

**Cu-Mo ÇÖKTÜRÜLMÜŞ KARBON KEÇE ELEKTROTLARIN
HAZIRLANMASI, KARAKTERİZASYONU VE HİDROJEN
GAZI ÜRETİMİNE KATALİTİK ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Selman BOYLU

Yüksek Lisans Tezi

Kimya Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ramazan SOLMAZ

Nisan 2014

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Cu-Mo ÇÖKTÜRÜLMÜŞ KARBON KEÇE
ELEKTROTLARIN HAZIRLANMASI,
KARAKTERİZASYONU VE HİDROJEN GAZI
ÜRETİMİNE KATALİTİK ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selman BOYLU

Enstitü Anabilim Dalı : Kimya Anabilim Dalı

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ramazan SOLMAZ

Nisan 2014

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Cu-Mo ÇÖKTÜRÜLMÜŞ KARBON KEÇE ELEKTROTLARIN
HAZIRLANMASI, KARAKTERİZASYONU VE HİDROJEN GAZI
ÜRETİMİNE KATALİTİK ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selman BOYLU

Enstitü Anabilim Dalı : KİMYA

Bu tez 07.04.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu (uygun olan kalacak, diğeri silinecektir) ile kabul edilmiştir.

**Doç. Dr.
Ramazan SOLMAZ
Jüri Başkanı**

**Yrd. Doç. Dr.
Mahmut TORAK
Üye**

**Yrd. Doç. Dr.
Ali DÖNER
Üye**

Yukarıdaki sonucu onaylarım

**Doç. Dr. İbrahim Yasin ERDOĞAN
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yapılması için gerekli ortamı sağlayan Bingöl Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü'ne, Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar'ına ve çalışmaların yürütülebilmesi için gerekli maddi desteği sağlayan Bingöl Üniversitesi Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine (Proje No: BAP-52-140-2013) teşekkür ederim.

Tez eğitimim boyunca ilminden faydalandığım, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek edindiğim, yanında çalışmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Ramazan SOLMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her konuda desteklerini gördüğüm laboratuvar arkadaşlarım Sayın Nevzat ÇAĞLAYAN, Sayın Mustafa IŞIK, Bingöl Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Öğretim Elemanları ve SEM-EDX analizlerinde yapmış olduğu katkı dolayısı ile Merkezi Laboratuvar personeline teşekkür ederim.

Son olarak çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarını esirgemeyen anne ve babama, tezin hazırlanması sırasında gösterdikleri sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı eşim Cahide BOYLU ve biricik oğlum Mustafa Arif'e özellikle teşekkürü bir borç bilirim.

Selman BOYLU
Bingöl 2014

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ.....	1
1.1. Enerji.....	2
1.1.1. Yenilenemez Enerji Kaynakları.....	2
1.1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	3
1.2. Dünyanın ve Türkiye'nin Enerji Durumu.....	3
1.3. Alternatif Enerji Kaynakları	9
1.3.1. Hidrojen Enerjisi.....	10
1.3.1.1. Hidrojen.....	11
1.3.1.2. Kullanım Alanları	15
1.3.1.3. Hidrojen Üretimi.....	16
1.3.1.3.(a). Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi.....	16
1.3.1.3.(b). Suyun Elektrolizi.....	17
1.3.1.3.(c). Termokimyasal Yöntem.....	17
1.3.1.3.(d). Güneş-Hidrojen Sistemi.....	17
1.3.1.3.(e). Fotokimyasal Yöntem.....	18
1.3.1.3.(f). Yarı-İletken (Güneş Pili) Sistemler.....	18
1.3.1.3.(g). Foto Biyolojik Sistemler.....	19

1.4. Elektroliz ile Bazik Ortamda Hidrojen Eldesi.....	19
1.4.1. Bazik Ortamda Hidrojen Çıkış Reaksiyonu.....	20
1.5. Karbon Keçe.....	21
1.6. Çalışmanın Amacı.....	22
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	24
MATERYAL VE METOD.....	35
3.1. Materyal.....	35
3.2. Metod.....	36
3.2.1. Çalışma Elektrotlarının Hazırlanması.....	36
3.2.2. Karbon Keçe Yüzeyine Katalizör Çöktürülmesi.....	36
3.2.3. Elektrotların Karakterizasyonu.....	38
3.2.4. Elektrotların Hidrojen Gazı Üretimine Katalitik Etkilerinin Belirlenmesi.....	38
3.2.4.1. Katodik Akım-Potansiyel Eğrileri	38
3.2.4.2. Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi.....	38
3.2.5. Elektrotların Zamanla Kararlılığı.....	39
BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
4.1. C/Cu Elektrotların Hazırlanması ve Hidrojen Gazı Üretimine Katalitik Etkilerinin İncelenmesi.....	40
4.2. C/Mo Elektrotların Hazırlanması ve Hidrojen Gazı Üretimine Katalitik Etkilerinin İncelenmesi	49
4.3. C/MoCu Elektrotların Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Hidrojen Gazı Üretimine Katalitik Etkilerinin İncelenmesi.....	55
4.4. Elektrotun Katalitik Etkisinin Zamanla Kararlılığı.....	62
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	64
KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	72

KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ

C/Cu	: Bakır Çöktürülmüş Karbon Keçe Elektrot
C/Mo	: Molibden Çöktürülmüş Karbon Keçe Elektrot
C/Mo _x Cu _y	: Molibden-Bakır Çöktürülmüş Karbon Keçe Elektrot
EIS	: Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi
EDX	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
HER	: Hidrojen Çıkış Reaksiyonu
ΔG°	: Standart Serberst Enerji Değişimi (kJ/mol)
ΔH°	: Standart Entalpi Değişimi (kJ/mol)
ΔS°	: Standart Entropi Değişimi (J/molK)
E	: Elektrot potansiyeli (V)
i	: Akım Yoğunluğu (mA/g C)
η	: Aşırı gerilim (mV)
t	: Zaman (s)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Dünya Birincil Enerji Arzında Kaynakların Payı (World Energy Outlook IEA 2012)	4
Şekil 1.2.	1990, 2010 ve 2035 Talep Senaryolarına göre Dünya Birincil Enerji Arzı içinde Kaynakların Miktarı (World Energy Outlook IEA 2012)	4
Şekil 1.3.	2011 Yılı Türkiye Birincil Enerji Arzında Kaynakların Payı (URL-2, 2012).....	5
Şekil 1.4.	1990-2011 yılları Türkiye birincil enerji arzında kaynakların miktarı (ETKB, URL-2 2012; Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi enerji raporu 2012).....	5
Şekil 1.5.	1990-2011 yıllarında Türkiye toplam birincil enerji üretimi ve tüketimi (mtep) (Genel Enerji Denge Tabloları ETBK).....	6
Şekil 1.6.	Türkiye birincil enerji üretiminde kaynakların payı (ETKB 2012).	6
Şekil 1.7.	Hidrojenin birincil kaynaklarla ilişkisi (Baykara, 2002).....	11
Şekil 1.8.	Karbon keçenin dış görünüşü (a), eksen yönündeki model (b), grafen düzlem (c), (Kojira ve Kiryu-shi, 1999).....	22
Şekil 4.1.	Kaplanmamış C elektrotun 1000 kat (a) ve 3000 kat (b) büyütülmüş SEM görüntüleri (Gündoğdu, 2011; Çağlayan, 2013).....	40
Şekil 4.2.	25 mA (a, a'), 50 mA (b, b'), 100 mA (c, c'), 150 mA (d, d') ve 200 mA (e, e') akım uygulanarak 0,1 g Cu/1 g C kaplanmış C/Cu elektrotların 1000 kat ve 2 500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri.....	41
Şekil 4.3.	C (○) ve 100 mA uygulanarak 0,1 g Cu çöktürülmüş C/Cu (●) elektrotların katodik akım-potansiyel eğrileri.....	43
Şekil 4.4.	200 mA/g C'da sistemdeki aşırı gerilim (a) ve 200 mV aşırı gerilimde elde edilen akım yoğunluklarının (b) 0,1 g Cu çöktürmek için uygulanan kaplama akımı ile değişimi.....	45

Şekil 4.5.	100 mA akım uygulanak 0,1 g Cu/1g C (a, a'), 0,5 g Cu /1 g C (b, b') ve 1,0 g Cu/1g Cu (c, c') kaplanmış C/Cu elektrotların 1000 kat ve 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri.....	46
Şekil 4.6.	0,1 g (○), 0,5 g (■) ve 1,0 g (Δ) Cu çöktürülmüş C/Cu elektrotların katodik akım-potansiyel (a) ve -200 mV aşırı gerilimde elde edilen Nyquist (b) eğrileri.....	47
Şekil 4.7.	100 mA akım uygulanak 0,1 g Mo/1g C (a, a'), 0,5 g Mo /1 g C (b, b') ve 1,0 g Mo/1g C (c, c') çöktürülmüş C/Mo elektrotların 1000 kat ve 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri.....	49
Şekil 4.8.	0,1 g (○), 0,5 g (■) ve 1,0 g (Δ) Mo çöktürülmüş C/Mo elektrotların katodik akım-potansiyel (a) ve -200 mV aşırı gerilimde elde edilen Nyquist (b) eğrileri.....	50
Şekil 4.9.	25 mA (a, a'), 50 mA (b, b'), 100 mA (c, c'), 150 mA (d, d') ve 200 mA (e, e') akım uygulanarak 0,1 g Mo/1 g C kaplanmış C/Mo elektrotların 1000 kat ve 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri.....	51
Şekil 4.10.	200 mA/g C'da sistemdeki aşırı gerilim (a) ve -200 mV aşırı gerilimde elde edilen akım yoğunluklarının (b) 0,1 g Mo çöktürmek için uygulanan kaplama akımı ile değişimi.....	54
Şekil 4.11.	100 mA akım uygulanak 1,0 g Mo+Cu çöktürülmüş C/MoCu-1 (a, a'), C/MoCu-2 (b, b'), C/MoCu-3 (c, c'), C/MoCu-4 (d, d') ve C/MoCu-5 (e, e') elektrotların 1000 kat ve 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri.....	56
Şekil 4.12.	C/MoCu-5 elektrotu yüzeyinde Cu (a) ve Mo (b) metallerinin dağılımı (EDX haritalama görüntüsü).....	57
Şekil 4.13.	C (●), C/MoCu-1 (◆) ve C/MoCu-2 (○), C/MoCu-3 (□), C/MoCu-4 (■), C/MoCu-5 (▲) elektrotların katodik akım-potansiyel eğrileri...	58
Şekil 4.14.	Şekil 4.14. C/MoCu-1 (●), C/MoCu-3 (□) ve, C/MoCu-5 (Δ) elektrotların -200 mV aşırı gerilimde elde edilen Nyquist eğrileri.....	60
Şekil 4.15.	Volkan eğrisi.....	62
Şekil 4.16	C/MoCu-5 (○) elektrotun başlangıç (○) ve (●) -1,20 V (Ag/AgCl) 24 saat uygulandıktan sonra alınan akım-potansiyel eğrileri.....	63

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Dünya fosil yakıt rezervleri (Enerji Raporu 2000-2001).....	7
Tablo 1.2.	Dünya fosil yakıt rezervlerinin kullanılabilme süreleri (Enerji raporu 2000-2001).....	7
Tablo.1.3.	Fosil yakıtlarının çevreye verdiği zararlı atıklar.....	8
Tablo 1.4.	Hidrojenin genel özellikleri (Çelik V. 2006).....	12
Tablo 1.5.	Hidrojen ve diğer motor yakıtlarının karşılaştırmalı temel özellikleri (URL-7).....	13
Tablo 1.6.	Emniyet faktörüne göre yakıtların sıralanması (URL-7).....	14
Tablo 1.7.	Enerji sistemleri için efektif maliyetler ve ekonomiklik faktörleri (URL-7).....	15
Tablo 4.1.	Farklı akımlarda ve miktarlarda Cu çöktürülmüş C/Cu elektrotların katodik akım-potansiyel eğrilerinden 200 mA/g C katodik akımda elde edilen aşırı gerilimler ($-\eta_{200}$) ve 200 mV katodik aşırı gerilimde elde edilen akım yoğunlukları (i_{200})	44
Tablo 4.2.	Farklı akımlarda ve miktarlarda Mo çöktürülmüş C/Mo elektrotların katodik akım-potansiyel eğrilerinden 200 mA/g C katodik akımda elde edilen aşırı gerilimler ($-\eta_{200}$) ve 200 mV katodik aşırı gerilimde elde edilen akım yoğunlukları (i_{200})	53
Tablo 4.3.	Farklı oranlarda ve miktarlarda Mo ve Cu çöktürülmüş C/MoCu elektrotların elektrokimyasal parametreleri	58

Cu-Mo ÇÖKTÜRÜLMÜŞ KARBON KEÇE ELEKTROTLARIN HAZIRLANMASI, KARAKTERİZASYONU VE HİDROJEN GAZI ÜRETİMİNE KATALİTİK ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada elektroliz sistemindeki aşırı gerilimleri düşürmek ve hidrojen gazı oluşum reaksiyonunu hızını artırmak için büyük yüzey alanına sahip karbon keçenin (C) yüzeyi farklı akımlar uygulanarak farklı miktarlarda Cu ve Mo çöktürülmüştür (C/Cu, C/Mo). Belirlenen uygun çöktürme akımı ve metal miktarında Mo ve Cu farklı oranlarda çöktürülerek elektrotun katalitik etkisi daha da arttırılmaya çalışılmıştır. Elektrotların yüzey yapıları taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenmiş, elektrot yüzeylerinin kimyasal bileşimleri ise enerji dağılımlı X-ray spektroskopisi (EDX) ile belirlenmiştir. Hazırlanan elektrotlar katot olarak kullanılmış ve 1 M KOH çözeltisinde hidrojen gazı üretimine katalitik etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, katodik akım-potansiyel eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi teknikleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Mo ve Cu metallerinin C yüzeyine çöktürülmesi elektrotun hidrojen gazı üretimine katalitik etkisini arttırmaktadır. C yüzeyine Mo ve Cu bir arada çöktürüldüğünde elektrotun katalitik etkisi daha da artmaktadır. MoCu ikili katalizörlerin katalitik etkisi çöktürülen metal oranlarına bağlı olup çalışılan koşullarda en etkin elektrot çöktürme banyosunda Mo ve Cu mol oranının 1:0,1 olduğu (*C/MoCu-5) koşullarda elde edilmiştir. Bu elektrot (*C/MoCu-5) elektroliz sisteminde katot olarak kullanıldığında elektrotun hidrojen oluşumuna katalitik etkisi zamanla hemen hemen sabit kalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen Enerjisi, Elektroliz, Karbon Keçe, Molibden-Bakır Katalizörü.

THE INVESTIGATION OF PREPARATION, CHARACTERIZATION AND CATALYTIC EFFECTS OF Mo-Cu DEPOSITED CARBON FELT ELECTRODES ON HYDROGEN GAS PRODUCTION

ABSTRACT

In this study, Mo and Cu metals with various amounts at different deposition currents were electrochemically deposited over a carbon felt (C) which has high surface area (C/Cu, C/Mo) in order to reduce overpotentials in electrolysis system and increase the rate of hydrogen evolution reaction. In order to enhance catalytic effect of the electrode, MoCu binary coatings with various metal ratios were prepared over the C felt electrode (C/MoCu) at the determined optimum deposition current and total metal amounts. The surface morphologies were investigated by scanning electron microscopy (SEM), and the chemical composition of the surfaces were determined by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The prepared electrodes were used as cathode, and their catalytic activities for hydrogen gas production were investigated in 1 M KOH solution. For this aim, cathodic current-potential and electrochemical impedance spectroscopy measurements were performed. The data obtained showed that, the deposition of Cu and Mo over the C enhances the hydrogen evolution activity of the electrode. The co-deposition of small amount of Mo and Cu could further enhance hydrogen evolution activity of the electrode. The electrocatalytic activity of the binary CoMo catalysts depends on metal ratios of the deposited metals. The *C/MoCu-5 electrode with 1:0.1 (Mo:Cu) metal ratio in the bath solution has the highest hydrogen evolution activity among the studied electrodes. The catalytic activity of this electrode (*C/MoCu-5) nearly remained the same, when this electrode was used in electrolysis system as cathode.

Keywords: Hydrogen Energy, Electrolysis, Carbon Felt, Molybdenum-Copper Catalyst.

1. GİRİŞ

Enerjinin insan hayatındaki önemi tarih boyunca artmaktadır. Çağımızda hızlı teknolojik gelişmeler ile enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün daha da fazla olmaktadır. Teknolojik gelişmeler günlük yaşantımızda kullandığımız birçok araç ve cihaz için enerji kaynakları konusunda arayışları da beraberinde getirmiştir. Enerji, toplumların ekonomik, sosyal ve politik gelişmişliğinin ölçüsüdür. 19. yüzyılda buhar makinesinin icadı ve hemen sonrasında, sanayi devrimi ile uluslararası ilişkilerin de temel belirleyici faktörlerinden olmuştur. Bu sebeple vatandaşlarının refah seviyesini yükseltmek, ekonomik gelirlerini arttırmak ve uluslararası arenada küresel bir güç olmak arzusu ile bütün ülkeler enerji üretimini artırmaya çalışmaktadır.

Çağımızda tüketilen enerji kaynaklarının büyük çoğunluğunu fosil yakıtlar oluşturmaktadır. Fosil yakıtlarının oluşum süreçleri, rezervlerinin sınırlılığı, artan fiyatları, çevreye olumsuz etkileri ve günümüzde artan enerji tüketimi nedeni ile alternatif enerji kaynakları arayışları yoğun bir şekilde devam etmektedir. Mevcut enerji kaynaklarına alternatif olabilecek enerji kaynaklarının ise üretim, ekonomik değer, efektif maliyeti, enerji yoğunluğu, taşınabilirliği, çevreye etkileri ve verimlilikleri bakımından fosil yakıtlara üstün olmaları gerekmektedir. 20. yüzyılda bilim insanlarının yapmış olduğu çalışmalarla fosil yakıtlara alternatif olabilecek birçok enerji kaynağı belirlenmiştir. Bu alternatif enerji kaynakları içerisinde hidrojenin sahip olduğu enerji değeri, efektif maliyeti, ekonomik getirisi, çevreci, taşınabilir ve tamamen zehirsiz bir gaz olması nedeni ile geleceğin enerji taşıyıcısı olarak kabul edilmesine neden olmuştur (Barbir 2008; Sherif vd 2005; Veziroğlu ve Şahin 2008; Midilli vd 2005; Momirlana ve Veziroğlu 2005; Bockris ve Veziroğlu 1983).

Hidrojen ısı kimyasal yöntem, fotokimyasal yöntem, yarı-iletken sistemler ve elektroliz gibi birçok yolla üretilebilir. Bunlar içerisinde en uygun olan yöntem suyun elektrolizidir. Ancak elektroliz sistemindeki maliyeti arttıran aşırı gerilimler bu yöntemin önemli

dezavantajdır. Bu dezavantajın giderilmesi için uygun elektrot ve çalışma ortamları araştırılmaktadır. Elektroliz sistemlerinde genellikle NaOH veya KOH çözeltileri kullanılmaktadır. Kullanılacak elektrotların ise mümkün olduğunca düşük aşırı gerilimli olması gerekmektedir. Son yıllarda geniş yüzey alanına sahip elektrokimyasal aktif ve düşük aşırı gerilimli elektrot geliştirme çalışmaları artarak devam etmektedir.

1.1. Enerji

Yunanca “energeia” kelimesinden gelen enerji, “en” iç ve “ergon” iş kelimelerinden oluşmuştur. Dolayısıyla enerji, içerde oluşan “iç iş” tir. Enerji en basit şekilde iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır (“Energy” Encyclopedia Britannica Vol. 6). Canlı veya cansız herhangi bir maddenin bir noktadan bir başka noktaya hareketi ya da fiziksel, kimyasal olarak bir şekilden başka bir şekle dönüşmesi bir iştir ve enerji kullanımını gerektirir. Enerji, modern insanın gündelik yaşamını sürdürebilmesi için temel gereksinimdir. Sanayileşme çağından önce enerji ihtiyaçları doğada bulunan odun, rüzgâr, su gibi temel kaynaklardan, insan ve hayvanın kas gücünden karşılanırken, sanayi devrimi ile kullanılan enerji kaynaklarını tamamen değiştirmiştir. Enerji kaynakları niteliklerinin değiştirilip değiştirilmemesi açısından ‘birincil’ ve ‘ikincil’ enerji kaynakları olarak sınıflandırılabilir. Birincil enerji kaynakları, doğada buldukları biçimden bir değişikliğe uğramaksızın kullanılabilinen kaynaklardır. İkincil enerji kaynakları ise birincil enerji kaynaklarının belli işlemlerden geçirilmesi ile meydana getirilen enerji kaynaklarıdır (Berberoğlu 1982).

Birincil enerji kaynaklarına kömür, petrol, doğalgaz, nükleer güç, odun, hidrolik güç, güneş, rüzgâr, biyokütle ve jeotermal, ikincil enerji kaynaklarına ise elektrik enerjisi odun kömürü ve havagazı örnek olarak verilebilir. Birleşmiş Milletler ise enerji kaynaklarını ‘Yenilenemez Enerji Kaynakları’ ve ‘Yenilenebilir Enerji Kaynakları’ şeklinde sınıflandırmaktadır.

1.1.1. Yenilenemez Enerji Kaynakları

Günümüzde yenilenemez enerji kaynaklarının toplam enerji üretimindeki oranı %90’ın üstündedir. Enerji tüketiminin fosil yakıtlara dayalı olması ve fosil yakıt yanma

ürünlerinin atmosferdeki miktarlarının artmasından kaynaklanan sera etkisi ile küresel sıcaklığın artışına neden olmaktadır (Ültanır 1998). Doğalgaz ve petrol gibi fosil yakıt kaynaklarının yakın gelecekte tükeneceği öngörülmektedir. Yenilenemez enerji kaynaklarının en yaygın olanları petrol, kömür, doğalgaz ve nükleer enerjidir.

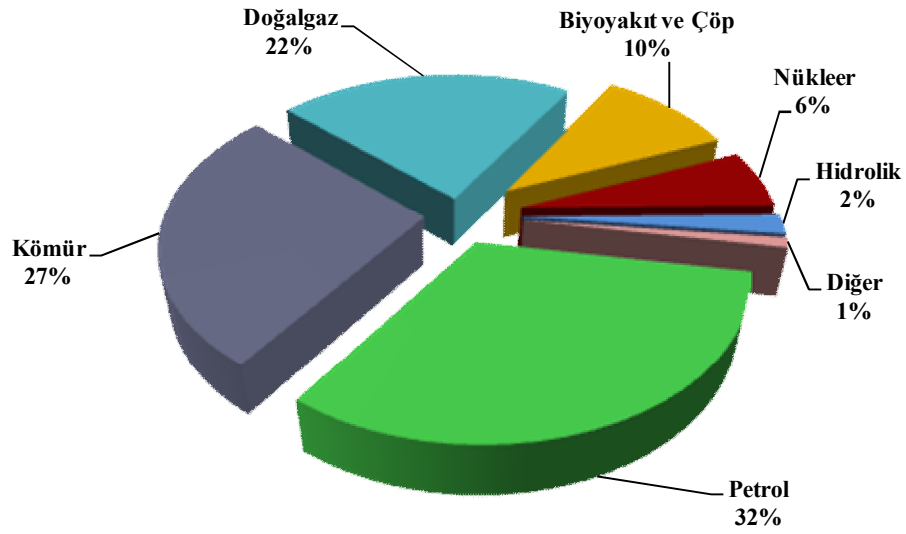
1.1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Genel olarak, yenilenebilir enerji kaynağı enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir şekilde kendini yenileyebilmesi ile tanımlanır (URL-1 22 Temmuz 2013). Yenilenebilir enerji kaynakları yeryüzünde herhangi bir üretime ihtiyaç duymadan temin edilebilen, elektrik enerjisi üretilirken CO₂ emisyonu az bir seviyede gerçekleşen veya hiç olmayan, çevreye zararı ve etkisi konvansiyonel enerji kaynaklarına göre çok daha düşük olan, sürekli bir devinimle yenilenen ve kullanılmaya hazır olarak doğada var olan enerji kaynakları olarak ifade edilir (Çınar 2010). Yenilenebilir enerji kaynakları; rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, biyogaz, hidrojen, dalga, akıntı enerjisi ve gel-git, hidrojen gibi kaynaklardır.

