



MARMARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**OKSİT BAZLI MALZEMELERİN İLETKEN  
POLİMERLER İLE KAPLANMASI VE  
KAPASİTİF DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ**

OSMAN CEM TOPCU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Polimer Bilimi ve  
Teknolojisi Anabilim Dalı  
Polimer Bilimi ve Teknolojisi Programı

**DANIŞMAN**

Prof. Dr. Seyfullah MADAKBAŞ

İSTANBUL, 2024



MARMARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**OKSİT BAZLI MALZEMELERİN İLETKEN  
POLİMERLER İLE KAPLANMASI VE  
KAPASİTİF DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ**

OSMAN CEM TOPCU  
(526620017)

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
Polimer Bilimi ve  
Teknolojisi Anabilim Dalı  
Polimer Bilimi ve Teknolojisi Programı

**DANIŞMAN**  
Prof. Dr. Seyfullah MADAKBAŞ

İSTANBUL, 2024

## **TEŞEKKÜR**

Tez çalıőmam boyunca tecrübesi, bilgisi ve öngörülerıyla bana ışık tutan, tüm süreçlerde sabır ve hoşgörüsüyle beni destekleyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Seyfullah MADAKBAŞ' a; tezimdaki grafiklerin hazırlanmasında ve hesaplamaların yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Arő. Gör. Erhan Őükrü CENGİZ' e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Tezimin içerik kısmının hazırlanmasında bana yardımcı olan değerli arkadaşım ve meslektaşım Gizem KÜLLÜ' ye ve ekip arkadaşım Rıdvan Tuğberk ÖZSÜRÜCÜ' ye teşekkür ederim. Son olarak aldığım ve alacağım tüm kararlarda yanımda olduğunu hissettiğim, tüm eğitim ve çalışma hayatım boyunca beni destekleyen, sevgisini ve güvenini benden esirgemeyen sevgili annem Dilek YALTIRAKLI TOPCU' ya sonsuz teşekkür ederim.

**Mayıs 2024**

**Osman Cem TOPCU**

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT .....	iv
SEMBOLLER .....	v
KISALTMALAR .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	viii
TABLO LİSTESİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Enerji Depolama Teknolojileri.....	1
1.2. Süperkapasitörler.....	3
1.3. Elektrotlar.....	4
1.4. Metal Oksitler.....	4
1.5. Polimerler.....	5
1.6. İletken Polimerler.....	5
1.7. Polipirol.....	6
2. MATERYAL VE YÖNTEM .....	7
2.1. Kullanılan Kimyasallar.....	7
2.2. Kullanılan Cihazlar .....	7
2.3. Numunelerin Hazırlanması .....	8
2.3.1. NiCoMg numunelerin hazırlanması .....	8
2.3.2. PPy katkılı numunelerin hazırlanması.....	11
2.4. Uygulanan Testler .....	14
2.4.1. Dönüşümlü voltametri (CV).....	14
2.4.2. Galvanostatik şarj / deşarj (GCD) testi .....	15
2.4.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS).....	15
3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	17
3.1. Dönüşümlü Voltametri (CV) Bulguları.....	17
3.2. Galvanostatik Şarj / Deşarj Testi (GCD) Bulguları.....	19
3.3. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Bulguları .....	22
4. SONUÇLAR .....	24
KAYNAKLAR.....	25
ÖZGEÇMİŞ	

## ÖZET

### OKSİT BAZLI MALZEMELERİN İLETKEN POLİMERLER İLE KAPLANMASI VE KAPASİTİF DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mobil teknolojilerde kullanılan pil sistemlerinin uzun şarj ve deşarj sürelerine, kısa çevrim ömrüne ve çevreye zarar verme potansiyeline sahip olmaları alternatif çözüm arayışını tetiklemiştir. Bu doğrultuda, süperkapasitörler gibi çevre dostu olan elektrokimyasal enerji depolama sistemlerine yönelme eğilimi gözlenmektedir. Süperkapasitörler (SC), kısa şarj ve deşarj süreleriyle dikkat çekerken, organik yapılı olmaları ve yüksek iletkenlikleri sayesinde enerji depolama, biyolojik sensörler ve güneş pilleri gibi çeşitli uygulamalarda tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında hazırlanan numunelerin enerji depolama ve pil sistemleri üzerine kapasitif davranışlarının incelenmesi hedeflenmiştir. Farklı derişim ve kütle birleşme oranlarına sahip hidroksit malzemeler mol hesapları yapılarak sentezlendi; numuneler belli sürede ve derecede etüvde şartlandırıldı. Elde edilen dört farklı derişime ve mol ağırlığına sahip numuneler aktif karbon (AC), bağlayıcı polimer ve homojen karıştırıcıyla birlikte havanda dövülerek nikel foam üzerine tatbik edilmiştir. Dört farklı derişim ve kütle birleşme oranlarına sahip hidroksit malzeme örneklerinin elektrot yüzeyindeki aktif madde miktarı gravimetrik olarak belirlendikten sonra, sıvı elektrolit çözeltisi içinde dönüşümlü voltametri (CV), galvanostatik şarj-deşarj testleri (GCD) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) teknikleriyle elektrokimyasal ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre seçilen en iyi iki farklı derişime sahip metal oksit numunelere ayrı ayrı iletken polipirol (PPy) doplanarak sentezlenmiştir. Hazırlanan iki ayrı derişime ve kütle birleşme oranına sahip kompozit numunelerin kapasitif özellikleri yine GCD, CV ve EIS yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler: İletken Polimerler, Süperkapasitörler, Oksit Bazlı Malzemeler, Elektrokimya, Enerji Depolama**

## **ABSTRACT**

### **COATING OF OXIDE BASED MATERIALS WITH CONDUCTIVE POLYMERS AND EXAMINATION OF THEIR CAPACITIVE BEHAVIOURS**

The long charge and discharge times, short cycle life and potential environmental harm of battery systems used in mobile technologies have triggered the search for alternative solutions. In this regard, there is a tendency to shift towards electrochemical energy storage systems such as supercapacitors which are environmentally friendly. Supercapacitors (SC) attract attention with their short charge and discharge times and due to being organic and having high conductivity, they are preferred in various applications such as energy storage, biological sensors, and solar cells.

The aim of this thesis is to investigate the capacitive behaviors of the samples prepared on energy storage and battery systems. Hydroxide materials with different concentrations and mass mixing ratios were synthesized by mol calculations; the samples were conditioned in an oven for a certain period and degree. The samples with four different concentrations and molecular weights were applied onto nickel foam along with active carbon (AC), binding polymer and a homogeneous mixer by pounding in a mortar. After determining the amount of active substance on the electrode surface of the hydroxide material samples with four different concentrations and mass mixing ratios gravimetrically, electrochemical measurements were carried out using cyclic voltammetry (CV), galvanostatic charge-discharge tests (GCD), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques in a liquid electrolyte solution. According to the results obtained, the best two metal oxide samples with different concentrations were separately synthesized by doping with conductive polypyrrole (PPy). The capacitive properties of the prepared composite samples with two different concentrations and mass mixing ratios were investigated again using GCD, CV, and EIS methods.

**Keywords: Conductive Polymers, Supercapacitors, Oxide Based Materials, Electrochemistry, Energy Storage**

## SEMBOLLER

<b>°K</b>	: Kelvin Derece
<b>T</b>	: Sıcaklık
<b>°C</b>	: Santigrat Derece
<b>ml</b>	: mililitre
<b>g</b>	: gram
<b>mg</b>	: miligram
<b>M</b>	: Molar
<b>V</b>	: Volt, Voltaj
<b>ΔV</b>	: Potansiyel aralık
<b>ΔU</b>	: Tarama hızı
<b>A</b>	: Amper, Akım birimi
<b>I</b>	: Akım yoğunluğu
<b>W</b>	: Ağırlık
<b>π</b>	: pi elektron
<b>%</b>	: yüzde
<b>g/mol</b>	: Gram bölü mol
<b>A/g (Ag<sup>-</sup>)</b>	: Amper bölü gram
<b>mV</b>	: milivolt
<b>cm</b>	: santimetre
<b>F</b>	: Farad
<b>Z</b>	: Empedans
<b>m</b>	: kütle
<b>Cm</b>	: Spesifik kapasitans
<b>C</b>	: Elektrot kapasitesi
<b>kHz</b>	: Kilohertz
<b>Ω</b>	: Ohm
<b>Rcell</b>	: Hücrenin eşdeğer seri direnci
<b>P</b>	: Güç yoğunluğu
<b>cm<sup>2</sup></b>	: santimetre kare alan
<b>±</b>	: artı eksi tolerans
<b>t</b>	: zaman
<b>s</b>	: saniye

## KISALTMALAR

<b>Ni</b>	: Nikel (Nickel)
<b>Co</b>	: Kobalt (Cobalt)
<b>Mg</b>	: Magnezyum (Magnesium)
<b>EIS</b>	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (Electrochemical Impedance Spectroscopy)
<b>Py</b>	: Piro (Pyrrole)
<b>PPy</b>	: Polipiro (Polypyrrole)
<b>AC</b>	: Aktif Karbon (Activated Carbon)
<b>CV</b>	: Dönüşümlü Voltametri (Cyclic Voltammetry)
<b>GCD</b>	: Galvanostatik Şarj-Deşarj Testleri (Galvanostatic Charge- Discharge Tests)
<b>SC</b>	: Süperkapasitör (Supercapacitor)
<b>ESR</b>	: Eşdeğer Seri Direnç (Equivalent Series Resistance)
<b>TOC</b>	: En Yüksek Şarj (Top of Charge)
<b>EOD</b>	: Deşarj Sonu (End of Discharge)
<b>NaOH</b>	: Sodyum Hidroksit (Sodium Hydroxide)
<b>KOH</b>	: Potasyum Hidroksit (Potassium Hydroxide)
<b>DC</b>	: Doğru Akım (Direct Current)
<b>MnO<sub>2</sub></b>	: Mangan Oksit (Manganese Dioxide)
<b>RuO<sub>2</sub></b>	: Rutenyum Oksit (Ruthenium Dioxide)
<b>MoO<sub>x</sub></b>	: Molibden Oksit bileşikleri (Molybdenum Oxide Compounds)
<b>CuO<sub>x</sub></b>	: Bakır Oksit bileşikleri (Copper Oxide Compounds)
<b>CoO<sub>x</sub></b>	: Kobalt Oksit bileşikleri (Cobalt Oxide Compounds)
<b>MnO<sub>x</sub></b>	: Mangan Oksit bileşikleri (Manganese Oxide Compounds)
<b>IrO<sub>2</sub></b>	: Iridyum Oksit (Iridium Dioxide)
<b>NiO<sub>x</sub></b>	: Nikel Oksit bileşikleri (Nickel Oxide Compounds)
<b>Ni-Al</b>	: Nikel Alüminyum (Nickel Aluminum)
<b>Co-Ni</b>	: Kobalt Nikel (Cobalt Nickel)
<b>Mn-Co</b>	: Mangan Kobalt (Manganese Cobalt)
<b>Co-Ru</b>	: Kobalt Rutenyum (Cobalt Ruthenium)
<b>Ni-Co-Cu</b>	: Nikel Kobalt Bakır (Nickel Cobalt Copper)
<b>Ni-Co-Zn</b>	: Nikel Kobalt Çinko (Nickel Cobalt Zinc)

<b>OLED</b>	: Organik Işıık Yayan Diyot (Organic Light Emitting Diode)
<b>PEG</b>	: Polietilen Glikol (Polyethylene Glycol)
<b>NMP</b>	: N-Metil-2-Pirolidon (N-Methyl-2-pyrrolidone)
<b>PVDF</b>	: Poliviniliden Florür (Polyvinylidene Fluoride)
<b>pH</b>	: Potansiyel Hidrojen (Potential Hydrogen)
<b>Hg/HgO</b>	: Civa-Civa Oksit (Mercury-Mercury Oxide)
<b>SCE</b>	: Doygun Kalomel Elektrotu (Saturated Calomel Electrode)
<b>NiO</b>	: Nikel Oksit (Nickel Oxide)
<b>CoO</b>	: Kobalt Oksit (Cobalt Oxide)
<b>MgO</b>	: Magnezyum Oksit (Magnesium Oxide)
<b>M.O</b>	: Metil Oranj/Turuncusu (Methyl Orange)
<b>SDS</b>	: Sodyum Dodesil Sülfat (Sodium Dodecyl Sulfate)
<b>APS</b>	: Amonyum Persülfat (Ammonium persulfate)

