



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KİMYA ANABİLİM DALI

**KARBON NANOTÜP/Nİ NANOPARTİKÜL
ELEKTROKATALİZÖRÜ ÜZERİNDE HİDROJEN GAZI
ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nesrin AYDIN ULUKUŞ

DANIŞMAN

Doç. Dr. Didem BALUN KAYAN

AKSARAY, 2021

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 172305421 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, Nesrin AYDIN ULUKUŞ tarafından hazırlanan “**KARBON NANOTÜP/Nİ NANOPARTİKÜL ELEKTROKATALİZÖRÜ ÜZERİNDE HİDROJEN GAZI ÜRETİMİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kimya Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Didem BALUN KAYAN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Prof. Dr. Meltem DÜDÜKCÜ

Mersin Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Doç. Dr. Talat BARAN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 03/02/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Doç. Dr. Mehmet Ali HİNİS
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Nesrin AYDIN ULUKUŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimde bana yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, verdiği emek, destek ve zor zamanlarımda beni anlayış ile karşılayan sabır ve sakinlik ile beni telkin eden değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Didem BALUN KAYAN'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Bana her zaman yardımcı olan ve zor günlerimde yanımda olan biricik eşim CAN ULUKUŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu hayatta beni yetiştirip bu günlere gelmemi sağlayan, dinleyen, desteğini hiç esirgemeyen, bu hayata erken gözlerini kapamış olsa da her zaman kalbimizde olan sevgili babacığım Erdem AYDIN'a ve anneciğim Fatma AYDIN'a sonsuz saygı ve teşekkürü borç bilirim.

Nesrin AYDIN ULUKUŞ

AKSARAY, 2021

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 Genel Bilgiler	3
2.1.1 Enerji kaynakları	3
2.1.1.1 Yenilenemeyen (birincil) enerji kaynakları	4
2.1.1.2 Yenilenebilir enerji kaynakları.....	4
2.1.1.3 Hidrojen enerjisi.....	5
2.1.2 Elektrokataliz	5
2.1.3 Katı elektrotlar	6
2.1.3.1 Karbon elektrotlar	7
2.1.4 Modifiye elektrotlar	7
2.1.5 Karbon nanotüpleri (KN)	8
2.1.5.1 Tek duvarlı karbon nanotüp(TDKN)	9
2.1.5.2 Çok duvarlı karbon nanotüpleri (ÇDKN)	10
2.2 Çalışmalarda Kullanılan Yöntemler.....	11
2.2.1 Dönüşümlü voltametri.....	11
2.2.2 Tafel polarizasyon eğrileri	11
2.2.3 Elektrokimyasal impedans spektroskopisi	14
2.2.4 Taramalı elektron mikroskobu	14
2.2.5 Enerji dağılım spektroskopisi.....	14
2.3 Önceki Çalışmalar	15
3. MALZEME VE YÖNTEM	19
3.1 Kullanılan Kimyasal Maddeler	19
3.1.1 Kullanılan malzemeler	19
3.1.1.1 Elektrokimyasal hücreler	19
3.1.1.2 Elektrotlar.....	20
3.1.2 Kullanılan cihazlar	20
3.1.2.1 Elektrokimyasal çalışma ünitesi.....	20
3.1.2.2 Taramalı elektron mikroskobu	21
3.1.2.3 Ultrasonik temizleyici	21
3.2 Yöntem	21
3.2.1 Kalem grafit elektrodun hazırlanması.....	21
3.2.2 ÇDKN'lerin saflaştırılması ve aktivasyonu	22
3.2.3 ÇDKN süspansiyonunun hazırlanması	22
3.2.4 ÇDKN süspansiyonunun kalem grafit elektroda uygulanması	23
3.2.5 ÇDKN /Ni kompozit yapısının hazırlanması	23
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	24
4.1. Elektrot Yüzeyinin Karakterizasyonu	24
4.2 Suyun Elektrolizi ile Hidrojen Oluşumunun İncelenmesi.....	27
4.2.1 Dönüşümlü voltametri çalışmaları	27

4.2.2 Tafel polarizasyon eğrileri	29
4.2.3 Elektrokimyasal impedans spektroskopisi	32
4.2.4 Stabilité çalışmaları	32
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	36
KAYNAKLAR	38
ÖZGEÇMİŞ	1



YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON NANOTÜP/Nİ NANOPARTİKÜL ELEKTROKATALİZÖRÜ ÜZERİNDE HİDROJEN GAZI ÜRETİMİ

Nesrin Aydın Ulukuş

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Didem BALUN KAYAN

ÖZET

Bu çalışmada, suyun elektroliziyle hidrojen gazı oluşumunda yüksek katalitik aktivite gösteren, yeni ve ekonomik bir elektrot malzemesinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Elektrot malzeme olarak, kalem grafit elektrot (KGE) yüzeyine çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKN) uygulanmış ve bu yüzey üzerine Ni nanopartiküller elektrodpozisyon yöntemiyle biriktirilerek ÇDKN/Ni nanokompozit yapısı elde edilmiştir. Elektrot yüzeylerinin özellikleri ve kimyasal kompozisyonları, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile enerji dağılım spektroskopisi (EDS) teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Geliştirilen elektrotların elektrokimyasal hidrojen oluşumundaki katalitik etkinlikleri, dönüşümlü voltametri (CV), Tafel polarizasyon eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) teknikleriyle incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen Enerjisi, Hidrojen Oluşumu Reaksiyonu, Çok Duvarlı Karbon nanotüp, Ni Nanopartikül, Nanokompozit.

Şubat, 2021; 41 sayfa

M.Sc. THESIS

**PRODUCTION OF HYDROGEN GAS ON THE CARBON NANOTUBE/NI
NANOPARTICULAR ELECTROCATALYZER**

Nesrin Aydın Ulukuş

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Chemistry**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Didem BALUN KAYAN

ABSTRACT

In this study, it is aimed to develop a new and economical electrode material which shows high catalytic activity in hydrogen gas formation by electrolysis of water. As the electrode material, a multi-walled carbon nanotube (MWCNT) was applied to the pencil graphite electrode (PGE) surface and Ni nanoparticles were deposited on this surface by electrodeposition method to obtain the MWCNT/Ni nanocomposite structure. The properties and chemical compositions of the electrode surfaces were investigated by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersion spectroscopy (EDS) techniques. The catalytic activities of the developed electrodes for the electrochemical hydrogen formation were investigated by cyclic voltammetry (CV), Tafel polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques.

Keywords: Hydrogen Energy, Hydrogen Evolution Reaction, Multi-Walled Carbon Nanotube, Ni Nanoparticle, Nanocomposite.

February, 2021; 41 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Grafit elektrodun yapısı	7
Şekil 2.2. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler.....	9
Şekil 2.3. Tek duvarlı karbon nanotüpler.....	10
Şekil 2.4. Çok duvarlı karbon nanotüp	11
Şekil 3.1. Elektrokimyasal hücre standı.....	19
Şekil 3.2. Kalem grafit elektrot.....	20
Şekil 3.3. Ultrasonik temizleyici.....	21
Şekil 3.4. ÇDKN'lerin modifikasyonu.	22
Şekil 3.5. Modifiye edilmiş ÇDKN'lerin FT-IR spektrumu.....	22
Şekil 4.1. a) Çıplak KGE, b) KGE/ÇDKN elektrot yüzeylerinin tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.	24
Şekil 4.2. a) KGE/ÇDKN, b) KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit yapılarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.	25
Şekil 4.3. a) KGE/ÇDKN, b) KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit yapılarının EDS analizleri.	26
Şekil 4.4. KGE, KGE/ÇDKN ve KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrotların 0,5 M H ₂ SO ₄ içerisinde kaydedilen dönüşümlü voltamogramları ($v=10\text{mV.s}^{-1}$).....	28
Şekil 4.5. KGE, KGE/ÇDKN ve KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrotların 0,5 M H ₂ SO ₄ içerisinde kaydedilen Tafel diyagramları ($v=1\text{mV.s}^{-1}$).	29
Şekil 4.6. KGE, KGE/ÇDKN ve KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrotların 0,5 M H ₂ SO ₄ içerisinde -0,6 V'ta kaydedilen Nyquist diyagramları.	32
Şekil 4.7. KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrodun 0,5 M H ₂ SO ₄ içerisinde farklı potansiyellerde kaydedilen Nyquist diyagramları.	33
Şekil 4.8. KGE/ÇDKN/Ni nanopartikül elektrodun 0,5 M H ₂ SO ₄ elektrolit ortamında kaydedilen ilk ve 1000 döngü sonucundaki dönüşümlü voltamogramları.....	34
Şekil 4.9. KGE/ÇDKN/Ni nanopartikül elektrodun 0,5 M H ₂ SO ₄ elektrolit ortamında -0,7V'ta kaydedilen kronoamperomogramı	35

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin özellikleri	11
Çizelge 4.1. KGE, KGE/ÇDKN ve KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrotların Tafel eğrilerinden hesaplanan elektrokimyasal parametreleri.....	30
Çizelge 4.2. Bazı katalizörlerin hidrojen oluşum reaksiyonu için hesaplanan elektrokimyasal parametreleri.	31



SİMGELER VE KISALTMALAR

AAS	Atomik Absorpsiyon Spektroskopisi
Au	Altın
CV	Dönüşümlü Voltametri
CA	Kronoamperometri
ÇDKN	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
DMF	Dimetilformamit
E	Elektrot Potansiyeli
E_{eq}	Denge Potansiyeli
EİS	Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
H₂SO₄	Sülfürik Asit
HER	Hidrojen Oluşum Tepkimesi
HNO₃	Nitrik Asit
i₀	Değişim Akım Yoğunluğu
KN	Karbon Nanotüp
KOH	Potasyum Hidroksit
mV	Milivolt
Na₂HPO₄	Disodyum Hidrojen Fosfat
Ni	Nikel
NiSO₄	Nikel Sülfat
nm	Nanometre
KGE	Kalem Grafit Elektrot
rGO	İndirgenmiş Grafen Oksit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TDKN	Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
V	Volt
XPS	X-Ray Fotoelektron Spektroskopisi
XRD	X-ışını Kırınımı
η	Aşırı Gerilim
α	Simetri Faktörü (transfer katsayısı)
μL	Mikrolitre
°C	Derece Santigrat

1. GİRİŞ

Günümüzde, nanoteknoloji ile üretilen pek çok üründe karbon nanotüpler kullanılmaktadır. Çapları birkaç nanometre ile uzunlukları milimetrelerle ifade edilen karbon nanotüpler, silindirik yapıdadırlar. Çaplarının milyonlarca katı uzunluklara ulaşabilen karbon nanotüpler, mekanik dayanıklılık, elektrik ve ısı iletkenliği gibi özellikleriyle de başka malzemelere göre oldukça avantajlıdırlar.

Bir elementin atomlarının farklı şekillerde bağlanarak farklı yapılar oluşturmalarına allotrop denir. Karbonun allotroplarından biri grafitir. Tek bir karbon atomu kalınlığındaki grafit katmanlarına ise grafen denir. Karbon atomlarının birbirlerine altıgen olarak bağlı olduğu grafen, tüp şeklinde katlanarak, tüp eksenine paralel veya spiral şekilde desenler oluşturabilirler. Karbon nanotüpler tek duvarlı veya iç içe geçmiş tüpler olarak çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKN) olabilmektedirler. Nanotüplerin çapı veya altıgenlerin dizilimi, nanotüplerin elektrik akımını iletme özelliklerini etkiler. Çelikten daha sağlam ve çok daha hafif olan nanotüplerin sayesinde, çok küçük boyutlarda elektronik cihazları üretilmek mümkün olmaktadır. Karbon nanotüplerin elektrokimya alanında sıklıkla kullanılmalarının temel nedeni modifikasyon işlemlerine uygun olmaları, duyarlı ve hassas sonuçlar verebilmeleri aynı zamanda kararlı olmalarıdır. Ayrıca oldukça hafif olmaları ve kuvvetli bağ yapabilmeleri sebebiyle elektrokimyada modifikasyon işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar (Iijima, 2002; Luo vd., 2008).

Fosil yakıtlar (petrol, doğal gaz, kömür vb.) günümüzde dünya enerji talebinin büyük bir kısmını karşılamakla beraber, hızla tükenmekte, ayrıca yanmaları sonucunda ozon delikleri, sera etkisi, asit yağmurları ve bunlara bağlı olarak çevre kirliliği gibi yaşam için büyük sorunlar oluşturmaktadırlar. Birincil enerji kaynağı olarak nitelendirilen bu kaynaklara alternatif olarak, yenilenebilir enerji teknolojileri için araştırma-geliştirme çalışmaları ve uygulamaları hızla ilerlemektedir. Bununla birlikte son yıllarda, alternatif enerji kaynakları araştırmalarında, üzerinde en çok durulan enerji kaynağı, hidrojen olup, bundaki en önemli sebep, hidrojenin sınırsız, temiz ve oldukça verimli olmasıdır. Hidrojen, ideal yakıttan istenen tüm özellikleri yerine getiren bir yakıt olup, çevrim veriminin düşük olması ve depolanamaması gibi elektrik enerjisinin dezavantajlarını giderecek ve yeni enerji kaynaklarıyla tüketim yerleri arasında köprü kurarak kullanımını yaygınlaştıracak bir ara sistemdir.

Doğadaki temel enerji kaynakları birincil enerji kaynaklarıdır. Birincil enerji kaynaklarının fiziksel durumu farklı olacak biçimde dönüştürülmesiyle de elde edilen ikincil enerjilere enerji taşıyıcısı denmektedir. Elektrik, yüzyılı aşkın süredir kullanılan bir enerji taşıyıcısıdır. Elektrikten sonra teknolojinin geliştirdiği yeni bir enerji taşıyıcısı olan hidrojen, önümüzdeki yüzyılın yakıtı olarak kabul edilmektedir (Nguyen vd., 2018; Balun Kayan vd., 2018).

Suyun elektrolizi ile hidrojen eldesi, alternatif enerji kaynağı olarak büyük önem taşıyan hidrojenin elde edilme yöntemleri arasında önemli bir yere sahiptir. Hidrojenin elde edildiği diğer yöntemlerle kıyaslandığında, daha basit ve daha saf hidrojenin üretildiği suyun elektroliziyle hidrojen üretiminin dezavantajı, elektrokimyasal sistemde meydana gelen aşırı gerilim ve buna bağlı olarak yöntemin maliyetidir. Elektrot materyali olarak hidrojen oluşumunda yüksek katalitik aktivite gösteren materyaller olarak kullanılan platin ve platin grubu metallerinin kullanımı da yöntemin uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. Bu sebeple aşırı gerilimin düşük olduğu, hidrojen oluşumunda yüksek katalitik aktivite gösteren yeni elektrot malzemelerin geliştirilmesi oldukça önemlidir.

