'te gösterilmiştir.



Şekil. 2.14. Çift tabakalı süperkapasitörün kinetik parametrelere dayalı eşdeğer modeli

Bu devrede yer alan R_s çözelti direncini gösterir. R_1 tüm elektrodun, R_2 ise polimer filminin direncine karşılık gelmektedir. Devrede bulunan C_1 tüm elektrodun kapasitansını, C_{dl} ise çift katmanlı süperkapasitörün kapasitansını ifade eder. Elektriksel devredeki Warburg Empedans (W) ise homojen olmayan elektrot yüzeyinde bir kapasiteye ve elektrottaki iyonların difüzyonuna karşılık gelmektedir (Girija ve Sangaranarayanan, 2006). Bu model empedans spektrumları ile iyi bir uyum içindedir ve elektrotun kinetik ve termodinamik özelliklerini en iyi gösteren devre şeklidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Materyaller

İyonik sıvı (1-Butil-3-metilimidazolium tetrafloroborat) ve 1 M'lık H₂SO₄, 1.8 V'luk Kırmızı LED lambası, elektrik devresinin kurulduğu berad boradın modeli Arduino Breadboard 8.5cm X 5.5cm 400 Hücreli Bread Board, çeşitli değerlerde dirençler, elektrik devrelerinde kullanılan tek devre açma kapama düğmeleri kullanıldı.

3.2. Kullanılan Cihazlar

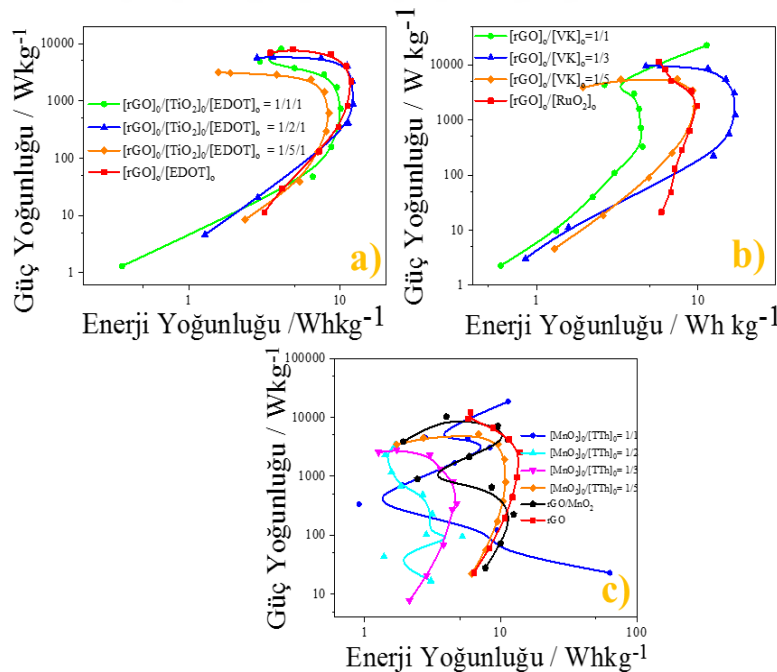
Tezimde kullanılan ikili nano kompozit malzemelerinden yararlanılarak yapılan elektrokimyasal performans ölçümlerinin Galvanostatik sabit akım (GCD), döngülü voltametri (DV) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) ölçümleri ikili elektrotlu cihaz yapılarak PARSTAT 2273 (yazılım, power suit ve Faraday kafesi, BASI cell stand C₃), IVIUMSTAT-cihazı ve gerçek eşdevre analiz programı ZSimpWin 3,22 programı kullanılarak uygulanmıştır. Ardından da buradaki ölçüm metotlarından faydalanılarak belirlenen gerçek eşdeğer devre modeli ZSimpWin 3,22 programı kullanılarak devre modellemesi yapılmıştır.

Pres makinesi olarak kullanılan cihazın modeli MTI Corporation YLJ-24T, Precisa XB 620M modelinde Hassas terazi cihazı, QIATEK-.QVO 55 modelinde etüv cihazı, Ayarlı Güç Kaynağının Modeli RXN1502D 2AL 250V, Dijital multimetre aletinin modeli DT830D.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. rGO/TiO₂/PEDOT, rGO/RuO₂/PVK ve rGO/MnO₂/PTTh Nanokompozitlerinin Ragon Grafiklerinin Karşılaştırılması

rGO/TiO₂/PEDOT (Ates vd., 2019), rGO/RuO₂/PVK (Ates, Yıldırım, Kuzgun, Özkan, 2019) ve rGO/MnO₂/PTTh nanokompozitlerinin farklı başlangıç monomer derişimlerinde süperkapasitör cihaz performanslarından elde edilen enerji-güç yoğunluk grafikleri (Ragon grafikleri) Şekil 4.1.a'da gösterilmiş ve Tübitak 1001 projesi kapsamında çalışılmıştır (Ates, Özkan, Aktaş, Kuzgun, Yıldırım, 2020). Elde edilen ve projeden çıkan sonuçlara göre; rGO/PEDOT nanokompozitinde en yüksek enerji yoğunluğu 5 mA'de 11,873 Wh/kg, en yüksek güç yoğunluğu ise 40 mA'de 8010 W/kg olarak elde edilmişti. Ayrıca üçlü nanokompozitler olan [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o= 1/1/1, 1/1/2 ve 1/1/5 oranlarında çalışılmış en yüksek enerji yoğunlukları sırasıyla 2 mA'de 10,09 Wh/kg, 12,20 Wh/kg ve 8,42 Wh/kg, en yüksek güç yoğunlukları ise 50 mA'de 8150 W/kg, 40 mA'de 5853,33 W/kg ve 50 mA'de 3137,5 W/kg elde edilmişti. Ürettiğimiz süperkapasitörlerin güç yoğunluğu bakımından literatürdeki birçok TiO₂ bazlı nanokompozitten üstün olduğu görülmüş ve literatür taramasından elde edilen enerji ve güç yoğunlukları Çizelde 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. a) rGO/TiO₂/PEDOT, b) rGO/RuO₂/PVK, c) rGO/MnO₂/PTTh ve nanokompozitlerinin Ragon grafikleri.

Çizelge 4.1. TiO₂ kullanılan nanokompozitlerin enerji-güç ve kapasitans değerleri.

TiO₂ tabanlı nanokompozitler					
Nanokompozit	Elektrolit	E / Whkg⁻¹	P / Wkg⁻¹	C_{sp}/ Fg₁⁻	Kaynaklar
rGO/TiO ₂	1 M NaOH	6,22	1,87	202,5	(Yue vd. 2018)
rGO/TiO ₂	1 M H ₂ SO ₄	9,08	598	201,5	(Thiruqnanam vd. 2018)
rGO/TiO ₂	1 M H ₂ SO ₄	16,5	199,5	455,3	(Zhang vd. 2016)
rGO/TiO ₂	1 M H ₂ SO ₄	32,454	716,779	160	(Reddy vd. 2018)
PANI/TiO ₂	1 M H ₂ SO ₄	27	200	540	(Bolagam vd. 2017)
TiO ₂ /PPy	1 M H ₂ SO ₄	17,7	1257	614,7	(Liu vd. 2018)

rGO/RuO₂/PVK nanokompoziti için [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o= 1/1/1, 1/1/3 ve 1/1/5 oranlarındaki enerji-güç yoğunluğu grafikleri **Şekil 4.1.b'te** gösterilmiştir. rGO/RuO₂ nanokompoziti için en yüksek enerji yoğunluğu 10 mA'de 9,97 Wh/kg, en yüksek güç yoğunluğu ise 50 mA'de 11018 W/kg olarak bulunmuştur. 1/1/1, 1/1/3 ve 1/1/5 oranlarındaki [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o nanokompozitlerin enerji yoğunlukları sırasıyla, 50 mA'de 11,312 Wh/kg, 2 mA'de 17,024 Wh/kg ve 5 mA'de 9,652 Wh/kg'dır. Aynı nanokompozitlerin güç yoğunlukları yine sırasıyla 50 mA'de 22625 W/kg, 40 mA'de 9600 W/kg ve 20 mA'de 5580 W/kg olarak hesaplanmıştır. Enerji yoğunluğu bakımından en iyi nanokompozitin 1/1/3 güç bakımından ise en iyi nanokompozitin 1/1/1 oranlarındaki [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o nanokompozitler olduğu saptanmıştır. Enerji yoğunluğu bakımından literatürde RuO₂ bazlı yapılan çalışmalarla hemen hemen aynı sonuçların bulunduğu, güç bakımından bakıldığında ise sentezlediğimiz [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o nanokompozitin literatür çalışmalarının çoğundan daha üstün olduğu sonucuna varılmıştır. Literatür taramasından elde edilen enerji ve güç yoğunlukları **Çizelge 4.2'de** verilmiştir.

Çizelge 4.2. RuO₂ kullanılan nanokompozitlerin enerji-güç ve kapasitans değerleri.

RuO₂ tabanlı nanokompozitler					
Nanokompozit	Elektrolit	E / Whkg⁻¹	P / Wkg⁻¹	C_{sp}/ Fg⁻¹	Kaynaklar
rGO/RuO ₂	1M H ₂ SO ₄	16,2	9885	677	(Wang vd. 2016)
rGO/RuO ₂	1M H ₂ SO ₄	17,33	480	226	(Shaikh vd. 2012)
RuO ₂ /CNF	0,3 M H ₂ SO ₄	18,8	96	138	(Chen vd. 2010)
RuO ₂ /Karbon	0,5 M Na ₂ SO ₄	10,62	4,456	570	(Muniraj vd. 2016)
PEDOT/rGO/RuO ₂	1 M NaOH	18	5000	591	(Chang vd. 2018)

Geçiş metal oksitlerinden MnO₂ (Hu vd. 2009), rGO ve PTTh iletken polimerler ile birlikte üçlü kompozit malzeme olarak kullanılmıştır. MnO₂ malzemesine göre iletken polimer kullanımı maliyeti azaltır (Sivakkumar vd. 2007). Ayrıca iletken polimerlerin elektronik pseudokapasitans durumu hızlı ve tersinir redoks davranış gösterir. Bu durum polimer zincirindeki π konjugasyonuna yardımcı olur (Zhang, Feng, Wu, Wang ve Zhang, 2009). Literatür taramasından elde edilen enerji ve güç yoğunlukları **Çizelge 4.3**'te verilmiştir.

rGO/MnO₂/PTTh nanokompozitlerinin [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o = 1/1/1, 1/1/3 ve 1/1/5 oranlarındaki enerji-güç yoğunluğu grafikleri gösterilmiştir (**Şekil 4.1.c**) rGO/MnO₂ nanokompoziti için en yüksek enerji yoğunluğu (E= 0.084 Wh/kg) iken en yüksek güç yoğunluğu P= 14,55 W/kg olarak bulunmuştur. Buna karşılık 3 bileşenli nanokompozitin enerji ve güç yoğunluklarını incelediğimizde en yüksek enerji yoğunluğu E= 0.147 Wh/kg ile [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o = 1/1/5 oranında elde edilirken en yüksek güç yoğunluğu P= 381,62 W/kg değeri ile [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o = 1/1/1 oranında elde edilmişti. Gerek enerji bakımından gerekse güç yoğunluğu bakımından değerlerde 3. bileşen olan PTTh ilavesiyle artış sağlanmıştır. Bu artış enerji yoğunluğunda 1,75 kat iken güç yoğunluğunda 26,23 kat olarak tespit edilmiştir. İletken polimerlerden PTTh kimyasal sentez sırasında rGO/MnO₂ yapısının iletkenliği konjugasyon yapısından dolayı artırır (Al-Mashat vd., 2010; Hsu ve Wu, 2012; Bose vd., 2010). Politertiyofen başlangıç monomer konsantrasyon oranlarında ise düzenli bir artış yoktur. Bu durum düzensiz polimerizasyon ile nanokompozit yapı içerisindeki etkileşimler ile yük biriktirme miktarları arasında belirtilebilir.

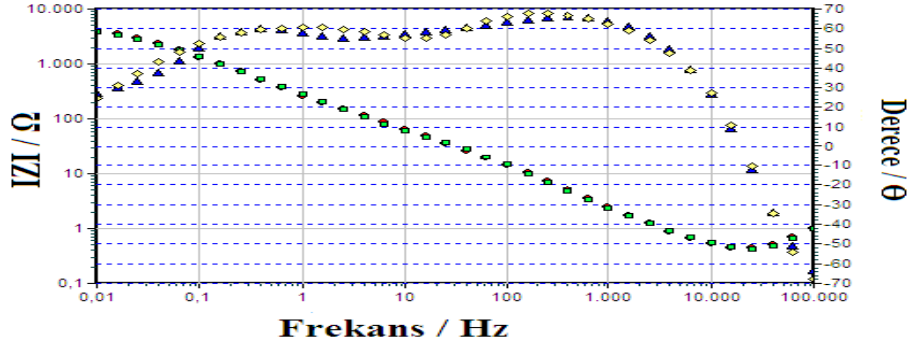
Çizelge 4.3. MnO₂ kullanılan nanokompozitlerin enerji-güç ve kapasitans değerleri.

MnO ₂ tabanlı nanokompozitler					
Nanokompozit	Elektrolit	E / Whkg ⁻¹	P / Wkg ⁻¹	C _{sp} / Fg ⁻¹	Kaynaklar
rGO/MnO ₂	1M Na ₂ SO ₄	5,5	40	253,48	(Chen vd. 2018)
MnO ₂ /CCNF	6M KOH	33	5	498	(Samuel vd. 2017)
MnO ₂ /PPy	0,5M Na ₂ SO ₄	37,63	830	345,54	(Bai vd. 2018)
PEDOT/GO/MnO ₂	1M KCl	7,9	489	239,4	(Azman vd. 2018)
PEDOT:PSSwrap ped MWCNT/MnO ₂	0,1M Na ₂ SO ₄	63,8	10	428,2	(Lee vd. 2017)
rGO/MnO ₂ @ Pani	PVA/KOH	38,12	1,191	166	(Ghosh vd. 2018)
MnO ₂ /HCNFs	1M Na ₂ SO ₄	5,35	1	293,6	(Zhao vd. 2019)

4.2. Malzemelerin ZSimpWin programı ile Devre Analizleri

4.2.1. rGO/RuO₂ Nanokompozitin Devre Analizleri

Süperkapasitör cihazlardan EES sonuçlarına göre elde ettiğimiz deneysel veriler ZSimpWin simülasyon programında bazı devrelere uyarlanarak teorik ve deneysel sonuçların % hata < 15 ve $\chi^2 < 10^{-3}$ durumları incelenerek en uygun devre elemanları içeren devreler çizilmiştir. Buna göre rGO/RuO₂ nanokompozitin [rGO]_o/[RuO₂]_o = 1:1 oranında LR₁(CR₂)(QR₃) devresi ele alınmıştır. Devre analizi sonucu elde edilen Bode-magnitude ve Bode-faz grafikleri Şekil 4.2’de ve devre parametre sonuçları Çizelge 4.4’te verilmiştir. LR₁(CR₂)(QR₃) devresinde kullanılan devre parametreleri sırasıyla L: indüktans, R₁: çözelti direnci, C: çift katmanlı kapasitans, R₂ ve R₃: Yük transfer direncini, Q: sabit faz elemanını temsil etmektedir. Çizelge 4.4’de verilen parametrelere göre; Çift katmanlı kapasitans değeri C_{d1} = 3,253×10⁻⁴ ve indüktans değeri, L = 1,578×10⁻⁶ tespit edilmiştir.

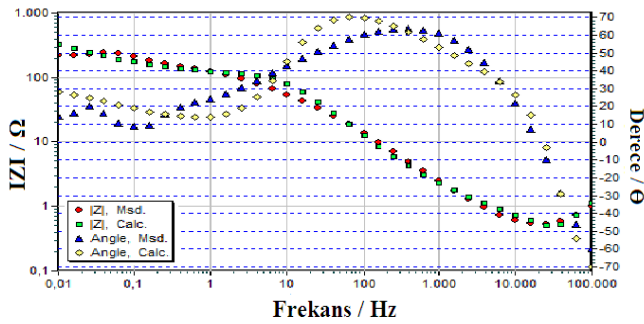


Şekil 4.2. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o = 1:1$ nanokompozitin LR(CR)(QR) devre analizi.

Çizelge 4.4. $[rGO]_o/[RuO_2]_o = 1:1$ nanokompozitin LR(CR)(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R_1/Ω	R_2/Ω	R_3/Ω	CPE, Y_0 [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C_{dl}/F
$[rGO]_o/[RuO_2]_o = 1:1$	$1,578 \times 10^{-6}$	0,3531	14,69	5380	$9,098 \times 10^{-4}$	0,7347	$3,253 \times 10^{-4}$

rGO/RuO_2 nanokompozit süperkapasitör cihazın aynı oranlarda farklı bir devre olan LRQ(CR) devresinde Bode-magnitude ve Bode-faz grafikleri Şekil 4.3.'te devre sonuçları ise Çizelge 4.5'de verilmiştir. Sabit faz elemanın değeri, $Q = 8,586 \times 10^{-4}$ ve indüktans değeri, $L = 1,743 \times 10^{-6}$ tespit edilmiştir.

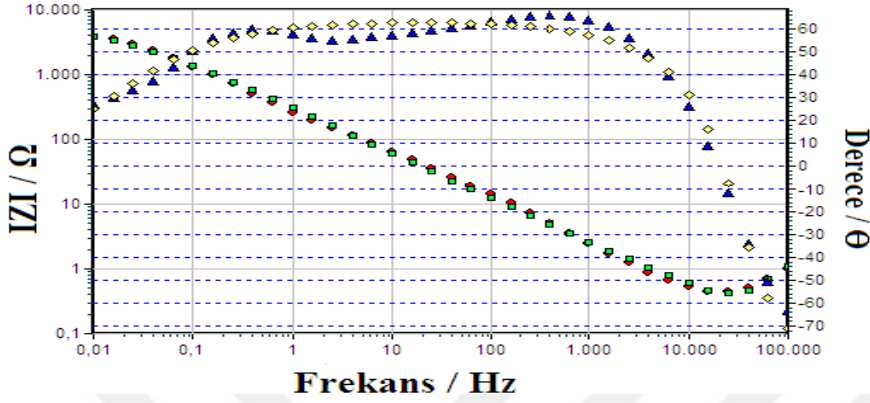


Şekil 4.3. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o = 1:1$ nanokompozitin LRQ(CR) devre analizi.

Çizelge 4.5. $[rGO]_o/[RuO_2]_o = 1:1$ nanokompozitin LRQ(CR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R_1/Ω	R_2/Ω	CPE, Y_0 [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]
$[rGO]_o/[RuO_2]_o = 1:1$	$1,743 \times 10^{-6}$	0,3003	5583	$8,586 \times 10^{-4}$	0,7068

rGO/RuO₂ nanokompozit süperkapasitör cihazın aynı oranlarda farklı bir devre olan LR(QR) devresinde Bode-magnitüde ve Bode-faz grafikleri Şekil 4.4.'de devre sonuçları ise Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çift katmanlı kapasitans değeri, $C_{dl} = 1,718 \times 10^{-4}$, indüktans değeri, $L = 1,902 \times 10^{-6}$ ve sabit faz elemanın değeri, $Q = 114,03 \times 10^{-4}$ elde edilmiştir.

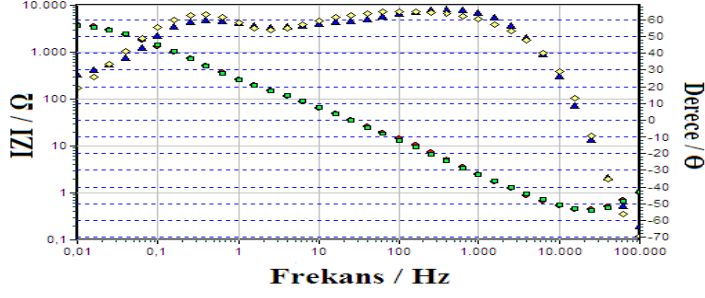


Şekil 4.4. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO]_o/[RuO₂]_o = 1:1 nanokompozitin LR(QR) devre analizi.

Çizelge 4.6. [rGO]_o/[RuO₂]_o = 1:1 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C _{dl} /F	R ₂ /Ω
[rGO] _o /[RuO ₂] _o = 1:1	$1,902 \times 10^{-6}$	0,2312	$114,03 \times 10^{-4}$	0,439	$1,718 \times 10^{-4}$	215

rGO/RuO₂ nanokompozit süperkapasitör cihazın aynı oranlarda farklı bir devre olan LR(Q(R(CR))) devresinde Bode-magnitüde ve Bode-faz grafikleri Şekil 4.5'de devre sonuçları ise Çizelge 4.7'de verilmiştir. Çift katmanlı kapasitans değeri, $C_{dl} = 3,577 \times 10^{-4}$, indüktans değeri, $L = 1,635 \times 10^{-6}$ ve n değeri, $n = 0,7537$ elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:1$ nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre analizi.

Çizelge 4.7. $[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:1$ nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre ölçümünün sonuçları.

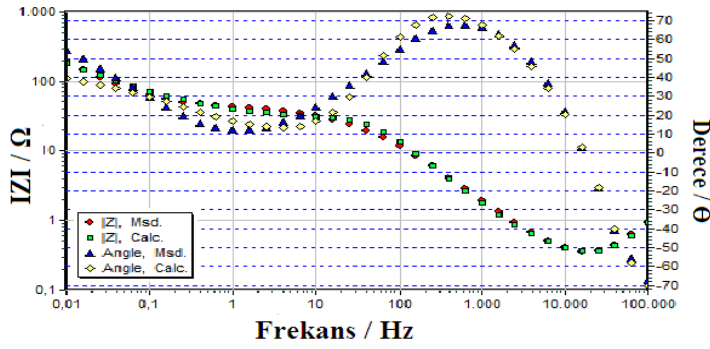
Devre Elemanları	L/Henri	C_{dl}/F	CPE, Y_0 [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R_1/Ω	R_2/Ω	R_3/Ω
$[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:1$	$1,635 \times 10^{-6}$	$3,577 \times 10^{-4}$	$5,913 \times 10^{-4}$	0,7537	0,3372	403,3	4095

En yüksek çift katmanlı kapasitans değeri ($C_{dl}=3,577 \times 10^{-4}$ F) olarak LR(CR)(QR) devresinde elde edilmiştir. Sabit faz elemanı olan, $n=0,7537$ değeri LR(Q(R(CR))) devrede elde edilmiştir. n değeri homojenlik hakkında bilgiler verir. Yük transfer dirençleri ise (R_1, R_2, R_3) devrelerde verilen değerleriyle **Çizelge 4.8**'de verilmiştir.

rGO/RuO₂ nanokompozitinin dört farklı devre analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek indüktans değeri, $L=1,902 \times 10^{-6}$ olarak, LR(QR) devresinde elde edilmiştir.

Çizelge 4.8. $[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:1$ nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.

Devre Elemanları	L/Henri	R_1/Ω	R_2/Ω	R_3/Ω	CPE, Y_0 [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C_{dl}/F
$[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:1$	$1,578 \times 10^{-6}$	0,3531	14,69	5380	$9,098 \times 10^{-4}$	0,7347	$3,253 \times 10^{-4}$
	$1,743 \times 10^{-6}$	0,3003	5583	----	$8,586 \times 10^{-4}$	0,7068	-----
	$1,902 \times 10^{-6}$	0,2312	215	----	$114,03 \times 10^{-4}$	0,439	$1,718 \times 10^{-4}$
	$1,635 \times 10^{-6}$	0,3372	403,3	4095	$5,913 \times 10^{-4}$	0,7537	$3,577 \times 10^{-4}$

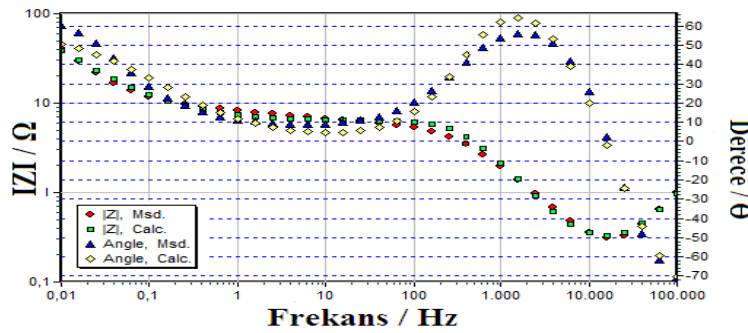


Şekil 4.6. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:2$ nanokompozitin LRQ(CR) devre analizi.

Çizelge 4.9. $[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:2$ nanokompozitin LRQ(CR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri/	R_1/Ω	CPE [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C_{dl}/F	R_2/Ω
$[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:2$	$1,476 \times 10^{-6}$	0,2839	$2,499 \times 10^{-2}$	0,506	$1,208 \times 10^{-4}$	27,55

$[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:2$ nanokompozitin LRQ(CR) devre ölçümünün sonuçlarına göre; indirgenmiş grafen oksite RuO_2 metal oksiti eklenmesinden dolayı n değerinde azalma meydana gelmiştir. $n = 0,506$ ve çift katmanlı kapasitans değeri, $C_{dl} = 1,208 \times 10^{-4}$ F olarak elde edilmiştir. n değerinin azalması kompozit filmin yüzey morfolojisinin homojenliğin bozulması şeklinde açıklanabilir.



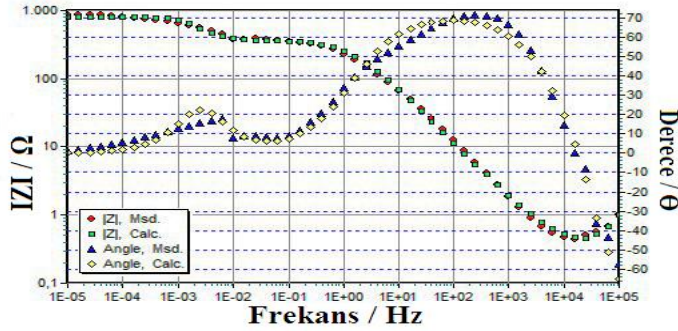
Şekil 4.7. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:3$ nanokompozitin LRQ(CR) devre analizi.