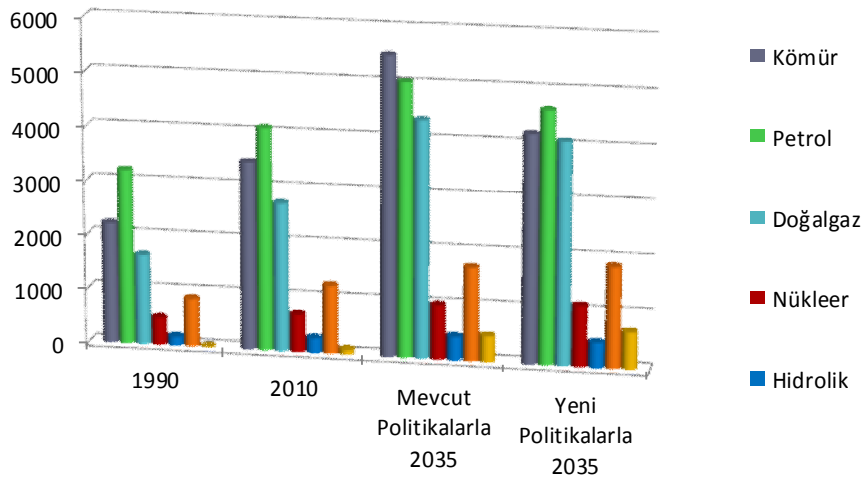
1.2. Dünyanın ve Türkiye'nin Enerji Durumu

Gelişen ve büyüyen toplumlar için günümüzde her ne kadar yeterli enerji kaynağı bulunsa da gelecekte mevcut kaynakların ihtiyacı karşılamayacağı açıktır. Dünya Enerji Konseyi (World Energy Council) Türk Milli Komitesinin 2012 yılında yayınlamış olduğu enerji raporuna göre dünyanın ve Türkiye'nin enerji kaynaklarının dağılımı aşağıda verilmiştir.

2010 yılında dünya birincil enerji arzında petrol %32, kömür %27, doğal gaz % 22 ile toplam arzının % 81'ini oluşturmuştur. Dünya birincil enerji arzı 1990 yılında 8,779 milyon ton eşdeğer petrol (mtep) olan toplam birincil enerji arzı geçen 20 yıl sonra %45 artarak 2010 yılında 12,730 mtep olmuştur. Mevcut politikalara göre, 2035 yılında dünya birincil enerji arzı 2010 yılına göre, %47 artarak 18,676 mtep'e, yeni politikalar senaryosuna göre ise dünya toplam birincil enerji arzı % 35 artışla 17,197 mtep'e yükseleceği tahmin edilmektedir (DEK-TMK Enerji Raporu 2012).

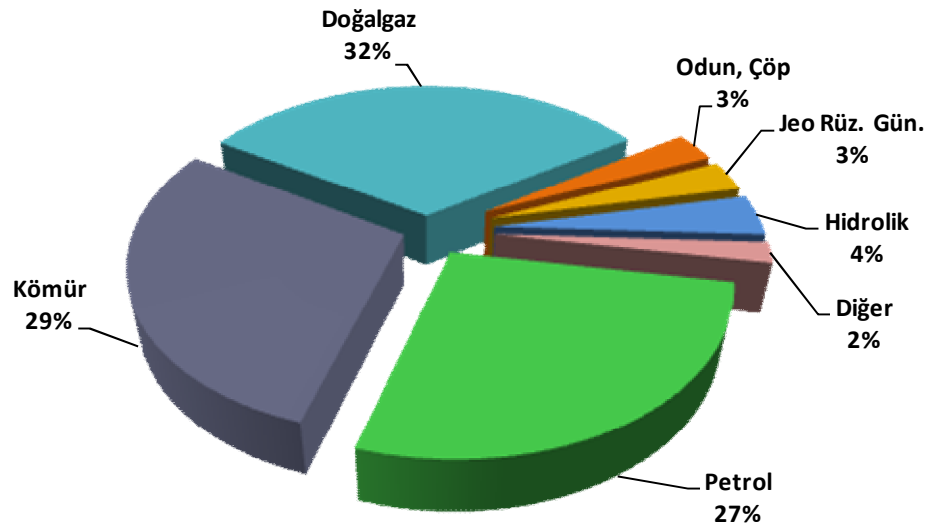


Şekil 1.1. Dünya birincil enerji arzında kaynakların payı (World Energy Outlook IEA 2012)

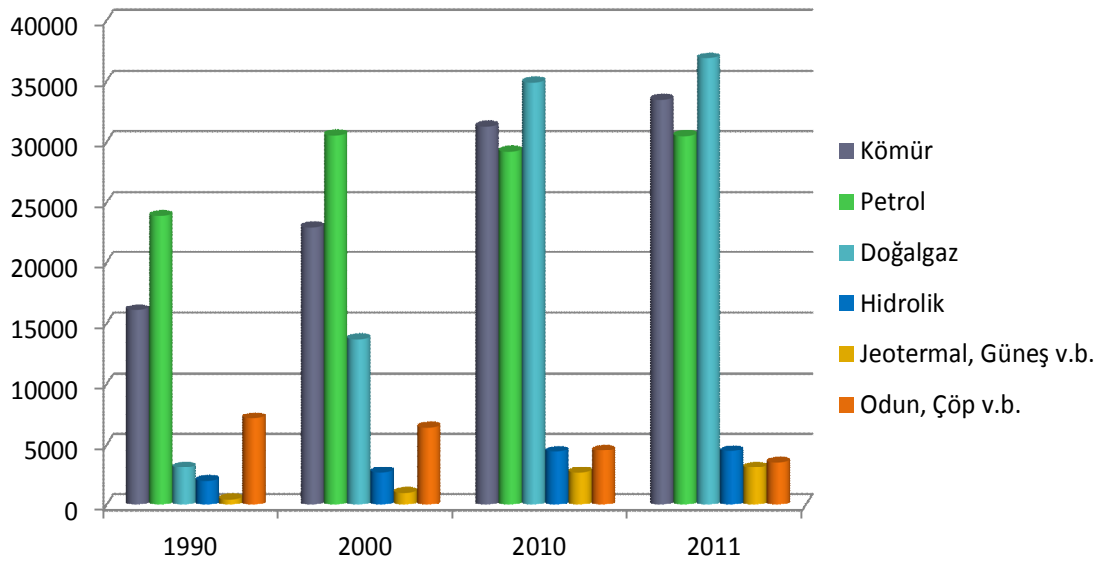


Şekil 1.2. 1990, 2010 ve 2035 Talep senaryolarına göre dünya birincil enerji arzı içinde kaynakların miktarı (World Energy Outlook IEA 2012)

Türkiye'nin 2011 yılındaki toplam birincil enerji arzı 114,5 mtep'dir. Bu arzın kaynaklara dağılımında ilk sırayı 36,9 mtep ve toplam arzın %32 oranı ile doğal gaz alırken bunu 33,5 mtep ve %29 ile kömür, 30,4 mtep ve %27 ile petrol, 4,5 mtep ve %4 ile hidrolik, 3,4 mtep ve %3 ile odun, hayvan ve bitki artıkları ve 2,9 mtep ve % 3 oranı ile jeotermal, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir kaynaklar izlemiştir (DEK-TMK - Enerji Raporu 2012) (Şekil 1.3).

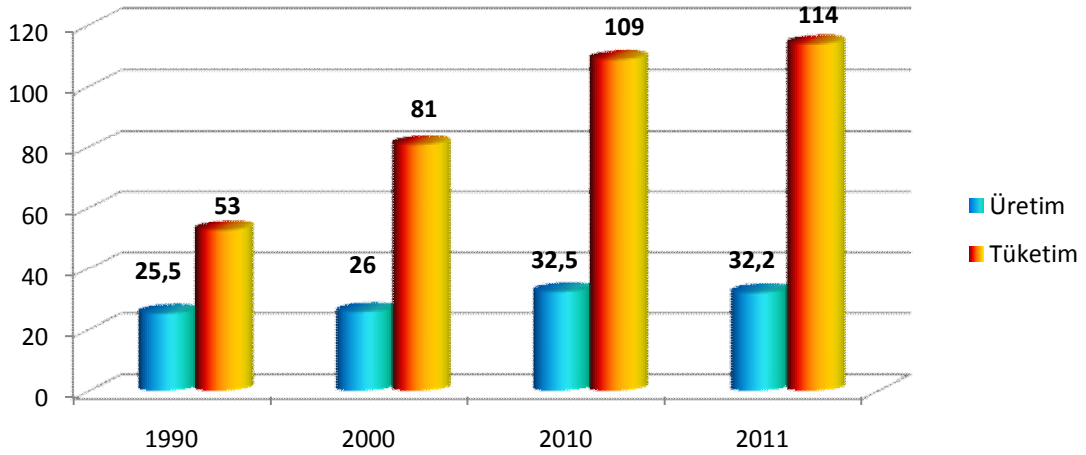


Şekil 1.3. 2011 Yılı Türkiye birincil enerji arzında kaynakların payı (URL-2 2012)

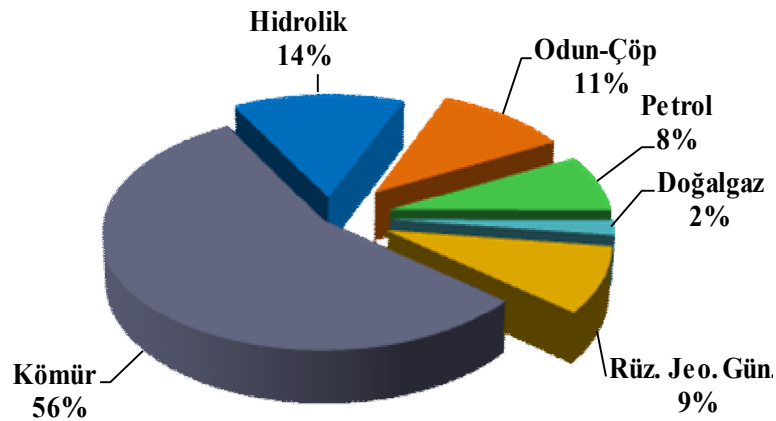


Şekil 1.4. 1990-2011 yılları Türkiye birincil enerji arzında kaynakların miktarı (ETKB, URL-2 2012; Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi enerji raporu 2012)

1990-2011 yılları arasındaki yirmi bir yılda toplam birincil enerji üretimi, %26 oranında artarak 25,5 mtep'ten 32,2 mtep düzeyine yükselmiştir. Bu dönemdeki toplam birincil enerji arzı ise %115 artmıştır. Üretimin toplam birincil enerji arzını karşılama oranı ise



Şekil 1.5. 1990-2011 Yıllarında Türkiye toplam birincil enerji üretimi ve tüketimi (mtep) (Genel enerji denge tabloları ETBK)



Şekil 1.6. Türkiye birincil enerji üretiminde kaynakların payı (ETKB 2012)

1990 yılında %48 iken geçen yirmi bir yılda %28 oranına inmiştir (DEK-TMK - Enerji Raporu 2012) (Şekil 1.5). 2011 yılı toplam Türkiye birincil enerji üretimi 32,2 milyon tep olurken, üretimin 18 milyon tep ve %56 ile yarıdan fazlasını kömür üretimi oluşturmuştur. Kömürü, 4,5 mtep ve %14 oranı ile hidrolik, 3,5 mtep ve %11 ile odun, çöp, hayvan atıkları, 3 milyon tep ve %9 payı ile jeotermal, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları, 2,6 milyon tep ile petrol ve 0,6 milyon tep ile doğal gaz izlemiştir (DEK-TMK - Enerji Raporu 2012) (Şekil 1.6).

Tablo 1.1. Dünya fosil yakıt rezervleri (Enerji Raporu 2000-2001)

Bölgeler	Petrol (Milyar Ton)	Doğal Gaz (Trilyon m ³)	Taş kömürü (Milyar Ton)	Linyit (Milyar Ton)
Kuzey Amerika	8,4	7,3	116,7	139,8
Orta ve Güney Amerika	12,9	6,3	7,8	13,7
Avrupa	2,7	5,1	41,7	80,4
Eski SSCB Ülkeleri	9,0	56,7	97,5	132,7
Ortadoğu	91,5	49,5	0,2	-
Afrika	10,0	11,2	61,2	0,2
Asya ve Okyanusya	5,9	10,3	184,4	107,7
Toplam Dünya	140,4	146,4	509,5	474,7

Tablo 1.2. Dünya fosil yakıt rezervlerinin kullanılabilme süreleri (Enerji raporu 2000-2001)

Bölgeler	Petrol (Yıl)	Doğal Gaz (Yıl)	Kömür (Yıl)
Kuzey Amerika	14	11	239
Orta ve Güney Amerika	38	66	474
Avrupa	8	18	161
Eski SSCB Ülkeleri	24	82	>500
Ortadoğu	87	>100	175
Afrika	28	98	268
Asya ve Okyanusya	16	40	164
Toplam Dünya	41	62	230

İlerleyen teknoloji ve artan enerji ihtiyacı fosil yakıtların her geçen gün daha fazla tüketilmesine ve mevcut fosil kaynakların hızla tükenmesine neden olmaktadır. Yapılan araştırmalar en önemli enerji kaynaklarından olan petrolün 50 yıldan daha az doğal gazın ise yaklaşık 60 yıl kullanılabilme ömrünün kaldığını göstermektedir (DEK-TMK - Enerji Raporu 2012).

1990-2010 dönemindeki gelişmeler dikkate alınarak mevcut politikalara göre 2035 yılında 2010 yılına göre; dünyadaki toplam birincil enerji arzı %47 oranında artacağı

hesaplanırken Türkiye’de toplam birincil enerji arzının %117 artacağı hesaplanmıştır. Bu değerleri dünyanın ilk onunda olmayı hedefleyen bir ülke için son derece olumlu değerler olarak görülse de 1990-2011 yılları arasındaki 21 yıl incelendiğinde enerjide dışa bağımlılığının birincil enerji arzında, %52’den %72’ye yükselmiş olması önemli bir risk oluşturmaktadır (DEK-TMK - Enerji Raporu 2012).

Dünyada enerjinin ana kaynağı olan fosil yakıtlar, yanma reaksiyonları sonucunda karbondioksit (CO₂) ile diğer zararlı gaz emisyonların ortaya çıkması çevre problemlerinin de ana kaynaklardan olmasını sağlamaktadır. Günümüzde en önemli çevre sorunu olan küresel ısınmanın ana nedeni, artan CO₂ emisyonu ile atmosferin sera etkisinin artmasıdır. Bu nedenle CO₂ emisyonunu düşürmek için çeşitli çalışmalar yapılmakla beraber bu sorunun çözümü hala çok uzak görünmektedir (URL-3 10 Temmuz 2013).

Tablo 1.3. Fosil yakıtlarının çevreye verdiği zararlı atıklar (1 tep enerji üretimi için kg olarak)

Atıklar Kaynaklar	CO ₂	SO ₂	CO	NO _x	Partüküller
Kömür	9900	87	1,5	30	-
Petrol	8600	51	1,3	8	0,5
Doğal Gaz	4900	-	-	-	-

Birincil enerji kaynağı olan fosil yakıt rezervlerinin kullanılabilir ömrünün azalması, yakıt fiyatlarının artışı, nüfus artışı, endüstrileşme, ulusal kaynakların değerlendirilmesi zorunluluğu, 21. yüzyılın sosyo-ekonomik yapılanması, mevcut yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkileri (sera etkisi, küresel ısınma, iklim değişiklikleri, yağış anormallikleri, asit yağmurları, sağlık problemleri gibi), yeni enerji teknolojileri kapsamında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gerekliliğinin temellerini oluşturmaktadır. Dünya genelinde, yeni enerji kaynaklarının en uygun şekilde kullanımı ve yeni enerji teknolojilerinin gerekliliği açıkça ortaya konmuş ve ülkeler doğal kaynaklarına, iklim koşullarına ve gelişmişlik düzeylerine bağlı olarak yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı araştırma-uygulama çalışmalarını hızlandırmışlardır (Karaosmanoğlu ve Çetinkaya 2002).

1.3. Alternatif Enerji Kaynakları

Sanayileşme devriminden önce birincil enerji kaynağı olarak kullanılan odunun çevreye olan zararı yok denecek kadar az olmasına rağmen enerji değeri oldukça düşüktür. Bunun yanında odunun elde edilebilmesi için uzun yıllar boyunca ağaçların yetişmesi gerekmektedir. Bu da üretim ve tüketim dengesinin sağlanamamasına neden olur. Odun gibi yel ve su değirmenleri de geçmişte enerji kaynağı olarak kullanılmışlardır. Fosil yakıtların oluşum süreçleri, rezervlerin sınırlılığı ve çevreye etkileri düşünüldüğünde yeni alternatif enerji kaynaklarının bulunması kaçınılmaz bir zorunluluktur. Alternatif enerji kaynakları ile hem artan enerji ihtiyacının karşılanmasına katkı sağlamak hem de fosil yakıtların çevre ve ekonomi üzerinde baskısını azaltmak amaçlanmaktadır. Alternatif enerji kaynakları araştırılırken, bu enerjinin kullanılabilir olması için bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir.

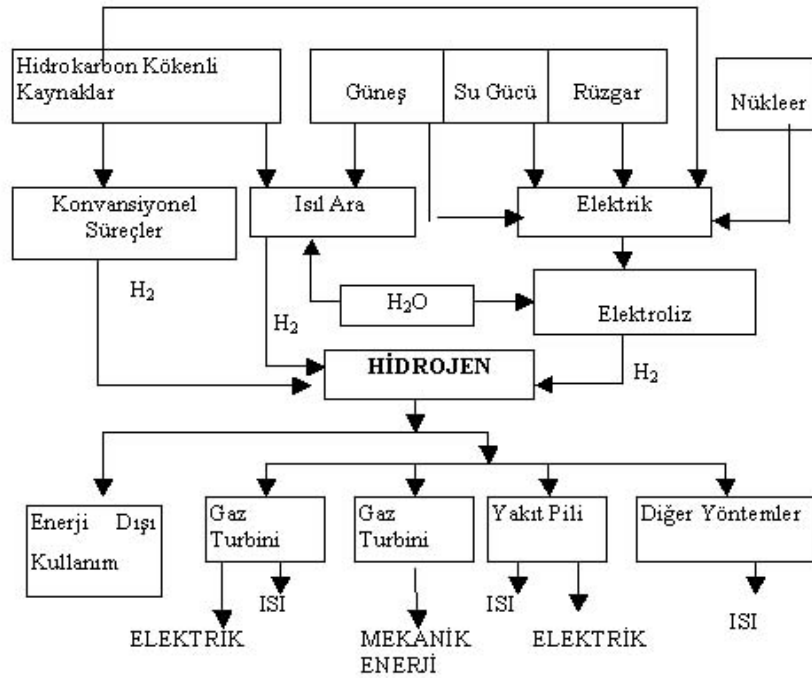
Bir yakıt, enerji olarak kullanılması için ideal olarak aşağıdaki koşulları sağlamalıdır:

- Kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilmeli
- Taşınırken enerji kaybı hiç veya çok az olmalı
- Her yerde, örneğin, sanayide, evlerde, taşıtlarda kullanılabilirmeli
- Depolana bilmeli
- Tükenmez olmalı
- Temiz olmalı
- Birim kütle başına yüksek kalori değerine sahip olmalı
- Değişik şekillerde, örneğin, doğrudan yakarak veya kimyasal yolla kullanılabilirmeli
- Güvenli olmalı
- Isı, elektrik veya mekanik enerjiye kolaylıkla dönüşebilmeli
- Çevreye hiç zarar vermemeli
- Çok hafif olmalı
- Çok yüksek verimle enerji üretebilmeli
- Karbon içermemeli
- Ekonomik olmalıdır (URL-4 12 Temmuz 2013)

Bu özellikleri taşıyan bir yakıtın bulunmasının her ne kadar zor olduğu düşünülse de dünya için en ideal yakıtın bu özelliklere sahip olan bir kaynak olması gerekmektedir. Bu özellikleri taşıyan en ideal yakıt ise hidrojendir. Başta su olmak üzere birçok maddenin Hidrojen kaynağı olarak kullanılabilmesi, taşıdığı enerji değeri ve yanma ürününün sadece su veya su buharı olması hidrojenin çağımızın ve geleceğin en önemli enerji kaynağı olmasını sağlamaktadır.

1.3.1. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen evrende bolca bulunan bir madde olup, tüm maddelerin yaklaşık olarak $\frac{3}{4}$ 'lük bir oranını kapsar. Tüm yıldızlar ve birçok gezegen çok büyük miktarda hidrojen ihtiva eder. Ancak dünya üzerinde serbest olarak dolaşan hidrojen miktarı çok düşüktür. Atmosferde yaklaşık olarak on binde 7 oranında bulunur. Bu yüzden hidrojen üretilmelidir. Hidrojenin yerel kaynakları petrol, kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtlar (C_xH_y), su (H_2O) ve biokütle olarak gösterilebilir (URL-5 15 Temmuz 2013).



Şekil 1.7. Hidrojenin birincil kaynaklarla ilişkisi (Baykara 2002)

Hidrojenden enerji elde etmek için katlanılan çevresel maliyet diğer enerji türleri ile kıyaslandığında neredeyse hiç düzeyindedir. Çıplak maliyet ve çevre zararlarını içeren

maliyetin toplamını oluşturan efektif maliyet hesaplamalarına göre hidrojen bugün için doğal gazdan sonra en ekonomik enerji taşıyıcı olarak görülmektedir. Doğal gazın bugün için oldukça ucuz bir enerji kaynağı olması hidrojenin önüne geçmesine neden olmaktadır (Ültanır 1998).

Sürdürülebilir enerji sistemlerini içeren hidrojen enerjisi sistemleri ile elektrik enerjileri birbirleriyle uyumlu ve tamamlayıcı biçimde, sınırlı doğal kaynakları tüketmeyen ve doğayı kirletmeyen bir döngü oluşturarak çeşitli enerji biçimlerine dönüştürülebilirler. Yakıt hücrelerinde, hidrojen ve doğada bulunan oksijen kullanılarak elektrik enerjisi üretilebilirken; elektrik enerjisi kullanılarak, yani elektroliz yöntemiyle sudan hidrojen elde etmek mümkündür. Açığa çıkan oksijen ise doğaya geri verilir (URL-6 2009).

Dünyanın giderek artan enerji gereksinimini çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek en ileri teknolojinin hidrojen enerji sistemi olduğu günümüzde bütün bilim adamlarınca kabul edilmektedir. Hidrojen enerjisinin insan ve çevre sağlığına olumsuz bir etkisi yoktur. Hidrojen, enerji kaynağı olarak düşünülse de aslında bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen yerel olarak üretimi mümkün, kolay ve güvenli bir şekilde her yere taşınabilen, taşınması sırasında enerji kaybının az olduğu ve her alanda yararlanabileceğimiz bir enerji sistemidir.

1.3.1.1. Hidrojen

Hidrojen ilk olarak 1776 yılında Henry Cavendish tarafından keşfedilmiştir. Yunancada su yapan (idrogono) anlamına gelen hidrojen ismi ise Antoine Lavoisier tarafından verilmiştir. Yıldızlardan yayılan ışıkların analizi sonucunda yıldızların yapısında, güneş sisteminin %90'ında hidrojen olduğu düşünülmektedir.