Buradan yola çıkılarak, bu tez çalışmasında suyun elektrolizinden hidrojen elde etmek amacıyla, etkin ve ekonomik bir elektrot materyali geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bunun için literatürde ilk defa, oldukça ucuz bir elektrot malzemesi olarak kalem grafit elektrodun (KGE) yüzeyi ÇDKN ile kaplanmış, elde edilen yüzey üzerine hidrojen oluşumunda yüksek katalitik aktivite gösteren nikel (Ni) metalinin nano düzeyde biriktirilmesiyle yeni bir kompozit elektrot geliştirilmiştir. Geliştirilen elektrodun yüzey özellikleri karakterize edilmiş, suyun elektrolizi ile hidrojen gazı oluşumundaki katalitik etkinliği elektrokimyasal yöntemlerle incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Genel Bilgiler

Enerji, günlük yaşamın her alanında insanların ihtiyaçlarının karşılanması ve yaşamın sürdürülebilmesi için gerekli olan kaynaktır. Hızla artış gösteren dünya nüfusunun ve buna bağlı olarak artan sanayinin enerji gereksinimleri mevcut kaynaklarla karşılanamamaktadır. Bununla birlikte enerji tüketimi ve üretimi arasındaki fark gün geçtikçe artış göstermektedir. Dünya enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılan petrol, doğalgaz, kömür ve nükleer enerji gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarının çevreyi ve insanlığın sağlığını etkilediği bilinmektedir. Bu yüzden verimli, ucuz ve temiz alternatif enerji kaynakları dünya çapında büyük ilgi gören bir araştırma konusudur.

Enerji üretimi ve kullanımı sırasında yaşanan çevre sorunları, eski teknolojilerin terk edilmesinin esas nedenlerinden birisidir. Kömür, petrol ve doğalgaz santrallerinin kuruldukları bölgede yerel olarak oluşan tahribatların yanında, küresel olarak tüm dünyayı tehdit eden etkiler de bulunmaktadır. Fosil yakıtlar yakıldığında atmosfere yayılan karbon dioksit, azotoksit, kükürt dioksit, toz ve kurum, yakın çevreyi kirleterek bazı canlıların ölümüne yol açarken, karbon dioksit ve benzeri sera gazları küresel iklim değişikliğine yol açarak tüm dünyada canlıların yaşamını tehdit etmektedir (Gençoğlu, 2002).

2.1.1 Enerji kaynakları

Yeterli ve çevresel değerleri tehdit etmeyecek düzeyde enerji sağlama ve kullanma, toplumun en önemli sorunlarından birisidir. Yenilenemeyen ve sınırlı olan enerji kaynakları olarak tanımlanan kömür, petrol, doğal gaz ve nükleer enerjinin kullanımı, birçok açıdan çevresel olumsuzluğu beraberinde getirmektedir. Fosil yakıtların kullanımıyla elektrik üretilen termik santrallerin oluşturduğu katı atıklar ise toprak kirliliğine neden olmaktadır.

Alternatif enerji olarak tanımlanan yenilenebilir enerji kaynakları, yerel olmaları nedeniyle, enerji ithalatına olan bağımlılığın azalmasına ve istihdamın gelişmesine önemli oranda katkı sunmaktadırlar (Varınca ve Gönüllü, 2006).

Enerji kaynakları yenilenemeyen (birincil) ve yenilenebilir (ikincil) enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.1.1.1 Yenilenemeyen (birincil) enerji kaynakları

Yenilenemeyen enerji kaynakları, insanlar tarafından sürekli tüketilen, tüketildikçe çevreye zarar veren ve zaman içerisinde azalan fosil enerji kaynaklarıdır. Çağımızda enerji ihtiyacının çoğunun karşılanmasında direkt olarak veya elektrik enerjisine dönüştürülmede fosil kökenli enerji kaynakları yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Fosil kaynaklı enerji üretimi ve kullanımının, insan ve çevre sağlığı üzerinde birçok olumsuz etkiler meydana getirdiği bilinmektedir (Selici vd., 2006).

Yenilenemeyen enerji kaynakları arasında sayılan kömür, doğal gaz ve petrolün en dikkat çekici özellikleri, tükenir olmalarıdır. Yenilenemez enerji kaynaklarının dönüşümü, milyonlarca yıl ile ifade edilen uzun zamanlar almaktadır.

Fosil yakıtları temel alan enerji kullanımı, yakıt konusunda dışa bağımlılık, buna bağlı olarak yüksek ithalat giderleri ve çevre sorunları gibi önemli olumsuzlukların yanında, dünya fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini arttırmaktadır (Kumbur vd., 2005).

2.1.1.2 Yenilenebilir enerji kaynakları

Enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir şekilde kendini yenileyebilen enerji türüne yenilenebilir enerji denir. Güneş, rüzgâr, jeotermal, hidroelektrik, biyokütle ve hidrojen enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları olup, bu enerjilerin, birincil enerji türleri gibi bitip tükenme riskleri bulunmamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlara göre avantajları, çevreyi kirletmemeleri, doğaya ve canlılara dost olmalarıdır. Buna karşılık dezavantajları, coğrafi olarak her bölgede bol ve homojen olarak bulunmamaları, ayrıca yoğun enerji formlarında olmamaları nedeniyle geniş alanlardan toplanmak zorunda olmalarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları, süreklilikleri nedeniyle sürdürülebilir olmalarının yanında, dünyanın her ülkesinde bulunabilmeleriyle de büyük önem taşımaktadırlar (Kumbur vd., 2005).

2.1.1.3 Hidrojen enerjisi

Hidrojen atomu 1500'lü yıllarda bulunmuş ve 1700'lü yıllarda ise hidrojenin yanabilme özelliği fark edilmiştir. Evrenin temel enerji kaynağı olan hidrojen, doğal olarak var olan bir kaynak değildir ancak kolay bir şekilde elde edilebilen sürdürülebilir ve alternatif bir kaynaktır.

Hidrojen evrende en basit ve en çok bulunan element olup renksiz, kokusuz, havadan 14,4 kez daha hafif ve zehirsiz bir gazdır. Hidrojen, tüm yakıtlar içinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahip gazdır. Bir kg hidrojen 2,1 kg doğalgaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Kolay ve güvenli bir şekilde taşınabilmesi nedeniyle enerji kaybı az olan hidrojen, doğada bileşikleri halinde bulunmaktadır ve en çok bilinen bileşiği sudur (URL-1).

Hidrojen fosil kaynaklardan, doğalgazın buhar reformasyonundan, biyokütleden, termokimyasal, fotokatalitik ve suyun elektrolizi yöntemleriyle elde edilmektedir. Günümüzde en yoğun üretim yöntemi, doğal gazın buhar reformasyonu olup bahsedilen yöntemler arasında, hidrojenin en saf ve en basit üretim yolu suyun elektrolizidir. Suya elektrik akımı uygulanmasıyla hidrojen ve oksijene ayrıştırılması işlemine “suyun elektrolizi” denir. Elde edilen hidrojenin uygun şekilde yakılmasıyla atık ürün olarak yalnızca su açığa çıkmaktadır.

Hidrojen, suyun elektroliziyle yüksek saflıkta üretilmesine rağmen, bu yöntem yüksek elektrik enerjisi tüketimi ve düşük verimlilik nedeniyle ekonomik bir yöntem olarak değerlendirilmemektedir. Ancak uygulanan elektrik enerjisini düşürmek dolayısıyla elektrot verimliliğini arttırmak amacıyla son yıllarda araştırmacılar bu konuda yoğun bir şekilde çalışmalar yapmaktadırlar (Balun Kayan vd., 2017).

2.1.2 Elektrokataliz

Kimyasal veya termodinamiksel olarak kendiliğinden gerçekleşmesi beklenen tepkimenin daha kolay oluşmasını sağlayan ve tepkimelerin hızlanmasını sağlayan maddelere katalizör denilmektedir.

Elektrokimyasal olayların katalizlenmesi, çözeltideki bir katalizör veya elektrot yüzeyindeki katalizörle gerçekleşmektedir. Elektrokimyasal tepkimelerde bu işlemi elektrot yapmaktadır.

Reaksiyona giren maddenin, yükseltgenme veya indirgenme olayları için elektrot yüzeyi ile etkileşime girdiği sistemler için elektrokataliz terimi kullanılmaktadır. Dolayısıyla yükseltgenme veya indirgenme için elektrot, reaksiyonun oluşabileceği bir ortamdır ve elektrot, çözünme ve madde iletimi olayları dışında değişmeden kalmaktadır. Bu nedenle bir elektrot, elektron (yük) aktarımı reaksiyonu için katalizör görevi gören bir malzemedir (Biryol ve Uslu, 1997).

Bir elektrokatalizörü karakterize eden en önemli parametrelerden biri, zamanla kararlı kalması diğeri, elektrodun aktif yüzey alanıdır. Bir elektrokatalizörün etkinliğini arttırmak için elektrodun yüzey alanını artırarak düşük aşırı gerilimlerdeki tepkime hızını yükseltmek en pratik yoldur.

2.1.3 Katı elektrotlar

Elektrokimyasal çalışmalarda kullanılan katı elektrotlar platin, altın, paladyum rutenyum gibi soy metaller, camı karbon, grafit ve çinko oksit, indiyum oksit, iridyum oksit gibi yarı iletken malzemelerdir. Katı elektrotların kullanıldığı voltametri haricinde özellikle indirgenme tepkimelerine oranla az incelenmiş olan yükseltgenme tepkimelerindeki rolü ile katı elektrotlar, birçok alanda başarıyla kullanılmaktadırlar (Tunçel vd., 1996).

Deney süresince elektrot yüzeyine adsorplanmış veya birikmiş safsızlıklardan dolayı katı elektrotlar kararsız davranış gösterebilmektedirler. Bu nedenle elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliği azalmaktadır. Bu sorunu gidermek amacıyla katı elektrotların yüzeyinin her ölçümden önce temizlenmesi gerekmektedir. Ön işlem adı verilen bu işlemler her elektrot materyali için kendine özgü olmaktadır (Wang vd. 1985; Fagan vd. 1985; Özkan vd. 1994).

2.1.3.1 Karbon elektrotlar

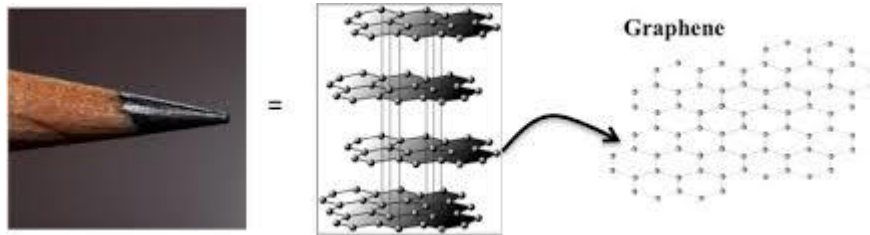
Katı elektrotlar içerisinde yer alan karbon elektrotların, hem yükseltgenme hem de indirgenme tepkimelerinde geniş potansiyel penceresine sahip olmaları, kimyasal olarak inert olmaları ve ucuz olmaları nedeniyle elektroanalitik alanında kullanımları oldukça yaygındır. Metal elektrotlarla karşılaştırıldığında, karbon yüzeylerde gözlenen elektron aktarım hızları daha yavaştır (Yılmaz, 2016).

Karbon elektrotlar; camsı karbon, karbon pasta, perde baskılı karbon, karbon-fiber ve kalem grafit olmak üzere oldukça çeşitlidirler.

2.1.3.1.1 Grafit karbon elektrotlar

Kurşun kalem olarak bilinen kalem uçları, doğal grafitin kil ve balmumu karışımı içerisine dağıtılıp, ardından ısıtılma işlemi uygulanmasıyla üretilir. Kil yerine selüloz gibi organik temelli materyal kullanılıp oksijensiz atmosferde yakıldığı zaman selüloz karbon şekline dönüşmektedir. Bu şekilde elde edilen yapı, son derece elastik bir yapıdır.

Grafit, elektriksel iletkenliğe ve oldukça düzenli bir yapıya sahip karbonun allotroplarından birisidir. Grafitte karbon atomları iki boyutlu düzlemde üst üste yığılmış grafen adı verilen tabakalar şeklinde yerleşmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Grafit elektrodun yapısı.

Tek atom kalınlığında, iki boyutlu malzeme olan grafen, üç boyutlu bir malzeme olan grafitin yapıtaşıdır. Bal peteği örgüsü yapısındaki grafen, sahip olduğu hegzagonal latiste sp^2 bağı ile sıra dışı elektriksel, ısıtılma, mekanik özellikleri ve hafifliğiyle son yıllarda yaygın olarak çalışılmaktadır (Şenel vd., 2018).

Elektrot olarak farklı sertlik ve çapta her yerde bulunabilen ticari mekanik kurşun kalem uçlarından yararlanılır. Kalem grafit elektrot, karbon pasta ve pirolitik karbon

kadar kırılğan olmayıp, camı karbon kadar sert bir yapıya sahiptir. Elektriksel olarak iletken, ucuz, inert ve modifikasyona uygun olması, elektrot materyali olarak kullanım alanlarını geliştirmiştir (Balun Kayan vd., 2017).

2.1.4 Modifiye elektrotlar

Elektrokimyada kullanılan elektrotların sınırlı olması nedeniyle elektrotların kimyasal veya elektrokimyasal nitelikleri değiştirilerek çalışma koşullarının geliştirilmesiyle modifiye elektrotlar hazırlanmaktadır. Elektrotların hepsi öncelikle elektronik olarak iletken malzemeler kullanılarak modifiye edilirler. Genel olarak, elektrokimyasal modifikasyonda kimyasal ve mekaniksel olarak kararlılıkları yüksek olduğu için platin, altın ve karbon, elektrot materyali olarak daha çok tercih edilmektedirler (Yılmaz, 2016).

Kimyasal olarak modifiye edilen elektrotların yalnız yüzeyinde değişiklik yapılmakta, elektrodun ana maddesi etkilenmemektedir. Modifikasyon ile elektrotların yüzeyleri istenilen tepkimelere uygun hale getirilerek, zamanla değişikliğe uğramayacak şekilde değiştirilmektedir. Bu konuda çok sayıda çalışma yapılmaktadır ve yüzey modifikasyonu geniş bir araştırma alanına sahiptir (Hu vd., 2004). Karbon elektrotların farklı şekillerde modifikasyonu mümkündür. Bunlar, bir katalizörün yüzeye fiziksel adsorpsiyonu veya belirli kimyasal grubun yüzeye bağlandığı kimyasal modifikasyondur.

