

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Orhan AĞFINDIK

**KOBALT-KALAY KAPLI NİKEL ELEKTROTTA SUYUN
ELEKTROLİZİ İLE HİDROJEN GAZI ELDE EDİLMESİ**

KİMYA ANABİLİM DALI

ADANA, 2020

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOBALT-KALAY KAPLI NİKEL ELEKROTTA SUYUN ELEKTROLİZİ
İLE HİDROJEN GAZI ELDE EDİLMESİ**

Orhan AĞFINDIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KİMYA ANABİLİM DALI

Bu Tez / /2020 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Gülfeza KARDAS
DANIŞMAN

.....
Prof. Dr. Halime Ö. PAKSOY
ÜYE

.....
Doç. Dr. Murat FARSAK
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz Kimya Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No:

**Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOBALT-KALAY KAPLI NİKEL ELEKTROTTA SUYUN ELEKTROLİZİ İLE HİDROJEN GAZI ELDE EDİLMESİ

Orhan AĞFINDIK

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Gülfeza KARDAŞ
Yıl: 2020, Sayfa: 57
Jüri : Prof. Dr. Gülfeza KARDAŞ
: Prof. Dr. Halime Ö. PAKSOY
: Doç. Dr. Murat FARSAK

Bu çalışmada, katot elektrodunu hazırlamak için Ni köpük (Ni mesh) çalışma elektrodu, MTI Corporation'dan satın alınan Nikel köpük destek malzemesi kullanılmıştır. Çalışma elektrotları verilen özelliklere sahip 0,16cm x 1 cm x 0.5cm (kalınlık, genişlik, yükseklik) Nikel köpük boyutlarında hazırlanmıştır. Bir kaplama yapmak için, nikel köpük 1 cm x 0.5 cm ölçüldü ve geri kalanı teflon ile sarıldı, saf sudan geçirildi ve kaplama banyosuna daldırıldı. Üzerine nikel (Ni#Ni), kalay (Sn#Ni), kobalt (Co#Ni), kalay-kobalt (SnCo#Ni) ve nikel-kalay-kobalt (NiSnCo#Ni) kaplamalar yapılarak bazik ortamda hidrojen çıkış reaksiyonuna (HER) katalitik etkinlikleri belirlenmiştir. Kaplamalar kronopotansiyometri tekniği ile 5 mA cm⁻² (Sn için) ve 10 mA cm⁻² (Co ve Ni için) akım uygulanarak yapılmıştır. Hazırlanan elektrotların yüzey karakterizasyonları SEM-EDX cihazı ile yapılmıştır. Elektrotların HER için katalitik etkinlikleri 1,0 M KOH çözeltisi içerisinde dönüşümlü voltametri, potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi teknikleri ile belirlenmiştir. Sonuç olarak elde edilen HER aşırı gerilimi en düşük (0,1911 V) olan SnCo#Ni elektrot, en düşük direnç (2,512 ohm cm²) ve en yüksek akım yoğunluğu (110,9 mA cm⁻²) en çok hidrojen üretebilen elektrot olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler Hidrojen, Katot, Elektrokimyasal Kaplama, Elektrokataliz, Kobalt, Kalay, Nikel köpük

ABSTRACT

MSc THESIS

HYDROGEN GAS PRODUCTION BY ELECTROLYSIS OF WATER IN COBALT-TIN COATED NICKEL ELECTRODE

Orhan AĞFINDIK

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

Supervisor	:Prof. Dr. Gülfeza KARDAŞ Year :2020, Pages : 57
Jury	: Prof. Dr. Gülfeza KARDAŞ : Prof. Dr. Halime Ö. PAKSOY : Assoc. Prof. Dr. Murat FARSAK

In this study, Ni foam (Ni mesh) working electrode, Nickel foam support material purchased from MTI Corporation was used to prepare the cathode electrode. The working electrodes were prepared in the dimensions of Nickel foam 0,16cm x1 cm x 0.5cm (thickness, width, height) with the given properties. To make a coating, the nickel foam was measured 1 cm x 0.5 cm and the rest was wrapped with teflon, passed through pure water and immersed in the coating bath. Coating bath composition Nickel (Ni#Ni) on nickel foam, tin (Sn#Ni) on nickel foam, cobalt (Co#Ni) on nickel foam, tin on nickel foam respectively, cobalt (SnCo#Ni) on nickel foam, respectively nickel, tin, cobalt (NiSnCo#Ni) coatings were made. Coatings were made by using chronopotentiometry technique by applying 5 mA cm^{-2} (for Sn) and 10 mA cm^{-2} (for Co and Ni) current for cyclic voltammetry (CV), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), cathodic current curves (Tafel) for characterization of electrodes in 1,0 M KOH solution.) and linear scanning voltammetry (LSV) techniques were used. Hydrogen growth efficiency was determined by accumulated hydrogen gas. Surface Characterization was done using SEM and EDX. As a result, the SnCo # Ni electrode with the lowest HER overvoltage (0.1911 V) is the electrode capable of producing the most hydrogen with the lowest resistance (2.512 ohm cm^2) and the highest current density (110.9 mA cm^{-2}) It has been identified.

Keywords: Hydrogen, Cathode, Electrochemical Deposition, Cobalt, Tin, Nickel mesh

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Geleceğin yakıtı hidrojen, birim kapasite ve yüksek yanma ısısı nedeniyle petrol ve petrol ürünlerine kıyasla daha güçlü bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen yanma ürünleri çevreye zararlı değildir. Hidrojen, su, kömür, doğal gaz, biyokütle, hidrojen sülfür, bor hidritler ve diğerleri gibi birçok farklı hammaddeden termal, elektrokatalitik veya fotokatalitik işlemlerle üretilebilir.

21.yüzyılda enerji seçeneği olarak elektrik ve hidrojen enerjisine yönelim olmaktadır. Bu enerjiler birbirine dönüştürülebildiği gibi temiz enerji kaynaklarıdır. Hidrojen enerjisi elektrikten daha yüksek depolanabilme ve daha iyi taşınabilmektedir. Hidrojenin bu özelliğinden dolayı motorlu taşıtlar ve uçak içinde enerji kaynağı olmaktadır. Suyun elektrolizi sonucunda hidrojen gazı eldesi, hidrojenin kimyasal özellikleri, petrol türevi yakıtlara göre motorlu taşıtlarda enerji daha yüksek güce dönüştürebilmektedir

Elektroliz, saf hidrojeni doğrudan elde etmek için en iyi tekniktir. Elektrolizin bazı dezavantajları vardır. Bunlar yüksek maliyet ve düşük katalizör verimliliğidir. Bu nedenle, bu teknik geliştirilmelidir. Elektrolizin maliyetini azaltmak için, yüksek katalitik aktiviteye sahip ucuz elektrot malzemelerinin seçilmesinin yanı sıra elektrot reaksiyonlarının aşırı gerilimlerinin azaltılması gereklidir. Soy metaller en aktif malzemelerdir. Bununla birlikte, endüstriyel uygulamalar için bu metaller çok pahalıdır. Sudan hidrojen üretimi için daha yüksek verim elde etmek amacıyla, Ni, Fe, Co, Cu, Sn ve Zn gibi geçiş metallerinin birbirleriyle kombinasyonları kullanılmaktadır. Genel olarak, HER'ye doğru düşük potansiyeli olan yeni malzemelerin geliştirilmesi çok katmanlı katalizörlerin kullanılmasıyla katalitik aktivitenin artırılması sağlanabilir.

Ni bazlı alaşımlar HER içinde yüksek katalitik aktiviteye sahip ve alaşımlar arasındaki sinerjistik elektronik etki için tek Ni katalizörden daha iyi katalitik etkinlik sergilemektedir. Saf metaller arasında yeni malzemeler bulmak kolay değil. İki veya daha büyük alaşımların kullanımı daha fazla metal artırmak

için önemli bir yaklaşımdır. Çeşitli metal katalizörler kullanılarak asidik veya alkali çözeltilerdeki su elektrolizinden hidrojen üretimi, yüksek saflıkta hidrojen üretimi nedeniyle en çok çalışılan reaksiyonlardan biridir. Soy olmayan metallerin katalizör olarak kullanıldığı yerlerde, genellikle bir alkali çözeltisi tercih edilir. Çünkü aşırı miktarda hidroksit iyonları alkali zeltiiler kullanıldığında hidrojen evrim reaksiyonunu (HER) mümkün kılar. HER'nin verimliliği, katalizör olarak kullanılan metale bağlıdır.

Bu nedenle, HER için alkalın su elektrolizi sıklıkla tercih edilir.

Bu çalışmada katot elektrodu hazırlamak için, Ni köpük (Ni mesh) alışma elektrodunu, MTI Corporation satın alınan Nikel köpük destek malzemesi kullanıldı.

Çalışma elektrotları, verilen özelliklere sahip olan Nikel köpük 0,16cm x1 cm x 0.5cm (kalınlık, genişlilik, yükseklik) boyutlarında hazırlandı. Kaplama yapmak için nikel köpük 1 cm x 0,5 cm ölçülüp geri kalan kısım teflon ile sarılarak saf sudan geçirilip kaplama banyosuna daldırılmıştır. Nikel köpük üzerine, nikel (Ni#Ni), kalay (Sn#Ni), kobalt (Co#Ni), sırasıyla kalay, kobalt (SnCo#Ni), ve sırasıyla nikel, kalay, kobalt (NiSnCo#Ni) kaplamalar yapıldı. Kaplamalar kronopotansiyometri tekniği ile 5 mA cm⁻² (Sn için) ve 10 mA cm⁻² (Co ve Ni için) akım uygulanarak yapılmıştır. Hazırlanan elektrotların 1,0 M KOH zeltisi içerisinde elektrokimyasal karakterizasyonu için dönüşümlü voltametri (CV), elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve potansiyodinamik polarizasyon teknikleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan HER aşırı gerilimi en düşük (0,1911 V) olan SnCo#Ni elektrot, en düşük direnç (2,512 ohm cm²) ve en yüksek (110,9 mA cm⁻²) akım yoğunluğu ile en çok hidrojen üretebilen elektrot olarak belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans aşamasından bu yana deneyim ve birikimlerini paylaşan, yol gösteren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Gülfeza KARDAŞ'a teşekkür ederim.

Ayrıca verdikleri teorik bilgiler ile desteklerini esirgemeyen sayın Doç. Dr. Murat FARSAK' a çok teşekkür ederim.

Deney aşamasında sabırla ve özveriyle her türlü yardımlarını ve desteklerini gördüğüm değerli hocam Arş. Gör. Dr. Gökmen SİĞİRCİK' a, Dr. Fatih TEZCAN' a teşekkür ederim.

Çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Kimya bölümüne ve analizlerimi yaptığım ÇÜMER LAB ' a beni destekledikleri için çok teşekkür ederim.

Deney çalışmalarım esnasında kritik bir zamanda sağlamış olduğu materyal ile deneylerimi sonuçlandırmamda katkısı olan değerli kimyager arkadaşım Dr. Rahisa Nefise MUTLU' ya ve yüksek lisansım boyunca edindiğim diğer kıymetli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında bana destek olan, bu günlere gelmem için emek harcayan, her koşulda yanımda olan sevgili babam Memik AĞFINDIK, annem Sevim AĞFINDIK, desteklerini esirgemeyen kardeşlerim Serap AĞFINDIK, Seda AĞFINDIK, Ayşe AĞFINDIK, Mert AĞFINDIK ' a hep yanımda oldukları için çok teşekkür eder sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Enerji Kaynakları.....	2
1.2. Hidrojenin tanımı ve özellikleri.....	3
1.3. Hidrojen Üretim Yöntemleri.....	4
1.3.1. Sudan Hidrojen Üretimi	5
1.3.2. Elektroliz	5
1.3.3. Doğrudan Termal Bozunma / Termoliz	8
1.3.4. Termokimyasal Süreç.....	8
1.3.5. Güneş Enerjisinden Yararlanma	9
1.4. Hidrojenin Diğer Yakıtlarla Farkları	9
1.5. Elektrokataliz	10
1.6. Metallerin Elektrokatalitik Etkinlikleri.....	11
1.7. Aşırı Gerilim.....	13
1.7.1. Hidrojen Oluşum Reaksiyonları.....	13
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	17
3. MATERYAL	29
3.1. Materyaller.....	29
3.2. Elektrokimyasal Ölçümler	30
3.3. Yüzey Karakterizasyonu.....	30

4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	31
4.1. Dönüşümlü Voltamogramlar	31
4.2. Katodik Akım-Potansiyel Eğrileri	35
4.3. Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (EIS)	38
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	57



ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 1.1.	Benzin, doğal gaz ve hidrojenin özellikleri	4
Çizelge 1.2.	Kimyasal Kataliz ve elektrokatalizin davranışları ve hız eşitliklerinin kıyaslanması	11
Çizelge 4.1.	Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların pik potansiyelleri (Ep) ve pik akımları (Ip)	35
Çizelge 4.2.	Katodik akım-potansiyel eğrilerinden belirlenen aşırı gerilim ve -1,5 V'ta elde edilen akım yoğunlukları.	37
Çizelge 4.3.	Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların açık devre potansiyeli (Eocp) ve -1,3V ta (E _{-1,3V}) belirlenen polarizasyon dirençleri.....	41
Çizelge 4.4.	SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni EDX verileri	45



ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil .1.1. Volkan Eğrisi.....	12
Şekil 4.1. Ni köpük (#Ni) elektrotunun 100 mVs ⁻¹ tarama hızıyla 1,0 M KOH çözeltisinde elde edilen dönüşümlü voltamogramı	31
Şekil 4.2 Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların 100 Mv s ⁻¹ tarama hızıyla elde edilen dönüşümlü voltamogramları.	33
Şekil 4.3. Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların 1 Mv s ⁻¹ tarama hızı ile elde edilen akım-potansiyel eğrileri	36
Şekil 4.4. Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların 10 Mv s ⁻¹ tarama hızı ile elde edilen yarı logaritmik akım-potansiyel eğrileri	37
Şekil 4.5. Ni, Ni#Ni, Sn#Ni, Co#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların açık devre potansiyellerinde 1,0 M KOH içerisinde oda sıcaklığında elde edilen Nyquist diyagramları.	39
Şekil 4.6. Ni, Ni#Ni, Sn#Ni, Co#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotlarda 1,0 M KOH içerisinde -1,3 V Hidrojen Bölgesinde alınan Nyquist diyagramları.....	40
Şekil 4.7. Ni(a), Sn#Ni(b), Co#Ni(c), SnCo#Ni(d) ve NiSnCo#Ni(e) elektrotların SEM görüntüleri.....	40



SİMGELER VE KISALTMALAR

EDX	: Enerji dağılımlı X- ışını spektroskopisi
EIS	: Elektrokimyasal Impedans Spektroskopisi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
LSV	: Doğrusal Taramalı Voltamogramı
HER	: Hidrojen Oluşum Reaksiyonu
v	: Tarama hızı / Mv





1. GİRİŞ

Enerji bir sistemin iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlanır. Dünya üzerinde toplumların enerjiye olan ihtiyaçları her yıl katlanarak artmaktadır. Enerji ihtiyacının %85'nden fazlası fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Bilindiği gibi Dünya ve tabii ki ülkemiz enerjide fosil yakıtlara bağımlıdır. Kömür bakımından orta düzeyde fakat petrol ve doğal gaz gibi temel sıvı ve gaz yakıtlar bakımından ise maalesef zengin olmayan bir ülkeyiz. Ayrıca bu fosil yakıtların yanma ürünleri sonucunda açığa çıkan gazlar küresel ısınmaya, asit yağmurlarına neden olmaktadır. Geri dönüşümü zor, çevre kirliliğine, doğayı ve canlıların geleceğini tehdit eden sonuçlara neden olmaktadır. Bir diğer konu ise fosil yakıtların tükenerek bitmesi gerçeğidir. Fosil kaynaklar sınırlı rezervlere sahip olduğu için alternatif enerji kaynakları bulunmalıdır.

Hava kirliliği, çevre kirliliği ve fosil yakıt rezervlerinin azalması gibi sorunlar 21.yüzyılda enerji seçeneği olarak elektrik ve hidrojen enerjisini doğurmaktadır. Bu enerjiler birbirine dönüştürülebilmektedir. Hidrojen enerjisi elektrikten daha yüksek depolanabilme ve daha iyi taşınabilmektedir. Hidrojenin bu özelliğinden dolayı motorlu taşıtlar ve uçak içinde enerji kaynağı olmaktadır. Suyun elektrolizi sonucunda hidrojen gazı eldesi, hidrojenin kimyasal özellikleri, petrol türevi yakıtlara göre motorlu taşıtlarda enerji daha yüksek güce dönüştürebilmektedir. Ayrıca çevre dostu enerji olduğundan hidrojeni önemli bir alternatif enerji kaynağı yapmaktadır. Hidrojen birçok yenilenebilir enerji kaynağından üretilmektedir. Hidrojen kullanımı artırmak ve yaygınlaştırmak için birtakım engeller vardır. Bu engel teşkil eden sorunlar; ekonomi açısında ve mevcut kullanılan sistemlerin uyumsuzluğunun giderilememesidir. Tükenen enerji kaynakları ve çevresel olumsuzluklar yüzünden yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretimine başlanması ve kullanımının yaygınlaşması için ekonomik su elektroliz sistemlerinin oluşturulması gerekmektedir(Hilooğlu ve ark, 2018; Yu ve ark, 2019; Veziroglu T.N. ve ark, 1992).

1.1. Enerji Kaynakları

Günümüzde dünyanın en büyük enerji gereksinimleri fosil yakıtlarla karşılanmakta ve aşağıdaki zorluklarla karşılaşılmaktadır:

- Sınırlı fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi
- Yüksek kaliteli enerjinin tehlikeli düşük kaliteli atıklara ayrılması
- Artan enerji talebi.