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Çeşitli enerji depolama cihazları için Ragone grafiği .....	1
Şekil 1.2 İletken polimer yapıları .....	6
Şekil 2.1 Kullanılan kimyasallar .....	7
Şekil 2.2 Hazırlanan numunelerin havanda dövülmesi ve nikel foama tatbiki .....	9
Şekil 2.3 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığında hazırlanan numune grupları .....	9
Şekil 2.4 Numune sentez düzeneği .....	10
Şekil 2.5 Etüvde şartlandırılan numuneler .....	11
Şekil 2.6 Elektrokimyasal hücrenin görünümü (ilüstrasyon ve gerçek) .....	11
Şekil 2.7 Polipirol sentez aşamaları .....	12
Şekil 2.8 Polipirol numunelerinin süzülmesi ve etüvde kurutulması .....	13
Şekil 2.9 Spesifik kapasitans ölçüm formülü .....	14
Şekil 2.10 Elektrot kapasitans formülü .....	15
Şekil 2.11 Nyquist diyagram grafiği örneği .....	16
Şekil 2.12 Gamry Instruments Reference 600+ potentiostat/galvanostat cihazı.....	16
Şekil 2.13 Gravimetrik güç yoğunluğunu formülü .....	17
Şekil 3.1 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin farklı tarama hızlarındaki CV grafikleri ( sırasıyla; a)5mV b)10mV c)20mV d)40mV e)50mV .....	18
Şekil 3.2 a)20 mV tarama hızında PPy katkılı ve katkısız NO <sub>2</sub> CV grafiği, b) 20 mV tarama hızında PPy katkılı ve katkısız NO <sub>3</sub> CV grafiği, c)5-10-20-40-50mV tarama hızında PPy katkılı NO <sub>2</sub> grafiği, d) 5-10-20-40-50mV tarama hızında PPy katkılı NO <sub>3</sub> grafiği.....	19
Şekil 3.3 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin farklı akım yoğunluğu altında GCD grafikleri a)NO <sub>1</sub> , b)NO <sub>2</sub> , c)NO <sub>3</sub> , d)NO <sub>4</sub> .....	20
Şekil 3.4 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin 1 akım/gram yoğunluğu altında karşılaştırmalı GCD grafiği.....	21
Şekil 3.5 a)PPy katkılı NO <sub>2</sub> numunesinin farklı akım yoğunluklarında GCD grafiği, b)PPy katkılı NO <sub>3</sub> numunesinin farklı akım yoğunluklarında GCD grafiği, c)PPy katkılı ve katkısız NO <sub>2</sub> ve NO <sub>3</sub> numunelerinin 0,5 akım/gram yoğunluğu altında karşılaştırmalı GCD grafiği..	22
Şekil 3.6 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin elektrokimyasal empedans spektrum grafiği.....	23
Şekil 3.7 PPy katkılı NO <sub>2</sub> ve NO <sub>3</sub> numunelerinin elektrokimyasal empedans spektrumu.....	23

## TABLO LİSTESİ

Sayfa No

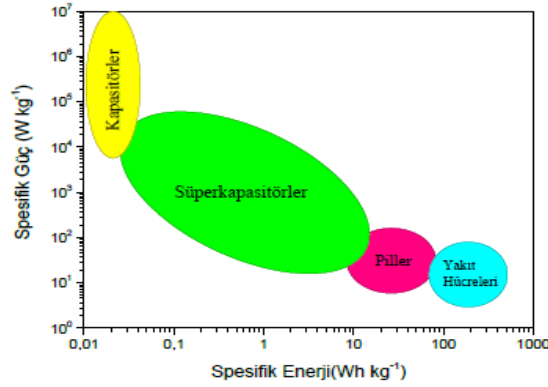
Tablo 1.1 Süperkapasitör ve pillerin bazı özelliklerinin lityum-iyon pilleri ile karşılaştırılması .....	2
Tablo 2.1 Kullanılan bileşik ağırlıkları .....	8
Tablo 2.2 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin sentez öncesi ve sonrası ağırlıkları .....	9
Tablo 2.3 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin etüv sonrası ağırlıkları ..	10
Tablo 2.4 Polipirol katkılı numunelerin sentez öncesi ve sonrası ağırlıkları .....	13
Tablo 2.5 Polipirol katkılı numunelerin etüv sonrası ağırlıkları .....	14
Tablo 3.1 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin farklı tarama hızlarındaki kapasitans değerleri (F/g) .....	17
Tablo 3.2 PPy katkılı NO <sub>2</sub> ve NO <sub>3</sub> numunelerinin farklı tarama hızlarındaki kapasitans değerleri (F/g).....	19
Tablo 3.3 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin farklı akım yoğunluğu altında kapasitans değerleri (F/g) .....	20
Tablo 3.4 PPy katkılı NO <sub>2</sub> ve NO <sub>3</sub> numunelerinin farklı akım yoğunluğu altında kapasitans değerleri (F/g).....	22

# 1. GİRİŞ

Mobil teknolojide kullanılan pillerin uzun şarj ve deşarj süreleriyle birlikte kısa çevrim ömürleri ve çevreye olan olumsuz etkileri, alternatif bir çözüm arayışını tetiklemiştir. Bu bağlamda, kısa şarj/deşarj sürelerine sahip, çevre dostu süperkapasitörler (SC' ler) dikkat çekmektedir. SC' ler, elektrik enerjisini elektrokimyasal olarak depolayabilen sistemlerdir. Hem iletkenlik göstermeleri hem de organik yapıya sahip olmaları enerji depolama, biyolojik sensörler ve güneş pilleri gib birçok alanda tercih edilmelerini sağlamaktadır.

## 1.1. Enerji Depolama Teknolojileri

Dünyadaki enerji krizi araştırmacıları yeni enerji kaynakları ve aynı zamanda verimli enerji depolama sistemleri bulmaya zorlamaktadır. Enerjinin depolanması için biyolojik depolama, kimyasal depolama, termal depolama, elektriksel depolama, potansiyel enerji, yerçekimi potansiyel enerjisi, kinetik enerji gibi çeşitli formlarda depolama yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında, kimyasal, mekanik, termal ve elektriksel enerji depolama yöntemleri öne çıkmaktadır [1]. Piyasada çok farklı elektrokimyasal enerji depolama sistemleri ve ultrakapasitörler veya elektrokimyasal kapasitörler olarak da adlandırılan süperkapasitörler bulunmaktadır. Şekil 1.1 'deki çizim Ragone grafiği olarak adlandırılır ve farklı enerji depolama ve dönüşüm sistemlerini spesifik güç ve enerji yoğunluklarına göre karşılaştırır [2].



Şekil 1.1 Çeşitli enerji depolama cihazları için Ragone grafiği

Yakıt hücreleri en yüksek özgül enerji yoğunluğuna sahip iken elektrostatik kapasitörler ise en yüksek özgül güç yoğunluğuna sahip olanlardır. Piller ve SC' ler orta düzeyde güç ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Tablo 1.1 piller, kapasitörler ve süperkapasitörler arasındaki temel farkları özetlemektedir [3].

*Tablo 1.1 Süperkapasitör ve pillerin bazı özelliklerinin lityum-iyon pilleri ile karşılaştırılması*

<b>Özellik</b>	<b>Süperkapasitör</b>	<b>Lityum-iyon pilleri</b>
Şarj süresi	1-10 saniye	10-60 dakika
Döngü süresi	1 milyon	500 ve üzeri
Hücre voltajı	2.3-2.75 V	3.6-3.7 V
Spesifik enerji (Wh/kg)	5	100-200
Spesifik güç (W/kg)	10000	1000-3000
Şarj sıcaklığı	-40-65 °C	0-45 °C
Deşarj sıcaklığı	-40-65 °C	-20-60 °C

SC' ler kapasitörlerden daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Pillerin, süperkapasitörler (SC' ler) ve diğer enerji depolama teknolojileri arasında daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu bilinmektedir. Ancak, SC' lerin pillerle karşılaştırıldığında kısa şarj/deşarj süresi, yüksek güç yoğunluğu ve daha fazla çevrim gibi bazı önemli özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Elektrot yüzeyindeki faradayik olmayan fiziksel reaksiyonlar nedeniyle SC' llerde çevrim verimliliği çok yüksektir. Pil ve kondansatör arasındaki önemli bir fark, kondansatörün şarj başlangıcında vedeşarj başlangıcında bir azalma olmasıdır [4]. Gerilimdeki ani düşüşe eşdeğer seri direnç (ESR) denir. Pil, TOC (En yüksek şarj) olarak adlandırılan %100 şarja ve EOD (deşarj sonu) olarak adlandırılan %100deşarj adlarına yaklaşması dışında şarj vedeşarj sırasında herhangi bir artış veya azalma göstermez. Bu nedenle kondansatörün DC-DC (direkt akım) dönüştürücüye ihtiyacı vardır. Pildeki depolama mekanizması SC' lerden tamamen farklıdır. Piller şarj vedeşarj sırasında çalışmak için kimyasal reaksiyonları kullanırken, SC' ler fiziksel reaksiyonları kullanır. Bu sınırlama reaksiyon kinetiği ve kütle taşınımından kaynaklanmaktadır. SC' lerin güç sınırlaması kullanılan elektrolite bağlıdır.

Enerji, akü elektrotlarının toplu yapısında depolanırken, enerji depolaması elektrotların yüzey alanıyla sınırlıdır. Çünkü SC' lerde yük depolaması elektrot malzemelerinin yüzeyinde gerçekleşir. Çevrim ömrü ayrıca SC' lerdeki yan reaksiyonlar ve pillerdeki mekanik ve kimyasal stabilite ile de sınırlıdır. SC' lerde şarj vedeşarj hızı çok yüksektir ancak pillerin şarjı çok yavaştır. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için SC sisteminin bileşenlerinin daha

derinlemesine araştırılması gerekmektedir ve son zamanlarda bu alanda devam eden birçok araştırma bulunmaktadır [5, 6, 7, 8].

## 1.2. Süperkapasitörler

Günümüzde, önemi giderek artan enerji depolama kapasitesine sahip olan süperkapasitörler, umut vaat eden bir enerji depolama cihazıdır. Süperkapasitörler, son yıllarda bilimsel ve endüstriyel alanlarda önemli gelişmelere konu olan, nispeten yeni bir enerji depolama sistemidir [9].

Ultrakapasitör ve süperkapasitör terimleri, tipik olarak sıvı elektrolit içeren, yüksek yüzey alanına sahip karbon elektrotlar arasında elektrik depolayabilen cihazları tanımlamak için kullanılır. Bu cihazlar, enerjiyi elektrotlar arasındaki şarj transferi ile depolarlar. Depolayabilecekleri enerji miktarı düşük olmasına rağmen, yüksek güç seviyeleri sunarlar. Önemli bir avantajları, çok hızlı şarj/deşarj olabilme yetenekleri ve 10.000'den fazla şarj/deşarj döngüsünü rahatlıkla sağlayabilme özellikleridir. Süperkapasitörler genellikle enerji depolaması yerine güç dengelemesi için kullanılır ve pillerle karşılaştırıldığında daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen, yüksek güç yoğunluğu sağlarlar. Enerji depolama materyalleri arasında yer alan süperkapasitörler, yüksek güç yoğunlukları, düşük maliyetleri, yüksek şarj-deşarj oranları ve yüksek tersinirlikleri ile dikkat çekmiş ve bu özelliklerin bir sonucu olarak birçok uygulama için (sağlık, otomotiv ve savunma sanayisi gibi) gelecek vadeden cihazlar olarak öne çıkmışlardır [10]. Süperkapasitörler, pillere kıyasla daha hızlı bir şekilde şarj olabilirler ve ayrıca daha düşük bir iç dirence sahiptirler [11]. Buna karşılık, süperkapasitörlerin enerji yoğunlukları düşüktür. Bu nedenle, birincil depolama sistemi olarak kurşun asit akü, nikel metal hidrür, lityum iyon pil, yakıt hücresi gibi sistemlerle birlikte kullanılırlar. Süperkapasitör aygıtları, biri pozitif diğeri negatif olmak üzere aktif kütle içeren elektrotlardan, bunları ayıran bir separatörden, elektrolitten ve akım toplayıcıdan oluşur [12]. Kullanılan akım toplayıcılar, elektriksel iletkenlik sağlamalı ve elektrotlar arasında elektron transferini kolaylaştırmalıdır. Aktif kütle içeren elektrotlarda elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi ve elektriksel iletkenlik sağlanmalıdır. Separatör, elektrik akımını taşıyabilmeli ve iyonik olarak iletken olmalıdır; ancak self-deşarjı önlemek için elektriksel olarak yalıtkan olmalıdır. Ayrıca, aktif madde ve separatör için iyonik iletkenliği sağlayan bir elektrolit ortamı gerekmektedir. Elektrot yüzeyinde bulunan aktif maddeler, süperkapasitörlere uzun döngü ömrü, mekanik dayanıklılık, yüksek yüzey alanı ve dolayısıyla yüksek spesifik kapasite sağlarlar [13, 14]. Bu aktif maddelerin elektrot yüzeyinde varlığı, şarj-deşarj işlemi sırasında

elektrotun şişmesine, büzülmesine, kısmen  z nmesine veya korozyona uğramasına neden olabilir [9].