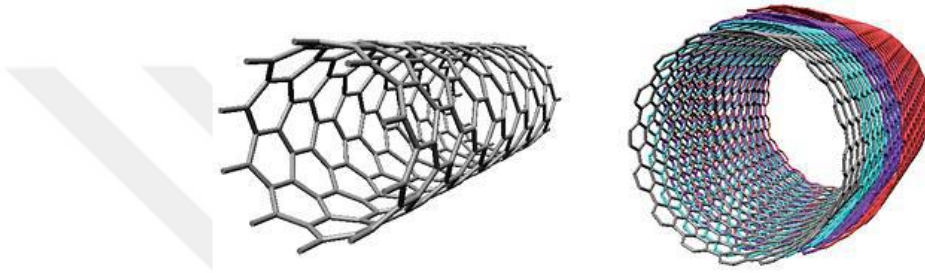
Modifiye elektrotlar, kolay değişebilen indirgenme-yükseltgenme yükü, kutuplanabilirlik ve geçirgenlik gibi ayarlanabilir fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Bunun yanı sıra, modifiye elektrotların elektrokimyasal yöntemlerle bir arada kullanılması, elektrosentez ve malzeme karakterizasyonu için de önemli uygulamalara zemin hazırlamaktadır. Modifiye edilen elektrotların kullanılacak proseste iyi bir elektrokatalitik özelliğe sahip olabilmesi, elektrot modifikasyonunun en önemli amacıdır.

2.1.5 Karbon nanotüpleri

İlk olarak 1991 yılında ortaya çıkan nanotüpler, ileri teknoloji ürünü malzemelerin üretiminde kullanılmaktadırlar. Sahip oldukları üstün özellikler nedeniyle üzerinde en çok çalışılan malzemeler arasında yer alan nanotüpler, birçok farklı yöntemle

sentezlenerek geniş kullanım alanı bulmaktadırlar. Karbon atomu, oluşturduğu farklı kristal biçimlerine göre elmas, grafit ve amorf karbon olmak üzere doğada üç allotropik formda bulunmaktadır. Karbonun yapay allotropları arasında ise camsı karbon, fullerenler (buckyball) ve karbon nanotüpler yer almaktadır.

Yalnız bir karbon atomundan meydana gelen bir grafen tabakasının, silindirik biçiminde katlanarak uçlarının birleştirildiği tek katmanlı yapı, karbon nanotüpü oluşturmaktadır. Grafen tabakasının tek tabaka olarak sarılmasıyla tek duvarlı karbon nanotüp (TDKN), çok tabakalı sarılmasıyla ÇDKN'ler elde edilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler.

ÇDKN'ten iyonlaştırma gibi çeşitli yöntemler kullanılarak TDKN elde edilmektedir. ÇDKN, TDKN'e göre çok daha kolay üretilebildiği için maliyet açısından çok daha uygundur.

Karbon nanotüplerin kullanımı çalışılmak amaçlanan madde ile doğrudan ilişkilidir. Karbon nanotüplerin nasıl kullanılacağı veya hangi türünün seçileceği tamamen seçilen madde ve deney şartlarına bağlı olarak değişmektedir. ÇDKN daha çok bağ yapabilme kapasitesine sahip olduğu için, adsorpsiyon özelliği yüksek olan maddeler açısından çok uygun olmayabilir. Bu durumda TDKN'ün kullanılması daha uygundur.

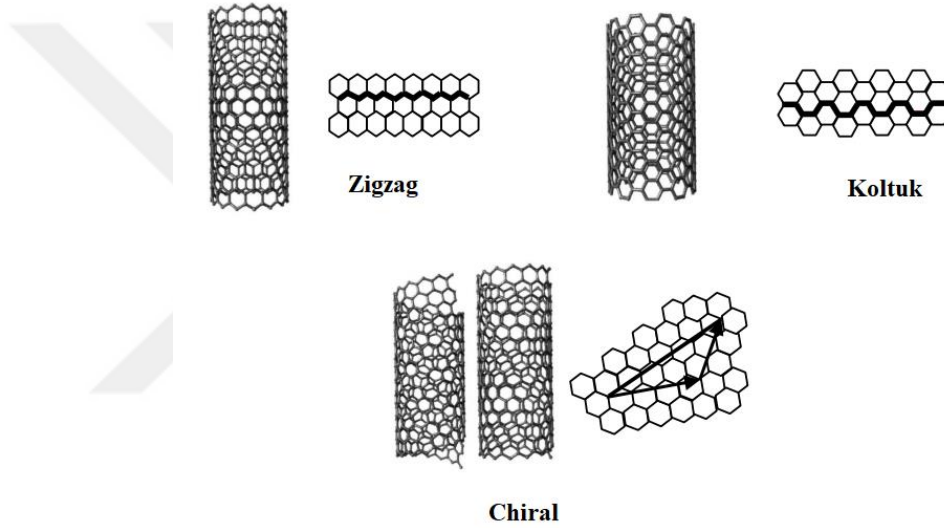
Karbon nanotüplerin elektrokimya alanında sıklıkla kullanılmalarının nedenleri, geniş yüzey alanına, yüksek adsorplama özelliğine sahip olmaları, modifikasyon işlemlerine uygun olmaları, duyarlı ve hassas sonuçlar verebilmeleri aynı zamanda kararlı olmalarıdır. Bunun yanında, dayanıklı, hafif, kuvvetli bağ yapabilmeleri ve elastik olmaları sebebiyle karbon nanotüplerin elektrokimyasal analizlerdeki önemi büyüktür. Elektrokimyasal çalışmalar, analizi yapılacak maddenin elektroaktif

olması, analizi yapılacak madde dışındaki bileşenlerin elektroaktivite göstermemeleri ve deneyde hataya sebebiyet vermemeleri gerekir.

Çapları nano boyutta olan bu nanotüpler, ayrıca asidik ve bazik ortamlara karşı oldukça dayanıklı olmaları nedeniyle geniş bir pH aralığında çalışılabilmeye olanak sağlamaktadırlar.

2.1.5.1 Tek duvarlı karbon nanotüp

TDKN'ler çapı 1 nm (10^{-9} m) ve boyu birkaç mikrometre (10^{-6} m) olabilen içi boş silindir şeklindeki yapılardır. Bu yapılar, grafitin tek bir katmanının yani grafen levhasının bir silindir şeklinde sarılmış hali olarak düşünülebilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Tek duvarlı karbon nanotüpler.

Karbon nanotüpler çok yüksek mekanik özelliklere sahip olup, özellikle elektriksel ve termal açıdan diğer karbon malzemelerden daha avantajlıdırlar. Bu özelliklerinden dolayı, kompozit malzemelerde, hidrojen enerjisi depolamada, biyoteknolojide, kaplamalar ve filmlerde, lifler ve mikro elektronikte geniş uygulama alanı bulmaktadırlar.

2.1.5.2 Çok duvarlı karbon nanotüp

ÇDKN'ler, birden çok grafen levhanın eş merkezli olacak şekilde iç içe geçmesiyle oluşmaktadırlar (Şekil 2.4). ÇDKN'lerin karbon duvarları arasındaki mesafe yaklaşık

0,34 nm'dir. Silindirik şekilde istiflenen grafen katmanları arasında van der Waals kuvvetleri etkindir.



Şekil 2.4. Çok duvarlı karbon nanotüp.

TDKN'ler için belirtilen özellikler ÇDKN'ler için de geçerlidir (Valcárcel vd., 2007). TDKN ve ÇDKN'lerin özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin özellikleri.

Özellik	TDKN	ÇDKN
Elektrik iletkenliği (S/cm)	10^2 - 10^6	10^3 - 10^5
Termal iletkenlik (W/(mK))	6000	2000
Termal genleşme katsayısı (K^{-1})	ihmal	ihmal
Havada termal kararlılık ($^{\circ}C$)	600	600

2.2 Çalışmalarda Kullanılan Yöntemler

2.2.1 Dönüşümlü voltametri

Dönüşümlü voltametri, elektrokimyasal bir hücre içerisinde uygun bir elektrolit çözeltisine daldırılmış çalışma, referans ve karşı elektrot olmak üzere üç elektrot sisteminin kullanıldığı bir potansiyel tarama tekniğidir. Belirli tarama hızlarında potansiyel değiştirilerek buna karşılık gelen akım şiddeti ölçülür ve elde edilen

diyagrama voltamogram denir. Dönüşümlü voltametri, elektroaktif türleri çalışmak için çok yönlü bir elektroanalitik tekniktir. Elektrokimyasal reaksiyondan önce veya sonra oluşan ardışık kimyasal reaksiyonların izlenmesinde, elektrot reaksiyonunda rol oynayan maddelerin yüzey adsorpsiyonu ve kinetiğinin belirlenmesinde, redoks reaksiyonlarının karakterizasyonunda, formal potansiyellerin tespitinde, elektrokimyasal reaksiyonların tersinirliğinin belirlenmesinde ve bir türün indirgenme-yükseltgenme mekanizmasının belirlenmesinde dönüşümlü voltametri tekniği kullanılır. Bir avantajı da, ileri taramalarda meydana gelen elektron transfer tepkimesinin ürünün ters taramada tekrar oluşmasıdır (Tural vd., 2003).

2.2.2 Tafel polarizasyon eğrileri

Saf hidrojen eldesi için kullanılan yöntemlerden birisi de suyun elektrolizi yöntemidir. Elektrokatalitik ayrışma sırasında katotta ortaya çıkan tepkime hidrojen çıkış reaksiyonu olarak adlandırılmaktadır (Krstajit vd., 2001).

Tafel polarizasyon eğrileri, hidrojen çıkış reaksiyonları araştırılmaları sırasında 1905'te keşfedilmiştir. Elektrokimyasal bir proseste, elektrokatalitik aktivitelerin değerlendirilmesinde Tafel polarizasyon eğrileri en fazla sonuç veren yöntemlerden birisi olarak bilinmektedir. Hidrojen çıkış reaksiyonlarında, elektrokatalizörlerin reaksiyon esnasındaki davranışının analizinde ve elektrokatalitik aktivitenin belirlenmesinde Tafel eşitliği kullanılarak genel anlamda Tafel analizi yapılmaktadır. Uygulanan potansiyeli sistemden geçen akım şiddetine bağlayan Tafel eşitliği, aslında Butler–Volmer eşitliğinin indirgenmiş halidir. Butler–Volmer eşitliği aşağıda gösterildiği gibidir.

$$I = A i_0 \left\{ \exp \left[\frac{(1-\alpha)nF}{RT} (E - E_{eq}) \right] - \exp \left[-\frac{\alpha nF}{RT} (E - E_{eq}) \right] \right\} \quad (2.1)$$

$$i = i_0 \left\{ \exp \left[\frac{(1-\alpha)nF}{RT} (E - E_{eq}) \right] - \exp \left[-\frac{\alpha nF}{RT} (E - E_{eq}) \right] \right\} \quad (2.2)$$

Eşitlikte , i akımı yoğunluğunu (A/m^2) , E elektrot potansiyelini (V), i_0 değişim akım yoğunluğunu (A/m^2) , F Faraday sabitini, E_{eq} denge potansiyelini (V), R evrensel gaz sabitini, A elektrodun yüzey alanını (m^2), T mutlak sıcaklığı (K), n elektrot tepkimesinde transfer edilen elektronların sayısını, ve α simetri faktörünü (transfer katsayısını) ifade etmektedir.

Yukarıda yazılan Butler–Volmer eşitliğinin sadeleşmiş özel bir versiyonu olan Tafel denklemi, η ile ifade edilen aşırı gerilim ve $\log i$ arasındaki doğrusal ilişkiyi verir;

$$\eta = a + b \log i_0 \quad (2.3)$$

$$a = - \left[\frac{RT}{(1 - \alpha)nF} \right] \ln i_0 \quad (2.4)$$

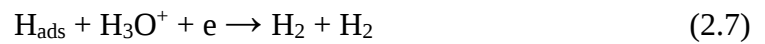
$$b = \left[\frac{RT}{(1 - \alpha)nF} \right] \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.3'te a , Tafel sabitini, b ise Tafel eğimini ifade etmektedir (Gorker ve Dimitrov 2009). Eşitlikte elektron transferinde $n=1$ olduğunda α transfer katsayısı anodik ve katodik kısma göre değişim göstermekte ve genel olarak $\alpha = 0,5$ olarak kabul edilmektedir.

Genel olarak hidrojen oluşum reaksiyon mekanizması, asidik ortamda üç olası reaksiyon adımı ile belirlenmektedir. İlk adım adsorbe hidrojen atomunun (H_{ads}) oluştuğu elektrokimyasal basamak olup, Volmer basamağı olarak adlandırılmaktadır;



Volmer basamağından sonra iki olası basamak mevcuttur. Bunlardan biri, adsorplanmış hidrojen atomuna bir elektronun transferiyle H_2 gazının oluştuğu Heyrovsky reaksiyonudur;



Olası diğer basamak, iki adsorbe hidrojen atomunun kimyasal olarak birleşerek H_2 çıkışının gerçekleştiği Tafel basamağıdır.



Bu aşamada ilk basamak olan Volmer tepkimesi, olası ikinci basamak olan Heyrovsky ve Tafel basamakları arasındaki fark, hangi basamağın hız belirleyen basamak olduğudur. Hesaplanan Tafel eğimi $b=120$ mV/decade olduğunda hız belirleyen basamak Volmer basamağı, Tafel eğimi $b=40$ mV/decade olduğunda hız belirleyen basamak Heyrovsky ve Tafel eğimi $b=30$ mV/decade olarak hesaplandığında hız belirleyen basamak Tafel basamağıdır. Hidrojen çıkış reaksiyon

mekanizmasında ikinci reaksiyon adımına göre tepkime Volmer-Tafel veya Volmer-Heyrovsky olarak devam etmektedir (Dang Young Chung vd., 2014).

Özetle, Tafel eğiminin araştırılması, elektrokatalitik ilerleyen bir sistemde yüzeydeki hidrojen çıkış reaksiyonunun mekanizmasının incelenmesinde oldukça önemlidir. Tafel eğiminin düşük seviyelerde izlenmesi, düşük aşırı gerilimle, hidrojen çıkışının daha hızlı gerçekleştiği anlamına gelmektedir (Dhandapani Balaji vd., 2020).

2.2.3 Elektrokimyasal impedans spektroskopisi

Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), elektrokimyasal sistemlerin dirençlerini ve yüzey hassasiyetlerini analiz etmede kullanılan çok etkili ve kullanışlı bir yöntemdir. Bir impedans spektrumundan, yüzeylerin, tabakaların veya membranların değişim ve difüzyon prosesleri ve karakterizasyonu hakkında bilgi sağlanır. İmpedans temelde, yüksek frekanslar uygulandığında kapasitans ve indüktif değişikliklerden etkilenen direncin ölçümüne dayanmaktadır.