Sanayileşmiş ülkeler için güvenli bir enerji kaynağı ve gelişmekte olan ülkelerin artan enerji tüketimini karşılamak için, dünyanın enerji arzını fosil olmayan enerji kaynaklarına veya alternatif temiz enerji kaynaklarına aktarmak gerekir. Güneş, su, hidrojen, okyanus gibi alternatif enerji kaynakları, termal, rüzgar, dalgalar, termonükleer, jeotermal vb. artan talebi karşılamak için olası enerji kaynakları olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, bu enerji kaynaklarının hiçbiri istisna hidrojen, petrol ve doğal gazın yerini almak için arzu edilen tüm özelliklere sahip değildir. Örneğin, bazıları sadece aralıklı olarak mevcuttur, diğerleri tüketim merkezlerinden uzaktadır ve nakliye için yakıt olarak kullanılamaz. Bu nedenle, yukarıdaki alternatif enerji kaynaklarından hidrojen, yeni enerji kaynakları ile kullanıcı arasındaki bağlantıyı oluşturabilecek en iyi seçenek olarak kabul edilir. Hidrojen, en temiz ve geri dönüştürülebilir bir yakıttır ve yakıt olarak kullanıldığında sadece su üretir. Hidrojen birincil enerji kaynağı değildir. Ara enerjinin veya ikincil enerji biçimidir. Hidrojen enerji sisteminde, hidrojenin fosil olmayan enerji kaynaklarından üretileceği ve günümüzde fosil yakıtların kullanıldığı her uygulamada kullanılacağı öngörülmektedir. Hidrojen en bol elementtir ve malzemenin %90'ından fazlasını oluşturur. Evrende, güneşte ve yıldızların çoğunda bulunabilir. Hidrojenin nükleer füzyonla Helyum'a dönüştürülmesi, güneş dahil yıldızlara enerji sağlayan bir işlemdir. Yeryüzünde, hidrojen okyanuslarda, göllerde ve nehirlerde su şeklinde bol miktarda bulunur. Aynı zamanda doğal gaz, metanol, kömür, vb. gibi birçok maddede bulunur. İçinde

depolanan enerji birimi başına en ucuz sentetik yakıttır. Son on yılda hidrojen enerji sisteminin çeşitli yönlerini (üretim, stok ve nakliye) ve uygulamalarını araştırmak için artan araştırma çabaları olmuştur(Çetinkaya ve ark, 2002; Veziroğlu T.N. ve ark 1992).

1.2. Hidrojenin tanımı ve özellikleri

Hidrojen renksiz, kokusuz ve son derece yanıcı bir gazdır ve küçük lezyon kimyasal elementler ailesinin en basit üyesidir. Hidrojen, bir birim pozitif elektrik yükü taşıyan bir proton ve bir elektron ve bir birim negatif elektrik yükü taşıyan bir çekirdekten oluşur. Hava ve yeryüzünün çekim kuvvetine karşı uzaya uçabilmesi nedeniyle çok daha hafiftir. Hidrojen gazı genellikle oda sıcaklığında diğer elementlerle reaksiyona girmez, ancak ısıtıldığında 450 ° C sıcaklıkta patlayıcı ile oksijenle birleşir ve çok miktarda enerji üretir (Lewandowski W.M., 1996). Hidrojenin termo fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması (her iki sıvı) gaz ve doğal gaz ile Çizelge 1’de (Veziroğlu T.N., 1987) verilmiştir. Çizelge, belirli bir enerji miktarı için hidrojenin fosil yakıtların yaklaşık üçte biri ağırlığında olduğunu, ancak daha hacimli olduğunu göstermektedir. Belirli bir enerji miktarı için, sıvı formdaki hidrojen, benzin tarafından işgal edilen hacminin 3.8 katını ve gaz formunda, doğal gazın kapladığı hacminin 3.6 katını işgal eder. Yüksek alev hızı ve geniş yanıcılık limitleri hidrojeni içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri ve jet motorları için çok iyi bir yakıt haline getirir. Yüksek tutuşma sıcaklığı ve düşük alev parlaklığı hidrojeni diğerlerinden daha güvenli bir yakıt haline getirir. Ayrıca zehirli değildir ve geri dönüştürülebilir.

Çizelge 1.1. Benzin, doğal gaz ve hidrojenin özellikleri

Özellik	Benzin	Doğal gaz	Hidrojen
Yoğunluk (g/cm ³)	0.73	0.78*10 ⁻³	0.84*10 ⁻⁴ (gaz) 0.71*10 ⁻¹ (sıvı)
Kaynama Noktası (°C)	38/204	-156	-253(20K)
Düşük ısıtma değeri :			12.50*10 ⁴
Gravimetrik (kj/kg)	4.45*10 ⁴	4.8*10 ⁴	10.4*10 ³ (gaz)
Volumetrik (kj/m ³)	32*10 ⁶	37.3*10 ³	8.52*10 ⁶ (sıvı)
Stokiyometrik bileşim	1.76	9.43	29.3
Atmosferde (vol. %)			
Yanıcı limitler (% atm)	1.4-7.6	5-16	4-75
Tutuşma hızı (m/s)	0.40	0.41	3.45
Tutuşma Sıcaklığı	2197	1875	2045
Atmosferde (°C)			
Ateşleme sıcaklığı.	257	540	585
(°C)			
Alev parlaklığı	Yüksek	Orta	Düşük

1.3. Hidrojen Üretim Yöntemleri

Hidrojen üretimi, hidrojen enerji sisteminin en temel parçasıdır ve her zaman yoğun ve güçlü araştırma ve geliştirmenin amacı olmuştur. Dünya hidrojen üretimi, her yıl yıllık % 8 ± 10 hızla büyümektedir. Üretilen hidrojenin yaklaşık yarısı amonyak imalatında kullanılır ve geri kalanların çoğu yağın hidrokrakingi ve hidrodesülfürizasyonu için ve metanol üretimi için kullanılır(Garg H.P. ve ark, 1984). Şu anda hidrojen esas olarak fosil yakıtlar, su ve biyokütleden üretilmektedir. Hidrojen üretim yöntemleri şu şekilde kategorize edilebilir:

- Fosil yakıtlardan
- Doğal gazın termal parçalanması
- Naftadan daha ağır hidrokarbonların kısmi oksidasyonu
- Kömür gazlaştırma
- Hidrojen kaynağı olarak su
- Suyun elektrolizi
- Termokimyasal / termoliz
- Güneş enerjisi kullanımı
- Fotoliz
- Fotovoltaik-elektroliz sistemi
- Fotokimyasal
- Fotoelektrokimyasal
- Hidrojen üretiminin biyolojik yöntemleri
- Organik bileşiklerin fotosentetik bakteriler tarafından fotodepozisyonu
- Fotosentetik ve fermantif bakteriler kullanılarak hibrid sistem
- Biyokütle
- Piroliz veya gazlaştırma

1.3.1. Sudan Hidrojen Üretimi

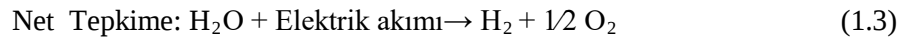
Hidrojen, okyanuslarımız, göllerimiz ve nehirlerimizdeki su şeklinde en bol bulunan maddedir. Bu nedenle, ucuz bir hammadde olan sudan hidrojen üretimi, gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılayabilecek zorlu ve çok önemli bir projedir (Willnerand Willner, 1988). Suyun ayrılması serbest enerji veya yüksek sıcaklık gerektirir. Serbest enerji doğru akım ve güneş enerjisi (fotoliz) ile veya ısı / elektrik şeklinde verilebilir. Sudan hidrojen üretiminin farklı yöntemleri aşağıdaki başlıklarda anlatılmıştır.

1.3.2. Elektroliz

Suyun elektrolizi, petrol, doğal gaz ve kömür (hidrojenin de elde

edilebildiği) gibi fosil yakıtların kıt veya pahalı veya her ikisinin ve kaynaklardan gelen elektrik enerjisinin bulunduğu hidrojen üretimi için ekonomik endüstriyel ölçekli bir yöntem olarak ilgi çekicidir.

Fosil yakıtlar dışında yeterli miktarda ve nispeten ucuz olarak bulunur. Bu yöntemde, hücrenin iki elektrotu arasında doğrudan elektrik akımının geçmesine izin vererek sudan hidrojen ve oksijen üretmek için bir elektrolitik hücre kullanılır (Bockris J. O'M., 1975; Escher ve Hanson, 1975; Hilderbrandt, 1975; Ohta T., 1975). Anotta oksijen açığa çıkar ve hidrojen katotta bulunur. Gazın diğer elektrot bölmelerine geçişini önleyen diyaframlar alternatif elektrotları çevreler. Yöntem, hidrojen ve oksijeni düz bir şekilde sağlar, iyi kurulmuş teknolojiye sahiptir, yüksek verimliliğe sahiptir (= % 70) ve daha yüksek sıcaklık ve basınçta daha iyidir. Elektroliz çok saf hidrojen üretir ve elektrokimyasal reaksiyonu meydana getiren yer şu şekilde tarif edilebilir:



Suyu ayırtırmak için serbest enerji değişimi ve ısı enerjisi sağlanması gereklidir. Suyu ayırtırken entalpi değişimi, ΔH , burada ΔG , Q , ΔS ve T sırasıyla Gibbs'in serbest enerjisindeki değişiklik, ısı enerjisi miktarı, entropi değişimi ve mutlak sıcaklıktır. Denklemler (1 ve 2), sıvı veya gaz halindeki su, geri dönüşümlü koşullar altında başlangıçtaki ile aynı sıcaklık ve basınçta hidrojen gazı ve oksijen gazına ayrıldığında geçerlidir. Terim $T\Delta S$, suyu T sıcaklığında ayırmak için gereken ısı miktarını ifade eder. $T = 298 \text{ K}$ 'da, Denklemler (1) ve (2) 'deki termodinamik parametreler için

$$\Delta H = \Delta G + Q \quad (1.4)$$

$$\text{Tersinir süreçler için; } Q = T\Delta S \quad (1.5)$$

Sıcaklık yükseldikçe, entropi değişimi ΔS biraz azalır(Ohta T. ve ark, 1985). Hem su ($H > 0$) hem de ayrıştırılmış hidrojen ve oksijenin ($H > 0$) gaz halindeki sıcaklıklar için entalpi'ye karşı sıcaklık diyagramı çizilir. Değerler, oda sıcaklığında suyu ayırmak için gereken enerjinin% 85'inden fazlasının Gibbs'in serbest enerjisi olduğunu göstermektedir. Elektroliz sürecinde büyük miktarlarda enerjinin gerekli olmasının nedeni budur. Bu formüle göre, dalga boyu 507 nm'den daha kısa olan fotonlar prensip olarak suyu ayrıştırabilir. Bununla birlikte, pratik olarak bu imkansızdır, çünkü uygun bir katalitik işlem olmadıkça, foton enerjisinin su molekülünün bağlarını kıramaz(Ohta T., 1988).

Serbest enerji kaynakları

- Elektrik enerjisi
- Kimyasal enerji
- Foton enerjisi.

Hepsi su molekülünün atomlarını bağlayan elektronları aktive edebilir ve hidrojen ile oksijeni ayırabilir. Bu üç serbest enerji kaynağı arasında, elektrik enerjisi doğal dünyada dengesiz olarak kabul edilebilir, kimyasal enerji çoğunlukla fosil yakıtta bulunurken, foton enerjisi güneş ışınları olarak bol miktarda bulunur. Bu nedenle, tıpkı doğanın bitkilerin fotosentez sürecinin bir bölümünde gerçekleştirdiği gibi, suyu ayırmak için güneş foton enerjisini kullanmak makul görünmektedir. İkinci gerçek, daha yüksek bir sıcaklık mevcut olduğunda, daha az serbest enerjiye ihtiyaç duyulmasıdır. Bu, yüksek sıcaklıkta su elektrolizi, termokimyasal su ayrışımı ve termokimyasal $\pm$ fotokimyasal hibrit su ayrışmasının temel dayanağıdır.

Güneş foton enerjisi, maddelere emildiğinde kolayca ısı enerjisine dönüştürülen bir tür serbest enerjidir.

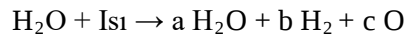
1.3.3. Doğrudan Termal Bozunma / Termoliz

Doğrudan ısı yönteminde, su buhar oluşturmak için ısıtılır ve daha sonra buhar hidrojen gazı ve oksijen gazı oluşturmak üzere parçalanarak yaklaşık 1400 °C 'ye kadar ısıtılır. Sıcaklıklar daha da arttıkça, buhar moleküllerinin ayrılma hızı artar. Aynı etki, sıcaklık ve düşük basınçlar, doğrudan ısı yöntemini kullanarak hidrojen üretmenin en iyi yoludur.

Bu çok yüksek sıcaklıkta, hidrojen ve oksijen birbirinden ayrılmalı çünkü soğudukça yeniden birleşerek tekrar su oluştururlar. Bu metod;

- Yüksek termal verime sahiptir
- Çok az çevresel tehlike veya hiç tehlike yaratmaz
- Hiçbir ara kimyasal maddeye ihtiyaç duymaz.

Bununla birlikte, çok yüksek sıcaklığın korunması nedeniyle ticari gerçekleştirme için bazı pratik problemler yaratacaktır. İşlem kimyasal olarak şöyle yazılabilir (Lodhi M.A.K., 1987):



(1.6)

buradaki a, b ve c, mol fraksiyonlarıdır.

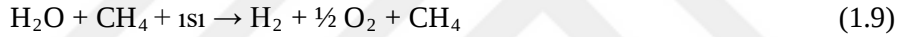
Su moleküllerini ayırmak için yukarıdaki sıcaklığa ulaşmak için bir güneş fırını kullanılabilir.

1.3.4. Termokimyasal Süreç

Suyun doğrudan termal ayrışması 2500 K üzerinde bir sıcaklık gerektirir ve

suyun bir dizi kimyasal reaksiyon vasıtasıyla çok daha düşük bir sıcaklıkta, endüstriyel olarak daha kolay elde edilerek ayrıştırıldığı bulunmuştur. Dolayısıyla bu işlemler için kullanılan teknik maddelere termokimyasal döngüsel işlemler denir. Hidrojen ve oksijenin atık ısı ile birlikte üretildiği, yani termal enerjinin kimyasal enerjiye dönüştürüldüğü sistemler sadece su ve enerjinin tüketildiği sistemlerdir.

Örnek olarak, burada iki aşamalı bir işlem verilmektedir:



1.3.5. Güneş Enerjisinden Yararlanma

Güneş enerjisi temiz, yenilenebilir bir enerji kaynağıdır ve gelecekteki kullanımlar için fosil enerjiye alternatif olarak çok dikkat çekmiştir. Hidrojen üretimi için su ile birlikte kullanıldığında güneş enerjisi, tüketilemez bir birincil enerji kaynağı oluşturur. Kullanılan çeşitli yöntemler ;

- Fotoliz
- Fotovoltaik-elektroliz sistemi
- Fotokimyasal
- Fotoelektrokimyasal

1.4. Hidrojenin Diğer Yakıtlarla Farkları

Geleceğin yakıtının en önemli özelliği yenilenebilir ve çevre dostu olmasıdır. Geleceğin taşımacılığında kullanılacak olan Hidrojen Yakıt Pili bu

konuda bir çıkış açacaktır. Çünkü, pil ile çalışan elektrikli arabalar gibi diğer yakıt ve ulaşım teknolojileri yanında hidrojenle çalışan taşıtlar, petrolün alternatifidir. Gelecekte Hidrojen gazı birçok yakıtın yerini alacaktır. Şu anda kullanılan enerji kaynakları daha temiz ve çevre dostu olan hidrojenle yer değiştirecektir. Doğal gaz ile birlikte Hidrojen temiz yakıt olarak kullanıma sunulabilir. Çünkü her iki yakıtın depolanma teknikleri birbirine benzerdir.

1.5. Elektrokataliz

Tepkimede harcanmaksızın kimyasal bir tepkimenin hızını arttıran maddelere katalizör denir. Katalizörün kimyasal yapısında hiçbir değişiklik yaşanmaz. Elektrokimyasal tepkimelerde elektrotlar bu değişiklikten etkilenmeyen kısımlardır. Yük transfer tepkimelerinde, elektrot katalizör görevi görür. Buna elektrokatalizör denir.

Aşırı gerilim (η) tepkime bir elektrot üzerinde, diğer bir elektrotla göre daha hızlı gerçekleşiyorsa, bu elektrot diğer elektrotla göre daha elektrokatalitik demektir. Görünür akım yoğunluğu i' yi sabit tutmak koşulu ile katalitik etkinlik aşırı gerilim (η) cinsinden kıyaslanabilir. Ayrıca denge akım yoğunluğu i_0 ($\eta = 0$ iken tepkime hızı) karşılaştırılır. Bu uygulama tepkime mekanizması aynı elektrot üzerinde olması durumunda geçerlidir. Kısacası i' nin ve E' nin de logi ile değişimi elektrokatalitik etkinliğin değişimi konusunda önemlidir. Bazen ise elektrotlar, denge akımına (i_0) göre iyi bir katalizör olmaması beklenirken, Tafel sabiti yani başka bir deyişle, değişim akımı yoğunluğu geri dönüşümlü potansiyeldeki reaksiyon hızı değerleri, b , çok küçükse düşük aşırı gerilimlerde gayet iyi elektrokatalitik etkinlik gösterebilirler. Elektrokatalizörü karakterize etmek için parametre zaman ile olan kararlılığıdır. Bir elektrokatalizör orta aşırı gerilimde uzun süre çalıştırmak yerine düşük aşırı gerilimde kısa süre çalıştırmak daha verimlidir. Elektrokimyasal reaksiyon hızının bağlı olduğu parametrelerden potansiyel, reaksiyon hızında büyük bir etkinlik kullanımına izin vermektedir.