Çizelge 4.10. $[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:3$ nanokompozitin LRQ(CR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R_1/Ω	CPE (Q) [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C_{dl}/F	R_2/Ω
$[rGO]_0/[RuO_2]_0 = 1:3$	$1,48 \times 10^{-6}$	0,3225	0,1707	0,650	$7,553 \times 10^{-5}$	5,993

$[rGO]_o/[RuO_2]_o=1:3$ nanokompozitin LRQ(CR) devresinde elde edilen parametrelerdeki değerlere bakıldığında çift katmanlı kapasitans değeri, $C_{dl} = 7,553 \times 10^{-5}$ F, sabit faz değeri, $Q = 0,1707$ ve $n = 0,650$ olarak bulunmuştur.

4.2.2. rGO/RuO₂/PVK Nanokompozitin Devre Analizleri

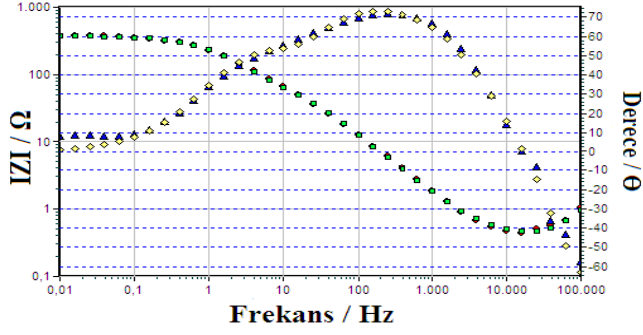


Şekil 4.8. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1$ nanokompozitin LR(QR(CR)) devre analizi.

Çizelge 4.11. $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1$ nanokompozitin LR(QR(CR)) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	CPE/[S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ /Ω	C _{dl} /F	R ₃ /Ω
$[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1$	$1,499 \times 10^{-6}$	0,403	$4,903 \times 10^{-4}$	0,803	805,6	0,061	685,6

$[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1$ nanokompozitin devre analiz sonuçlarına göre: Bode-magnitude ve Bode-faz grafiği sonuçlarından yararlanılarak LR(QR(CR)) devresinde elde edilen sonuçlarına göre $n = 0,803$ değeri ile çift tabakalı kapasitans değeri, $C_{dl} = 0,061$ F, LRQ(CR) devresine göre arttığı tespit edilmiştir.

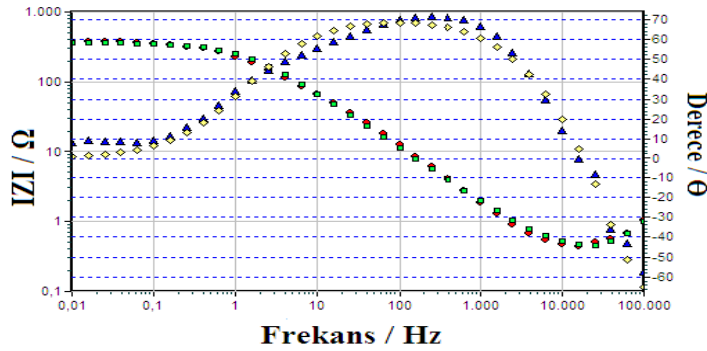


Şekil 4.9. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:1 nanokompozitin LR(CR)(QR) devre analizi.

Çizelge 4.12. [rGO]_o/[RuO₂]_o/[PVK]_o = 1:1:1 nanokompozitin LR(CR)(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	CPE [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ /Ω	C _{dl} /F	R ₃ /Ω
[rGO] _o /[RuO ₂] _o / [VK] _o = 1:1:1	1,415×10 ⁻⁶	0,4307	6,497×10 ⁻⁴	0,8169	19,93	3,158×10 ⁻⁴	357,4

[rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:1 nanokompozitin devre analizi. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiği sonuçlarından yararlanılarak LR(CR)(QR)) devresinde elde edilen sonuçlarına göre, n = 0,8169 değeri, indüktans değeri, L = 1,415×10⁻⁶ ve çift tabakalı kapasitans değeri, C_{dl} = 3,158×10⁻⁴ F tespit edilmiştir.

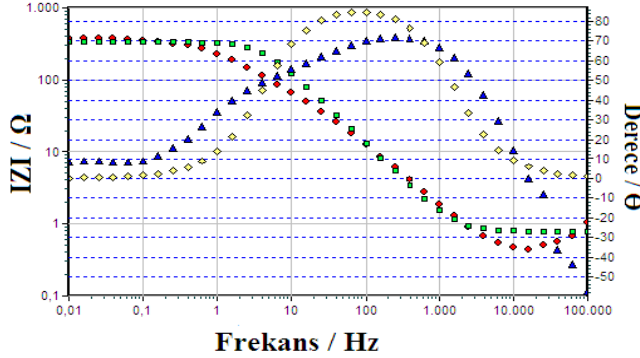


Şekil 4.10. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:1 nanokompozitin LR(CR)(QR)) devre analizi.

Çizelge 4.13. [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:1 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	CPE [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ /Ω
[rGO] _o /[RuO ₂] _o / [VK] _o = 1:1:1	1,501×10 ⁻⁶	0,4027	4,941×10 ⁻⁴	0,8025	367,7

$[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1$ nanokompozitin LR(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre indüktans değeri ise, $L = 1,501 \times 10^{-6}$ ve $n = 0,8025$ değeri LR(CR)(QR)) devresine göre değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.11. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1$ nanokompozitin R(CR) devre analizi.

Çizelge 4.14. $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1$ nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.

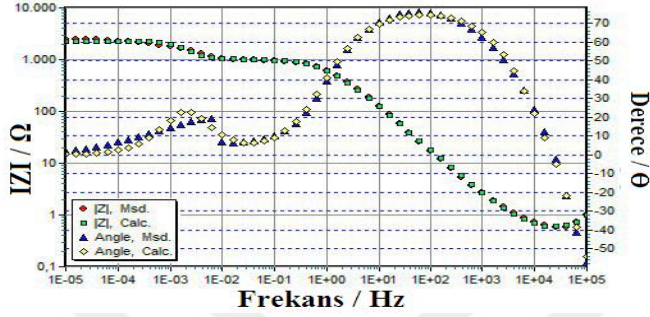
Devre Elemanları	R_1/Ω	R_2/Ω	C_{d1}/F
$[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o=1:1:1$	0,7842	334,9	$1,204 \times 10^{-4}$

$[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1$ nanokompozitin R(CR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre eşdeğer direnç değerleri; $R_1 = 0,7842 \Omega$, $R_2 = 334,9 \Omega$ değerleri elde edildi. Çift tabakalı kapasitans değeri, $C_{d1} = 1,204 \times 10^{-4} F$ elde edilmiştir.

En yüksek çift tabaklı kapasitans değeri, $C_{d1} = 0,061 F$ olarak LR(QR(CR)) devresinde elde edilmiştir. En fazla miktarda n değeri ise, $n = 0,8169$ değeri LR(CR)(QR) devrede elde edilmiştir. n değeri homojenlik hakkında bilgiler verir. Yük transfer dirençleri ise (R_1, R_2, R_3) $R_1 = 0,7842 \Omega$ değeri R(CR) devresinde, $R_2 = 367,7 \Omega$ de LR(QR) devresinde görülür iken son olarak $R_3 = 685,6 \Omega$ değeri de LR(QR(CR)) devresinde görülmektedir. Verilen bu değerleri **Çizelge 4.15'**de gösterilmiştir. $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o=1:1:1$ nanokompozitin dört farklı devre analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek indüktans değeri, $L = 1,501 \times 10^{-6}$ olarak LR(QR) devresinde elde edilmiştir.

Çizelge 4.15. [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o=1:1:1 nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	R ₃ /Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C _a /F
[rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o =1:1:1	1,499×10 ⁻⁶	0,403	805,6	685,6	4,903×10 ⁻⁴	0,803	0,061
	1,415×10 ⁻⁶	0,4307	19,93	357,4	6,497×10 ⁻⁴	0,8169	3,158×10 ⁻⁴
	1,501×10 ⁻⁶	0,4027	367,7	-----	4,941×10 ⁻⁴	0,8025	-----
	-----	0,7842	334,9	-----	-----	-----	1,204×10 ⁻⁴

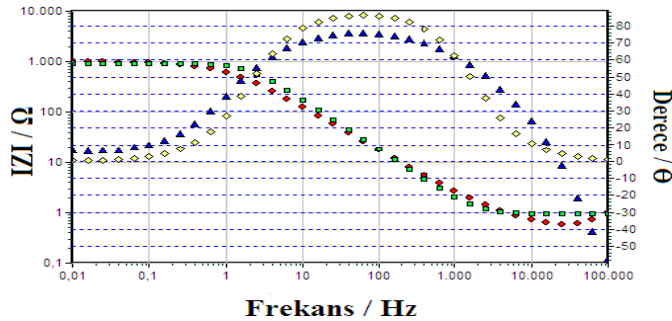


Şekil 4.12. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:3 nanokompozitin LR(QR(CR)) devre analizi.

Çizelge 4.16. [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:3 nanokompozitin LR(QR(CR)) devre ölçümünün sonuçları

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	CPE [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ /Ω	C ₁ /F	R ₃ /Ω
[rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:3	1,342×10 ⁻⁶	0,558	2,269×10 ⁻⁴	0,853	2297	0,028	1837

[rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:3 nanokompozitin LR(QR(CR)) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri ise, R₁ = 0,558 Ω, R₂ = 2297 Ω ve indüktans değeri, L = 1,342×10⁻⁶ Henri elde edilmiştir.

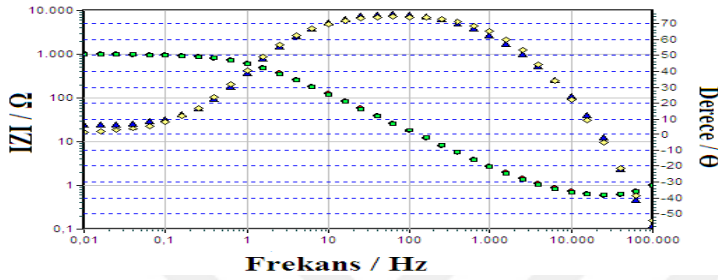


Şekil 4.13. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:3 nanokompozitin R(CR) devre analizi.

Çizelge 4.17. [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:3 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	C _{d1} /F
[rGO] _o /[RuO ₂] _o / [VK] _o =1:1:3	0,9363	929,4	8,801×10 ⁻⁵

[rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:3 nanokompozitin R(CR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerlerine göre; R₁ = 0,9363 Ω, R₂ = 929,4 Ω ve çift tabakalı kapasitans değeri, C_{d1} = 8,801×10⁻⁵ F elde edilmiştir.

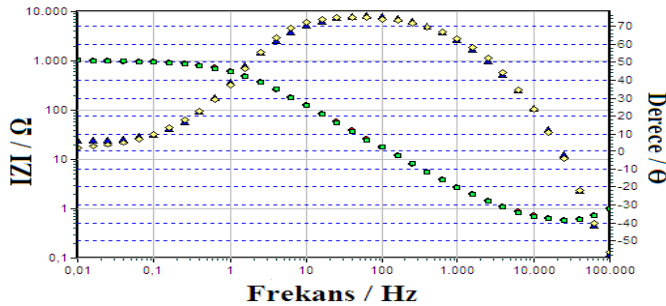


Şekil 4.14. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:3 nanokompozitin LR(QR) devre analizi.

Çizelge 4.18. [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:3 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ / Ω	CPE [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ /Ω
[rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o =1:1:3	1,343×10 ⁻⁶	0,5582	2,275×10 ⁻⁴	0,8532	1008

[rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:3 nanokompozitin LR(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,5582 Ω, R₂ = 1008 Ω, indüktans değeri, L= 1,343×10⁻⁶ ve n = 0,8532 değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:3 nanokompozitin LR(CR)(QR) devre analizi.

Çizelge 4.19. [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o= 1:1:3 nanokompozitin LR(CR)(QR) devre ölçümünün sonuçları

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	CPE [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ /Ω	C/F
[rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o =1:1:3	1,39×10 ⁻⁶	0,5245	6,661×10 ⁻⁴	0,7631	391,2	2,412×10 ⁻⁴

[rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:3 nanokompozitin LR(CR)(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,5245 Ω,

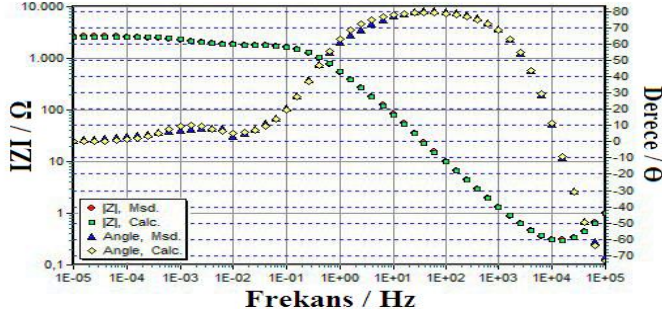
R₂ = 391,2 Ω LR(QR) devresindeki değerlere göre azalma olduğu görülmektedir. İndüktans değeri, L = 1,39×10⁻⁶ ve n = 0,7631 değeri elde edilmiştir.

En yüksek kapasitans değeri, C_{dl}=0,028 F olarak LR(QR(CR)) devresinde elde edilmiştir. Sabit faz elemanı olan, n = 0,8532 değeri LR(QR) devrede elde edilmiştir. n değeri homojenlik hakkında bilgiler verir. Yük transfer dirençleri ise (R₁, R₂, R₃) R₁ = 0,9363 Ω değeri R(CR) devresinde, R₂ = 1008 Ω de LR(QR) devresinde görülür iken son olarak R₃ = 1837 Ω degeri de LR(QR(CR)) devresinde görülmektedir.

[rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o=1:1:3 nanokompozitinin dört farklı devre analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek indüktans değeri, L = 1,39×10⁻⁶ olarak LR(CR)(QR) devresinde elde edilmiştir. Verilen bu değerleri Çizelge 4.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.20. [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o=1:1:3 nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	R ₃ /Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C _{dl} /F
[rGO] _o /[RuO ₂] _o /[VK] _o = 1:1:3	1,342×10 ⁻⁶	0,558	2297	1837	2,269×10 ⁻⁴	0,8530	0,028
	-----	0,9363	929,4	-----	-----	-----	8,801×10 ⁻⁵
	1,343×10 ⁻⁶	0,5582	1008	-----	2,275×10 ⁻⁴	0,8532	-----
	1,39×10 ⁻⁶	0,5245	391,2	-----	6,661×10 ⁻⁴	0,7631	2,412×10 ⁻⁴

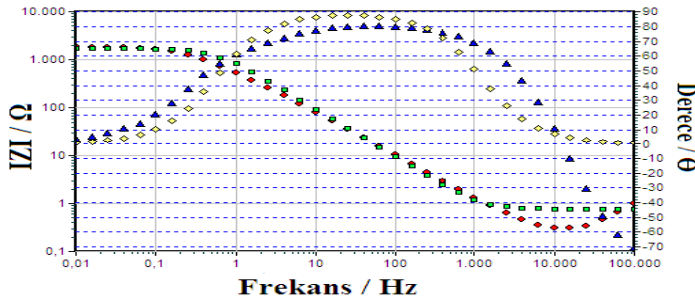


Şekil 4.16. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0 = 1:1:5$ nanokompozitin LR(QR(CR)) devre analizi.

Çizelge 4.21. $[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0 = 1:1:5$ nanokompozitin LR(QR(CR)) devre ölçümünün sonuçları

Devre Elemanları	L/Henri	R_1 / Ω	CPE [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R_2/Ω	C_{dl}/F	R_3/Ω
$[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0=1:1:5$	$1,536 \times 10^{-6}$	0,279	$3,077 \times 10^{-4}$	0,897	2635	0,014	6340

$[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0 = 1:1:5$ nanokompozitin LR(QR(CR)) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri ise, $R_1 = 0,279 \Omega$, $R_2 = 2635 \Omega$, indüktans değeri, $L = 1,536 \times 10^{-6}$, $n = 0,279$ değeridir. n değerinin sıfıra yakın olması nanokompozitin homojen olmadığını göstermektedir. Çift tabakalı kapasitans değeri, $C_{dl} = 0,014 F$ değerleri elde edilmiştir.

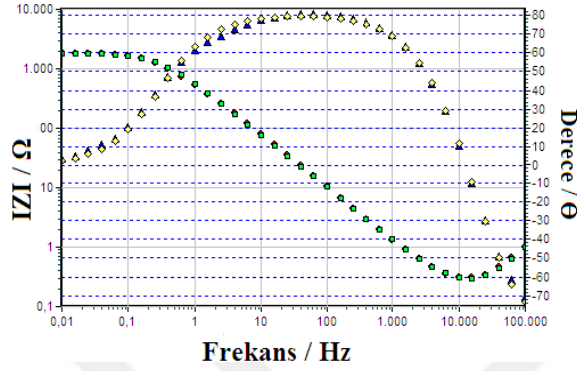


Şekil 4.17. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0 = 1:1:5$ nanokompozitin R(CR) devre analizi.

Çizelge 4.22. $[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0 = 1:1:5$ nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R_1 / Ω	R_2/Ω	C_{dl}/F
$[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0=1:1:5$	0,7607	1718	$1,69 \times 10^{-4}$

$[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:5$ nanokompozitin R(CR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; $R_1 = 0,7607 \Omega$, $R_2 = 1718 \Omega$ ve çift tabakalı kapasitans, $C_{dl} = 0,014 F$ değerlerinde düşme meydana geldiği görülmektedir.

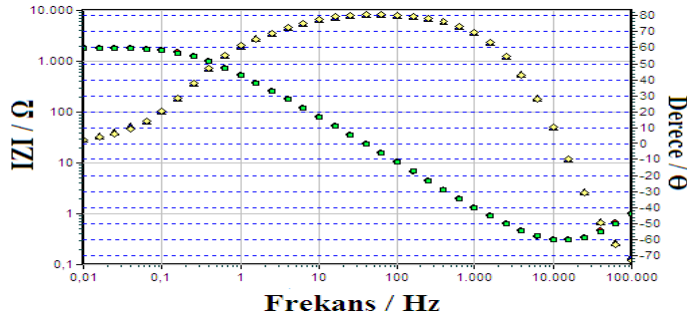


Şekil 4.18. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:5$ nanokompozitin LR(QR) devre analizi.

Çizelge 4.23. $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:5$ nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R_1 / Ω	CPE [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R_2/Ω
$[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o=1:1:5$	$1,536 \times 10^{-6}$	0,2796	$3,079 \times 10^{-4}$	0,8969	1840

$[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:5$ nanokompozitin LR(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; $R_1 = 0,2796 \Omega$, $R_2 = 1840 \Omega$ ve indüktans değeri ise, $L = 1,536 \times 10^{-6}$ elde edilmektedir.



Şekil 4.19. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre $[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0 = 1:1:5$ nanokompozitin LR(CR)(QR) devre analizi.

Çizelge 4.24. $[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0 = 1:1:5$ nanokompozitin LR(CR)(QR) devre ölçümünün sonuçları.

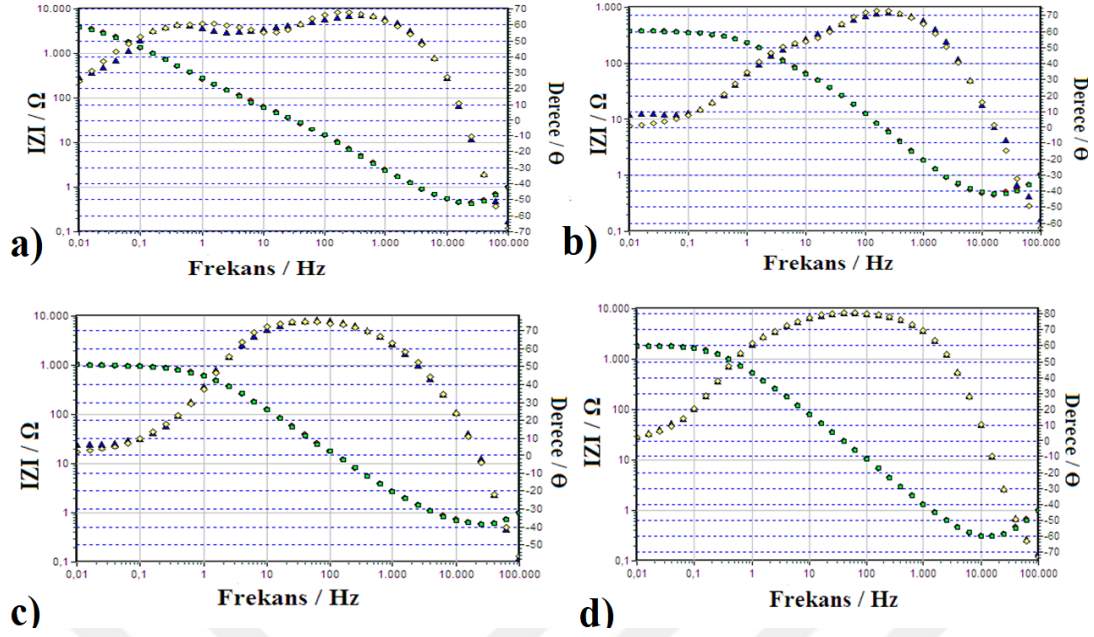
Devre Elemanları	L/Henri	R_1/Ω	CPE [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R_2/Ω	C_{dl}/F	R_3/Ω
$[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0 = 1:1:5$	$1,517 \times 10^{-6}$	0,2847	$3,532 \times 10^{-4}$	0,8984	52,99	$1,053 \times 10^{-4}$	1816

$[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0 = 1:1:5$ nanokompozitin LR(CR)(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; $R_1 = 52,99 \Omega$, $R_2 = 1816 \Omega$ ve indüktans değeri ise, $L = 1,517 \times 10^{-6}$ elde edilmektedir.

En yüksek çift tabakalı kapasitans değeri, $C_{dl} = 0,014 F$ olarak LR(QR(CR)) devresinde elde edilmiştir. $n = 0,8984$ değeri LR(CR)(QR) devrede en fazla miktar elde edilmiştir. n değeri homojenlik hakkında bilgiler verir. Yük transfer dirençleri ise (R_1, R_2, R_3) $R_1 = 0,7607 \Omega$ değeri R(CR) devresinde, $R_2 = 2635 \Omega$ değeri de LR(QR(CR)) devresinde görülür iken son olarak $R_3 = 6340 \Omega$ değeri de LR(QR(CR)) devresinde görülmektedir. Verilen bu değerleri **Çizelge 4.25**'de gösterilmiştir. $[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0=1:1:5$ nanokompozitin dört farklı devre analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek indüktans değeri, $L = 1,536 \times 10^{-6}$ olarak LR(QR(CR)) ve R(CR) devresinde elde edilmiştir.

Çizelge 4.25. $[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0=1:1:5$ nanokompozitin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.

Devre Elemanları	L/Henri	R_1/Ω	R_2/Ω	R_3/Ω	CPE, Y_0 [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C_{dl}/F
$[rGO]_0/[RuO_2]_0/[VK]_0=1:1:5$	$1,536 \times 10^{-6}$	0,279	2635	6340	$3,077 \times 10^{-4}$	0,897	0,014
	-----	0,7607	1718	-----	-----	-----	$1,69 \times 10^{-4}$
	$1,536 \times 10^{-6}$	0,2796	1840	----	$3,079 \times 10^{-4}$	0,8969	-----
	$1,517 \times 10^{-6}$	0,2847	52,99	1816	$3,532 \times 10^{-4}$	0,8984	$1,053 \times 10^{-4}$



Şekil 4.20. ZSimpWin kullanılarak sırasıyla; a) $[rGO]_o/[RuO_2]_o = 1/1$, b) $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1$, c) $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:3$, d) $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:5$ oranlarındaki rGO/RuO₂/PVK nanokompozitlerinden elde edilen eşdeğer LR(CR)(QR) devre modeli.

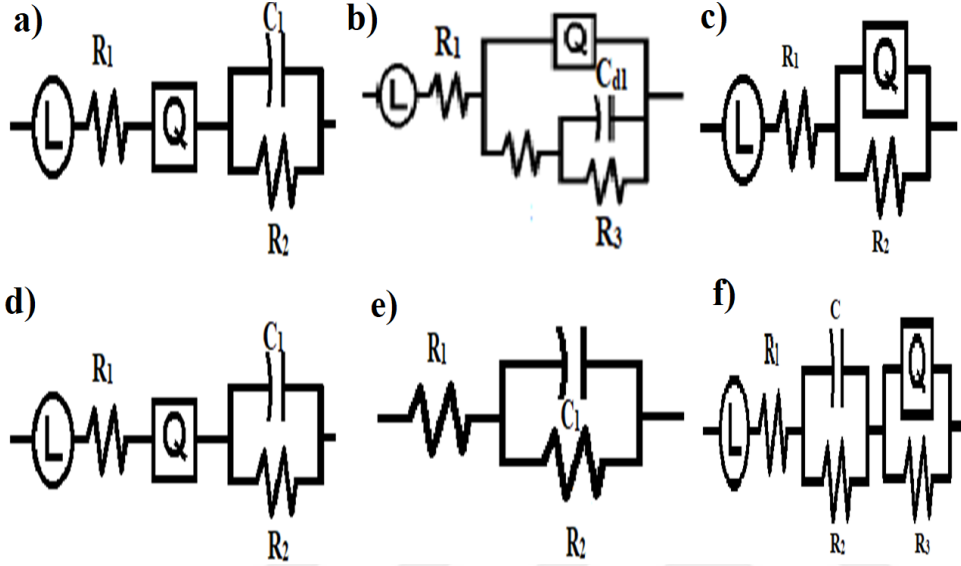
Çizelge 4.26. $[rGO]_o/[RuO_2]_o$ ve $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1, 1:1:3, 1:1:5$ nanokompozitlerinin LR(CR)(QR) devre ölçümünden elde edilen sonuçları.