Süperkapasitörler, kullanılan aktif maddeye göre elektriksel çift tabaka s perkapasit rleri ve faradayik süperkapasitörler olarak ikiye ayrılır. Süperkapasitörlerin performansını değerlendirmek için temel kriterler arasında spesifik kapasite, hücre potansiyeli, enerji ve güç yoğunluğu yer alır [16]. Spesifik kapasite, süperkapasitör elektrot malzemesinin niteliğine, elektrot tabakasının yapısına, elektron-iyon transferine ve kalınlığına bağlıdır. İnce aktif malzeme tabakaları, iyi elektrolit teması ve kısa elektron/iyon taşıma mesafesi sağlayarak yüksek spesifik kapasite gösterir. Ancak, uygulama açısından kalın malzemelerin mekanik dayanımının yüksek olması önemlidir.

Süperkapasitörlerde enerji yoğunluğu, spesifik kapasite ile doğru orantılıdır [17]. Dolayısıyla, enerji yoğunluğunu artırmak için en etkili yol kapasitansını artırmaktır. Enerji ve güç yoğunluğu değerleri, voltajın karesi ile doğru orantılıdır; bu nedenle voltajı artırmak, kapasitansını artırmaktan daha etkilidir [17]. Elektrolitin kararlı olduğu potansiyel aralığında, uygun elektrot seçimi ve elektrodun yapısının optimizasyonu ile yüksek voltajlara ulaşılabilir. Ancak, hücrenin iç direnci azaldıkça güç yoğunluğu artar.

### **1.3. Elektrotlar**

Elektrot, birden fazla devrenin yan yana getirilmesiyle oluşan ve bu devreler arasındaki potansiyel farkı ölçmeye yarayan bir düzenektir. Faradayik süperkapasitör elektrotları veya onların aktif maddeleri genellikle metal oksitler ve iletken polimerler ile bunları içeren kompozitlerden oluşur. Piller, elektrolitik hücreler veya elektron tüpleri gibi çok çeşitli elektrikli cihazlarda bulunmaktadır.

### **1.4. Metal Oksitler**

Metal oksitler, özellikle geçiş metal oksitleri, karbon malzemelere göre daha yüksek kapasitif özellikler sunarak süperkapasitör elektrotları için umut vadeden malzemeler arasında yer alır [17]. Bu metal oksitler, çok değerlikli ve yararlı olduklarından, redoks kapasitif mekanizması aracılığıyla y k depolayabilirler [15]. Örneğin, MnO<sub>2</sub> ve RuO<sub>2</sub> gibi metal oksitlerle hazırlanan süperkapasitörler,  ifte tabaka ve redoks kapasitif mekanizmasıyla y k depolayarak daha yüksek spesifik kapasitans sağlayabilirler [18]. Metal oksitler/hidroksitler, yüksek spesifik kapasitansları ve farklı oksidasyon durumları nedeniyle elektrot malzemeleri olarak tercih edilir. Bu nedenle s perkapasit rlerdeki metal oksitler/hidroksitler yüksek enerji ve g  üretimi

sağlar. İletken polimerler yüksek psödokapasitans sağlayabilmesine rağmen, iletkenlikleri ve redoks reaksiyonları sırasındaki yüksek mekanik deformasyonları iletken polimerlerin kullanılabilirliğini azaltır. Bu nedenle, MoOx [19], CuOx [20], CoOx [21], RuO2 [22] MnOx [23], IrO2 [24] ve NiOx [25, 26] gibi geçiş metal oksit/hidroksit/sülfid psödokapasitans malzemeleri olarak çalışılmıştır. Bahsedilen metal oksitler arasında nikel temelli elektrot, kullanılabilirlik, yüksek kapasitans, ucuzluk, yüksek termal ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle psödokapasitörlerde en çok kullanılan metal oksitlerden biridir [27]. Geçiş metal oksit/hidroksitler arasında, yüksek kapasitansları, yüksek şarj/deşarj oranı ve düşük maliyetleri nedeniyle nikel temelli formlar ilgi çekicidir [28]. Örneğin, nikel temelli malzemeler, rutenyum oksit/hidroksite kıyasla düşük maliyetleri nedeniyle büyük bir avantaja sahiptir. Geçiş metal oksit/hidroksitleri, yüksek spesifik kapasitans sağlayarak Faradayik enerji depolama mekanizmasını kullanmıştır [29]. Ancak, bu elektrot malzemelerinin süperkapasitör uygulamaları, zayıf elektrik iletkenliği ve düşük elektrokimyasal stabilite gibi sorunlarla sınırlıdır [30]. Bu nedenle, süperkapasitör araştırmalarında, yüksek elektrik iletkenliğine, yüksek spesifik kapasitansa ve uzun süreli çevrim stabilitesine sahip yeni materyallerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Metal oksitlerin döngüsel voltamogramı genellikle dikdörtgen şekline benzer. Bu şekil, metal oksit içinde gerçekleşen bir dizi redoks reaksiyonunu yansıtmaktadır. Son çalışmalar, süperkapasitörler için, pozitif elektrot malzemeleri olarak tekli bileşiklere kıyasla entegre elektrokimyasal performansı büyük ölçüde teşvik eden karışık metal bileşiklerinin ([31] Ni-Al, [32] Co-Ni, [33] Mn-Co, [34] Co-Ru, [35] Ni-Co-Cu ve [35] Ni-Co-Zn), avantajlara sahip olduğunu göstermiştir.

### **1.5. Polimerler**

Kovalent bağlar ile bağlanarak polimeri oluşturan maddelere ‘monomer’ adı verilir [36]. Birden çok monomerin birbirine kovalent bağlarla bağlanarak oluşturduğu büyük moleküllere ise polimer denir [37]. Polimerler kolay işlenebilme, esneklik, estetik görünüm, hafif ve ucuz olmaları ve kimyasal açıdan aktif olmamaları gibi üstün özelliklere sahiptir ancak elektriksel olarak yalıtkan malzemelerdir. Metaller ise zor işlenebilme, ağır, pahalı olmalarının aksine yapıları içinde serbest hareket eden elektronları nedeniyle, yüksek iletkenliğe sahiptirler.

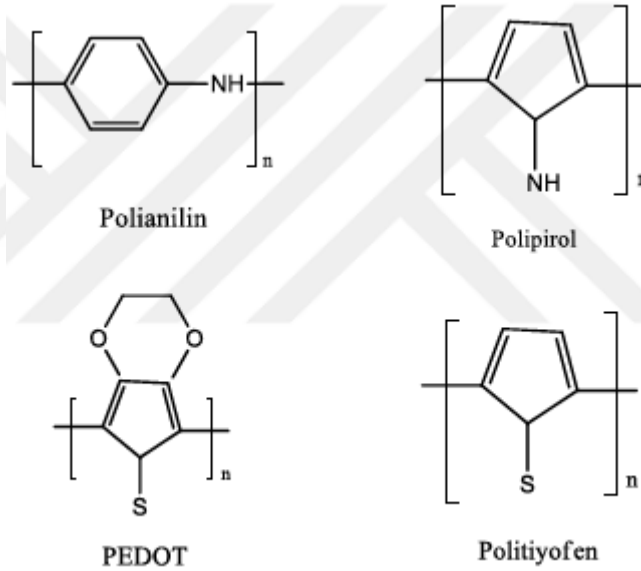
### **1.6. İletken Polimerler**

İletken polimerler, polimer zinciri boyunca konjuge çift bağlar içeren ve iyi iletkenlik özelliği

sergileyen polimerlerdir. Bu polimerler, metallerle yarı iletkenler arasında elektrik iletimini sağlarlar ve genellikle bir  $\pi$ -elektron iskeletine sahiptirler. Elektriksel iletkenlikleri, düşük enerjili optik geçişler, düşük iyonlaşma gerilimi ve yüksek elektron afinitesi gibi elektronik özelliklerinden  $\pi$ -elektron iskeleti sorumludur. İletken polimerlerin  $\pi$ -elektron iskeleti, ardışık olarak düzenlenmiş konjuge  $\pi$ -elektron sisteminden oluşur. Bu polimerler, hafiflikleri, işlenebilirlikleri, korozyona karşı dirençleri ve redoks özellikleri nedeniyle (biyo)sensörler, elektronik devreler, iyon seçici membranlar ve pil teknolojisi gibi çeşitli alanlarda büyük ilgi görmektedirler [38].

### 1.7. Polipirol

Polipirol (PPy), pirol (Py) monomerinin polimerizasyonundan elde edilen organik polimerdir. Polipirol' ün, 1968'de iletken bir polimer olduğu gösterildi [39].



Şekil 1.2 İletken polimer yapıları

Çok sayıda iletken polimer arasında (Şekil 1.2) PPy, hazırlanma kolaylığı, üstün redoks özellikleri, stabilize oksitlenmiş form, yüksek iletkenlik verme kapasitesi, suda çözünürlük, ticari olarak erişilebilir olması ve yüksek elektriksel ve optik özellikleri nedeniyle araştırmacılar tarafından ilgi çekmektedir [40]. İletken polimerler arasında en çok tercih edilenler polipirol, politiyofen ve polianilin ve bunların türevleridir. Polipirol, elektrokromik cihazlar, güneş pili, kimyasal sensör, enerji depolama cihazları, korozyon koruması ve OLED' ler gibi farklı uygulamalar için sulu ve organik elektrolitlerde incelenmiştir [41]. PPy' nin iletkenlik açısından tatmin edici bir aralıkta bulunması ve normal şartlarda olduğu kadar yüksek sıcaklıklarda (673 °K'e kadar) da kararlı olması önemlidir. Ayrıca, PPy mükemmel bir elektrot malzemesi olarak

hizmet verebilir. Bu gibi nedenler, PPy' nin diğerkatkılanmış polimerlere göre üstünlüğünü ortaya koyar.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Kullanılan Kimyasallar

Kobalt (II) Nitrat

Nikel (II) Asetat Tetrahidrat

Magnezyum Sülfat (susuz)

Polietilen Glikol

Saf Su

Aktif Karbon

1 Molar Sodyum Hidroksit

3 Molar Potasyum Hidroksit

Poliviniliden Florür

N-Metil-2-Pirolidon

Metil Oranj/Turuncusu

Sodyum Dodesil Sülfat

Amonyum Persülfat



Şekil 2.1 Kullanılan kimyasallar

### 2.2. Kullanılan Cihazlar

Heidolph MR Hei-Standard Karıştırıcı

inoLab WTW Series pH Ölçer

Filter Papers – Filtre Kağıtları

FN 400 Etüv Fırın

Precisa XB 220 A TEX Analitik Terazı

Gamry Inst. Ref. 600+ Potentiyostat / Galvanostat / ZRA

## 2.3. Numunelerin Hazırlanması

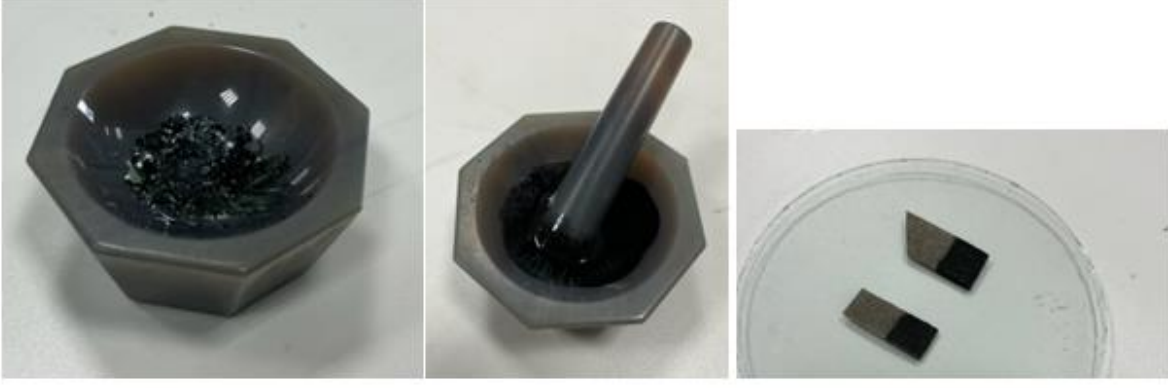
### 2.3.1. NiCoMg numunelerin hazırlanması

Bu tez çalışmasında metal olarak aktifliği iyi Nikel, iletkenliği iyi Kobalt ve doplanabilir özelliği iyi Magnezyum kullanılmıştır. Önce Zhihui ve arkadaşlarının makalesinde çalıştıkları  $Ni_{0,85-x}Co_{0,15}Al_x(OH)_2$  (NiCoAl) bileşiği baz alınarak malzemeler sentezlendi [42]. Kobalt (II) Nitrat, Nikel (II) Asetat Tetrahidrat, Magnezyum Sülfat (susuz) kullanılarak elde edilen dört farklı derişim ve kütle birleşme oranlarına sahip  $Ni_{0,85-x}Co_{0,15}Mg_x(OH)_2$  (NiCoMg) hidroksit malzemelerin mol ve kütle hesapları Tablo 2.1' e göre yapıldı.