Ara yüzeyde potansiyel farkının değişimiyle bazı katalizörler reaksiyon hızını 10 kattan daha fazla değiştirebilmektedir. Bir kimyasal reaksiyonda hızlarında birden farklı değişimler vardır. Elektrokimyasal ve kimyasal kataliz karakteristikleri Çizelge 1.2.' de verilmektedir (Bockris J. O'M. 1970).

Çizelge 1.2. Kimyasal Kataliz ve elektrokatalizin davranışları ve hız eşitliklerinin kıyaslanması

	Kimyasal Kataliz	Elektrokataliz
Hız	$e^{-\Delta G^*/RT}$	$e^{-\Delta G^*/RT} e^{-\alpha F \Delta \Phi / RT}$
Potansiyel	Yok	$\text{Var}(\Delta \Phi)^*$
Sıcaklık	Var	Var
Çalışma Sıcaklık	150 °C >	150 °C <
Hareket(aktivasyon) Enerjisi(Kcal/mol)	10-100	5-35

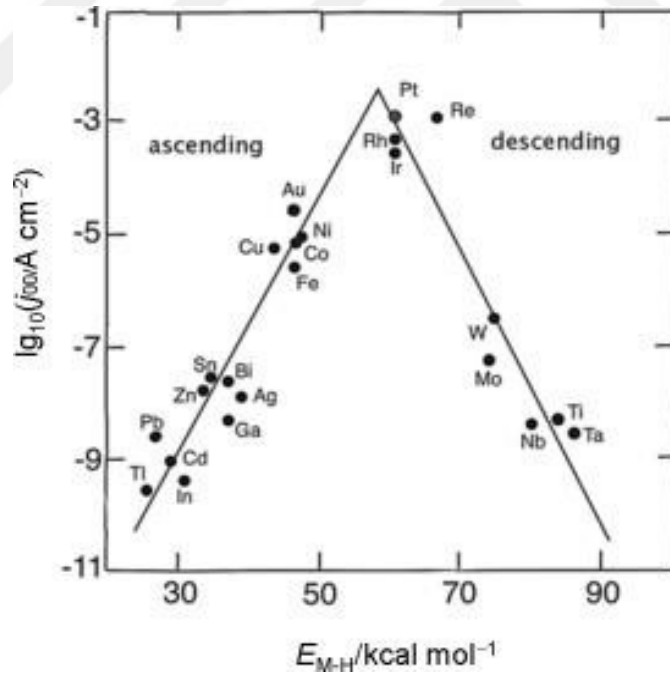
1.6. Metallerin Elektrokatalitik Etkinlikleri

Elektrot metalinin elektrokimyasal reaksiyonda önemli bir yeri vardır. Metallerin elektrokatalitik özellikleri genellikle fermi dinamikleri tarafından belirlenebilir. Bu yöntem, yüksek katalitik özelliklere sahip metalin ve elektrot metalinin katalitik özelliği hakkında bilgi verir. Bu işlemi yaparken sorunlar var. İlk olarak, akış yoğunluğundaki değişiklikler sadece benzer tepkimeler için kıyaslanabilir, ancak hidrojen çıkış reaksiyonları (HER) her metal için farklıdır. Volkan eğrisini farklı deney koşullarında kullanılan kinetik veriler asidik ve bazik çözeltilerden meydana getirilir. Her zaman çok saf elektrolitlerde elde edilmezler ve kayıtlarda benzer metal için bile farklı veriler vardır. Elektrot yüzeyinin kararlı durumu, çözelti içindeki metalden metale değişir. Bazı metaller oksitlerinde veya hidritlerinde kararlıdır. Volkan eğrileri elektrot aktivitelerini karşılaştırmak için çok kullanışlı bir yöntemdir. Fermi enerji E_f , enerji bandına ait birkaç elektrot

tarafından alınabilecek yüksek kinetik enerjilerdir.

Başka bir deyişle, çözelti içinde metalden iyonla aktarılan elektronların enerjisidir (Petrii ve ark, 1994).

Yük değiştirme akımı yoğunlukları, metal elektrotların elektrokatalitik özellikleri ile belirlenir. Yüksek yük varyasyonu ve akım yoğunluğuna sahip metaller yüksek elektrokatalitik özelliklere sahiptir. Yük değişimi ve akım yoğunluğu düşüğe, metalin elektrokatalitik özelliği zayıftır. Bazı metallerde oluşan $2H^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2$ yük varyasyon akım yoğunlukları MH bağ enerjisine karşı grafikte gösterilmiştir (Şekil 1.1.) Volkan eğrisi grafiğine göre, yük değişim akımı yoğunluğu (i_0) önce artar ve sonra azalır. Buna göre, yoğunluk değişikliği en yüksek olan metaller Pt, Au, Ni, Rh'dir. Bu metallerin ayrıca yüksek elektrokatalist özelliklere sahip oldukları bilinmektedir.



Şekil .1.1. Volkan Eğrisi (Petrii ve ark, 1994)

1.7. Aşırı Gerilim

Faz sınırındaki elektriksel çift katman, elektrot tepkimesini enerjisini değiştirerek elektrot hızına etkiyen aşırı gerilime aktivasyon aşırı gerilimi η_A denir. Buradaki aşırı gerilime çözelti neden olmuş ise “direnç aşırı gerilimi”, η_Ω denir. Yüzeyden ayrılan maddenin çözelti içerisinde bozulmasına neden olduğu aşırı gerilime “kristal aşırı gerilimi”, η_k denir.

Yük transferine etki eden iyon elektriksel çift tabaka sınırına gelmesi ya da bu sınırdan yeteri kadar uzak değilse bunu sağlamak için uygulanan gerilime “difüzyon aşırı gerilimi”, η_D denir. Elektrokimyasal tepkime dışında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlara neden olan gerilime ise “reaksiyon aşırı gerilimi”, η_r denir. Toplam aşırı gerilim bunların toplamıdır (Üneri S., 1998);

$$\eta = \eta_a + \eta_d + \eta_r + \eta_k + \eta_\Omega \quad (1.10)$$

Aşırı gerilime etki eden etkenler, metal elektrolite, elektrolitin derişimine, metal ve elektrolit içerisindeki bulunan maddelere, uygulanan akım yoğunluğuna sıcaklık gibi unsurlara bağlıdır.

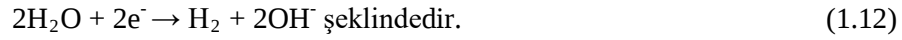
1.7.1. Hidrojen Oluşum Reaksiyonları

Aşırı potansiyel veya aşırı gerilimin etkisi farklı elektrotlar üzerinde çalışmaları yapılmıştır. Elektrotların bu yönü hidrojen oluşumunda belirlenmeye çalışılmıştır. Sistemlerdeki aşırı gerilim, gazın oluşma akımına engel olur. Ara yüzeyde net akım yoğunluğunun geçişi aşırı gerilime bağlıdır. Konsantrasyon aşırı gerilimi olmamalı, sınır akım yoğunluğu ve böylece taşıma sınırsız olmalıdır. Sıfır aktivasyon aşırı gerilimine sahip olan bir sistemde akım yoğunluğu sonsuz olmalıdır.

Hidrojen oluşum tepkimeleri asit çözeltisi içerisinde,



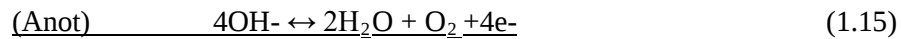
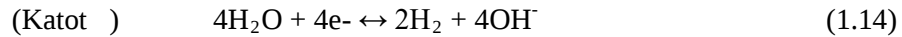
ve alkali çözeltilerde,



Hidrojen oluşum reaksiyonları elektrotların cinsine büyük oranda bağlı olarak değişmektedir. Nikel veya krom gibi elektrotlar kullanıldığında hidrojen oluşum reaksiyonunu önemli ölçüde hızlandırırlar. Hidrojen oluşturma tepkimesinin önemi teknolojik işlemlerde kullanılmasıdır.

Standart metotlarla üretilen hidrojen gazı yalnızca elektroda bağlı olarak değişmemekte başka etkenlere de bağlıdır. Örneğin ağır suyun (D_2O) endüstriyel üretimde hidrojen gazı, döteryum gazından (D_2) daha hızlı elektron vererek elektrot üzerinden çıkabilmektedir. Çözelti bu nedenle D_2O (ağır su) ile zenginleşir. Elektrot üzerinde metalin cinsine göre çeşitli gazlar çıkabilir. Hidrojen oluşumunu arttıran elektrokatalizör metal çözünebilir veya üzerinde oksit filmi oluşabilir.

Suyun elektrolizi ile hidrojen üretiminde bazik ortam kullanılır. Bazik Ortamda Hidrojen Oluşum Reaksiyonu (HER)



Bazik çözeltide 1.14 ve 1.15 tepkimelerinin standart potansiyelleri 25 °C’de normal hidrojen elektrotuna karşı sırasıyla $E^{\circ}H_2 = -0,828 \text{ V}$, $E^{\circ}O_2 = 0,402 \text{ V}$ ’ tur. Bu durumda toplam tepkimenin tersinir potansiyeli $E_{tr} = 1,229 \text{ V}$ olur. Böyle bir sistemde elektroliz için tersinir elektrot potansiyel termal enerjisi $\Delta H^{\circ} - \Delta G^{\circ} = 48,652 \text{ kJ mol}^{-1}$ olur ve suyun elektrolizinin gerçekleşmesi için bu kadar enerji sağlanmalıdır. Suyun elektrolizi için gerekli potansiyel (1,481 V) indirgenme potansiyellerinden hesaplanan potansiyelden (1,229 V) daha büyüktür (Ananthachar V. ve ark., 2005).

Bu durum aşağıdaki denklemle açıklanır.

$$E = E_{a,g} + \eta_a + \eta_k + \dot{I}r \quad (1.17)$$

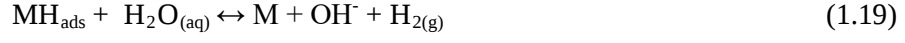
$E_{a,g}$ ayrışma gerilimi, η_a ve η_k sırasıyla anodik ve katodik aşırı gerilimleridir. $\dot{I}$ devreden geçen akım, R ise çözeltinin ve elektrotların elektriksel direncini göstermektedir. Yani sistemde bulunan aşırı gerilimler ve çözelti ve elektrotların direnci, uygulanması gereken potansiyeli arttırmaktadır. Elektrolizde amaç aşırı gerilimleri düşürmektir. Aşırı gerilimi düşürmek için elektrot yüzeyinde gerçekleşen HER mekanizmasının belirlenmesi önemlidir. HER mekanizması iyonik reaktantı, yük transferi, ardışık basamakları, ara yüzeyde adsorplanmış hidrojen atomunun dönüşümünü ve gaz olarak ürünü içermektedir. Ayrıca elektrokimyasal reaksiyondan sonra yük transferi veya hidrojen iyonlarının difüzyonu ile hız kontrolünü içerir.

Bazik ortamda hidrojen oluşumu 3 basamakta gerçekleşir (Krstajit N. ve ark., 2001).

1.Volmer reaksiyonu ile hidrojenin elektrokimyasal olarak adsorplanması



2.Heyrovsky reaksiyonu ile elektrokimyasal desorpsiyonu



3. Tafel reaksiyonları ile kimyasal desoprsiyon (Krstajit N. ve ark, 2011)
(Bockris, J.O.M., Reddy, A.K.N. 1923).



HER etkinliğinin belirlenmesinde bu üç mekanizmada gerçekleşen reaksiyonlar önemli rol oynar. Metal-H bağının oluşumu ve buradan hidrojen gazının oluşumu metalin katalitik etkinliği ile ilişkilidir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Burchardt T. (2000), tarafından bu çalışmada, Ni plakalar üzerine elektrokimyasal olarak çöktürülmüş NiPx alaşımları üzerinde hidrojen çıkışı reaksiyonunu incelemiştir. Çöktürme potansiyeli değiştirilerek %15–27 oranında P içeren kaplamalar elde edilmiştir. Elektrotların aktivitesinin kaplama içerisindeki P içeriğine bağlı olduğu belirlenmiş ve % 17,1 P içeren elektrotta maksimum etkinlik elde edilmiştir. Daha düşük ve daha yüksek P içeriğinde ise etkinlik azalmaktadır. Sabit akımda çöktürme süresi değiştirilerek farklı alınlıklarda kaplamalar elde edilmiş, kaplama kalınlığının artması ile etkinliğin arttığı bulunmuştur. Elde edilen kaplamalarda absorplanan hidrojen miktarı belirlenmiş ve absorplanmış hidrojen miktarındaki değişimin yaklaşık olarak katalitik etkinlikteki değişime eşit olduğu belirlenmiş, en aktif elektrodun aynı zamanda en fazla hidrojen absorplayan elektrot olduğu bulunmuştur. Absorplanmış hidrojen metalin elektronik yapısını değiştirmekte, bu nedenle de hidrojen çıkışı reaksiyonunun mekanizmasını değiştirerek elektrotların elektro katalitik özelliklerini değiştirmektedir. Çalışmada ayrıca 14 gün boyunca elektrotların kararlılığı da çalışılmıştır. Başlangıçtan itibaren etkinlik azalmış (yaklaşık %50 oranında) , yaklaşık iki gün sonra dengeye gelmiştir. 10. Günde elektrot çözeltiden çıkarılıp çözeltiye tekrar daldırılmış, elektrot etkinliği, çözeltiden çıkarılmadığı duruma göre biraz fazla olduğu gözlenmiş fakat etkinlik tekrar eski durumuna düşmüş ve dengeye gelmiştir.

Hitz C. ve ark. (2001), Çok aktif elementler “leaching” edildikten sonra, alkali çözelti içindeki toz elektrotların (Ni-Zn ve Ni-Al) elektrokimyasal aktifliğine karşı hidrojen çıkış reaksiyonu çalışılmıştır.. Bu elektrotlar, porozlu karakter göstermiştir ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi, yüzey porozitesini karakterize etmek için kullanılmıştır. Aşırı gerilimin etkileri, sıcaklık, elektrot bileşimi ve elektrolit konsantrasyonu çalışılmıştır ve faradik ve geometrik etkilerin arasındaki ayırt edici kriterler formüle edilmiştir. Farklı gözenek geometrileri içindeki impedans değerlerine sayısal benzetim (digital simulations) uygulanmıştır.

Hidrojen çıkışının kinetik parametreleri çalışılmıştır. Elektrot aktivitesini etkileyen ana faktör, gerçek yüzey alanı olarak görülmüştür.

Altube A. ve ark. (2001), tarafından bu çalışmada, Potansiyodinamik ve Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi yöntemlerini kullanarak Fe-Co alaşımı içerisine Co eklenmesinin hidrojen çıkışı reaksiyonuna etkisini incelemişlerdir. Alaşım içerisine kobalt eklenmesi ile hidrojen çıkış reaksiyonunun yük değişimi akım yoğunluğunu arttırdığı ve bunun da reaksiyonun katalitik etkinliğini arttırdığını belirlemişlerdir.

Krolikowski A. ve ark. (2002), tarafından bu çalışmada, 0,1 M H_2SO_4 çözeltisinde elektrokimyasal olarak çöktürülmüş %7, 20 ve 28 oranında P içeren Ni-P alaşımlarında potansiyodinamik, potansiyostatik ve impedans yöntemleri ile hidrojen çıkış reaksiyonunu, (HER) incelemişlerdir. Hidrojen çıkış reaksiyonunun kinetik parametrelerini polarizasyon ve impedans verilerinden elde etmişlerdir. Kristal Ni-7P alaşımları için HER, amorf Ni-20P ve Ni-28P alaşımlarından daha hızlıdır. Fakat bu fark fazla değildir. Deney öncesinde bazı kristal Ni-7P alaşımlarını anodik olarak polarize etmiş ve bu alaşımlar için HER' de belirgin bir artış gözlemişlerdir. Bu şartlarda HER'in türü değiştirilmiş, çok yüksek ara yüzey kapasitans değerleri ve çok daha düşük Tafel eğimleri bulunmuştur. Bu etki, alaşım yüzeyinin HER için aktif bir tür olarak belirlenen fosfat filmi ile kaplanmasına bağlanmıştır.

Gürten A.A. ve ark. (2003), tarafından bu çalışmada, Elektroliz yöntemi ile 0,01 M NaCl ve değişik konsantrasyonlarda primer alkoller içeren çözeltelerde gümüşün katodik davranışlarını incelemişlerdir. Pt ve Ag elektrotlar arasındaki teorik ve deneysel ayrışma gerilimi değerlerini belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre NaCl çözeltisi içerisine alkol ilavesinin anodik aşırı gerilimi düşürdüğünü ve hidrojen verimini arttırdığını belirlemişlerdir.

Kardaş G. ve ark. (2003), tarafından bu çalışmada, platin elektrotta 0,1 M NaCl+1,0 M x alkol (x=metil, etil ve propil alkol) çözeltisinde, farklı pH'larda (3,5 ve 8) ve sıcaklıklarda (25°C, 50°C ve 75°C), sabit 5,0 V potansiyel altında primer

alkollerin hidrojen gazı çıkışına etkisini incelemişlerdir. Alkolü çözeltilerde, alkol platin üzerine adsorplanmakta ve anodik ve katodik reaksiyonların aşırı gerilimlerini düşürmektedir. Bütün pH'larda alkollü çözeltilerde hidrojen verimlerinin arttığını, bütün çözeltilerde sıcaklığın artmasıyla hidrojen veriminin azaldığını belirlemişlerdir. Böyle bir sistem için 25°C'de hidrojen üretiminin daha ekonomik olduğu önerilmiştir.