Kokusuz, renksiz, tatsız, zehirsiz ve saydam bir yapıya sahip olan hidrojen, doğadaki en hafif kimyasal elementtir. Atom ağırlığı 1,00797 g/mol ve atom sayısı 1 olan bu element hafif olması nedeniyle (0°C ve atmosfer şartlarında 1 L hidrojen 0,0898 g'dır) yeryüzünde serbest halde çok az bulunur. Hidrojen sıvılaştırılması oldukça güç olan bir elementtir. Yaklaşık olarak 20 K sıcaklık ve 2 bar basınçta sıvı faza geçer. (Aydemir 1998). Oldukça iyi bir ısıl iletkendir. Hidrojenin genel özellikleri Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1.4. Hidrojenin genel özellikleri (Çelik 2006)

Özellik	Değer	Birimi
Molekül Ağırlığı	2,016	g/mol
Yoğunluğu	0,0838	kg/m ³
Üst Isıl Değer (Kütlesel)	141,9	MJ/kg
Üst Isıl Değer (Hacimsel)	11,89	MJ/m ³
Alt Isıl Değer (Kütlesel)	119,9	MJ/kg
Alt Isıl Değer (Hacimsel)	10,05	MJ/m ³
Kaynama Sıcaklığı	20,3	K
Sıvı Yoğunluğu	70,8	kg/m ³
Kritik Noktadaki Sıcaklık	32,94	K
Kritik Noktadaki Basınç	12,84	Bar
Kritik Noktadaki Yoğunluk	31,40	kg/m ³
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı	858	K
Havada Tutuşma Limitleri	4-75	% Hacimsel
Havadaki Stokiyometrik Karışım	29,53	% Hacimsel
Havadaki Alev Sıcaklığı	2318	K
Difüzyon Katsayısı	0,61	cm ² /s
Özgül Isısı	14,89	KJ/kg K

Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında yarar sağlayacak en önemli özelliklerinden farklı hava hidrokarbon karışım oranları için hava fazlalık katsayısının 0,3-1,7 değerleri arasında tutuşma sağlanabilmekte iken hidrojen için bu sınır 0,15-4,35 değerlerine ulaşmaktadır. Hidrojen-hava karışımlarını ateşlemek için gerekli enerji miktarı da diğer yakıtlara oranla çok düşüktür. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığının oldukça yüksek olması (1 atm basınçta 847-867 K) ve oktan sayısının yüksek olması, hidrojenin dizel motorlardan çok içten yanmalı (Otto ilkesi ile çalışan) motorlar için daha uygun bir yakıt olacağını göstermektedir. Hidrojenin yanması sonucu elde edilen alev hızı da oldukça yüksektir. Bu değer stokiyometrik karışımlar için benzin-hava karışımlarındaki alev hızının yaklaşık dört katı düzeyindedir. Hidrojen diğer mevcut içten yanmalı motor yakıtlarından çok yüksek ısıl değerlere sahiptir (alt ısıl değer 119,9 MJ/kg, üst ısıl değer 141,86 MJ/kg).

Tablo 1.5. Hidrojen ve diğer motor yakıtlarının karşılaştırmalı temel özellikleri (URL-7)

	Yakıt	Kimyasal Formül	Isıl değer (MJ/kg)	Isıl değer (MJ/m ³)	Devindirme fakörü (%)
<i>Sıvı Yakıtlar</i>	Fuel-oil	C _{≤20} H _{≤42}	45,5	38,65	78
	Benzin	C ₅₋₁₀ H ₁₂₋₂₂	47,4	34,85	76
	Jet yakıtı	C ₁₀₋₁₅ H ₂₂₋₃₂	46,5	35,30	75
	LPG	C ₃₋₄ H ₈₋₁₀	48,8	24,40	62
	LNG	~ CH ₄	50,0	~23,0	61
	Metanol	CH ₃ OH	22,3	18,10	23
	Etanol	C ₂ H ₅ OH	29,9	23,60	37
<i>Gaz Yakıtlar</i>	LH ₂	H ₂	141,9	10,10	100
	Doğal gaz	~ CH ₄	~ 50,0	0,040	75
	GH ₂	H ₂	141,9	0,013	100

Günümüzde yakıt seçiminde ölçüt olarak alınan ulaştırma yakıtı olma özelliği, çok yönlü kullanıma uygunluk, kullanım verimi, çevresel uygunluk, emniyet ve maliyet açısından yapılan değerlendirmeler hidrojen lehine sonuç vermektedir (Ültanır 1997). Hidrojen çok amaçlı bir yakıt olup, hava ya da oksijen ile birlikte yakılarak ısıtma amaçlı olarak kullanılabilir. Motor ya da gaz türbiniyle bir jeneratörü tahrik ederek veya yakıt pili olarak kullanılmasıyla yüksek bir verim ile elektrik üretilebilir. Taşıtlarda; basınç altında, sıvı halde ve metal hidrit şeklinde depo edilerek motor yakıtı olarak yararlanılabilir (Anonim 1992).

Hidrojen sahip olduğu birim enerji başına üretilmesi en ucuz sentetik yakıttır. Sentetik yakıt sisteminde 1 GJ'lük enerji 18,65 \$'a mal olurken, solar enerji ile üretilen hidrojen 13,02 \$'a mal olmaktadır (Acaroğlu 1998). Ayrıca çevreyi hemen hemen hiç kirletmez ve sentetik yakıtlar (metanol, amonyak vb.) içerisinde en temiz olanıdır (Veziroğlu 1992). Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir. 1 kg hidrojen 2,1 kg doğal gaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Hidrojenin petrol yakıtlarına göre ortalama 1,33 kat daha verimli bir yakıt olduğu belirtilmektedir.

Yakıtın zehirliliği, yanma ürünlerinin zehirliliği, difüzyon katsayısı, ateşleme enerjisi, patlama enerjisi ve alev emissivitesi gibi faktörlere göre yapılan emniyet değerlendirmesi açısından, hidrojen en güvenli yakıttır. Emniyet faktörü benzinde 0,53 ve metanda 0,80 iken Hidrojenin emniyet faktörü 1 ile en ideal değerdedir. Ayrıca hidrojenin benzin ve metana oranla yanma tehlikesi daha azdır. Dolayısıyla benzin ve doğal gaz hidrojenin yanında tehlikeli yakıtlar olarak değerlendirilir. Emniyet faktörüne göre yakıtların sıralanması Tablo 1.6’da yer almaktadır.

Tablo 1.6. Emniyet faktörüne göre yakıtların sıralanması (URL-7)

Karakteristikler	Benzin	Metan	Hidrojen
Yakıtın zehirliliği	3	2	1
Yanma ürünlerinin zehirliliği (CO, SOx, NOx, HC, PM)	3	2	1
Yoğunluk	3	2	1
Difüzyon katsayısı	3	2	1
Özgül ısı	3	2	1
Ateşleme sınırı	1	2	3
Ateşleme enerjisi	2	1	3
Ateşleme sıcaklığı	3	2	1
Alev sıcaklığı	3	1	2
Patlama enerjisi	3	2	1
Alev emissivitesi	3	2	1
TOPLAM PUAN	30	20	16
Emniyet faktörü	0,53	0,8	1
1: Emniyetli, 2: Az Emniyetli, 3: En Az Emniyetli			

Yakıtların ekonomik kıyaslaması efektif maliyete göre yapılır. Efektif maliyet ise çıplak maliyet ve çevre zararlarını içeren maliyet ile kullanım veriminin fonksiyonudur. İç maliyet de denilen çıplak maliyet, alışlagelmiş görünür maliyettir. Çevre zararlarını içeren dış maliyet ise yeni bir kavramdır. Burada yakıtın birim miktarının çevrede oluşturduğu maddi zarar anlaşılmaktadır. Efektif maliyete göre hesaplanan ekonomiklik faktörü hidrojende 1 iken doğal gaz dışındaki fosil yakıtlarda 0,37-0,61 arasında değişmekte olup, hidrojenden daha az ekonomiktirler. Ancak, doğal gazın ekonomiklik faktörü bugün için hidrojenden yüksektir. Enerji sistemleri için efektif maliyetler ve ekonomiklik faktörler Tablo 1.7’de yer almaktadır. Yukarıda açıklandığı gibi, temelde efektif maliyet önemli olmakla birlikte, günümüzde maliyet karşılaştırmaları, daha çok iç

ya da çıplak maliyetle yapılmaktadır. Dış maliyet, yani çevre maliyeti göz önüne alınmaksızın hidrojen endüstri, konut ve elektrik sektörlerinde doğal gazdan 1,5-3,7, petrol ürünlerinden 1,3-3,5 ve kömürden 4,7-5,8 kat daha pahalı görünmektedir. Ancak, yakıt hidrojenin kütleli üretimi yapılmadığından bu karşılaştırmalar göreceli kalmaktadır.

Tablo 1.7. Enerji sistemleri için efektif maliyetler ve ekonomiklik faktörleri (URL-7)

Enerji sistemi	Yakıt	Efektif maliyet	Ekonomiklik
Fosil yakıt		14,97	
	Benzin	21,4	0,61
	Doğal gaz	11,82	1,1
Kömür/sentetik		18,65	
	Sentetik gaz	34,97	0,37
	Sentetik doğal gaz	24,81	0,52
Güneş-hidrojen		13,02	
	Hidrojen	13,02	1

1.3.1.2. Kullanım Alanları

- i.* Katalitik hidrojenleme;
 - Amonyak sentezi
 - Metil alkol sentezi
 - Bitkisel yağ katılaştırma
 - Yağ asitlerinden alkol eldesi
 - Yapay iplik eldesi
 - İlaç üretimi
- ii.* Yakıt olarak;
 - Kaynak alevi
 - Metal ısı birleşiminde
 - Elektrik üretiminde
 - Roketlerde
- iii.* Metalürjide;
 - İndirgeme maddesi
 - Tungsten ve molibden eldesi
 - Metal hidrürleri hazırlamada

1.3.1.3. Hidrojen Üretimi

Atmosferde yaklaşık olarak 7/10000 oranında bulunan hidrojenin tamamına yakını doğada serbest bir şekilde bulunmayıp bileşikleri halinde bulunmaktadır. Bu nedenle hidrojen doğal bir yakıt olmayıp, her türlü birincil enerji kaynağından yararlanılarak çeşitli hammaddelerden (su, fosil yakıtlar, bitkiler) üretilebilen sentetik bir yakıttır. Günümüzde ilaç üretiminde, bitkisel yağların katılaştırılmasında, roket yakıtlarında kadar çeşitli alanlarda kullanılmakta ve bunun için dünyada her yıl 600 milyar metreküp hidrojen üretilmektedir (URL-8 2010). Birçok kaynaktan üretilebilen hidrojen suyun elektroliziyle üretilmesi en temiz, en sürdürülebilir ve en doğru seçim olarak görülmektedir. Hidrojen üretim yöntemlerinden bazıları şöyledir (Türkmen 2006);

1.3.1.3.(a). Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi

Günümüzde hidrojen üretimi için en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu üretim biçimi iki basamaktan oluşmaktadır.

1. Basamak: Doğal gaz yüksek sıcaklıkta (392°C) buhara tâbî tutularak hidrojen, karbonmonoksit ve karbondioksit elde edilir.
2. Basamak: Karbonmonoksit buhara tâbî tutularak ilâve hidrojen ve karbondioksit elde edilir.

Hidrojen üretmek için en verimli yöntem olup, hidrojen ürün miktarı %70-90 arasındadır. Doğal gazın katalitik buhar ıslahı, petrolün parçalı oksidasyonu, buhar demir işlemi ve kömür gazlaştırılması en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemler dışında, temel amacı hidrojen üretimi olmakla birlikte başka sanayi maddelerinin üretimi sırasında, yan ürün olarak hidrojen elde edilen yöntemler arasında, klor-alkaliden karşıt klor üretimi, ham petrolün rafineri işleminde hafif gazların üretimi, kok fırınlarında kömürden kok üretimi ve margarin sanayinde kimyasal hidrojenasyon işlemleri sayılabilir.

1.3.1.3.(b). Suyun Elektrolizi

Doğru akım kaynağı kullanılarak suyun hidrojen ve oksijene ayrılması yöntemidir. Hidrojen üretimi için en basit yöntem olarak bilinmektedir. Su elektroliz edildiğinde elektrolit içindeki su, katottan çıkan hidrojen ve anottan çıkan oksijene ayrılır. Faraday kanunlarına göre, her bir amper saatte 0,037 g H₂ ve 0,298 g O₂ açığa çıkar. Su elektroliz edildiğinde, normal basınç ve sıcaklıkta, ideal olarak 1,23 V'ta hidrojen ve oksijene ayrılır. Ancak aşırı gerilimden dolayı daha büyük bir potansiyel uygulanmak gerekmektedir.

1.3.1.3.(c). Termokimyasal Yöntem

İyot ya da brom gibi bazı kimyasallar kullanılarak suyun ısı enerjisi ile ayrıştırılması yöntemidir. Bunun için minimum 2500°C sıcaklık gerekmektedir. Bu olayda, tek basamakta termo-kimyasal işlem yerine, birkaç basamaklı işlemler ön görülmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar sonucu, çok basamaklı ısıl kimyasal işlemlerde gerekli sıcaklık 950°C ye kadar indirilmiş, toplam verim ise %50 olarak bulunmuştur. Termo-kimyasal yöntemle ilgili çalışmalar yoğun bir şekilde sürmektedir.

1.3.1.3.(d). Güneş-Hidrojen Sistemi

Hidrojenin güneş enerjisinden yararlanılarak üretilmesi, sınırlı doğal kaynakları tüketmeyen ve doğayı kirletmeyen bir döngü oluşturacağı için hem çevre açısından hem de ekonomik açıdan büyük bir üstünlük sağlamaktadır. Sınırlı rezervler olan fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükeneceği gerçeği de göz önüne alındığında, son yıllarda çalışmalar güneş-hidrojen sistemi üzerinde yoğunlaşmıştır. Güneş-Hidrojen sistemi son derece temiz ve güvenli bir enerji üretim yoludur.

Güneş enerjisinden faydalı şekilde yararlanma, ısıl (termal) ve foton salma olarak iki kısma ayrılabilir. Isıl işlemde, güneş enerjisi öncelikle ısıya çevrilir. Bu ısı enerjisinden yararlanılır veya enerji değişik çevrimleri ile mekanik ya da elektrik enerjisine dönüştürülür. Diğer bir seçenek de, bu enerjiyi çeşitli şekilde depolamadır. Foton salma işleminde ise, fotonlar bir yutucu madde tarafından doğrudan soğurulur. Bu soğurucu

maddeler foton enerjisinin bir kısmını ya doğrudan elektrik enerjisine çevirir veya suyu hidrojen ve oksijenlerine ayrıştırır. Güneş enerjisi fotonlarının başka bir çevrimi de, fotosentez ile biyokütle oluşumudur. Burada önce foton enerjisinden hidrojen eldesi ve bunun enerji kaynağı olarak kullanımındaki kuramsal ve deneysel verimleri incelemek gerekir. Bütün çevrim işlemlerinde olduğu gibi, güneş enerjisinde hidrojen üretimi için de, yüksek verim sağlayabilmek maliyeti düşüreceğinden, bu konuda sınırlamalar ve kayıpların neler olduğunu iyi bilmek önem taşımaktadır.

1.3.1.3.(e). Fotokimyasal Yöntem

Bu yöntemde ışık soğurucu yarı-iletkenler kullanılır. Bu yarı iletkenin anot veya katodu, ya da her ikisi birden elektrokimyasal hücrenin içine yerleştirilebilir. Burada, su hidrojen ve oksijenlerine ayrıştırılırken, yüksek sıcaklık veya elektriğe gerek olmadan, doğrudan güneş enerjisinin mor ötesi (UV) bölgesi kullanılmaktadır. Güneşten gelen UV ışınlarını suyun doğrudan ayrıştırılması için yeterli enerjiye sahiptirler, ancak bunların çoğu atmosferdeki ozon tabakası tarafından tutulduklarından çok az bir kısmı dünyaya ulaşabilmektedir. Normalde tüm canlılar için oldukça zararlı olan UV ışınlarının, incelen ozon tabakasından daha çok miktarda geçmesi, fotokimyasal yöntem için verimi artırıcı bir etki olmasına rağmen dünyamız için ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Fakat fotokimyasal yöntem için UV ışınlarının güçlendirilmesi veya su tarafından soğrulmasının arttırılması gerekmektedir. Bunun için, güneş ışınlarını yoğunlaştırıcı bir takım düzenekler ile su içerisine bazı mineral ve metaller ilave edilerek UV etkisi arttırılmaktadır.

1.3.1.3.(f). Yarıiletken (Güneş Pili) Sistemler

Güneş pilleri (fotovoltaik piller), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Güç çıkışını arttırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül (güneş paneli) adı verilir. Bu paneller birçok fotovoltaik hücreden meydana gelip bazen tek başlarına, bazen de diğer alışla gelmiş kaynaklarla benzer kullanılabilirler. Bu

sistemlerde hidrojen üretimi iki basamaklı olarak gerçekleştirilir. Burada ilk basamakta, genelde silisyum, galyum arsenit ve kadmiyum tellür gibi maddelerden yapılan güneş pili aracılığı ile DC elektrik akımı elde edilir. Daha sonra bu akım, bir elektroliz hücresinin elektrotlarına verilerek suyun oksijen ve hidrojenlerine ayrıştırılmaları gerçekleştirilir.

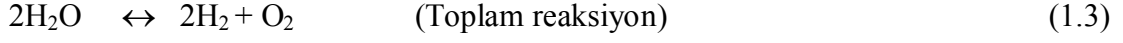
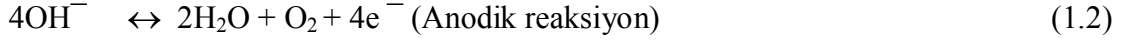
1.3.1.3.(g). Foto Biyolojik Sistemler

Fotosentetik organizmalar, güneş enerjisini çok büyük miktarlarda depolayan bir enerji depolama mekanizması oluşturmuşlardır. Normal olarak, fotosentetik sistemler karbondioksiti karbonhidratlara indirger fakat doğrudan hidrojen vermezler. Fotosentetik bakteriler, foto fermantasyonlarından sonra ortama uygun organik bileşikler verildiğinde ve oksijensiz ortamda büyütüldüklerinde hidrojen üretebilmektedirler. Bugüne kadar H_2/O_2 üretebilen en verimli foto biyolojik sistemlerin, yeşil alg ve ciyano-bakteria gibi algler olduğu anlaşılmıştır (Koyunoğlu vd 2004).

1.4. Elektroliz İle Bazık Ortamda Hidrojen Eldesi

Hidrojen elde etme yöntemlerinden birisi olan suyun elektrolizinde yüksek saflıkta ve temiz hidrojen gazı üretilmektedir. Suyun elektrolizi sırasında çok fazla elektrik enerjisi harcanması, katalitik etkinliği yüksek materyaller üzerinde araştırma yapılmasını gündeme getirmiştir. Volkan eğrisinden de görüldüğü gibi (Şekil 4.15.) Pt, Pd gibi elementler çok yüksek katalitik etkinliğe sahip olmasının yanında fiyatlarının yüksek olması nedeniyle elektrolizde pek kullanılmamaktadır. Bunun yerine bu elementlerin eser miktarları ile diğer metallerin alaşımları oluşturularak elektrolizde kullanılmaktadır. Katalizör olarak kullanılan metal/alaşımlar, asidik veya bazık ortamlarda hidrojen gazı eldesinde kullanılırlar. Suyun elektroliziyle hidrojen eldesi, hidrojen çıkış reaksiyonu (HER) olarak adlandırılıp birden fazla ara basamaklardan oluşmaktadır. Hidrojen çıkış reaksiyonu (HER) en çok araştırılan elektrokimyasal reaksiyonlardan bir tanesi olup, 18. yüzyıldan beri bilinmektedir. HER, asidik ortamda ve bazık ortamda, ortamda bulunan türlerin farklılaşması nedeniyle farklılık göstermektedir. Suyun elektroliziyle katotta $H_{2(g)}$, anotta $O_{2(g)}$ çıkmaktadır (Krstajit vd 2001).

1.4.1. Bazik Ortamda Hidrojen Çıkış Reaksiyonu



Bazik çözeltilerde 1.1 ve 1.2 reaksiyonlarının standart potansiyelleri 25°C'de normal hidrojen elektrotuna karşı sırasıyla $E^0_{\text{H}_2\text{O}} = -0,828 \text{ V}$, $E^0_{\text{O}_2} = 0,402 \text{ V}$ 'tur.

Bu durumda toplam reaksiyonun tersinir potansiyeli

$E_{\text{tr}} = 1,229 \text{ V}$ olur. 25°C de $\Delta G^\circ = -nFE^\circ$ den

$$\Delta G^\circ = -2F(-E_{\text{tr}}) = 237,2 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ değerine sahiptir.} \quad (1.4)$$

$$\Delta G^\circ = 237,178 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (1.5)$$

$$\Delta H^\circ = 285,83 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (1.6)$$

$$\Delta S^\circ = 163,18 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ (1 mol H için)} \quad (1.7)$$

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. Sadece elektrik enerjisi uygulandığında $\Delta H^\circ = 285,83 \text{ kJ mol}^{-1}$ iken $E^{0, \text{en}}_{\text{H}_2\text{O}} = 1,481 \text{ V}$ ($E^{0, \text{en}}_{\text{H}_2\text{O}}$: Entalpik elektroliz potansiyeli) olur ve su izotermal olarak elektroliz olur. Suyun elektrolizi için gerekli potansiyel (1,481 V) termodinamik olarak hesaplanan potansiyelden (1,229 V) daha büyüktür (Ananthachar vd 2004).

Bu durum aşağıdaki denklemlerle açıklanır.

$$E = E^{\text{tn}}_{\text{H}_2\text{O}} + \eta_a + \eta_k + iR \quad (1.8)$$

η_a ve η_k sırasıyla anodik ve katodik aşırı gerilimleridir. i devreden geçen akım, R ise çözeltinin ve elektrotların elektriksel direncini göstermektedir ($E^{\text{tn}}_{\text{H}_2\text{O}}$: Suyun termonötral elektroliz potansiyeli). Yani sistemde bulunan aşırı gerilimler, çözelti ve elektrotların direnci, uygulanması gereken potansiyeli arttırmaktadır. Elektrolizde amaç aşırı

gerilimleri düşürmektir. Bunun için yüksek performanstaki elektrotların kullanımı ile bu sorunu ortadan kaldırmak gerekir. Elektrot potansiyelini arttırmak için 2 yol vardır:

1. Yüksek akım yoğunluğu ile karakterize edilen elektrot materyallerinin kullanımı.
2. Gerçek yüzey alanı ile karakterize edilen elektrot materyallerinin kullanımı.

Elektrotlar çoğunlukla Tafel parametreleriyle karakterize edilirler. Bunlar yük değişimi akım yoğunluğu (j) ve Tafel eğimi (b)' dir. Tüm aktif elektrotlar için j değeri en büyük ve b değeri en küçük olması istenir.

1.5. Karbon Keçe

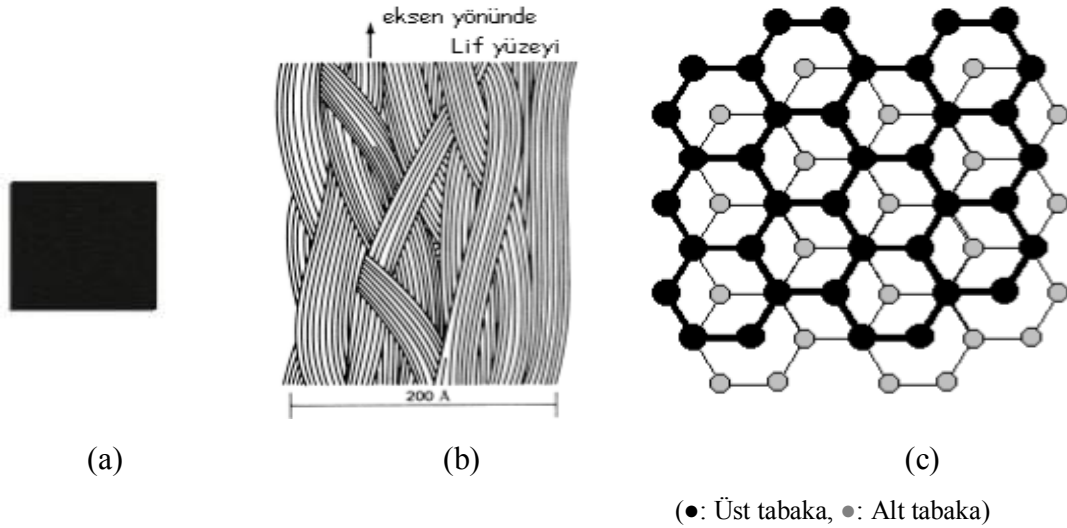
Performans ve fiyat oranının değişimi ile karbon lifleri hızla kompozit materyallerde kullanılan metallerin yerini almaya başlamıştır. Daha hafif, dayanıklı ve daha etkili ticari ürün olan karbon liflerin kompozisyonları artık sadece uzay araçlarında değil otomotiv, inşaat ve kağıt endüstrisi gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

Karbon liflerinin üretiminde, organik kökenli hammaddelerin ısıtılması sonucu karbon dışındaki diğer atomlar uzaklaşmakta böylece karbon atomlarından oluşmuş filamentler elde edilmektedir. Bu filamentlerin kristalizasyonundan sonra yüksek mukavemetli lifler elde edilmektedir. Karbon liflerinin yoğunluğu kullanılan hammadde ve işlem sıcaklığına bağlı olarak 1,6-2,2 g/cm³ arasında değişiklik göstermektedir. Karbon lif üretiminde kullanılan hammadde yoğunluğu 1,14-1,19 g/cm³ arasında değişmektedir. Elde edilen lif modülündeki artış grafitizasyon sıcaklığının artışı ile artmaktadır. Karbon liflerinden yapılmış kompozitler 1020 çelik konstrüksiyonlarda 5 kat daha dayanıklı ve 1/5 ağırlığındadır. Aynı şekilde 6061 alüminyum konstrüksiyonlarda 7 kat daha dayanıklı iken, 2 kat daha sert ve 1,5 kat daha hafiftir. Karbon liflerinin yorulma davranışı bilinen tüm metallerden daha iyidir. Uygun reçine ile kaplandığı zaman elde edilen kompozitin korozyona karşı dayanımı iyi olmaktadır. Katran esaslı karbon liflerinin elektriksel iletkenliği bakırdan 3 kat daha fazladır.