*Tablo 2.1 Kullanılan bileşik ağırlıkları*

Bileşik	(g)
Nickel (II) Acetate Tetrahydrate	248,86
Cobalt (II) Nitrate	291,03
MgMagnesium Sulfate Anhydrous	120,37

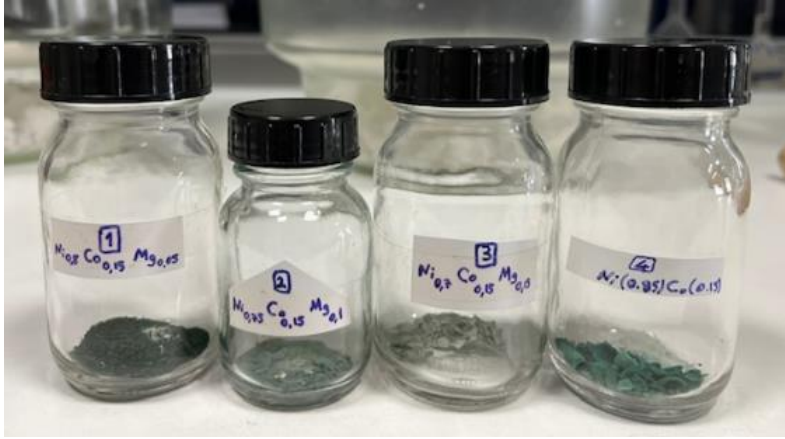
75 ml saf su ve 25 ml surfactant, Polietilen Glikol (PEG) yardımıyla 150°C derece ve 375 cycle hızında 20 dakika boyunca Heidolph MR Hei-Standard Karıştırıcı' da karıştırıldı. Ardından, 1 Molar sodyum hidroksit (NaOH) solüsyonu yardımıyla pH 11 olana kadar sentezlenen numuneler (Şekil 2.4) sonrasında 2 saat boyunca etüvde 110°C derecede şartlandırılmıştır. Malzemelerin tanecik boyutunun ve kalınlığının düşmesiyle kapasitansın artacağı örnek çalışmalardan araştırılarak öğrenildiğinden sentez sırasında buna da dikkat edildi. Elde edilen farklı derişim ve mol ağırlığına sahip numuneler aktif karbon (AC), bağlayıcı polimer olan Poliviniliden Florür (PVDF) ve NMP (N-Metil-2-Pirolidon) homojen karıştırıcıyla birlikte belirli bir oranda (Tablo 2.2) havanda dövülerek nikel foam üzerine tatbik edilmiştir. (Şekil 2.2)



Şekil 2.2 Hazırlanan numunelerin havanda dövülmesi ve nikel foama tatbiki

Tablo 2.2 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin sentez öncesi ve sonrası ağırlıkları

Numune Grubu	Sentez öncesi			Sentez sonrası eklenen malzemeler		
	Numune Formülü	Ni (g)	Co (g)	Mg (g)	AC (g)	PVDF (g)
1	Ni <sub>0,80</sub> Co <sub>0,15</sub> Mg <sub>0,05</sub>	3,98176	0,87309	0,12037	0,015	0,005
2	Ni <sub>0,75</sub> Co <sub>0,15</sub> Mg <sub>0,10</sub>	3,7329	0,87309	0,24074		
3	Ni <sub>0,70</sub> Co <sub>0,15</sub> Mg <sub>0,15</sub>	3,48404	0,87309	0,36111		
4	Ni <sub>0,85</sub> Co <sub>0,15</sub>	4,23062	0,87309	0,87309		



Şekil 2.3 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığında hazırlanan numune grupları



Şekil 2.4 Numune sentez düzeneği

Elektrot, 110°C'de 2 saat boyunca etüvde şartlandırıldı (Şekil 2.5) ve aktif madde miktarı gravimetrik olarak belirlendi. Bu tayin yapılırken aktif madde karbon %15 ve homojen bağlayıcı %5 oranlarında olduğundan etüvden çıkarılan numunelerin kütlece %80 ağırlığı alınmıştır. (Tablo 2.3)

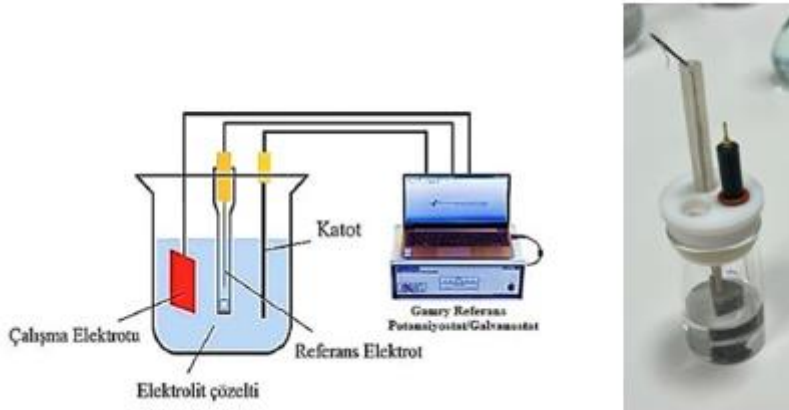
Tablo 2.3 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin etüv sonrası ağırlıkları

Numune Grubu	Numune İsimlendirmesi	Numune Formülü	A. Nikel Foam (g)	B. Malzeme Tatbiki ve Etüv Sonrası Ölçüm (g)	(B-A) x 0,80 (mg)
1	a	Ni <sub>0,80</sub> Co <sub>0,15</sub> Mg <sub>0,05</sub>	0,0915	0,1105	15,20
	b		0,0891	0,1062	13,68
	c		0,0956	0,1119	13,04
	d		0,0756	0,0889	10,64
	e		0,0948	0,11	12,16
2	a	Ni <sub>0,75</sub> Co <sub>0,15</sub> Mg <sub>0,10</sub>	0,1095	0,1353	20,64
	b		0,0885	0,1058	13,84
	c		0,0816	0,1014	15,84
	d		0,0731	0,0873	11,36
	e		0,0895	0,1036	11,28
3	a	Ni <sub>0,70</sub> Co <sub>0,15</sub> Mg <sub>0,15</sub>	0,085	0,0981	10,48
	b		0,106	0,12	11,20
	c		0,0828	0,1004	14,08
	d		0,0868	0,1011	11,44
	e		0,1086	0,1247	12,88
4	a	Ni <sub>0,85</sub> Co <sub>0,15</sub>	0,0722	0,0941	17,52
	b		0,0752	0,0911	12,72
	c		0,0869	0,1011	11,36



Şekil 2.5 Etüvde şartlandırılan numuneler

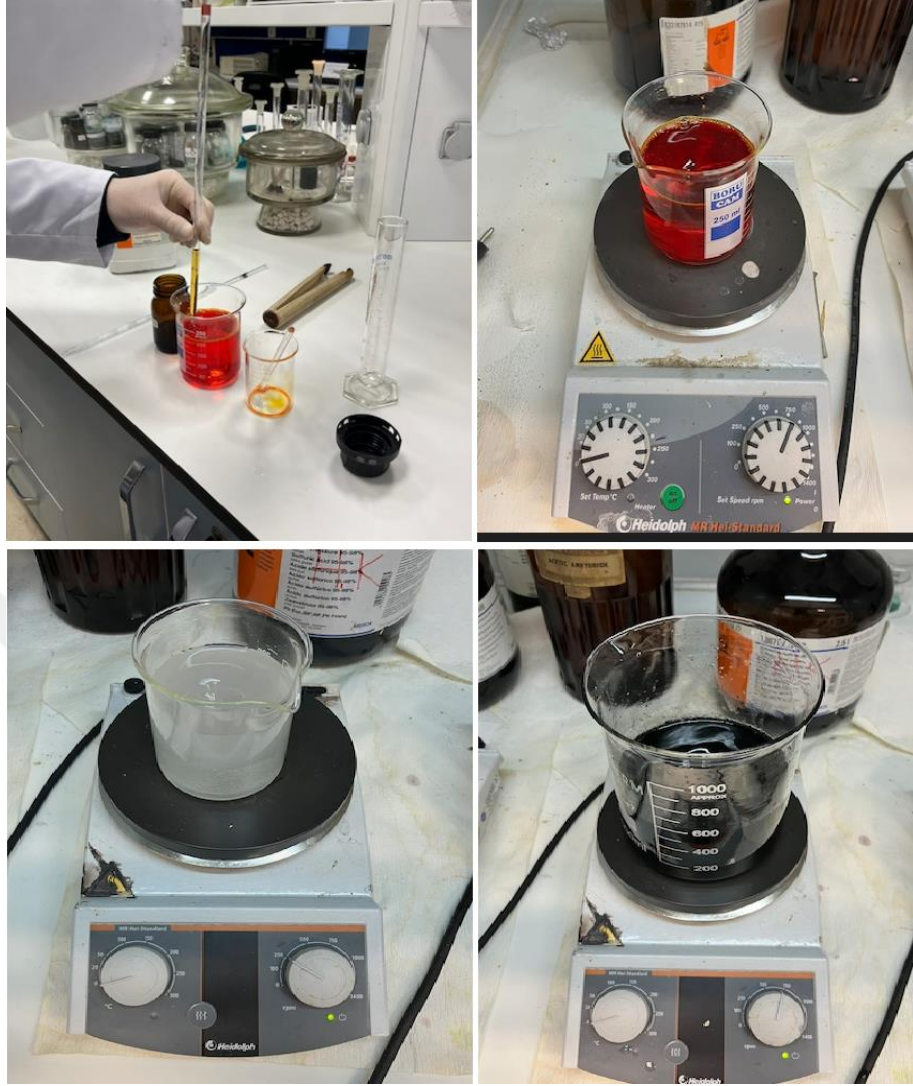
Gravimetrik ağırlıkları tayin edilen numunelerin elektrokimyasal ölçümleri, 3 molar Potasyum Hidroksit (KOH) sıvı elektrolit çözeltisi içinde CV, GCD ve EIS yöntemleri kullanılarak Şekil 2.6’ da gösterilen düzenekte yapılmıştır.



Şekil 2.6 Elektrokimyasal hücrenin görünümü (ilüstrasyon ve gerçək)

### 2.3.2. PPy katkılı numunelerin hazırlanması

Dört farklı derişim ve kütle birleşme oranlarına sahip NiCoMg numunelerinden elde edilen sonuçlara göre 2 ve 3 numaralı numune grubu ve iletken polimer PPy ile kompozit numuneler oluşturuldu. Testler yeniden bu farklı kompozit gruplarına uygulandı. Bu doğrultuda PPy sentezi için öncelikle 0,1637 g Metil Oranj (M.O), 0,288 g Sodyum Dodesil Sülfat (SDS) ve 200 ml saf su karıştırıldı. Bu karışım üzerine 2,76 ml pirol eklenerek “Çözelti A” oluşturuldu ve 4°C derecede 1 saat boyunca Heidolph MR Hei-Standard Karıştırıcı’ da karıştırılmaya bırakıldı. Ayrıca 22,82 g Amonyum Persülfat (APS) ve 200 ml saf su 1 saat boyunca Heidolph MR Hei-Standard Karıştırıcı’ da karıştırıldı ve “Çözelti B” oluşturuldu.



*Şekil 2.7 Polipirol sentez aşamaları*

Elde edilen Çözelti A ve Çözelti B tek bir kaba alınarak yavaş hızda 24 saat boyunca Heidolph MR Hei-Standard Karıştırıcı' da karıştırıldı, süzüldü ve 60-70°C derecede etüvde kurutuldu. Aşamalar Şekil 2.7 ve Şekil 2.8' de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Polipirol numunelerinin süzülmesi ve etüvde kurutulması

Etüvden alınan PPy örneklerinin numune 2 ve numune 3 için dörtte biri tartıldı. Üzerine AC, bağlayıcı polimer olan PVDF ve NMP homojen karıştırıcıyla birlikte havanda dövülerek ayrı ayrı (Numune 2 PPy ve Numune 3 PPy olacak şekilde) nikel foam üzerine Tablo 2.4' te belirtilen oranlarda tatbik edilmiştir.