Crnkovic F.C. ve ark. (2004), tarafından bu çalışmada, yumuşak çelik üzerine nikel, demir ve molibdenin birlikte veya ayrı çökmesi ve çinkonun çözünmesinden sonraki katot materyallerinin alkali çözelti içinde hidrojen üretmek için aktif olduğu bulunmuştur. Ni-Fe-Mo(51,4 – 5,5- 43,1 %) ve Ni-Fe-Mo-(Zn) (70,9-15,3-12,7-1,1% çözünmeden sonra) kaplaması, 6,0 M NaOH çözeltisinde 25'den 80 °C'ye değişen sıcaklıklarda hidrojen çıkışı için çok aktif olduğu bulunmuştur. Polarizasyon eğrileri, sıcaklıkla sabit eğrilerle çizilmiştir ve bugüne kadar bilinen en iyi materyallerle kıyaslanabilecek elektrokimyasal aktiflikleri olduğu ortaya çıkmıştır. Ni-Fe-Mo-(Zn) kaplamasında, 80°C'de hidrojen çıkışı için aşırı gerilim, 83,1 mV'a düşürülmüştür. 135 mA.cm⁻² lik sabit akım yoğunluğunda uzun süreli elektrolizlerde, bu yüzeyin epey azaldığı ve performansın düştüğü görülmüştür. Fakat 440 saat sonraki aşırı gerilim değeri, 157 mV' da sabit olduğu ölçülmüş ve bu değer endüstriyel uygulamalar için uygun bir değer olduğu belirlenmiştir.

Solmaz R. (2004), tarafından bu çalışmada, çıplak ve nikel kaplı gümüş, pirinç ve değişik metal bileşimlerine sahip çelik elektrotlarda asidik ve bazik ortamlarda hidrojen gazı çıkışı incelenmiştir. Bu amaçla üç elektrot tekniği kullanılarak katodik polarizasyon eğrileri ve hidrojen çıkışının gerçekleştiği farklı potansiyellerde Nyquist eğrileri elde edilmiştir. Bu elektrotların hidrojen aşırı gerilimini belirlemek amacıyla elektroliz yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca elektroliz yöntemi kullanılarak sisteme sabit 5,0 V potansiyel uygulanarak katotta açığa çıkan hidrojen gazı hacimleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlardan, nikel kaplı elektrotlarda hidrojen aşırı geriliminin düştüğü belirlenmiştir

Kardaş G. ve ark. (2005) tarafından bu çalışmada, yumuşak çelik (YÇ), ince nikel filmi ve bu filmin üzerine kobalt-çinko kaplanmış yumuşak çelik elektrotlarda (YÇ/Ni/CoZn) 1,0 M NaOH çözeltisi içerisinde 25°C’de hidrojen gazı eldesi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ince nikel kaplanmış yumuşak çeliğin yüzeyinin CoZn ile kaplandıktan sonra yüzeydeki daha aktif çinko metalinin çözülmesi ile elde edilen YÇ/Ni/CoZn elektrotunun hidrojen gazı eldesi için etkinliğinin oldukça arttığını ve elektroliz sisteminde kullanıldığında sistemdeki aşırı gerilimi düşürdüğünü göstermiştir

Krishna M. M.A. (2005), tarafından yapılan çalışmada, sülfat banyosunda oluşturulan Zn-Ni alaşımlarının katot verimleri ve katot potansiyellerinin farklı sıcaklıklardaki (25, 30, 35, 40, 50 °C) değişimini incelemişlerdir. Banyo bileşimi 0,40 M sodyum sülfat, 0,01 M sülfürik asit, 0,16 M borik asit, 0,20 M çinko sülfat ve 0,20 M nikel sülfattır. 10 dakika boyunca 10,0 mA cm⁻² akım uygulanarak oluşturulan alaşımların alışımlıktan farklı olduğunu, Ni₃Zn₂₂ ve/veya Ni₅Zn₂₁ karışımı şeklinde çökelmeler olduğunu belirlemişlerdir. Zn, Zn-Ni ve Ni çökmesinin -1,14 V; -1,12 V ve -0,85 V’ta olduğunu belirterek, sıcaklık artışıyla alaşım potansiyelinin katodik potansiyelinin düştüğünü ve bunun Ni⁺² iyonlarının birincil çekirdek oluşumu için düşük aşırı gerilime ihtiyacı olmasından kaynaklanabileceğini belirtmiştir.

Mert M.E. (2005), tarafından bu çalışmada, çıplak ve nikel kaplı gümüş, bakır ve çinko elektrotlarda bazik ortamda hidrojen gazı çıkışını incelemiştir. Bu amaçla üç elektrot tekniği kullanılarak katodik polarizasyon eğrileri ve hidrojen çıkışının gerçekleştiği farklı potansiyellerde Nyquist eğrileri elde edilmiştir. Bu elektrotların hidrojen aşırı gerilimlerini belirlemek amacıyla elektroliz yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca elektroliz yöntemi kullanılarak sisteme sabit 3,0 V potansiyel uygulanarak katotta açığa çıkan hidrojen gazı hacimleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlardan, nikel kaplı elektrotlarda hidrojen aşırı geriliminin düştüğü belirlenmiştir.

Solmaz R. ve ark. (2007) tarafından bu çalışmada, yumuşak çelik (YÇ), nikel kaplanmış yumuşak çelik (YÇ/Ni) ve nikel-çinko kaplanmış yumuşak çelik (YÇ/NiZn) elektrotlarda alkali ortamda hidrojen çıkışı çalışılmıştır. Elektrotların etkinliklerinin ve kararlılıklarının elektroliz süresince değişimi ayrıca incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar yumuşak çeliğin yüzeyinin ince bir nikel filmi ile kaplanmasının hidrojen eldesi için elektrotun etkinliğini arttırdığını ve özellikle YÇ/NiZn elektrotunun oldukça aktif, düşük aşırı gerilimli ve elektroliz süresince kararlı olduğunu göstermiştir.

Solmaz R. ve ark. (2009), tarafından bu çalışmada, NiCu kompozit kaplamalar, elektrokimyasal olarak bir bakır elektrot (Cu/ NiCu) üzerine biriktirilmiş ve olası uygulamaları göz önüne alınarak atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve taramalı elektrokimyasal mikroskopi (SECM) teknikleri ile karakterize edilmiştir. Elektrokatalitik Hidrojen çıkış reaksiyonu için materyaller (HER). Hazırlanan elektrotların HER aktivitesi, katodik akım-potansiyel eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) teknikleri ile 1,0 M KOH solüsyonunda incelenmiştir. NiCu kaplamanın gözenekli bir yapıya ve alkali ortamda HER için iyi bir elektrokatalitik aktiviteye sahip olduğu bulunmuştur. Cu / NiCu elektrotunun HER aktivitesi, kaplanmamış (Cu) ve Ni kaplı (Cu / Ni) bakır elektrotlardan daha yüksek bulunmuştur. Katalitik aktivitesi, gözeneklilik ve aynı zamanda Ni ve Cu'nun sinerjik etkileşimi ile ilgili olduğu göstermiştir.

Solmaz R. ve ark. (2009), tarafında bu çalışmada, çeşitli kimyasal bileşimlere sahip nikel (Cu / Ni), demir (Cu / Fe) ve nikel- demir (Cu / NiFe) kompozit kaplamalar, bir elektrotta elektrokimyasal olarak çökeltilmiş ve dönüşümlü voltametri (CV), atomik absorpsiyon kullanılarak karakterize edilmiştir. Spektroskopi (AAS), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) teknikleri, bir alkali ortamda hidrojen evrimi reaksiyonu (HER) için elektrokatalitik malzemeler olarak olası uygulamalarını göz önünde bulundurarak. HER için kaplamaların elektrokatalitik aktivitesi, katodik

akım-potansiyel eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) teknikleri kullanılarak 1,0 M KOH solüsyonunda incelenmiştir. Demir ile birlikte nikel varlığı, tek tek nikel ve demir kaplamalarla karşılaştırıldığında HER için elektrotun elektro katalitik aktivitesini artırır. Kompozit kaplamaların HER aktivitesi, alaşımların kimyasal bileşimine bağlıdır. Cu / NiFe⁻³ elektrodu (kaplama banyosunda Ni⁺² Fe⁺² 4-6 molar konsantrasyon oranına sahip, deney koşulları altında bir alkali ortamda HER için en uygun katot materyali olarak bulunmuştur. Ayrıca, HER için Cu / NiFe⁻³ elektrodunun elektrokatalitik aktivitesi, işlem süresi ile elektrotun elektrokatalitik aktivitesindeki değişimi değerlendirmek için uzun süreler boyunca test edilmiştir. HER aktivasyon kontrol edilmiş ve elektrolizden sonra değişmemiştir. Elektroliz sistemine sabit akım yoğunluğu 100 mA cm⁻² korozyon testi uygulanmıştır. Cu / NiFe⁻³ elektrotu, EIS ve doğrusal polarizasyon direnci (LPR) teknikleri kullanılarak farklı çalışma sürelerinden sonra incelenmiştir. Karşılaştırma için, akımın uygulanmadığı bir Cu / NiFe⁻³ elektrodunun korozyon davranışı da araştırılmıştır. Korozyon testleri korozyon direncini göstermiş ve elektroliz sistemine bir katodik akım uygulandığında Cu / NiFe⁻³ katotunun davranışı değişmiştir.

Han Q. ve ark. (2010), tarafından bu çalışmada, Yüksek HER aktivitesine sahip amorf Ni-Mo filmi puls kaplama ile elde edilmiştir. HER potansiyeline göre optimum elektrodepozisyon koşulları, örn. Na₂MoO₄.2H₂O konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve görev döngüsü. Buna uygun olarak, çeşitli molibden içerikli Ni-Mo kaplamalarının bileşimleri ve bileşenleri sistematik olarak incelenmiştir. Sonuçlar, elektro-çökme banyosundaki nikel ve molibden konsantrasyonlarının oranının %1'den (mol%) daha düşük olduğu zaman, kaplamadaki molibden içeriğinin artan Na₂MoO₄.2H₂O konsantrasyonu ile azaldığını, buna karşılık Ni-Mo filminin HER aşırı potansiyelinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Solmaz R. ve ark. (2010), tarafından bu çalışmada, NiCuZn üçlü kaplama bir bakır elektrot üzerinde elektrokimyasal olarak çökeltildi. Daha sonra, hidrojen çıkış reaksiyonunda (HER) kullanıma uygun bir gözenekli ve elektrokatalitik yüzey

üretmek için konsantre bir alkali solüsyonda (% 30 NaOH) belirlenmiştir. Alkalin süzdürmeden önce ve sonra kaplamanın yüzey bileşimi, enerji dağıtıcı X-ışını (EDX) analizi ile belirlenmiştir. Yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile araştırılmış. Alkalin su elektrolizi için hazırlanan elektrotun uzun süreli stabilitesi, katodik akım potansiyeli eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) teknikleri yardımıyla 1,0 M KOH solüsyonunda incelenmiştir. NiCuZn kaplamanın, iyi fiziksel stabiliteye sahip, kompakt ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu bulunmuştur. Alkalin liçi işlemi, NiCuZn kaplamanın aktivitesini, HER için ikili NiCu yatağına kıyasla daha da geliştirdi. -100 mA cm^{-2} 'deki uzun süreli operasyon 120 saatin üzerinde iyi bir elektrokimyasal stabilite göstermiştir.

Herraz-Cardona S. ve ark. (2010), tarafından bu çalışmada, Alkali ortamda (ağırlıkça %30 KOH çözeltisi) hidrojen evrimi reaksiyonu (HER) için Ni / Zn ve Ni-Co / Zn alaşımlarının elektrokatalitik performansı üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Paslanmaz çelik destekler üzerinde elektro-çökeltme ile hazırlandıktan sonra, alaşımlar çinko parçasını çıkarmak ve gözenekli bir tabaka oluşturmak için ayrılmıştır. Geliştirilen elektrotlar için yüzey sertlik faktörü Rf elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ile değerlendirilmiştir. Bu elektrotlardaki HER, kararlı durum polarizasyon eğrileri ve EIS ile belirlenmiştir. Elde edilen elektrotlar, HER için büyük Rf ile karakterize edilmiştir ve çok düşük sıcaklıkta 30 °C'de 250 mA cm^{-2} , 250 250 ~0,138V akım yoğunluğunda aşırı kapasiteler belirlenmiştir. Yüksek elektrot aktivitesi esas olarak gelişmiş elektrotların yüksek yüzey alanına atfedilmiştir.

Kaninski M.P M. ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada elektrolitik hidrojen üretimi için en çok kullanılan teknolojilerden biri alkali su elektrolizidir. Bununla birlikte, çoğu endüstriyel elektrolizörde yaklaşık 4,5-5 kWh / Nm³ H₂'lik yüksek enerji gereksinimleri nedeniyle, bu şekilde üretilen hidrojen maliyeti yüksektir. Sıfır boşluk hücre geometrisi, yeni diyafram malzemelerinin geliştirilmesi, elektrotlar için yeni elektrokatalitik malzemelerin geliştirilmesi vb. gibi bu problemin üstesinden gelmek için çeşitli girişimler söz konusudur. Hidrojen

çıkış reaksiyonu için ileri elektrokatalitik malzemeler kullanarak bu süreci iyileştirmek için sürekli araştırmada geçiş metali dizisine dayanarak, katot malzemesi olarak kobalt ve tungsten bazlı katalizörler incelenmiştir. Deneylerin sonuçlarına dayanarak, Co-W katalizörünün, bazı durumlarda %20'den fazla oranda üretilen hidrojen birimi başına enerji ihtiyacını azalttığına dair güçlü bir işaret kanı vardır. Bu çalışmanın amacı, yarı-potansiyostatik, galvanostatik ve impedans spektroskopisi teknikleri kullanılarak elektrokatalitik etkinliği araştırmaktır. Sonuçlar, Tafel eğimlerini, değişim akım yoğunluklarını, etkinleşmenin görünen enerjisini, görünür elektrokimyasal yüzeyi ve Co-W katalizörünün stabilitesini göstermek için sunulmuştur. Sonuçlar, sadece elektrotların gerçek yüzey alanı artışından değil, aynı zamanda Co-W katalizörünün gerçek katalitik etkisinden de önemli bir katalitik performansa işaret etmektedir.

Huang Y.G. ve ark. (2015), tarafından yapılan çalışmada, Ni-grafen (Ni-G) kompozitleri, 1 dakikadan 30 dakikaya kadar kaplama süresi ile bir Ni bazlı banyoda basit, ekonomik ve etkili bir elektro-çökeltme tekniği kullanılarak 304 paslanmaz çelik (304 SS) yüzeyinde hazırlanmıştır. Grafenin hidrojen çıkış reaksiyonu (HER) için etkisi araştırılmıştır. Ni-G kompozit kaplamalardaki grafen içeriği 1 dk, 5 dk ve 30 dk depozisyon süresi ile sırasıyla % 0,42, % 1,47 ve % 2,82 olarak bulunmuştur. Ni-G kompozit kaplamalardaki grafen içeriğinin artmasıyla, başlangıçtaki aşırı potansiyel azalmış ve İDA sırasında değişim akımı yoğunluğu artmıştır. 298,15 K'de 0.1 mol L⁻¹ KOH çözeltisi içinde aşırı gerilimi ve maksimum değişim akımı yoğunluğu 75 mV ve 1,43 mA cm⁻² dir. Ni-G / 304 SS maksimum akım sergilemiştir. Hidrojen üretimi için en iyi aktiviteyi gösteren Ni / 304 SS elektrotta 1,3 V'da akımın 9,50 mA cm⁻² olduğunu belirlemişler. Ni / 304 SS ve 304 SS'nin birlikte kullanılması, maksimum akım yoğunluğunun HER'de Ni-G / 304 SS elektrotta, Ni / 304 SS'den 18,6 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. Yüksek katalitik aktivitenin, yüksek özgül yüzey alanları ve mükemmel elektriksel iletkenliği Ni-G / 304 SS'nin yapısal avantajlarına

bağlanmıştır.

Bukola S. ve ark. (2016), tarafından yapılan çalışmada, Platin için alternatif olarak tasarlanan kobalt-modifiyeli molibden karbürler dayanan bir dizi nanoyapılı katalizör, tuzlu sudan hidrojen çıkış reaksiyonu (HER) için geliştirilmiştir. Katalizörler, metal tuzlarının karbon desteği üzerine emdirilmesiyle ve ardından CH_4 atmosferinde piroliz işlemi ile sentezlenmiştir. Elde edilen katalizörler, hem brin hem de alkali ortamlarda yüksek HER aktiviteleri göstermiştir. $7,0 \text{ mA cm}^{-2}$ akım yoğunluğunda, Pt / C katalizörü ve Co modifiye edilmiş Mo / C katalizörleri için aşırı gerilimler sırasıyla, 63-89 mV ve 15-148 mV'dır. Her ikisi içinde hız belirleyici reaksiyon Volmer-Heyrovsky basamağıdır.

Bachvarov V. ve ark. (2016), tarafından yapılan çalışmada, kristal NiFeCo ve amorf NiFeCoP alaşımlarının, farklı akım yoğunluklarında elektrodpozisyonun, bileşiminde farklılıklara yol açtığı görülmektedir. Alaşımlar SEM, XRF, EDX, XRD ve XPS yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Hidrojen çıkış reaksiyonu (HER) için malzemelerin elektrokatalitik aktivitesi polarizasyon eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), 6,0 M KOH solüsyonunda incelenmiştir. Nikel alaşımlarında demir ve kobaltın varlığı, hidrojen oluşumu sırasındaki aşırı gerilimi önemli ölçüde azaltmıştır ve yük aktarma direnci, saf nikel kıyasla yaklaşık 1000 kat daha küçülmüştür. Alaşım amorfizasyonu için fosforun eklenmesiyle, bu malzemelerin HER için elektro-aktivitesini arttırmıştır. Her iki elektrokimyasal yöntemden yapılan sonuçlar, en yüksek elektrokatalitik davranışın, yüksek demir içeriğine sahip olan amorf alaşımlar tarafından olduğunu göstermiştir. İkincisi, bu malzemelerin aktivitesindeki artış yüzey alanı ve Ni, Fe ve Co arasında olası sinerji ile ilişkilidir.