Parametreler	rGO/RuO ₂	$[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o =$		
		1/1/1	1/1/3	1/1/5
L/Henri	$1,578 \times 10^{-6}$	$1,415 \times 10^{-6}$	$1,39 \times 10^{-6}$	$1,517 \times 10^{-6}$
R ₁ /Ω	0,3531	0,4307	0,5245	0,2847
CPE [S.sec ⁿ]	$9,098 \times 10^{-4}$	$6,497 \times 10^{-4}$	$6,661 \times 10^{-4}$	$3,532 \times 10^{-4}$
n, [0<n<1]	0,7347	0,8169	0,7631	0,8984
R ₂ /Ω	14,69	19,93	391,2	52,99
C _{d1} /F	$3,253 \times 10^{-4}$	$3,158 \times 10^{-4}$	$2,412 \times 10^{-4}$	$1,053 \times 10^{-4}$
R ₃ /Ω	5380	357,4	654,3	1816

rGO/RuO₂ ve $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:1; 1:1:3; 1:1:5$ oranlarındaki nanokompozitin LR(CR)(QR) devre modeline uyumlu olduğu görülmektedir. PVK miktara nanokompozitte ağırlıkça miktarı arttıkça $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1/1/5$ oranlarındaki R₃ = 1816 Ω değerinde yükselmeler olduğu ve kapasitans değerinde, C_{d1} = $1,053 \times 10^{-4}$ azalmalar ve n = 0,8984 değerinin artmakta olduğu görülmektedir. İdeal kapasitör olmaya en yakın kompozit $[rGO]_o/[RuO_2]_o/[VK]_o = 1:1:5$ nanokompozit olarak açıkça görülmektedir.

[rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o=1:1:3 oranlarındaki $R_1 = 0,5245 \Omega$, $R_2 = 391,2 \Omega$ değerinde artmaktadır. rGO/RuO₂ nanokompozitinde indüktans değeri, $L = 1,578 \times 10^{-6}$ en yüksek olduğu görülmektedir.

4.2.3. rGO/RuO₂ ve rGO/RuO₂/PVK Nanokompozitin Devre Modelleri

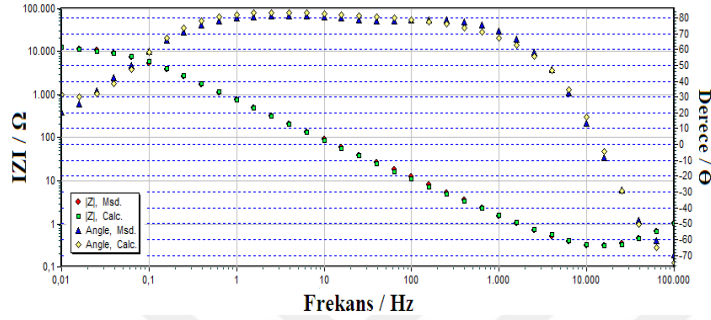


Şekil 4.21. [rGO]_o/[RuO₂]_o ve [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1:1:1, 1:1:3, 1:1:5 nanokompozitin devre modellerinin isimleri; **a)** LR₁Q(CR₂), **b)** LR₁(QR₂(C_{d1}R₃)), **c)** LR(QR), **d)** LRQ(CR), **e)** R(CR), **f)** LR(CR)(QR) ve devre modellerinin şekilleri.

rGO/RuO₂ ve [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1/1/1, 1/1/3 ve 1/1/5 oranlarındaki nanokompozitleri için eşdeğer devre çalışmaları nanokompozitlerin EES verileri kullanılarak ZSimpWin programında gerçekleştirilmiştir. rGO/RuO₂ ve [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o = 1/1/1, 1/1/3 ve 1/1/5 oranlarındaki nanokompozitleri için en uygun devrenin LR(CR)(QR) devresi olduğuna doğruluk parametrelerine ($\chi^2 < 10^{-2}$ ile 10^{-3} ve hatanın $< \%15$) bakılarak karar verilmiştir. Eşdeğer devre modeli uygulamasından sonra elde edilen sonuçlar ise **Çizelge 4.26**'da gösterilmiştir. Devre parametrelerinde R_1 çözelti direnci (Carreno, Rosales, Merchan, Lozano ve Godinez, 2019), R_2 ve R_3 ise elektrot ve elektrolitteki elektron değişimden kaynaklanan yük transfer direnci olduğu saptanmıştır (Ateş, Bayrak, Yoruk, Çalışkan, 2017). Ayrıca Q sabit faz elemanıdır (Jana vd. 2017). Sabit faz elemanının bir parametresi olan n ise elektrotun yüzey pürüzlülüğü hakkında bilgi verir ve n değeri $0 < n < 1$ arasında bir değer alır. Sıfıra yakın olması resistör, 1 veya 1'e yakın olması ise ideal bir kapasitör davranışına sahip bir malzeme olduğunu gösterir. C_{d1} ise devredeki çift katmanlı kapasitansı temsil eder (Qu vd., 2018). L indüktans olarak adlandırılır (Abouelamiam vd., 2018). Yüksek frekansta süperkapasitörün metalik kılıf içindeki davranışlarını belirtmede kullanılır.

4.2.4. rGO Nanokompozitin Devre Analizleri

Devre uygulamaları ile ilgili çalışmalar ZSimpWin 3,2 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Devre uygulamalarında nanokompozitlerin EES verileri kullanılmıştır ve uygulanan devrenin doğruluğuna karar vermek için hata oranının $\leq \% 20$ ve $\chi^2 > 10^{-3}-10^{-4}$ olması için Kramer-Kronig testleri yapılmıştır. 1 M H₂SO₄ elektrolit çözeltisi kullanılarak devre modelleri hakkında bilgiler alınmıştır.



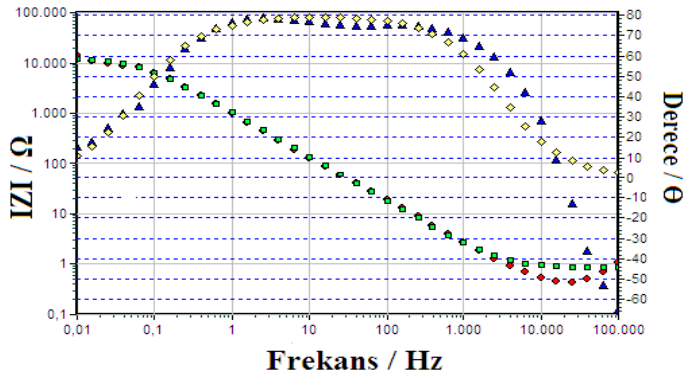
Şekil 4.22. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; rGO nanokompozitin LR(QR) devre analizi.

Çizelge 4.27. rGO nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ / Ω	CPE, Y ₀ [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ / Ω
[rGO]	$1,7 \times 10^{-6}$	0,2805	$5,9 \times 10^{-4}$	0,7745	2407

LR(QR) devresine göre rGO malzemesinin Bode-magnitude ve Bode-faz grafiği simülasyon ve deneysel verilerinden elde edilen sonuçları Şekil 4.22' de elde edilen devre parametreleri Çizelge 4.27'de gösterilmiştir. İndüktans değeri, $L = 1,7 \times 10^{-6}$ ve $n = 0,7745$ olarak tespit edilmiştir.

4.2.5. rGO/MnO₂ Nanokompozitin Devre Analizleri

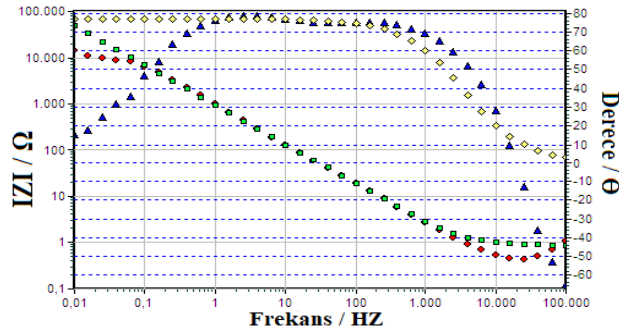


Şekil 4.23. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; rGO/MnO₂ nanokompozitin R(QR) devre analizi.

Çizelge 4.28. rGO/MnO₂ nanokompozitin R(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	CPE, Y ₀ [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C _{dl} /F
[rGO] ₀ /[MnO ₂] ₀ =1:1	0,9141	1,122×10 ⁻⁴	1,829×10 ⁻⁴	0,8869	9,118×10 ⁻⁵

[rGO]₀/[MnO₂]₀ =1:1 nanokompozitin R(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri ise R₁ = 0,9141 Ω, R₂ = 1,122×10⁻⁴ Ω, MnO₂ metal oksitin eklenmesiyle n değerinde artma meydana gelmiştir. n değeri, n = 0,8869 ve çift tabakalı kapasitans değeri, C_{dl} = 9,118×10⁻⁵ F değerleri elde edilmektedir.

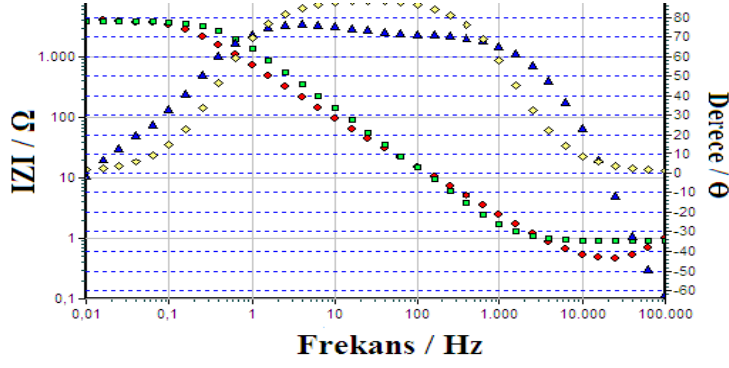


Şekil 4.24. Bode-magnitüde ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; rGO/MnO₂ nanokompozitin RQ devre analizi.

Çizelge 4.29. rGO/MnO₂ nanokompozitin RQ devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R/Ω	CPE, Y ₀ [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]
[rGO] ₀ /[MnO ₂] ₀ =1:1	0,86006	2,152×10 ⁻⁴	0,8569

rGO/MnO₂=1:1 nanokompozitin RQ devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değeri, R₁ = 0,8606 Ω, sabit faz değeri, Q = 2,152×10⁻⁴ ve n = 0,8569 değeri elde edilmektedir.

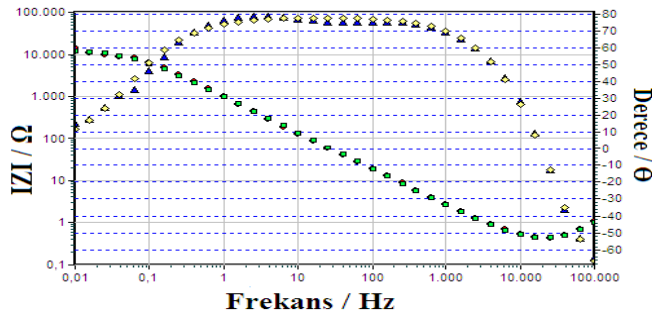


Şekil 4.25. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; rGO/MnO₂ nanokompozitin R(CR) devre analizi.

Çizelge 4.30. rGO/MnO₂ nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	C _{d1} /F
[rGO] _o /[MnO ₂] _o = 1:1	0,9141	1,122×10 ⁻⁴	9,118×10 ⁻⁵

[rGO]_o/[MnO₂]_o = 1:1 nanokompozitin R(CR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri ise, R₁ = 0,8606 Ω, R₂ = 1,122×10⁻⁴ Ω ve çift tabakalı kapasitans değeri, C_{d1} = 9,118×10⁻⁵ F elde edilmektedir.



Şekil 4.26. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; rGO/MnO₂ nanokompozitin LR(QR) devre analizi.

Çizelge 4.31. rGO/MnO₂ nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	N, [0<n<1]	R ₂ /Ω
[rGO] _o /[MnO ₂] _o = 1:1	1,58×10 ⁻⁶	0,4009	1,9×10 ⁻⁴	0,8714	1310

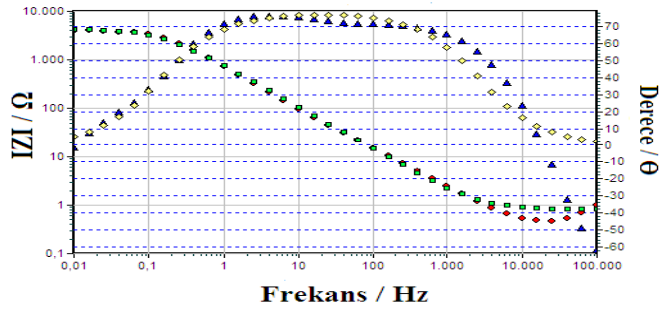
[rGO]_o/[MnO₂]_o = 1:1 nanokompozitin LR(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri ise, R₁ = 0,4009 Ω, R₂ = 1310 Ω ve indüktans değeri, L = 1,58×10⁻⁵ F elde edilmektedir.

Bütün devre modellerinde elde edilen en yüksek çift tabakalı kapasitans değeri, $C_{dl} = 9,118 \times 10^{-5}$ F olarak R(QR) ve R(CR) devresinde iken $n = 0,8869$ değeri R(QR) devrede elde edilmiştir. n değeri homojenlik hakkında bilgiler verir. Yük transfer dirençleri ise (R_1, R_2), $R_1 = 0,9141 \Omega$ değeri R(CR) ve R(QR) devrelerinde, $R_2 = 1310 \Omega$ değeri de LR(QR) devresinde görülmektedir. Verilen bu değerleri Çizelge 4.32’de gösterilmiştir. $[rGO]_o/[MnO_2]_o=1:1$ nanokompozitinin dört farklı devre analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek indüktans değeri $L = 1,58 \times 10^{-6}$ LR(QR) devresinde gösterilmektedir.

Çizelge 4.32 $[rGO]_o/[MnO_2]_o=1:1$ nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.

Devre Elemanları	L/Henri	R_1/Ω	R_2/Ω	CPE, Y_0 [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C_{dl}/F
$[rGO]_o/[MnO_2]_o=1:1$	-----	0,9141	$1,122 \times 10^{-4}$	$1,829 \times 10^{-4}$	0,8869	$9,118 \times 10^{-5}$
	-----	0,86006	-----	$2,152 \times 10^{-4}$	0,8569	-----
	-----	0,9141	$1,122 \times 10^{-4}$	-----	-----	$9,118 \times 10^{-5}$
	$1,58 \times 10^{-6}$	0,4009	1310	$1,9 \times 10^{-4}$	0,8714	-----

4.2.6. rGO/MnO₂/PTTh Nanokompozitin Devre Analizleri

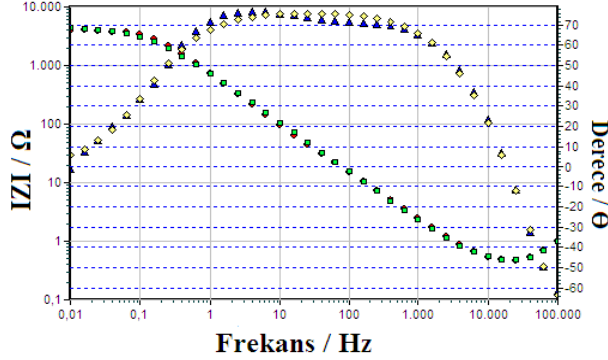


Şekil 4.27. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[MnO_2]_o/[TTh]_o=1:1:1$ nanokompozitin R(QR) devre analizi.

Çizelge 4.33. $[rGO]_o/[MnO_2]_o/[TTh]_o=1:1:1$ nanokompozitin R(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R_1/Ω	R_2/Ω	CPE, Y_0 [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]
$[rGO]_o/[MnO_2]_o/[TTh]_o=1:1:1$	0,8125	437,7	$2,528 \times 10^{-4}$	0,8705

[rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:1 nanokompozitin R(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri, R₁ = 0,8125 Ω, R₂ = 437,7 Ω ve n = 0,8705 değeri tespit edilmiştir.

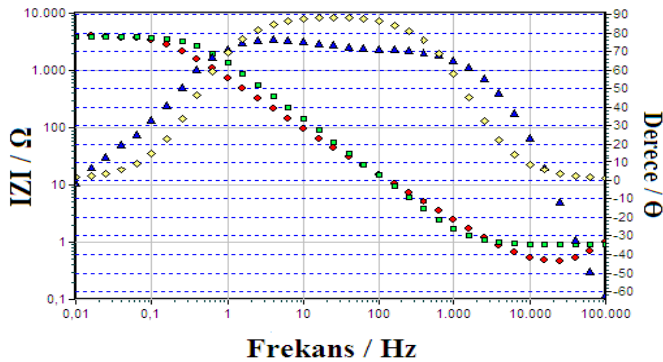


Şekil 4.28. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:1 nanokompozitin LR(QR) devre analizi.

Çizelge 4.34. [rGO]_o/[MnO₂]_o=1:1:1 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ / Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ / Ω
[rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:1	1,47×10 ⁻⁶	0,4323	2,7×10 ⁻⁴	0,8521	4497

[rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:1 nanokompozitin LR(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,4323 Ω, R₂ = 4497 Ω ve n = 0,8521 değerinde R(QR) devresindeki değere göre azalma görülmektedir.



Şekil 4.29. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:1 nanokompozitin R(CR) devre analizi.

Çizelge 4.35. [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:1 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.

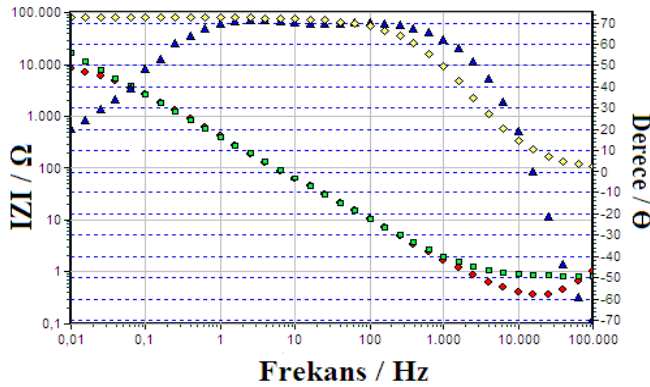
Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	C _{d1} / F
[rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:1	0,902	3893	1,092×10 ⁻⁴

[rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:1 nanokompozitin R(CR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,902Ω, R₂ = 3893Ω ve çift tabakalı kapasitans değeri, C_{d1}=1,092×10⁻⁴ elde edilmiştir.

Bütün devre modellerinde çift tabakalı kapasitans değeri, C_{d1} = 1,092×10⁻⁴ F olarak R(CR) devresinden elde edilmiştir. n = 0,8705 değeri R(QR) devresinde elde edilmiştir. n değeri homojenlik hakkında bilgiler verir. Yük transfer dirençleri ise (R₁, R₂), R₁ = 0,902 Ω değeri R(CR) devresinde ve R₂ = 4497 Ω LR(QR) devresinde görülmektedir. Verilen bu değerleri Çizelge 4.36’da gösterilmiştir. [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:1 nanokompozitinin üç farklı devre analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek indüktans değeri, L = 1,47×10⁻⁶ LR(QR) devresinde tespit edilmiştir.

Çizelge 4.36. [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:1 nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C _{d1} /F
[rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:1	-----	0,8125	437,7	2,528×10 ⁻⁴	0,8705	-----
	1,47×10 ⁻⁶	0,4323	4497	2,7×10 ⁻⁴	0,8521	-----
	-----	0,902	3893	-----	-----	1,092×10 ⁻⁴

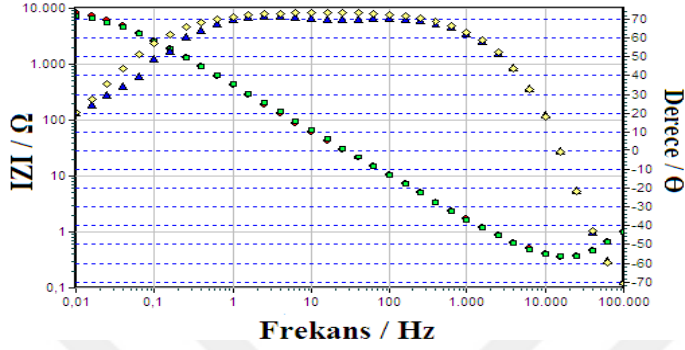


Şekil 4.30. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:2 nanokompozitin RQ devre analizi.

Çizelge 4.37. [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:2 nanokompozitin RQ devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	N, [0<n<1]
[rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:2	0,801	5,507×10 ⁻⁴	0,8067

[rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:2 nanokompozitin RQ devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değeri, $R_1 = 0,801 \Omega$, $n = 0,8067$ ve sabit faz değeri, $Q = 5,507 \times 10^{-4}$ elde edilmektedir.

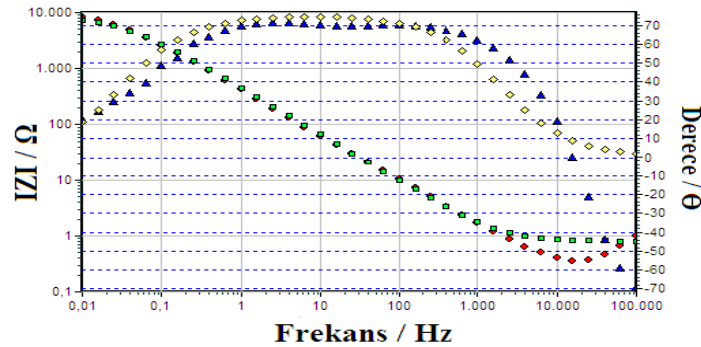


Şekil 4.31. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o = 1:1 2 nanokompozitin LR(QR) devre analizi.

Çizelge 4.38. rGO/MnO₂/[TTh]_o=1:1:2 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ /Ω
[rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:2	$1,54 \times 10^{-6}$	0,3192	$4,9 \times 10^{-4}$	0,8221	8721

[rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:2 nanokompozitin LR(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; $R_1 = 0,3192 \Omega$, $R_2 = 8721 \Omega$, indüktans değeri, $L = 1,54 \times 10^{-6}$ ve $n = 0,8221$ değeri elde edilmektedir.



Şekil 4.32. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o = 1:1 2 nanokompozitin R(QR) devre analizi

Çizelge 4.39'da [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:2 nanokompozitin R(QR) devre ölçümünün sonuçları.

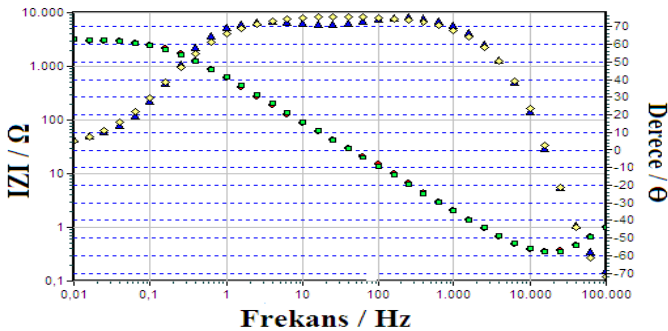
Devre Elemanları	R ₁ /Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ /Ω
[rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:2	0,7944	4,65×10 ⁻⁴	0,8393	8329

[rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:2 nanokompozitin R(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,7944 Ω, R₂ = 8329 Ω, n = 0,8393 ve sabit faz değeri, Q = 4,65×10⁻⁴ değeri elde edilmektedir.

Bütün devre modellerinde en yüksek çift tabakalı kapasitans değeri, C_{d1} = 9,118×10⁻⁵ F olarak R(QR) ve R(CR) devresinde elde edilmiş ve n = 0,8869 değerinin en fazla olduğu devre R(QR)'de elde edilmiştir. n değeri homojenlik hakkında bilgiler verir. Yük transfer dirençleri ise (R₁, R₂), R₁ = 0,9141 Ω değerlerinin en fazla olarak bulunduğu devre R(CR) ve R(QR) devrelerinde, R₂ = 1310 Ω değeri de LR(QR) devresinde görülmektedir. Verilen bu değerleri **Çizelge 4.40'**da gösterilmiştir. [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:2 nanokompozitin dört farklı devre analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek indüktans değeri, L = 1,58×10⁻⁶ değerinde tespit edilmiştir.

Çizelge 4.40. [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:2 nanokompozitin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C _{d1} /F
[rGO] _o /[MnO ₂] _o / [TTh] _o =1:1:2	-----	0,9141	1,122×10 ⁻⁴	1,829×10 ⁻⁴	0,8869	9,118×10 ⁻⁵
	-----	0,86006		2,152×10 ⁻⁴	0,8569	-----
	-----	0,9141	1,122×10 ⁻⁴	-----	-----	9,118×10 ⁻⁵
	1,58×10 ⁻⁶	0,4009	1310	1,9×10 ⁻⁴	0,8714	-----

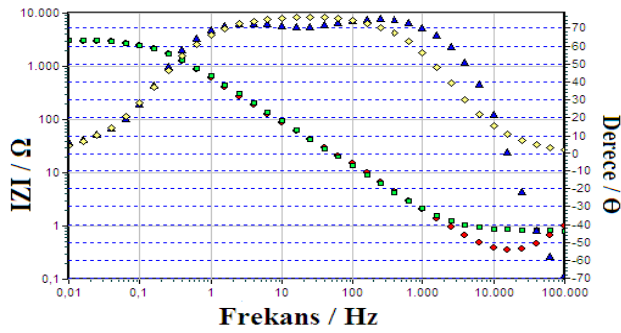


Şekil 4.33. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o nanokompozitin LR(QR) devre analizi.

Çizelge 4.41. [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:3 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	L/Henri	R ₂ /Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ /Ω
[rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:3	1,59×10 ⁻⁶	0,3066	3,103×10 ⁻⁴	0,8495	3279

[rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:3 nanokompozitin LR(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,3066 Ω, R₂ = 3279 Ω, indüktans değeri, L = 1,59×10⁻⁶ ve n = 0,8495 değeri elde edilmektedir.

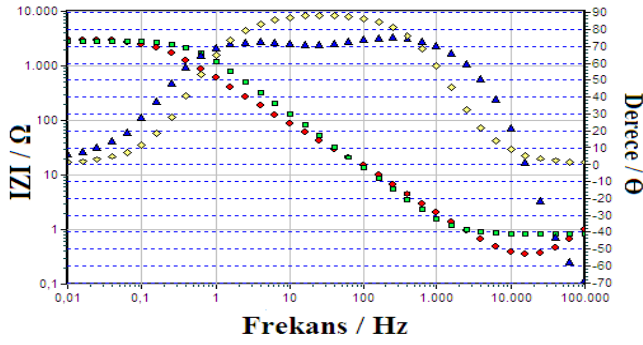


Şekil 4.34. Bode-magnitide ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o nanokompozitin R(QR) devre analizi.

Çizelge 4.42. [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:3 nanokompozitin R(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	C _{dl} / F	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]
[rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:3	0,9142	3509	1,19×10 ⁻⁴	4,081×10 ⁻⁴	0,8202

[rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o= 1:1:3 nanokompozitin R(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri ; R₁ = 0,9142 Ω, R₂ = 3509 Ω, çift tabakalı kapasitans değeri C_{dl} = 1,19×10⁻⁴ F ve n = 0,8202 değeri elde edilmektedir.