Elektriksel direnç, bir devre elemanının elektriksel akıma karşı gösterdiği dirençtir. İmpedans da direnç gibi elektriksel akıma karşı devrenin gösterdiği direnci ölçer ancak, ideal direncin sahip olduğu basit özelliklerin yanında impedansla, elektrot/elektrolit ara yüzeyinde oluşan çift faz tabakası ve diğer devre elemanlarının değerleri, uygulanan alternatif akıma bağlı olarak belirlenebilmektedir. EIS, biyosensörlerde, metal kaplama çalışmalarında, biyolojik sistemlerde, ince organik film özelliklerinin tespitinde, korozyon çalışmalarında, bataryalarda, yarı iletken elektrotlarda ve iletken polimerlerin özelliklerinin incelenmesinde kullanılmaktadır. EIS, modifiye elektrotların yüzey özelliklerinin incelenmesinde, özellikle HER'in kinetik incelemelerinde dönüşümlü voltametri tekniğine göre daha yaygın kullanılan bir yöntemdir.

2.2.4 Taramalı elektron mikroskobu

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), numune yüzeyine bir elektron demeti gönderilerek yüzeyin taranarak görüntüsünün alındığı bir tekniktir. Elektron ışınını katı bir cisme gönderen ve katı cisimden yansıyan elektronlarla cismin içyapısını gösteren cihaza, SEM denir. Elektronlar katı cisme çarptığında, bu elektronlar yansır veya yutulur. Yansıyan elektronlar çeşitli sinyaller üretmektedir. Yansıyan

elektronların sinyalleri, ikincil (SE), geri yansıyan (BSE), Auger (AE) ve diğer yansıyan elektron sinyalleri olarak adlandırılırlar. SEM optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için çok fazla gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı farklı çapta delikler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır.

2.2.5 Enerji dağılım spektroskopisi

Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS), örnek bileşimini analiz etmek için kimyasal bir mikroanaliz uygulamasıdır. Örnek üzerindeki elektron bombardımanı sonucunda elde edilen örnekten çıkan X ışınlarının ortaya çıkarılmasını sağlar. Enerji dağılım spektroskopisi iki yöntem ile bilinmektedir. Bunlardan birincisi dalga boyu dağılım spektroskopisi X-ışını spektroskopisi (WDS), ikincisi ise EDS olarak bilinmektedir (Ayaz, 2019).

Aralarındaki kıyaslamada EDS’de, numunede üretilen bütün dalga boylarındaki X-ışınlarını elde etmek için katı hal yarı iletken detektör kullanılmaktadır. EDS çok daha kısa sürede sayım yaptığı için daha fazla bilgi verir. WDS üstün X-ışını pik çözünürlüğü kullandığı için çok daha hassas bir tekniktir.

EDS ve SEM birbirine bağlı olarak çalışmakta olup, karakteristik X-ışınları kullanarak örnek üzerine belirlenen bölgenin kalitatif ve yarı kantitatif element örneklerinin analizleri gerçekleştirilebilen bir sistemdir. Bir element örneğinde, yeteri kadar enerjiye sahip elektronlar ile bombardıman edildiğinde o elemente özgü karakteristik ışın çizgi spektrumu açığa çıkmaktadır. Bu spektrum, ışıını yayan örnek elemente özgü belirli dalga boylarına sahip olduğundan ötürü daima karakteristik çizgiler olarak çıkmaktadır (Ceyhun, 2017).

2.3 Önceki Çalışmalar

Hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılarak üretilen, enerjinin depolanmasını, taşınmasını ve istenilen türden bir enerjiye çevrilmesini sağlayan doğal bir yakıt olmayıp, doğada serbest halde bulunmayan ve diğer enerji

kaynaklarından yararlanılarak üretilen yapay bir yakıttır. Doğada, bileşikleri halinde bulunmaktadır. Son dönemlerde sudan hidrojen elde etmenin en yaygın ve basit yöntemi suyun elektrolizidir. Suyun elektroliz sisteminde oluşan aşırı gerilimler, bu yöntemin maliyetini arttırmaktadır. Bu maliyeti azaltmak için kararlı, ekonomik ve kullanılabilir elektrot materyalleri geliştirebilmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan birisi, Balaji vd. (2020) tarafından yapılan, suyun elektrolizi ile hidrojen oluşumu reaksiyonunu, hidrotermal yöntemle sentezledikleri demir nikel diselenitin ($\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{Se}_2$), ÇDKN'ler ile hazırladıkları kompozit üzerinde inceledikleri çalışmadır. Farklı oranlarda hazırladıkları kompozitlerin karakterizasyonlarını, XRD ve FT-IR analizleri ile yapmışlardır. %3 oranında ÇDKN içeren kompozit yapının hidrojen oluşumunda en yüksek katalitik aktivite gösterdiğini, 10 mA.cm^{-2} 'lik akım yoğunluğuna 200 mV'ta ulaşabildiklerini, Tafel eğimini 71 mV.dec^{-1} olarak hesapladıklarını belirtmişlerdir.

Bir başka çalışmada Huff vd. (2017), altın nanoparçacıklar (Au) ve ÇDKN kullanarak elde ettikleri Au/ÇDKN katalizörün hidrojen üretimi reaksiyonunda etkisini araştırmışlardır. Hidrojen üretimi için sodyum bor hidrür kullanılmış olup artan sıcaklıkla reaksiyon kinetiğinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca nötr ortamın asidik veya bazik ortama göre daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır. Araştırmada Au/ÇDKN katalizörün hidrojen üretimi reaksiyonu için bileşenlerine oranla, daha yüksek aktivite sergilediği görülmüştür.

Başka bir çalışmada ise hidrojen oluşum reaksiyonu için Huff vd. (2018), platin nanoparçacık (Pt) ile ÇDKN kompozitini üretmiş ve bu kompozitin verimliliğini araştırmışlardır. Modifikasyon sonucunda elde edilen kompozitin tek tek bileşenlerinden daha yüksek verimliliğe sahip olduğunu görmüşlerdir. Nötr (pH=7) ortamda ve 295 K'de en yüksek verimin elde edildiğini belirtmişler ve daha önce geliştirdikleri Au/ÇDKN kompozit yapısına göre Pt/ÇDKNT kompozitinin daha iyi aktivite gösterdiğini vurgulamışlardır.

Darband vd. 2018, bakır yüzeyine üç boyutlu Ni-KNT kompozit filmini elektrodepozisyon yöntemiyle kaplayarak elde ettikleri poröz yapı üzerinde hidrojen oluşumu tepkimesini incelemişlerdir. Kompozit filmin karakterizasyonunu, XRD, SEM, EDS ve AFM tekniklerini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. 1 M potasyum hidroksit (KOH) elektrolit ortamında yapılan incelemelerde, hidrojen çıkışı için 10,

20 ve 100 mA/cm²'lik akım yoğunlukları sırasıyla 82, 116 ve 207 mV'luk potansiyel değerlerinde elde edilmiştir.

Bir başka çalışmada camsı karbon elektrot üzerine işlem görmemiş ÇDKN ve oldukça yüksek sıcaklıklarda (2600 °C) ısıtılma işlemi görmüş ÇDKN'ler uygulanarak 0,5 M H₂SO₄ elektrolit ortamında hidrojen oluşumu incelenmiştir. İşlem görmemiş ÇDKN'ler hidrojen oluşumunda çok aktif değilken ısıtılma işlemi tabii tutulmuş ÇDKN'lerin yüksek katalitik aktivite gösterdiği belirtilmiştir. Bu durumun, yüksek ısıtılma işlemi sonucunda ÇDKN'lerin kristallik özelliklerinin iyileşmesi, C-O bağlarının azalmasıyla gözenekliliğin artması ve böylelikle elektrokimyasal yük transferinin artmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ayrıca ısıtılma işlemi görmüş ÇDKN'lerin, Pt ile hazırlanan Pt-ÇDKN kompozit yapısının hidrojen oluşumunda çok yüksek katalitik aktivite gösterdiği belirtilmiştir. 10,9 mV.dec⁻¹'lik Tafel eğimi ve oldukça düşük onset potansiyel değeriyle (-0,04 V), geliştirilen kompozit yapının hidrojen çıkışı için Pt'den daha iyi sonuçlar verdiği vurgulanmıştır (Nguyen vd., 2018).

Diğer taraftan suyun elektrolizi ile hidrojen eldesinde, nikel metali de soy metallere göre daha bol bulunabilecek, daha ekonomik ve etkin bir metaldir. Wang vd. (2017), Ni nanopartikülleri ve indirgenmiş grafen oksit (rGO) tabakalarını eş zamanlı olarak Ni köpük üzerine ayırıştırarak elde ettikleri Ni-rGO/Ni köpük kompozit üzerinde, 1 M NaOH elektrolit ortamında hidrojen oluşumunu incelemişlerdir. Elektrokimyasal ölçümler sonucunda Tafel eğimini 77 mV.dec⁻¹ olarak hesapladıklarını, 100 mA.cm⁻²'lik akım yoğunluğuna 183 mV'ta ulaştıklarını ve geliştirdikleri elektrot materyalinin farklı akım yoğunluklarında yüksek kararlılık gösterdiğini belirtmişlerdir

McArthur vd. (2014)'nin yaptığı bir çalışmada, paslanmaz çelik yüzeyi termal-kimyasal buhar depozisyonu tekniğiyle ÇDKN'ler ile modifiye edilmiş, bu yüzey üzerine puls lazer depozisyonu tekniği kullanılarak Ni nanopartiküller biriktirilmiştir. 1 M KOH elektrolit ortamında hidrojen oluşumu tepkimesi incelenmiş, tüm elektrokimyasal ölçüm sonuçlarının, Ni levha elektrot kullanılarak elde edilen sonuçlardan çok daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Mahale ve Ingle (2017) çalışmalarında, bir geçiş metali olarak Ni ve katalizör olarak grafen kullanarak hidrojen üretim oranını arttırmak istemişlerdir. Çalışma sırasında

elektroforetik biriktirme yöntemi ile grafen levhalar modifiye edilmiştir. XRD, FTIR, XPS ve SEM teknikleri kullanılarak elektrokatalizörün karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Alkali koşullarda grafen yüzeyindeki nikelin, hidrojen oluşum reaksiyonunun aktivitesini önemli düzeyde arttırdığı görülmüştür. Çalışma sonucunda Tafel eğiminin çok düşük olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın aynı sistemle yapılacak sonraki araştırmalara ışık tutacağı belirtilmiştir.

Döner vd. 2012, kompakt ve gözenekli bir materyal olarak karbon keçeyi (C-keçe), Ni, Co ve NiCo tabakalarıyla modifiye etmiş, bu yapılar üzerinde hidrojen oluşumu tepkimesini incelemişlerdir. Kaplamaların yüzey yapısı, atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS) ve SEM ile karakterize edilmiştir. Hidrojen oluşum reaksiyonu için kaplamaların elektrokatalitik aktivitesi, döngüsel voltametr, katodik akım-potansiyel eğrileri, EIS ve elektroliz teknikleri kullanılarak 1.0 M KOH çözeltisinde incelenmiştir. Karbon keçenin fiber ve ağ yapısının, hidrojen oluşumunu güçlendirdiğini belirtmişlerdir. Nikel ve kobaltın C-keçe üzerinde birikmesi hidrojen üretimini artırdığını ve reaksiyonun düşük potansiyellerde gerçekleşmesini sağladığını vurgulamışlardır. Çalışmalarında en yüksek hidrojen üretimini ve en yüksek akım yoğunluğunu, en düşük aşırı gerilimi uyguladıkları C-keçe/NiCo katalizöründe elde ettiklerini belirtmişlerdir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Kullanılan Kimyasal Maddeler

Bu çalışmada elektrot materyali olarak kalem grafit elektrot, ÇDKN, (>%70 saflıkta, Sigma-Aldrich), dimetilformamit (DMF), destek elektrolit olarak sülfürik asit (H_2SO_4) (Merck) kullanılmıştır. Elektrot yüzeyini nikel parçacıklarla modifiye etmek için $NiSO_4$, disodyum hidrojen fosfat (Na_2HPO_4) kullanılmıştır.

3.1.1 Kullanılan malzemeler

3.1.1.1 Elektrokimyasal hücreler

Voltametrik çalışmalar, Tafel polarizasyon eğrileri, kronoamperometri ve EIS gibi tüm elektrokimyasal çalışmalar, standart cam hücre içerisinde, çalışma elektrodu, referans elektrot ve karşı elektrot kullanılarak, elektrokimyasal hücre standında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Elektrokimyasal hücre standı.

3.1.1.2 Elektrotlar

Çalışma elektrodu

Tüm elektrokimyasal ölçümlerde 2B serili kalem grafit çalışma elektrodu olarak kullanılmıştır. 2 mm çapındaki grafit elektrodun etrafı polyester ile kaplanarak elektriksel olarak izole edilmiş, sadece 0,0314 cm² yüzey alanına sahip elektrot yüzeyi açıkta bırakılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kalem grafit elektrot.

Açıkta bırakılan yüzeyini temizlemek/parlatmak amacıyla kalından inceye doğru, 250-2500 gritlik zımpara kâğıtları kullanılmıştır.

Karşı elektrot

Tüm elektrokimyasal ölçümlerde 0,5 cm çapında ve 7,5 cm uzunluğunda Pt tel karşı elektrot olarak kullanılmıştır.

Referans elektrot

Tüm elektrokimyasal ölçümlerde referans elektrot olarak BASİ marka MF-2052 model Ag/AgCl/Cl⁻ elektrot kullanılmıştır.

3.1.2 Kullanılan cihazlar

3.1.2.1 Elektrokimyasal çalışma ünitesi

Dönüşümlü voltametri, Tafel polarizasyon eğrileri, EIS ve krontamperometri ölçümleri, Gamry Instruments marka ve Interface 1000

Potansiyostat/Galvanostat/ZRA model elektrokimyasal çalışma ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.1.2.2 Taramalı elektron mikroskobu

Hazırlanan elektrot yüzeylerinin morfolojik özellikleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (ZEISS), ve yapıların kimyasal kompozisyonları bu cihaza entegre edilmiş EDS ile incelenmiştir.

3.1.2.3 Ultrasonik temizleyici

Deneysel aşamada, çözeltileri homojenize etmek amacıyla kullanılan VWR marka ultrasonik temizleyici kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Ultrasonik temizleyici.