Casciano P.N.S. ve ark. (2017), tarafından yapılan çalışmada, akım yoğunluğunun, kaplama çözeltisinin pH'ının ve kimyasal bileşiminin, elektrodpozisyon verimliliği ve Co-Mo kaplamalarının pürüzlülük faktörü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Daha yüksek pürüzlülük faktörü olan kaplamalar, alkali ortamda hidrojen üretimi için katot olarak seçilmiştir.

Elektrodepozisyon akım yoğunlukları 30 mA cm^{-2} , 45 mA cm^{-2} ve 60 mA cm^{-2} di ve kaplama çözeltilerinin pH değerleri 6, 7 ve 8 di. İki seviyeli ve merkez noktalı faktöriyel tasarım uygulanmıştır. Kaplamalar çatlaklar ve amorf yapılar göstermiştir. pH, Mo yüzdesi ve kaplamaların pürüzlülük faktörü üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir. Kaplama yoğunluğu, kaplamaların verimliliği ve elektro-aktif alanı üzerinde en yüksek etkiye sahip elektrot belirlenmiştir. Bu parametreler değiştirilerek mevcut verim %17,65'den %31,63'e, pürüzlülük faktörü ise 27,53'den 78,74'e artmıştır. Volmer reaksiyonu hız belirleyen basamaktır ve hidrojen oluşum reaksiyonunda aktivasyon enerjisi $18,40 \text{ kJ mol}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

Schalenbach M. ve ark. (2018), tarafından yapılan çalışmada, farklı yüzey alanlarına sahip Ni-Mo alaşımlı elektrotların, alkali elektrolitlerde, HER için aktivitesi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Parlatılmış Ni-Mo elektrotların aktiviteleri, saf Ni elektrotlarından biraz daha düşük bulunmuştur. Kütle spektrometresine bağlanan bir elektrokimyasal akış hücresi kullanılarak, Mo'nun HER koşullarda çözüldüğünü göstermektedir. Yüzey atomlarının Ni-Mo oranının elektrokimyasal işlemde sonra arttığını ve ayrıca daha az soy olan Mo'nun çözünmesini sağladığını tespit etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara dayanarak, daha önce bildirilen yüksek aktivitelerin bazılarının, alaşımın kendi özelliklerinden ziyade, imalat işleminden ve / veya elektrokimyasal de-alaşımlamadan kaynaklanan yüksek yüzey alanlarına atfedilebileceği sonucuna varmışlardır.

Telli E. ve ark. (2018), tarafından yapılan çalışmada, Nikel köpük kullanılmıştır. Elektrokimyasal kaplamalar gerçekleştirildiğinde, devreden farklı zamanlarda farklı akımlar geçirilmiş ve kaplamalar sabit yükte yapılmıştır. Hazırlanan elektrotlar FexCu_x , FexCu_3x ve FexCu_9x olarak adlandırılır ve bu elektrotlar hidrojen çıkış reaksiyonu (HER) için kullanılmıştır. Yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskopisi ile araştırılmıştır. HER aktivitesi katodik akım-potansiyel eğrileri, dönüşümlü voltametri, elektrokimyasal impedans spektroskopisi kaydedilerek değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, FexCu_9x

katalizörlerinin kompakt ve gözenekli bir yapıya ve alkalın ortam içinde HER için iyi elektrokatalitik aktiviteye sahip olduğunu sonuçlandırılmıştır.

Neto S.A. ve ark. (2019), tarafından yapılan çalışmada, alkali veya fizyolojik çözeltilerde hidrojen eldesini hedefleyen elektrokatalitik aktif nikel bazlı materyaller araştırılmıştır. Nikel esaslı nanopartiküller, bromür anyon değiştirme yöntemi ile sentezlenmiş ve performansları, nikel köpük ve yüksek saflıkta bir nikel folyonun performanslarıyla karşılaştırılmıştır. $\text{Ni}_{99}\text{Pt}_{01}/\text{C}$ elektrokatalizörü, özellikle fizyolojik koşullarda, düşük aşırı gerilim ve yüksek akım yoğunluğu açısından en iyi performansı göstermiştir. Buna ek olarak, alkali ortamda, nikel köpüğün yanı sıra ticari yüksek saflıkta nikel folyo, pH 7'de (tamponlu çözelti içinde) daha iyi davranış göstermiştir. Her iki malzeme de, özellikle nötr elektrolitlerde hidrojen üretiminde, büyük katot malzemeleri gerektiren teknolojiler için çevre dostu ve ekonomik olarak uygun adaylar olmuştur.

Laszczynska A. ve ark. (2019), tarafından yapılan çalışmada, Co-Ni-Mo, Co-Ni ve Co-Mo alaşım kaplamaların HER elektrokatalitik aktivitesi 1,0 M KOH çözeltisi içinde araştırılmıştır. Yüzey morfolojisi ve incelenen kaplamaların yapısı SEM ve XRD analizi ile karakterize edilmiştir. HER için elektrokatalitik aktivite, dönüşümlü voltametri, elektrokimyasal impedans spektroskopisi, katodik polarizasyon ve kronopotensiyometri teknikleri kullanılarak belirlenmiştir. XRD analizi tüm kaplamalarda Co'nın hcp yapısında olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, Mo ile alaşım birikintileri daha nanokristalin yapı ile karakterize edilmiştir. Elektrokimyasal deneyler, Co-Ni alaşımına kıyasla Mo ile kaplamaların elektrokatalitik aktivitesinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. EIS sonuçlarına göre, Co-Mo ve Co-Ni-Mo yüzey pürüzlülüğü faktörleri (R_f) daha geniş gerçek yüzey alanının olduğunu göstermektedir. HER için Co-Ni-Mo kaplama, en yüksek R_f ve en yüksek katalitik aktiviteye sahip elektrot olmuştur.



3. MATERYAL

3.1. Materyaller

Elektrokimyasal Analiz Cihazı: Elektrokimyasal ölçümler CHI 660 cihazı ile 3 elektrot tekniği kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Elektrolit :Deneyisel çalışmalar 1,0 M KOH çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Nikel Kaplama Banyosu :Elektrotun yüzeyinin nikel ile kaplanması amacıyla kullanılmış olup bileşimi aşağıda verilmiştir

Nikel Kaplama Banyosu Bileşimi : %30 NiSO₄, %1,25 H₃BO₃, pH=5,6-6,2

Kobalt Kaplama Banyosu :Elektrotun (Ni Köpük) yüzeyinin kobalt ile kaplanması amacıyla kullanılmış olup bileşimi aşağıda verilmiştir.

Kobalt Kaplama Banyosu Bileşimi : % 30 CoSO₄ % 1,25 H₃BO₃

Kalay Kaplama Banyosu :Elektrotun (Ni Köpük) yüzeyinin kalay ile kaplanması amacıyla kullanılmış olup bileşimi aşağıda verilmiştir.

Kalay Kaplama Banyosu Bileşimi : % 0,214 SnSO₄ %5,43 H₂SO₄

Çalışma Elektrotları :Nikel köpük (Ni), nikel kaplı nikel köpük (Ni#Ni), Kobalt kaplı Ni köpük (Co#Ni), kalay kaplı nikel köpük (Sn#Ni), kalay ve kobalt kaplı nikel köpük (SnCo#Ni) elektrotları çalışma elektrotları olarak kullanılmıştır.

Referans Elektrot : Gümüş-gümüş klorür elektrot (Ag, AgCl/Cl⁻) referans elektrot olarak kullanılmıştır.

Karşı Elektrot : 2 cm² yüzey alanına sahip platin elektrot karşı elektrot olarak kullanılmıştır.

Elektrokimyasal Analiz Cihazı (CHI 660B - Electrochemical Analyzer, Seri No A1383) : Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), katodik polarizasyon ve dönüşümlü voltametri ölçümlerinde kullanılmıştır.

3.2. Elektrokimyasal Ölçümler

Katodik polarizasyon eğrileri, 10 mVs^{-1} tarama hızıyla açık devre potansiyelinden $-1,8 \text{ V}$ 'a kadar polarize edilerek ölçülmüştür. EIS, açık devre potansiyelinde 10^6 Hz 'den $0,01 \text{ Hz}$ 'e kadar 10 mV genlik uygulanarak ölçülmüştür. LSV, $-1,0 \text{ V}$ 'dan $-1,5 \text{ V}$ 'a $1,0 \text{ mVs}^{-1}$ tarama hızıyla ölçülmüştür. Dönüşümlü voltametri ölçümleri, $-1,5 \text{ V}$ 'dan $1,2 \text{ V}$ 'a 100 mVs^{-1} tarama hızıyla elde edilmiştir. Bütün ölçümler oda sıcaklığında ve üçer kez tekrarlanarak elde edilmiştir. Elektrot İsimleri ve Kısaltmaları şu şekildedir;

- Ni : Nikel köpük
- Ni#Ni : Nikel köpük üzerine $40 \text{ s } 10 \text{ mA cm}^{-2}$ Ni biriktirilmiş elektrot.
- Sn#Ni : Nikel köpük üzerine $180 \text{ s } 5 \text{ mA cm}^{-2}$ Sn biriktirilmiş elektrot.
- Co#Ni : Nikel köpük üzerine $900 \text{ s } 10 \text{ mA cm}^{-2}$ Co biriktirilmiş elektrot.
- SnCo#Ni : Nikel köpük üzerine $180 \text{ s } 5 \text{ mA cm}^{-2}$ Sn, üzerine $900 \text{ s } 10 \text{ mA cm}^{-2}$ Co biriktirilmiş elektrot.
- NiSnCo#Ni : Nikel köpük üzerine $40 \text{ s } 10 \text{ mA cm}^{-2}$ Ni, üzerine $180 \text{ s } 5 \text{ mA cm}^{-2}$ Sn, üzerine $900 \text{ s } 10 \text{ mA cm}^{-2}$ Co biriktirilmiş elektrot.

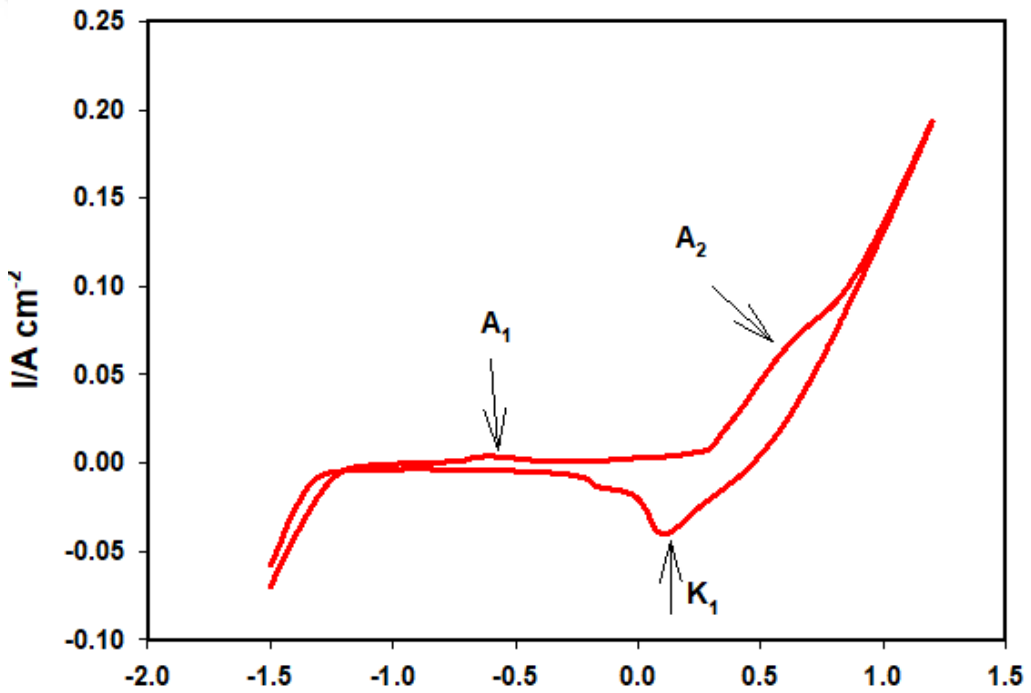
3.3. Yüzey Karakterizasyonu

SEM EDX Analizleri FEI marka Quanta 650 Field Emission SEM Model Taramalı Elektron cihazı ile yapılmıştır. Ölçümler 20 kV 'da $1,2 \text{ nm}$ yüksek vakumda $1000\times$ yaklaşımda alınmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

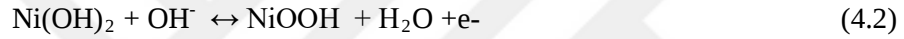
Ni köpük (Ni), Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların HER katalitik etkinlikleri dönüşümlü voltametri, katodik polarizasyon (akım potansiyel) eğrisi ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi teknikleri ile belirlenmiştir.

4.1. Dönüşümlü Voltamogramlar



Şekil 4.1. Ni köpük elektrotunun 100 mVs⁻¹ tarama hızıyla 1,0 M KOH çözeltisinde elde edilen dönüşümlü voltamogramı

Şekil 4.1 Ni köpük (Ni) elektrotunun 100 mV s^{-1} tarama hızıyla $1,0 \text{ M}$ KOH çözeltisinde elde edilen dönüşümlü voltamogramı görülmektedir. Anodik yönde taramada $-0,61 \text{ V}$ 'ta oluşan oksidasyon piki (A_1) Ni/Ni^{+2} yükseltgenmesine ve $0,72 \text{ V}$ 'ta oluşan ikinci oksidasyon piki (A_2) $\text{Ni}^{+2}/\text{Ni}^{+3}$ ($\text{NiOH}_2/\text{NiOOH}$) yükseltgenmesine karşılık gelmektedir. Katodik yönde taramada $0,103 \text{ V}$ 'ta oluşan indirgenme piki (K_1), 4.2. eşitliğinin indirgenme yönünde gerçekleşmesi ile elektrot yüzeyinde Ni(OH)_2 oluşmaktadır. Oluşan elektrokimyasal yarı reaksiyonlar;



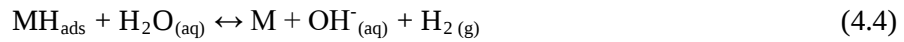
Anodik yönde taramada $0,73 \text{ V}$ 'tan itibaren görülen akım artışı suyun ayrışması ile oksijen çıkışının başladığını göstermektedir. Katodik yönde taramada yaklaşık $-1,48 \text{ V}$ 'tan itibaren hidrojen çıkışı gerçekleşmektedir.

Bazık ortamda hidrojen gazı çıkış (HER) üç basamakta gerçekleşir. Bu basamaklar:

1.Volmer reaksiyonu ile hidrojenin elektrokimyasal olarak adsorplanması basamağı



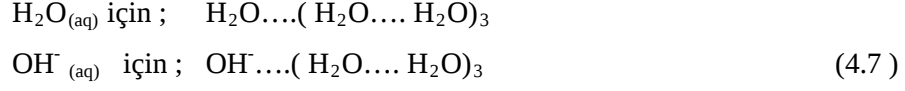
2.Heyrovsky Reaksiyonu ile elektrokimyasal adsorpsiyon basamağı



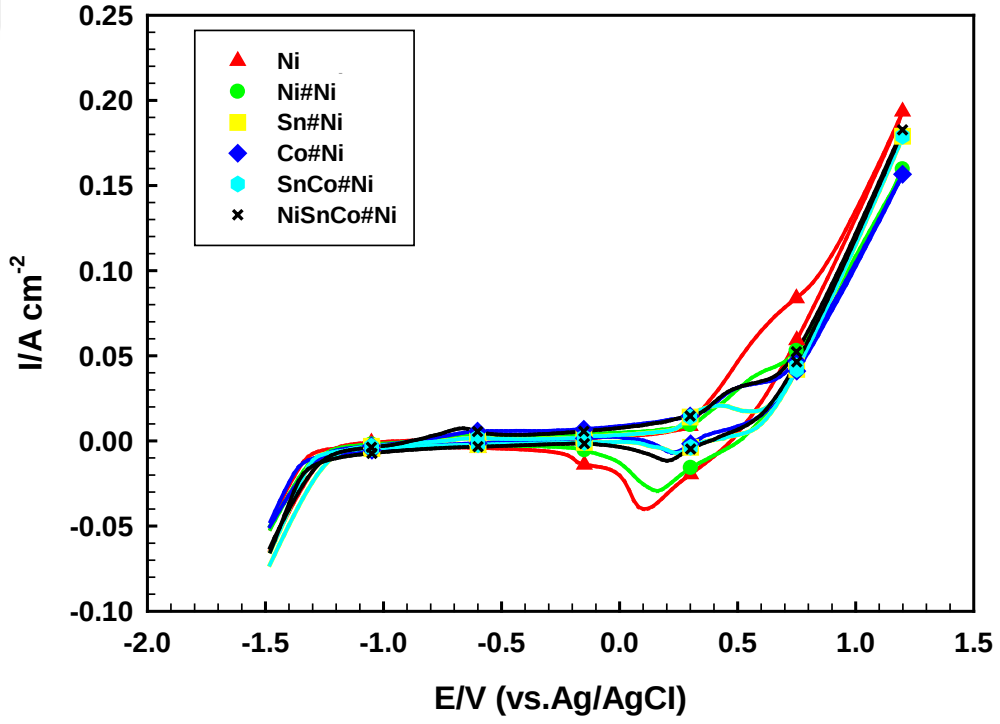
3. Tafel Reaksiyonu ile elektrokimyasal desorpsiyon basamağı



1.ve 2. Basamaklardaki $\text{OH}^-_{(\text{aq})}$ ile $\text{H}_2\text{O}_{(\text{aq})}$



Şeklinde iki hidratasyon kabukları bulunmaktadır(Krstajit N. ve ark, 2001; Bockris J.O'M. ve ark, 1923).



Şekil 4.2 Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların 100 mV s^{-1} tarama hızıyla elde edilen dönüşümlü voltamogramları.