Karbon lifleri kolaylıkla erimedikleri için yüksek sıcaklıkların olduğu uçak frenlerinde ve roketlerde kullanılmaktadır. Her bir kristalit, çoklu tabakadan oluşmaktadır. Her bir

tabaka, grafen tabaka olarak isimlendirilen hegzagonal yapı şeklinde düzenlenmiş karbon atomlarından meydana gelmektedir.

Tabaka içindeki güçlü C-C bağları life, yüksek dayanım ve sertlik verirken, tabakalar arasındaki zayıf van der Waals bağları kayma direncinin artmasına sebep olurken, ısı ve elektrik iletkenliğinin yüksek olmasına neden olmaktadır. Kiristalitlerin kalınlığı ve uzunluğu karbon liflerinin elektriksel, ısıl özelliklerini ve modülünü etkilemektedir. Daha büyük ve daha oryante olmuş grafen düzlemi daha yüksek termal ve elektriksel iletkenlik sağlamaktadır. Mikro yapının oryantasyonu plastik deformasyon veya ısıl işlemleri ile değiştirilebilmektedir.



Şekil.1.8. Karbon keçenin dış görünüşü (a), eksen yönündeki model (b), grafen düzlem (c), (Kojira ve Kiryu-shi 1999)

Yoğunluğu $0,05-0,2 \text{ g/cm}^3$, ısı iletkenliği 20°C 'de $6,10-5-3,10-4 \text{ W/m K}$ olan karbon keçeleri ısı izolasyon maddesi olarak kullanılmaktadırlar. Karbon kumaşlar elektrik fırınlarında $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'a kadar elektrik izolasyonunda kullanılmaktadır (Karcı 2010).

1.6. Çalışmanın Amacı

Enerji, insan hayatının devamı ve her geçen gün artan ihtiyaçlarının karşılanması için vazgeçilmez unsurdur. Çağımızda artan enerji tüketimi sınırlı rezerve sahip, çevreye olumsuz etkileri olan ve her geçen gün artan fiyatı ile sadece fosil yakıtlardan karşılanamayacağı açıktır. Bu nedenle sonsuz rezerve sahip, çevreye zarar vermeyen,

ekonomik ve enerji değeri yüksek alternatif enerji kaynaklarının bulunması bir zorunluluktur. Bilim insanları bu özelliklere uygun olan enerji kaynağı olarak güneş-hidrojen sisteminin olacağını belirtmektedir (Veziroğlu ve Barbir 1992; Barbir vd 1990). Doğada serbest halde bulunmayan hidrojenin eldesi için birçok üretim yöntemi bulunmasına rağmen suyun elektrolizi yöntemi ile üretilmesi en uygun olanıdır. Fakat suyun elektrolizi yönteminde, anot, katot ve çözeltide oluşan aşırı gerilimler elektroliz sisteminde verimi azaltmakta ve daha fazla elektrik enerjisi harcanmasına neden olmaktadır. Bu dezavantajın giderilmesi için uygun elektrot ve elektrolit belirleme çalışmaları yapılmaktadır. Platin grubu metallerin hidrojen gazı çıkışını en iyi katalizlediği bilinmektedir (Yazici vd 1995). Fakat platinin pahalı bir metal olması, katalizör olarak kullanılmasında yöntemin maliyetinin artmasına neden olacaktır. Ayrıca elektrotların yüzey alanı elektrotun etkinliğini belirleyen önemli etkenlerdendir. Bu nedenle karbon keçenin yüzey alanı oldukça büyük olması bu malzemenin kullanılması için iyi bir nedendir. Fakat karbon keçe hidrojen gazı oluşumu için yeterli etkinliğe sahip değildir. Elektrotun etkinliğini arttırmak için karbon keçe üzerine hidrojen gazı çıkışı sağlayacak yüksek katalitik etkinliğe sahip metaller çok az miktarlarda çöktürülebilir.

Bu çalışmada, yüksek yüzey alanına sahip karbon keçe (C) zerine farklı miktarlarda ve çöktürme akımlarında Cu ve Mo metalleri, farklı metal oranlarında ve miktarlarda Cu ve Mo metalleri bir arada elektrokimyasal olarak çöktürülmüştür. Hazırlanan elektrotların hidrojen gazı çıkışına katalitik etkisi 1 M KOH çözeltisinde, oda sıcaklığında elektrokimyasal yöntemlerle araştırılmıştır. Çalışmada elektroliz ile hidrojen gazı eldesi için aşırı gerilimi düşük, elektrokatalitik etkisi yüksek, maliyet olarak ucuz ve zamanla kararlı elektrot hazırlanması amaçlanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Burchardt (2000), Ni plakalar üzerine elektrokimyasal olarak çöktürülmüş NiP_x alaşımları üzerinde hidrojen çıkışı reaksiyonunu incelemiştir. Çöktürme potansiyeli değiştirilerek % 15-27 oranında P içeren kaplamalar elde edilmiştir. Elektrotların etkinliğinin 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 kalınlıklarda kaplamalar elde edilmiş, kaplama kalınlığının artması ile etkinliğin arttığı bulunmuştur. Elde edilen kaplamalarda adsorplanan hidrojen miktarı belirlenmiş ve adsorplanmış hidrojen miktarındaki değişimin yaklaşık olarak katalitik etkinlikteki değişime eşit olduğu belirlenmiş, en aktif elektrodun aynı zamanda en fazla hidrojen adsorplayan elektrot olduğu bulunmuştur. Adsorplanmış 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.

Krstajic vd (2001), bazik ortamda nikel elektrot üzerinde hidrojen çıkış reaksiyonun (HER) mekanizmasını araştırmışlardır. Bunun için Tafel eğrileri ve impedans spektroskopisi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün potansiyel bölgelerinde daha baskın olan V basamağını birbirine paralel olan H ve T basamakları izler. $-0,95 > E > -1,1V$ potansiyel bölgesinde V basamağını H basamağı ile birlikte meydana gelen T basamağı daha baskın bir şekilde takip eder. Yani burada meydana gelen H basamağı önemsizdir. Bu potansiyel bölgelerinde hız belirleyici basamak Tafel basamağıdır. $-1,2 > E > -1,4 V$ potansiyel bölgelerinde Volmer basamağını Tafel basamağı ile birlikte

meydana gelen H basamağı daha baskın bir şekilde takip eder. Burada hız belirleyici basamak H basamağı olup tam bir kaplama sahiptir. Yani burada meydana gelen T basamağı önemsizdir.

Krolikowski ve Wiecko (2002), elektrokimyasal olarak çöktürülmüş % 7, 20 ve 28 oranında P içeren Ni-P alaşımlarında potansiyodinamik, potansiyostatik ve impedans yöntemleri ile 0,1 M H₂SO₄ çözeltisinde hidrojen çıkış reaksiyonunu, (HER) incelemiştir. Hidrojen çıkış reaksiyonunun kinetik parametreleri 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 alaşımları anodik olarak polarize edilmiş ve bu alaşımlar için HER'de belirgin bir artış gözlemlenmiştir. 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.

Kardaş vd (2003), platin elektrotta 0,1 M NaCl + 1 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 V potansiyel altında birincil alkollerin hidrojen gazı çıkışına etkisini incelemiştir. Alkollü 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 belirlemiştir. Böyle bir sistem için 25°C'de hidrojen üretiminin daha ekonomik olduğu önerilmiştir.

Gürten vd (2003), elektroliz yöntemi ile 0,01 M NaCl ve değişik konsantrasyonlarda primer alkoller içeren çözeltilerde gümüşün katodik davranışlarını incelemiştir. Pt ve Ag elektrotlar arasındaki teorik ve deneysel ayrışma gerilimi değerlerini belirlemiştir. Sisteme sabit 5,0 ve 10,0 V sabit potansiyel uygulayarak Ag katot yüzeyinde açığa çıkan hidrojen gazı hacimlerini ayrıca belirlemiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre NaCl çözeltisi içerisine alkol ilavesinin anodik aşırı gerilimi düşürdüğünü ve hidrojen verimini arttırdığını belirlemiştir.

Turonova ve Galova (2003), Fe elektrotu üzerine elektrokimyasal olarak Ni-Cu kaplamışlar. Cu, Ni, Ni-Cu elektrotlarının akım veriminin incelemişler. Akım verimine sodyum sitrat oranının nasıl etkilediğini araştırmışlar. Buna göre Ni-Cu elektrotuna ait akım verimi en iyi olmakla birlikte sodyum sitrat miktarı arttıkça akım verimi de artmaktadır.

Solmaz (2004), bu çalışmada, çıplak ve nikel kaplı gümüş, pirinç ve değişik metal bileşimlerine sahip çelik elektrotlarda asidik ve bazik ortamlarda 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 5 V potansiyel uygulanarak katotta açığa çıkan hidrojen gazı hacimleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlardan, nikel kaplı elektrotlarda hidrojen aşırı geriliminin düştüğü belirlenmiştir.

Crnkovic vd (2004), yumuşak çelik elektrot üzerine kaplanmış Ni-Fe-Mo-Zn alaşımının 6 M KOH içerisinde hidrojen gazı çıkışını incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları elektrotu iki yolla hazırlamışlardır. Birincisinde 10 dk boyunca 4 metali de bir arada kaplamış ve daha sonra elektrot % 28 KOH içerisinde 80°C'de 4 saat boyunca tutularak yüzeydeki Zn metali uzaklaştırılıp elektrotun yüzey alanı arttırılmıştır (tip a). İkincisinde ise Zn dışındaki 3 metal 60 dk kaplandıktan sonra üzerine Zn'yu da içeren 4 metal kaplanmış ve aynı şekilde yüzeydeki Zn uzaklaştırılmıştır (tip b). Elde ettikleri sonuçlara göre her iki elektrotta da HER için oldukça yüksek etkinlik göstermektedir Buna karşın tip b elektrotu daha yüksek etkinlik göstermekte ve zamanla daha kararlı olmaktadır.

Supicova vd (2005), demir yüzeyine Ni-Cu ikili kaplamasını yapmışlar ve kaplama koşullarını ve akım verimini araştırmışlar. %95 Cu içerikli kaplamaların daha kaliteli ve daha dayanıklı olduğunu ve sodyum sitrat eklenmesiyle bakıra ait standart potansiyeli daha negatife kaydırarak daha yüksek kalitede kaplamalar elde etmişlerdir. Artan akım şiddetiyle kaplama esnasında akım verimi azalmaktadır.

Navarro-Flores vd (2005), bakır üzerine elektrokimyasal olarak kaplanmış Ni, NiMo, NiW ve NiFe kaplamalarının sülfürik asit içerisinde Tafel ve impedans tekniklerini

kullanarak hidrojen gazı çıkışını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre Ni'in Fe, Mo ve W ile alaşım haline getirildiğinde hidrojen gazı eldesi için sadece nikel kullanıldığı duruma göre daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Bu sonucu, kaplanan metallerin elektrokatalitik etkinlikleri ve elektrotların daha geniş yüzey alanlarından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Çalışılan elektrotlar içerisinde Ni_{7,3}Mo elektrodu daha gözenekli olmasından dolayı en yüksek elektrokatalitik etkinliğe sahiptir. Elektrokatalitik etkinliği yüksek katalizörler geçiş metallerinin sağındaki ve solundaki grupların alaşım haline getirilerek elde edilebileceğini göstermişlerdir.

Solmaz vd (2005), 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 vd (2005), yumuşak çelik (YÇ), ince nikel filmi ve bu filmin üzerine kobalt-çinko kaplanmış yumuşak çelik elektrotlarda (YÇ/Ni/CoZn) 1 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.

Kardaş vd (2006), ince Co filmi kaplanmış yumuşak çelik (YÇ/Co), ince kobalt filmi ve bu filmin üzerine kobalt-çinko kaplanmış yumuşak çelik elektrotlarda (YÇ/Co/CoZn) hidrojen gazı eldesi araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar ince kobalt kaplanmış yumuşak çeliğin yüzeyine CoZn ile kaplandıktan sonra yüzeydeki daha aktif çinko metlinin çözünmesiyle elde edilen YÇ/Co/CoZn elektrotunun hidrojen gazı eldesi için etkinliğini oldukça arttığını ve elektroliz sisteminde kullanıldığında sistemdeki aşırı gerilimini düşürdüğünü göstermiştir.

Solmaz ve Kardaş (2007), bu çalışmada B (pirinç), B/NiZn, B/Ni/NiZn elektrotlarını kullanarak 1 M KOH çözeltisinde elektroliz yöntemi kullanılarak katodik polarizasyon eğrileri ve impedans ölçümleri elde edilmiş, buna bağlı olarak hidrojen çıkışı reaksiyonu (HER) incelenmiştir. Uzun süren testlerde bu alaşımların elektrokatalitik aktivitesi ve korozyon performansı belirlenmiş olup, elde edilen sonuçlara göre (leaching) uzaklaştırma yapılan elektrotlarda özellikle B/Ni/NiZn elektrodunun diğer elektrotlara göre daha düşük aşırı gerilime, HER için daha iyi elektrokatalitik aktiviteye ve korozyona karşı daha iyi korumaya sahip olduğu bulunmuştur.

Cho ve Kwon (2007), ince Cu levha üzerine Co ve Co-P kaplanarak % 1'lik NaOH, % 10'luk NaBH₄ çözeltisinde HER ve katodik akım yoğunluğunu araştırmışlar ve ayrıca banyo kaplama süresinin HER'una nasıl etki edeceğini belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre katodik akım yoğunluğunun ve kaplama süresinin artmasıyla Co-P alaşımının, diğer alaşımlara göre HER performansının daha fazla arttığını bulmuşlardır. Katodik akım yoğunluğunun ve kaplama süresinin çok fazla artması HER performansının azalmasına sebep olmaktadır. Bunun nedeni ise alt tabakada bulunan Cu levhanın HER performansını azaltıcı yönde etki etmesidir. Ayrıca Co-P alaşımındaki % P oranı arttıkça HER'da hızlanmaktadır.

Rosalbino vd (2007), Ni, Ni-Co, Ni-Co-Y alaşımlarının 1 M NaOH çözeltisindeki HER ve katalitik aktivitesini araştırmışlardır. Buna göre HER için Ni-Co-Y alaşımının en yüksek katalitik aktiviteye sahip olduğu saptanmıştır. Bu alaşımların akım potansiyel eğrileri elde edilmiş ve yüzey morfolojisi SEM (taramalı elektron mikroskobu) ile belirlenmiştir.

Danaee vd (2008), camsı karbon üzerine galvanostatik olarak Ni ve NiCu çöktürerek (GC/Ni, GC/NiCu) metanol elektrooksidasyonuna katalitik etkilerini 1 M NaOH çözeltisinde CV ve kronoamperometri tekniklerini kullanarak araştırmışlardır. Ni ve Cu'nun birlikte çöktürüldüğü GC/NiCu elektrotun metanol elektrooksidasyonu için oldukça etkin olduğunu ve reaksiyonun bu elektrot yüzeyinde difüzyon denetimli olarak gerçekleştiğini belirlemişlerdir.

Solmaz vd (2008), bu çalışmada NiCu kompozit malzemesi, bakır (Cu/NiCu) elektrotu üzerine elektrokimyasal olarak kaplanmıştır ve hidrojen oluşum reaksiyonunda (HER) elektrokatalitik malzemesi olarak kullanılabilirliği atomik absorpsiyon (AAS), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elektrokimyasal mikroskop teknikleri kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçta Cu/NiCu elektrodunun HER aktivitesi kaplanmamış Cu ve Ni kaplanmış Cu/Ni elektroduna göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Yine Cu/Ni elektrodunun katalitik aktivitesinin Ni ve Cu arasındaki etkileşim kadar poröz yapısı ile alakalı olduğu ortaya konmuştur.

Solmaz vd (2008), bu çalışmada, karbon keçe üzerine farklı miktarlarda nikel elektrokimyasal olarak çöktürülmüştür. Hazırlanan elektrotların 1 M NaOH çözeltisinde hidrojen gazı çıkışına katalitik etkisi katodik akım-potansiyel eğrileri, elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve elektroliz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre karbon keçe üzerine nikel çöktürülmesi elektrotun aşırı gerilimini düşürerek hidrojen gazı çıkışını arttırmaktadır. Elektrotun katalitik etkinliği çöktürülen nikel miktarına bağlı olarak değişmektedir. Nikel çöktürülmüş elektrotların yüksek katalitik etkinliği keçe elektrotun büyük yüzey alanı ve nikelin yüksek katalitik etkinliği ile açıklanmıştır.

El-Meligi Ismail (2009), hidrojen üretim kaynağı olarak hidroklorik asit içine daldırılmış zayıf karbon çelik elektrotunun hidrojen oluşum reaksiyonu çalışılmıştır. Hidroklorik asit konsantrasyonundaki artış ile birlikte korozyon ve üretim hızı ile akım yoğunluğu artışı gözlemlenmiştir. Teorik ve pratik olarak her 1 gram demire karşılık 0,036 gram hidrojen elde edilmiştir. Bundan dolayı deney süresince hidrojen üretim verimliliği %100 olarak gerçekleşmiştir. Verimliliğin bu düzeyde yüksek çıkması, demirdeki azalma ile hidrojen oluşum miktarı arasında güçlü bir bağ olduğunu göstermiştir. Buradaki demir miktarı ile hidrojen oluşum miktarı ile bağımlı değişkenler, HCl konsantrasyonu ile deney zamanı bağımlı değişkenler olduğu saptanmıştır. Zayıf karbon çelik elektrot tarafından üretilen hidrojen depolama malzemesi üzerine uygulanmıştır. Test edilen malzeme oda sıcaklığı ve normal atmosfer basıncında hidrojenin % 6'sını topladığı gözlemlenmiştir.

Xu (2009), bu çalışmada, hidrojenin, gelecek için önemli bir enerji kaynağı olduğu ve üretimi ile araştırılmasının önemli olduğu fikrinden yola çıkılmıştır. Safsızlıkların

hidrojen oluşum reaksiyonu üzerindeki etkilerine vurgu yapılmıştır. Ayrıca elektrokimyasal performans ile adsorpsiyon yapısı arasındaki ilişki kurmanın önemli olduğu ve bazı katkı maddelerinin (özellikle nitrik asit) hidrojen oluşumuna önemli ölçüde katkı sağladıkları ortaya konulmuştur.

Xue vd (2009), karbon keçe elektrokimyasal aktivitesinin geniş yüzey alanına sahip ve iyi mekanik dayanımı olan yaygın kullanılan geçirgen elektrottur. Buna rağmen kötü yanları vardır. Kinetik zayıf tersinirdir. Tersinirliği arttırmak için karbon keçe üzerinde kimyasal ve elektrokimyasal değişikliğe gitmişlerdir. Prusya mavisi ile karbon keçe film kaplamışlar. Bu da elektrotu daha verimli hale getirmiştir. Şarj edilebilir pillerin elektrokatalizlerinde ve ikincil pillerde kullanılmıştır. Prusya mavisi ile kaplanmış karbon keçenin elektrokimyasal davranışları dönüşümlü voltametri ve EIS 'ta sabit akımda deneyleri gözlemlenmiştir. Prusya mavisi ile kaplanmış karbon keçe elektrot şarj transfer direncini düşürdüğü ve % 12 oranında elektrotun voltaj etkinliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Yanhui Xu (2009) , Safsızlıkların hidrojenin oluşum reaksiyonlarına etkileri incelenmiştir. Çalışmanın amacı elektrokimyasal performans ile adsorpsiyon yapısı arasında ilişki kurmak ve bazı katkı maddelerinin etkilerini ortaya çıkarmaktadır. EIS ile tek kristal altın elektrot üzerinde hidrojen oluşum reaksiyonları çalışılmış, nitrik asit ile hidrojen oluşum hızının arttığı gözlenmiştir.

Solmaz ve Kardaş (2009), bakır elektrot üzerine elektrokimyasal olarak Fe, Ni ve değişik oranlarda NiFe kaplamışlardır. Hazırlanan kaplamalar dönüşümlü voltametri, atomik absorpsiyon spektroskopisi, taramalı elektron mikroskobu ve atomik kuvvet mikroskobu ile karakterize edilmiştir. Elektrotların alkali ortamda hidrojen gazı çıkışına katalitik etkilerini akım-potansiyel eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi ile incelemişlerdir. Elde edilen verilere göre Ni ve Fe bir arada kaplandıklarında tekli kaplamalar ile kıyaslandığında hidrojen gazı çıkışına katalitik etkileri artmaktadır. İkili kaplamaların etkisi kaplamanın bileşimine bağlı olarak değişmektedir. En uygun metal bileşimli elektrotun elektroliz sisteminde zamanla elektrokimyasal kararlılığı ve korozyon davranışları ayrıca incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre NiFe (4:6) kaplamasının hidrojen gazı çıkışına katalitik etkisi zamanla oldukça kararlı olmakta ve ayrıca korozyon dayanımı oldukça yüksektir.

Solmaz vd (2009), bakır yüzeyine elektrokimyasal olarak NiCoZn üçlü kaplamasını oluşturmuşlardır. Elde edilen elektrot 24 saat boyunca hidrojen gazı çıkışı duruncaya kadar %30'luk NaOH çözeltisi ile muamele edilerek yüzeydeki Zn çözülerek uzaklaştırılmıştır. Bu şekilde elektrotun yüzey alanı arttırılmıştır. Elektrotlar atomik absorpsiyon spektroskopisi, enerji dağılımlı X-ray spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskobu ile karakterize edilmiştir. Elektrotların elektroliz sisteminde zamanla kararlılığı akım-potansiyel eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi ile incelenmiştir. Elektrotların kesikli elektroliz ve sürekli elektroliz ile korozyon davranışlarındaki değişim ayrıca belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre NiCoZn elektrotu zamanla oldukça kararlı olmaktadır. Korozyon dayanımı ise elektroliz süresine göre değişmektedir.

Solmaz vd (2010), bakır yüzeyine elektrokimyasal olarak NiCuZn üçlü kaplamasını oluşturmuşlardır. Elde edilen elektrot 24 saat boyunca hidrojen gazı çıkışı duruncaya kadar %30'luk NaOH çözeltisi ile muamele edilerek yüzeydeki Zn çözülerek uzaklaştırılmış ve elektrotun yüzey alanı arttırılmıştır. Elektrotlar enerji dağılımlı X-ray spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskobu ile karakterize edilmiştir. Elektrotların elektroliz sisteminde zamanla kararlılığı akım-potansiyel eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre NiCoZn elektrotu ikili NiCu ile kıyaslandığında oldukça gözenekli bir yapıya hidrojen gazı çıkışın katalitik etkisi önemli ölçüde artmıştır. 120 saat boyunca yapılan elektroliz süresince elektrotun katalitik etkisi oldukça kararlı olmaktadır.

Song ve Meng (2010), deniz suyunda hidrojen üretiminde kullanılan Ni-Fe-C elektrotu üzerinde C içeriğinin etkisi incelemiştir. pH =12, % 3,5 NaCl, 90°C'de 100 ile 300 A/m² akım yoğunluğu aralığında Ni-Fe-C elektrotu üzerinde gerçekleştirilen hidrojen oluşum reaksiyonları EIS tekniği ve polarizasyon ölçümleri yapılarak çalışılmıştır. Ölçümler neticesinde akım yoğunluğunun Ni-Fe-C kaplamasının C içeriği ve parçacık büyüklüğü ile belirlendiği görülmüştür. Bunun yanında Ni-Fe-C hidrojen oluşumunda oluşan aşırı gerilimin C içeriği ve parçacık büyüklüğü ile ilişkili olduğu görülmüştür. Hidrojen oluşum reaksiyonunun optimum katalitik aktiviteli Ni-Fe-C elektrotunun % 1,59 C içerdiği ve minimum parçacık büyüklüğü 3,4 nm olması gerektiği bulunmuştur.

Raouf vd (2010), bakır yüzeyine nanoporöz bakır oluşturduktan sonra bunun üzerine kimyasal olarak Pt çöktürmüşlerdir. Hazırladıkları elektrotları SEM ve EDX ile karakterize etmişlerdir. Elektrotların hidrojen gazı çıkışın katalitik etkilerini 0,5 M H₂SO₄ çözeltisinde incelemişlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre Pt çöktürülmüş nanoporöz bakır elektrot hidrojen gazı çıkışı için oldukça yüksek katalitik etkiye sahiptir.