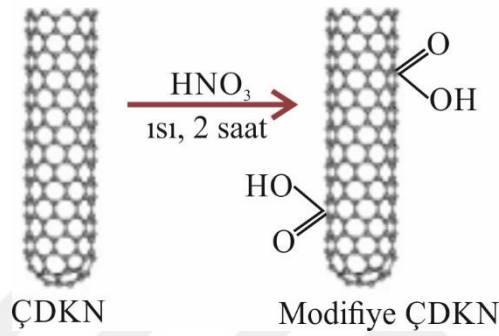
3.2 Yöntem

3.2.1 Kalem grafit elektrodun hazırlanması

2 mm çapındaki grafit elektrodun yüzeyi ($0,0314 \text{ cm}^2$) açıkta kalacak şekilde etrafı polyester ile izole edilerek kullanılmıştır. Deney yapılacak kısmı açıkta bırakılarak çalışma elektrodu hazırlanmıştır. Kalem grafit elektrodun yüzeyi 200'den 2000 grite kadar farklı kalınlıklardaki zımpara kâğıtlarıyla zımparalanarak temizlenmiştir. Bu işlem her deney öncesi yapılan elektrot temizliğinde tekrarlanarak yüzey parlatılmıştır.

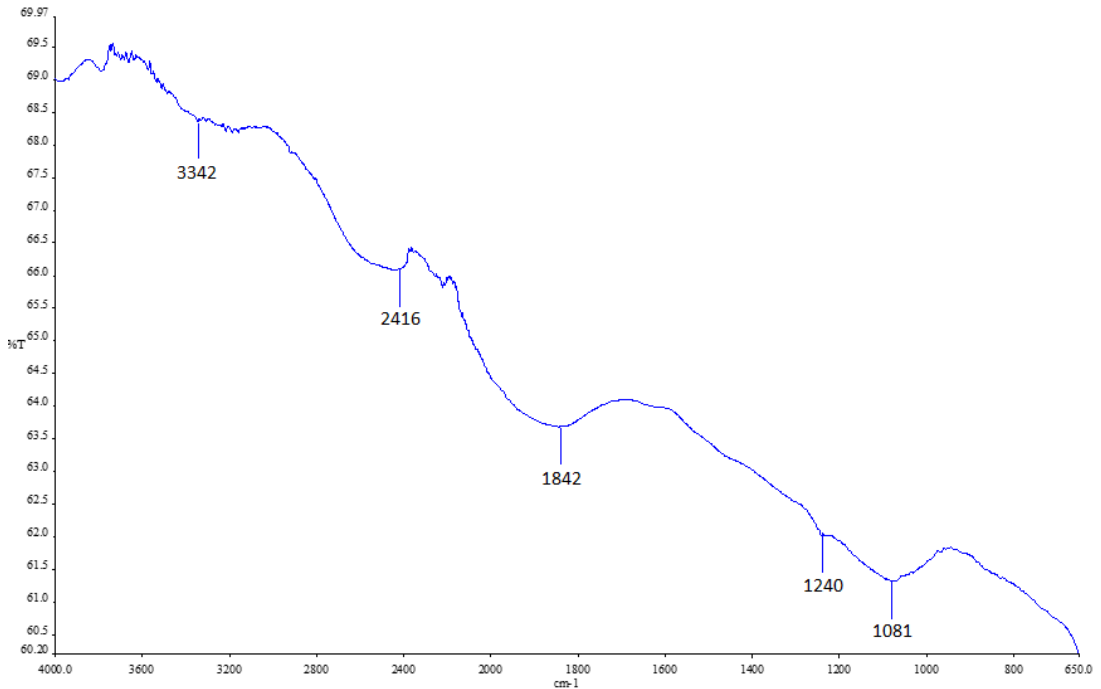
3.2.2 ÇDKN'lerin saflaştırılması ve aktivasyonu

Ticari olarak temin edilen ÇDKN'lerin aktivasyonu için, 0,1 g olarak tartılan ÇDKN'lerin üzerine 4 mL HNO₃ (nitrik asit) eklenerek elde edilen karışım 2 saat süre boyunca kaynatıldı. Böylelikle ÇDKN'lerin yüzeyi, –COOH gruplarıyla modifiye edilerek fonksiyonelleştirildi (Şekil 3.4). Kaynama sonunda homojen çamur kıvamında elde edilen karışım defalarca (20-30 kez) saf su ile yıkandıktan sonra süzgeç kağıdından süzülerek oda sıcaklığında kurumaya bırakıldı.



Şekil 3.4. ÇDKN'lerin modifikasyonu.

Modifikasyonu gerçekleştirilen ÇDKN'lerin yapısal analizi, Fourier dönüşümlü infrared spektrumu ile incelenmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Modifiye edilmiş ÇDKN'lerin FT-IR spektrumu.

Şekil 3.5'te fonksiyonelleştirilmiş ÇDKN'lerin FT-IR spektrumu görülmektedir. FT-IR spektrumunda gözlenen titreşim frekansları incelendiğinde, 3342 cm^{-1} de görülen yayvan zayıf pikin -OH fonksiyonel grubu gerilmesine, 1842 cm^{-1} 'deki pikin karbonil grubu (-C=O) gerilmesine ve 1240 cm^{-1} 'de gözlenen pikin de -C-O gerilmesine ait titreşim frekansları olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, ÇDKN'lerin modifikasyonunun gerçekleştirildiğine işaret etmektedir.

3.2.3 ÇDKN süspansiyonunun hazırlanması

Aktive edilen ÇDKN'lerden homojen bir süspansiyon elde etmek amacıyla, 30 mg (0,03g) ÇDKN tartıldı ve üzerine 12 mL dimetilformamit (DMF) eklendi. Hazırlanan ÇDKN/DMF süspansiyonu dört saat boyunca ultrasonik banyoda karıştırılarak homojenize edildi ve buzdolabında muhafaza edildi.

3.2.4 ÇDKN süspansiyonunun kalem grafit elektroda uygulanması

Yüzeyi temizlenen kalem grafit elektrot yüzeyine, hazırlanan ÇDKN/DMF süspansiyonundan mikro pipet yardımı ile $3\mu\text{L}$ enjekte edilerek elektrot oda sıcaklığında kurutuldu. Hazırlanan elektrot, 5 dk saf suda bekletilip yıkandıktan sonra kullanıma hazır hale geldi.

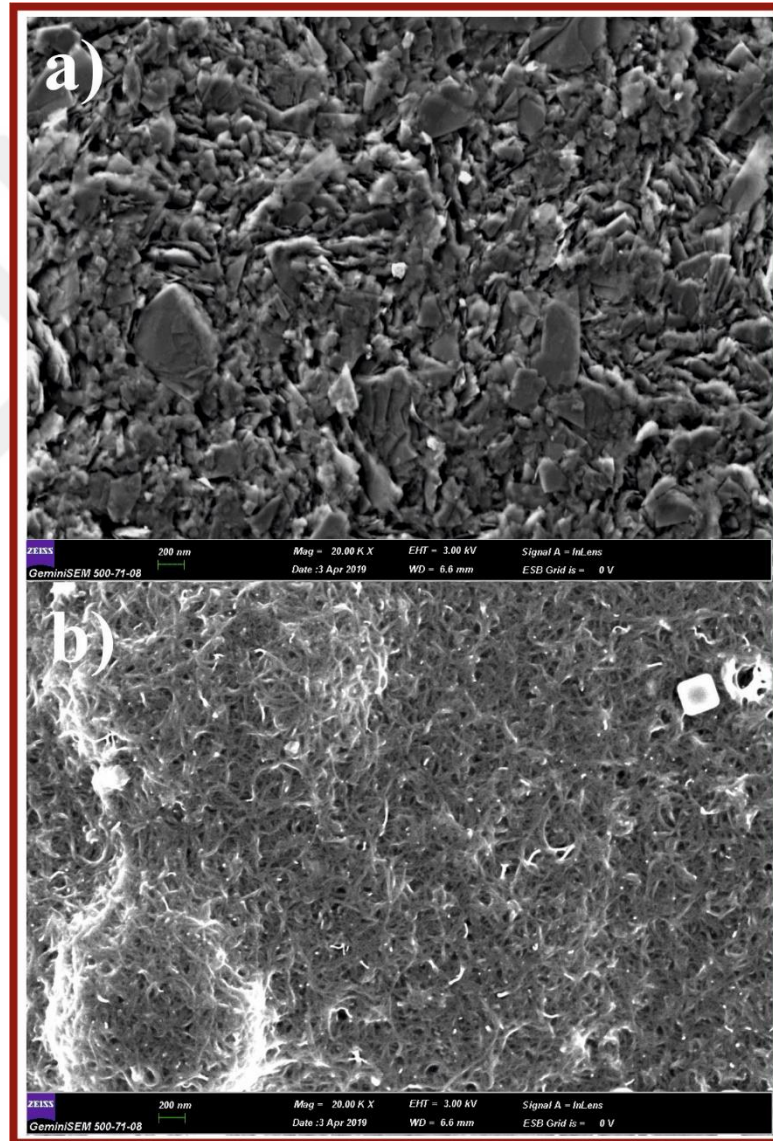
3.2.5 ÇDKN/Ni kompozit yapısının hazırlanması

Kalem grafit elektrot yüzeyine ÇDKN uygulandıktan sonra, yüzeye Ni nanopartiküllerin elektrodpozisyonu için 10 mL 0,5 M NiSO_4 içeren 0,1 M Na_2HPO_4 (pH=4) elektrolit çözeltisi kullanıldı. $-0,9\text{V}$ 'ta 500 s süreyle kronoamperometrik olarak elektrokimyasal indirgeme işlemiyle yüzeyde Ni nanopartikülleri oluşturuldu. Hazırlanan ÇDKN/Ni modifiye elektrodu 5 dk saf suda bekletilerek yıkandıktan sonra elektrokimyasal ölçümler için hazır hale gelmiş oldu.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Elektrot Yüzeyinin Karakterizasyonu

Suyun elektrolizi ile hidrojen oluşumu tepkimesini incelemek amacıyla kullanılan elektrokimyasal ölçümlerden önce, geliştirilen elektrot materyalinin karakterizasyonu SEM ve EDS teknikleriyle gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, yüzeyi temizlenmiş çıplak kalem grafit elektrot ve yüzeyine ÇDKN enjekte edilmiş kalem grafit elektrodun SEM görüntüleri kaydedilmiştir (Şekil 4.1).

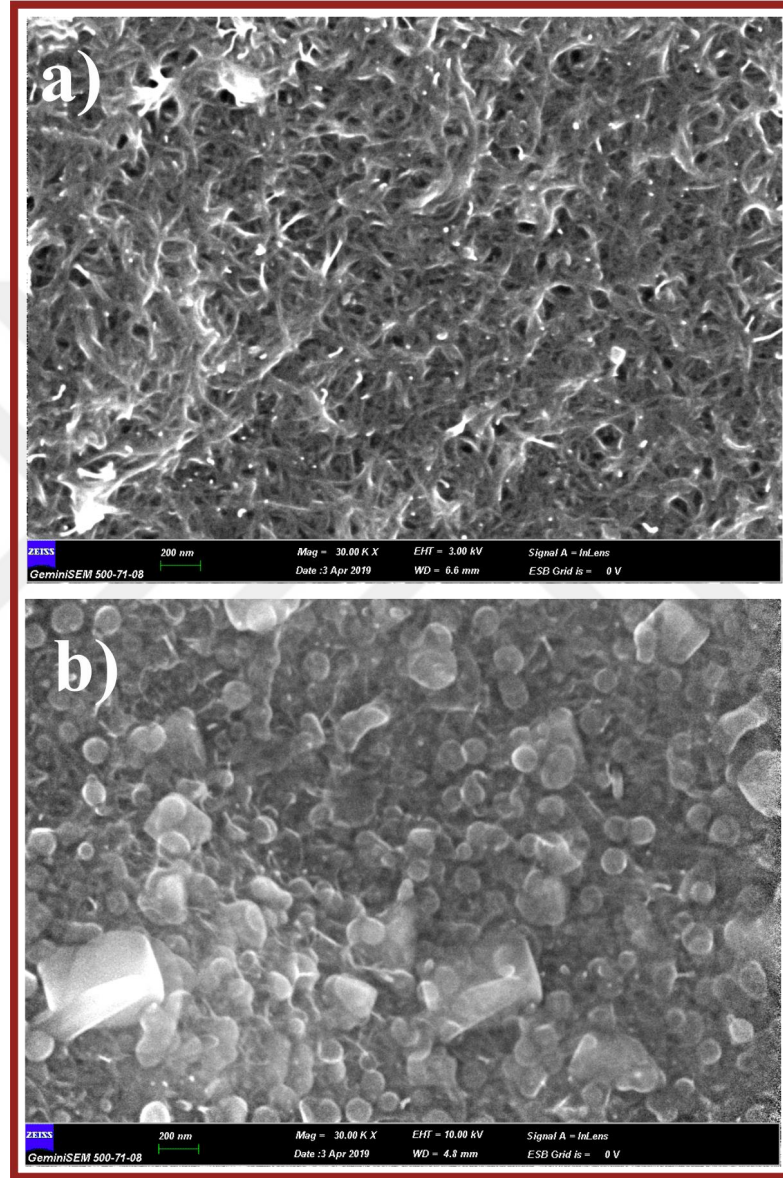


Şekil 4.1. a) Çıplak KGE, b) KGE/ÇDKN elektrot yüzeylerinin tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

Kalem grafit elektrodun poröz yüzeyi Şekil 4.1.a’da görülmektedir. Bu yüzey üzerine ÇDKN uygulandıktan sonra aynı büyütme oranında (20.000x) kaydedilen SEM

görüntüsünde, karbon nanotüplere ait tipik silindirik yapılar net bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.1.b).