Ni köpük, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların -1,5 V – 1,2 V aralığında 100 mV s^{-1} tarama hızıyla 1,0 M KOH çözeltisinde elde edilen dönüşümlü voltamogramları Şekil 4. 2 de verilmektedir. Bazı ortamda (1,0 M KOH), Ni'e ait 0,5 V dolaylarında elde edilen $\text{NiOH}_2/\text{NiOOH}$ spesifik dönüşümü Ni köpükte yüksek akım ($46,4 \text{ mA cm}^{-2}$) yoğunluğu ile oluşmaktadır. Ni köpük üzerine kaplamalar yapılmasıyla pikin akım yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. En düşük pik akımı ($18,8 \text{ mA cm}^{-2}$) kalay, kobalt kaplamanın (SnCo#Ni) yapıldığı elektrotta görülmektedir. Pik akımındaki bu düşüş yüzeyde Sn-Co kaplamalardan meydana gelmektedir.

Dönüşümlü voltamogramlarda hidrojen indirgenmesine karşılık gelen -1,2 V ile -1,5V aralığında katodik akım artışının başladığı potansiyel HER katalitik etkinliği ile ilgili aşırı gerilimlere bağlı olarak değişmektedir. Katodik akım artışının gerçekleştiği en düşük potansiyel (-1,2371 V) dolayısı ile aşırı gerilim (0,1911 V) SnCo#Ni elektrotta belirlenmiştir.

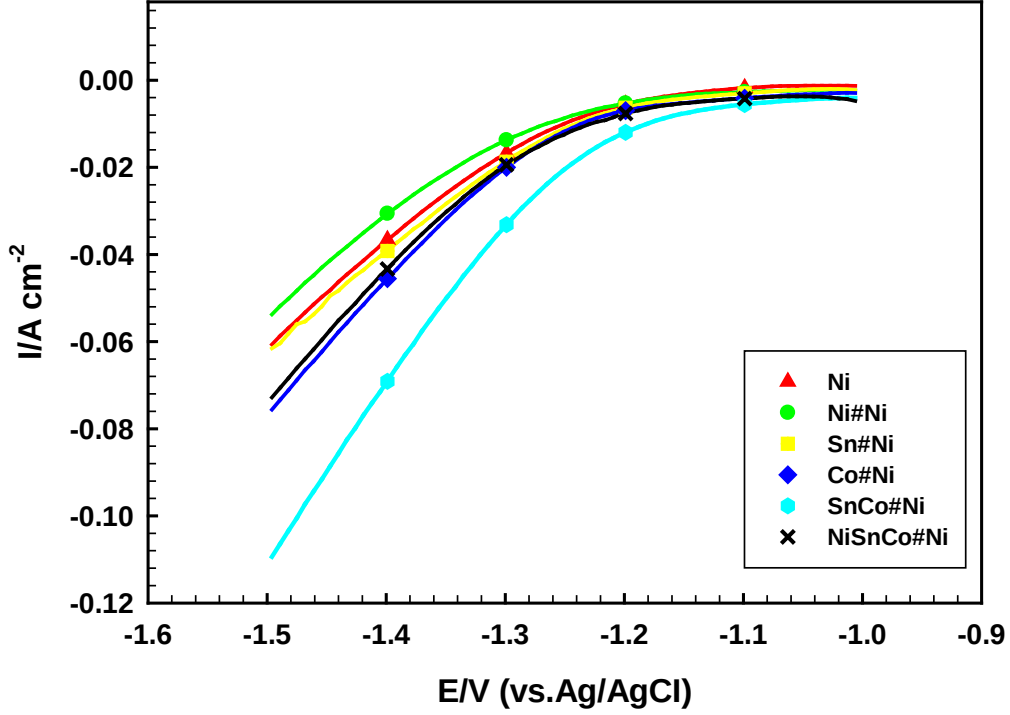
Şekil 4.2 de verilen dönüşümlü voltamogramlardan belirlenen pik potansiyelleri (E_p) ve pik akımları I_p Çizelge 4.1 de verilmektedir. Ni, Sn ve Co kaplamalar Ni köpük elektrotta elde edilen anodik ve katodik pik akımlarının düşmesine ve pik potansiyellerinin kaymasına neden olmaktadır. Bu durum yüzeyde kaplamaların oluşması ile açıklanabilir(Solmaz R. ve ark, 2007; Solmaz R. ve ark, 2009).

Çizelge 4.1. Ni köpük, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların pik potansiyelleri (Ep) ve pik akımları (Ip)

Ep /Ip	A ₁		A ₂		K ₁	
	(V)	(mA cm ⁻²)	(V)	(mA cm ⁻²)	(V)	(mA cm ⁻²)
Ni Köpük	0,625	0,0296	0,661	0,0734	0,139	0,0385
Ni#Ni	0,620	0,0436	0,579	0,0386	0,181	0,0028
Co#Ni	0,628	0,0532	0,491	0,0308	0,261	0,0054
Sn#Ni	0,581	0,0580	0,499	0,0313	0,241	0,0065
SnCo#Ni	0,574	0,0017	0,411	0,0207	0,243	0,0076
NiSnCo#Ni	0,639	0,0071	0,479	0,0303	0,201	0,0117

4.2. Katodik Akım-Potansiyel Eğrileri

Şekil 4.3 de 1,0 M KOH çözeltisinde Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotlarda katodik yönde 1,0 mV s⁻¹ tarama hızı ile elde edilen akım-potansiyel eğrileri verilmektedir. Eğriler incelendiğinde Nikel köpük üzerine nikel kaplı(Ni#Ni) ve kalay kaplı (Sn#Ni) elektrotlarda aşırı gerilim artarken, kobalt kaplı (Co#Ni) elektrotta aşırı gerilimin azaldığı görülmektedir. Nikel köpük yüzeyine kalay ve üzerine kobalt kaplanması ile (SnCo#Ni) katodik hidrojen akımının 2 kat arttığı ve aşırı gerilimin yaklaşık 100 mV azaldığı belirlenmiştir. Nikel köpük üzerine Ni kaplandıktan sonra kalay ve kobalt'ın kaplanması (NiSnCo#Ni) ile elde edilen elektrotun katodik akımının Ni kaplanmama göre düşük olduğu ve aşırı gerilimin daha yüksek olduğu Şekil 4.3 de görülmektedir. Katodik akım-potansiyel eğrilerinden hidrojen indirgenmesinde SnCo#Ni elektrodun elektrokatalitik etkinliğinin hazırlanan diğer kaplamalara göre daha yüksek olmuştur.

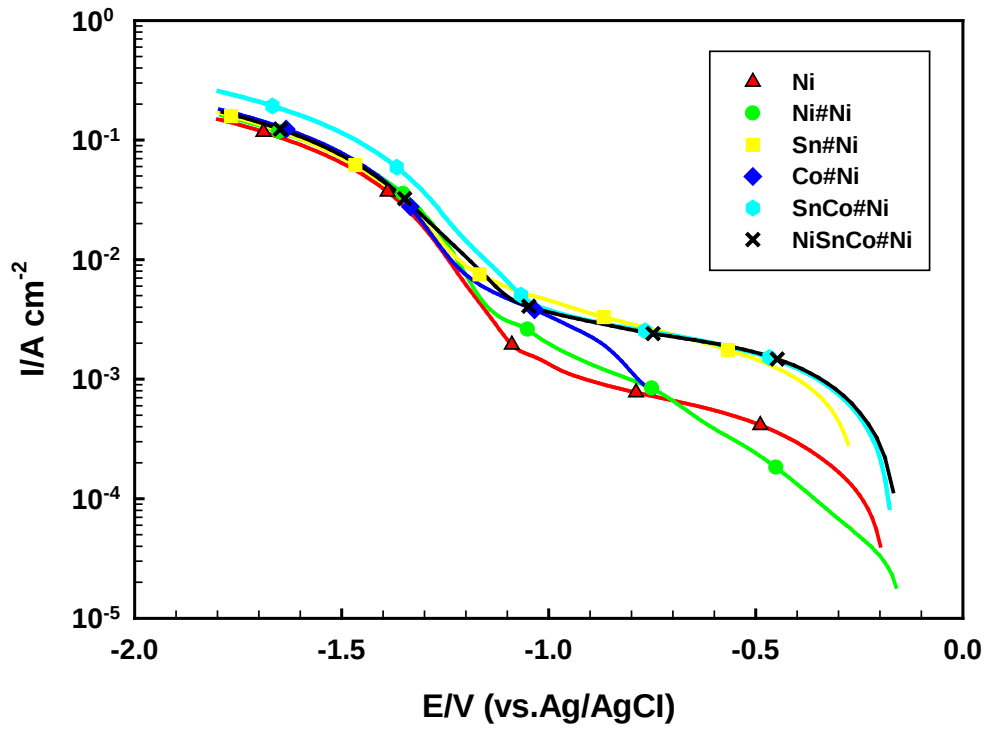


Şekil 4.3. Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların 1 mV s⁻¹ tarama hızı ile elde edilen akım-potansiyel eğrileri

Çizelge 4.2’de Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların katodik akım-potansiyel eğrilerinden belirlenen aşırı gerilim ve -1,5V’ta elde edilen akım yoğunlukları verilmektedir. Çizelgede görüldüğü gibi, en düşük aşırı gerilim (0,1911 V) ve en yüksek akım (110,9 mA cm⁻²) yoğunluğu kalay ve kobalt kaplı nikel eletrotta (SnCo#Ni) elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Katodik akım-potansiyel eğrilerinden belirlenen aşırı gerilim ve -1,5 V'ta elde edilen akım yoğunlukları.

Elektrotlar	-1,5 V'da mA cm^{-2}	Aşırı gerilim V
Nikel Köpük	60,8	0,2503
Ni#Ni	54,2	0,3111
Co#Ni	61,8	0,1969
Sn#Ni	76,1	0,2638
SnCo#Ni	110,9	0,1911
NiSnCo#Ni	73,2	0,2356



Şekil 4.4. Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların 10 mV s⁻¹ tarama hızı ile elde edilen yarı logaritmik akım-potansiyel eğrileri

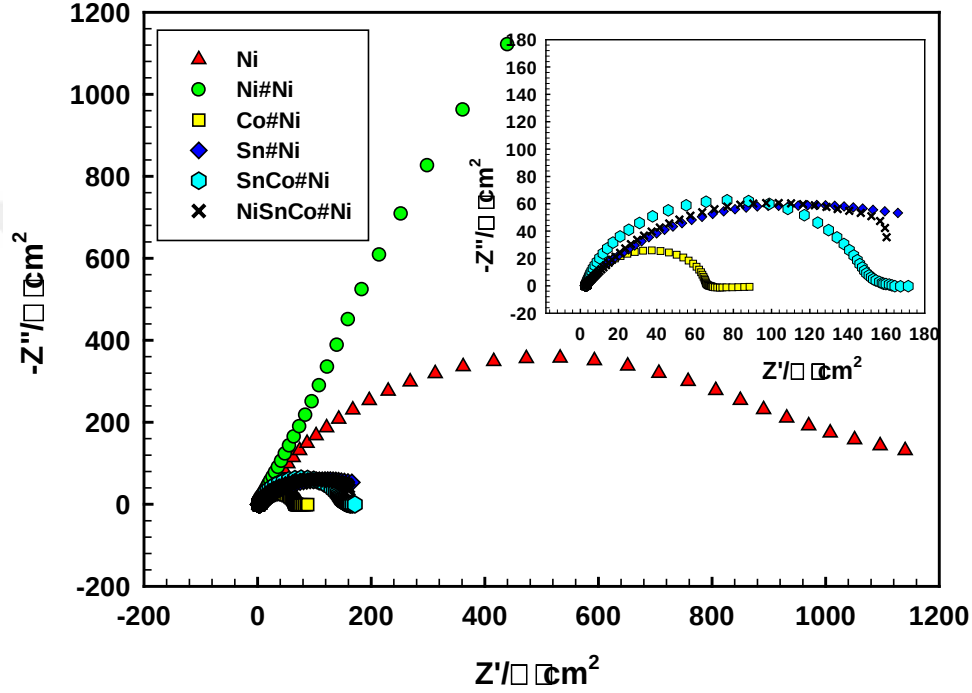
Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların açık devre potansiyelinden itibaren -1,8 V ta kadar 10 mV s^{-1} tarama hızıyla 1,0 M KOH çözeltisinde elde edilen katodik yarı logaritmik akım-potansiyel eğrileri Şekil 4.4'de verilmektedir. Elde edilen eğrilerde açık devre potansiyelinden itibaren yaklaşık -1,0V potansiyele kadar oluşan sınır akımı oksijen indirgenmesine karşılık gelmektedir. -1,0V ile -1,2V aralığında hidrojen indirgenmesi gerçekleşmekte ve akım artışının başladığı potansiyel ve akımın büyüklüğü elektrotların hidrojen indirgenmesine karşı katalitik etkinlikleri için önemli bir göstergedir. Hazırlanan elektrotlardan, Nikel köpük üzerine Ni (Ni#Ni) kaplandığında, Ni köpük üzerine Ni kaplamada yüzey alanının küçülmesine bağlı olarak en düşük katodik akım ve aşırı gerilimin arttığı elde edilmiştir. Kalay ve kobalt kaplandığında (Sn#Ni, Co#Ni) ise aşırı gerilimin bir miktar azaldığı görülmektedir.

Kalay üzerine kobalt kaplanması ile, katodik akım iki kat artmaktadır. SnCo#Ni elektrotta aşırı gerilimin daha düşük ve akım artışının diğer elektrotlara kıyasla daha yüksek olduğu Şekil 4.4'de görülmektedir. Bu durum hazırlanan elektrotun katalitik etkinliğinin yüksek olduğunun bir göstergesidir.

4.3. Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (EIS)

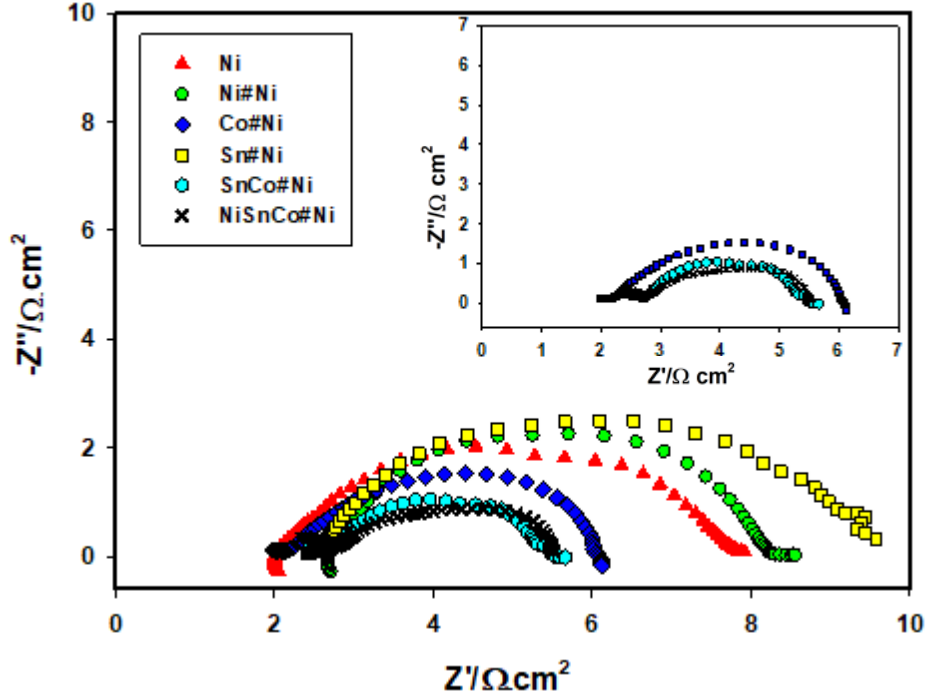
Ni, Ni#Ni, Sn#Ni, Co#Ni , SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotlarda açık devre potansiyellerinde 1,0 M KOH içerisinde oda sıcaklığında elde edilen Nyquist diyagramları Şekil 4.5 de verilmektedir. Nikel köpük yüzeyinin nikel kaplı elektrotta kapanmayan açılı bir diyagram oluşurken diğer elektrotlarda basık yarım daire şeklinde diyagramlar elde edilmiştir. Elde edilen basık yarım daire düşük frekans bölgesinde başlayıp yüksek frekans bölgesinde kapanmaktadır. Bu basık yarım dairelerin çapından polarizasyon dirençleri (R_p) belirlenmektedir(Tüken T. 2000; Erbil M. 1987). Açık devre potansiyelinde elde edilen Nyquist diyagramı elektrotların yüzey porozitesi ve korozyon dayanımı ile ilgili bilgi vermektedir. Hazırlanan kaplamalar içerisinde R_p en düşük dolayısı ile korozyon direnci en düşük kalay kaplamalı elektrottur. SnCo#Ni elektrotta R_p 'nin artması korozyon

direncinin arttığını göstermektedir. Nikel köpük yüzeyine nikel kaplı elektrotta açılı bir eğri elde edilmesi yüzeyde gözeneklerin önemli ölçüde kapanması ve olayın diffüzyon kontrollü olduğunu göstermektedir(Erbil M. 1987). Diğer elektrotlarda gözenekli yapının kaplamada korunduğu söylenebilir.



Şekil 4.5. Ni, Ni#Ni, Sn#Ni, Co#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların açık devre potansiyellerinde 1,0 M KOH içerisinde oda sıcaklığında elde edilen Nyquist diyagramları.

Şekil 4.6'da -1,3V'ta Ni, Ni#Ni, Sn#Ni, Co#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotlarda 1,0 M KOH içerisinde elde edilen Nyquist diyagramları verilmektedir. Hidrojen çıkış potansiyelinde elde edilen eğrilerde bütün elektrotlarda basık yarım daire kapanmıştır. Şekilde görüldüğü gibi hidrojen çıkışının gerçekleştiği potansiyelde SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotlarda elde edilen basık yarım dairenin çapı diğer elektrotlara göre daha düşük belirlenmiştir. Bu durum akım-potansiyel eğrilerinden belirlenen düşük direnç ve yüksek akıma sahip elektrot SnCo#Ni olduğunu desteklemektedir.