Şekil 4.35. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:3$ nanokompozitin R(CR) devre analizi.

Çizelge 4.43. $[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:3$ nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.

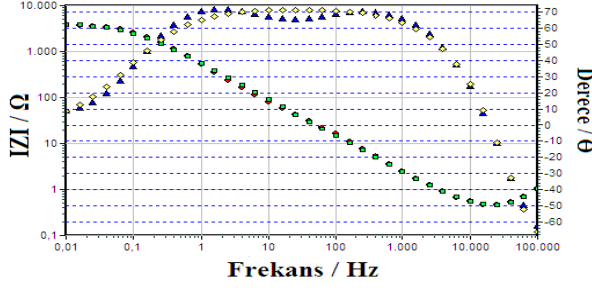
Devre Elemanları	R_1 / Ω	R_2 / Ω	C_{d1} / F
$[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:3$	0,8245	2879	$1,188 \times 10^{-4}$

$[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0= 1:1:3$ nanokompozitin R(CR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri ; $R_1 = 0,8245 \Omega$, $R_2 = 2879 \Omega$, çift tabakalı kapasitans değeri $C_{d1} = 1,188 \times 10^{-4} F$ elde edilmektedir.

Bütün devre modellerinde en yüksek değeri olan çift tabakalı kapasitans değeri, $C_{d1} = 1,19 \times 10^{-4} F$ olarak R(QR) devresinde elde edilmiştir. En yüksek n değeri, $n = 0,8495$ olarak LR(QR) devresinde elde edilmiştir. n değeri homojenlik hakkında bilgiler verir. Yük transfer dirençleri ise (R_1, R_2), $R_1 = 0,9142 \Omega$, $R_2 = 3509 \Omega$ değerleri R(QR) devresinde miktarlarının arttığı görülmektedir. Verilen bu değerleri **Çizelge 4.44**'de gösterilmiştir. $[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:3$ nanokompozitin dört farklı devre analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek indüktans değeri, $L = 1,59 \times 10^{-6}$ LR(QR) devresinde gösterilmektedir.

Çizelge 4.44. $[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:3$ nanokompozitin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.

Devre Elemanları	L/Henri	R_1/Ω	R_2/Ω	CPE, Y_0 [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C_1/F
$[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:3$	$1,59 \times 10^{-6}$	0,3066	3279	$3,103 \times 10^{-4}$	0,8495	-----
	-----	0,9142	3509	$4,081 \times 10^{-4}$	0,8202	$1,19 \times 10^{-4}$
	-----	0,8245	2879	-----	-----	$1,188 \times 10^{-4}$

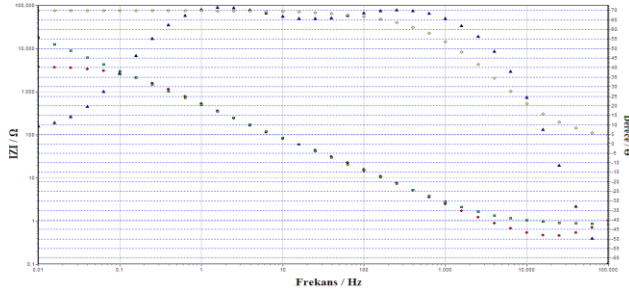


Şekil 4.36. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:5$ nanokompozitin R(QR) devre analizi.

Çizelge 4.45. $[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:5$ nanokompozitin $R_1(QR_2)$ devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R_1 / Ω	R_2 / Ω	CPE, Y_0 , [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]
$[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:5$	0,8158	4210	$4,081 \times 10^{-4}$	0,8202

$[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:5$ nanokompozitin R(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; $R_1 = 0,8158 \Omega$, $R_2 = 4210 \Omega$ ve $n = 0,8202$ değeri elde edilmektedir.

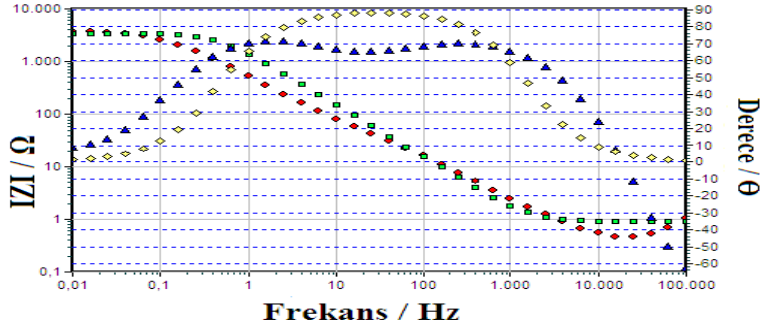


Şekil 4.37. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; $[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:5$ nanokompozitin RQ devre analizi.

Çizelge 4.46. $[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:5$ nanokompozitin RQ devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R_1 / Ω	CPE, Y_0 [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]
$[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:5$	0,8229	$5,242 \times 10^{-4}$	0,7768

$[rGO]_0/[MnO_2]_0/[TTh]_0=1:1:5$ nanokompozitin RQ devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değeri, $R_1 = 0,8229 \Omega$ ve $n = 0,7768$ değeri elde edilmektedir.

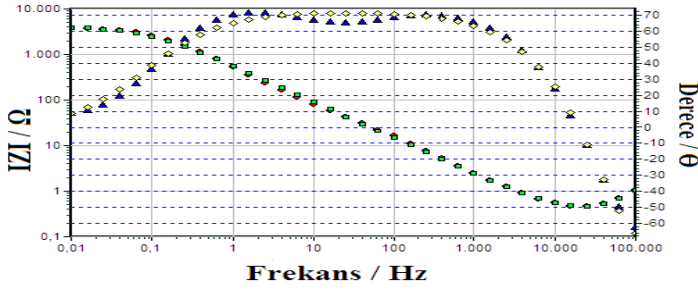


Şekil 4.38. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]₀/[MnO₂]₀/[TTh]₀=1:1:5 nanokompozitin R(CR) devre analizi.

Çizelge 4.47. [rGO]₀/[MnO₂]₀/[TTh]₀=1:1:5 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R ₁ / Ω	R ₂ / Ω	C _{d1} /F
[rGO] ₀ /[MnO ₂] ₀ /[TTh] ₀ =1:1:5	0,9142	3509	1,19×10 ⁻⁴

[rGO]₀/[MnO₂]₀/[TTh]₀=1:1:5 nanokompozitin R(CR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,9142 Ω, R₂ = 3509 Ω, çift tabakalı kapasitans değeri, C_{d1} = 1,19×10⁻⁴ F elde edilmektedir.



Şekil 4.39. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]₀/[MnO₂]₀/[TTh]₀=1:1:5 nanokompozitin LR(QR) devre analizi.

Çizelge 4.48. [rGO]₀/[MnO₂]₀/[TTh]₀=1:1:5 nanokompozitin LR(QR) devre ölçümünün sonuçları.

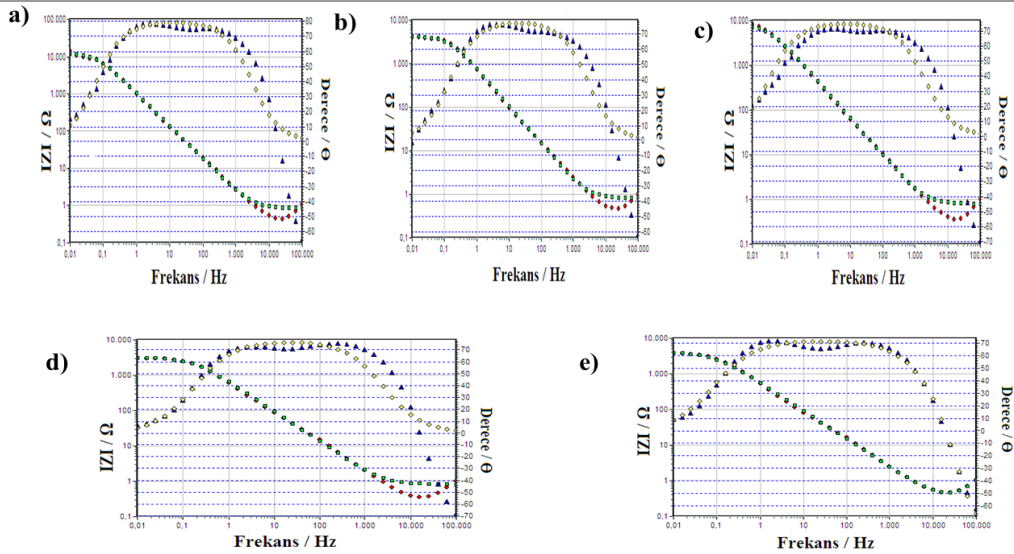
Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ / Ω	CPE, Y ₀ [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	R ₂ /Ω
[rGO] ₀ /[MnO ₂] ₀ /[TTh] ₀ =1:1:5	1,57×10 ⁻⁶	0,3978	3,9×10 ⁻⁴	0.8044	4230

[rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:5 nanokompozitin LR(QR) devresinde elde edilen sonuçlarına göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,3978 Ω, R₂ = 4230Ω, indüktans değeri, L= 1,57×10⁻⁶ elde edilmektedir.

Bütün devre modellerindeki parametrelerde en yüksek değerler şöyledir; çift tabakalı kapasitans değeri, C_{d1} = 1,19×10⁻⁴ F olarak R(QR) devresinde elde edilmiş ve n = 0,820 değeri R(QR) devrede elde edilmiştir. n değeri homojenlik hakkında bilgiler verir. Yük transfer dirençleri ise (R₁, R₂), R₁ = 0,9142 Ω RQ devresinde ve R₂ = 4230 Ω değeri de LR(QR) devresinde görülmektedir. Verilen bu değerleri **Çizelge 4.49**'da gösterilmiştir. [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:5 nanokompozitinin dört farklı devre analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek indüktans değeri, L = 1,57×10⁻⁶ R(QR) devresinde gösterilmektedir.

Çizelge 4.49. [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:5 nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri.

Devre Elemanları	L/Henri	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	CPE, Y _o [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C _{d1} /F
[rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =1:1:5	-----	0,8158	4210	4,081×10 ⁻⁴	0,820	-----
	-----	0,8229	-----	5,242×10 ⁻⁴	0,7768	-----
	-----	0,9142	3509	-----	-----	1,19×10 ⁻⁴
	1,57×10 ⁻⁶	0,3978	4230	3,9×10 ⁻⁴	0,8044	-----

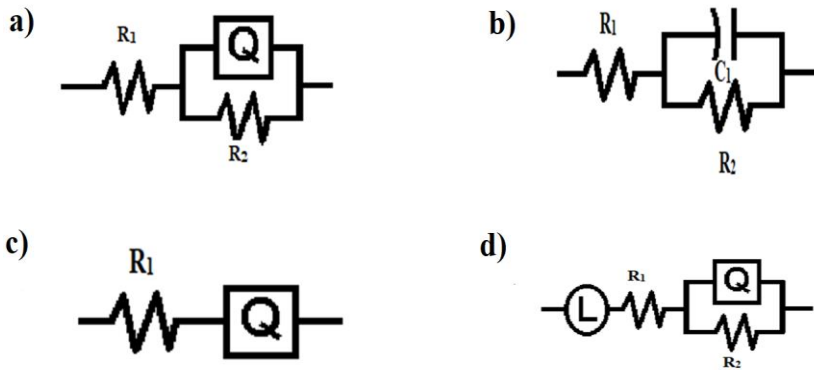


Şekil 4.40. R(QR) eşdeğer devre modelinin, a) rGO/MnO₂, b) [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o= 1/1/1, c)[rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o= 1/1/2, d)[rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1/1/3, e) [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o= 1/1/5 oranlarındaki nanokompozitlerdeki analizi.

Çizelge 4.50. R(QR) eşdeğer devre modelinin rGO/MnO₂ ve [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o= 1/1/1, 1/1/3, 1/1/5 oranlarındaki nanokompozitlerdeki analizi.

Parametre	rGO/MnO ₂	[rGO] _o /[MnO ₂] _o /[TTh] _o =			
		1/1/1	1/1/2	1/1/3	1/1/5
R₁ /Ω	0,8531	0,8125	0,7944	0,7978	0,8158
CPE, Y_o [S.Secⁿ]	1,829×10 ⁻⁴	2,528×10 ⁻⁴	4,656×10 ⁻⁴	2,904×10 ⁻⁴	4,081×10 ⁻⁴
n, [0<n<1]	0,8869	0,8705	0,8393	0,8642	0,8202
R₂ /Ω	1,27×10 ⁻⁴	437,7	8329	3212	4209

4.2.7. rGO, rGO/MnO₂ ve rGO/MnO₂/PTTh Nanokompozitin Devre Modelleri

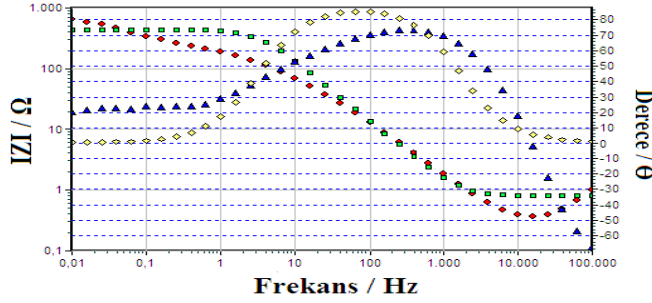


Şekil 4.41. rGO, rGO/MnO₂, [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1:1:1, 1:1:2, 1:1:3, 1:1:5 nanokompozitin devre modellerinin isimleri **a)** R(QR), **b)** R(CR), **c)** RQ, **d)** LR(QR) devre modellerinin şekilleri.

rGO/MnO₂ ve [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o= 1/1/1, 1/1/2, 1/1/3 ve 1/1/5 oranlarındaki nanokompozitleri için eşdeğer devre çalışmaları nanokompozitlerin EES verileri kullanılarak ZSimpWin programında gerçekleştirilmiştir. rGO/MnO₂ ve [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o=1/1/1, 1/1/2, 1/1/3 ve 1/1/5 oranlarındaki nanokompozitleri için en uygun devrenin R₁(QR₂) devresi olduğuna doğruluk parametrelerine ($\chi^2 < 10^{-2}$ ila 10^{-3} ve hatanın $< \%15$) bakılarak karar verilmiştir. Eşdeğer devre modeli uygulamasından sonra elde edilen eğriler **Şekil 4.41**'de ve elde edilen sonuçlar ise **Çizelge 4.50**'de gösterilmiştir. Devre parametrelerinde R₁ çözelti direnci (Devillers, Jemei, Pera, Beiname ve Gustin, 2014). Ayrıca Q sabit faz elemanıdır (Singh, Supriya, Rakib, Chavhan ve Ganguly, 2016). Sabit faz elemanının bir parametresi olan n ise elektrotun yüzey pürüzlülüğü hakkında bilgi verir ve n değeri 0<n<1 arasında bir

değer alır. Sıfıra yakın olması resistör, 1 veya 1'e yakın olması ise ideal bir kapasitör davranışına sahip bir malzeme olduğunu gösterir. R_2 elemanı malzemenin direncini temsil eder (Ates vd. 2019).

4.2.8. rGO/ TiO₂ Nanokompozitin Devre Analizleri



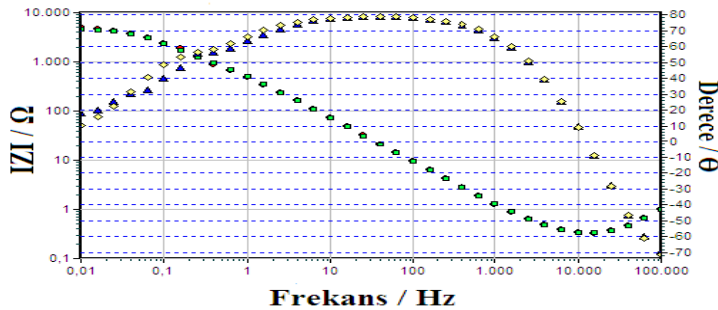
Şekil 4.42. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]_o/[TiO₂]_o =1:1 nanokompozitin R(CR) devre analizi.

Çizelge 4.51. [rGO]_o/[TiO₂]_o =1:1, nanokompozitin devre analizi. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiği nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R_1/Ω	R_2/Ω	C_{dl}/F
[rGO] _o /[TiO ₂] _o =1:1	0,805	444,2	$1,156 \times 10^{-4}$

Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre [rGO]_o/[TiO₂]_o =1:1 oranlarında nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçlarında elde edilen parametrelere göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; $R_1 = 0,805 \Omega$, $R_2 = 444,2 \Omega$, çift tabakalı kapasitans değeri, $C_{dl} = 1,156 \times 10^{-4} F$ elde edilmektedir.

4.2.9. rGO/TiO₂/PEDOT Nanokompozitin Devre Analizleri

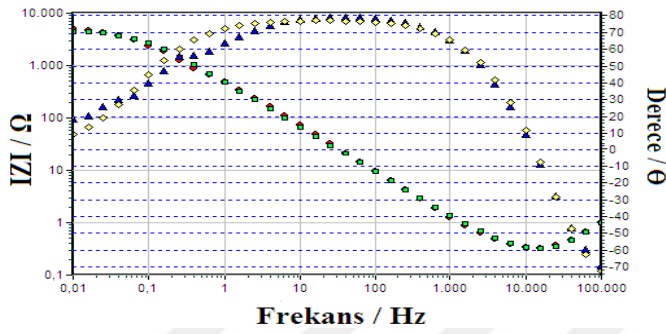


Şekil 4.43. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o =1:1:1 nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre analizi.

Çizelge 4.52. [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	R ₃ /Ω	CPE/ Yo [S,sec ⁿ]	n, [0<n>1]	L/Henri	C _{dl} /F
[rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1	0,3112	1966	2922	3,356×10 ⁻⁴	0,8937	1,514×10 ⁻⁶	5×10 ⁻⁴

[rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin grafiği nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre ölçümünün sonuçlarında elde edilen parametrelere göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,3112Ω, R₂ = 1966Ω, R₃ = 3,356×10⁻⁴ Ω elde edilmektedir. Çift tabakalı kapasitans değeri, C_{dl}=5×10⁻⁴ F ve indüktans değeri olarak, L=1,514×10⁻⁶ elde edilmektedir.

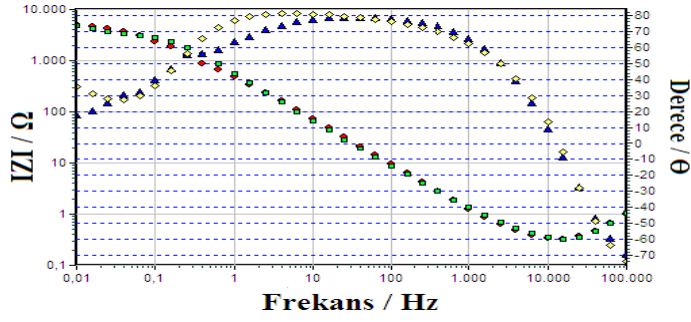


Şekil 4.44. Bode-magnitude ve Bode-faz grafiklerinin sonuçlarına göre; [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin LR₁(QR₂) devre analizi.

Çizelge 4.53. [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o= 1:1:1 nanokompozitin LR₁(QR₂) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	CPE/ Yo [S,sec ⁿ]	n, [0 <n> 1]	L/Henri
[rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1	0,2988	4778	4,56×10 ⁻⁴	0,866	1,558×10 ⁻⁸

[rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin grafiği nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre ölçümünün sonuçlarında elde edilen parametrelere göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,2988 Ω, R₂ = 4778 Ω, n = 0,866 ve indüktans değeri olarak, L=1,558×10⁻⁸ elde edilmektedir.

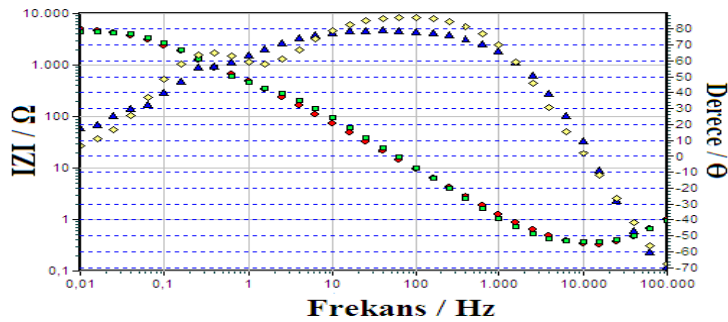


Şekil 4.45. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin LR₁Q(CR₂) devre analizi.

Çizelge 4.54. [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin LR₁Q(CR₂) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	CPE/ Y ₀ [S,sec ⁿ]	n, [0<n>1]	L/Henri	C _{d1} /F
[rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1	0,2717	2688	2,404×10 ⁻³	0,7162	1,615×10 ⁻⁶	3,362×10 ⁻⁴

[rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitinin grafiği nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre ölçümünün sonuçlarında elde edilen parametrelere göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,2717 Ω, R₂ = 2688 Ω, n = 0,7162 değeri LR₁(QR₂) devresindeki değere göre azaldığı tespit edilmiştir. Çift tabakalı kapasitans değeri, C_{d1} = 3,362×10⁻⁴ F ve indüktans değeri olarak, L = 1,615×10⁻⁶ elde edilmektedir.

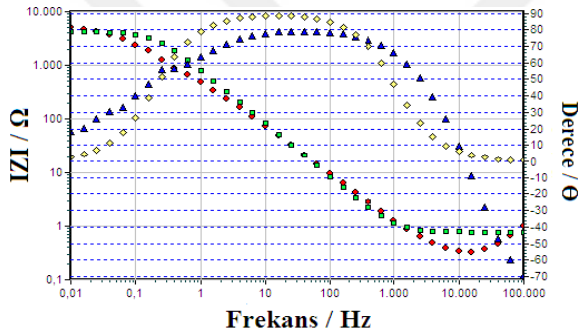


Şekil 4.46. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin LR(C(R(CR))) devre analizi.

Çizelge 4.55. [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin LR(C(R(CR))) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	R ₃ /Ω	L/Henri	C _{dl} /F	C/F
[rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1	0,364	511,1	3973	1,399×10 ⁻⁶	3,556×10 ⁻⁴	1,597×10 ⁻⁴

[rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin grafiği nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre ölçümünün sonuçlarında elde edilen parametrelere göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,364 Ω değeri LR₁Q(CR₂) devresinde değere göre arttığı görülmektedir. Diğer iç direnç parametresi olan R₂ = 511,1 Ω, R₃ = 3973 Ω değerleri olarak bulunmuştur. Çift tabakalı kapasitans değerleri ise, C_{dl}= 3,556×10⁻⁴ F, C = 1,597×10⁻⁴ F ve indüktas değeri olarak, L = 1,399×10⁻⁶ elde edilmektedir.



Şekil 4.47. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin R(CR) devre analizi.

Çizelge 4.56. [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	C _{dl} /F
[rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:1:1	0,7696	4198	1,911x10 ⁻⁴

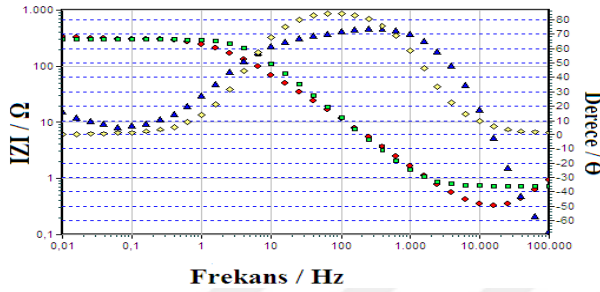
[rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:1:1 nanokompozitin grafiği nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçlarında elde edilen parametrelere göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,7696 Ω ve R₂ = 4198 Ω değerleri olarak bulunmuştur. Çift tabakalı kapasitans değerleri ise, C_{dl}= 1,911×10⁻⁴ F elde edilmektedir.

Bütün devre modellerinde en yüksek değerler şöyledir; çift tabakalı kapasitans değeri, C_{dl} = 3,556F ve C = 1,597×10⁻⁴ F LR(C(R(CR))) devresinde elde edilmiş ve n = 0,8937 değeri LR(Q(R(CR))) devresinde elde edilmiştir. n değeri homojenlik hakkında bilgiler verir. Yük transfer dirençleri ise (R₁, R₂), R₁ = 0,7696 Ω R(CR) devresinde ve R₂ = 4778 Ω değeri LR₁(QR₂), R₃ = 3973 Ω, LR(C(R(CR))) devresinde görülmektedir. Verilen bu değerleri

Çizelge 4.57'de gösterilmiştir. $[rGO]_o/[TiO_2]_o/[EDOT]_o=1:1:1$ nanokompozitinin beş farklı devre analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek indüktans değeri, $L = 1,615 \times 10^{-6}$, $LR_1Q(CR_2)$ devresinde gösterilmektedir.

Çizelge 4.57. $[rGO]_o/[TiO_2]_o/[EDOT]_o=1:1:1$ nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerleri

Devre Elemanlar	L/Henri	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	R ₃ /Ω	CPE, Y ₀ [S.Sec ⁿ]	n, [0<n<1]	C _{d1} /F	C/F
[rGO] _o / [TiO ₂] _o / [EDOT] _o =1:1:1	1,514×10 ⁻⁶	0,3112	1966	2922	3,35×10 ⁻⁴	0,8937	5×10 ⁻⁴	-----
	1,558×10 ⁻⁸	0,2988	4778	-----	4,56×10 ⁻⁴	0,866	-----	-----
	1,615×10 ⁻⁶	0,2717	2688	-----	-----	0,7162	3,362×10 ⁻⁴	-----
	1,399×10 ⁻⁶	0,364	511,1	3973	-----	-----	3,556×10 ⁻⁴	1,59×10 ⁻⁴
	-----	0,7696	4198	-----	-----	-----	1,911×10 ⁻⁴	-----

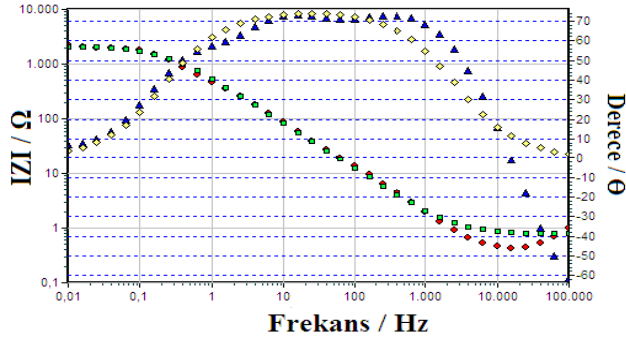


Şekil 4.48. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_o/[TiO_2]_o/[EDOT]_o=1:2:1$ nanokompozitin R(CR) devre analizi.