Tablo 2.4 Polipirol katkılı numunelerin sentez öncesi ve sonrası ağırlıkları

Numune Grubu	Sentez öncesi				Sentez sonrası eklenen malzemeler	
	Numune Formülü	Ni (g)	Co (g)	Mg (g)	AC (g)	PVDF (g)
NO2_PPy	PPy-Ni <sub>0,75</sub> Co <sub>0,15</sub> Mg <sub>0,10</sub>	3,7329	0,87309	0,24074	0,015	0,005
NO3_PPy	PPy-Ni <sub>0,70</sub> Co <sub>0,15</sub> Mg <sub>0,15</sub>	3,48404	0,87309	0,36111		

Numune 2 PPy ve Numune 3 PPy' e ait elektrotlar, 110°C'de 2 saat boyunca etüvde şartlandırıldı ve aktif madde miktarı gravimetrik olarak belirlendi. Bu tayin yapılırken aktif madde karbon %15 ve homojen bağlayıcı %5 oranlarında olduğundan etüvden çıkarılan numunelerin kütlece %80 ağırlığı alınarak Tablo 2.5' te belirtilmiştir.

Tablo 2.5 Polipirol katkılı numunelerin etiv sonrası ağırlıkları

Numune Grubu	Numune İsimlendirmesi	Numune Formülü	A. Nikel Foam (g)	B. Malzeme Tatbiki ve Etiv Sonrası Ölçüm (g)	(B-A) x 0,80 (mg)
NO2_PPy	a	PPy-Ni <sub>0,80</sub> Co <sub>0,15</sub> Mg <sub>0,05</sub>	0,1174	0,1476	24,16
	b		0,1169	0,1275	8,48
	c		0,1322	0,1645	25,84
NO3_PPy	a	PPy-Ni <sub>0,75</sub> Co <sub>0,15</sub> Mg <sub>0,10</sub>	0,0993	0,1189	15,68
	b		0,0946	0,1107	12,88
	c		0,0908	0,1045	10,96

## 2.4. Uygulanan Testler

### 2.4.1. Dönüşümlü voltametri (CV)

Dönüşümlü voltametri, elektrokimyasal bir yöntemdir ve hücredeki redoks olaylarını ölçmek için kullanılır. Dengedeki bir elektrokimyasal hücreye dışarıdan denge geriliminden farklı bir gerilim uygulandığında, sistem yeniden dengeye ulaşmaya çalışır ve bu süreçte elektrot tepkimeleri meydana gelir, yani akım oluşur. Potansiyel uygulanarak hücrede tarama işlemi gerçekleştirilir. Uygulanan gerilim değerlerinin, ölçülen akım değerlerine karşı çizilmesiyle elde edilen grafik, voltamogram olarak bilinir. Uygulanan gerilim taraması ileri yönde belli bir gerilim değerine ulaştıktan sonra yine doğrusal olarak azalacak biçimde terse çevrilirse, bu yöntemin adı dönüşümlü voltametri olur. CV deneyleri 0-0,6 mV aralığında ve 1 A/g sabit tutularak farklı tarama hızlarındaki 5,10, 20, 40 ve 50 mV/s CV eğrileri kaydedilmiştir. Kapasitif özelliğin göstergesi olan dikdörtgene yakın voltamogram eğrilerinden süperkapasitörün spesifik kapasitans değerleri aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplandı. (Şekil 2.9)

$$C_m = \frac{S}{2mV\Delta U}$$

$$C_m = \frac{S}{2AV\Delta U}$$

Şekil 2.9 Spesifik kapasitans ölçüm formülü

SC testlerinde ön denemeler için CV sıklıkla kullanılmaktadır [43]. Dikdörtgene yakın voltamogram elde edildiğinde, elektrodun kapasitesi hesaplanabilir, bu da kapasitif özelliğin göstergesidir. Ayrıca, voltamogram şarj-deşarj sürecindeki reaksiyonları da izleyebilir.

Kaplamanın spesifik kapasitansı ( $C_m, F g^{-1}$ ), S dönüşümlü voltametri eğrisinin altındaki alan ( $Amper \times Volt$ ), m (g) elektrot yüzeyindeki aktif maddenin kütlesi,  $dV/dt$  ( $Volt s^{-1}$ ) tarama hızı ve U potansiyel aralığıdır (Volt). Bu denklemde  $F=(Amper \times s)/Volt$  bir turu ifade eder. Alan kapasitansı ( $C_s, F cm^{-2}$ ) bulmak için ise kapasitans, A ( $cm^2$ ) elektrodun alanına bölünerek hesaplanır. CV' llerde anodik ve katodik tepe konumları arasındaki fark, elektrokimyasal reaksiyonların tersine çevrilebilirliğini temsil eder. Bu fark psödokapasitif malzemeler için küçük olup tarama hızının artmasıyla artmazken, pil tipi malzemelerde geri dönüşü olmayan kristalografik faz dönüşüm reaksiyonları nedeniyle bu fark daha da büyür ve tarama hızının artmasıyla artar.

#### 2.4.2. Galvanostatik şarj / deşarj (GCD) testi

GCD testi SC' leri sabit bir akım ile şarj etmeye ve şarjı boşaltmaya tabi tutarak istenilen voltaj sınırına kadar karakterize eder. Bu testin sonuçları, kapasitans, direnç ve döngüsellik gibi parametrelere dair bilgi sağlar. Uygulanan akımın büyüklüğüne bağlı olarak, SC' ler farklı özgül kapasitans değerleri sağlayacaktır. Pillerde ise, potansiyel zaman grafiğinde şarj etme / şarj boşaltma sırasında farklılaşan düz deşarj platformları görülmektedir. Bu durum, faz dönüşümlerinden kaynaklanmaktadır. Elektrotun kapasitesi, GCD ile aşağıdaki denklemle (Şekil 2.10) hesaplanabilir [46]:

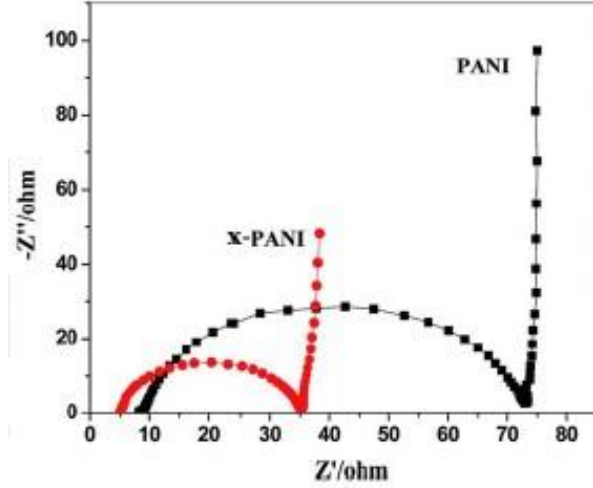
$$C = \frac{I \times t}{\Delta V}$$

Şekil 2.10 Elektrot kapasitans formülü

Burada I akım yoğunluğunu, t boşalma zamanını ve  $\Delta V$  potansiyel aralığı temsil eder.

#### 2.4.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS)

EIS yöntemi pillerin davranışını araştırmak, karakterizasyonu belirlemek ve modellemek için en kullanışlı tekniklerden biridir. EIS analizi, elektrokimyasal ara yüzey tepkimelerini, malzemenin kapasitif performansını, çözelti direncini, yük aktarım direncini, elektrot malzemesinin polarizasyon direncini ve polarize edilebilirliğini değerlendirmek için etkili bir yöntemdir. Z ile sembolize edilen empedans, kapasitif ve endüktif özelliklere sahip elemanların değişen direnç etkisi olarak tanımlanır, Nyquist diyagramı olarak değerler grafiğe yansıtılır. (Şekil 2.11)



Şekil 2.11 Nyquist diyagram grafiği örneği

Nyquist grafiği, faradayik empedans spektrumu olarak adlandırılan bir grafiktir ve sanal bileşenin gerçek bileşene olan bağlılığını gösterir. Bu grafik, elektrokimyasal arayüzey tabakası ve elektron transfer tepkimeleri hakkında değerli bilgiler sağlar. Elektrokimyasal ölçümler, üç elektrotlu bir test hücresi kullanılarak Gamry Instruments Reference 600+ potentiostat/galvanostat cihazında gerçekleştirilmiştir. (Şekil 2.12) 3 molar KOH sıvı elektrolit ortamında referans elektrot olarak Hg/HgO elektrodu ve sulu ortamda doygun kalomel elektrotu (SCE) kullanılmıştır. Karşıt elektrot olarak ise platin spiral tel elektrot tercih edilmiştir. Genel olarak, EIS ölçümleri için, empedans verileri, geniş bir frekans aralığında 0,01 ila 100 kHz küçük bir genlikte  $\pm 5$  ila  $\pm 10$  mV alternatif potansiyel uygulanarak açık devre potansiyelinde toplanmıştır.



Şekil 2.12 Gamry Instruments Reference 600+ potentiostat/galvanostat cihazı

Aşağıdaki denkleme göre (Şekil 2.13) gravimetrik güç yoğunluğunu belirlemek için eşdeğer seri direnç (ESR) gereklidir. Burada W toplam ağırlıktır, V hücre voltajıdır ve R<sub>cell</sub> hücrenin eşdeğer seri direncidir ve Ohm (Ω) cinsindedir. ESR azaldıkça sistemin güç yoğunluğu artmaktadır. Diğer enerji depolama sistemleri gibi yüksek ESR değerleri de düşük güç yoğunluğuna neden olur ve aynı zamanda şarj/deşarj oranını da etkiler [44]. Bu nedenle bazı uygulamalar için ESR kapasitanstan daha önemlidir. ESR, aktif malzemenin direnci, elektrolitin ayırıcı ile direnci ve akım toplayıcı ile aktif malzeme arasındaki temas direnci gibi çeşitli katkıların toplamıdır [45].

$$P = \frac{1}{4WR_{Cell}} V^2$$

Şekil 2.13 Gravimetrik güç yoğunluğunu formülü

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

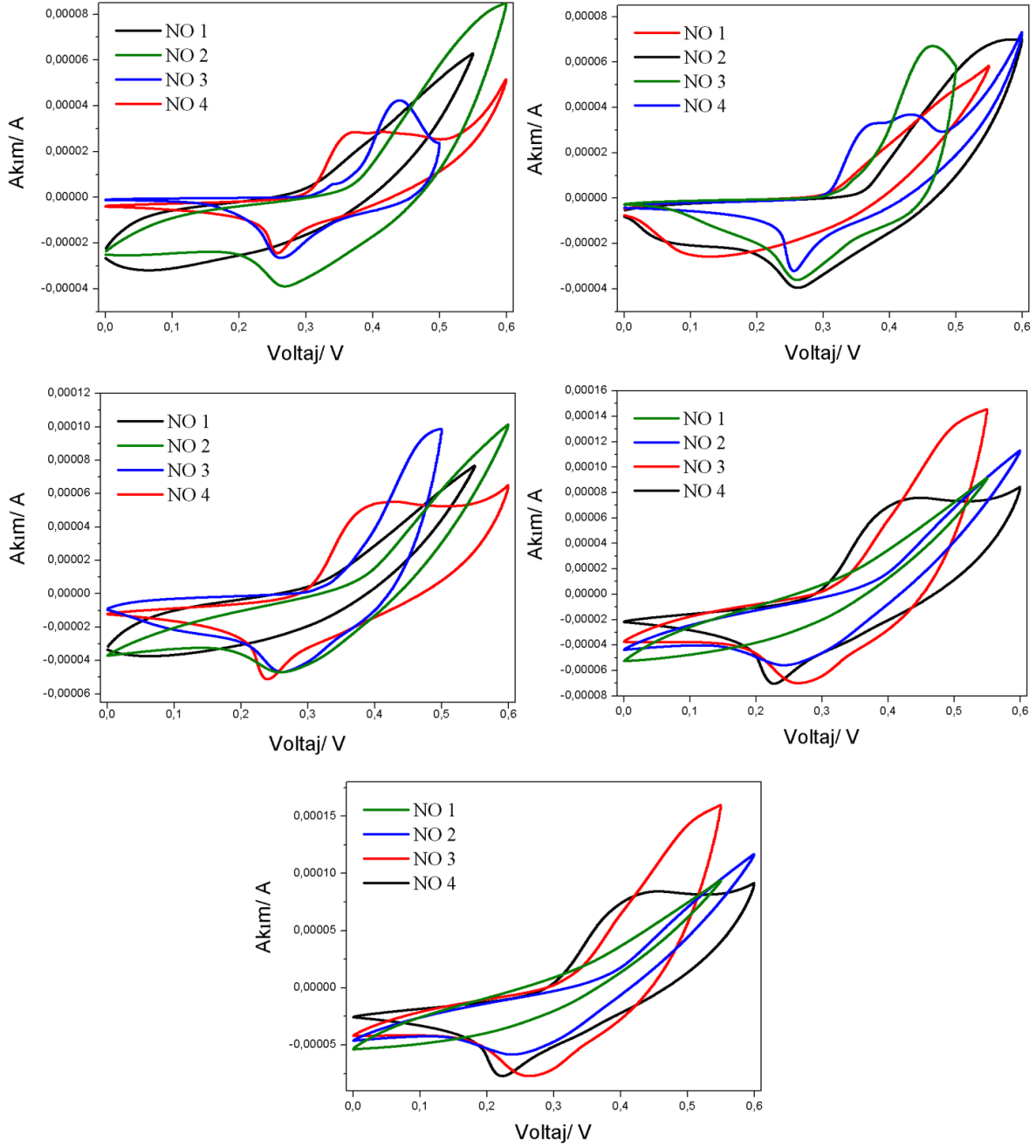
Aktif madde miktarları gravimetrik yöntemlerle tespit edildikten sonra, sıvı elektrolit çözeltisi içinde ve üçlü elektrot sistemi kullanılarak, CV, GCD ve EIS yöntemleriyle kapasitif özellikler incelenmiştir.