Döner vd (2011), grafit elektrot üzerine farklı oranlarda Co ve Zn metallerini farklı akım yoğunluklarında ve kalınlıklarda bir arada çöktürdükten sonra hazırladıkları CoZn ikili kaplamasını %30'luk NaOH çözeltisi ile muamele ederek yüzeydeki Zn çözülerek uzaklaştırmış ve elektrotun yüzey alanını arttırmışlardır. Yüzey alanı artırılmış CoZn yüzeyine daha sonra 1 mg/cm² Pt çöktürmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre CoZn kompozit kaplamanın hidrojen gazı çıkışına katalitik etkisi metal oranları, kaplama akım yoğunluğu ve kaplama kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. En uygun metal oranı, kaplama akım yoğunluğu ve kalınlıkta elde edilen CoZn yüzeyine çok az miktarda Pt çöktürüldüğünde ise elektrotun etkinliği daha da artmaktadır.

Herraiz-Cardona vd (2011), AISI 304 paslanmaz çelik elektrot üzerine elektrokimyasal olarak NiCoZn kaplamış ve oluşturdukları kaplamayı daha sonra derişik alkali çözeltisi ile muamele ederek Zn metalini uzaklaştırarak elektrotun gözenekliliğini arttırmışlardır. Hazırladıkları elektrotu SEM, EDX, polarizasyon ve EIS teknikleri ile karakterize etmişlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre Ni elektrot ile kıyaslandığında gözenekliliği artırılmış NiCoZn elektrotun hidrojen gazı çıkışın katalitik etkisi artmıştır. Artan etkinliği NiCoZn katalizörünün yüksek yüzey alanı ile açıklamışlardır.

Solmaz ve Kardaş (2011), bakır elektrot üzerine NiCoZn üçlü kaplamasını oluşturduktan sonra elde ettikleri elektrotu hidrojen gazı çıkışı duruncaya kadar %30'luk NaOH ile muamele ederek yüzeydeki Zn metalini çözerek uzaklaştırmış ve elektrotun gözenekliliğini arttırarak yüzey alanını arttırmışlardır. Yüzey alanı artırılmış NiCoZn yüzeyine daha sonra 1mg/cm² Ag, Pd ve Pt metallerini elektrokimyasal olarak çöktürmüşlerdir. Hazırladıkları elektrotları EDX ve SEM ile karakterize etmişlerdir. Elektrotların hidrojen gazı çıkışına katalitik etkilerini oda sıcaklığında 1 M KOH çözeltisinde katodik akım-potansiyel eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi ile belirlemişlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre hazırlanan elektrotlar oldukça gözenekli

bir yapıya sahiptir. NiCoZn yüzeyine Ag, Pd ve Pt çöktürülmesi elektrotun katalitik etkisini daha da arttırmaktadır. Elektrotların katalitik etkileri $Ni < NiCoZn < NiCoZn-Pd < NiCoZn-Ag < NiCoZn-Pt$ sırasına göre değişmektedir. Diğer elektrotlar ile kıyaslandığında elektroliz sisteminde NiCoZn-Pt elektrotunun zamanla daha kararlı olduğu belirlenmiştir.

Döner vd (2012), Karbon keçe yüzeyine Ni, Co ve NiCo katalizörlerini çöktürerek 1 M KOH çözeltisinde hidrojen gazı üretimine katalitik etkilerini çalışmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre C yüzeyine bu katalizörlerin çöktürülmesi, C'nin hidrojen gazı çıkışına katalitik etkisini arttırmaktadır. En yüksek etkinlik Ni ve Co'nun bir arada çöktürüldüğü elektrotta elde edilmiştir.

Gündoğdu (2012), yapmış olduğu yüksek lisans tezinde (Tez Danışmanı Ramazan Solmaz) karbon keçe yüzeyine değişik oranlarda NiPt (100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100) çöktürmüş ve elde ettikleri elektrotların 1 M KOH çözeltisinde hidrojen gazı çıkışına katalitik etkisini araştırmıştır. Elde ettiği bulgulara göre elektrot yüzeyinin önce ince bir Ni filmi sonra bu filmin yüzeyine çok az miktarlarda Ni ve Pt çöktürüldüğünde elektrotun katalitik etkisi önemli ölçüde artmaktadır. Elektrotun zamanla oldukça kararlı olduğu ayrıca belirlenmiştir.

Solmaz (2013), karbon keçe üzerine ince bir Ni filmi kapladıktan sonra elde ettiği C/Ni yüzeyine çok az miktarlarda Ir ve NiIr (1:1) çöktürerek katalitik yüzeyli elektrotlar elde etmiştir (C/Ni-NiIr). Elde ettiği elektrotların hidrojen gazı üretimine katalitik etkisini oda sıcaklığında 1 M KOH çözeltisinde polarizasyon ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi tekniği ile incelemiştir. Elde ettiği deneysel bulgulara göre C yüzeyinin ince bir Ni filmi ile kaplanması elektrotun etkinliğini arttırmaktadır. C/Ni yüzeyine çok az miktarda Ir ve NiIr çöktürüldüğünde etkinlik önemli ölçüde artmaktadır. Özellikle NiIr çöktürülmüş elektrotta metallerin sinerjistik etkisi ile hidrojen üretimi önemli ölçüde katalizlenmektedir.

Xie vd (2013), dört farklı yöntemle hazırlamış oldukları Ni elektrotların 0.50 M $Na_2SO_4 + 0.10 M H_2SO_4$ ortamında hidrojen gazı üretimine etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri deneysel bulgulara göre elektrotları aktivitesinin elektrotların morfolojisine

ve yüzey yapısına önemli ölçüde bağlı olduğunu belirlemişlerdir. En düşük yük transfer direnci ve en yüksek yük değişim akım yoğunluğu poroz Ni elektrotta oluşmaktadır.

Abbaspour ve Mirahmadi (2013), farklı oranlarda Ni ve Fe içeren elektrotlar hazırlayarak elektrotların Ni içeriğinin elektrotun hidrojen gazı çıkışına etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre elektrotların etkinliği $Fe_3O_4 \leq Ni_{0.6}Fe_{2.4}O_4 < Ni_{0.2}Fe_{2.8}O_4 \leq Ni_{0.8}Fe_{2.8}O_4 < Ni_{0.4}Fe_{2.6}O_4$ sırasına göre değişmektedir. Volmer basamağının hız belirleyen reaksiyon olduğu ve elektrotların paslanmaya karşı dayanıklı olduğu bulunmuştur.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

Kimyasallar: KOH, CuSO₄.5H₂O, Na₂MoO₄.2H₂O, Na₃C₆H₅O₇.2H₂O, HNO₃.

Çalışma Çözeltisi: Elektrotların hidrojen gazı çıkışına katalitik etkileri 1 M KOH çözeltisi içerisinde yapılmıştır.

Kaplama Banyoları: Kaplanacak metallerin tuzlarından uygun miktarlarda kullanılarak hazırlanmış olup banyo bileşimleri 3.2.2'de detaylı olarak verilmiştir.

Çalışma Elektrotları:

- 1) Karbon Keçe Elektrot (C): 1cmx1cmx0,5cm (boy x en x kalınlık) boyutlarında ve ortalama 0,05 g ağırlığında keçeden kesilerek hazırlanmıştır. Kullanılan C elektrotun elektriksel direnci 0,35 Ω cm⁻¹'dir.
- 2) C/Cu Elektrot: Elektroliz sistemine farklı akımlar uygulanarak C yüzeyine değişik miktarlarda Cu metali çöktürülerek hazırlanmıştır.
- 3) C/Mo Elektrot: Elektroliz sistemine farklı akım uygulanarak C yüzeyine değişik miktarlarda Mo metali çöktürülerek hazırlanmıştır.
- 4) C/MoCu Elektrot: Kaplama banyosunda Mo:Cu mol oranları 1:0,001, 1:0,005, 1:0,01, 1:0,05, 1:0,1 ve 1:0,5 olacak şekilde Na₂MoO₄.2H₂O, CuSO₄.5H₂O tuzları ve kütlece %5 Na₃C₆H₅O₇.2H₂O saf suda çözülerek hazırlanmıştır. Bu banyolarda elde edilen elektrotlar sırası ile C/MoCu-1, C/MoCu-2, C/MoCu-3, C/MoCu-4, C/MoCu-5 ve C/MoCu-6 olarak isimlendirilmiştir.

Karşı Elektrot: Toplam yüzey alanı 2 cm² olan platin levha karşı elektrot olarak kullanılmıştır. Elektriksel iletkenliği sağlamak için bir bakır tel ile bağlantı yapılmış ve sadece platin levha dışarıda kalacak şekilde poliester ile kaplanarak hazırlanmıştır.

Referans Elektrot: Gümüş - gümüş klorür (Ag, AgCl/Cl⁻, KCl= 3 M) referans elektrot olarak kullanılmıştır.

Doğru Akım Kaynağı (RENKO GK-09304D): C yüzeyine katalizörlerin çöktürülmesi için kullanılmıştır.

Avometre: Kaplama esnasında elektroliz sisteminden geçen akımı daha hassas bir şekilde ölçmek için kullanılmıştır.

Manyetik Karıştırıcı: Çözeltileri karıştırmak için kullanılmıştır.

Kronometre: Süreyi ölçmek için kullanılmıştır.

Etüv: Elektrotların kurutulmasında kullanılmıştır.

Potansiyostat-Galvanostat (CHI 660D): Elektrotların elektrokimyasal olarak temizlenmesi, akım-potansiyel eğrileri, elektrokimyasal impedans spektroskopisi ve akım-zaman eğrilerinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (JEOL 6510): Elektrotların yüzey görüntülerinin incelenmesinde kullanılmıştır.

Enerji Dağılımlı X-Ray Spektroskopisi (EDX) (JEOL 6510): Elektrotların yüzeylerinin kimyasal bileşimlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

3.2. Metod

3.2.1. Çalışma Elektrotlarının Hazırlanması

Çalışma elektrotu olarak 0,5 cm kalınlığında karbon keçeden 1cmx1cm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır (Ortalama ağırlıkları 0,05 g). Kesilen karbon keçe örnekler saf su ile iyice yıkanıp 2 saat saf suda bekletildikten sonra 105°C sıcaklıktaki etüvde 12 saat kurutulularak desikatörde bekletilmiştir. Kurutulan C elektrotlar Cu veya Mo kaplanmış paslanmaz çelik tele geçirilerek çalışma elektrotları hazırlanmıştır.

Elektrokimyasal ölçümlerde karşı elektrot olarak Pt levha kullanılmıştır. Pt elektrotlar 0,2cmx1cmx1cm boyutlarındaki Pt levhalara Pt teller tutturulduktan sonra iletkenliği sağlamak için bakır telle bağlanmış ve sadece Pt levha dışarıda kalacak şekilde poliester içerisine gömülerek hazırlanmıştır. Platin elektrotun yüzeyi bütün ölçümlerden önce 1:1 (v/v) HNO₃:H₂O çözeltisinde bir süre bekletilmiş ve saf sudan geçirilerek yıkanmıştır.

3.2.2. Karbon Keçe Yüzeyine Katalizör Çöktürülmesi

Çalışmada öncelikle farklı akımlar (25 mA, 50 mA, 75 mA, 100 mA, 150 mA ve 200 mA) elektroliz sistemine uygulanarak 0,1 g Cu /g C çöktürülmüş ve hidrojen gazı

üretimi için en uygun akım yoğunluğu belirlenmiştir. Belirlenen akım elektroliz sistemine farklı sürelerde uygulanmış ve C yüzeyine farklı miktarlarda Cu (0,1 mg, 0,5mg ve 1,0 mg metal/g C) çöktürülmüş ve hidrojen gazı üretimi için C yüzeyine çöktürülecek en uygun Cu miktarı belirlenmiştir. Benzer şekilde Mo çöktürme için en uygun akım ve metal miktarı belirlenmiştir. Ancak, 0,1 g Mo çöktürmede yüksek akımlarda aşırı hidrojen gazı nedeni ile metal çöktürülemediğinden Mo çöktürmelerde önce uygun metal miktarı daha sonra belirlenen Mo miktarında (1,0 g) uygun akım belirlenmiştir. En uygun metal miktarı ve akımda Mo ve Cu çöktürülmüş C elektrotlar *C/Mo ve *C/Cu olarak simgelenmiştir. Belirlenen akım ve metal miktarında (Mo ve Cu toplam miktarı) C keçe yüzeyine farklı oranlarda Mo:Cu bir arada çöktürülmüştür (C/Mo_xCu_y ($x:y$ (kaplama banyolarındaki mol oranları)=1:0,001, 1:0,005, 1:0,01, 1:0,05, 1:0,1). Kaplama banyoları aşağıda verilmiştir.

- 1) **Cu Kaplama Banyosu:** 0,1 M $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ + %5 (m/v) $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$
- 2) **Mo Kaplama Banyosu:** 1,0 M $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ + %5 (m/v) $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$ (Gaz çıkışından dolayı, Mo kaplamalarda Mo derişimi yüksek tutulmuştur). Seyreltik (0,1 M) molibden kaplamalarda elektroliz sırasında aşırı hidrojen gazı çıkışı nedeni ile Mo kaplamalar elde edilemediğinden Cu kaplama banyosuna kıyasla daha derişik (1,0 M) Mo çözeltisi kullanılmıştır. Bakır ile kıyaslandığında molibdenin iyonlarının standart indirgenme potansiyeli oldukça negatiftir (Eşitlik 3.2).
- 3) **MoCu Çöktürme Banyosu:** Farklı mol oranlarında Mo ve Cu içerecek şekilde %5 (m/v) $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ içeren farklı miktarlarda Mo ve Co tuzları karıştırılarak elde edilmiştir. Örneğin Mo:Cu oranı 1:0,01 (C/MoCu-3) olan 50 mL ikili MoCu çöktürme banyosu hazırlamak için 12,0972 g $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ ve 0,1248 g $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ alınmıştır. Hidrojen gazı üretimini en iyi katalizleyen elektrot *C/MoCu olarak simgelenmiştir.

Bakır ve molibden iyonlarının standart indirgenme potansiyelleri arasında büyük bir fark vardır. Bu fark, iki metalin bir arada çöktürülmesini zorlaştırmakta ve ayrıca oluşan kaplamanın kalitesini düşürmektedir. Bu dezavantajların giderilmesi amacı ile banyo içerisine kompleksleştirici olarak %5 (m/v) $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$ ilave edilmiştir. Ortama kompleksleştiricilerin ilave edilmesi metallerin daha kararlı olmasını ve daha kontrollü

bir şekilde indirgenmesini sağlayarak daha sağlam çöktürmeler elde edilmektedir (Kardaş ve Solmaz, 2009; Solmaz vd., 2008; Solmaz vd., 2009; Solmaz vd., 2010).



Elektrotlar saf suda iyice yıkandıktan sonra 1,0 M KOH çözeltisine daldırılarak sabit katodik akım uygulanmış ve metal kaplı elektrotların yüzeyleri elektrokimyasal olarak temizlenmiştir. Bu şekilde yüzeyde oluşmuş oksitler indirgenmiş ve elektrokimyasal ölçümler için daha kararlı ve tekrarlanabilirliği yüksek kaplama yüzeyleri oluşturulmuştur. Ayrıca gözeneklerde birikmiş korozyon ürünleri uzaklaştırılarak temizlenmiştir. Elektrotların yüzeyi temizlendikten sonra 1,0 M KOH çözeltisi içeren elektrokimyasal hücreye daldırılarak elektrokimyasal ölçümler yapılmıştır.

3.2.3. Elektrotların Karakterizasyonu

C yüzeyine oluşturulan katalizörlerin yüzey görüntüleri SEM ile incelenmiştir. Kaplamaların metal bileşimleri EDX ile belirlenmiştir.

3.2.4. Elektrotların Hidrojen Gazı Üretimine Katalitik Etkilerinin Belirlenmesi

3.2.4.1. Katodik Akım-Potansiyel Eğrileri

Katodik akım-potansiyel eğrileri 1,0 M KOH içerisinde 25°C'de açık devre potansiyeli ile -1,80 V potansiyel aralığında 0,005 V s⁻¹ tarama hızında elde edilmiştir. Karşı elektrot olarak Pt, referans elektrot olarak Ag/AgCl, Cl⁻ (3,0 M KCl) kullanılmıştır.

3.2.4.2. Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi

Katodik akım-potansiyel eğrilerinden belirlenen ve hidrojen gazının oluştuğu değişik katodik aşırı gerilimlerde 10⁶-10⁻² Hz frekans aralığında 0,005 V genlik uygulanarak elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri yapılmıştır.

3.2.5. Elektrotların Zamanla Kararlılığı

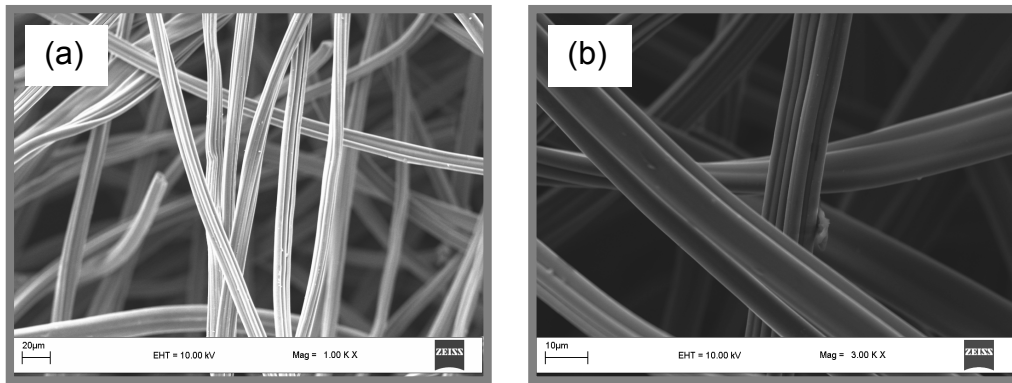
Hidrojen gazı üretimi için en uygun olduğu belirlenen *C/MoCu elektrotunun elektroliz sisteminde zamanla kararlılığı 1,0 M KOH çözeltisinde oda sıcaklığında incelenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. C/Cu Elektrotların Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Hidrojen Gazı Üretimine Katalitik Etkilerinin İncelenmesi

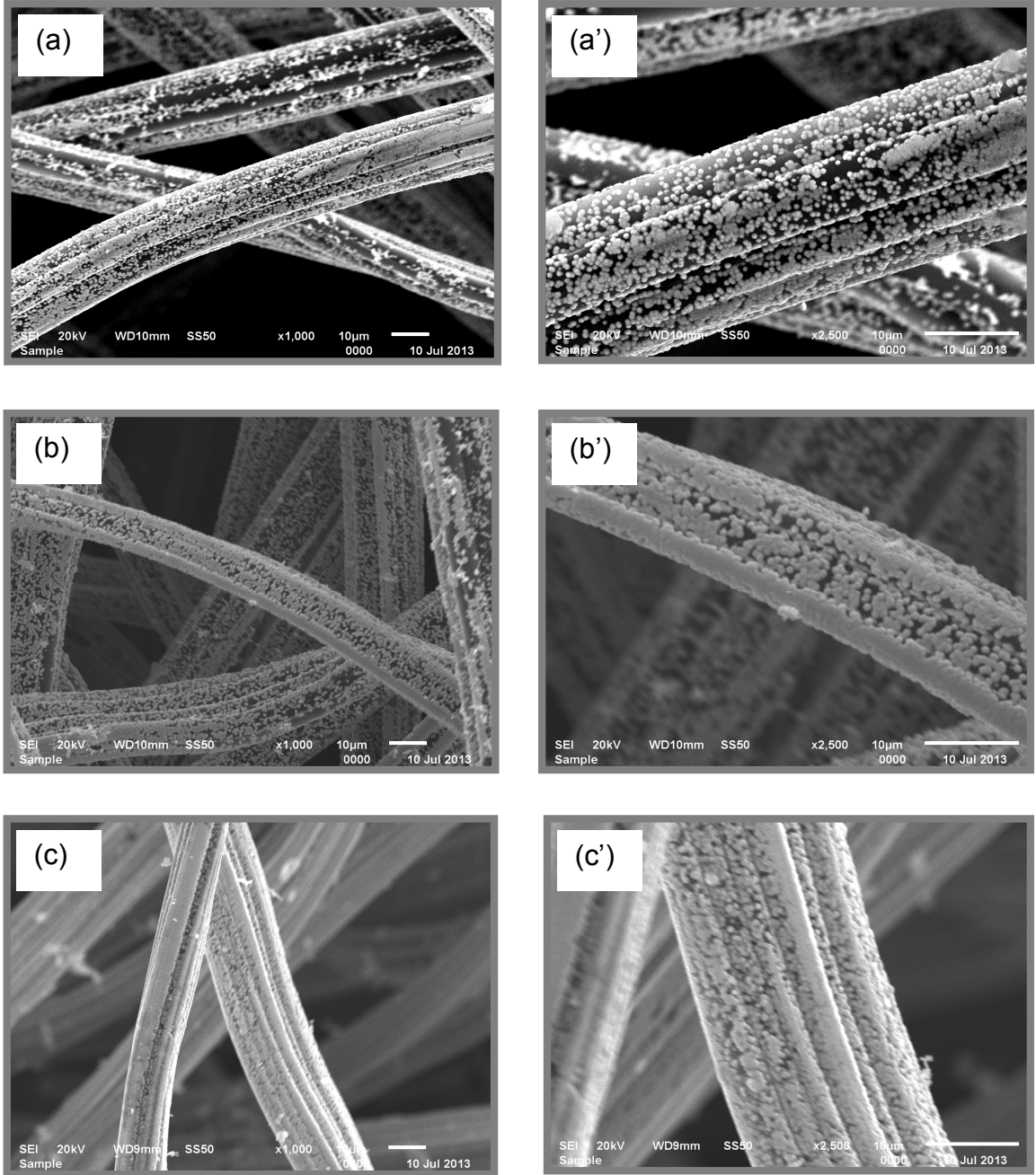
Genel olarak geçiş metallerinin hidrojen gazı üretimine elektrokatalitik etkileri karbon keçeden daha yüksektir. Bu nedenle C yüzeyi Cu ve Mo ile kaplanarak (C/Cu ve C/Mo) hazırlanan elektrotların hidrojen gazı oluşumuna katalitik etkileri belirlenmiştir. Kaplamada uygulanacak akım ve çöktürülen metal miktarı kaplamanın kalitesini ve yüzey morfolojisini önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Kataliz bir yüzey işlemi olduğundan değişen yüzey yapısı ile birlikte elektrotun katalitik etkisi de değişecektir. Bu nedenle çalışmada öncelikle C yüzeyine farklı akımlarda ve miktarlarda Cu ve Mo çöktürülmüş (C/Cu ve C/Mo) ve en uygun kaplama koşulları belirlenmiştir.

Katalizör çöktürülmemiş C elektrotun iki farklı büyütmede alınmış SEM görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir (Gündoğdu 2011; Çağlayan 2013). Şekilden de görüldüğü gibi C; lifli, uzun çubuklar şeklinde bir yapıya sahip olup oldukça geniş boşluklardan oluşmaktadır. Bu yapı, geniş yüzeyli elektrot yapımı için oldukça uygundur.