Şekil 4.6. Ni, Ni#Ni, Sn#Ni, Co#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotlarda 1,0 M KOH içerisinde -1,3 V'ta elde edilen Nyquist diyagramları

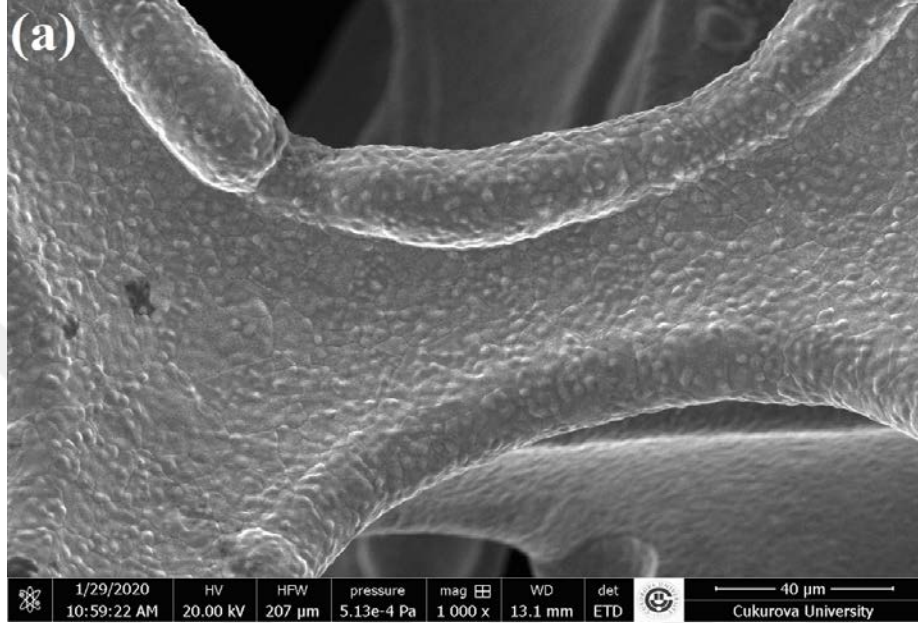
Çizelge 4.3 de açık devre potansiyeli ve -1,3 V potansiyelde elde edilen Nyquist diyagramlarından belirlenen polarizasyon dirençleri verilmektedir. Elde edilen sonuçlarda R_p değeri en düşük SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotlar

olmuştur. Nikel köpük yüzeyine kalay kaplama açık devre potansiyelinde en düşük -1,3 V ta ise en yüksek polarizasyon direncini göstermektedir. Hidrojen çıkışı için düşük katalitik etkinliğe sahip kalay kobalt ile ikili kaplama yapıldığında hidrojen çıkışı için yüksek katalitik etkinlik göstermektedir. Metallerin bir araya gelmeleri ile oluşan sinerjistik etki katalitik aktivitenin artmasında etkin rol almaktadır (Bachvarov V. ve ark 2016; MERT M.E. ve ark. 2018). Hazırlanan SnCo#Ni elektrotta kalay, kobalt ve nikel birarada hidrojen aşırı gerilimini düşürerek katalitik etkinliğin artmasını sağlamıştır.

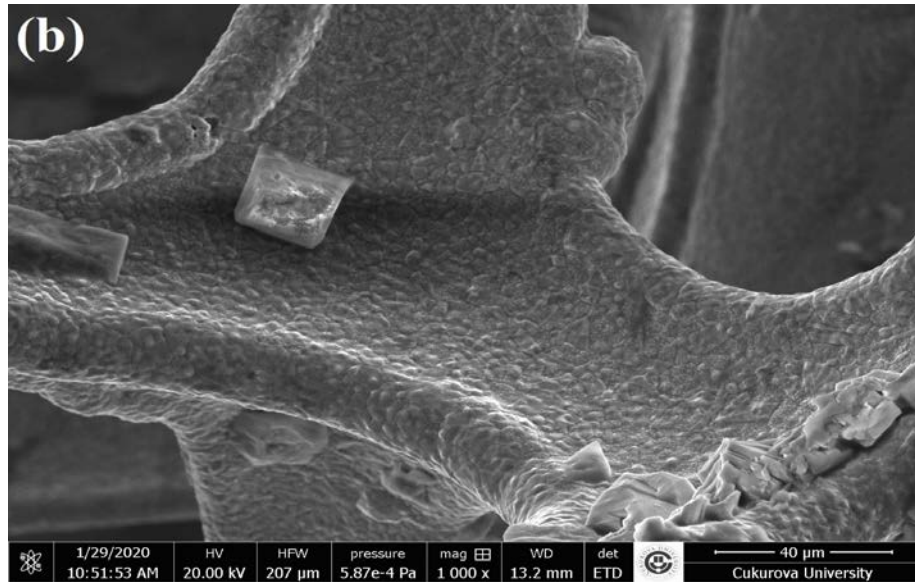
Çizelge 4.3. Ni, Ni#Ni, Co#Ni, Sn#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların açık devre potansiyeli (E_{ocp}) ve -1,3V ta ($E_{-1,3V}$) belirlenen polarizasyon dirençleri

	Rp	
	E_{ocp} (ohm cm ²)	$E_{-1,3V}$ (ohm cm ²)
Ni	1137,125	6,05
Ni#Ni	11486,32	5,546
Sn#Ni	166,678	8,526
Co#Ni	68,263	3,914
SnCo#Ni	164,723	2,512
NiSnCo#Ni	161,678	2,731

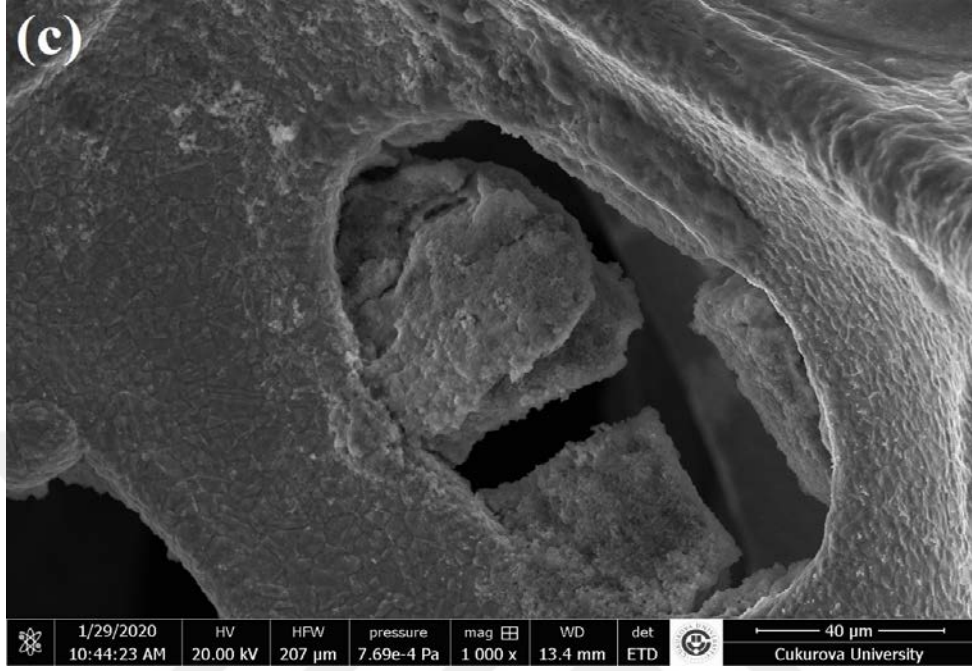
4.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Ray Spektrometresi (EDX)



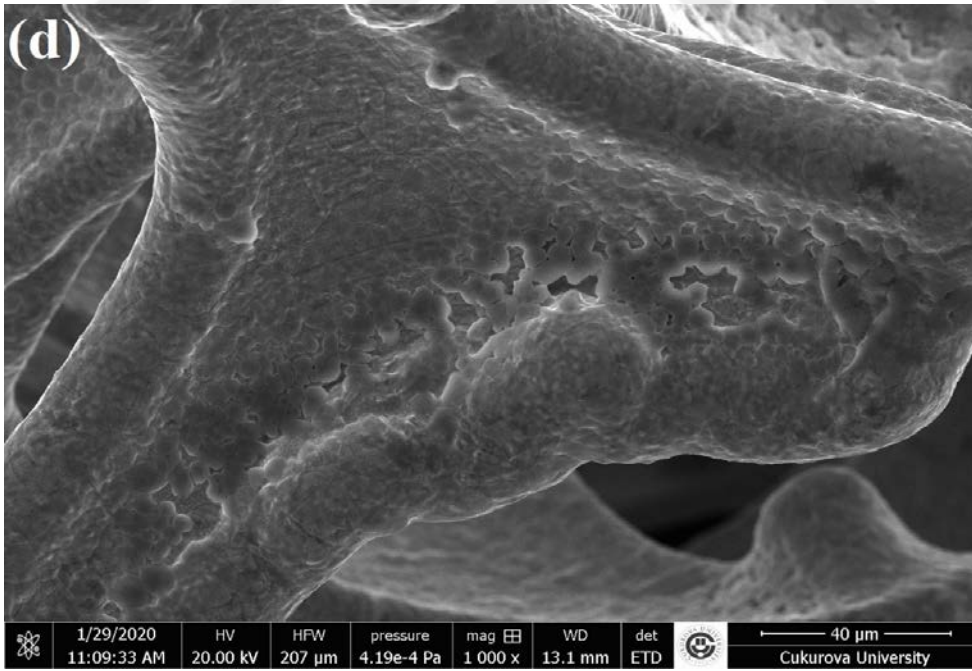
Şekil 4.7. (a) Ni Köpük SEM görüntüsü



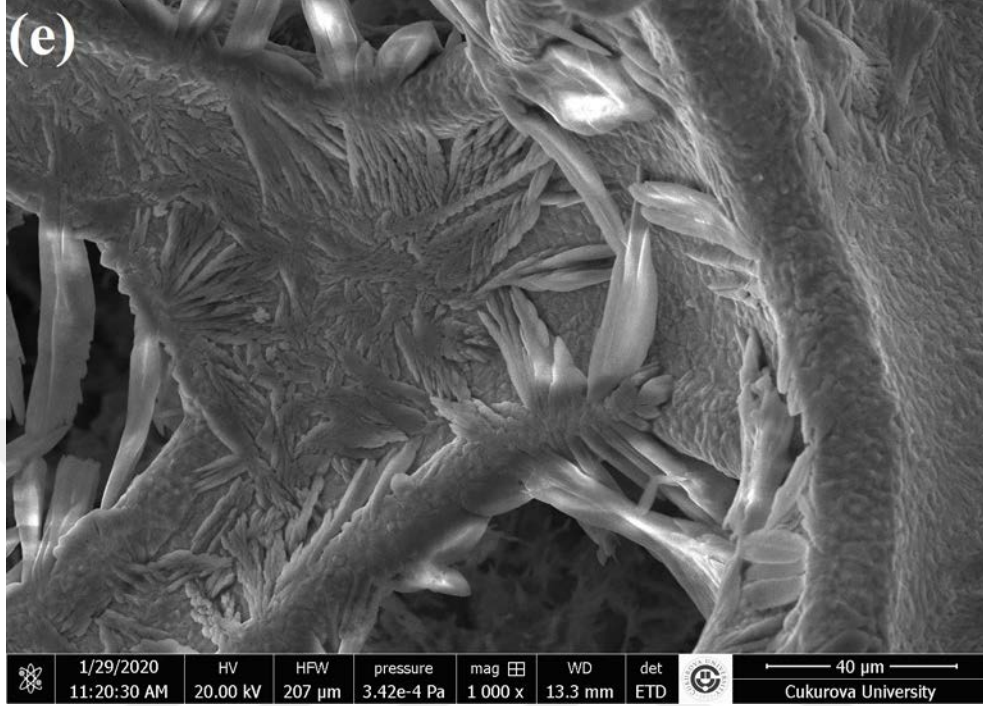
Şekil 4.7. (b) Sn#Ni elektrot SEM görüntüsü



Şekil 4.7. (c) Co#Ni elektrot SEM görüntüsü



Şekil 4.7. (d) SnCo#Ni elektrot SEM görüntüsü



Şekil 4.7. (e) NiSnCo#Ni elektrot SEM görüntüsü

Ni(a), Sn#Ni(b), Co#Ni(c), SnCo#Ni(d) ve NiSnCo#Ni(e) elektrotların 20,00 kV gerilimde 1000x büyütmede elde edilen SEM görüntüleri. Şekil 4.7 de verilmektedir. Elde edilen görüntülerde yüzeyde yapılan kaplamalara bağlı olarak yapının değiştiği görülmektedir. Kaplamalarda:

Ni: Nikel köpük (Şekil 4.7 a).

Sn#Ni : Nikel köpük üzerine 180 s 5 mA cm⁻² Sn biriktirilmiş elektrotta, yüzeyinde geometrik (kübik) birikintiler olmuştur. (Şekil 4.7 b).

Co#Ni : Nikel köpük üzerine 900 s 10 mA cm⁻² Co biriktirilmiş elektrotta, yüzeyinde tortu şeklinde bölgesel birikintiler olmuştur. (Şekil 4.7 c).

SnCo#Ni : Nikel köpük üzerine 180 s 5 mA cm⁻² Sn, üzerine 900 s 10 mA cm⁻² Co biriktirilmiş elektrotta, yüzeyinde pullu birikintiler oluşmuştur. Diğer kaplamalara göre daha homojen dağılımlıdır. (Şekil 4.7 d).

NiSnCo#Ni : Nikel köpük üzerine 40s 10 mA cm⁻² Ni, üzerine 180 s 5 mA

cm^{-2} Sn, üzerine 900 s 10 mA cm^{-2} Co biriktirilmiş elektrotta, yüzeyinde buzul sarkıtlar şeklinde birikintiler olmuştur. (Şekil 4.7 e).

Bu çalışmada elde edilen elektrotlar arasında en iyi sonuç veren Nikel köpük üzerine 180 s 5 mA cm^{-2} Sn, üzerine 900 s 10 mA cm^{-2} Co (SnCo#Ni) kaplamada yüzeyindeki homojen dağılım katalitik etkinin yüksek olduğunu desteklemektedir. (Şekil 4.7 d). SEM görüntülerinde bütün elektrotların yüzeyinde oluşan değişimler kaplamaların homojen bir şekilde oluşturulduğunu göstermektedir. Çizelge 4.5 de SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotların EDX sonuçları verilmektedir. Elde edilen verilerden her iki elektrotun yapısında değişik oranlarda Ni, Sn ve Co belirlenmiştir. Nikel köpük üzerine nikel kaplı elektrotta nikel miktarının kaplamasız elektrota göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Yüzeyde gerçekleşen hidrojen indirgenmesine üç metalin ortak katkısı katalitik etkinliği artırmaktadır.

Çizelge 4.4. SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni EDX verileri

Element			
SnCo#Ni		Ağırlık %	Atomik %
	Sn	39,55	24,45
	Co	0,61	614,51
	Ni	59,85	74,8
NiSnCo#Ni	Sn	14,49	7,74
	Co	1,76	1,89
	Ni	83,75	90,38



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Nikel köpük üzerine elektrokimyasal olarak nikel, kalay ve kobalt kaplamalar yapılarak Ni#Ni, Sn#Ni, Co#Ni, SnCo#Ni ve NiSnCo#Ni elektrotlar hazırlanmış ve bu elektrotların 1,0 M KOH çözeltisi içerisinde hidrojen gazı çıkışına katalitik etkinlikleri belirlenmiştir. Elde edilen verilerden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Nikel köpük üzerine, Ni, Sn, Co, Ni#Ni, Sn#Ni, Co#Ni, SnCo#Ni, NiSnCo#Ni elektrokimyasal kaplamalar için en uygun kaplama koşulları:

Nikel köpük üzerine, 40s 10 mA cm⁻² Nikel (Ni#Ni), 180 s 5 mA cm⁻² Kalay (Sn#Ni), 900 s 10 mA cm⁻² Kobalt (Co#Ni), 180 s 5 mA cm⁻² Kalay üzerine 900 s 10 mA cm⁻² Kobalt (SnCo#Ni), 40s 10 mA cm⁻² Nikel üzerine 180 s 5 mA cm⁻² Kalay üzerine 900 s 10 mA cm⁻² Kobalt (NiSnCo#Ni) kaplama en uygun koşullar olarak belirlenmiştir.

Bazık ortamda (1,0 M KOH), Ni'e ait 0,5 V dolaylarında elde edilen NiOH₂/NiOOH spesifik dönüşümü Ni köpükte yüksek akım (46,4 mA cm⁻²) yoğunluğu belirlenmiştir. Ni köpük üzerine kaplamalar yapılmasıyla pikin akım yoğunluğu azaldığı belirlenmiştir. Yani Ni çözünüp çözeltiye geçmektedir. En düşük pik akımı (18,8 mA cm⁻²) kalay kobalt kaplamanın (SnCo#Ni) yapıldığı elektrotta belirlenmiştir. Bu akım değeri SnCo#Ni elektrotunun çözelti içerisinde çözünmesini engellemekte ve elektrotu daha dayanıklı hale getirmektedir. Dönüşümlü voltamogramlarda hidrojen indirgenmesine karşılık gelen -1,2 V ile -1,5 V aralığında katodik akım artışının başladığı potansiyel HER katalitik etkinliği ile aşırı gerilimlere bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Katodik akım artışının gerçekleştiği en düşük potansiyel (1,2371 V) dolayısı ile aşırı gerilim (0,1911 V) SnCo#Ni elektrotta belirlenmiştir.