Çizelge 4.58. $[rGO]_o/[TiO_2]_o/[EDOT]_o=1:2:1$ nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	C _{d1} /F
[rGO] _o / [TiO ₂] _o / [EDOT] _o =1:2:1	0,732	301	1,308×10 ⁻⁴

$[rGO]_o/[TiO_2]_o/[EDOT]_o=1:2:1$ nanokompozitinin grafiği nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre ölçümünün sonuçlarında elde edilen parametrelere göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; $R_1 = 0,732\Omega$, $R_2 = 301\Omega$ ve çift tabakalı kapasitans değeri, $C_{d1} = 3,556 \times 10^{-4} F$ elde edilmektedir.

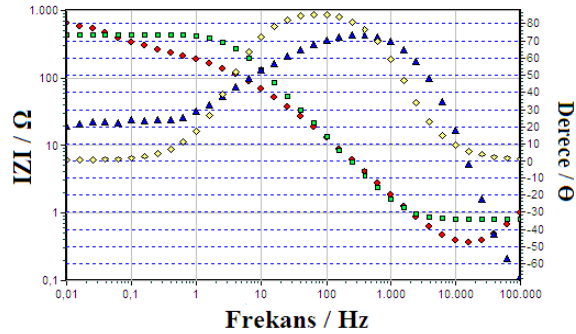


Şekil 4.49. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_0/[TiO_2]_0/[EDOT]_0=1:5:1$ nanokompozitin R(QR) devre analizi.

Çizelge 4.59. $[rGO]_0/[TiO_2]_0/[EDOT]_0=1:5:1$ nanokompozitin R(QR) devre ölçümünün sonuçları.

Devre Elemanları	R_1/Ω	R_2/Ω	CPE/ $Y_0 [S,sec^n]$
$[rGO]_0/[TiO_2]_0/[EDOT]_0=1:5:1$	0,7689	2148	0,8445

$[rGO]_0/[TiO_2]_0/[EDOT]_0=1:5:1$ nanokompozitinin grafiği nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre ölçümünün sonuçlarında elde edilen parametrelere göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; $R_1 = 0,7689 \Omega$, $R_2 = 2148 \Omega$ ve sabit faz değeri, $Q = 0,8445$ değeri elde edilmektedir.



Şekil 4.50. Bode-magnitude ve Bode-faz grafik sonuçlarına göre; $[rGO]_0/[TiO_2]_0/[EDOT]_0=1:5:1$ nanokompozitin R(CR) devre analizi.

Çizelge 4.60. $[rGO]_0/[TiO_2]_0/[EDOT]_0=1:5:1$ nanokompozitin R(CR) devre ölçümünün sonuçları

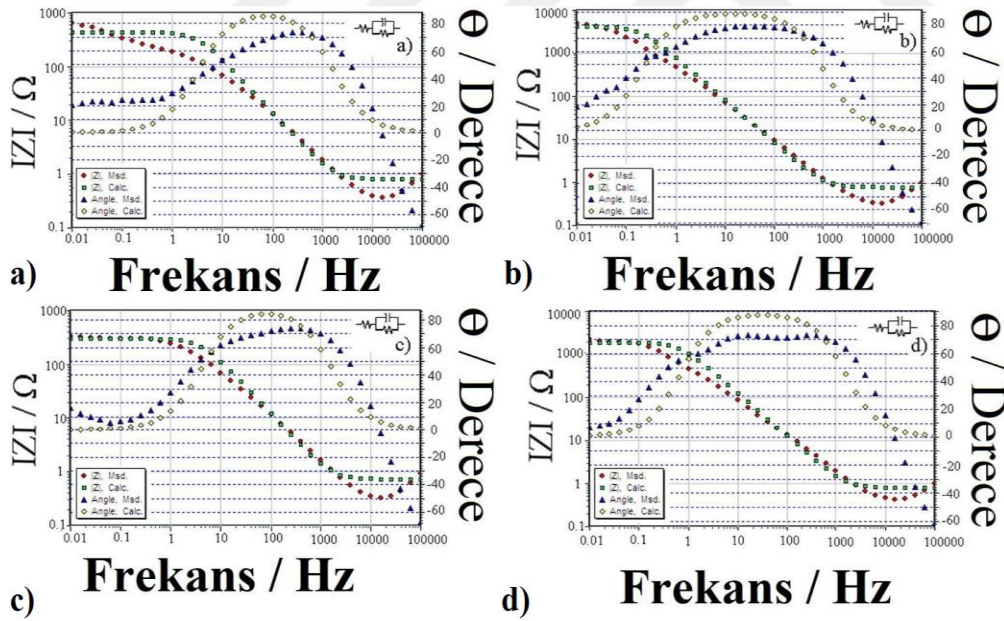
Devre Elemanları	R_1/Ω	R_2/Ω	C_{dl}/F
$[rGO]_0/[TiO_2]_0/[EDOT]_0=1:5:1$	0,797	1923	$1,242 \times 10^{-4}$

[rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1:5:1 nanokompozitinin grafiği nanokompozitin LR(Q(R(CR))) devre ölçümünün sonuçlarında elde edilen parametrelere göre malzemenin direncini gösteren parametrelerinin değerleri; R₁ = 0,797 Ω, R₂ = 1923 Ω ve çift tabakalı kapasitans değeri, C_{d1} = 1,242×10⁻⁴ F değeri elde edilmektedir.

Bütün devre modellerinde [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o= 1:5:1 nanokompozitinin en yüksek çift tabakalı kapasitans değeri, C_{d1} = 1,242×10⁻⁴ F olarak R(CR) devresinde elde edilmiştir. Yük transfer dirençleri ise (R₁, R₂), R₁ = 0,797 Ω R(CR) devresinde ve R₂ = 2148 Ω değerleri R₁(QR₂) devresinde görülmektedir. Verilen bu değerleri **Çizelge 4.61**'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.61. [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o= 1:5:1 nanokompozitinin farklı devrelerde uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarındaki parametrelerin değerler.

Devre Elemanları	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	CPE/ Y _o [S,sec ⁿ]	C _{d1} / F
[rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =1:5:1	0,7689	2148	0,8445	1,242x10 ⁻⁴
	0,797	1923	-----	-----

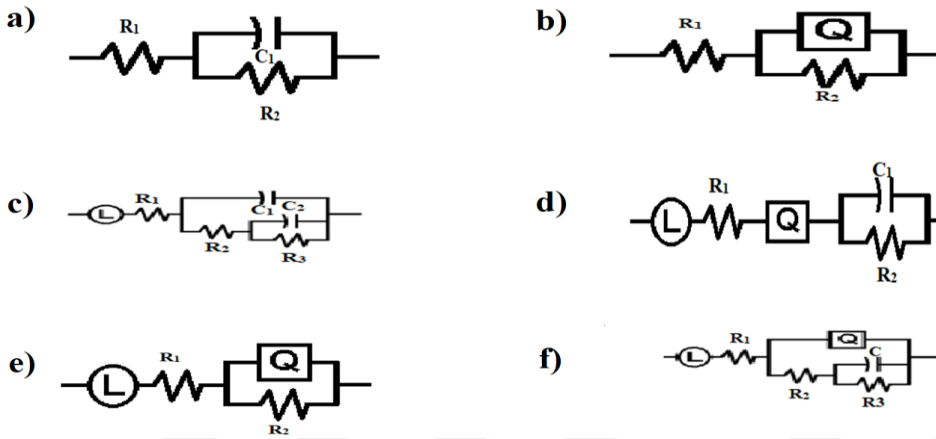


Şekil 4.51. ZSimpWin kullanılarak a) [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1/0/1, b) [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1/1/1, c)[rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1/2/1, d)[rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o=1/5/1 oranındaki rGO/TiO₂/PEDOT nanokompozitlerinden elde edilen eşdeğer R(CR) devre modelleri.

Çizelge 4.62. rGO/TiO₂/PEDOT nanokompozitlerinin R(CR) devre ölçümünden elde edilen sonuçları.

Parametreler	rGO/PEDOT	[rGO] _o /[TiO ₂] _o /[EDOT] _o =		
		1/1/1	1/2/1	1/5/1
R ₁ / Ω	0,805	0,769	0,732	0,797
C _{dl} / F	1,156x10 ⁻⁴	1,911x10 ⁻⁴	1,308x10 ⁻⁴	1,242x10 ⁻⁴
R ₂ /Ω	444,2	4198	301	1923

4.2.10. rGO/TiO₂ ve rGO/TiO₂/PEDOT Nanokompozitin Devre Modelleri



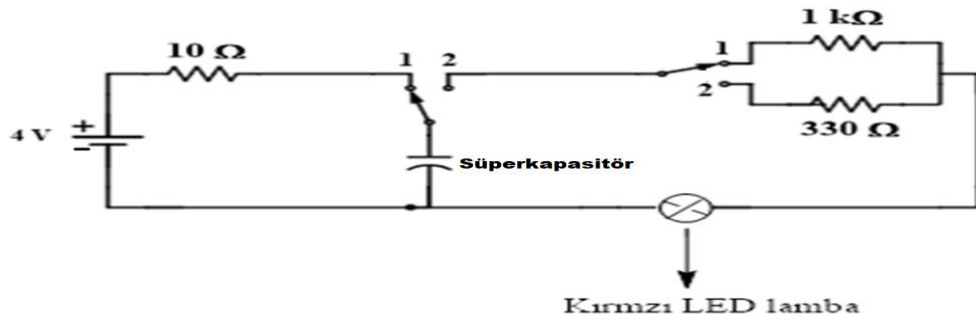
Şekil 4.52. rGO/TiO₂ ve [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o = 1/1/1, 1/2/1, 1/5/1 **a)** R(CR), **b)** R(QR), **c)** LR₁(C₁(R₂(C₂R₃))), **d)** LR₁Q(CR₂), **e)** LR₁(QR₂), **f)** LR(Q(R(CR))) devre modellerinin şekilleri.

Eşdeğer devre modelleri ZSimpWin programı kullanılarak rGO/PEDOT ve rGO/TiO₂/PEDOT nanokompozitlerinin [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o = 1/1/1, 1/2/1 ve 1/5/1 oranlarındaki EES verilerinden yararlanılarak elde edilmiştir. rGO/PEDOT ve rGO/TiO₂/PEDOT nanokompozitlerinin [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o = 1/1/1, 1/2/1 ve 1/5/1 oranlarındaki en iyi uyan devrenin R(CR) devresi olduğu bulunmuştur. Devre seçimindeki doğruluk ($\chi^2 < 10^{-2}$ ile 10^{-3} ve hatanın $< \%15$) parametrelerle belirlenmiştir. Nanokompozitlere uygulanan eşdeğer devre sonucunda elde edilen grafikler **Şekil 4.52**'de verilmiştir. Eşdeğer devrede bulunan 3 parametreden birincisi olan R₁ çözelti direncini temsil eder (Hidalgo-Reyes, Gomez-Aquilar, Escobar-Jiemenez, Alvarodo-Martinez ve Lopez-Lopez, 2019). C_{dl} ise çift katmanlı kapasitansı temsil ederken (Saha, Dey ve Khanra, 2019), R₂ ise yük transfer direncini yani elektrot ve elektrolitteki elektron değişimini temsil eder (Klem, Morais, Rubira ve Alves, 2019).

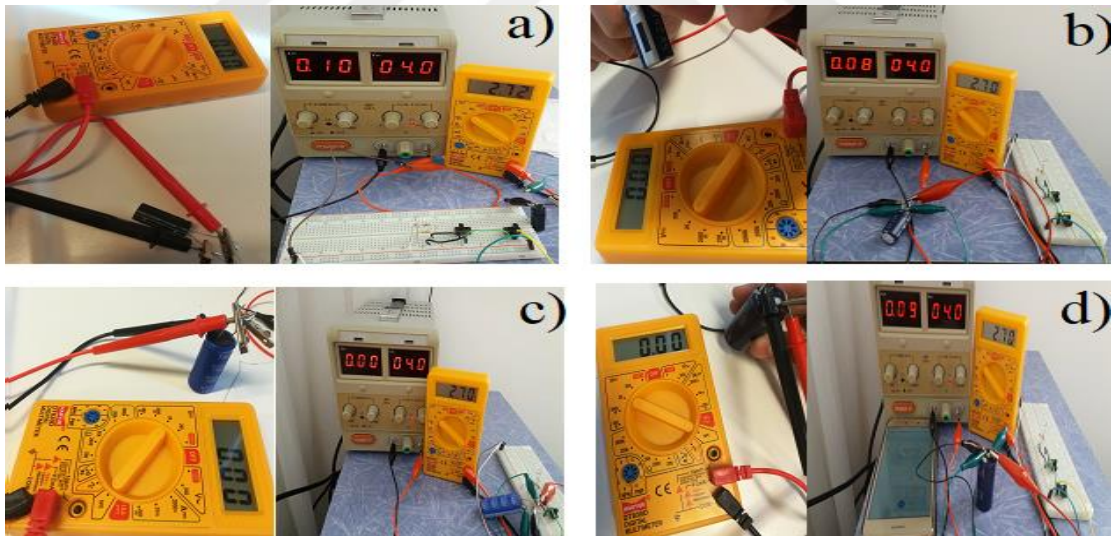
4.3. Ticari Süperkapasitörlerin Performans Sonuçları

4.3.1. Şarj İşlemi Sonuçları

Hem ticari ve hem de bu tez kapsamında incelenen süperkapasitörlerin şarj-deşarj işlemleri için **Şekil 4.53.**'deki elektrik bağlantı şeması kullanılmıştır. **Şekil 4.54**'de ticari süperkapasitörlerin şarj işlemi için gerçekleştirilen deney görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.53. Süperkapasitör şarj-deşarj işlemleri için gerçekleştirilen elektrik bağlantı şeması



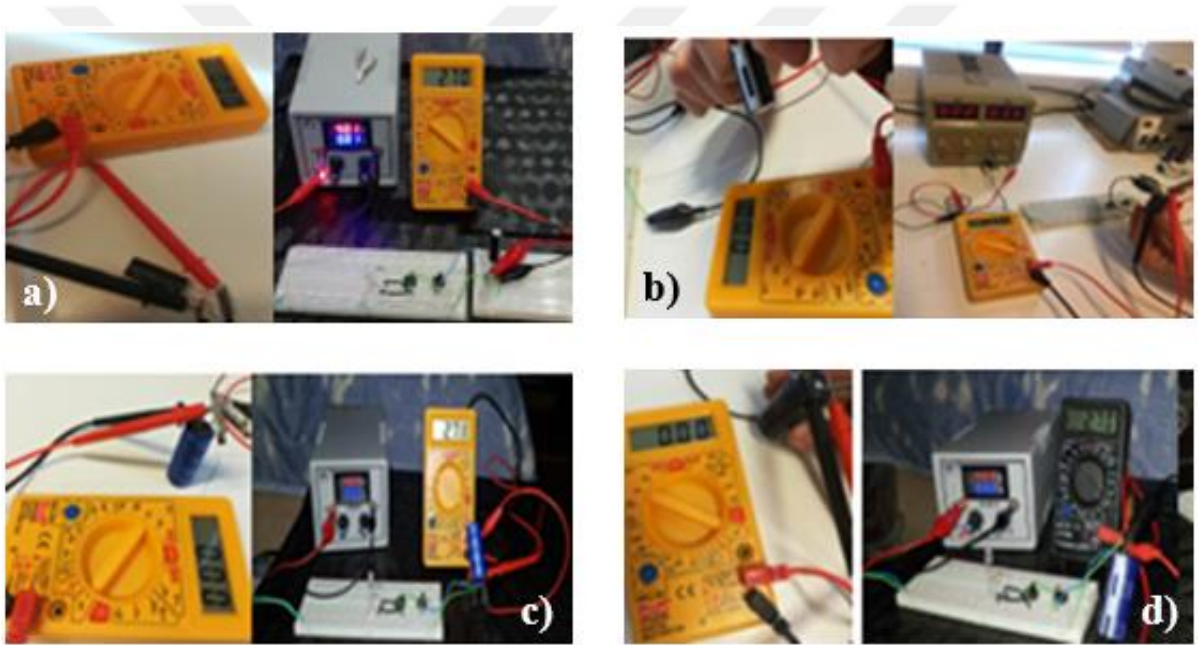
Şekil 4.54. Kurulan gerçek devrede a) 10 F, b) 25 F, c) 50 F, d) 100 F'lık ticari süperkapasitörlerin dirençsiz olarak şarj işlemi.

Kurulan gerçek devreden yararlanılarak ticari süperkapasitörlerin şarj edilebilmesi için güç kaynağından faydalanılmıştır. Devre üzerindeki 1. anahtara güç kaynağından 4V'luk enerji gönderilip, anahtar 1 konumuna dirençsiz olarak ticari süperkapasitörün şarj işlemi, **Şekil 4.54**'te gösterilmiştir. Bu işlem her bir ticari süperkapasitör için ayrı ayrı uygulanıp, farklı markalara ve kapasitansa sahip ticari süperkapasitörlerin ne kadar sürede şarj olduğu

Çizelge 4.63'te gözlemlenmiştir. 10 F'lık ticari süperkapasitörün markası Diymore, 25 F'lık süperkapasitörün markası Maxwell, 50 F'lık süperkapasitörün markası Cooper Bussmann, 100 F'lık süperkapasitörün markası Kamcap'tır. Diymore marka 10 F'lık ticari süperkapasitör, kurulan dirençsiz devrede kısa zamanda şarj olmuştur.

Çizelge 4.63. Ticari süperkapasitörlerin dirençsiz olarak şarj işlemlerinin sonuçları

Ticari Süperkapasitörlerin Kapasitans Değerleri	Şarj Süresi (dk- s)	Ticari Süperkapasitörlerin Voltaj Miktarı (V)
10F	1 dk-43s	2,7
25 F	4 dk -15 s	2,7
50 F	10 dk -39 s	2,7
100 F	33 dk- 49 s	2,7



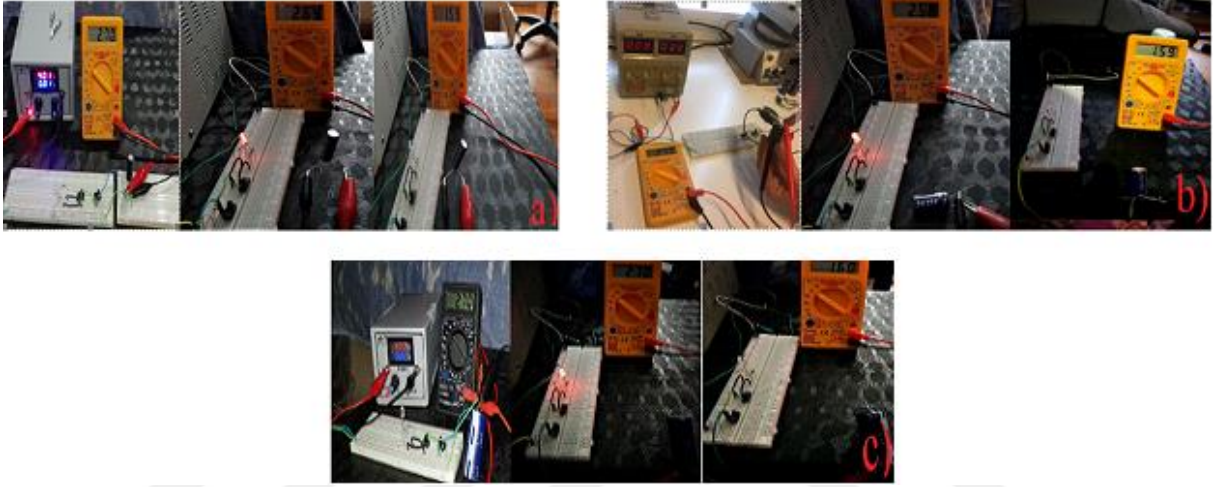
Şekil 4.55. Kurulan gerçek devrede a) 10 F, b) 25 F, c) 50 F, d) 100 F'lık ticari süperkapasitörlerin 10 Ω direncin üzerinde geçirilerek şarj işlemi.

Öncelikle aynı devre üzerindeki 1. anahtara güç kaynağından 4V'luk enerji gönderilmiştir. Ardından anahtar 1 konumuna getirilip 10 Ω'luk dirençten geçirilerek ticari şarj işlemi gerçekleştirilen süperkapasitörler **Şekil 4.55**'de gösterilmiştir. Gerçek devrenin üzerinde 10 Ω direncin olmasından dolayı, dirençsiz olarak ticari süperkapasitörün şarj işlemine göre daha uzun sürede gerçekleşmiştir. Kamcap markasına ait 100 F 'lık ticari süperkapasitörün, kurulan dirençli devrede uzun sürede şarj olduğu **Çizelge 4.64**'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.64. Ticari süperkapasitörlerin 10 Ω 'luk direnç kullanarak şarj işlemlerinin sonuçları

Ticari Süperkapasitörlerin Kapasitans Değerleri	Şarj Süresi (dk- s)	Ticari Süperkapasitörlerin Voltaj Miktarı (V)
10F	17 dk-38 s	2,7
25 F	26 dk- 04 s	2,7
50 F	60 dk -04 s	2,7
100 F	85 dk- 42 s	2,7

4.3.2. Deşarj İşlemi Sonuçları



Şekil 4.56. Kurulan gerçek devrede a) 10 F, b) 25 F, c) 50 F'lık ticari süperkapasitörleri 330 Ω direncin üzerinden akım geçirilerek yapılan deşarj işlemi.

Ticari süperkapasitörün şarj işlemi gerçekleştirildikten sonra 1. anahtar 2 konumuna getirilerek sadece süperkapasitörün sahip olduğu enerjiden faydalanılmış ve iki farklı dirençten enerji geçirilerek LED kırmızı lambanın yanmasıyla ticari süperkapasitörün deşarj işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu deşarj işlemi sırasında 2. anahtar 2 konumuna getirilmiş ve 330 Ω 'luk düşük dirençten akım geçirilmiştir (**Şekil 4.56**). Gerçek devrede lambanın parlak ışık şiddetinde ve kısa sürede deşarj işlemi, ticari süperkapasitörlerden 330 Ω direnç üzerinden akım geçirilmesiyle gerçekleşmektedir. Birbirinden farklı markalara ve kapasitansa sahip ticari süperkapasitörler için ayrı ayrı LED kırmızı lambayı yakma süreleri belirlenmiş ve **Çizelge 4.65**'de gösterilmiştir. Diymore markasına ait 10 F'lık ticari süperkapasitörün LED kırmızı lambayı kısa sürede yaktığı görülmüştür.

Çizelge 4.65. Ticari süperkapasitörlerin 330 Ω 'luk dirençli olarak lambanın yanma süreleri sonuçları

Ticari Süperkapasitörlerin Kapasitans Değerleri	Lambanın Yanma Süresi / s-dk
10F	3 s- 22 dk
25 F	2 s- 37 dk
50 F	32 s-10 dk



Şekil 4.57. Kurulan gerçek devrede a) 10 F, b) 25 F, c) 50 F'lık ticari süperkapasitörleri 1k Ω direncin üzerinden akım geçirilerek yapılan deşarj işlemi.

2. anahtar 1 konuma getirilip 1 k Ω 'luk dirençten akım geçirildiğinde, LED kırmızı lambanın daha düşük parlaklıkta yanmakta olduğu **Şekil 4.57**'de gösterilmiştir. LED lambanın uzun sürede yandığı ise **Çizelge 4.66**'da gösterilmiştir. Cooper Bussmann markasına ait 50 F 'lık ticari süperkapasitörün LED kırmızı lambayı daha uzun sürede yaktığı görülmüştür.

Çizelge 4.66. Ticari süperkapasitörlerin 1 k Ω 'luk dirençli olarak lambanın yanma süreleri

Ticari Süperkapasitörlerin Kapasitans Değerleri	Lambanın Yanma Süresi / s-dk
10 F	5 s – 52 dk
25 F	4 s- 48 dk
50 F	6 s

4.3.3. Tezde Kullanılan Süperkapasitörlerin Şarj- Deşarj İşlemi Sonuçları

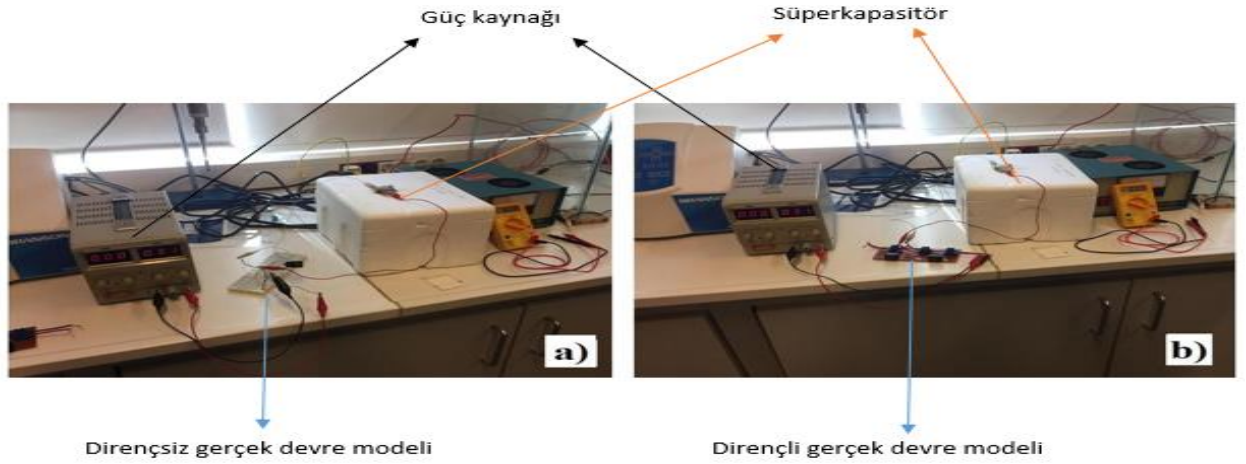
Kurulan devrede (Şekil 4.53) ilk olarak nanokompozit yapıya sahip süperkapasitörlerin şarj işlemi yapılmıştır. Devrede bulunan 1. anahtar 1 konumuna getirilerek güç kaynağından enerji, süperkapasitörlere aktarılmıştır. Böylece $rGO/MnO_2/PTTh=3,12$ V, $rGO/RuO_2/PVK=3,18$ V ve $rGO/TiO_2/PEDOT=3,12$ V'a kadar süperkapasitörlerin şarj işlemi yapılmıştır. Bu tez kapsamında kullanılan üç farklı elektroaktif malzeme ile sentezlenen süperkapasitörlerin, 1,7 V'luk LED kırmızı lambayı yakma süreleri Çizelge 4.67'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, en uzun süre yanan LED lamba, (15 saniye) $rGO/MnO_2/PTTh$ malzemesinden üretilen süperkapasitörden elde edilmiştir. Nanokompozit yapıya sahip süperkapasitörler ile ticari süperkapasitörler kıyaslandığında ise LED lambayı ticari süperkapasitörlerin daha uzun süre yakabildiği gözlenmiştir.