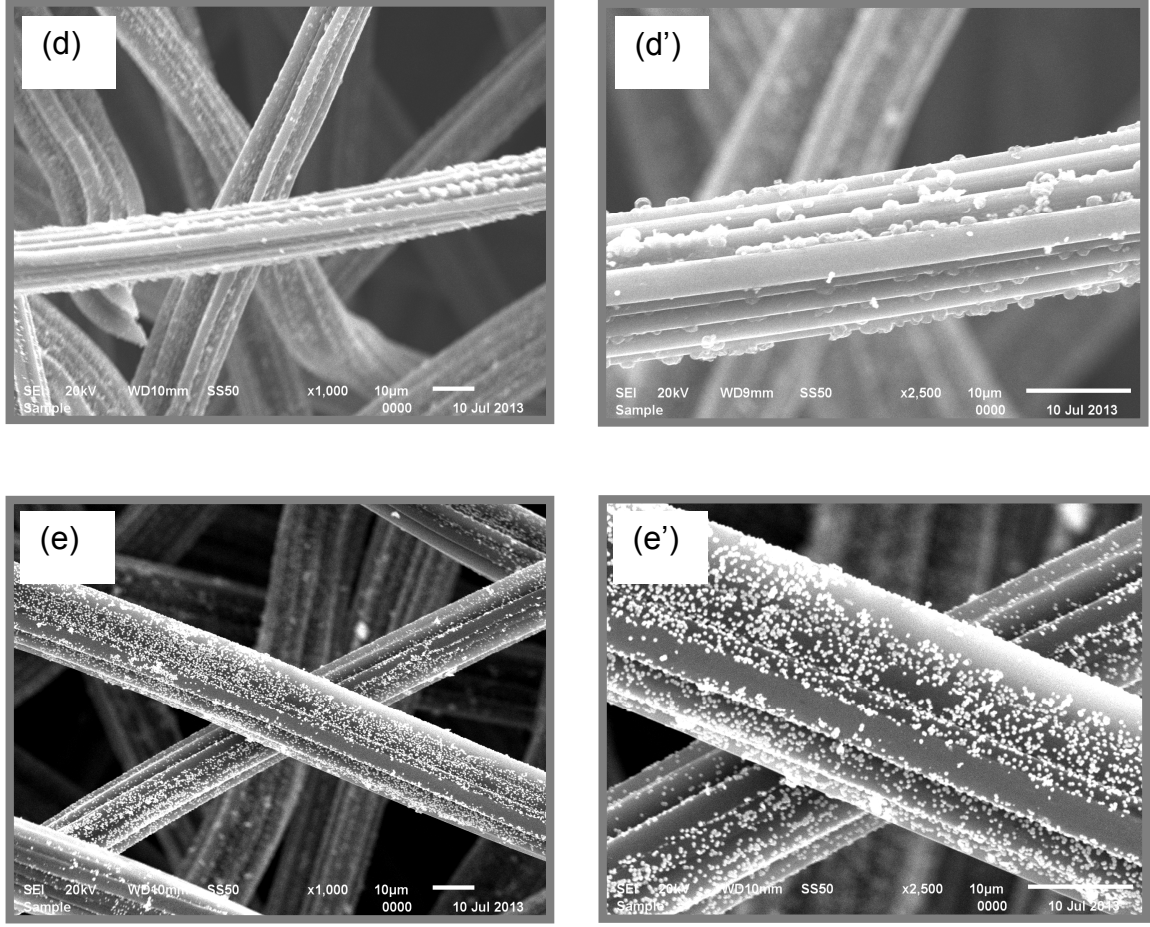


Şekil 4.1. Kaplanmamış C elektrotun 1000 kat (a) ve 3000 kat (b) büyütülmüş SEM görüntüleri (Gündoğdu 2011; Çağlayan 2013)

Elektrotun geniş boşluklara sahip olması iyonların katalitik bölgelere göçünü ve aynı zamanda yüzeyde oluşacak hidrojen gazı moleküllerinin elektrot yüzeyinden uzaklaşması için önemli bir avantaj sağlamaktadır. İyon ve kütle transferi kolay olabileceğinden sistemde daha düşük bir difüzyon direnci oluşacaktır.



Şekil 4.2. 25 mA (a, a'), 50 mA (b, b'), 100 mA (c, c'), 150 mA (d, d') ve 200 mA (e, e') akım uygulanarak 0,1 g Cu/1 g C kaplanmış C/Cu elektrotların 1000 kat ve 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri

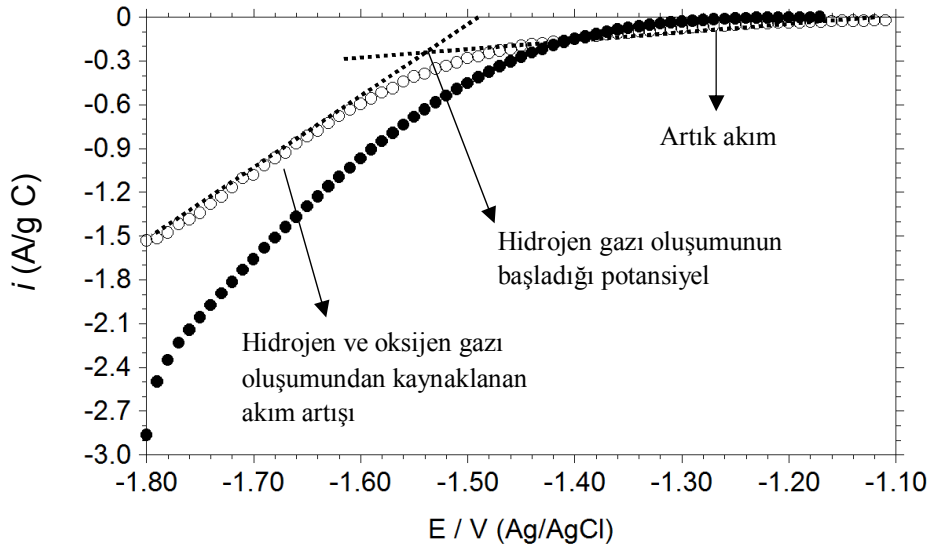


Şekil 4.2. (Devam) 25 mA (a, a'), 50 mA (b, b'), 100 mA (c, c'), 150 mA (d, d') ve 200 mA (e, e') akım uygulanarak 0,1 g Cu/1 g C kaplanmış C/Cu elektrotların 1000 kat ve 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri

Elektroliz sistemine farklı akımlar (25, 50, 100, 150 ve 200 mA) uygulanarak 0,1 g Cu/1 g C olacak şekilde C yüzeyine Cu çöktürülmüş ve hidrojen gazı üretimi için en uygun çöktürme akım miktarı belirlenmiştir. Farklı akımlarda elde edilen C/Cu elektrotların SEM görüntüleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Elde edilen görüntülerden açık bir şekilde görüldüğü gibi C yüzeyinde partikül boyutları 1 µm'nin altında, yüzeye hemen hemen homojen olarak dağılmış oldukça kaliteli Cu nanopartikülleri oluşmaktadır.

Yüzey görüntülerinden de görüldüğü gibi düşük akım yoğunluğunda (a, a') C keçe yüzeyinde birbirinden hemen hemen ayrılmış, çapları nanometre düzeyinde ve yüzeyi tamamen kapatmayan metal partiküller oluşmaktadır. Düşük akımlarda bakır iyonları metalik bakıra iyi indirgenememektedir. Akımın artması ile Cu partikülleri birbirlerine yaklaşıp C yüzeyini kapatmakta ve C yüzeyine oldukça iyi tutunmaktadır. 150 mA'den sonra ise hidrojen iyonlarının indirgenmeye başlaması ile oluşan hidrojen gazı Cu

metalini yüzeyden sökmeye başlamaktadır. 200 mA'in üzerindeki akımlarda C yüzeyinde aşırı hidrojen gazı oluşumundan dolayı Cu metali çöktürülemediği. Genel olarak bütün akımlarda oluşturulan Cu kaplamalar elektrokatalizde en önemli parametrelerden bir tanesi olan yüzey alanını arttırmaktadır.



Şekil 4.3. C (○) ve 100 mA uygulanarak 0,1 g Cu çöktürülmüş C/Cu (●) elektrotların katodik akım potansiyel eğrileri

Elektroliz sistemine 100 mA akım uygulanarak C yüzeyine 0,1 g Cu çöktürülmüş C elektrotun 1 M KOH çözeltisinde 25°C'de elde edilen katodik akım-potansiyel eğrisi Şekil 4.3'te verilmektedir. Kaplanmamış C keçe elektrotun aynı koşullardaki eğrisi de alınmış ve kıyaslamak amacı ile aynı şekilde gösterilmiştir. Elde edilen eğriler incelendiğinde C elektrotta açık devre potansiyelinden itibaren katodik yöne (daha negatif potansiyeller) gidildiğinde yaklaşık -1,5 V'a kadar önemli bir akım artışı gözlenmemiştir. Bu aralıkta gözlenen akım, artık akım olarak bilinir. Artık akım, elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşmediği ancak potansiyel uygulandığında elektriksel alanda iyonların göçünden kaynaklandığı kabul edilmektedir. Anotta oksijen ve katotta hidrojen gazı oluşumunun başlaması ile yaklaşık -1,5 V potansiyelden itibaren ani bir akım artışı olmaktadır. Gözlenen akım elektrokimyasal reaksiyonlarda alınıp verilen elektronlardan kaynaklandığından akım artışı hidrojen gazı oluşumu reaksiyonunun hızı ile orantılıdır. Yani akım ne kadar yüksek ise hidrojen gazı oluşumu da o kadar hızlı olur. Şekil 4.3'ten de açık bir şekilde görüldüğü gibi C/Cu elektrotta

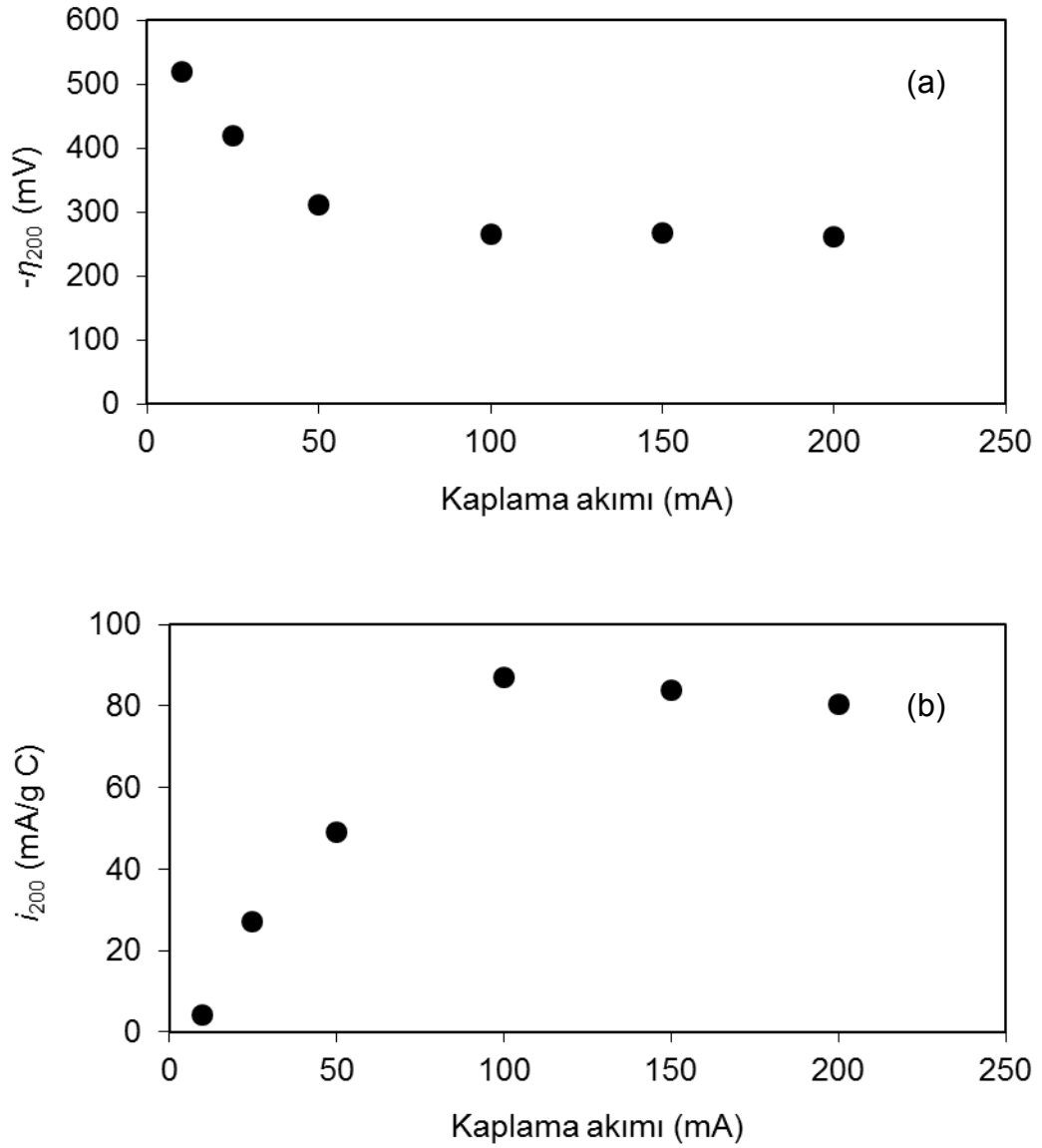
hidrojen gazı oluşumu çok daha düşük potansiyelerde başlamaktadır. Bu sonuç, elektroliz sistemindeki aşırı gerilimlerin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Aşırı gerilimin azalması hidrojen üretimi dışında fazladan harcanan (ısı enerjisi olarak ortama akar) enerjinin de azaldığını göstermektedir.

Hidrojen gazı oluşumuna elektroliz sistemine uygulanacak akımın etkisini belirlemek amacı ile farklı akımlarda Cu çöktürülmüş (0,1 g Cu/g C olacak şekilde) C/Cu elektrotlarının akım-potansiyel eğrileri elde edilmiştir. Elektrotların elektrokatalitik etkileri değerlendirilirken, hidrojen gazı oluşumu reaksiyonunun gerçekleştiği potansiyellere denk gelecek şekilde ya aynı aşırı gerilimdeki akım yoğunlukları veya aynı akım yoğunluğundaki aşırı gerilimler kıyaslanır. Akım yoğunluğu ne kadar yüksek veya aynı akım yoğunluğundaki aşırı gerilim ne kadar düşük ise elektrotun katalitik etkisi de o kadar yüksektir. Bu nedenle akım-potansiyel eğrilerinden i_{200} (200 mV aşırı gerilimde okunan akım yoğunluğu) ve $-\eta_{200}$ (akım yoğunluğunun 200 mA/g C olduğu potansiyel ile açık devre potansiyeli arasındaki fark) değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.1. Farklı akımlarda ve miktarlarda Cu çöktürülmüş C/Cu elektrotların katodik akım-potansiyel eğrilerinden 200 mA/g C katodik akımda elde edilen aşırı gerilimler ($-\eta_{200}$) ve 200 mV katodik aşırı gerilimde elde edilen akım yoğunlukları (i_{200})

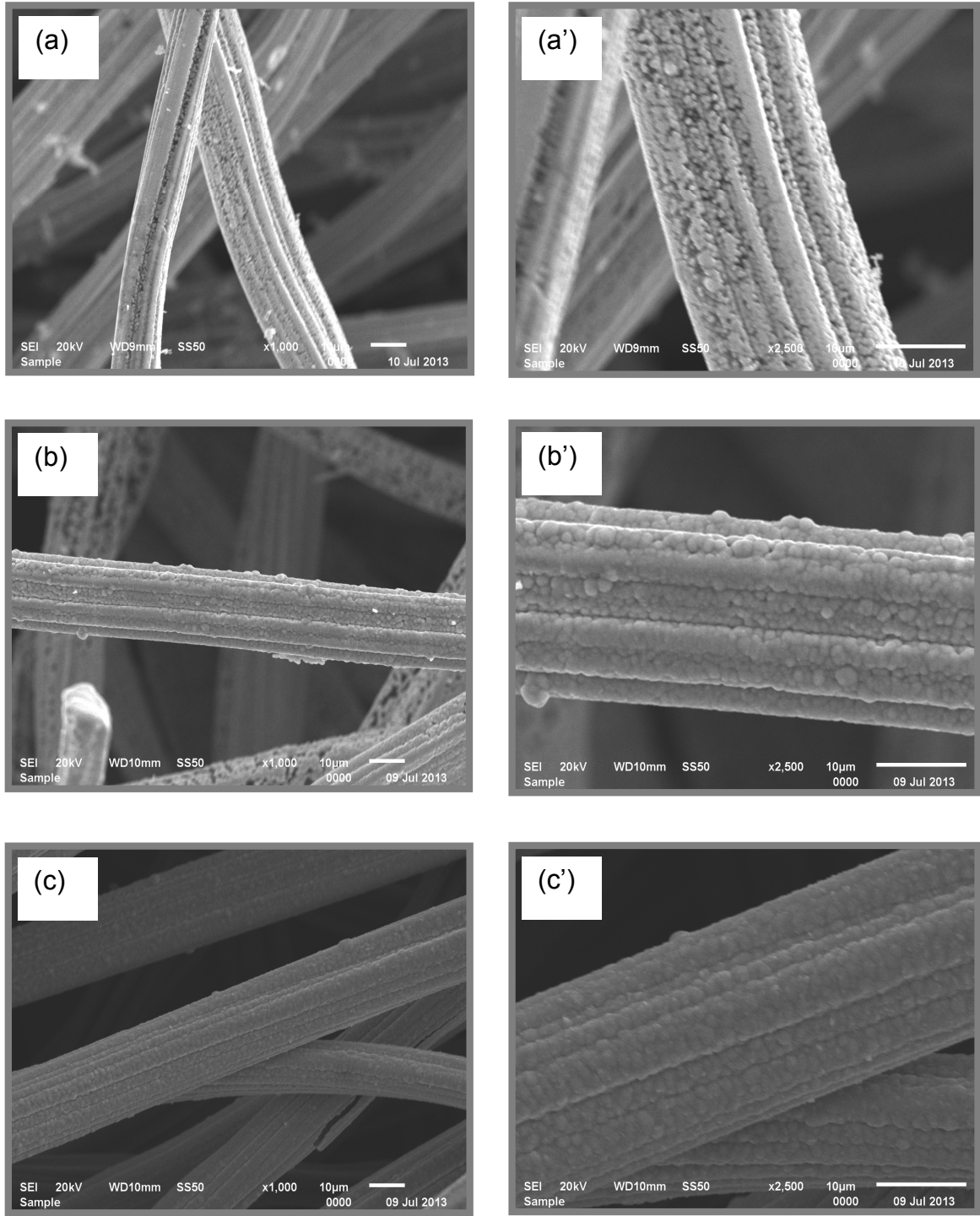
Çöktürülen miktar (g Cu/g C)	Uygulanan akım (mA)	i_{200} (mA/g C)	$-\eta_{200}$ (mV)
0,1	10	4,1	520
	25	27,1	420
	50	49,2	312
	100	87,0	265
	150	83,9	267
	200	80,3	262
0,5	100	105,3	248
*1,0	100	194,6	203

* C elektrotun aynı koşullarda -1.350 V'taki (~Mo ve Cu kaplanmış elektrotlara göre yaklaşık -200 mV aşırı gerilim) akım yoğunluğu 105 mA/g C'dur.



Şekil 4.4. 200 mA/g C'da sistemdeki aşırı gerilim (a) ve 200 mV aşırı gerilimde elde edilen akım yoğunluklarının (b) 0,1 g Cu çöktürmek için uygulanan kaplama akımı ile değişimi

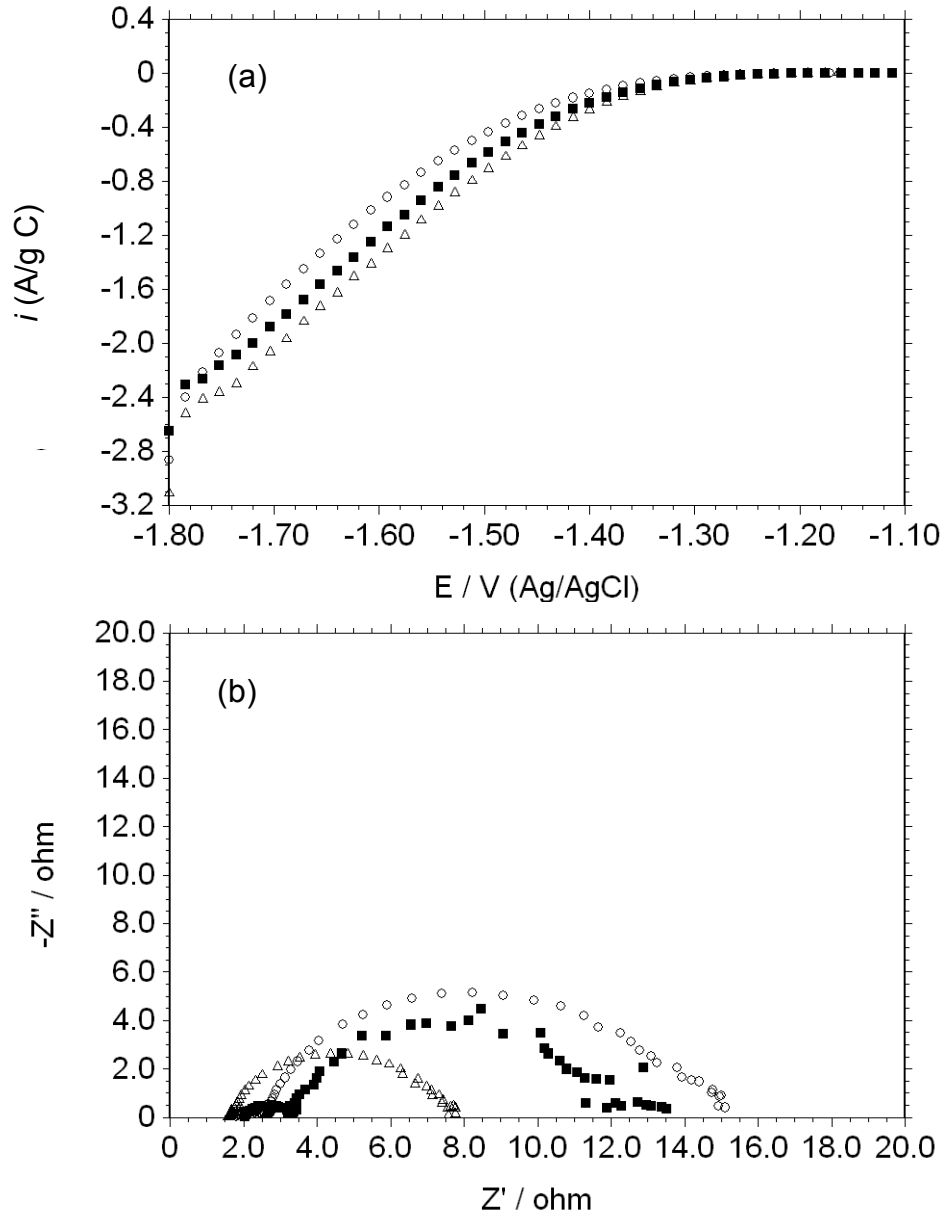
Açık devre potansiyeli, sisteme potansiyel uygulanmadığı koşullardaki potansiyeldir (akım-potansiyel eğrilerinin başlangıç potansiyeli). Dolayısı ile 200 mV aşırı gerilim, açık devre potansiyelinden itibaren 200 mV daha katodik potansiyel olup hidrojen gazı oluşumunun gerçekleştiği potansiyellere denk gelmektedir. Akım-potansiyel eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler Tablo 4.1'de verilmiştir. Değişimin daha iyi görülmesi için veriler Şekil 4.4'te grafiğe geçirilmiştir.



Şekil 4.5. 100 mA akım uygulanak 0,1 g Cu/1g C (a, a'), 0,5 g Cu /1 g C (b, b') ve 1,0 g Cu/1g Cu (c, c') kaplanmış C/Cu elektrotların 1000 kat ve 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri

Tablo 4.1 ve Şekil 4.4 incelendiğinde C yüzeyine Cu çöktürmek amacı ile elektroliz sistemine uygulanan akım arttığında hazırlanan C/Cu elektrotunun katalitik etkisi keskin bir şekilde artmakta (η_{200} değeri azalmakta, i_{200} ise artmaktadır), 100 mA'de en yüksek

değerine ulaşmaktadır. Elde edilen yüksek etkinlik, bu akım değerinde oldukça kaliteli Cu kaplamaların oluşumu ile açıklanabilir (Şekil 4.2-c, c'). Daha yüksek akımlarda etkinlik bir miktar düşmektedir. Katalitik etkideki düşüş, SEM görüntülerinden de gösterildiği gibi yüksek akımlarda kaplama sırasında C yüzeyinde aşırı gaz oluşumundan dolayı kaliteli Cu kaplamaların elde edilememesi ile açıklanabilir.