#### 3.1. Dönüşümlü Voltametri (CV) Bulguları

Ni<sub>0,85-x</sub>Co<sub>0,15</sub>Mg<sub>x</sub>(OH)<sub>2</sub> (NiCoMg) elektrodunun 0-0,6 mV aralığında ve 1 A/g sabit tutularak farklı tarama hızlarındaki 5,10, 20, 40 ve 50 mV/s CV eğrileri kaydedilmiştir. Her tarama hızında üçer cycle yapılırken, her bir numune grubuna ait elektrotlar için testler tekrarlanmıştır. CV'lerin altındaki alanın tarama hızının arttıkça CV'lerin daha yatay bir eğilim gösterdiği ve bu sebeple düşük tarama hızlarında kapasitans değerlerinde olumlu sonuçlar Tablo 3.1' de belirtilirken Şekil 3.1' de grafikler üzerinde de gözlemlenebilmektedir. (Tablo 3.1)

Tablo 3.1 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin farklı tarama hızlarındaki kapasitans değerleri (F/g)

		Sonuçlar				
gram	V (tarama hızı) V/s	0,0050	0,0100	0,0200	0,0400	0,0500
0,0152	Numune 1	12,72	5,33	3,36	1,54	1,30
0,02064	Numune 2	13,02	6,76	2,96	1,54	1,26
0,01048	Numune 3	11,84	9,97	6,39	5,73	4,82
0,01272	Numune 4	10,63	6,28	6,34	4,41	3,89



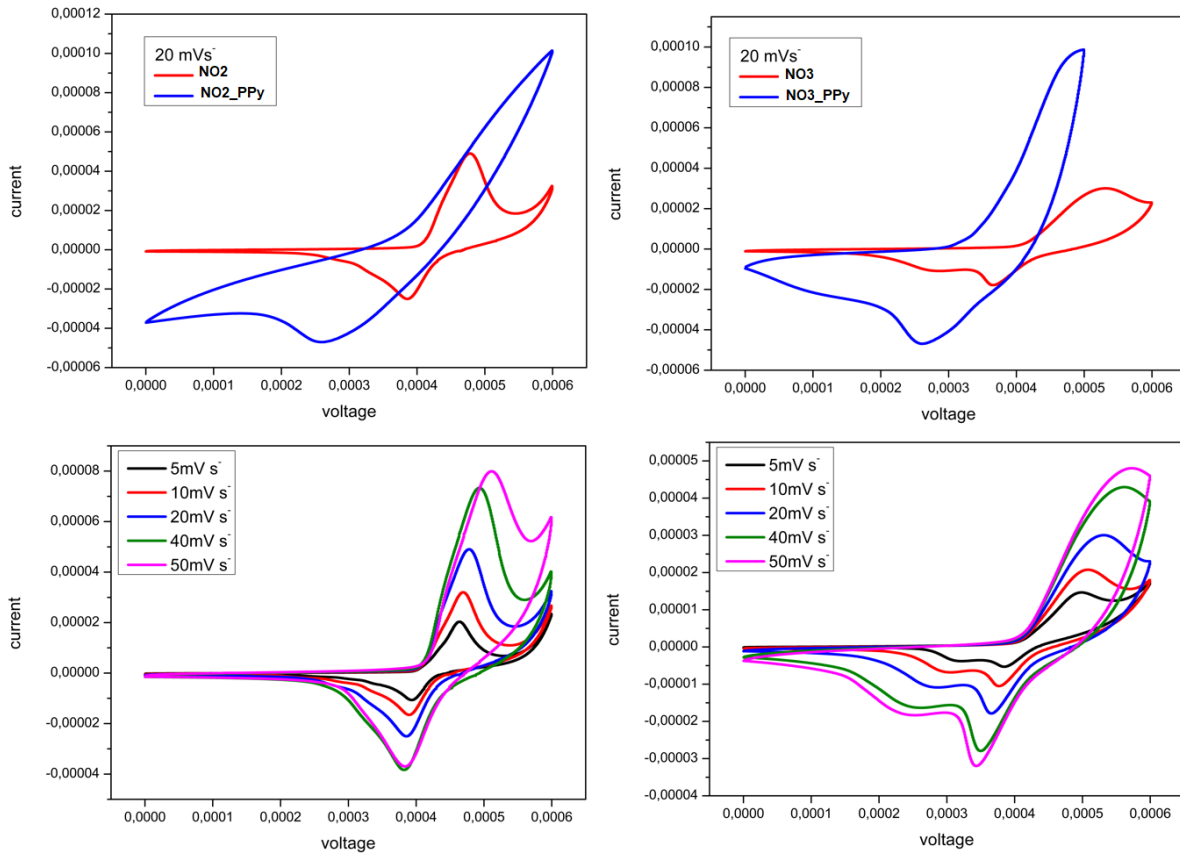
Şekil 3.1 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin farklı tarama hızlarındaki CV grafikleri ( sırasıyla; a)5mV b)10mV c)20mV d)40mV e)50mV

Testlerin devamında PPy ile kompozit numune oluşturularak CV testlerinin tekrarlanması kararlaştırılan numune 2 ve numune 3 gruplarının yine elektrot halinde 0-0,6 mV aralığında ve 1 A/g sabit tutularak farklı tarama hızlarındaki 5,10, 20, 40 ve 50 mV/s CV eğrileri kaydedilmiştir. Tablo 3.2' deki sonuçlar referans alınarak oluşturulan Şekil 3.2' deki grafikler incelendiği zaman NO2\_PPy ve NO3\_PPy olarak adlandırılan numune 2 ve numune 3' ün PPy ile katkılanmış sonuçlarında eğriler şarj ve deşarj işlemi boyunca kapalı bir alan sergilemektedir. Elde edilen eğrilere göre, iletken polimer katkısıyla, referans elektroda göre

kapalı eğri alanlarındaki artış açık bir şekilde görülmektedir. Voltametrik alanların büyümesi kapasitör üzerinde biriken yük miktarının arttığını göstermektedir.

Tablo 3.2 PPy katkılı NO<sub>2</sub> ve NO<sub>3</sub> numunelerinin farklı tarama hızlarındaki kapasitans değerleri (F/g)

Sonuçlar						
gram	V (tarama hızı) V/s	0,0050	0,0100	0,0200	0,0400	0,0500
0,00848	NO <sub>2</sub> _PPy	44,66	38,44	32,72	27,54	23,29
0,01096	NO <sub>3</sub> _PPy	28,04	25,92	22,55	17,29	15,28



Şekil 3.2 a) 20 mV tarama hızında PPy katkılı ve katkısız NO<sub>2</sub> CV grafiği, b) 20 mV tarama hızında PPy katkılı ve katkısız NO<sub>3</sub> CV grafiği, c) 5-10-20-40-50mV tarama hızında PPy katkılı NO<sub>2</sub> grafiği, d) 5-10-20-40-50mV tarama hızında PPy katkılı NO<sub>3</sub> grafiği

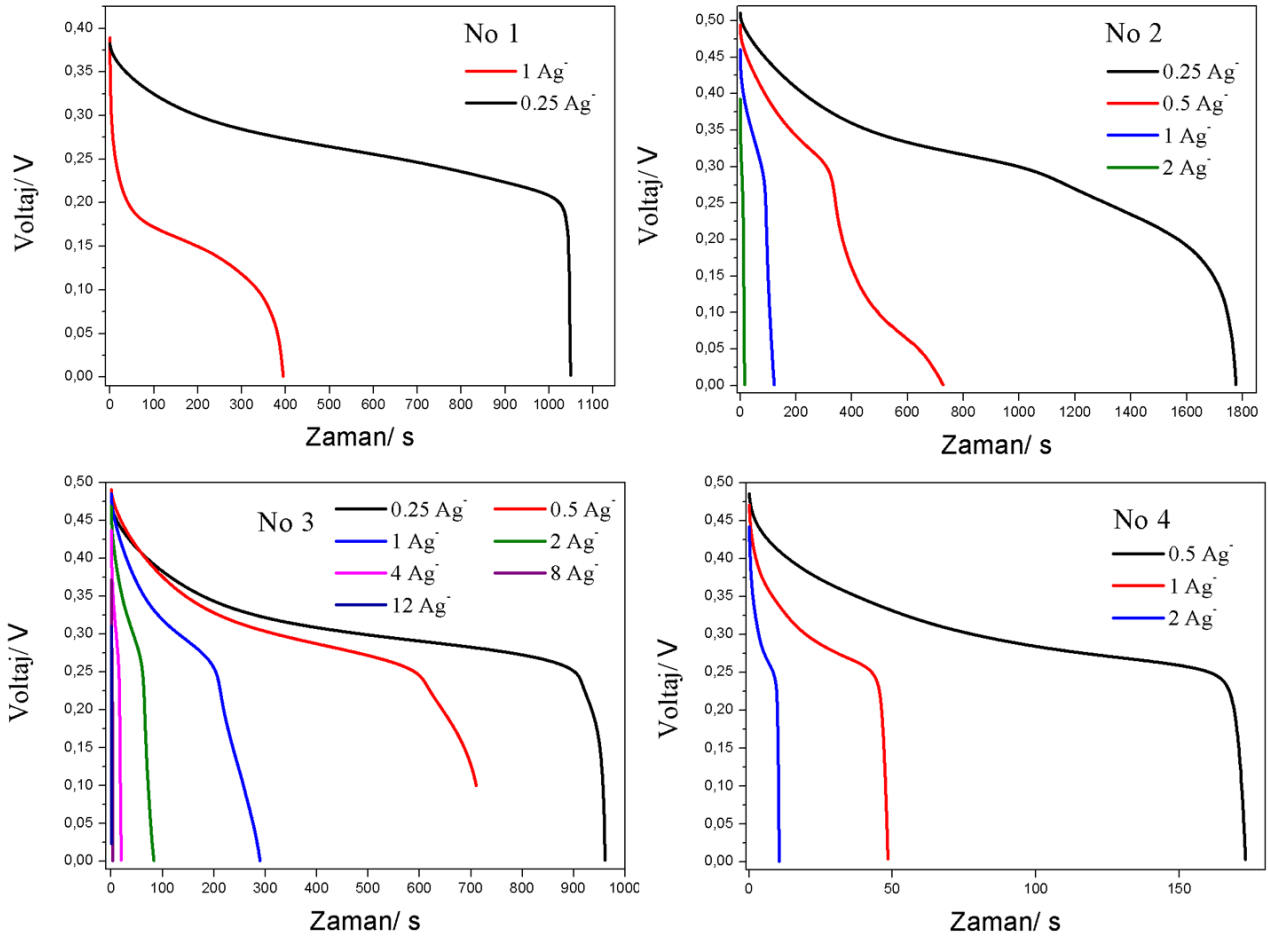
### 3.2. Galvanostatik Şarj / Deşarj Testi (GCD) Bulguları

Ni<sub>0,85-x</sub>Co<sub>0,15</sub>Mg<sub>x</sub>(OH)<sub>2</sub> (NiCoMg) olarak hazırlanan dört farklı gruptaki numunelere 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8 ve 12 sabit akım yoğunlukları uygulanarak GCD ölçümleri gerçekleştirildi. Elde edilen GCD grafikleri Şekil 3.3' te ve dört farklı numune grubuna ait 1 A/g sabit akım