Çizelge 4.67. Tezde kullanılan nanokompozitlerin LED kırmızı lambanın yanma süreleri

Kullanılan Nanokompozitler	Lambanın Yanma Süresi/ s
$rGO/MnO_2/PTTh$	15
$rGO/RuO_2/PVK$	6
$rGO/TiO_2/PEDOT$	10

4.4. $rGO/TiO_2/PEDOT$, $rGO/RuO_2/PVK$ ve $rGO/MnO_2/PTTh$ Nanokompozitlerinin Gerçek Devre Uygulamaları

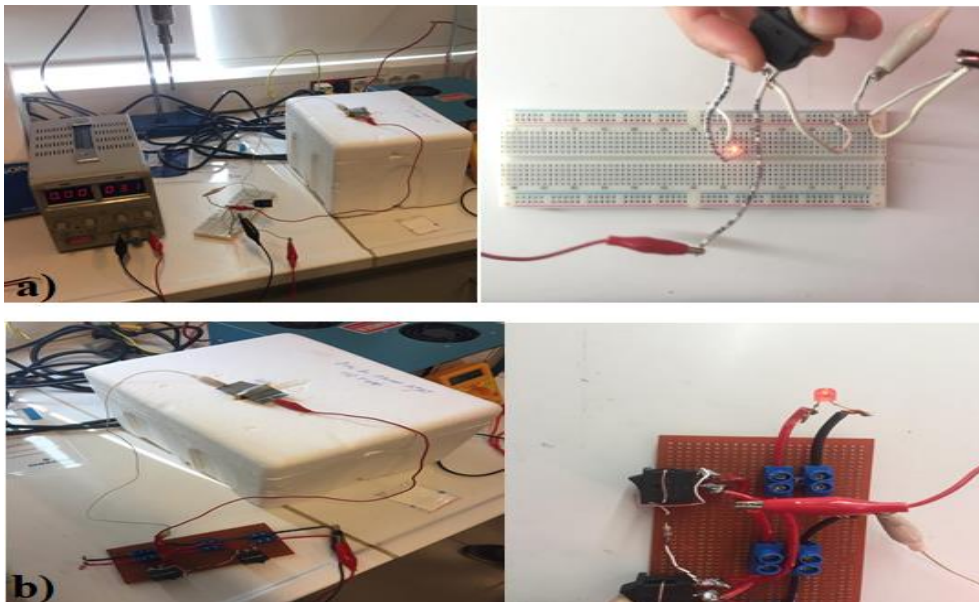
Bu tez kapsamında kullanılan $rGO/MnO_2/PTTh$, $rGO/RuO_2/PVK$ ve $rGO/TiO_2/PEDOT$ nanokompozit malzemelerden elde edilen süperkapasitörlerin gerçek devreden yararlanılarak şarj işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk önce güç kaynağı 3,1 V'a ayarlanmıştır. Güç kaynağından çıkan enerji dirençsiz ve dirençli gerçek devrelerden geçirilerek süperkapasitörlerin şarj işlemi gerçekleştirilmiş ve bu işlem her bir süperkapasitör için ayrı ayrı uygulanmıştır. Şekil 4.58'de süperkapasitörün dirençsiz ve dirençli gerçek devre ile şarj işlemleri gösterilmiştir.



Şekil 4.58. Gerçek devre uygulamaları için kurulmuş a) dirençsiz, b) 20 Ω 'luk düşük dirençli devre modeli.

Nanokompozit yapıya sahip rGO/MnO₂/PTTh, rGO/RuO₂/PVK ve rGO/TiO₂/PEDOT süperkapasitörlerin şarj işleminden sonra deşarj işlemi yapılmıştır. Süperkapasitörlerin sahip oldukları enerji üzerinden deşarj işlemi gerçekleştirilmiş, dirençsiz ve dirençli olarak gerçek devrelerden akım geçirildiğinde LED lambanın farklı parlaklıklarda yandığı görülmüştür.

Dirençsiz gerçek devrede LED lambanın daha parlak yandığı görülürken, 20 Ω 'luk düşük dirençli gerçek devredeki LED lambanın daha sönük yandığı **Şekil 4.59'da** gösterilmiştir.



Şekil 4.59. Şarj işlemi sonunda a) dirençsiz, b) 20 Ω 'luk düşük direnç ile yanan lambalar.

117M042 nolu TÜBİTAK projemiz olan süperkapasitör devre analiz bölümü ve gerçek devre uygulamaları için Fatih Sultan Mehmet VAKIF Üniversitesi Elektronik Mühendisliği laboratuvarında proje araştırmacımız olan Doç. Dr. Haydar ÖZKAN ile beraber projemizin uygulaması yapıldı.

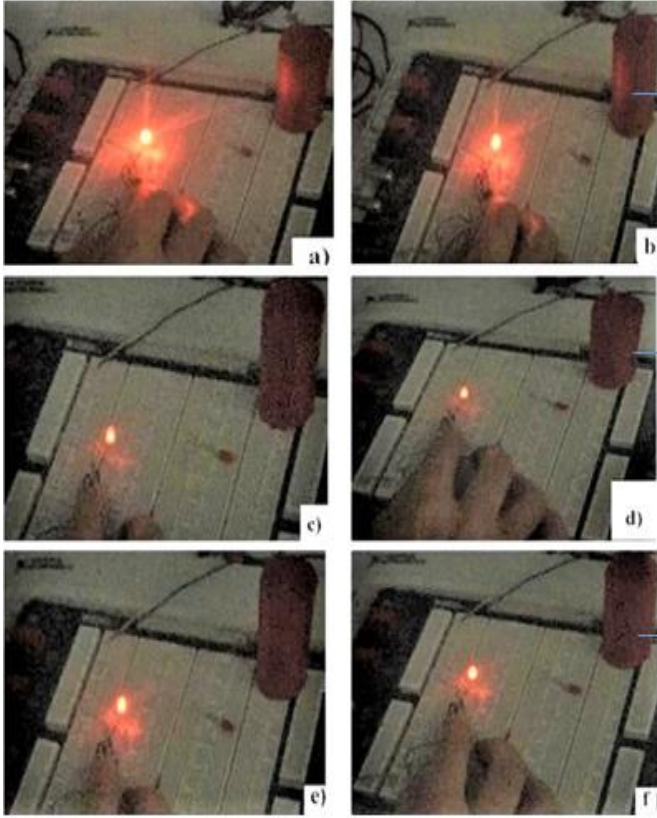
TÜBİTAK projesi kapsamında kullanılan süperkapasitörler indirgenmiş grafen oksit, Rutenyum dioksit, Titanyum dioksit, Mangan dioksit ve Politertiyofen, Polivinil karbozol, Poli(3,4-etilendioksitiyofen) karbon bazlı pseudokapasitörlerdir. Aynı zamanda EDLC içeren hibrit bir süperkapasitör tasarımı yapılmıştır. Simetrik olarak elektrotlar rGO, MnO₂ ve PTTh şeklinde dizayn edilmiştir. Kurduğumuz devrede farklı iki direnç kullanarak süperkapasitörlerin şarj ve deşarj işlemleriyle LED lambanın ne kadar parlakta yanacağı gösterilmiştir. Ayrıca 3D yazıcı yardımıyla kılıf yapılmıştır.

Kurulan devrede (**Şekil 4.53**) ilk olarak nanokompozit yapıya sahip süperkapasitörlerin şarj işlemi yapılmıştır. Devrede bulunan 1. anahtar 1 konumuna getirilerek güç kaynağından 4V'luk enerji süperkapasitörlere verilmiştir. Böylece rGO/MnO₂/PTTh=3,12 V, rGO/RuO₂/PVK=3,18 V ve rGO/TiO₂/PEDOT=3,12 V'a kadar süperkapasitörlerin şarj işlemi yapılmıştır. Burada 4V enerji verilmesinin nedeni (1-Butil-3-metilimidazolium tetrafloroborat) iyonik sıvı elektrolitinin kullanılmasıdır. İyonik sıvının çalışma aralığı suyun bozunmasından daha geniş bir potansiyel pencereye sahiptir. Bu nedenle 3,5-4V'a kadar çıkılabilmektedir. Bu nedenle LED lamba daha uzun sürede yanabilirken, devre sistemlerinde daha uzun deşarj süresi sağladığı görülmüştür.

Şarj işleminden sonra sentezlenmiş olan rGO/MnO₂/PTTh, rGO/RuO₂/PVK ve rGO/TiO₂/PEDOT süperkapasitörleri için deşarj işlemi gerçekleştirilmiş ve lambanın çeşitli dirençlerdeki parlaklıkları test edilmiştir (**Şekil 4.60**). Bu işlem sırasında 1. anahtar 2 konumuna ve 2.anahtar da 2 konumuna getirilerek 330Ω'luk düşük direncin üzerinden akım geçirilmiş (**Şekil 4.60 a,c,e**) ve farklı süperkapasitörlerdeki LED lambanın parlaklıkları kıyaslanmıştır. **Şekil 4.60 a**'da görüldüğü gibi en parlak şekilde yanan ve en uzun sürede deşarj olan rGO/MnO₂/PTTh süperkapasitörüdür. Son olarak (**Şekil 4.60 b,d,f**) 2.anahtar 1konumuna getirilerek 1kΩ'luk yüksek direncin üzerinden akım geçirilmiş ve LED lambanın ışık şiddetinin biraz daha azalmasından dolayı ışık, 330Ω'luk düşük dirence kıyasla daha az parlaklıkta yanmıştır. LED lambanın ışık şiddeti süperkapasitörün deşarj işlemi ile azalmaktadır.

330 Ω 'luk düşük dirençli gerçek devre (a, c, e)

1 k Ω 'luk yüksek dirençli gerçek devre (b, d, f)



Süperkapasitörlerin içinde bulunduğu 3D kılıf

Şekil 4.60. Şarj işlemi sonunda rGO/MnO₂/PTTh **a)** 330 Ω 'luk düşük dirençli, **b)** 1 k Ω 'luk yüksek dirençle yanan lamba, Şarj işlemi sonunda rGO/RuO₂/PVK, **c)** 330 Ω 'luk düşük dirençli, **d)** 1 k Ω 'luk yüksek dirençle yanan lamba, Şarj işlemi sonunda rGO/TiO₂/PEDOT, **e)** 330 Ω 'luk düşük dirençli, **f)** 1 k Ω 'luk yüksek dirençle yanan lambaların görselleri.

Yapılan literatür çalışmaları ile yaptığımız çalışmanın uyum içinde olduğu görülmektedir. Chien ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada 600 saniyede 3,8V'luk şarj edilerek 1,7V'luk kırmızı LED'i, 2V'luk yeşil LED'i ve 2,4V'luk Mavi LED lambasını yaktığı görülmüştür (Chein vd., 2015). Zhou ve arkadaşları tarafından yapılan NF/CuCo₂S₄@Ni₂(CO₃)(OH)₂ elektrotu hibrit süperkapasitörler çalışmasında çift hibrit elektrottan oluşan seri devre 3,0 V şarj edildikten sonra 3V'luk Sarı LED lambasını yaktığı görülmektedir (Zhou vd. 2019). Fukuhara ve arkadaşlarının çalışmalarında amorf titanyum – dioksit süperkapasitör 10V⁻¹ mA şarj edilerek 1,7V'luk kırmızı LED lambanın yandığı gözlemlenmiştir (Fukuhara, Kuroda ve Hasegawa, 2016).

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

En yüksek enerji yoğunluğu 2 mA sabit akımda rGO/TiO₂/PEDOT nanokompozitinin [rGO]_o/[TiO₂]_o/[EDOT]_o= 1/2/1 oranında (E= 12,20 Wh/kg) elde edilirken, en yüksek güç yoğunluğu, 50 mA sabit akımda (P= 8150 W/kg) olarak tespit edilmiştir. rGO/RuO₂/PVK nanokompoziti için [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o= 1/1/3 oranında en yüksek enerji yoğunluğu 2 mA sabit akımda (E= 17,024 Wh/kg) elde edilirken, [rGO]_o/[RuO₂]_o/[VK]_o= 1/1/1 oranında 50 mA sabit akımda en yüksek güç yoğunluğu (P= 22625 W/kg) olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, rGO/MnO₂/PTTh nanokompozitinin [rGO]_o/[MnO₂]_o/[TTh]_o= 1/1/5 oranında (E= 0,147 Wh/kg) elde edilirken, en yüksek güç yoğunluğu, 50 mA sabit akımda (P= 381.62 W/kg) olarak tespit edilmiştir. Sonuçta, en yüksek enerji ve güç yoğunluğu rGO/RuO₂/PVK nanokompoziti için (E= 17,024 Wh/kg ve P= 22625 W/kg) olarak hesaplanmıştır

rGO/MnO₂/PTTh, rGO/RuO₂/PVK ve rGO/TiO₂/PEDOT süperkapasitörlerimizde tek tek uyguladığımız zamanda rGO/MnO₂/PTTh 'in daha fazla parlakta ve daha uzun sürede yandığı gözlenmiştir. Süperkapasitör cihaz tasarımı ve gerçek devre uygulamalarına yönelik TÜBİTAK 1001 projemiz 1,7 V'luk kırmızı LED lambayı rGO/MnO₂/PTTh nanokompozitine ait süperkapasitörde en parlak ve en uzun sürede yanan süperkapasitörde iyonik sıvı (1-Butil-3-metilimidazolium tetrafloroborat) kullanıldı. 1 M'lık H₂SO₄ çözeltisi ile anlık LED yanmalar gözlemlenmiştir. Öneri olarak daha sonraki çalışmalarda iyonik sıvı sentezi gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Organik yapıya sahip daha ekonomik ve çeşitli cihazlarda bu tarz süperkapasitörlerin uygulaması yapılabilecektir. Bir diğer önerimiz, tek halde ürettiğimiz süperkapasitörleri 5'li veya 10'lu seri veya paralel bağlama ile paket haline getirilip ticari ürün olabilecek şekilde daha yüksek elektrokimyasal performans üretimi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- Aashish, A., Ramakrishnan, R., Sudha, J. D. (2016). Self-assembled hybrid polyvinyl/carbazole – titania nanotubes as an efficient photoanode for solar energy harvesting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 151, 169-178.
- Abouelamaiem, D. İ., He, G., Neville, T. P., Patel, D. Ji. S., Wang, R., Parkin, I. P., Jarge, A.B., Titirici, M. M., Shearing, P. R. , Brett, D. J. L. (2018). Correlating electrochemical impedance with hierarchical structure for porous carbon- based supercapacitors using a truncated transmission line model. *Electrochimica Acta*, 284,597-608.
- Aashish, A., Ramakrishnan, R., Sudha, J. D., Sankaran, M., Krishnapriya, G. (2016).Self-assembled hybrid polyvinylcarbazole-titania nanotubes as an efficient photoanode for solar energy harvesting. *Solar Energy Materials Solar Cells*, 151, 169–178.
- Aleshin, A. N., Sokolovskaya, A. D., Shcherbakov, I. P., Brunkov, P. N., Ulin, V. P. (2013). Organic light-emitting diodes based on polyvinylcarbazole films doped with polymer nanoparticles. *Physics of the Solid State*, 55, 675–680.
- Alpayım, A. B. (2014). *Grafen Bazlı Süperkapasitörlerin Modellenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Al- Mashat, L., Shin, K., Kalantar-Zadeh, K., Plessis, J. D., Han, S. H., Kojima, R. W., Kaner, R. B., Li, D., Gou, X., Ippolito, S. J., Wlodarski, W. (2010). Graphene/polyaniline nanocomposite for hydrogen sensing. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114, 16168.
- Anothumakkool, B., Torris, A.T., Veeliyath, S., Vijayakumar, V., Badiger, M.V., Kurungot, S. (2016). High-performance flexible solid-state supercapacitor with an extended nanoregime interface through in situ polymer electrolyte generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 1233-1241.
- Arico, S. A., Bruce, P., Scrosati, B., Tarascon, M. J. ,Schalkwijk Van, W. (2005). Nanostructured materials for advanced energy conversion and storage devices. *Nature Materials*, 4, 366-377.
- Arslan, A. (2012). *Bazı iletken Polimerlerin Süperkapasitör Uygulamaları*. (Yüksek Lisans Tezi), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Asono, Y., Komatsu, T., Murashiro, K., Hoshino, K. (2011). Capacitnce studies of cobalt compound nanowires prepared via electrodeposition. *Journal of Power Sources*, 196, 5215-5222.
- Ateh, D. D., Navsaria, H. A., Vadgama, P. (2006). Polypyrrole-based conducting polymers and interactions with biological tissues. *Journal of the Royal Society Interface*, 3, 741-752.
- Ateş, M., Bayrak, Y., Yoruk, O., Çalışkan, S. (2017). Reduced graphene oxide/ Titanium oxide nanocomposite synthesis via microwave- assisted method and supercapacitor behaviors. *Journal of Alloys and Compounds*, 728, 541-551.
- Ates, M., Bayrak, Y., Ozkan, H., Yoruk, O., Yıldırım, M., Kuzgun, Ö. (2019). Synthesis of rGo/ TiO₂/PEDOT nanocomposites, supercapacitor device performance and equivalent electrical circuit models. *Journal of Polymer Research*, 26, 49.
- Ateş, M., Garip, A., Yoruk, O., Bayrak, Y., Kuzgun, Ö., Yıldırım, M. (2019). rGO/CuO /PEDOT nonocomposite formation, its characterisation and electrochemical performances for supercapacitors. *Plastics Rubber and Composites*, 48,168-184.
- Ates, M., Özkan, Ö., Aktaş, S., Kuzgun, Ö., Yıldırım, M. (2020). Tübitak projesi 1001 117M042 nolu çalışma.
- Ates, M., Yıldırım, M., Kuzgun, O. (2019). The synthesis of rGo, rGo / RuO₂ and rGo / RuO₂ / PVK nanocompozites and their supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 787, 851-864.
- Ates, M., Yıldırım, M., Kuzgun,Ö., Özkan, H. (2019). The synthesis of rGO, rGO/RUO₂ and rGO/RuO₂/PVK nanocomposites, and their supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 787, 851- 864.
- Aurbach, D., Talyosef, Y., Markovsky, B., Markevich, E., Zinigrad, E., Asraf, L., Gnananaj, J. S., Kim, H. S. (2004). Design of electrolyte solutions for Li and Li-on batteries; a review. *Electrochimica Acta*, 50, 247-254.
- Ayoub, S. A., Lagowski, J. B. (2019). Side chain effect on conjugated polymer/ fullerene interfaces in organic solar cells: a DFT study. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21, 23978-23995.
- Aytug, J., Rager, S. M., Higgins, W., Brown, G. F., Veith, C., Rouleau, M., Wang, H., Hood, D.Z., Mahurin, R., Mayes, Joshi, P., Kuruganti, T. (2018). Vacuum-assisted low-

- temperature synthesis of reduced graphene oxide thin-film electrodes for high-performance transparent and flexible all-solid-state supercapacitors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10, 11008-11017.
- Azman, N. H. N., Lim, N. H., Mamat, S., Sulaiman, Y. (2018). Synergistic enhancement of ternary Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/Graphene oxide/ manganese oxide composite as a symmetrical electrode for supercapacitors. *Energy Storage and Application*, 11, 1510.
- Baek, S. W., Hinma, I., Kim, J., Rangappa, D. (2017). Solidified inorganic-organic hybrid electrolyte for all solid state flexible lithium battery. *Journal of Power Sources*, 343, 22-29.
- Bahceci, S., Esat, B. (2013). A polyacetylene derivative with pendant tempo group as cathode material for rechargeable batteries. *Journal Power Sources*, 242, 33-40.
- Bai, H. M., Liu, R., Yang, B.X., Yu, Z., Wang, Y., Zhao, Z. (2018). Polypyrrole and manganese oxide composite materials with high working voltage and excellent cycling stability. *Chemistry Select*, 3, 10574-10579.
- Baibarac, M., Gomez-Romero, P., Lira-Cantu, M., Casan~Pastor, N., Mestres, N., Lefrant, S. (2006). Electrosynthesis of The Poly(N-Vinyl Carbazole)/Carbon Nanotubes Composite for Applications in The Supercapacitors Field. *European Polymer Journal*, 42, 10, 2302-2312.
- Balbaşı, M., Şahin, A. (2015). Symmetric with low active carbon content supercapacitor application. *Journal of the Faculty of Engineering*, 30, 683-692.
- Bard, A. J., Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical Methods*, 2nd ed.. John Wiley and Sons: In New York City, 448.
- Beguin, F., Presser, V., Balducci, A., Frackowiak, E. (2014). Carbons and electrolytes advanced supercapacitors. *Advanced Materials*, 26, 2219 - 2251- 2283.
- Belhachemi, F., Raël S., Davat B. (2000). Physical based model of power electric double-layer supercapacitors, *IEEE Industry Applications Society*, 5, 3069 – 3076.
- Benchaabane, A., Ben Hamed, Z., Kouki, F., Sanhoury, M. A., Zellam, K., Zeinert, A., Bouchriha, H. (2014). Performance of effective medium model in interpreting optical properties of Polyvinylcarbazole: ZnSe nanocomposites. *Journal of Applied Physics*, 115, 134313.

- Berructa, A., Martin. I. S., Hernandez, A., Ursua, A., Sanchis, P. (2014). Electro-thermal modelling of a supercapacitor and experimental validation. *Journal of Power Sources*, 259, 154-165.
- Bhadra, S., Khastgir, D., Singha, N.K., Lee, J.H. (2009). Progress in preparation, processing and applications of polyaniline. *Progress Polymer Science*, 34, 783-810.
- Bolagam, R., Boddula, R., Srinivasan, P. (2017). Hybrid material of PANI with TiO₂-SnO₂ : Pseudocapacitor electrode for higher performance supercapacitors. *Chemistry Select*, 2, 65 - 73.
- Bon, C. Y., Mohammed, L., Kim, S., Manasi, M., Isheunesu, P., Lee, K. S., Ko, J.M. (2018). Flexible poly(vinyl-alcohol)-ceramic composite separators for supercapacitor applications. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 68, 173- 179.
- Bonaccorso, F., Colombo, L., Yu, G., Stoller, M., Tozzini, V., Ferrari, C.A., Ruoff, S. R., Pellegrini, V.R. (2015). Graphene, related two-dimensional crystals and hybrid systems for energy conversion and storage. *Science*, 347, 1246501.
- Boota, M., Chen, C., Aken, K. L. V., Jiang, J., Gogotsi, Y. (2019). Organic-inorganic all-pseudocapacitive asymmetric energy storage devices. *Nano Energy*, 65, 104022.
- Bose, S., Kuila, T., Uddin, M. E., Kim, N. H., Lau, A. K., Lee, J. (2010). In-situ synthesis and characterization of electrically conductive polypyrrole/graphene nanocomposites. *Polymer*, 51, 5921.
- Byungwoo, K., Haegeun, C., Woong, K. (2012). High-performance supercapacitors based on vertically aligned carbon nanotubes and nonaqueous electrolytes. *Nanotechnology*, 23, 155401.
- Carreno, C. A., Rosales, J. J., Merchan, L. R., Lozano, J. M., Godinez, F. A. (2019). Comparative analysis to determine the accuracy of fractional derivatives in modeling supercapacitors. *Circuit Theory and Applications*, 47, 1603-1614.
- Chandra, A. (2012). Supercapacitors: an alternate technology for energy storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences. India Section A: Physical Sciences*, 82, 79-90.
- Chang, Y., Zhou, W., Wu, J., Ye, G., Zhou, Q., Li, D., Zhu, D., Li, T., Nie, G., Du, Y., Xu, J. (2018). High-performance flexible-film supercapacitors of layered hydrous RuO₂/

- poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) through vacuum filtration. *Electrochimica Acta*, 283, 744-754
- Chen, D., Lou, Z., Shen, G. (2018). Device configurations and future prospects of flexible/stretchable lithium-ion batteries. *Advanced Functional Materials*. 28, 1805596.
- Chen, G. Z., Shaffer, M. S. P., Coleby, D., Dioxan, G., Zhou, W., Fray, D. J., Windle, A. H. (2000). Carbon nanotube and polypyrrole composites: coating and doping. *Advanced Materials*, 12, 522-526.
- Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, L., Li, Y., Ding, Y. (2019). Progress in electrical energy storage system; a critical review. *Progress in Natural Science*, 19, 291-312.
- Chen, K., Liu, D., Xue, S., Komarneni, S. (2015). Carbon with ultrahigh capacitance when graphene paper meets $K_3Fe(CN)_6$. *Nanoscale*, 7, 432-439.
- Chen, P., Chen, H., Qiu, J., Zhou, C. (2010) Inkjet printing of single-walled carbon nanotube/RuO₂ nanowire supercapacitors on cloth fabrics and flexible substrates. *Nano Research*, 3, 594-603.
- Chen, Y., Zhang, J., Li, M., Yang, C., Zhang, L., Wang, C., Lu, H. (2018). Strong interface coupling and few-crystalline MnO₂ / Reduced graphene oxide composites for supercapacitors with high cycle stability. *Electrochimica Acta*, 292, 115-124.
- Chen, Y., Zhaoen, L. S., Jiang, Y., Zhou, K. (2019). Synthesis of nitrogen /sulfur co-doped reduced graphene oxide aerogels for high-performance supercapacitors with ionic liquid electrolyte. *Materials Chemistry and Physics*, 238, 121932.
- Chien, C. T., Hiralal, P., Wang, D. Y., Huang, I.-S., Chen, C. C., Chen, C.W., Amaratunga, G.A. J., (2015). Graphene-based integrated photovoltaic energy harvesting/storage device. *Small Nano Micro*, 24, 2929 - 2937.
- Chmiola, J., Yushin, G., Portet, C., Simon, P., Taberna, L. P. (2006). Anomalous increase in carbon capacitance at pore sizes less than one nanometer. *Science*, 313, 1760 - 1763.
- Choudhury, N. A., Sampath, S., Shukla, A. K. (2009). Hydrogel-polymer electrolytes for electrochemical capacitors: an overview. *Energy and Environmental Science*, 2, 55 - 67.
- Conte, M. (2010). Supercapacitors technical requirements for new applications. *Fuel Cells Wiley-VCH Verlag*, 10, 806 - 818.