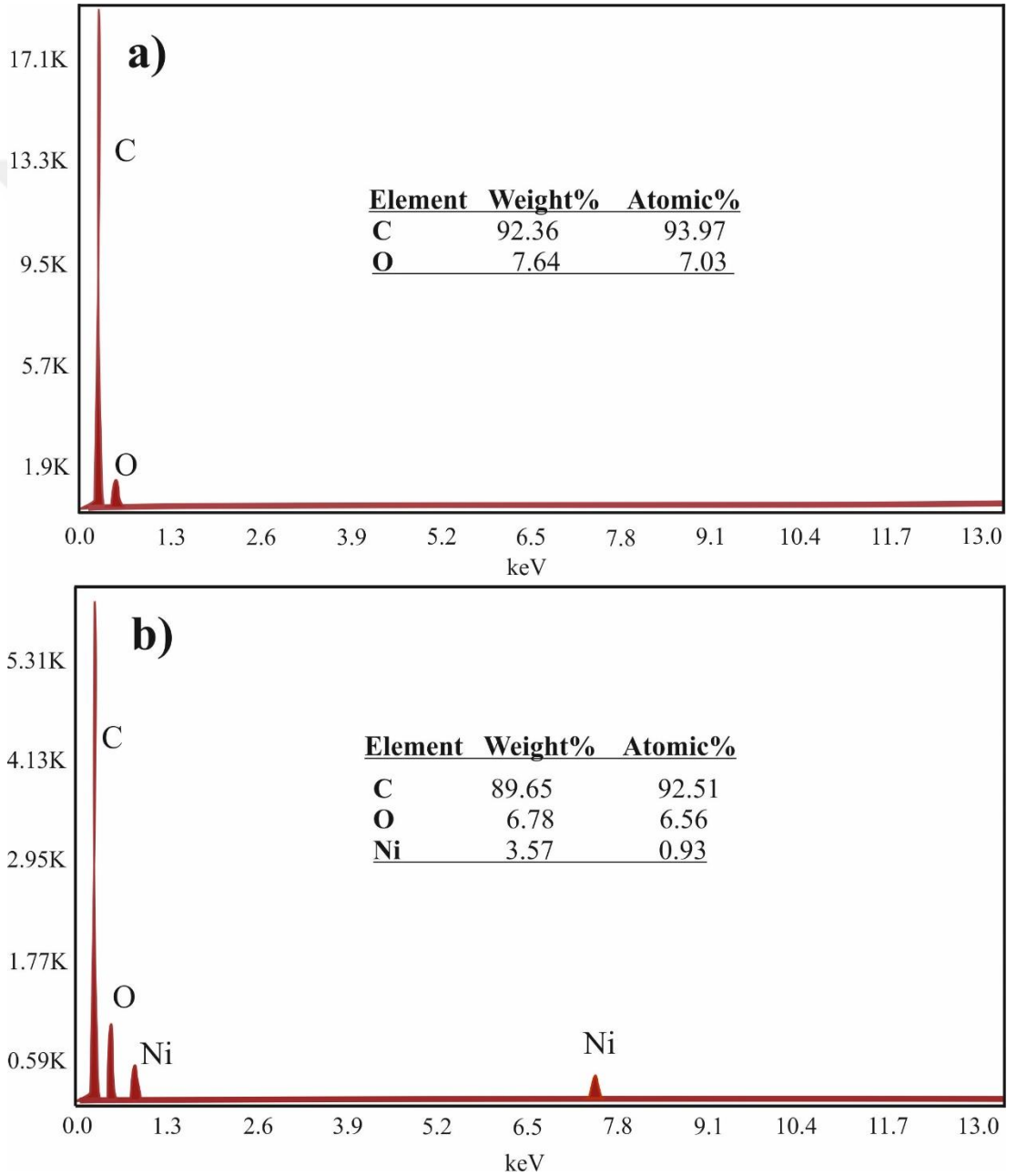
Daha sonra daha büyük büyütme oranında (30.000x), ÇDKN uygulanan yüzeyin ve bu yüzeye Ni nanopartiküllerin biriktirilmesiyle elde edilen ÇDKN/Ni nanokompozit yapının SEM görüntüleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. a) KGE/ÇDKN, b) KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit yapılarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

Şekil 4.2 incelendiğinde, küresel yapıdaki Ni nanopartiküllerin ÇDKN yüzeyine homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Yapıdaki Ni partiküllerinin çapları ortalama 60-80 nm aralığında tespit edilmiştir.

Yüzey karakterizasyonunda ayrıca ÇDKN uygulanmış elektrot yüzeyinin ve ÇDKN/Ni nanokompozit yapısının EDS spektrumları değerlendirilmiştir (Şekil 4.3). Yapılarda var olan elementlerin yüzde oranları EDS spektrumundan izlenebilmektedir.



Şekil 4.3. a) KGE/ÇDKN, b) KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit yapılarının EDS analizleri.

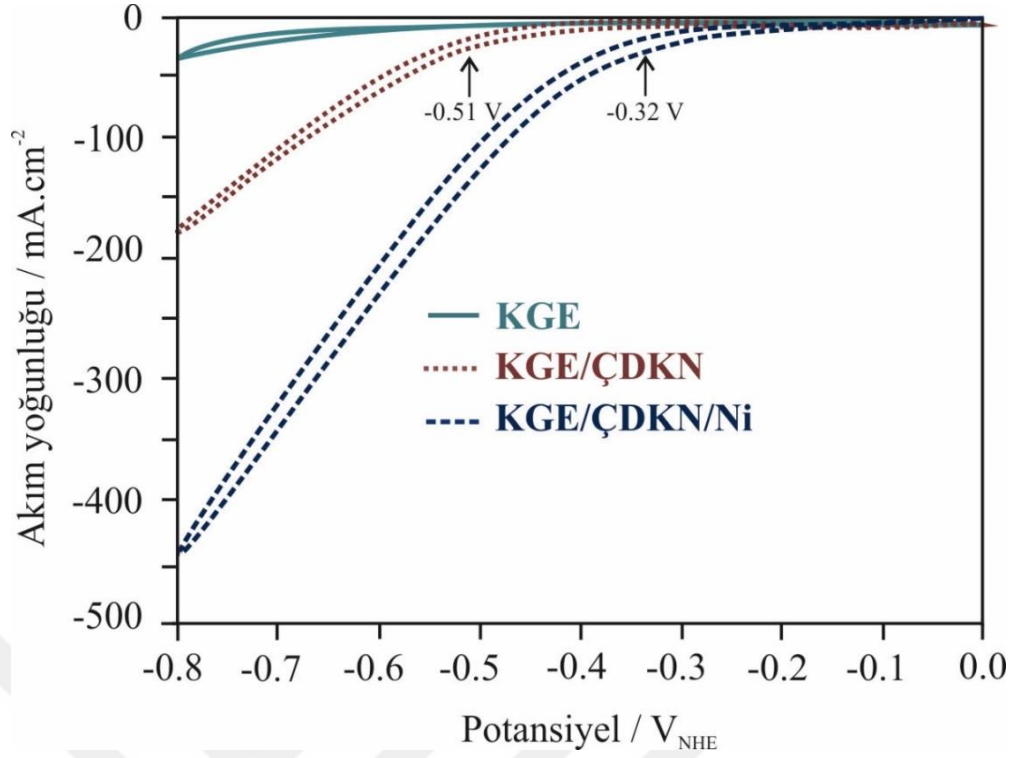
ÇDKN uygulanmış kalem grafit elektrot yüzeyinin kimyasal kompozisyonu, karbon ve oksijen elementlerinden oluşurken (Şekil 4.3.a), nikelin elektrodpozisyonu sonucunda elde edilen kompozit yapıya Ni partiküllerin katıldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.3.b).

4.2 Suyun Elektrolizi ile Hidrojen Oluşumunun İncelenmesi

Suyun elektrolizi ile hidrojen oluşumu tepkimesinde geliştirilen elektrodun gösterdiği elektrokatalitik aktivite, sulu asidik ortamda, dönüşümlü voltametri, Tafel polarizasyon eğrileri ve EIS teknikleriyle incelenmiştir.

4.2.1 Dönüşümlü voltametri çalışmaları

Dönüşümlü voltametri çalışmaları için ilk olarak, modifiye edilmemiş kalem grafit elektrodun 0,5 M H₂SO₄ elektrolit ortamında, 0V ile -0,8V potansiyel aralığında 10mV.s⁻¹ tarama hızında (v) dönüşümlü voltamogramı kaydedilmiştir. Deneysel ölçümlerde referans elektrot olarak Ag/AgCl/Cl⁻ referans elektrodu kullanılmıştır ancak tez çalışmasında verilen tüm potansiyel değerleri normal hidrojen elektroda (NHE) dönüştürülerek verilmiştir ($E_{NHE} = E_{Ag/AgCl/Cl^-} + 0.197 + 0.0592 \text{ pH}$). Daha sonra kalem grafit elektrot yüzeyine ÇDKN uygulandıktan sonra aynı şartlarda dönüşümlü voltamogram kaydedilmiş ve elektrot yüzeyinde gerçekleşen hidrojen oluşumu reaksiyonuna ($H^+ + e \rightarrow H_2$) ait akım yoğunluğunun arttığı görülmüştür (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. KGE, KGE/ÇDKN ve KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrotların 0,5 M H_2SO_4 içerisinde kaydedilen dönüşümlü voltamogramları ($v=10\text{mV.s}^{-1}$).

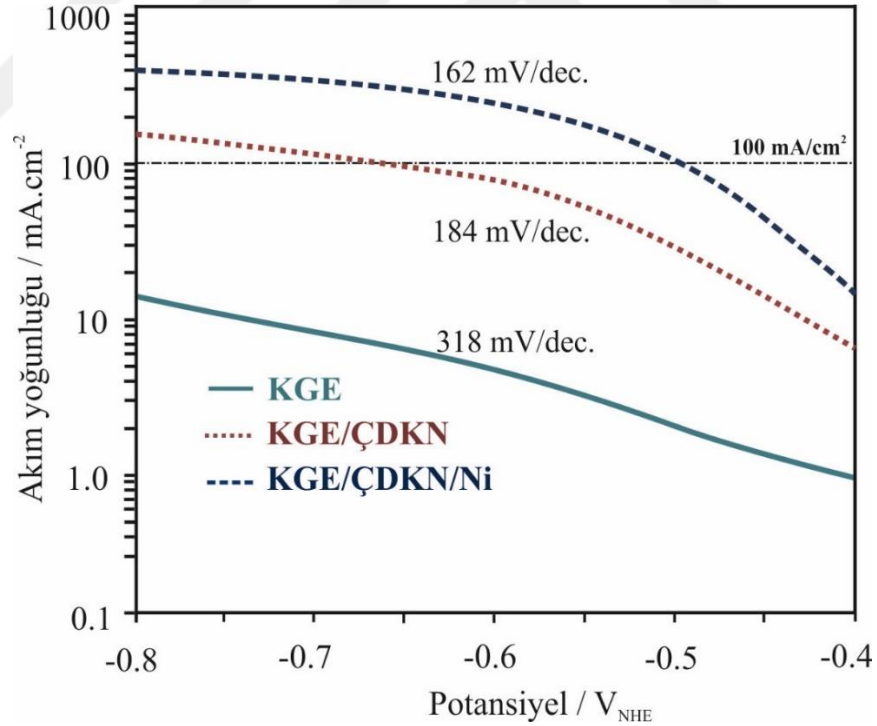
ÇDKN uygulanmış kalem grafit elektrot üzerinde hidrojen oluşumuna ait akım yoğunluğu yaklaşık $-0,5\text{V}$ 'tan sonra belirgin bir artış göstermiş, $-0,8\text{V}$ 'ta yaklaşık 175 mA.cm^{-2} 'e ulaşmıştır. ÇDKN uygulanmış kalem grafit elektrot yüzeyine Ni nanopartiküllerinin ayrıştırılmasıyla elde edilen ÇDKN/Ni nanokompozit yapısı üzerinde ise hidrojen çıkışına ait akım veriminin daha da arttığı görülmüştür. Bu durum, hidrojen oluşumunda yüksek katalitik aktivite gösterdiği bilinen nikelin yapıya katılmasından kaynaklanmaktadır (Balaji vd. 2019). Karbon nanotüp yüzeyinde Ni nanopartiküllerin var olduğu durumda akım yoğunluğundaki artış yaklaşık $-0,3\text{V}$ 'tan itibaren başlamış ve $-0,8\text{V}$ 'ta yaklaşık 440 mA.cm^{-2} 'e ulaşmıştır. Ayrıca bu değer, kalem grafit elektrot üzerinde aynı potansiyel değerinde elde edilen akım yoğunluğu ($\cong 40\text{ mA.cm}^{-2}$) ile karşılaştırıldığında, ÇDKN/Ni nanokompozit üzerinde akım yoğunluğunun yaklaşık 11 kat arttığı görülmüştür. Katalitik aktivitesi yüksek nikel metalinin nano düzeyde yapıya katılmasıyla, hidrojen oluşumunda katalitik aktivitenin belirgin bir şekilde arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.4 incelendiğinde, ÇDKN üzerine Ni metal partikülleri biriktirildiği durumda, hidrojen gazı çıkışının başladığı potansiyel değerinin (onset potansiyel değeri), çok

daha pozitif değere kaydığı görülmektedir (-0.32V). Bu da daha düşük enerji girdisiyle daha yüksek akım yoğunluğuna ulaşıldığı anlamına gelmektedir. Ayrıca nano düzeyde yapıya katılan nikelin düşük miktarda kullanılmasıyla geliştirilen elektrodun, bu proseste nispeten ekonomik ve etkin bir elektrot malzemesi olarak davrandığı sonucuna varılabilir.

4.2.2 Tafel polarizasyon eğrileri

Bir elektrot materyalinin katalitik performansının değerlendirilmesinde yararlanılan bir diğer elektrokimyasal teknik, Tafel polarizasyon eğrileridir. Yarı-logaritmik bir diyagram olan Tafel eğrilerinden yararlanılarak, kullanılan elektrokatalizörün etkinliği hakkında önemli bilgiler veren elektrokimyasal parametreler hesaplanabilmektedir. ÇDKN ve ÇDKN/Ni nanokompozit kaplı kalem grafit elektrodun ve karşılaştırma amaçlı çıplak kalem grafit elektrodun 0,5 M H₂SO₄ içerisinde, 1 mV.s⁻¹ tarama hızıyla kaydedilen Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5. KGE, KGE/ÇDKN ve KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrotların 0,5 M H₂SO₄ içerisinde kaydedilen Tafel diyagramları ($v=1\text{mV.s}^{-1}$).

Elektroliz esnasında hidrojen oluşumuna ait akım yoğunluğunun artmaya başladığı potansiyel değeri olarak -0,4V ile -0,8V aralığında kaydedilen Tafel diyagramları

karşılaştırıldığında, dönüşümlü voltametri sonuçlarıyla uyumlu olarak tüm potansiyellerde en yüksek akım yoğunluğu KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrodu üzerinde elde edilmiştir. 10 katlık (decade) akım artışını veren potansiyel farkı olarak hesaplanan Tafel eğimi (b), hidrojen çıkışında elektrokatalizörün aktifliği hakkında bilgi vermektedir. Hesaplanan Tafel eğiminin düşük olması, elektrokatalizörün bu proseste etkin bir materyal olduğu anlamına gelmektedir. Elektrokatalitik aktiflikte değerlendirilen diğer parametreler; uygulanan belirli bir potansiyelde ulaşılan akım yoğunluğu ve belirli bir akım yoğunluğuna (örneğin 10 mA.cm⁻² veya 100 mA.cm⁻²) ulaşmak için uygulanması gereken potansiyel değerleridir. Belirlenen bir potansiyelde ne kadar yüksek akım yoğunluğuna ulaşırsa ve belirli bir akım yoğunluğuna ne kadar düşük bir potansiyelde ulaşırsa, kullanılan elektrodun o kadar aktivitesi yüksek bir materyal olduğu kabul edilmektedir.

Tafel eğrilerinden gerekli hesaplamalarla her bir elektrot için belirlenen Tafel eğimleri (b), belirli bir potansiyelde ($\eta = -0,6V$) elde edilen akım yoğunlukları ve belirli bir akım yoğunluğuna (100 mA.cm⁻²) ulaşmak için uygulanması gereken potansiyel değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. KGE, KGE/ÇDKN ve KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrotların Tafel eğrilerinden hesaplanan elektrokimyasal parametreleri.