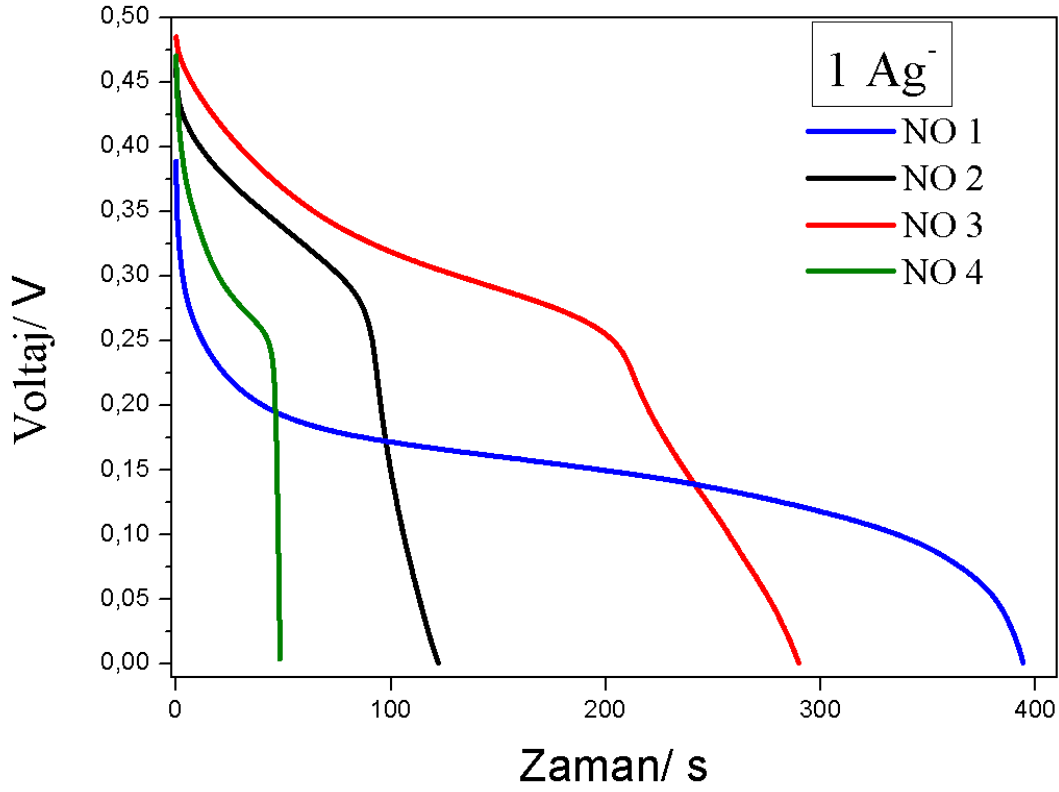
yoğunluğu altındaki karşılaştırmalı grafiği Şekil 3.4’ te verilmiştir. Uygulanan sabit akım değerleri azaldıkça kapasitans değerlerinde artış gözlenmektedir. Yapılan GCD ölçümleri sonucunda elde edilen en yüksek kapasitans değeri 0,25 A/g’ de 86,9 F/g olarak bulunmuştur. (Tablo 3.3)

Tablo 3.3 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin farklı akım yoğunluğu altında kapasitans değerleri (F/g)

Sonuçlar							
Ag-	0,25	0,5	1	2	4	8	12
Numune 1	68,5		101,2				
Numune 2	86,9	73,46	26,5	8,09			
Numune 3	51,09	72,33	59,76	35,47	17,97	6,45	3,09
Numune 4		17,81	10,28	4,72			



Şekil 3.3 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin farklı akım yoğunluğu altında GCD grafikleri a)NO1, b)NO2, c)NO3, d)NO4

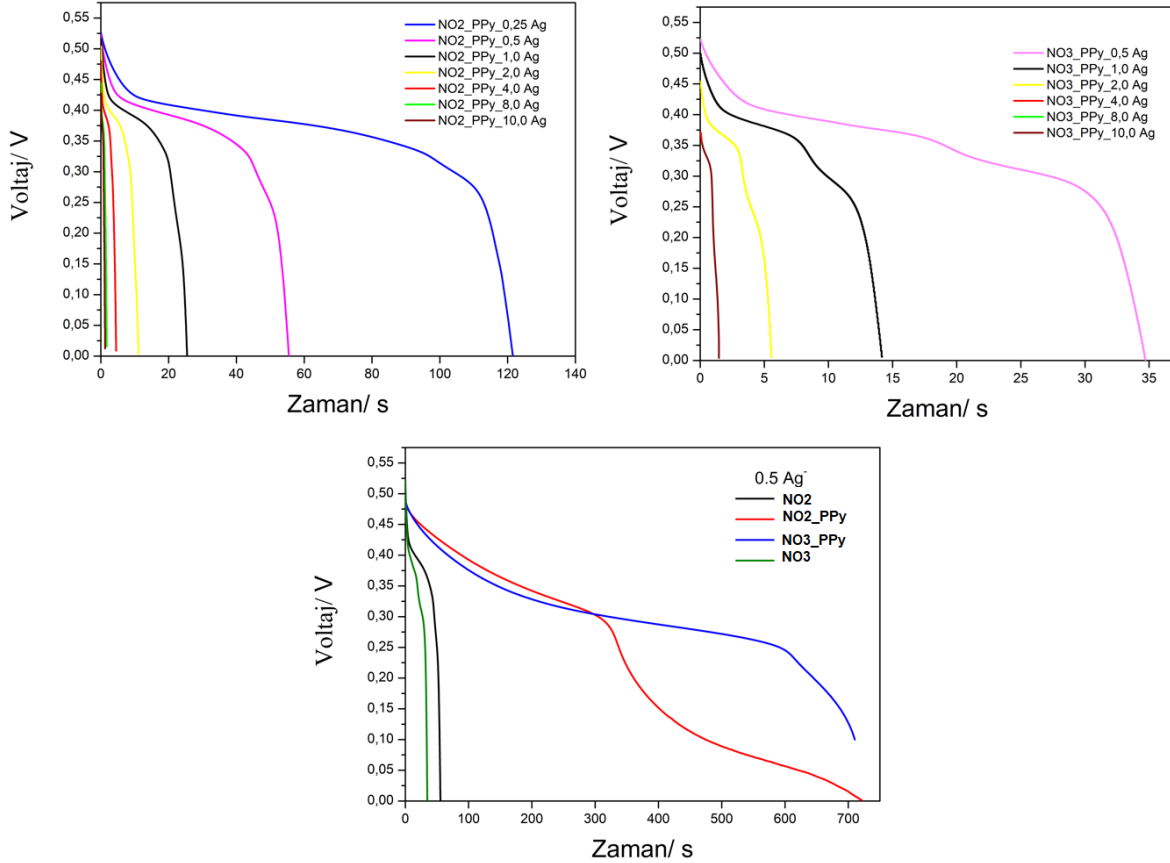


*Şekil 3.4 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin 1 akım/gram yoğunluğu altında karşılaştırmalı GCD grafiği*

GCD eğrileri başlangıçta hızlı bir düşüş, ardından yavaş bir düşüş ile iki bölümden oluşur. Eğrilerde ilk önce numunelerin sahip olduğu infrared (kızılötesi) kaynaklı düşüşler vardır. Bu düşüş, elektrot malzemeleri arasındaki zayıf elektrik teması ve ayrıca elektrolitlerin iç dirençlerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.5' te GCD testlerine tabi tutulan NO<sub>2</sub>\_PPy ve NO<sub>3</sub>\_PPy elektrotları 0,5 A/g sabit akım değeri altında, kompozit numunelerindeki iletken polimer PPy miktarındaki artışla şarj ve deşarj eğrilerinin eğimlerinin saf numune 2 ve numune 3 hidrosit numunelerine göre azalarak şarj deşarj sürelerini arttırdığını göstermektedir. Bu sonuç kapasitörün spesifik kapasitans değerinde artış olduğunu göstermektedir. Ayrıca uygulanan akım değeri azaldıkça spesifik kapasitans değerlerindeki artış dikkat çekmektedir. (Tablo 3.4)

Tablo 3.4 PPy katkılı NO<sub>2</sub> ve NO<sub>3</sub> numunelerinin farklı akım yoğunluğu altında kapasitans değerleri (F/g)

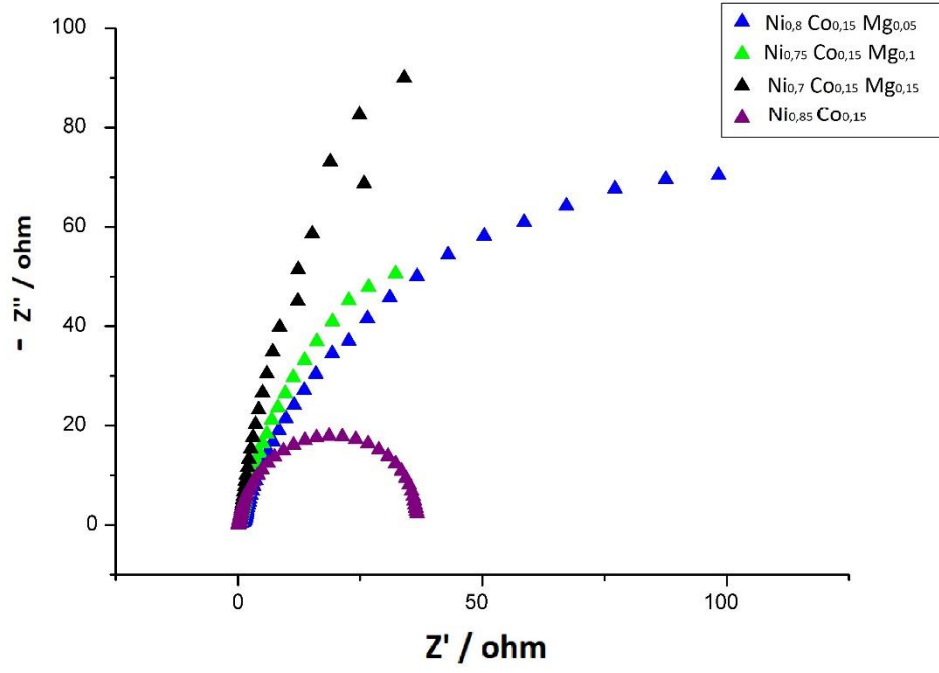
Sonuçlar							
Ag-	0,25	0,5	1	2	4	8	10
NO <sub>2</sub> _PPy	573,5	525,2	483,5	418,4	329	238,4	232
NO <sub>3</sub> _PPy		326,9	267,1	207,7	114,3	211,1	263,9



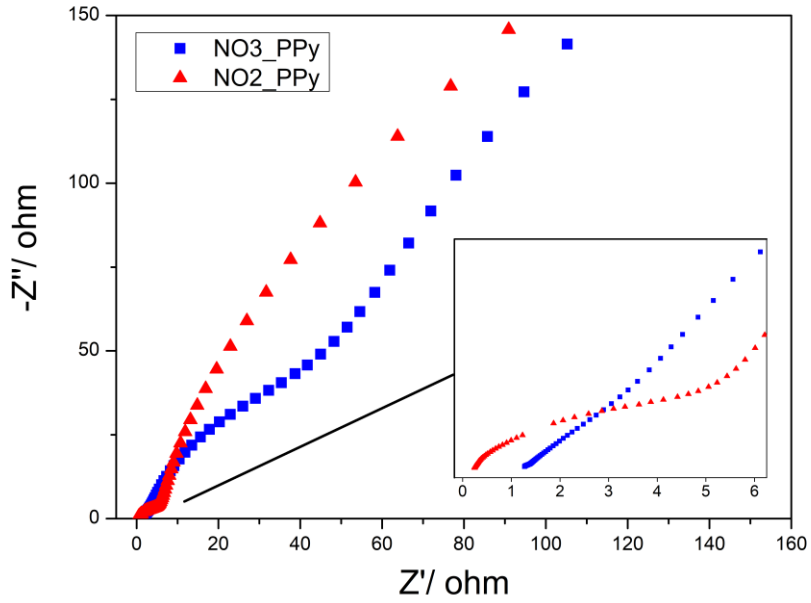
Şekil 3.5 a) PPy katkılı NO<sub>2</sub> numunesinin farklı akım yoğunluklarında GCD grafiği, b) PPy katkılı NO<sub>3</sub> numunesinin farklı akım yoğunluklarında GCD grafiği, c) PPy katkılı ve katkısız NO<sub>2</sub> ve NO<sub>3</sub> numunelerinin 0,5 akım/gram yoğunluğu altında karşılaştırmalı GCD grafiği

### 3.3. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Bulguları

EIS ölçümleri tüm elektrotlar için 3 M KOH çözeltisi içerisinde geniş bir frekans aralığında 0,01 ila 100 kHz, küçük bir genlikte  $\pm 5$  ila  $\pm 10$  mV açık devre potansiyeli uygulanarak Nyquist eğrileri elde edilmiştir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 karşılaştırıldığında PPy etkisi ile EIS değerlerinde enerji yoğunluğunun artarken direncin azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.6 Dört farklı derişim ve kütle ağırlığına sahip numunelerin elektrokimyasal empedans spektrum grafiği