- Conway, B. E. (1991), Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices. *Journal of the Electrochemical Society*, 138, 1539.
- Conway, B.E. (1996). Supercapacitor behavior resulting from pseudocapacitance associated with redox processes. In: Proceedings of the symposium electrochemical capacitors. *Journal Electrochemical Science*, 17–8.
- Conway, B. E. (1999). Scientific Fundamentals and Technological Applications. *Electrochemical Supercapacitors*, 698.
- Das, M., Mandal, R. (2018). A comparative performance analysis of direct, with battery, supercapacitor, and battery-supercapacitor enabled photovoltaic water pumping systems using centrifugal pump. *Solar Energy*, 171, 302 - 309.
- Decillers, N., Jemei, S, Pera, M. C., Beinaime, D., Gustin, F. (2014). Review of characterization methods for supercapacitor modelling. *Journal of Power Sources*, 246, 596-608.
- Demir, M. A. (2008). *Platin elektrotun p-aminobenzoik asit ile modifikasyonu ve kararlılığının belirlenmesi*. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Devillers, N., Jemei, S., Pera, M. C., Beiname, D., Gustin, F. (2014). Review of characterization methods of supercapacitors modelling. *Journal of Power Sources*, 246, 596-608.
- Du, C., Pan, N. (2007). Carbon nanotube-based supercapacitors. *Nanotechnology Law and Business*, 4, 569-676.
- Du, X., Wang, C. Y., Chen, M. M., Jiao, Y., Wang, J. (2009). Electrochemical Performances of Nanoparticle Fe₃O₄/Activated Carbon Supercapacitor Using KOH Electrolyte Solution. *The Journal of Physical Chemistry*, 113, 2643-2646.
- Dou, Q., Lu, Y., Su, L., Zhang, X., Lei, S., Bu, X., Liu, L., Xiao, D., Chen, J., Shi, S., Yan, X. (2019). A sodium perchlorate- based hybrid electrolyte with high salt-to-water molar ratio for safe 2.5 V carbon- based supercapacitor. *Energy Storage Materials*, 23, 603-609.
- Faranda, R. (2010). A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model. *Electric Power Systems Research*, 80, 363-371.

- Feng, D., Lei, T., Lukatskaya, R. M., Park, J., Huang H. Z., Lee, M., Shaw, L., Chen, C. S., Yakovenko, A. A., Kulkarni, A., Xio, P. J., Fredrickson, K., Tok, J. B., Zou, D.X., Cui, Y., Bao, N. Z. (2018). Robust and conductive two-dimensional metal-organic frameworks with exceptionally high volumetric and areal capacitance. *Nature Energy*, 3, 30-36 .
- Fic, K., Grzegorz, L., Mikoloj, M., Elzbieta, F. (2012). Novel insight into neutral medium as electrolyte for high-voltage supercapacitors. *Energy and Environmental Science*, 5, 5842-5850.
- Figuerido, J. L., Pereira, M. F. R., Freitas, M. M. A., Orfao, J. J. M. (1999). Modification of the surface chemistry of activated carbons. *Carbon*, 37, 379-1389.
- Fukuhara, M., Kuroda, T., Hasegawa, F., (2016). Amorphous titanium-oxide supercapacitors. *Scientific Reports*, 6, 35870.
- Frackowiak, E., Beguin, F. (2001). Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors. *Carbon*, 39, 937-950.
- Gao, H., Xiao, F., Ching, C. B. ve Duan, H. (2012). High-performance asymmetric supercapacitor based on graphene hydrogel and nanostructured MnO₂. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4 (5), 2801–2810.
- Gao, P. C., Tsai, W. Y., Daffos, B., Taberna, L. P., Perz, R. C., Gogotsi, Y., Simon, P, Favier, F. (2015). Graphene-like carbide derived carbon for high-power supercapacitors. *Nano Energy*, 12, 197-206.
- Gao, Y., Chen, S., Cao, D., Wang, G., Yin, J. (2010). Electrochemical capacitance of CO₃O₄ nanowire arrays supported on nickel foam. *Journal of Power Sources*, 195, 1757-1760.
- Geim, A. K., Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6, 183-191.
- Ghodbane, O., Pascal, J. L., Favier, F. (2009). Microstructural effects on charge-storage properties in MnO₂-based electrochemical supercapacitor. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 1, 1130-1139.
- Ghosh, K., Yue, Y. C., Sk, M. M., Jena, K. R., Bj, S. (2018). Development of a 3D graphene aerogel and 3D porous graphene/MnO₂ @ polyaniline hybrid film for all-solid-state flexible asymmetric supercapacitors. *Sustainable Energy Fuels*, 2, 280-293.

- Ghossein, N. E., Sari, A., Venet, P. (2019). Effects of the hybrid composition of commercial lithium-ion capacitors on their floating aging. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34, 2292 - 2299.
- Girija, T.C., Sangaranarayanan, M. V., (2006). Analysis of polyaniline-based nickel electrodes for electrochemical supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 156, 705 - 711.
- Gongadze, E., Petersen, S., Beck, U., ve Rienen, U. Van, (2009). Classical Models of the interface between an electrode and an electrolyte. *Cosmol Conference Milan*, 54, 78 - 91.
- Gonzalez, A., Goikolea, E., Barrena, A .J., Mysyk, R. (2016). Review on supercapacitors: technologies and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1189 - 1206.
- Groenendaal, L. B., Zotti, G., Aubert, P. H., Waybright, S. M., Reynolds, J. R. (2003). Electrochemistry of poly(3,4-alkylenedioxythiophene) derivatives. *Advanced Materials*, 15, 855 – 879.
- Halper, M. S. ve Ellenbogen, J. C. (2006). Supercapacitors: A brief overview. *Mitre Nanosystems Group, Virginia, USA*, 250 - 265.
- Harper, A., Anderson, M. R. (2010). Electrochemical glucose sensors-developments using electrostatic assembly and carbon nanotubes for biosensor construction. *Sensors*, 10, 8248 - 8274.
- He,I., Shu, Y, Li, W., Liu, M. (2019). Preparation of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{COO}_{3-\delta}$ (lsc)@ MnO_2 core/shell nanorods as high-performance electrode materials for supercapacitors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 17 – 25.
- Heinze, J., Frontana-Urbe, B. A., Ludwigs, S. (2010). Electrochemistry of conducting polymers-persistent models and new concepts. *Chemical Reviews*, 110, 4724 - 4771.
- Hidalgo-Reyes, J. I., Gomez-Aquilar, J. F., Escobar-Jiemenez, R. F., Alvarado-Martinez, V. M., Lopez-Lopez, M. G. (2019). Determination of supercapacitor parameters based on fractional differential equations. *Circuit Theory and Applications*, 47,1225 - 1253.
- Hong, Z., Chumming, L. (2014). Relationship between trace Mn and the pitting behavior of aluminium foil used for high voltage electrolytic capacitors. *Rare Metal Materials and Engineering*, 43, 1031 - 1036.

- Hong, W. L., Lin, L. Y. (2019). Design of nickel cobalt oxide and nickel cobalt oxide nickel molybdenum oxide battery-type materials for flexible solid-state battery supercapacitor hybrids. *Journal of Power Sources*, 435, 30.
- Hu, C. C., Chang, K. H., Lin, M. C., Wu, Y. T. (2006). Design and tailoring of the nanotubular arrayed architecture of hydrous RuO₂ for next generation supercapacitors. *Nano Letters*, 6, 2690-2695.
- Hu, J. L., Huang, J. H., Chih, Y.K., Chuang, C. C., Chen, J. P., Cheng, S. H., Horng, J. L. (2009). Effects of thermal treatments on the supercapacitive performances of PAN-based carbon fiber electrodes. *Diamond Related Materials*, 18, 511-515.
- Huang, M., Li, F., Dong, F., Zhang, Y. X., Zhang, L. L. (2015). MnO₂-based nanostructures for high-performance supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry*, 3, 21380-2142.
- Huang, Y., Li, H., Whang, Z., Zhu, M., Pei, Z., Xue, Q., Huang, Y., Zhi, C (2016). Nanostructured polypyrrole as a flexible electrode material of supercapacitor. *Nano Energy*, 22, 422-438.
- Humayun M., Khan, M. M., Muhammad, A., Xu, J. M., Zhang, W. D (2020). Evaluation of symmetric flying capacitor multilevel inverter for grid-connected application. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115, UNSP 105430.
- Hsu, F. H., Wu, T. M. (2012). In situ synthesis and characterization of conductive polypyrrole/graphene composites with improved solubility and conductivity. *Synthetic Metals*, 162, 682.
- Jana, M., Saha, S., Samanta, P., Murmu, N C., Kim, N. H., Kulia, T., Lee, J. H. (2017). A successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method to fabricate layer-by-layer (LBC) MnO₂ – reduced graphene oxide assembly for supercapacitor application. *Journal of Power Sources*, 340, 380 - 392.
- Jayalakshmi, M., Balasubramanian, K. (2008). Simple capacitors to supercapacitors-An overview. *International Journal of Electrochemical Science*, 3, 1196 - 1217.
- Ji, C., Mi, H., Ynag, S. (2019). Latest advances in supercapacitors; from new electrode materials to novel device designs. *Chinese Science Bulletin*, 64, 9 - 34.
- Ji, H., Zhao, X., Qiao, Z., Jung, J., Zhu, Y., Lu, Y., Zhang, L. L., Macdonald, A. H., Ruoff, R. S. (2014). Capacitance of carbon-based electrical double-layer capacitors. *Nature Communications*, 5, 3317.

- Jin, L., Wang, T., Feng, Z. Q., Leach, M. K., Wu, J. H., Mo, S. J., Jiang, Q. (2013). A facile approach for the fabrication of core-shell PEDOT nanofiber mats with superior mechanical properties and biocompatibility. *Journal of Materials Chemistry*, 1, 1818 – 1825.
- Ju, H., Xia, B., Elioff, M. S. (2016). A new terthiophene derivative as a fluorescent sensor for protein detection. *Journal of Luminescence*, 173, 57 - 65.
- Justin, P., Meher, S. K., Rao, R. F. (2010). Tuning of capacitance behavior of nio using anionic, cationic, and nonionic surfactants by hydrothermal synthesis. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114, 5203 - 5210.
- Justin, P., Rao, G.R. (2010). CoS sphere for high-rate electrochemical capacitive energy storage application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 9709 - 9715.
- Kalantar, K., Ou, J.Z., Daneke, T., Mitchell, A., Sasaki, T., Fuhrer, S. M. (2016). Two dimensional and layered transition metal oxide. *ACS Applied Energy Materials*, 5, 73 - 79.
- Kaempgen, M., Chan, C. K., Ma, J., Cui, Y, Gruner, G. (2015). Printable thin film supercapacitors using single-walled carbon nanotubes. *Nano Lette*, 9, 1872 - 1876.
- Keskin, F. (2014). *Yakıt pilli-bataryalı hibrid bir elektrikli araçta enerji yönetiminin sağlanması* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Kim, B. K, Chabot, V, Yu, A. (2013). Carbon nanomaterials supported Ni(OH)₂/NiO hybrid flower structure for supercapacitor. *Electrochimica Acta*, 109: 370 – 380.
- Kim, D. K., Lee, M., Kim, B. (2019). Low-voltage, high- performance polymeric field-effect transistors based on self- assembled monolayer- passivated Hfox di electrics: Carrelation between trap density, carrier mobility and operation voltage. *Organic Electronics*, 74, 135 - 143.
- Kim, J. H., Lee, Y. S., Sharma, A. K., Liu, C. G. (2006). Polypyrrole/carbon composite electrode for high power electrochemical capacitors. *Electrochimica. Acta*, 52, 1727 - 1732.
- Kim, J., Park, S. J., Chung, S. (2020). Preparation and capacitance of Ni metal organic framework/reduced graphane oxide composites for supercapacitors as nanoarchitectonics. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20, 2750 - 2754.

- Kim, J. W., Wada, T., Kim, S.G., Kato, H. (2014). Sub-micron porous riorbium solid electrolytic capacitor prepared by dealloying in a metallic melt. *Materials Letters*, 116, 223 - 226.
- Kim, S. W., Kim, I. H., Kim, S. I., Jang, J. H., (2017). Nickel hydroxide supercapacitor with a theoretical capacitance and high rate capability based on hollow dendritic 3D- nickel current collectors. *Chemistry an Asian Journal*, 12,1291 - 1296.
- Khamenko, v., frackowiak, e. (2015). Determination of the specific capacitance of conducting polymer/nanotubes composite electrodes using different cell configurations. *Electrochimica Acta*, 50, 2499 - 2506.
- Klem, M. D. S., Morais, R. M. , Rubira, R. J. G., Alves, N. (2019). Paper-based supercapacitor with screen-printed poly(3,4-ethylene dioxythiophene)- poly(styrene sulfonate)/multiwall carbon nonotube films actuating both as electrodes and current collector. *Thin Solid Films*, 669, 96 - 102.
- Kong, W., Zhu, J., Zhang, M., Liu, Y., Hu, J. (2018). Three-dimensional N- and S-codoped graphene hydrogel with in-plane pores for high performance supercapacitor. *Microporous and Mesoporous Materials*, 268, 260 – 267.
- Kotz, R., Carlen, M. (2000). Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, 45, 2483 - 2498.
- Kshetri. T., Tren, D. T., Nguyen, D. C., Kim, N. H., Lau, K. T., Lee, J. H. (2019). Ternary graphene- carbon nanofibers-carbon nanotubes structure for hybrid supercapacitor. *Chemical Engineering Journal*, 380, 122543.
- Kwon, S.J., Kim, T., Jung, B.M., Lee, S.B., Choi, U.H. (2018). Multifunctional epoxy-based solid polymer electrolytes for solid- state supercapacitors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10, 35108 - 35117.
- Laadjal, k., Sahraoui, M., Cardoso, A. J. M., Rap, A. M. (2018). Online estimation of aluminum electrolytic-capacitor parameters using a modified prony's method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54, 4764 - 4774.
- Lajnef, W., Vinassa, J. M., Briat, O., Azzopordi, S., Woirgard, E. (2007). Characterization methods and modelling of ultracapacitors for use as peak power sources. *Journal of Power Sources*, 168, 553 - 560.

- Law, M., Greene, L. E., Johnson, J. C., Saykally, R., Yang, P. D. (2005). Nanowire dye-sensitized solar cells. *Nature Materials*, 4, 455 – 459.
- Lee, U. H., Yin, L. J., Park, W. S., Park, Y. J. (2017). Preparation and characterization of PEDOT: PSS wrapped carbon nanotubes/MnO₂ composite electrodes for flexible supercapacitors. *Synthetic Metals*, 228, 84 - 90.
- Li, H., Zhang, W., XU, W., Zhang, X. (2000). Hydrogen bonding governs the elastic properties of poly(vinyl alcohol) in water: Single-molecule force spectroscopic studies of PVA by AFM. *Macromolecules*, 33, 465 - 469.
- Li, Y., Jang, J., Song, J. (2017). Structure models and nano energy system design for proton exchange membrane fuel cells in electric energy vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 160 - 172.
- Li, Y., Song, J., Yang, J. (2015). Graphene models and nano-scale characterization technologies for fuel cell vehicle electrodes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 66 – 77.
- Li, L, Wu, Z., Yuan, S., Zhang, B. X. (2014). Advances and challenges for flexible energy storage and conversion devices and systems. *Energy & Environmental Science*, 7, 2101 - 2122.
- Lin, K. H., Lin, Y., Hong, W. L. (2019). Incorporating redox additives in sodium hydroxide electrolyte for energy storage device with the nickel cobalt molybdenum oxide active material. *Journal of Energy Storage*, 25, 100823.
- Liu, C. F., Liu, Y. C., Yi, T. Y, Hu, C. C. (2019). Carbon materials for high-voltage supercapacitors. *Carbon*, 145, 529 - 548.
- Liu, C., Neff, D., Zhamu, A., Jang, B. Z. (2010). Graphene-Based Supercapacitor With An Ultrahigh Energy Density. *Nano Letters*, 10, 4863 - 4868.
- Liu, G., Chen, Y., Li, R. W., Zhang, B., Kong, E. T., Wang, C., Zhuang, X. D. (2014). Resistance-Switchable Graphene Oxide-Polymer Nanocomposites for Molecular Electronics. *ChemElectrochem*, 1, 514 – 519.
- Liu, H. K. (2013). An overview—functional nanomaterials for lithium rechargeable batteries, supercapacitors, hydrogen storage, and fuel cells. *Materials Research Bulletin*, 48, 4968 - 4973.

- Liu, H., Yu, H. (2019). Ionic liquids for electrochemical energy storage devices applications. *Journal of Materials Science* 35, 674 - 686.
- Liu, J., Li, J., Dai, M., Hu, Y., Cui, J., Wang, Y., Tan, H. H., Wu, Y. (2018). Photo-assisted synthesis of coaxial-structured polypyrrole/electrochemically hydrogenated TiO₂ nanotube arrays as a high performance supercapacitor electrode. *Royal Society of Chemistry*, 8,13393 - 13400.
- Liu, R., Cho, S., Lee, B. S. (2008). Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) nanotubes as electrode materials for a high- powered supercapacitor. *Nanotechnology*, 19, 21.
- Liu, R., Liu, Y., Zou, H., Songü, T., Sun, B. (2017). Integrated solar capacitors for energy conversion and storage. *Nano Research*, 10, 1545 – 1559.
- Liu, R. Y., Lee, S. T., Sun, B. Q. (2014). 13,8% efficiency hybrid Si/organic heterojunction solar cells with MoO₃ film as antireflection and inversion induced layer. *Advanced Materials*, 26, 6007 – 6012.
- Liu, Z., Li, Z., Li, D., Yin, X., Liu, Z. (2016). Use of manganese dioxide as oxidant in polymerization of aniline on carbon black for supercapacitor performances. *High Performance Polymers*, 28, 1105 - 1113.
- Liu, W, Li, M., Zhu, X. (2015). High-performance all-solid-state asymmetric supercapacitor based on CO₃O₄ nanowires and carbon aerogel. *Journal of Power Sources*, 282, 179 - 186.
- Liu, W. Y., Li, L. P., Gui, Q. Y., Deng, B. H., Li, Y. Y, Liu, J. P. (2020). Novel hybrid supercapacitors based on nanoarray electrodes. *Acta Physico- Chimica Sinica*, 36, UNSP 1904049.
- Lota, G., Frackowiak, E. (2014). Carbon nanotubes and their composites in electrochemical application. *Energy & Environmental Science*, 4, 1592 - 1605.
- Luo, B., Wang, L. (2017). Recent progress on integrated energy conversion and storage systems. *Advanced Science*, 4, 9.
- Luta, D. N., Raji, A. K. (2019). Optimal sizing of hybrid fuel cell-supercapacitor storage system for off-grid renewable applications. *Energy*, 166, 530 - 540.

- Macfarlane, D. R., Tachikawa, N., Pringle, J. M., Howlett, P. C., Elliott, G. D., Davis, J. H., Watanabe, M., Simon, P., Angel, C. A. (2014). Energy applications of ionic liquids. *Energy Environmental Science*, 7, 232 - 250.
- Mahmood, N., Zhang, C., Yin, H., Hou, Y. (2014). Graphene-based nanocomposites for energy storage and conversion in lithium batteries, supercapacitors and fuel cells. *Journal Materials Chemical*, 2, 15 - 32.
- Majumber, D., Maiyalagan, T., Jiang, Z.C. (2019). Recent progress in ruthenium oxide-based composites for supercapacitor applications. *Chemelectrochem*, 6, 4343 - 4372.
- Marie- Françoise, F., Guabus, H., Berthon, A. (2006). Supercapacitor thermal and electrical behaviour modelling using ANN. *IET Electric Power Applications*, 153, 255 - 262.
- Meher, J., Rao, G. R. (2010). Pine-cone morphology and pseudocapacitive behavior of nanoporous nickel oxide. *Electrochimica Acta*, 55, 8388 - 8396.
- Meher, S. K., Rao, G.F. (2011). Ultralayered CO₃O₄ for high-performance supercapacitor applications. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115, 15646 - 15654.
- Meher, S. K., Justin, P., Rao, G.R. (2011). Nanoscale morphology dependent pseudocapacitance of NiO: Influence of intercalating anions during synthesis. *Nanoscale*, 3, 683 - 692.
- Miller, J. M., Dunn, B., Tran, T.D., Pekala, R.W. (1997). Deposition of ruthenium nanoparticle on carbon aerogels for high energy density supercapacitor electrodes. *Journal of the Electrochemical Society*, 144, L309 - L311.
- Miller, R. J., Burke, A. F. (2008). Electrochemical capacitors: challenges and opportunities for real-world applications. *Electrochemical Society Interface*, 17, 53 - 57.
- Miller, R. T., Simon, P. (2008). Electrochemical capacitors for energy management. *Science*, 321, 651- 652.
- Mofrad, R. T., Payami, E., Ahadzadeh, I. (2019). Synthesis, characterization and electrochemical evaluation of a novel high performance GO-Fc/PANI nanocomposite for supercapacitor applications. *Electrochimica Acta*, 321, 134706.
- Moreno-Castilla, C., Maldonado-H'odar, F.J. (2005). Carbon aerogels for catalysis application : an overview. *Carbon*, 43, 455 - 465.

- Muniraj, A. K. V., Kamaja, K. C., Shelke, V. M. (2016). RuO₂.nH₂O nanoparticles anchored on carbon nano-onions: an efficient electrode for solid state flexible electrochemical supercapacitor. *ACS Sustainable Chemical Engineering*, 4, 2528 - 2534.
- Muzaffer, A, Ahamed, M. B., Deshmukk, K., Thirumalai, J. (2019). A review on recent advances in hybrid supercapacitors: design, fabrication and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, 123 -145.
- Na, R., Lu, N., Zhang, S., Huo, G., Yang, Y., Zhang, C., Mu, Y., Wang, G. (2018). Facile synthesis of a high-performance, fire-retardant organic gel polymer electrolyte for flexible solid-state supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 290, 262 - 272.
- Najib, S., Erdem, E. (2019). Current progress achieved in novel materials for supercapacitor electrodes; mini review. *Nanoscale Advances*, 1, 2817 - 28247.
- Nanbu, N., Ebina, T., Uno, H., Ishizawa, S., Saki, Y. (2006). Physical and electrochemical properties of quaternary ammonium bis(oxalato)borates and their application to electric double-layer capacitors. *Electrochimica Acta*, 52, 1763 -1770.
- Nathan, T. (2008). *Comparison of mesoporous carbon/carbon supercapacitor and NiO/mesoporous carbon hybrid electrochemical capacitor*. (Yüksek lisans tezi). Sains Malezya Üniversitesi, Malezya.
- Natori, I. (2006). Anionic polymerization of N-vinylcarbazole with alkyl lithium as an initiator. *Macromolecules*, 39, 6017 - 6024.
- Nikolaidis, P., Poullikkas, A. (2018). Cost metrics of electrical energy storage technologies in potential power system operations. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 25, 43 - 59.
- Noori, A., El-Kady, M. F., Rahmanifar, M. S., Kaner, R. B., Mousavi, M. F. (2019). Towards establishing Standard performance metrics for batteries, supercapacitors and beyond. *Chemical Society Reviews*, 48, 1272 - 1341.
- Novoselov, K. S., Falko, V. I., Colombo, L. (2012). A roadmap for graphene. *Nature*, 490, 192 - 200.
- Obeidat, M., Rastogi, A. C., (2018). Electrochemical energy storage performance of asymmetric PEDOT and graphene electrode-based supercapacitors using ionic liquid gel electrolyte. *Journal of Applied Electrochemistry*, 48, 747 - 764.

- Ojha, G. P., Muthurasu, A., Dahal, B., Mukhiya, T., Knag, D., Kim, H. Y. (2019). Oleylamire-assis-tered synthesis of manganese oxide nanostrue-tures for high-performance asymmetric supercapacitors. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 837, 254 - 265.
- Orbay, A. (2013). *Gümüş elektrot üzerinde sodyum borhidrür elektro yükseltgenmesinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Orikasa, Y., Masese, T., Koyama, Y., Mori, T., Hattori, M., Yamamoto, K., Okado, T., Huang, Z. D., Minato, T., Tassel, C., Kim, J., Kobayashi, Y., Abe, T., Kageyama, H., Uchimoto, Y. (2014). High energy density rechargeable magnesium battery using earth-abundant and non-toxic elements. *Scientific Reports*, 4, 5622.
- Palomares, V., Paulo, S., Irune, V., Karina, B. H., Javier, C. G., Teofilo, R. (2012). Na-ion batteries recent advances and present challenges to become low cost energy storage systems. *Energy and Environmental Science*, 5, 5884 - 5901.
- Pan, H., Li, J., Feng, Y. P. (2010). Carbon nanotubes for supercapacitor. *Nanoscale Research Letters*, 5, 654 - 668.
- Pean, C., Rotenberg, B., Simon, P., Salanne, M. (2016). Multi-scale modelling of supercapacitors: from molecular simulations to a transmission line model. *Journal of Power Sources*, 326, 680 - 685.
- Pean, C., Merlet, C., Rotenberg, B., Madden, P. A., Taberna, L., Daffos, B., Sallane, M., Simon, P. (2014). On the Dynamics of charging in nanoporous carbon-based supercapacitors. *ACS Nano*, 8, 1576 - 1583.
- Pham, T. N., Park, D., Lee, Y., Kim, I. T., Hur, J., Oh, Y. K., Lee, Y. (2019). Combination-based nanomaterial designs in single and double dimensions for improved electrodes in lithium ion-batteries and faradaic supercapacitors. *Journal of Energy Chemistry*, 38, 119 - 146.
- Pollet, B. G., Staffell, I., Shang, J. L. (2012). Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: from electrochemistry to market prospects. *Electrochim Acta*, 84, 235 - 249.
- Pumera, M. (2010). Graphene- based nanomaterials and their electrochemistry. *Chemical Society Reviews*, 39, 4146.