Elektrokatalizör	-b/mV.dec ⁻¹	i/ mA.cm ⁻² ($\eta = -0,6V$)	η/V (100 mA.cm ⁻²)
KGE	318	5,65	-0,98
KGE/ÇDKN	184	84,1	-0,66
KGE/ÇDKN/Ni	162	244,8	-0,47

Çizelge 4.1’de verilen sonuçlar incelendiğinde, KGE üzerinde hidrojen oluşumuna ait hesaplanan Tafel eğimi 318 mV.dec⁻¹, KGE/ÇDKN için 184 mV.dec⁻¹ ve KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit yapısı için 162 mV.dec⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Bölüm 2.2.2’de anlatıldığı gibi, Tafel eğimi $b=120$ mV.dec⁻¹ olduğunda en yavaş basamağın yani, hız belirleyen basamağın Volmer basamağı olduğu bilinmektedir. KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit yapısı için 162 mV.dec⁻¹ olarak hesaplanan Tafel eğimi, 120 mV.dec⁻¹’e yakın olduğundan, bu elektrotta gerçekleşen hidrojen çıkışı tepkimesinin Volmer-Heyrovsky basamaklarını izleyerek devam ettiği ve hız

belirleyen basamağın H_{ad} oluşumu yani Volmer basamağı olduğu söylenebilir (Balun Kayan vd., 2017).

Diğer taraftan, elektrodun katalitik etkinliğinde önemli bir gösterge olan birim yüzey alanına düşen akım yoğunluğu değerlendirildiğinde, KGE/ÇDKN elektrodu üzerinde 100 mA.cm^{-2} akım yoğunluğuna $-0,66\text{V}$ 'ta ulaşıldığı görülmüştür. Yapı üzerine Ni nanopartiküller ayrıştırıldığında, 100 mA.cm^{-2} akım yoğunluğuna daha düşük potansiyel değerinde ($-0,47\text{V}$), dolayısıyla daha düşük enerji girdisiyle ulaşılmıştır.

Ayrıca hidrojen çıkışının artmaya başladığı bir potansiyel olarak belirlenen $-0,6\text{V}$ 'ta kaydedilen akım yoğunlukları karşılaştırıldığında, çıplak kalem grafit elektrotta akım yoğunluğu $5,65 \text{ mA.cm}^{-2}$ iken, KGE/ÇDKN elektrodu üzerinde bu değer $84,1 \text{ mA.cm}^{-2}$ ve KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit yapısı üzerinde $244,8 \text{ mA.cm}^{-2}$ olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, çıplak kalem grafit elektroda ÇDKN uygulandığında akım yoğunluğundaki artış yaklaşık 15 kat, yapıya Ni nanopartiküller katıldığında bu artış, yaklaşık 43 kat olarak kaydedilmiştir.

Elde edilen sayısal sonuçların, literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması Çizelge 4.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2. Bazı katalizörlerin hidrojen oluşum reaksiyonu için hesaplanan elektrokimyasal parametreleri.

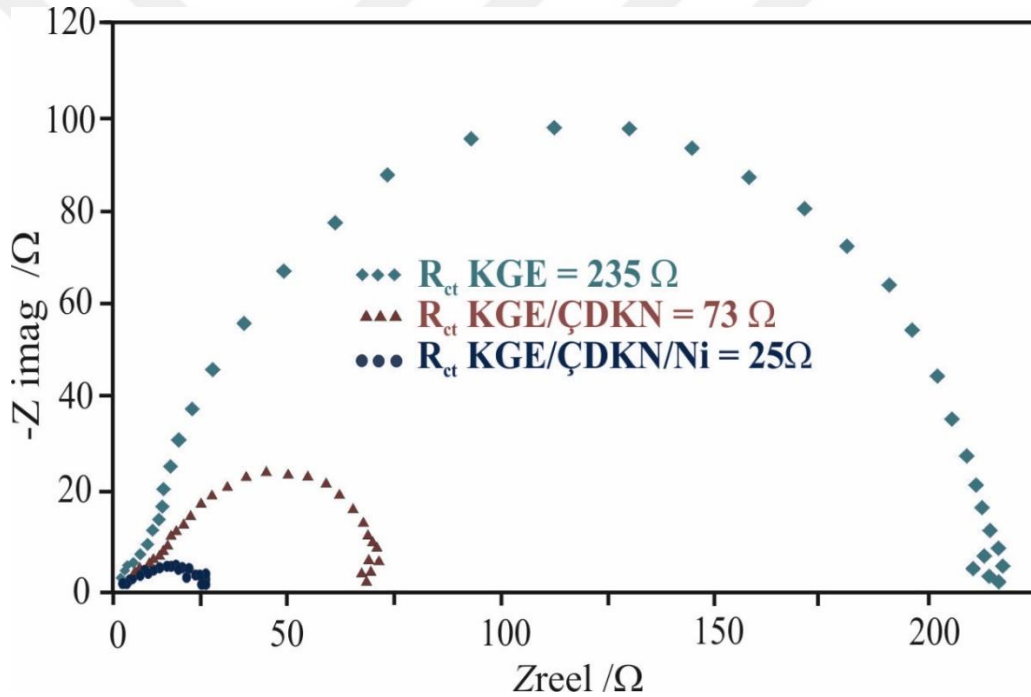
Katalizör	$-b/\text{mV.dec}^{-1}$	η/mV (10 mA.cm^{-2})	Elektrolit	Kaynak
Ni/KNT	124	345	0,5M H_2SO_4	Pan vd. (2015)
$\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{Se}_2/\text{ÇDKN}$	71	200	0,5M H_2SO_4	Balaji vd. (2020)
$\text{MoS}_2/\text{ÇDKN}$	130	540	0,5M H_2SO_4	Lai vd. (2019)
$\text{SrMoO}_4/\text{rGO}$ /ÇDKN	81	197	0,5M H_2SO_4	Kareem vd. (2020)
KGE/ÇDKN/Ni	162	350	0,5M H_2SO_4	Bu çalışma

Çizelge 4.2'de, bu çalışmada kullanılan elektrokatalizöre benzer özelliklerdeki materyaller üzerinde, asidik ortamda hidrojen oluşumu için elde edilen Tafel eğimleri ve 10 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunun elde edildiği potansiyel değerleri

karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, tez çalışmasında elde edilen sonuçların, literatürde elde edilen değerlere yakın sonuçlar olduğu tespit edilmiştir.

4.2.3 Elektrokimyasal impedans spektroskopisi

Hazırlanan elektrotların hidrojen oluşumunda elektron aktarımındaki performansları, dolayısıyla elektrokatalitik aktiviteleri EIS tekniğiyle de incelenmiştir. Elektrokimyasal impedans spektrumları Nyquist diyagramları olarak değerlendirilmiştir. ÇDKN ve ÇDKN/Ni nanokompozit kaplı kalem grafit elektrodun ve karşılaştırma amaçlı çıplak kalem grafit elektrodun 0,5 M H₂SO₄ içerisinde, 0,1 ile 100.000 Hz frekans aralığında, -0,6 V sabit potansiyelde kaydedilen Nyquist diyagramları Şekil 4.6’da görülmektedir.



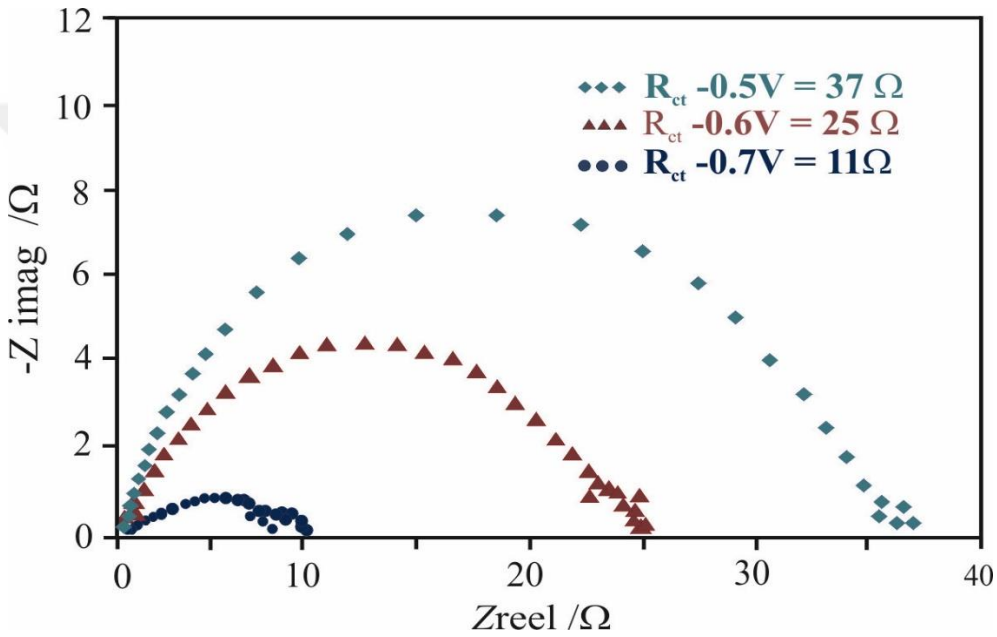
Şekil 4.6. KGE, KGE/ÇDKN ve KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrotların 0,5 M H₂SO₄ içerisinde -0,6 V’ta kaydedilen Nyquist diyagramları.

Nyquist diyagramlarından elde edilen yarım dairelerin çapları, hidrojen çıkışı tepkimesinde elektron aktarımına karşı gösterilen direnç olarak yorumlanmaktadır (Balun Kayan ve Köleli, 2015).

Şekil 4.6 incelendiğinde, hidrojen oluşumunda en yüksek direnç çıplak KGE üzerinde 235 Ω olarak belirlenmiş, elektrot yüzeyine ÇDKN uygulandığında yarım dairenin çapı küçülerek elektron transferine karşı gösterilen direnç 73 Ω’a düşmüş,

en düşük direnç KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrot üzerinde 25Ω olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan direncin düşük olması, hidrojen gazı oluşumu için kaydedilen akımın yüksek olduğu, dolayısıyla hidrojen çıkışı tepkimesinin daha hızlı gerçekleştiği ve EİS sonuçlarının, dönüşümlü voltametri ile Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Hidrojen oluşumunda en düşük direncin kaydedildiği KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektroda farklı potansiyeller uygulanarak da Nyquist diyagramları kaydedilmiştir (Şekil 4.7).



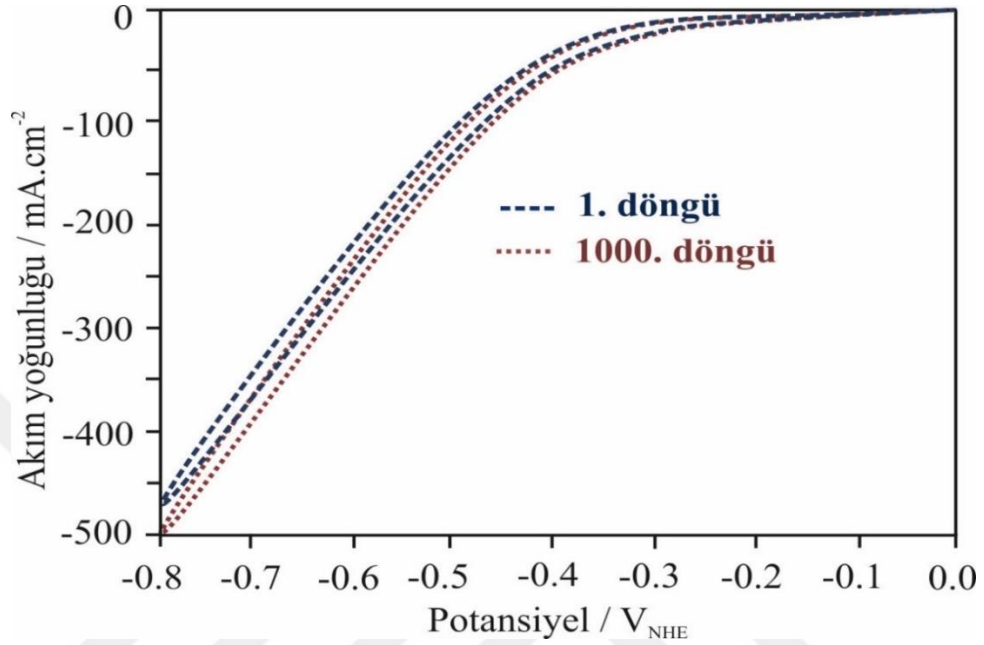
Şekil 4.7. KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit elektrodun 0,5 M H₂SO₄ içerisinde farklı potansiyellerde kaydedilen Nyquist diyagramları.

-0,5V, -0,6V ve -0,7V olmak üzere üç ayrı potansiyel uygulanarak kaydedilen Nyquist diyagramları incelendiğinde, sulu ortamda daha negatif potansiyeller uygulandıkça elde edilen yarım dairenin çapı küçülmekte, dolayısıyla hidrojen oluşumu hızlanmaktadır.

4.2.4. Stabilité çalışmaları

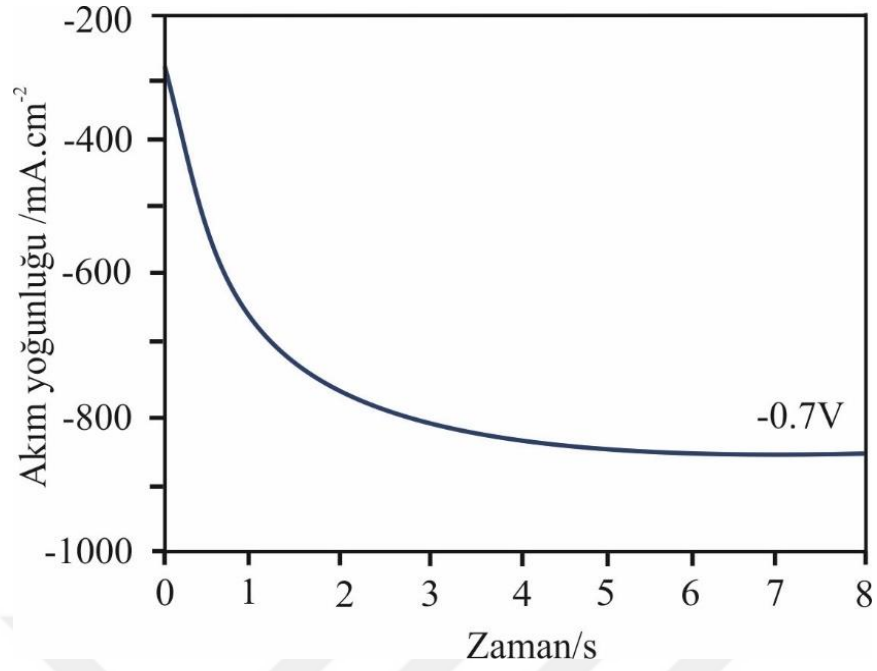
Geliştirilen bir elektrokatalizörün verimliliğinin artırılmasının yanında, kullanıldığı proseste uzun süre kararlı kalabilmesi de oldukça önemlidir. Hazırlanan KGE/ÇDKN/Ni nanopartikül ile modifiye edilmiş elektrodun stabilitesi, 0,5 M H₂SO₄ elektrolit ortamında dönüşümlü voltametri ve kronoamperometri ölçümleriyle

test edilmiştir. Dönüşümlü voltametri ile 0,0V ile -0,8V potansiyel aralığında 100 mV.s^{-1} tarama hızıyla kaydedilen ilk döngü ve 1000. döngü sonucunda oluşan voltamogramlar karşılaştırıldığında, elektrodun aktifliğini koruduğunu, hatta akım yoğunluğunun bir miktar arttığı görülmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. KGE/ÇDKN/Ni nanopartikül elektrodun 0,5 M H_2SO_4 elektrolit ortamında 100 mV.s^{-1} tarama hızıyla kaydedilen ilk ve 1000 döngü sonucundaki dönüşümlü voltamogramları.

KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit filmiyle modifiye edilmiş kalem grafit elektroda – 0,7V’luk sabit potansiyel uygulanarak elektrokatalizörün kararlılığı kronoamperometrik olarak da test edilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. KGE/ÇDKN/Ni nanopartikül elektrodun 0,5 M H₂SO₄ elektrolit ortamında -0,7V'ta kaydedilen kronoamperomogramı.

Şekil 4.9 incelendiğinde, yaklaşık 300 mA.cm⁻² ile başlayan akım yoğunluğunun artarak 800 mA.cm⁻² civarına ulaştığı ve 8 saatlik test süresince sabit kaldığı görülmüştür. Kararlılık testleri değerlendirildiğinde, geliştirilen elektrokatalizörün hidrojen oluşumunda katalitik aktivitesini uzun süre koruduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doğadaki temel enerji kaynakları birincil enerji kaynaklarıdır. Birincil enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar, dünya enerji gereksiniminin çok büyük bir dilimini karşılamaktadırlar. Fosil yakıtların kullanımı ve tüketim hızı her yıl elde edilen verilere göre daha fazla artış göstermektedir. Fosil yakıtlara olan talep ile birlikte asit yağmurları, hava kirlilikleri, ozon delikleri gibi doğayı tehdit eden sonuçlar baş göstermektedir. Fosil yakıtlara alternatif olarak ortaya çıkan yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması ve elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda daha çok üzerine düşülen enerji kaynağı hidrojen enerjisi olmuştur. Hidrojen enerjisinin en ilgi çekici yönü, temiz, verimli ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olmasıdır. Bu özellikler, alternatif enerji kaynağının sahip olması gereken temel özelliklerdir.

Hidrojen enerjisinin elde edilme yöntemleri arasında suyun elektrolizi yöntemi, en basit, temiz ve verimli sayılabilecek yöntemdir. Yöntemin bu avantajları yanında, dezavantajı da bulunmaktadır, bu da fazla miktarda enerji tüketimine bağlı olarak, elektrokimyasal sistem içinde oluşan aşırı gerilim ve buna bağlı olarak ortaya çıkan maliyet artışıdır. Bu nedenle aşırı gerilimin düşük olduğu yani daha düşük enerji girdisine sahip sistemler oluşturmak, oldukça önemlidir.

Karbon nanotüpleri , sahip oldukları geniş yüzey alanları, hafiflikleri ve dizilimlerine bağlı olarak elektrik akımını iyi iletebilme özelliklerinden dolayı birçok çalışmada araştırma konusu olmuştur. Ayrıca elektrokimya alanında sıklıkla tercih edilmelerinin sebebi, modifikasyon işlemlerine uygun olmalarıdır. Bununla birlikte sağlam, duyarlı, hassas sonuçlar verebilmeleri ve kararlı olmaları karbon nanotüpleri elektrokimyasal proseslerde ilgi çekici hale sokmaktadır.

Diğer taraftan, suyun elektrolizi ile hidrojen eldesinde en aktif metallerin, Pt ve Au gibi soy metaller olduğu bilinmektedir. Ancak bu metallerin pahalı olmaları ve yüzeylerinin çok çabuk pasivize olmaları, yöntemin maliyetini arttıran unsurlardır. Soy metallerin yerine, d-grubu geçiş metali olan Ni, literatür verilerine göre hem aktif, hem de kararlı metal olduğu için, hidrojen eldesinde tercih edilen bir elektrot materyalidir.

Bu amaçlarla, tez çalışmasında, ucuz, kolay ulaşılabilir, geniş yüzey alanına sahip ve iletken bir materyal olarak kalem grafit , elektrokatalizör olarak tercih edilmiş, kalem grafit elektrodun yüzeyi ÇDKN ile kaplanmış, böylelikle daha geniş ve

modifikasyona daha uygun bir hale getirilen yüzey, Ni nanopartiküllerle modifiye edilerek, suyun elektrolizi ile hidrojen eldesinde ucuz ve etkin bir elektrot materyali geliştirilmiştir. Geliştirilen KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit yapısının yüzey özellikleri SEM ve EDS teknikleriyle, hidrojen oluşumu tepkimesindeki etkinliği, dönüşümlü voltametri, Tafel eğrileri ve EIS teknikleriyle incelenmiştir. Karşılaştırma amaçlı olarak aynı karakterizasyon işlemleri ve elektrokimyasal ölçümler, çıplak kalem grafit ve KGE/ÇDKN kaplı elektrotlar için de tekrarlanmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, KGE/ÇDKN/Ni nanokompozit yapısının, suyun elektroliziyle hidrojen gazı üretiminde, ekonomik, kolay hazırlanabilen ve elektrokatalitik aktifliği yüksek bir elektrokatalizör olabileceği sonucuna varılmıştır.

Tez çalışmasında edinilen bilgi ve deneyimlerden yola çıkılarak, bu yapılara benzer sistemlerle sudan elektrokatalitik olarak hidrojen gazı elde edebilmek amacıyla, katalitik aktifliği yüksek, kararlı ve ekonomik elektrokatalizörler geliştirilebilecek sonuçlar ve bilgi birikimleri elde edilmiştir.

.

KAYNAKLAR

- Ayaz, R. M. Z., 2019. Chalcogenides in photoelectrochemical hydrogen production application and characterization, Marmara University Institute Of Pure And Applied Sciences, İstanbul.
- Balaji, D., Arunachalam, P., Duraimurugan, K., Madhavan, J., Theerthagiri, J., Al-Mayouf, A. M., ve YongChoi, M., 2020. Highly efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction in acid media, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 13, 7838-7847.
- Balun Kayan, D. İlhan, M. ve Koçak, D. 2018. Electrocatalytic hydrogen production on GCE/RGO/Au hybrid electrode, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 25, 10562-10568.
- Balun Kayan, D., Koçak, D., İlhan, M. ve Koca, A., 2017. Electrocatalytic hydrogen production on a modified pencil graphite electrode, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 4, 2457-2463.
- Balun Kayan, D. ve Koleli, F., 2015. Dinitrogen reduction on a polypyrrole coated Pt electrode under high-pressure conditions: electrochemical impedance spectroscopy studies, *Turkish Journal of Chemistry*, 39, 648-659.
- Ceyhun, S. B., 2017. Gökkuşığı alabalığı kasının elementer kompozisyonunun enerji dağılımlı spektroskopi yöntemi ile tespit edilebilirliğinin araştırılması, *Alinteri Zirai Bilimler Dergisi*, 32, 35-37.
- Chung, D. Y., Park, S. K., Chung, Y. H., Yu, S. H., Lim, D. H., Jung, N., Ham, H. C., Park, H. Y., Piao, Y., Yoo, S. J. ve Sung, Y. E., 2014. Edge-exposed MoS₂ nano-assembled structures as efficient electrocatalysts for hydrogen evolution reaction, *The Royal Society of Chemistry, Nanoscale*, 6, 2131–2136.
- Darband, B., Aliofkhazraei, M. ve Rouhaghdam, A. S., 2018. Three-dimensional porous Ni-CNT composite nanocones as high performance electrocatalysts for hydrogen evolution reaction, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 829, 194-207.
- Döner, A., Karcı, İ. ve Kardaş, G., 2012. Effect of C-felt supported Ni, Co and NiCo catalysts to produce hydrogen, *İntrenational Journal of Hydrogen*, 37, 9470-9476.
- Fagan, D. T., Kuwana, T. 1985. Vacuum heat treatment for activation of glassy carbon electrode, *Anal. Chem.*, 567, 2759-2763.
- Gençoğlu, M. T., 2002. Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye açısından önemi, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Elazığ, Türkiye.
- Gorker, L., ve Dimitrov, V., 2009. Modified tafel equation for electroless metal deposition, *Progress in Reaction Kinetics and Mechanism*, 34, 127-40.
- Hu, S. ve Wu K., 2004. Electrochemical study and selective determination of dopamine at a multi-wall carbon nanotube-nafion film coated glassy carbon electrode, *microchim. Acta*, 144, 131–137.

- Huff, C., Dushatinski, T. ve Abdel-Fattah, T. M., 2017. Gold nanoparticle/multi-walled carbon nanotube composite as novel catalyst for hydrogen evolution reactions, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 30, 18985-18990.
- Huff, C., Long, J. M., Heyman, A. ve Abdel-Fattah, T. M., 2018. Palladium nanoparticle multiwalled carbon nanotube composite as catalyst for hydrogen production by the hydrolysis of sodium borohydride, *Applied Energy Materials*, 1, 4635-4640.
- Kareem, A., Kunhiraman, A. K. ve Maiyalagan, T., 2020. Hydrogen evolution reaction catalyzed by microstructured SrMoO₄ decorated on three-dimensional nanostructured rGO/f-MWCNT in acidic medium, *Ionics*, 26, 5055-5064.
- Krstajić, N., Popović, M., Grgur, B., Vojnović, M. ve Šepa, D., 2001. On the kinetics of the hydrogen evolution reaction on nickel in alkaline solution: Part II. Effect of temperature, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 512, 2, 27-35.
- Kumbur, H., Özer, Z., Özsoy, D. H. ve Avcı, E. D., 2005. Türkiye’de geleneksel ve yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli ve çevresel etkilerinin karşılaştırılması, III. Ulusal Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin.
- Lai, B., Singh, S. C., Bindra, J. K., Saraj, C. S., Shukla, A., Yadav, T. P., Wu, W., McGill, S. A., Dalal, N. S., Srivastava, A. ve Guo, C., 2019. Hydrogen evolution reaction from bare and surface-functionalized few-layered MoS₂ nanosheets in acidic and alkaline electrolytes, *Materials Today Chemistry*, 14, 100207.
- Lijima, S., 2002. Carbon nanotubes: past, present and future, *Physica B*, 323, 1-5.
- Luo, L., Zou, X., Ding, Y., ve Wu, Q., 2008. Derivative voltammetric directsimultaneous determination of nitrophenol isomers at a carbon nanotube modified electrode, *Sens Actuators B*, 135, 61-65.
- Mahale, N. K. ve Ingle, S., T., 2017. Electrocatalytic hydrogen evolution reaction on nano-nickel decorated graphene electrode, *Energy*, 119, 872-878.
- McArthur, M. A., Jorge, L., Coulombe, S. ve Omanovic, S., 2014. Synthesis and characterization of 3D Ni nanoparticle/carbon nanotube cathodes for hydrogen evolution in alkaline electrolyte, *Journal of Power Sources*, 266, 365-373.
- Nguyen, T.K., Bannov, A.G., Popov, M., Yun, J.W., Nguyen, A.D., ve Kim, Y.S., 2018. High-temperature-treated multiwall carbon nanotubes for hydrogen evolution reaction, *Inter Journal of Hydrogen Energy*, 43, 13, 6526-6531.
- Özkan, S. A., Biryol, G. ve Gençtürk, Z. 1994. An activation method for glassy carbon electrode, *18*, 34-38.
- Pan, Y., Hu, W., Liu, D., Liu, Y. ve Liu, C., 2015. Carbon nanotubes decorated with nickel phosphide nanoparticles as efficient nanohybrid electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction, *Journal of Materials Chemistry A*, 3, 24, 13087-13094.

- Selici, T., Utlü, Z. ve İlten, N., 2006. Enerji kullanımının çevresel etkileri ve sürdürülebilir gelişme açısından değerlendirilmesi, III. Ulusal Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E., 2018. Toz metalürjisi metoduyla üretilen Al-Si₃N₄ metal matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Engineer and Machinery, 59, 693, 33-46.
- Tural, H., Gökçel, H. ve Ertas, F.N., 2003. Enstrümental analiz I elektroanalitik yöntemler, Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Uslu, B. ve Biryol, İ., 1997. Elektrokataliz, Bilimsel Taramalar, 22, 13-20.
- Valcárcel, M., Cárdenas, S. ve Simonet, B. M., 2007. Role of carbon nanotubes in analytical science, Analytical Chemistry, 79, 13, 4788-97.
- Varınca, K. ve Gönüllü, M. T., 2006. Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin kullanım derecesi, yöntemi ve yaygınlığı üzerine bir araştırma, I. Ulusal Güneş Ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, Eskişehir, Türkiye.
- Wang, I. ve Hutehins, L.D. 1985. Activation of glassy carbon electrodes by alternating current electrochemical treatment, Anal. Chem. Acta, 167, 325-334.
- Wang, L., Li, Y., Xia, M., Li, Z., Chen, Z., Ma, Z., Qin, X. ve Shao, G., 2017. Ni nanoparticles supported on graphene layers: An excellent 3D electrode for hydrogen evolution reaction in alkaline solution, Journal of Power Sources, 347, 220-228.
- Yılmaz, S., 2016. Uygulama örnekleriyle elektroanalitik kimya, Gazi Kitapevi, Ankara.
- URL-1 < http://www.gazalarm.net/hidrojen_gazi_dedektoru.html>, Erişim tarihi: 10.10.2020.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Nesrin AYDIN ULUKUŞ

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans :Selçuk Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü,
2010 - 2014

Yüksek Lisans :Aksaray Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı, 2021

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1-Delta Kozmetik San. Ve Tic. A.Ş. Firmasında Kimya Mühendisi, 2015-2016

2-Selin OSGB Firmasında İş Güvenliği Uzmanı, 2017-2018

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. N. Aydın Ulukuş, D. Balun Kayan, “Electroactivity of MWCNTs/Ni nanocomposite film on Hydrogen Evolution” Electrochemistry Conference 2019, Turkey.