Şekil 4.6. 0,1 g (○), 0,5 g (■) ve 1,0 g (Δ) Cu çöktürülmüş C/Cu elektrotların katodik akım-potansiyel (a) ve -200 mV aşırı gerilimde elde edilen Nyquist (b) eğrileri

Şekil 4.4'ten de açık bir şekilde görülebileceği gibi C yüzeyine Cu çöktürmek için en uygun akım 100 mA'dir. Bilindiği gibi, elektrokatalizörlerin katalitik etkileri miktarlarına

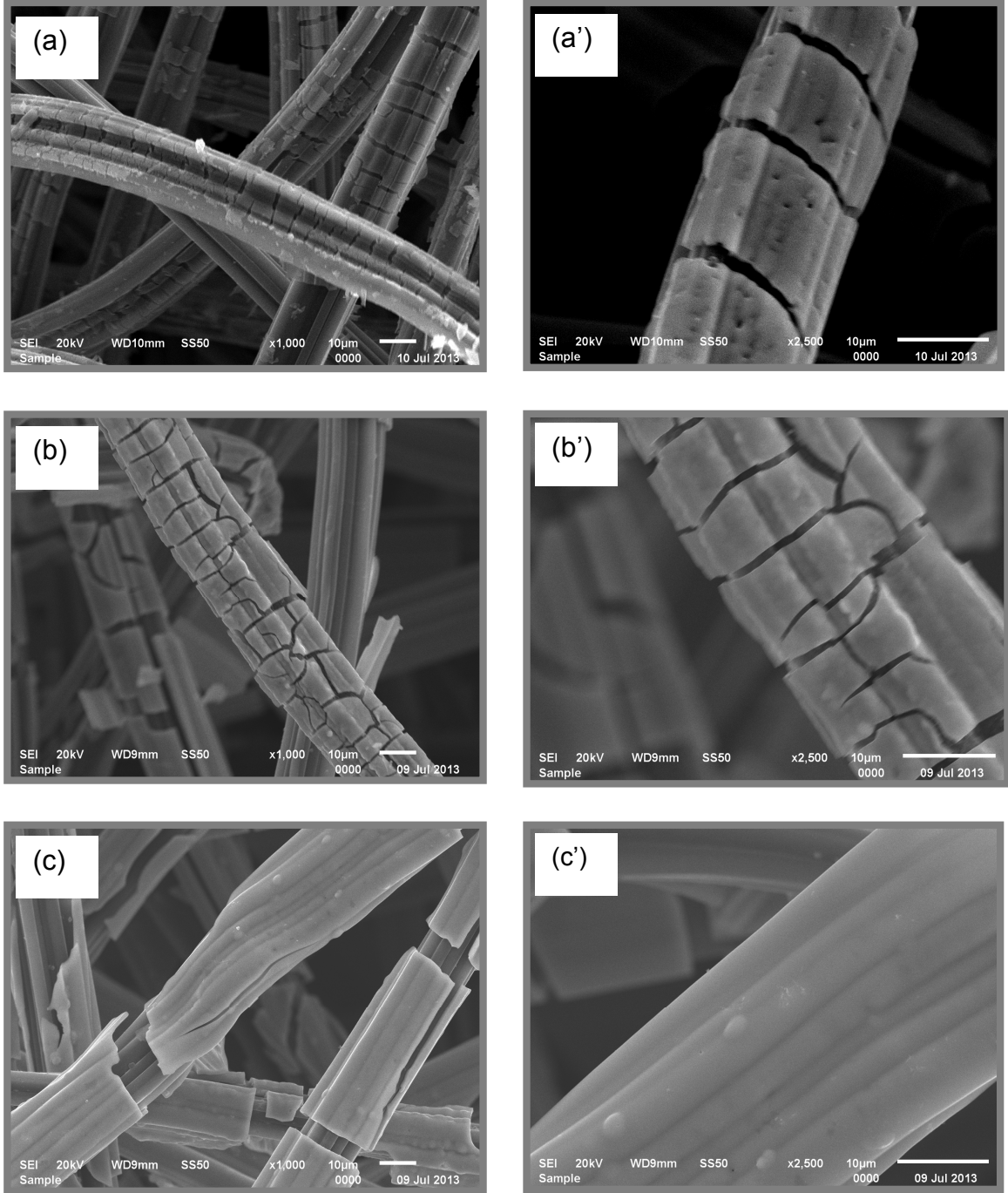
bağlı olarak değişebilmektedir. C yüzeyine çöktürülecek en uygun Cu miktarını belirlemek için, Cu çöktürme için en uygun olduğu belirlenen 100 mA akım farklı sürelerde elektroliz sistemine uygulanarak 0,1, 0,5 ve 1,0 g Cu/g C çöktürülmüştür (Ekonomik açıdan ve elektrotun ağırlığının fazla olmaması için bakır miktarı daha fazla arttırılmamıştır). Hazırlanan elektrotların yüzey görüntüleri Şekil 4.5'te verilmiştir. SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi, çöktürülen bakır miktarı arttırıldığında C yüzeyi daha iyi kaplanmakta ve oldukça kaliteli bir Cu filmleri oluşmaktadır.

100 mA uygulanarak farklı miktarlarda Cu çöktürülmüş C/Cu elektrotların 1,0 M KOH çözeltisinde elde edilen katodik akım potansiyel eğrileri Şekil 4.6a'da ve bu eğrilerden belirlenen elektrokimyasal parametreler Tablo 4.1'de verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, çöktürülen Cu miktarının arttırılması ile elektrotun katalitik etkisinin de arttığı görülmektedir.

Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) yöntemi ile metal yüzeyine uygulanan küçük genlikli alternatif akım yüzey yapısını fazla değiştirmedeğinden metalin direnci ve yüzey yapısı ile ilgili daha doğru sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu yöntem ile belirlenen direnç polarizasyon direnci olup, buna ilave olarak yük transfer direnci, yüzeydeki kaplama veya film direnci ve iyon difüzyonuna karşı gösterilen dirençler ile ilgili bilgi edinilebilmektedir (Erbil 1987; Erbil ve Dehri 2000; Erbil 2004). EIS yöntemi ile elde edilen Nyquist eğrilerinin şekli, elektrokatalizde son derece önemli olan yüzeyin gözenek yapısı hakkında da bilgi verir (Hitz 2001). Nyquist eğrilerinin çapı elektrot yüzeyinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonun direncini verir. Farklı miktarlarda Cu çöktürülmüş C/Cu elektrotların katodik akım-potansiyel eğrilerinden belirlenen ve hidrojen gazı çıkışının gerçekleştiği -200 mV katodik aşırı gerilimde EIS ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen Nyquist eğrileri Şekil 4.6b'de verilmiştir. Elde edilen veriler akım-potansiyel eğrileri ile paralellik göstermekte olup çöktürülen Cu miktarının arttırılması ile direncin azaldığı, elektrotun katalitik etkisinin arttığı görülmektedir. En düşük direnç 1,0 g Cu/g C çöktürülmüş C/Cu elektrotta oluşmakta olup yaklaşık olarak 6,1 Ω 'a düşmektedir. Farklı çöktürme akımlarında ve miktarlarda Cu çöktürülmüş C/Cu elektrotlar için elde edilen deneysel bulgular özetlendiğinde, alkali ortamda hidrojen gazı üretimi için en uygun Cu çöktürülmüş elektrotun 100 mA akım uygulanarak 1,0 g Cu/g C çöktürülmüş C/Cu elektrot olduğu görülmektedir.

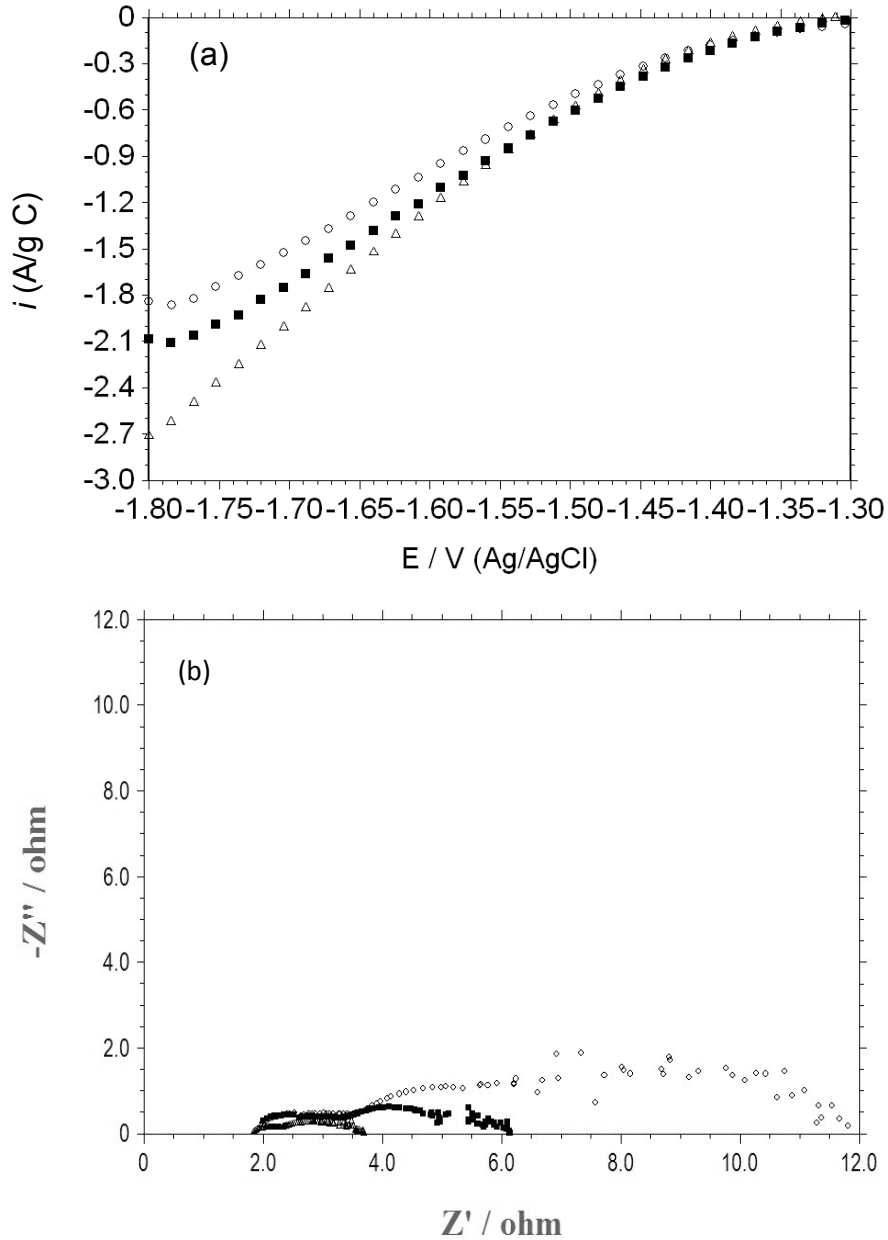
4.2. C/Mo Elektrotların Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Hidrojen Gazı Üretimine Katalitik Etkilerinin İncelenmesi

Elektroliz sistemine 100 mA akım farklı sürelerde uygulanarak 0,1 g, 0,5 g ve 1,0 g Mo/g C çöktürülmüş C/Mo elektrotların SEM görüntüleri Şekil 4.7’de verilmiştir.



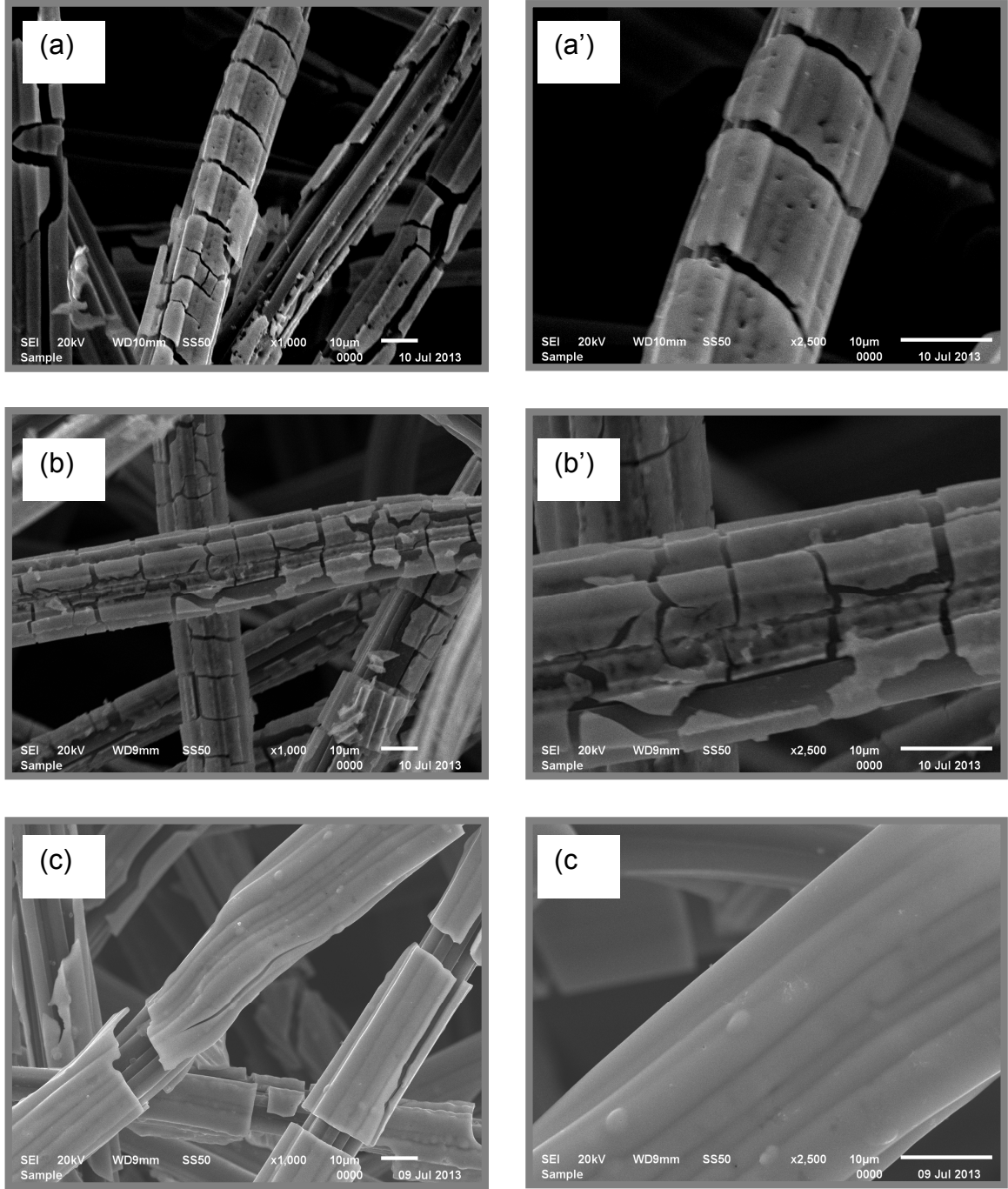
Şekil 4.7. 100 mA akım uygulanarak 0,1 g Mo/1g C (a, a'), 0,5 g Mo/1 g C (b, b') ve 1,0 g Mo/1g C (c, c') çöktürülmüş C/Mo elektrotların 1000 kat ve 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri

Mo kaplamaların yapısının Cu kaplamaların yapısından oldukça farklı olduğu görülmektedir. Bütün Mo miktarlarında, yüzeyde ince Mo filmlerin oluştuğu görülmektedir. Çöktürülen metal miktarı arttırıldıkça C yüzeyi daha iyi yüzeyi kapanmaktadır. Kaplama sırasında C yüzeyinde aynı zamanda hidrojen gazı çıkmasından dolayı Mo filmler kırılmaktadır. Bu yapı yüzey alanını arttırdığından hidrojen gazı üretimi için bir avantaj sağlamaktadır.

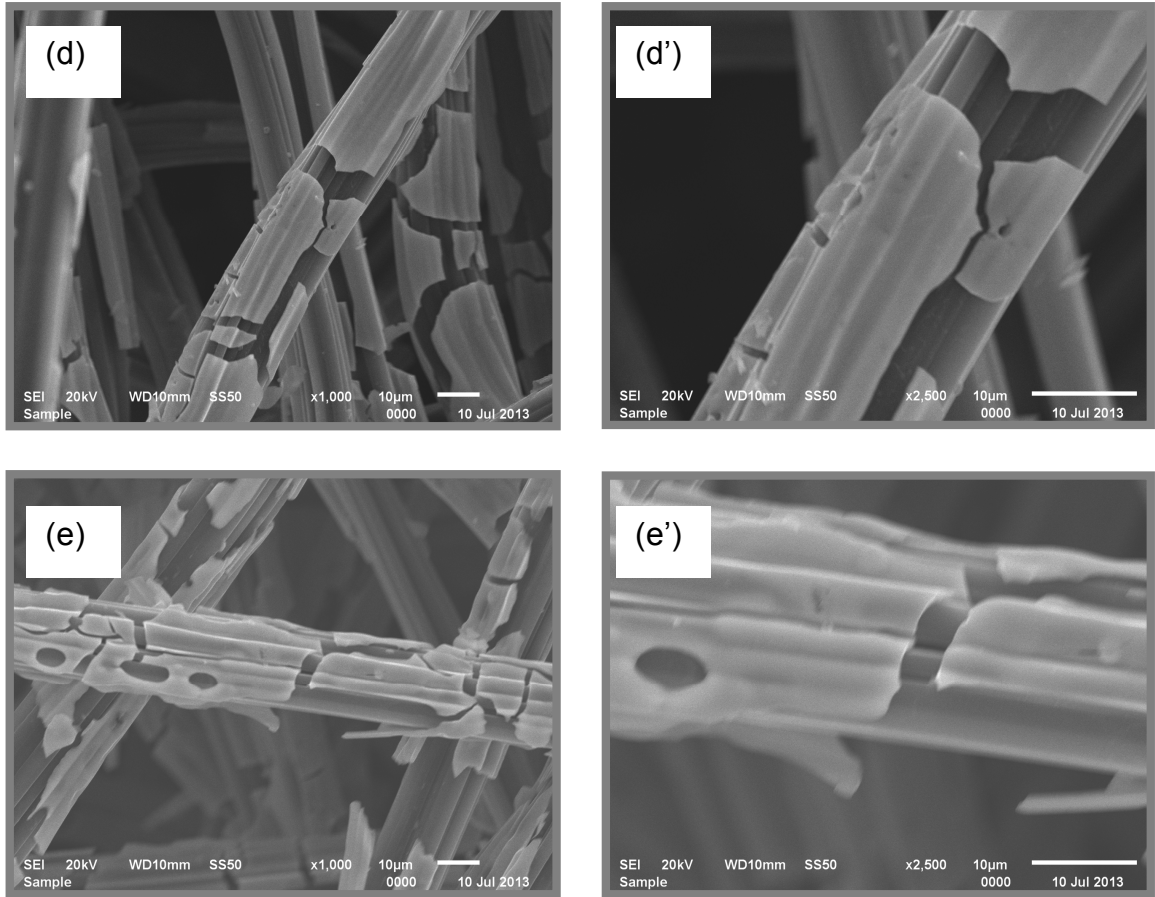


Şekil 4.8. 0,1 g (○), 0,5 g (■) ve 1,0 g (Δ) Mo çöktürülmüş C/Mo elektrotların katodik akım-potansiyel (a) ve -200 mV aşırı gerilimde elde edilen Nyquist (b) eğrileri

Elektroliz sistemine farklı akımlar (25, 50, 100, 150 ve 200 mA) uygulanarak 0,1 g Mo/g C olacak şekilde C yüzeyine Mo çöktürülmüş ve hidrojen gazı üretimi için en uygun çöktürme akım miktarı belirlenmiştir. Farklı akımlarda elde edilen C/Mo elektrotların SEM görüntüleri Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. 25 mA (a, a'), 50 mA (b, b'), 100 mA (c, c'), 150 mA (d, d') ve 200 mA (e, e') akım uygulanarak 0,1 g Mo/1 g C kaplanmış C/Mo elektrotların 1000 kat ve 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri



Şekil 4.9. (Devam) 25 mA (a, a'), 50 mA (b, b'), 100 mA (c, c'), 150 mA (d, d') ve 200 mA (e, e') akım uygulanarak 0,1 g Mo/1 g C kaplanmış C/Mo elektrotların 1000 kat ve 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri

Mo kaplamaların görüntülerinin Cu çöktürülmüş elektrotların yapısından oldukça farklı olduğu görülmektedir. Çok sayıda çatlaktan oluşan ve daha düz yüzeyli yapılar oluşmaktadır. Elektroliz sistemine uygulanan akımın artırılması, yüzeyde daha sıkı ince metal filmlerinin oluşumuna neden olmaktadır. En kaliteli kaplamanın 100 mA'de 1,0 g Mo/g C çöktürülmüş C keçe yüzeyinde olduğu Şekil 4.9-c,c' de verilen SEM görüntülerinden görülebilmektedir. Daha yüksek akımlarda C yüzeyinde gaz çıkışının başlaması nedeni ile filmde kırılmalar tekrar artmaktadır.

0,1 g, 0,5 g ve 1,0 g Mo/g C çöktürülmüş C/Mo elektrotların katodik akım-potansiyel eğrileri Şekil 4.10a'da, bu eğrilerden belirlenen elektrokimyasal parametreler Tablo 4.2'de verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, çöktürülen Mo miktarının artması ile elektrotun katalitik etkisinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Katalitik artış,

katalizör miktarı, yüzey alanı ve ayrıca SEM görüntülerinden de görüleceği gibi çöktürülen Mo filminin kalitesinin artması ile açıklanabilir.

Tablo 4.2. Farklı akımlarda ve miktarlarda Mo çöktürülmüş C/Mo elektrotların katodik akım-potansiyel eğrilerinden 200 mA/g C katodik akımda elde edilen aşırı gerilimler ($-\eta_{200}$) ve 200 mV katodik aşırı gerilimde elde edilen akım yoğunlukları (i_{200})

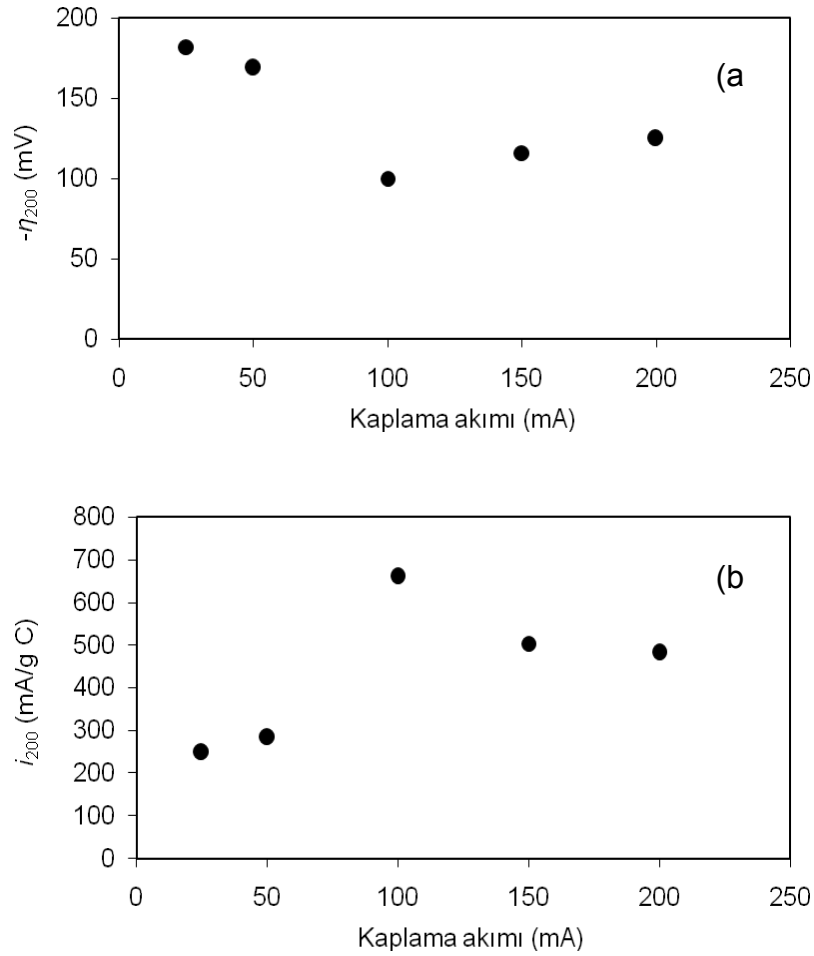
Çöktürülen miktar (g Mo/g C)	Uygulanan akım (mA)	i_{200} (mA/g C)	$-\eta_{200}$ (mV)
0,1	100	173,1	211
0,5	100	545,8	110
1,0	25	248,8	182
1,0	50	272,7	176
*1,0	100	660,0	100
1,0	150	503,2	116
1,0	200	481,8	125

* C elektrotun aynı koşullarda -1.350 V'taki (~Mo ve Cu kaplanmış elektrotlara göre yaklaşık -200 mV aşırı gerilim) akım yoğunluğu 105 mA/g C'dur.