Şekil 3.7 PPy katkıli NO<sub>2</sub> ve NO<sub>3</sub> numunelerinin elektrokimyasal empedans spektrum grafiği

#### 4. SONUÇLAR

Günümüzde enerji depolama aygıtlarına olan talep artışından dolayı süperkapasitörlere olan ilgi ve araştırmalar önem kazanmıştır. Bu amaçla dört farklı derişim ve kütle birleşme oranlarına sahip NiO, CoO ve MgO hidroksit malzemelerin sentezinden sonra sıvı elektrolit çözeltisi içinde CV, GCD ve EIS yöntemleri kullanılarak elektrokimyasal ölçümleri yapılmıştır. Numune 2 ve numune 3 hidroksit malzeme grubu ayrı ayrı iletken polimer PPy ile kompozit numune haline getirilerek PPy' nin kapasitif davranış üzerine etkisi ve çalışma uyumu yine CV, GCD ve EIS test yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kompozit numunelerde, PPy katkısıyla saf hidroksit numunelere oranla daha fazla yük biriktirilmesi sağlanmıştır. Her ne kadar deneysel sonuçlarda görülen sapmalar elektrotlar hazırlanırken optimum koşulların sağlanamamasından kaynaklansa da 2 numaralı numune grubu olarak sentezlenen ve sonrasında PPy katkılanan Ni<sub>0,75</sub> Co<sub>0,15</sub> Mg<sub>0,10</sub> numunesinin elektrokimyasal test çıktıları CV' de 3,4 kat; GCD' de 6,6 kat ve EIS' de 3 kat daha güçlü olacak şekilde performans artırdığı gözlemlenmiştir. PPy katkılı kompozit numunelerin (özellikle NO<sub>2</sub>) iyi sonuçlar sergileyerek kapasitansı, şarj deşarj süresini ve enerji depolamasını iyileştirerek umut verici sonuçlar ortaya koyduğu tablo ve grafiklerde belirgin şekilde görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] Bryan, B. P., Andrews, J. A., *Advence in Flywell Energy Storages Systems*. Tezas, 2004.
- [2] Achilleos, D.S., Hatton T.A., Surface design and engineering of hierarchical hybrid nanostructures for asymmetric supercapacitors with improved electrochemical performance. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015. 447(0): p. 282-301.
- [3] González, A., et al., Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. 58: p. 1189-1206.
- [4] Béguin, F., et al., Supercapacitors: Carbons and Electrolytes for Advanced Supercapacitors (*Adv. Mater.* 14/2014). *Advanced Materials*, 2014. 26(14): p. 2283-2283.
- [5] Pandolfo, G.A., Hollenkamp, F.A., Carbon properties and their roles in supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 2006. 157: p. 11-27.
- [6] Wang, G., Zhang L., A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors. *Chemical Society Reviews*, 2012. 41(2): p. 797-828.
- [7] Simon, P., Gogotsi, Y., Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 2008. 7.
- [8] Chen, T. and Dai, L., Carbon nanomaterials for high-performance supercapacitors. *Materials Today*, 2013. 16 (7–8): p. 272-280.
- [9] Béguin, F. and Frackowiak, E., *Carbons for electrochemical energy storage and conversion systems*. CRC Press, 2009.
- [10] Xu, G., Nie, P., Dou, H., Ding, B., Li, L., Zhang, X., Exploring metal organic frameworks for energy storage in batteries and supercapacitors. *Materials Today*, 2017. 20(4): p.191-209.
- [11] Besenhard, J.O., *Handbook of battery materials*. John Wiley & Sons, 2008.
- [12] Sahay, K., Dwivedi, B., Supercapacitors Energy Storage System for Power Quality Improvement: An Overview. *J. Electrical Systems*, 2009. p. 1-8.
- [13] Chen, W.-C., Wen, T.-C., Electrochemical and capacitive properties of polyaniline implanted porous carbon electrode for supercapacitors. *J. Power Sources*, 2003. 117(1-2): p.273-282.
- [14] Wang, Y.-L., Zhao, Y.-Q., Xu, C.-L., May 3D nickel foam electrode be the promising choice for supercapacitors? *J. Solid State Electrochem*, 2011. 16(3): p.829-834.
- [15] Chee, W.K., Lim, H.N., Harrison, I., Chong, K.F., Zainal, Z., Ng, C.H., Huang, N.M., Performance of Flexible and Binderless Polypyrrole/Graphene Oxide/Zinc Oxide Supercapacitor Electrode in a Symmetrical Two-Electrode Configuration. *Electrochim Acta*, 2015. 157: p. 88-94.
- [16] Brousse, T., Belanger, D., Long, J.W., To Be or Not To Be Pseudocapacitive? *J. Electrochem. Soc.*, 2015. 162(5): p. A5185-A5189.
- [17] Wang, G., Zhang, L., Zhang, J., A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors. *Chem. Soc.*, 2012. Rev. 41(2): p. 797-828.
- [18] Peng, H., Ma, G., Ying, W., Wang, A., Huang, H., Lei, Z., In situ synthesis of polyaniline/sodium carboxymethyl cellulose nanorods for high-performance redox supercapacitors. *J. Power Sources*, 2012. 211: p. 40-45.

- [19] Sun, G., Zhang, X., Lin, R., Yang, J., Zhang, H., Chen, P., Hybrid fibers made of molybdenum disulfide, reduced graphene oxide, and multi-walled carbon nanotubes for solid-state, flexible, asymmetric supercapacitors. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015. 54(15): p. 4651–4656.
- [20] Dubal, Deepak P., Gund, G. S., Lokhande, C. D., Holze, R., CuO cauliflowers for supercapacitor application: Novel potentiodynamic deposition. *Materials Research Bulletin*, 2013. 48(2): p. 923–928.
- [21] Godillot, G., Guerlou-Demourgues, L., Taberna, P.-L., Simon, P., Delmas, C., Original Conductive Nano-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Investigated as Electrode Material for Hybrid Supercapacitors. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2011. 14(10):A139.
- [22] Iro, Z. S., Subramani, C., Dash, S. S., A brief review on electrode materials for supercapacitor. *International Journal of Electrochemical Science*, 2016. 11(12): p. 10628–10643.
- [23] Sharma, R. K., Rastogi, A. C., Desu, S. B., Manganese oxide embedded polypyrrole nanocomposites for electrochemical supercapacitor. *Electrochimica Acta*, 2008. 53(26): p. 7690–7695.
- [24] Liu, D.-Q., Yu, S.-H., Son, S.-W., Joo, S.-K., Electrochemical performance of iridium oxide thin film for supercapacitor prepared by radio frequency magnetron sputtering method. *ECS Transactions*, 2008. 16(1): p.103–109.
- [25] Wang, Yan, Guo, J., Wang, T., Shao, J., Wang, D., Yang, Y.-W., Mesoporous Transition Metal Oxides for Supercapacitors. *Nanomaterials*, 2015. 5(4): p. 1667–1689.
- [26] Xiong, X., Ding, D., Chen, D., Waller, G., Bu, Y., Wang, Z., Liu, M., Three-dimensional ultrathin Ni(OH)<sub>2</sub> nanosheets grown on nickel foam for high-performance supercapacitors. *Nano Energy*, 2015. 11: p. 154–161.
- [27] Li, Jinxiu, Yang, M., Wei, J., Zhou, Z., Preparation and electrochemical performances of doughnut-like Ni(OH)<sub>2</sub>–Co(OH)<sub>2</sub> composites as pseudocapacitor materials. *Nanoscale*, 2012. 4(15): p. 4498–4503.
- [28] Carmezim, M. J., Santos, C. F., *Electrolytes in Metal Oxide Supercapacitors*, Elsevier, 2017.
- [29] Yu, Z., Tetard, L., Zhai, L., Thomas, J., Supercapacitor electrode materials: nanostructures from 0 to 3 dimensions, *Energy Environmental Science*, 2015. 8: p. 702.
- [30] Rakhi, R.B., Chen, W., Cha, D., Alshareef, H. N., Substrate dependent self-organization of mesoporous cobalt oxide nanowires with remarkable pseudocapacitance, *Nano Letters*, 2012. 12: p. 2559.
- [31] Wang, Y. G., Cheng, L., Xia, Y., Superior asymmetric supercapacitor based on Ni-Co-oxide nanosheets and carbon nanorods, *Journal Power Sources*, 2006. 153: p. 191.
- [32] Wang, L., Lin, C., Zhang, F., Jin, J., Phase Transformation guided single-layer b-Co(OH)<sub>2</sub> nanosheets for pseudocapacitive electrodes, *ACS Nano*, 2014. 8: p. 3724–3734.
- [33] Liu, J., Jiang, J., Cheng, H., Li, J., Zhang, H., Gong, H., Fan, J., Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Nanowire@MnO<sub>2</sub> Ultrathin Nanosheet Core/Shell Arrays: A New Class of High-Performance Pseudocapacitive Materials, 2011. *Advanced Materials*, 23: p. 2076.
- [34] Xu, J., Wang, Q., Wang, X., Xiang, Q., Liang, B., Chen, D., Shen, G., Flexible asymmetric supercapacitors based upon Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub> nanorod//RuO<sub>2</sub> nanosheet arrays on carbon cloth, *ACS Nano*, 2013. 7: p. 5453.

- [35] Lien, C. H., , Hu, C. C., Hsu, C. T., , Wong, D. S., High-performance asymmetric supercapacitor consisting of Ni–Co–Cu oxy-hydroxide nanosheets and activated carbon, *Electrochemistry Communications*, 2013. 34: p. 323–326.
- [36] Rempp, P., Merrill, E.W., *Polymer Synthesis*, Hutting&Wepf., 1991. p. 320 – 331.
- [37] Saçak, M., *Polimer Kimyası 3. Baskı*, Ankara: Gazi Kitabevi, 2006. p. 1 – 3
- [38] Gerard, M.,Chaubey, A., Malhotra, B.D., Application of conducting polymers to Biosensors. *Biosensorsand Bioelectronics*, 2002. 17: p. 345-359.
- [39] Kanazawa, K. K., Diaz, A. F., Gill, W. D., Grant, P. M., Street, G. B., Gardini, G. P., Kwak, J. F., Polypyrrole: an electrochemically synthesized conducting organic polymer. *Synthetic Metals*, 1980. 1(3): p. 329–336.
- [40] Kumar, R., Singh, S., Yadav, B. C., *Conducting polymers: synthesis, properties and applications*. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2015. 2(11): p. 110–124.
- [41] Zhang, X., et al., Effect of aqueous electrolytes on the electrochemical behaviors of supercapacitors based on hierarchically porous carbons. *Journal of Power Sources*, 2012. 216(0): p. 290-296.
- [42] Xu, Z., Li, X., Sun, S., Wang, X., Zhang, Z., Li, H., Yin, S., High mass loading NiCoAl layered double hydroxides with interlayer spacing and interface regulation for high-capacity and long-life supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 2022. 546 (231982).
- [43] Pujari, R.B., Lokhande, V.C., Kumbhar, V.S., Chodankar, N.R., Lokhande, C.D., Hexagonal microrods architected MoO<sub>3</sub> thin film for supercapacitor application. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2015. 27(4): p. 3312-3317.
- [44] Zhong, C., Deng, Y., Hu, W., Qiao, J., Zhang, L., Zhang, J., A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors, *Chem. Soc. Rev.*, 2015. 44: p. 7484–7539. doi:10.1039/C5CS00303B.
- [45] Taberna, P.L., Portet, C., Simon, P., Electrode surface treatment and electrochemical impedance spectroscopy study on carbon/carbon supercapacitors, *Appl. Phys.*, 2006. 82: p. 639–646. doi:10.1007/s00339-005-3404-0.
- [46] Muzaffar, A., Ahamed, M.B., Deshmukh, K., Thirumalai, J., A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2019. 101: p. 123–145. doi: 10.1016/j.rser.2018.10.026.

## ÖZGEÇMİŞ

2012-2018	Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Lisans
2016	Politechnika Slaska, Malzeme Bilimi ve Metalürji, Erasmus
2016	TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü, Stajyer Mühendis
2017	Şişecam Elyaf Sanayi A.Ş, Stajyer Mühendis
2017	Mercedes-Benz Türk Hoşdere Otobüs Fabrikası, Stajyer Mühendis
2018-2019	Simeks Medical, Ar-Ge Mühendisi
2020-2021	Bimed Teknik Aletler, Ar-Ge Mühendisi
2021-2022	Samsung Electronics, Kalite Mühendisi
2021-2024	Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Polimer Bilimi ve Teknolojisi, Yüksek Lisans
2022-....	Ford Otosan, Kalite Mühendisi