- Prasad, K. R., Munichandraiah, M. (2002). Fabrication and evaluation of 450 F electrochemical redox supercapacitors using inexpensive and high-performance, polyaniline coated, stainless-steel electrodes. *Journal Power Sources*, 443 - 451.
- Qu, D., Wang, G., Kafle, J., Harris, J., Crain, L., Jin, Z., Zheng, D. (2018). Electrochemical impedance and its applications in energy-storage. *Small Methods*, 2, 1700342.
- Qu, J., Shi, L., He, C., Gao, F., Li, B., Zhou, Q., Hu, H., Shao, G., Wang, X., Qui, J. (2014). Highly efficient synthesis of graphene/MnO₂ hybrids and their application of ultrafast oxidative decomposition of methylene blue. *Carbon*, 66, 485 - 492.
- Rafik, F., Gualous, H., Gallay, R., Crausaz, A., Berthon, A. (2006). Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling. *Journal of Power Sources*, 165, 928 - 934.
- Rafiq, I. M., Farid, T., Zhou, J., Ali, A., Tang, J., Tang, W. (2019). Carbonized wood – supported hollow NiCO₂S₄ eccentric spheres for high-performance hybrid supercapacitors. *Journal of Alloys Compounds*, 811, 151858.
- Rajesh, M., Rai, J. C., Manikandan, R., Kim, C. B., Park, Y. S., Yu, H. K. (2017). A high performance pedot/pedot symmetric supercapacitor by facile in-situ hydrothermal polymerization of PEDOT nanostructures on flexible carbon fibre cloth electrodes. *Materials Today Energy*, 6, 96 - 104.
- Ramakrishnan, R., Jinesh, K. B., Devaki, S. J., Varma, M. R. (2016). Facile strategy for the fabrication of efficient nonvolatile bistable memory devices based on polyvinylcarbazole-zinc oxide. *Physica Status Solidi A-Applications and Materials Science*, 213, 2414 – 2424.
- Ran, F. T., Yang, X. B. and Shao, L. (2018). Recent progress in carbonbased nanoarchitectures for advanced supercapacitors. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1, 32 – 55.
- Raza, W., Ali, F., Raza, N., Luo, Y., Kim, K. H., Yang, J., Kumar, S., Mehmood, A., Kwon, E. E. (2018). Recent advancements in supercapacitor technology, *Nano Energy*, 52, 441- 473.
- Reddy, P. A. K., Manvitha, C., Boddula, R., Vattikuti, S. V. P., Kumar, M. K., Byon, C. (2018). Single-step hydrothermal synthesis of wrinkled graphene wrapped TiO₂

- nanotubes for photocatalytic hydrogen production and supercapacitor applications. *Materials Research Bulletin*, 98, 314 - 321.
- Robert, C., Wnag, L., Alam, M. (2011). The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks ; a review and outloojk. *Renew Sustain Energy Review*, 15, 544 - 553.
- Rizoug, N., Bartolomeus, P., Moigne, P. (2010). Modeling and characterizing supercapacitors using an online method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57, 3980 - 3990.
- Sagadale, A., Zhou, X., Xiong, r., dubali, D. P., Xa, J., Yang, S.(2019). Lithium ion capacitors (LICS): development of the materials. *Energy Storage Materials*, 19, 314 - 329.
- Sagadevan, S., Marlinda, A. R., Johan, M. R., Umar, A., Fouad, H., Alothman, O. Y., Khaled, U., Akhtar, M. S., Shahid, M. M. (2020). Reduced graphene/nanostructured cobalt oxide nanocomposite for enhance electrochemical performance of supercapacitor applications. *Journal of Colloid and Interface Science*, 558, 68 - 77.
- Saha, P., Dey, S., Khanra, M. (2019). Modeling and state-of-charge estimation of supercapacitor considering leakage effect. *IEE Transactions on Industrial Electronics*, 67, 350 - 357.
- Sallanne, M., Rotenberg, B., Naoi, K., Kaneko, K., Taberna, L. P., Grey, C. P., Dunn, B., Simon, P. (2016). Efficient storage mechanisms for building better supercapacitors. *Nature Energy*, 1, 16070.
- Samuel, E., Jo, S. H., Joshi, B., Park, G. H., Kim, I. Y., An, S., Swihart, T. M., Yun, M. J., Kim, H. K., Yoon, S.S. (2017). High-performance supercapacitors using flexible and freestanding MnO_x/carbamide carbon nanofibers. *Applied Surface Science*, 423, 210 - 218.
- Sani, U. (2015). Variation of the capacitance of supercapacitors with current and freequency. *AKGEC International Journal of Technology*, 6, 36.
- Saranya, K., Rameez, MD., Subramania, A. (2015). Developments in conducting polymer based counter electrodes for dye-sensitized solar cells – an overview. *European Polymer Journal*, 66, 207 - 227.
- Sellam, A., Jenjeti, N. R., Sampath, S. (2018). Ultrahigh-rate supercapacitors based on 2-dimensional, 1Tmos 2xSe 2(1-x) for AC line- filtering applications. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122, 14186 - 14194.

- Sevilla, M., Mokaya, R. (2014). Energy storage applications of activated carbons; supercapacitors and hydrogen storage. *Energy & Environmental Science*, 7, 1250 - 1280.
- Shaikh, F.M.S., Lim, Y. J., Mane, S. R., Ambade, B.S., Joo, S. O. (2012). Wet-chemical polyaniline nanorice mass-production for electrochemical supercapacitors. *Synthetic Metals*, 162, 1303 - 1307.
- Shao, Y., El-Kady, M. F., Sun, J., Li, Y., Zhang, Q., Zhu, M., Wang, H., Dunn, B., Kaner, R. B. (2018). Design and Mechanisms of Asymmetric supercapacitors. *Chemical Reviews*, 118, 9233 - 9280.
- Simon, P., Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 7, 845 - 854.
- Singh, S., Supriya, S. K. A., Rakib, M. P., Chavhan, S., Ganguly, S. (2016). Double layer capacitance for different thicknesses of carbon overlayer and types of electrolytes: a circuit analogue approach. *Chemical Engineering*, 11, 296 - 304.
- Sivakkumar, S.R., Kim, W.J., Choi, J.A., MacFarlane, D.R., Forsyth, M., Kim, D.W. (2007). Electrochemical performance of polyaniline nanofibres and polyaniline/multi-walled carbon nanotube composite as an electrode material for aqueous redox supercapacitors. *Journal Power Sources*, 171, 1062 - 1068.
- Snook, A. G., Kao, P., Best, S. A. (2011). Conducting-polymer- based supercapacitor devices and electrodes. *Journal of Power Sources*, 196, 1 - 12.
- Spanou, S., Pavlatou, E. A. (2010). Pulse electrodeposition of Ni/nano-TiO₂ composites: effect of pulse frequency on deposits properties. *Journal of Applied Electrochemistry*, 40, 1325.
- Stoller, M. D., Radney, S. R. (2010). Best practice methods for determining an electrode material's performance for ultracapacitors. *Energy Environmental Science*. 3, 1294 - 1301.
- Sun, H., Xu, Z., Gao, C. (2015). Multifunctional, ultra-flyweight, synergistically assembled carbon aerogels. *Advanced Materials*, 25, 2554 - 2560.
- Sun, K., Zhang, S., Li, P., Xia, Y., Zhang, X., Du, D., Isikgor, H. F., Quyang, J. (2015). Review on application of PEDOT and PEDOT:PSS in energy conversion and storage devices. *Journal of Materials Science*, 26, 4438 - 4462.

- Suss, E. M., Porade, S., Sun, X., Beisheuvel, M. P., Yoon, J., Presser, V. (2015). Water desalination via capacitive deionization: what is it and what can we expect from it?. *Energy & Environmental Science*, 8, 2296 - 2319.
- Syasta, P., Negroiu, R., Vasile, A. (2017). Supercapacitors-an alternative electrical energy storage device. *International symposium on electrical and electronics engineering, IEEE*, 5, 20 - 22.
- Taberna, P. L. ve Simon, P. (2013). Electrochemical techniques. Süpercapacitors materials, systems and applications (1st) (111-130). *Poland: Wiley VCH Verlag GmbH & Co KGaA*.
- Taberna, P. L., Simon, P., Fauvarque, F. (2003). Electrochemical Characteristics, Impedance Spectroscopy Studies OF carbon supercapacitors. *Journal Electrochemical Society*, 150, A292 - A300.
- Tao, L., Li, J., Zhou, Q., Zhu, H., Hu, G., Huang, J. (2018). Composition, microstructure and performance of cobalt nickel phosphate as advanced battery-type capacitive material. *Journal of Alloys and Compounds*, 767, 789 - 79630, 789, 796.
- Thirugnanam, L., Sundara, R. (2018). Few layer graphene wrapped mixed phase TiO₂ nanofiber as a potential electrode material for high performance supercapacitor applications. *Applied Surface Science*, 444, 414 – 422.
- Tillotson, T., Fricke, J. (1997). Aerogels; Production, characterization and application. *Thin Solid Film*, 297, 212 - 223.
- Toupin, M., Brousse, T., Belanger, D. (2002). Influence of microstructure on the charge storage properties of chemically synthesized manganese dioxide. *Chemistry of Materials*, 14, 3946 - 3952.
- Trasatti, S. (1991). Physical electrochemistry of ceramic oxides. *Electrochimica Acta*, 36, 225 - 241.
- Vangari, M., Pryor, T., Jiang, L. (2013). Supercapacitors: Review of materials and fabrication methods. *Journal of Energy Engineering*, 139, 72 - 79.
- Vivekchand, S. R. C., Rout, C. S., Subrahmanyam, K. S., Govindaraj, A., Rao, C. N. R. (2008). Graphene based electrochemical supercapacitors. *Journal of Chemical Sciences*, 120, 9 - 13.

- Wallace, G., Spinks G. (2007). Conducting polymers-bridging the bionic interface. *Soft Matter*, 3, 665 - 671.
- Wang, S., Dryfe, R. A. W. (2013). Graphene oxide- assisted deposition of carbon nanotubes on carbon cloth as advanced binder-free electrodes for flexible supercapacitors. *J. Materials Chemistry*, A1, 5279 - 5283.
- Wang, E. Q., Mu, J. C., Zhang, Y. L., Wang, Q. N., Zhang, L. P. (2020). Superior capacitive performance of active carbons derived from loofah sponge, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20, 2416 - 2422.
- Wang, F., Wu, X., Yuan, X., Liu, Z., Zhang, Y., Fu, L., Zhu, Y., Zhou, Q., Wu, Y., Wang, W. (2017). Latest advances in supercapacitors: from new electrode materials to novel device designs. *Chemical Society Reviews*, 46, 6816 - 6854.
- Wang, G., Yang, Y., Han, D., Li, Y. (2017). Oxygen defective metal oxides for energy conversion and storage. *Nanotoday*, 13, 23 - 39.
- Wang, G., Zhang, L. (2012). A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors. *Chemical Society Reviews*, 41, 797 - 828.
- Wang, J., Eem, J., Jayaram, S. H., Yu, A. Wong, X. (2014). Development of an equivalent circuit model for electrochemical double layer capacitors (edlcs) with distinct electrolytes, *Electrochimica Acta*, 115, 587 - 598.
- Wang, R., Yang, Y., An, N., Zhang, Y., Wu, H., Hu, Z. (2016). Ruthenium oxide/reduced graphene oxide nanoribbon composite and its excellent rate capability in supercapacitor application. *Chinese Journal of Chemistry*, 34, 114 - 122.
- Wang, Q., Wang, X., Liu, B., Yu, G., Hou, X., Chen, D., Shen, G. (2013). NiCO₂O₄ nanowire arrays supported on Ni foam for high-performance flexible all-solid-state supercapacitors. *Journal Materials Chemistry*, A1, 2468 - 2473.
- Wang, Q., Yan, J., Fan, Z. (2016). Carbon materials for high volumetric performance supercapacitors: design, progress, challenges and opportunities. *Energy & Environmental Science*, 9, 729-762.
- Wang, Y., Chen, K. S., Mishler, J., Cho, S. C., Adroher, X. C. (2011). A review of polymer electrolyte membrane fuel cells; technology, applications and needs on fundamental research. *Appl Energy*, 88, 981 - 1007.

- Wang, Y., Chen, S., Cao, D., Wang, G., Yin, J. (2015). Mesoporous transition metal oxide for supercapacitors. *Nanomaterials*, 5, 1667 - 1689.
- Wang, Y., Shi, Z., Huang, Y., Ma, Y., Wang, C., Chen, M., Chen, Y. (2009). Supercapacitor devices based on graphene materials. *Journal of Physical Chemistry*, 113, 13103 - 13107.
- Wei, T. Y., Chen, C. H., Chang, K. H., Lu, S. Y., Hu, C. C. (2009). Cobalt oxide aerogels of ideal supercapacitive properties prepared with an epoxide synthetic route. *Chemistry Materials*, 21, 3228 - 3233.
- Wei, Y., Fang, B., Iwasa, S., Kumagai, M. (2005). A novel electrode material for electric double-layer capacitors. *Journal of Power Sources*, 141, 386 - 391.
- Wen, L., Li, F., Chend, M. H. (2016). Carbon nanotubes and graphene for flexible electrochemical energy storage: from materials to devices. *Advanced Materials*, 28, 4306 - 4337.
- Wilkes, J. S., Zawonotko, M. J. (1992). Air and water stable 1-ethyl-3-methylimidazolium based ionic liquids. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 13, 965 - 967.
- Winter, M.; Brodd, R. J. (2004). What are batteries, fuel cells, and supercapacitors?. *Chemical Reviews*, 104, 4245 – 4270.
- Wiston, B. R., Ashak, M. (2019). Microwave-Assisted synthesis of cobalt-manganese oxide for supercapacitor electrodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 103, 104607.
- Wu, M. Q., Snook, G. A., Gupta, V., Shaffer, M., Fray, D. J., Chen, G. Z. (2005). Electrochemical Fabrication and Capacitance of Composite Films of Carbon Nanotubes and Polyaniline, *Journal Materials Chemistry*, 15, 23, 2297 - 2303.
- Xia, J., Zhang, N., Chong, S., Li, D., Chen, Y., Sun, C. (2018). Three-dimensional porous graphene-like sheets synthesized from biocarbon via low-temperature graphitization for a supercapacitor. *Green Chemistry*, 20, 694 - 700.
- Xie, J., Yang, P., Wang, Y., Qi, T., Lie, Y., Li, M. (2018). Puzzles and confusions in supercapacitor and battery: theory and solutions. *Journal of Power Sources*, 40, 213 - 223.

- Xia, L., Yu, L., Hu, D., Chen, G. Z. (2017). Electrolytes for electrochemical energy storage. *Materials Chemistry Frontiers*, 1, 584 - 618.
- Xu, B., Chen, R., Cao, G., Chen, S., Zhou, Z., Yang, Y. (2008). Highly mesoporous and high surface area carbon: a high capacitance electrode material for EDLCs with various electrolytes. *Electrochem. Commun*, 10, 795 - 797.
- Yan, D., Liu, Y., Li, Y., Zhuo, R., Wu, Z., Ren, P., Li, S., Wang, J., Yan, P., Geng, Z. (2014). Synthesis and electrochemical properties of MnO₂/rGO/PEDOT:PSS ternary composite electrode material for supercapacitors. *Materials Letters*, 127, 53 - 55.
- Yan, J., Wang, Q., Wei, T., Fan, Z. (2014). Recent advances in design and fabrication of electrochemical supercapacitors with high energy densities. *Advanced Energy Materials*, 4, 133816.
- Yan, P. Y., Ju, S. P., Hsieh, H. S., Lin, J. S., Hsieh, J. Y. (2019). Electrolytic molecule in-pore structure and capacitance of supercapacitors with nanoporous carbon electrodes: a coarse-grained molecular dynamics study. *Computational Materials Science*, 166, 293 - 302.
- Yang, Z. G., Zhang, J. L., Kintner-Meyer, M. C. W., Lu, X. C., Choi, D. (2011). Electrochemical energy storage for green grid, *Chemical Reviews*, 111, 3577 – 3613.
- Yao, F., Pham, D. T., Lee, Y. H. (2015). Carbon-based materials for lithium ion batteries, electrochemical capacitors, and their hybrid devices. *ChemSuschem Energy Materials*, 8, 2284 – 2311.
- Yassine, M., Fabris, D. (2017). Performance of commercially available supercapacitors. *Energies*, 10, 1340.
- Yavuz, A., Erdogan, P., Ozdemir, N., Zengin, H., Zengin, G., Bedir, M. (2019). Electrochemical synthesis of COOOH-CO(OH)₂ composite electrode on graphite current collector for supercapacitor applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 18413 - 18423.
- Yiğit, D., Aykan, M., Güllü, M. (2018). Substituent effect on supercapacitive performances of conducting polymer-based redox electrodes: Poly(30,40 bis(alkyloxy)2,20:50,200-terthiophene) derivatives. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 56, 480 – 495.

- Yoo, D., Kim, J., Kim J. H. (2014). Direct synthesis of highly conductive poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(4-styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)/graphene composites and their applications in energy harvesting systems. *Nano Research*, 7, 717 - 730.
- Yoo, H. D., Han, S. D., Bayliss, R. D., Gewirth, A. A. , Genorio, B., Raiput, N. N., Persson, K. A., Burrell, A. K., Cabana, J. (2016). Rocking-Chair-Type metal hybrid supercapacitors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8, 30853 - 30862.
- You, S., Tan, Y., Gonzalez, M. T., Zhang, X., Zhang, Y., Liu, Y. (2018).Comparative assessment of tactics to improve primary frequency response without curtailing solar output in high photovoltaic interconnection grids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10, 718 - 728 .
- Yu, G., Xie, X., Pan, L., Bao, Z., Cui, Y. (2013). Hybrid nanostructured materials for high-performance electrochemical capacitors. *Nano Energy*, 2, 213 - 234.
- Yu H., Wu J., Fan L., Xu K., Zong X., Lin Y., Lin J. (2011). Improvement of the performance for quasi-solid-state supercapacitor by using PVA/KOH-KI polymer gel electrolyte. *Electrochimica Acta*, 56, 6881 - 6886.
- Yu, N., Yin, H., Zhang, W., Liu, Y., Tang, Z., Zhu, Q. M. (2016). High-performance fiber-shaped all-solid-state asymmetric supercapacitors based on ultrathin MnO₂ nanosheet/carbon fiber cathodes for wearable electronics. *Advanced Energy Materials*, 6, 1 - 9.
- Yuan, C. Z., Gao, B., Shen, L. F., Yang, S. D., Hao L., Lu, X. J., Zhang, F., Zhang, L. J., Zhang, X. G. (2011). Hierarchically structured carbon- based composites: design, synthesis and their application in electrochemical capacitors. *Nanoscale*, 3, 529 - 545.
- Yue, Y. H. ,Guan, H. E. , Gao, X., Yao, F., Wang, Q. W., Zhang, T., Wang, Z., Song, S. S., Zhang, J. H. (2018). Hydrothermal Synthesis of TiO₂ nanowires-Reduced Graphene Oxide Nanocomposite to Enhance Electrochemical Performance in Supercapacitor. *Chemistry select*, 3, 12455 - 12460.
- Zhang, B., Liu, L., Wang, L. X., Liu, B., Tian, X. Y., Chen Y. (2018). Covalent modification of graphene oxide with poly(N-vinylcarbazole) containing pendant azobenzene chromophores for nonvolatile ternary memories. *Carbon*, 134, 500-506.

- Zhang, H., Cao, G., Yang, Y. (2009). Carbon nanotubes arrays and their composites for electrochemical capacitors and lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 2 - 932.
- Zhang, L., Jamal, R., Zhao, Q., Wang, M., Abdiryim, T. (2015). Preparation of PEDOT/GO, PEDOT/MnO₂ and PEDOT/GO/MnO₂ nanocomposites and their application in catalytic degradation of methylene blue. *Nanoscale Research Letters*, 10, 148 - 156.
- Zhang, L. L., Zhao, S. X. (2009). Carbon –based materials as supercapacitor electrodes. *Chemical Society Reviews*, 38, 2520.
- Zhang, L.ve Pan, X. S. (2014). Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. *Chemical Society Reviews*, 38: 2520 - 2531.
- Zhang, L, Wang, Z., Hu, X, Sun, F. Dorrell, D. G. (2015). A comparative study of equivalent circuit models of ultracapacitors for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 274, 899 - 906.
- Zhang, Y., Fan, W., Lu, H., Liu, T., Xie, K., Wang, X., Wu, Q., Yang, L., Jin, Z., Ma, Y., Liu, J., Hu, Z. (2018). Highly porous polyimide-derived carbon aerogel as advanced three-dimensional framework of electrode materials for high-performance supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 282, 1763 - 1772.
- Zhang, Y., Feng, H., Wu, X., Wang, L., Zhang, L. (2009). Progress of electrochemical capacitor electrode materials: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 4889 - 4899.
- Zhang, Y., Ju, P., Zhao, C., Qian, X. (2016). In-situ grown of MoS₂/RGO/MoS₂ @ Mo nanocomposite and its supercapacitor performance. *Electrochimica Acta*, 219, 693 - 700.
- Zhang, Y. Z., Wang, Y., Cheng, T., Yao, L. Q., Li, X., Lai, W. Y. ve Huang, W. (2019). Printed supercapacitors: materials, printing and applications. *Chemical Society Reviews*, 48, 3229 - 3266.
- Zhang, Q., Uchaker, E., Candelaria, S. L. & Cao, G. (2013). Nanomaterials for energy conversion and storage chemical society reviews. *Chemistry of Materials*, 42, 3127 – 3171.
- Zhang, X., Shen, C., Sanghadas, M., Lin, L. (2018). High-voltage supercapacitors based on aqueous electrolytes. *Chemelectrochem*, 6, 976 – 988.

- Zhao, J., Lai, H., Lyu, Z., Jiang, Y., Xie, K., Wang, X., Wu, Q., Yang, L., Jin, Z., Ma, Y., Hu, Z. (2015). Hydrophilic hierarchical nitrogen-doped carbon nanocages for ultrahigh supercapacitive performance. *Advanced Materials*, 27, 3541 - 3545.
- Zhao, P., Yao, M., Ren, H., Wang, N., Komarneni, S. (2019). Nanocomposites of hierarchical ultrathin MnO₂ nanosheets/hollow carbon nanofibers for high-performance asymmetric supercapacitors. *Applied Surface Science*, 463, 931 - 938.
- Zhao, Y., Qin, Z. Y., Li, L., Zhang, Y., Wei, Y. L., Wang, L. F., Zhu, M. F. (2010). Polyaniline/multi-walled carbon nanotube composites with core-shell structures as supercapacitor electrode materials. *Electrochim. Acta*, 55, 12, 3904 - 3908.
- Zhao, X., Sanchez, M. B., Dobson, J. P., Grant, S. P. (2011). The role of nanomaterials in redox-based supercapacitors for next generation energy storage devices. *Nanoscale*, 3, 839 - 855.
- Zhao, X., Zhang, Q., Chen, C. M., Zhang, B., Reiche, S., Wang, A., Zhang, T., Schlogl, R., Su, D. S. (2012). Aromatic sulfide, sulfoxide, and sulfone mediated mesoporous carbon monolith for use in supercapacitor. *Nano Energy*, 1, 624 - 630.
- Zhao, Q., Song, X. Z., Li, X., Sun, Q., Cheng, C. N., Lawes, S., Sun, L. X. (2016). Metal organic frameworks for energy storage conversion. *Energy Storage Materials*, 2, 35 - 62.
- Zheng, L., Wang, X. Y., An, H. F., Wang, X. Y., Yi, L. H., Bai, L. (2011). The preparation and performance of flocculent polyaniline/carbon nanotubes composite electrode material for supercapacitors. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 15, 4, 675 - 681.
- Zhou, F. C., Ren, Z. W., Zhao, Y. D., Shen, X. P., Wang, A. W., Li, Y. Y., Surya, C., Chai, Y. (2016). Perovskite photovoltachromic supercapacitor with all-transparent electrodes. *ACS Nano*, 10, 5900 - 5908.
- Zhou, K., Jeong, M. G., Shin, M. S., Chun, W. W., Bae, J. W., Yoo, P.J., Chung, C. H. (2014). Morphological variation of highly porous Ni-SN foams fabricated by electro-deposition in hydrogen-bubble templates and their performance as pseudo-capacitors. *Applied Surface Science*, 322, 15 - 20.
- Zhu, Y., Huang, Z., Hu, Z., Xi, L., Ji, X. ve Liu, Y. (2018). 3D interconnected ultrathin cobalt selenide nanosheets as cathode materials for hybrid supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 269, 30 - 37.

- Zhi, M., Xiang, C., Li, J., Li, M., Wu, N. (2013). Nanostructured carbon-metal oxide composite electrodes for supercapacitors: a review. *Nanoscale*, 5, 72 - 88.
- Zhu, H., Wang, X. L., Yang, F., Yang, X. R. (2011). Promising carbons for supercapacitors derived from fungi. *Advanced Materials*, 23, 2745 - 2748.
- Zielke, U., Huttinger, K.J., Hoffman, W.P. (1996). Surface-oxidized carbon fibers. I. Surface structure and chemistry. *Carbon*, 34, 983 - 998.
- Zou, Y., Wang, S. (2015). Interconnecting carbon fibers with the in situ electrochemically exfoliated graphene as advanced binder-free electrode materials for flexible supercapacitor. *Scientific Reports*, 5, 11792.
- Zou, Q., Huang, J., Li, C., Lv, Z., Zhu, H., Gang, H., (2019). Wrapping CuCO_2S_4 arrays on nickel foam with $\text{Ni}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ nanosheets as a high-performance faradaic electrode. *New Journal of Chemistry*, 43, 5904 - 5913.
- Zubieta, L., Bonert, R. (1997). Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33, 199 - 205.
- Zubieta, L., Bonert, R. (2007). Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36, 199 - 205.
- Zuo, Wh., Li, R. Z., Zhou, C., Li, Y. Y., Xia, J. L., Liu, J. P. (2017). Battery-Supercapacitor hybrid devices: recent progress and future prospects. *Advanced Science*, 4, 1600539 .

ÖZGEÇMİŞ

08.05.1989 Bulgaristan/Sliven’de doğdu. 1989 yılında zorunlu olarak Bulgaristan’dan Çorlu ilçesine göç etti. 1993 yılından beri Tekirdağ’da ikamet etmektedir. 2012-2016 yıllarında Afyonkocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Kimya Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Yüksek lisans eğitimini 2018 yılında Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Bölümü Fizikokimya Anabilim dalında başladı.