Akım-potansiyel eğrileri (LSV)' de Ni köpük için aşırı gerilim 0,2503 V iken üzerine Ni (Ni#Ni) kaplanan elektrotta aşırı gerilim 0,3111 V'a artmıştır. Ni köpük üzerine kalay ve kobalt kaplandığında (Sn#Ni), (Co#Ni) ise aşırı gerilimde

çok az miktarda düşüş olmuştur. -1,5 V’da okunan akım değeri Nikel köpükte $60,8 \text{ mA cm}^{-2}$ iken, Ni köpük üzerine kalay, kobalt (SnCo#Ni) kaplanan elektrotta akım değeri $110,9 \text{ mA cm}^{-2}$ çıkmıştır. Bu artış katodik hidrojen akımının yaklaşık 2 kat arttığı ve aşırı gerilimin yaklaşık 100 mV azaldığı görülmüş ve hidrojen üretiminde verimliliğin arttırdığı anlamına gelmektedir.

En düşük aşırı gerilim (0,1911 V) ve en yüksek akım ($110,9 \text{ mA cm}^{-2}$) yoğunluğu kalay kobalt kaplı (SnCo#Ni) elektrotta belirlenmiştir.

Hidrojen çıkış potansiyel eğrileri incelendiğinde SnCo#Ni kaplı Ni’in katalizör olarak en etkin olduğu görülmüştür. Bu ölçüm doğrusal tarama voltametresini (LSV) desteklemektedir. Hidrojen bölgesinde çıplak Ni köpük için $6,05 \text{ ohm cm}^2$ Ni köpük üzerine kalay ve kobalt kaplandığında (SnCo#Ni) en düşük dirence ($2,512 \text{ ohm cm}^2$) ve yüksek akıma ($110,9 \text{ mA cm}^{-2}$) sahip elektrot SnCo#Ni olduğu desteklemektedir. Açık devrede potansiyeli ile hidrojen bölgesinde yapılan ölçümler sonucunda en düşük dirence sahip olan elektrotlar hidrojen bölgesinde SnCo#Ni elektrotlardır.

Elektro tarama mikroskobu (SEM) incelenen elektrot Ni köpük üzerine 180 s 5 mA cm^{-2} Sn, 900 s 10 mA cm^{-2} Co (SnCo#Ni) kaplamanın yapıldığı elektrottur. Kaplama yüzeyindeki homojen dağılım katalitik etkinin en yüksek olduğunu desteklemektedir.

Bu sonuçlar doğrultusunda SnCo#Ni elektrotu elektroliz ile Hidrojen üretiminde katalizör olarak kullanılabileceği öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

- ABOU-KRISHA M. M. 2005. Electrochemical studies of zinc–nickel codeposition in sulphate bath *Applied Surface Science* (Vol.252): (No.4), 1035-1048
- ALTUBE A., PIERNA A.R, MARZO F.F., 2001. Hydrogen evolution reaction with Finemet–Co amorphous alloys in acid solution *Journal of Non-Crystalline Solids* (Vol.287): (No.1–3), 297-301
- ANANTHACHAR V., DUFFY J., 2005. Efficiencies of hydrogen storage systems onboard fuel cell vehicles. *Solar Energy Pages* (Vol.78): (No.5), 687-694
- BACHVAROV V., LEFTEROVA E., RASHKOV R., 2016. Electrodeposited NiFeCo and NiFeCoP alloy cathodes for hydrogen evolution reaction in alkaline medium *International Journal of hydrogen energy* 41:1276-2-12771
- BENEMANN J.R., 1997. Feasibility analysis of photobiological hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy*, (Vol.22), 979-987.
- BOCKRIS J. O'M., 1975a. *Energy the Solar-Hydrogen Alternative*, London: The Architectural Press, 44-56.
- BOCKRIS J.O'M., REDDY A.K.N., 1973. *Modern electrochemistry*. Kluwer Academic Plenum Publishers, 1670-1671
- BROSSEAU J.D., ZAJIC J.E., 1982. Continuous microbial production of hydrogen gas, *Int.J. Hydrogen Energy*, (Vol.7): 623-628.
- BRYANT H.C., 1981. *New Scientist* (Vol.17): 734.
- BUKOLA S., MERZOUGUI B., CREAGER S. E., QAMAR M., PEDERSON L. R., NOUI-MEHIDI M.N., 2016. Nanostructured cobalt-modified molybdenum carbides electrocatalysts for hydrogen evolution reaction. *International Journal of hydrogen energy* (Vol.41): (No.48), 22899-2291

- BUKOLA S., MERZOUGUI B., CREAGER STEPHEN E., QAMAR M., PEDERSON LARRY R., NOUI MEHIDID M.N., 2016. Nanostructured cobalt-modified molybdenum carbides electrocatalysts for hydrogen evolution reaction International Journal of Hydrogen Energy (Vol.41): (No.48), 22899-22912
- BURCHARDT T., 2000. The hydrogen evolution reaction on NiPx alloys International Journal of Hydrogen Energy (Vol.25), (No.7), 627-634
- CASCIANO P.N.S., BENEVIDES R.L., SANTANA R.A.C., CORREIA A.N., LIMA-NETO P.D., 2017. Factorial design in the electrodeposition of Co-Mo coatings and their evaluations for hydrogen evolution reaction. Journal of Alloys and Compounds 723:164-171
- CASCIANO P.N.S., BENEVIDES R.L., SANTANA RENATO A.C., CORREIA ADRIANA N., LIMA-NETO P., 2017. Factorial design in the electrodeposition of Co-Mo coatings and their evaluations for hydrogen evolution reaction Journal of Alloys and Compounds (Vol.723) 164-171
- CHAO R.E., COX K.E., VEZİROĞLU T.N., 1975. Hydrogen Energy, Part A, NewYork: Plenum. Enterobacter aerogens, J. Chem. Eng. Jpn., (Vol:16): 529-530.
- CRNKOVIC F.C., MACHADO S.A.S., AVACA L.A., 2004. Electrochemical and morphological studies of electrodeposited Ni-Fe-Mo-Zn alloys tailored for water electrolysis International Journal of Hydrogen Energy (Vol.29): (No.3), 249-254
- ERBİL, M., 1987. Alternatif Akım (AC) İmpedansı Yöntemiyle Korozyon Hızı Belirlenmesi. Doğa Türk Kimya Dergisi, 11 (3): 100-111.
- ESCHER W.J.D., HANSON J.A., VEZİROĞLU T.N., 1975. Hydrogen Energy, Part A, Plenum 171-305
- GARG H.P., MULLICK S.C., BHARGAVA A.K., 1984. Solar Thermal Energy Storage, D. Reidel Publishing Company, 1-81

- GÜRTEN A.A., KAYAKIRILMAZ K., YAZICI B., ERBİL M., 2003. The primary study on the effects of primer alcohols on the hydrogen evolution reaction on silver electrode *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol.28): (No.10), 1083-1088
- HAN Q., CUI S., PU N., CHEN J., LIU K., WEI X., 2010. A study on pulse plating amorphous Ni-Mo alloy coating used as HER cathode in alkaline medium. *International Journal of hydrogen energy* 35:5194-5201
- HAN Q., CUI S., PU N., CHEN J., LIU K., WEI X., 2010. A study on pulse plating amorphous Ni-Mo alloy coating used as HER cathode in alkaline medium *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol.35): (No.11), 5194-5201
- HASSMANN K., KUHNE H.M., 1993. Primary energy sources for hydrogen production *Int. J. Hydrogen Energy*, (Vol.18): (No.8), 635-640
- HERRAIZ-CARDONA I., ORTEGA E., PÉREZ-HERRANZ V., 2011. Impedance study of hydrogen evolution on Ni/Zn and Ni-Co/Zn stainless steel based electrodeposits *electrochimica Acta* 56 1308–1315
- HERRAIZ-CARDONA I., ORTEGA E., PÉREZ-HERRANZ V., 2011. Impedance study of hydrogen evolution on Ni/Zn and Ni-Co/Zn stainless steel based electrodeposits *Electrochimica Acta*, (Vol.56): (No.3), 1308-1315
- HITZ C. LASIA A., 2001. Experimental study and modeling of impedance of the her on porous Ni electrodes *Journal of Electroanalytical Chemistry* (Vol.500): (No.1–2), 213-222
- HUANG Y. G., FAN H. L., CHEN Z. K., GU C. B., SUN M. X., WANG H.Q., LI Q.Y., 2015. The effect of graphene for the hydrogen evolution reaction in alkaline medium. *International Journal of hydrogen energy*. 41:3786-3793
- KANINSKI M.P.M., MIULOVIC S.M., TASIC G.S., MAKŠIĆ A.D., NIKOLIĆ V.M., 2011. A study on the CoeWactivated Ni electrodes for the hydrogen production from alkaline water electrolysis e Energy saving. *International Journal of hydrogen energy* 36:5227-235

- KARAOSMANOĞLU F., ÇETİNKAYA M., 2002, Türkiye Enerji Profili ve Hidrojen
- KARDAŞ G., SOLMAZ R., YAZICI B., ERBİL M., 2003. Effect of some primary alcohols on hydrogen yield on platinum cathode in chloride solution International Journal of Hydrogen Energy 28 1213 – 1218
- KARDAŞ G., SOLMAZ R., YAZICI B., ERBİL M., 2005. Elektroliz yöntemiyle hidrojen gazı eldesi Ç.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Balcalı-ADANA
- KETTANI M.A., GANSALVES L.M., 1972. Solar Energy, (Vol.14): (No.1), 29-39
- KRÓLIKOWSKI A., WIECKO A., 2002. Impedance studies of hydrogen evolution on Ni-P alloys Electrochimica Acta (Vol.47): (No.13–14), 2065-2069
- KRSTAJIT N., POPOVIC M., GRGUR B., VOJNOVIC M., SEPA D., 2001. On The Kinetics Of The Hydrogen Evolution Reaction On Nickel In Alkaline Solution Part I. The Mechanism. J. Electroanalytical Chemistry, 512: 16–26.
- KUMAR D., KUMAR H.D., 1990. Protection of nitrogenase levels in dark-incubated cultures of Anabaena sp. Strain CA by various carbon sources and restoration of nitrogenase activity by oxygen, Br. Phycol. J, 25:3, 251-256
- KUMAR N., DAS D., 1999. Enhancement of hydrogen production by Enterobacter cloacae IIT-BT 08. Process Biochemistry 35(6):589-593 (Vol.35): (No.6), 589-593
- KUMAR N., DAS D., 2000. Production and purification of alpha-amylase from hydrogen producing Enterobacter cloacae IIT-BT 0. Bioprocess and Biosystems Engineering 23:205-208

- LASZCZYNSKA A. SZCZYGIEL I., 2020. Electrocatalytic activity for the hydrogen evolution of the electrodeposited Co–Ni–Mo, Co–Ni and Co–Mo alloy coatings International Journal of Hydrogen Energy (Vol.45): (No.1), 508-520
- LEWANDOWSKI W.M., 1996. Conventional & Renewable Sources of Energy, Polski Klub, Ekologiczny, Gdansk.
- LODHI M.A.K., O'MONGIAN E., O'TOOLE C.P., 1976. Physics in Industry, New York: Pergamon Press, (Vol.14): (No.6), 379-411
- LODHI M.A.K., 1987. Hydrogen production from renewable sources of energy, Int. J. Hydrogen Energy, 461-468
- MERT, M.E., 2005. Nikel Kaplı Gümüş, Bakır ve Çinko Elektrotlarda Bazik Ortamda Hidrojen Eldesi, Y.L. Tezi.
- MIYAKE, J., VEZIROGLU, T.N., TAKASHASHI, P.K., 1990. Hydrogen energy progress VIII. Proceedings 8th WHEC, Hawaii, Pergamon Press, New York, 755-764.
- MIYAMOTO K., WABLE O., BENEMANN J.R., 1989. Vertical tubular photobioreactor: design and operation, Biotechnol. Lett. (Vol.22): (No.10–11), 979-987
- NETO S.A., MOREIRA THAMYRES F.M., OLIVI P., 2019. Preparation and characterization of active and cost-effective nickel/platinum electrocatalysts for hydrogen evolution electrocatalysis International journal of hydrogen energy 44 8079-8088
- OHTA T., 1988. Photochemical and photoelectrochemical hydrogen production from water, Int. J. Hydrogen Energy, (Vol.13): (No.6), 333-339.
- PANGBORN J.R., SHARER J.C., VEZIROGLU T.N., 1975. Hydrogen Energy, Part A, New York: Plenum. (Vol.1): (No.3), 255-263
- PETRII O.A., TSIRLINA G.A., 1994. Electrocatalytic Activity Prediction For Hydrogen Electrode Reaction. Electrochimica Acta, 39: 1739-1747.

- ROYCHOWDHURY S., 1988. Production of hydrogen by microbial fermentation, Int. J. Hydrogen Energy, (Vol.13): (No.7), 407-410.
- SASIKALA K., RAMANA C.V., RAO P.R., KOVACS K.L., 1993. Anoxygenic phototrophic bacteria: physiology and advances in hydrogen technology, Adv. Appl. Microbiol (Vol.38): 211-295
- SCHALENBACH M., SPECK F. D., LEDENDECKER M., KASIAN O., GOEHL A., MINGERS A. M., BREITBACH B., SPRINGER H., CHEREVKO S., MAYRHOFER K. JJ., 2018. Nickel-molybdenum alloy catalysts for the hydrogen evolution reaction: Activity and stability revised. Electrochimica Acta 259:1154-1161
- SCHALENBACH M., SPECK FLORIAN D., LEDENDECKER M., KASIAN O., GOEHL D., MINGERS ANDREA M., BREITBACH B., SPRINGER H., CHEREVKO S., MAYRHOFER KARL J.J., 2018. Nickel-molybdenum alloy catalysts for the hydrogen evolution reaction: Activity and stability revised Electrochimica Acta (Vol.259) 1154-1161
- SOLMAZ R., 2004. Değişik Metal elektrotlarla Elektrokimyasal Yolla Asidik ve Bazik Ortamlarda Hidrojen Gazı Eldesi, Y.L. Tezi
- SOLMAZ R., DÖNER A., KARDAŞ G., 2009. The stability of hydrogen evolution activity and corrosion behavior of NiCu coatings with long-term electrolysis in alkaline solution international journal of hydrogen energy 34 2089-2094
- SOLMAZ R., DÖNER A., KARDAŞ G., 2010. Preparation, characterization and application of alkaline leached CuNiZn ternary coatings for long-term electrolysis in alkaline solutions. International journal of hydrogen energy 35 : 10045-10049
- SOLMAZ R., DÖNER A., KARDAŞ G., 2010. Preparation, characterization and application of alkaline leached CuNiZn ternary coatings for long-term electrolysis in alkaline solution International Journal of Hydrogen Energy (Vol.35): (No.19), 10045-10049

- SOLMAZ R., DÖNER A., KARDAŞ G., 2010. The stability of hydrogen evolution activity and corrosion behavior of NiCu coatings with long-term electrolysis in alkaline solutions. *International journal of hydrogen energy* 34 : 2089 – 2094
- SOLMAZ R., KARDAŞ G., 2007. Hydrogen evolution and corrosion performance of NiZn coatings. *Energy Conversion and Management*. 48: 583–591
- SOLMAZ R., KARDAŞ G., 2007. Hydrogen evolution and corrosion performance of NiZn coatings *Energy Conversion and Management* 48 583–591
- SOLMAZ R., KARDAŞ G., 2009. Electrochemical deposition and characterization of NiFe coatings as electrocatalytic materials for alkaline water electrolysis. *Electrochimica Acta* 54 : 3726–3734
- SOLMAZ R., KARDAŞ G., 2009. Electrochemical deposition and characterization of NiFe coatings as electrocatalytic materials for alkaline water electrolysis *Electrochimica Acta* 54 3726–3734
- TANISHO S. 1995. Biological hydrogen production by fermentation, *Proceedings of the second International Conference on New Energy Systems & Conv*, Istanbul, 311-316.
- TANISHO S., SUZUKI Y., WAKOO N. 1987. Fermentative hydrogen evolution by *Enterobacter aerogens* strain E.82005, *Int. J. Hydrogen Energy*, (Vol.12): 623-627.
- TANISHO S., WAKAO N., KOKAO Y., 1983. Biological hydrogen production by *enterobacter aerogenes*. (Vol.16): (No.6), 529-530
- TELLİ E., ÖZER D., 2018. Fe-Cu coated nickel mesh usage as cathode catalyst for hydrogen evolution reaction *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 43, Issue 15, 12 April 2018, Pages 7366-7371
- TÜKEN T., YAZICI B., ERBİL M., 2000. Nikotin, Nikotinik Asit ve Nikotinamidin, Demirli Malzemelerin Klorür İçeren Sulu Ortamlardaki Korozyonu Üzerine Etkilerinin Araştırılması, 542.

- ÜNERİ S., 1998. Korozyon ve önlenmesi Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, YayıncıKorozyon Derneği
- VEZİROĞLU T.N., 1987 Hydrogen technology for energy needs of human settlements', Int. J Hydrogen Energy, (Vol.12): (No.2), 99-129.
- VEZİROĞLU T.N., BARBİR F., 1992. Hydrogen: The Wonder Fuel. Int. J. Hydrogen Energy 17: 391
- WANGA F., SUNF Y., HEA Y., LIUA L., XUA J., ZHAOA X., YINE G., ZHANGC L., LIF S., MAOE Q., HUANGA Y., ZHANGA T., LIUC B., 2017. Highly efficient and durable MoNiNC catalyst for hydrogen evolution reaction. Nano Energy 37:1-6
- WILLNER I., WILLNER B.S., 1988. Solar hydrogen production through photobiologicalphotochemical and photoelectrochemical assemblies, Int J. Hydrogen Energy. (Vol.13): (No.10), 593-604.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Gaziantep’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Gaziantep’de tamamladıktan sonra 2009 yılında Erzincan Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü’nde üniversite eğitime başladı. 2011 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü’nde üniversite eğitime başladı. Lisans eğitimini 2016’da mezun oldu. 2017 yılında Çukurova Üniversitesi’nde Fen Bilimleri Enstitüsüne bağlı Kimya Bölümünde Yüksek lisans Eğitime başladı.