-200 mV aşırı gerilimde elde edilen Nyquist eğrileri, akım-potansiyel eğrileri ile son derece uyum göstermektedir. Çöktürülen katalizörün miktarının artırılması, direnci önemli ölçüde düşürmektedir. Direncin düşmesi, elektrot yüzeyinde hidrojen gazı oluşum reaksiyonunun daha kolay gerçekleşmesi anlamına gelmektedir.

Farklı kaplama akımlarında hazırlanan C/Mo elektrotların akım-potansiyel eğrilerinden elde edilen i_{200} ve $-\eta_{200}$ değerleri Şekil 4.8'de grafiğe geçirilmiştir. Her iki eğri birlikte değerlendirildiğinde hidrojen gazı oluşumu için en uygun çöktürme akımının 100 mA olacağı açık bir şekilde görülebilmektedir. Benzer sonuç Cu çöktürme için elde edilmişti. Bu nedenle ikili MoCu çöktürmelerde en uygun ortak akım, 100 mA akım ile yapılmıştır. C yüzeyine çok fazla metal çöktürüldüğünde C içerisindeki boşluklar kapanacak, elektroliz sisteminde difüzyon aşırı gerilimi artacak ve ayrıca elektrotun gerçek yüzey alanı azalacaktır. Bu nedenle ve ayrıca maliyeti arttıracığından çöktürülen metalin

miktarı 1,0 g/g C ile sınırlandırılmıştır. Mo çöktürülmüş elektrotların katalitik etkisi aynı koşullarda Cu çöktürülmüş elektrotlardan çok daha yüksek olmaktadır (Tablo 4.1 ve 2'yi kıyaslayınız). Ancak, kaplama esnasında gaz çıkışı C yüzeyine çöktürülen molibden filmde kırılmalara neden olmaktadır. Molibden ve bakırın aynı anda çöktürülmesi bu dezavantajı gidermektedir. Aynı zamanda, metaller arasında oluşacak sinerjistik etki ile katalitik etki daha da arttırılmaktadır. Bakır iyonlarının standart indirgenme potansiyeli molibden iyonlarının standart indirgenme potansiyelinden daha poziftir. Bu nedenle molibden iyonlarından daha hızlı indirgenen bakırın iyonlarının kaplama banyosundaki miktarının düşük olması gerekmektedir. Cu ve Mo çöktürülmüş elektrotların elektrokimyasal sonuçları, standart indirgenme potansiyelleri ve yüzey görüntüleri bir arada değerlendirilerek takip eden deneylerin uygun farklı mol oranlarında Mo ve Cu tuzları ile hazırlanan kaplama banyolarında iki metal bir arada çöktürülmüştür.



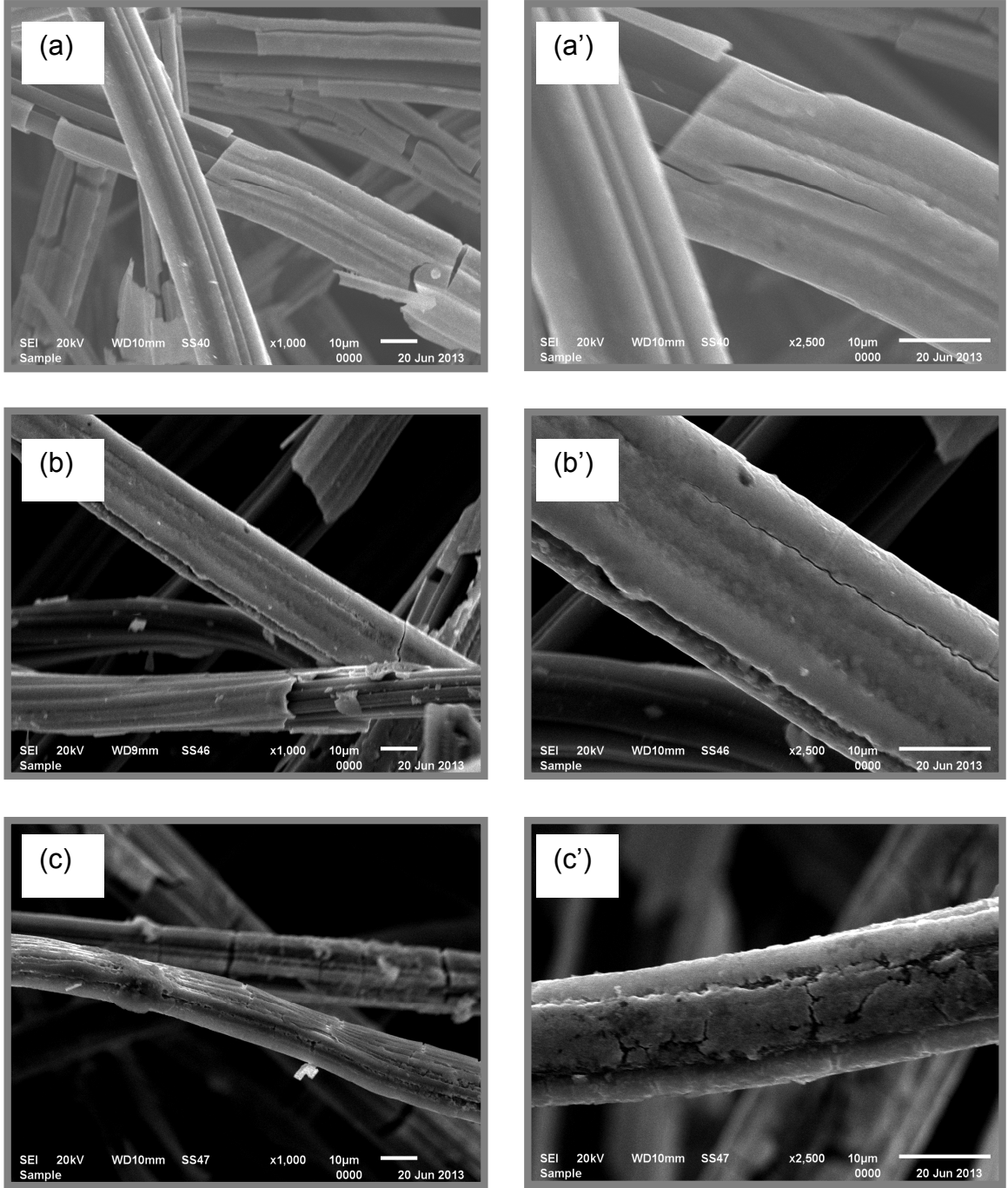
Şekil 4.10. 200 mA/g C'da sistemdeki aşırı gerilim (a) ve -200 mV aşırı gerilimde elde edilen akım yoğunluklarının (b) 1 g Mo çöktürmek için uygulanan kaplama akımı ile değişimi

4.3. C/MoCu Elektrotların Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Hidrojen Gazı Üretimine Katalitik Etkilerinin İncelenmesi

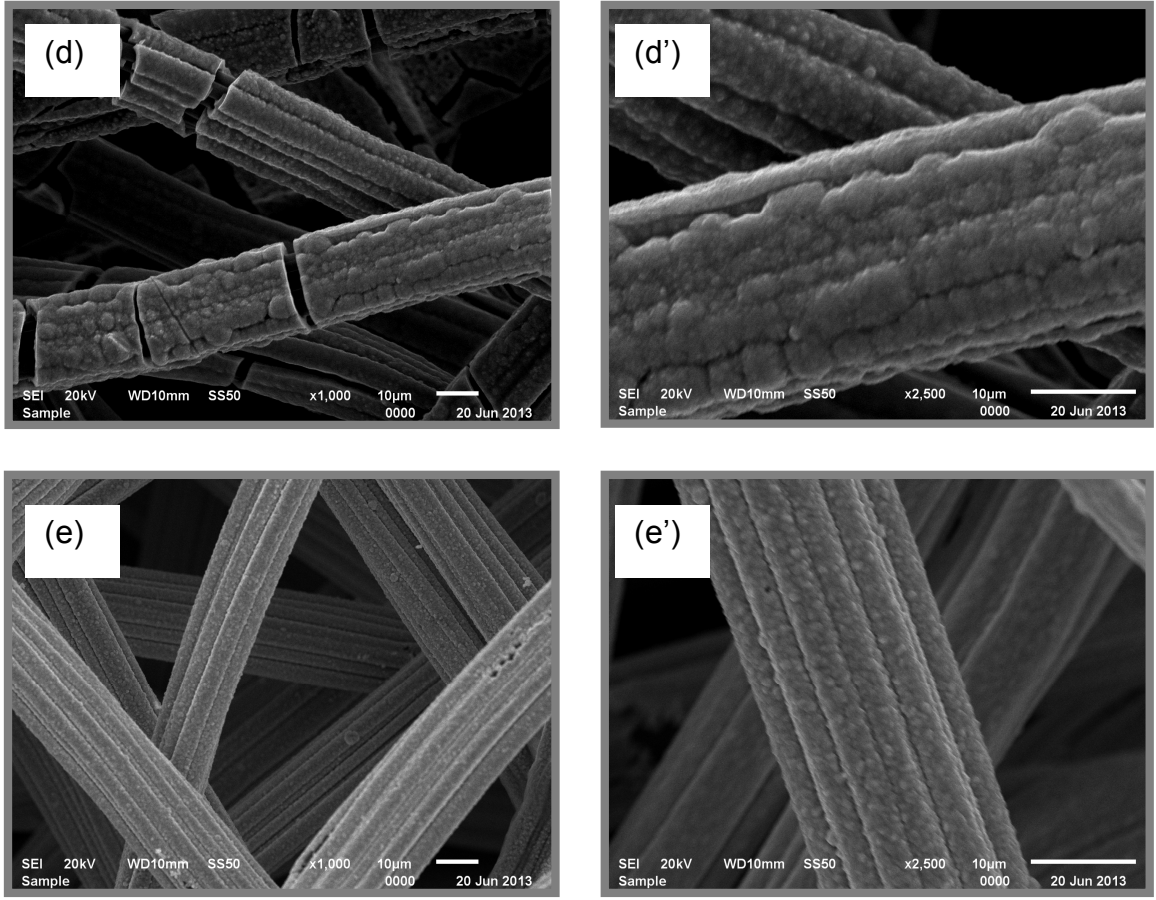
Elektrokimyasal olarak hidrojen gazı üretimi için en uygun olduğu belirlenen 100 mA akımda C yüzeyine farklı oranlarda (Mo:Cu=1:0,001, 1:0,005, 1:0,01, 1:0,05, 1:0,1, 1:0,5) toplam miktarları (teorik) 1,0 g olacak şekilde Mo ve Cu bir arada çöktürülmüştür (C/MoCu). Hazırlanan elektrotlar sırası ile C/MoCu-1, C/MoCu-2, C/MoCu-3, C/MoCu-4, C/MoCu-5 ve C/MoCu-6 olarak simgelenmiştir (3. Materyal ve Metod kısmına bakınız).

İkili alaşım kaplamaların SEM görüntüleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Aynı koşullarda hazırlanmış C/Cu ve C/Mo elektrotlarının yüzey görüntüleri (Şekil 4.5 ve Şekil 4.7) ile kıyaslandığında, MoCu ikili alaşım katalizörlerinin yüzey morfolojisinin metal oranlarına bağlı olarak saf Cu ve saf Mo arasında olduğu görülmektedir. Bakır miktarının çok az olduğu C/MoCu-1 elektrotu C/Mo elektrotuna oldukça benzemektedir. Bununla birlikte, Mo içerisinde Cu katılması ile filmin kalitesi artmaktadır. Bakır miktarının artması ile çatlaklar azalmakta, saf bakırda gözlenen yuvarlak partiküller oluşmaktadır. C/MoCu elektrotta C yüzeyi nanometre boyutunda yuvarlak ve yüzeye oldukça sıkı tutunmuş partiküllerden oluşmaktadır. Bu yapı kataliz uygulamaları için oldukça uygundur.

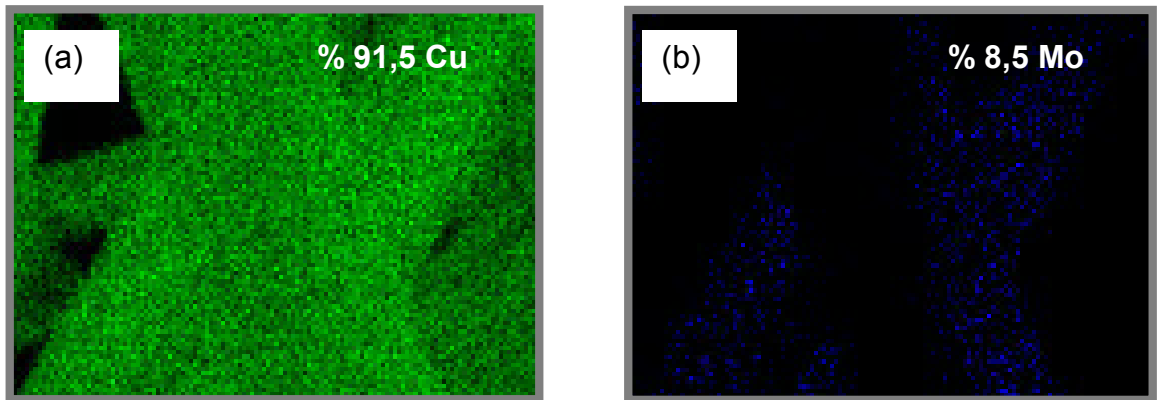
C/MoCu-5 elektrotunun yüzeyindeki metal oranları ve bu metallerin yüzeydeki dağılımları EDX yöntemi ile belirlenmiştir. Mo ve Cu için elde edilen EDX haritalama grafikleri Şekil 4.12’de verilmiştir. EDX yöntemi ile belirlenen Mo ve Cu oranları sırası ile %91,5 ve %8,5’tir. Her iki metalin de yüzeyde oldukça homojen bir şekilde dağıldığı açık bir şekilde görülebilmektedir. Çöktürme banyosunda Cu iyonları miktarının Mo iyonları miktarına göre 10 kat fazla olmasına karşın (1:0,1) C yüzeyinde Cu miktarı Mo miktarının yaklaşık 9 katıdır. Daha önce de değindiği gibi bu fark, iyonlarının standart indirgenme potansiyelinin daha pozitif olması nedeni ile daha hızlı indirgenmesinden kaynaklanmaktadır.



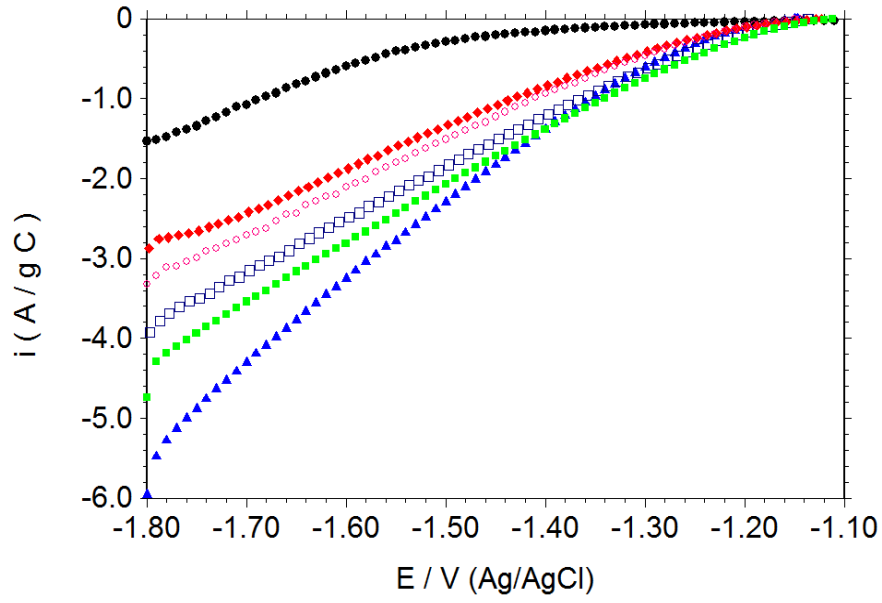
Şekil 4.11. 100 mA akım uygulanak 1,0 g Mo+Cu çöktürülmüş C/MoCu-1 (a, a'), C/MoCu-2 (b, b'), C/MoCu-3 (c, c'), C/MoCu-4 (d, d') ve C/MoCu-5 (e, e') elektrotların 1000 kat ve 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri



Şekil 4.11. (Devam) 100 mA akım uygulanak 1,0 g Mo+Cu çöktürülmüş C/MoCu-1 (a, a'), C/MoCu-2 (b,b'), C/MoCu-3 (c, c'), C/MoCu-4 (d, d') ve C/MoCu-5 (e, e') elektrotların 1000 kat ve 2 500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri



Şekil 4.12. C/MoCu-5 elektrotu yüzeyinde Cu (a) ve Mo (b) metallерinin dağılımı (EDX haritalama görüntüsü)



Şekil 4.13. C (●), C/MoCu-1 (◆) ve C/MoCu-2 (○), C/MoCu-3 (□), C/MoCu-4 (■), C/MoCu-5 (▲) elektrotların katodik akım-potansiyel eğrileri

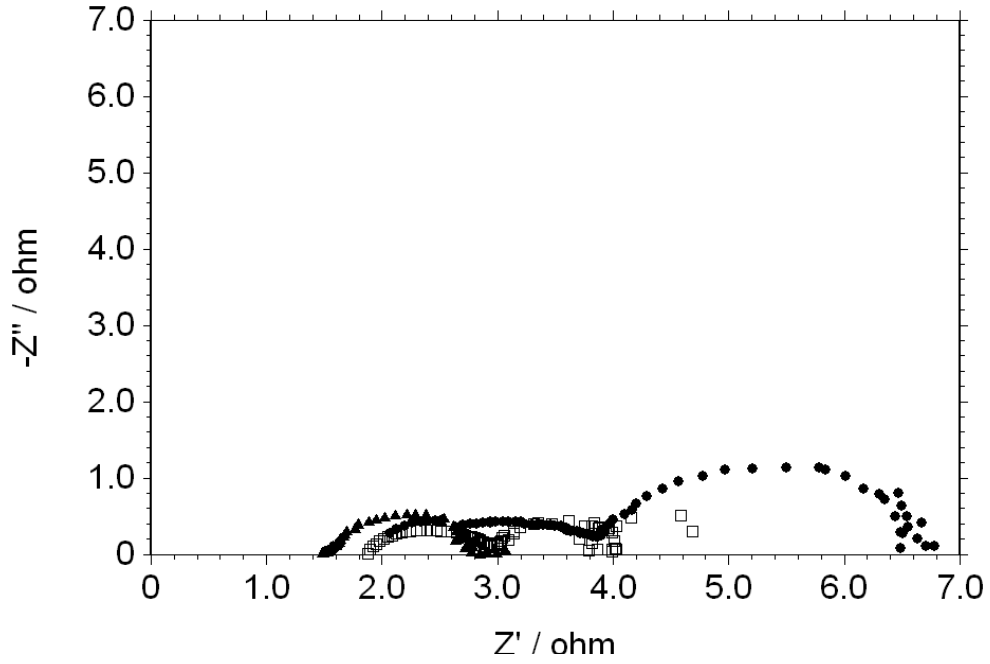
Tablo 4.3. Farklı oranlarda ve miktarlarda Mo ve Cu çöktürülmüş C/MoCu elektrotların elektrokimyasal parametreleri

Elektrot	Çöktürülen toplam MoCu Miktarı, (g/ g C)	i_{200} (mA/g C)	$-\eta_{200}$ (mV)
*C/Cu	1,0	194,6	203
*C/Mo	1,0	660,0	100
C/MoCu-1	1,0	507,4	114
C/MoCu-2	1,0	704,9	88
C/MoCu-3	1,0	795,3	78
C/MoCu-4	1,0	852,8	77
*C/MoCu-5	1,0	895,1	72
C/MoCu-6	1,0	437,8	132

* C elektrotun aynı koşullarda -1.460 V'taki (~MoCu-5 kaplanmış elektrotlara göre yaklaşık -200 mV aşırı gerilim) akım yoğunluğu 219,4 mA/g C'dur.

Farklı oranlarda Mo ve Cu çöktürülmüş elektrotların katodik akım-potansiyel eğrileri Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Karşılaştırma amacı ile metal çöktürülmemiş C keçe elektrotun aynı koşullarda akım-potansiyel eğrisi alınmış ve aynı şekilde verilmiştir. Eğrilerden belirlenen elektrokimyasal parametreler Tablo 4.3'te verilmektedir. Elde edilen veriler incelendiğinde bütün alaşım elektrotların C keçe elektrotun katalitik etkisini oldukça arttırdığı görülmektedir. C elektrotun yüzeyine çok az miktarda Mo ve Cu bir arada çöktürüldüğünde hidrojen gazı oluşumu daha düşük potansiyelerde başlamakta ve belirli bir potansiyelde çok daha yüksek akım yoğunlukları oluşmaktadır. İkili alaşım elektrotların hidrojen üretimi için katalitik etkisi metal bileşimine bağlı olarak değişmektedir. En yüksek etkinlik 1:0,1 (Mo:Cu) oranında hazırlanan çözeltide kaplanan C/MoCu-5 elektrotta elde edilmiştir. SEM ve EDX analizleri (Şekil 4.11 ve 4.12) bu oranda yapılan MoCu kaplamanın oldukça kaliteli ve yüksek yüzey alanına sahip olduğu ayrıca metallerin elektrotun yüzeyine hemen hemen homojen dağıldığını göstermiştir. Daha yüksek oranlarda bakır tuzları ilave edildiğinde kaplama banyosunda çökeltmeler gözlenmiş, kaplamanın kalitesi düşmüştür. Tablo 4.3'ten de görüldüğü gibi Mo:Cu oranı 1:0,5 olduğunda (C/MoCu-6), elektrotun katalitik etkisi Cu/MoCu-5 elektrotunun katalitik etkisine oranla hemen hemen yarı yarıya düşmüştür. Bu nedenle, Mo:Cu oranı 1:0,1 ile sınırlandırılmıştır.

Elektrotların katodik akım-potansiyel eğrilerinden belirlenen hidrojen gazının oluştuğu -100 mV aşırı gerilimde Nyquist eğrileri elde edilmiş ve Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Cu içeren bütün elektrotların Nyquist eğrilerinin çapının yani direncinin azaldığı, katalitik etkisinin arttığı görülmektedir. En düşük direnç 1:0,1 mol miktarı oranında hazırlanan çözeltide çöktürülmüş C/MoCu-5 elektrotunda oluşmaktadır. Bu sonuçlar C yüzeyinin çok az miktarda MoCu ile modifiye edilmesi elektrotun katalitik etkisini önemli ölçüde değiştireceğini göstermektedir.



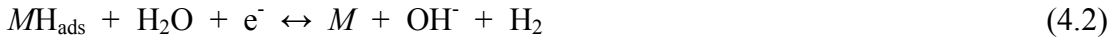
Şekil 4.14. C/MoCu-1 (●), C/MoCu-3 (□) ve, C/MoCu-5 (Δ) elektrotların -200 mV aşırı gerilimde elde edilen Nyquist eğrileri

Literatürde elde edilen verilere göre geçiş metallerinin alaşımları hazırlandığında metallerin elektronik yapılarının değişmesi sonucu sinerjistik etki ile yüksek katalitik özelliğe sahip elektrotlar elde edilebilmektedir (Rosalbino vd 2005). Bu şekilde aynı zamanda genellikle daha gözenekli yüzeyler elde edilebilmektedir. Hidrojen gazı çıkışını en iyi katalizleyen metal Pt olmasına karşın (Lasia 2003) Pt'in yüksek fiyatı bu metalin saf elektrot halinde pratikte kullanımını güçleştirmektedir (Yadav 2010; Habibi vd 2008; Paunovic 2009). Literatürde Pt metali yerine daha ucuz elektrot belirlemek veya Pt miktarının mümkün olduğunca düşürülerek elektrot hazırlanması çalışmaları yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bununla birlikte hazırlanacak elektrotların yüksek yüzey alanına sahip olması gerekmektedir. C elektrotu oldukça yüksek yüzey alanına sahip olup bu metalin elektrot yapımında kullanılması hem ucuz olması hem de yüzey alanının artırılması için ekstra çalışma gerektirmediğinden ekonomik olacaktır. Bu çalışmada oldukça pahalı olan Pt metalinin yerine yüksek yüzey alanına sahip elektrot yüzeyine daha ucuz metaller olan Mo ve Cu değişik oranlarda bir arada çöktürülerek etkinliği yüksek daha ucuz katot malzemesi hazırlanması amaçlanmıştır. Ayrıca Mo metali hidrojen için etkin ancak çok daha ucuz Cu ile değişik oranlarda bir arada

çöktürülerek hem kullanılan Mo miktarı düşürülmüş hem de sinerjistik etki ile elektrotun etkinliği daha da arttırılmıştır.

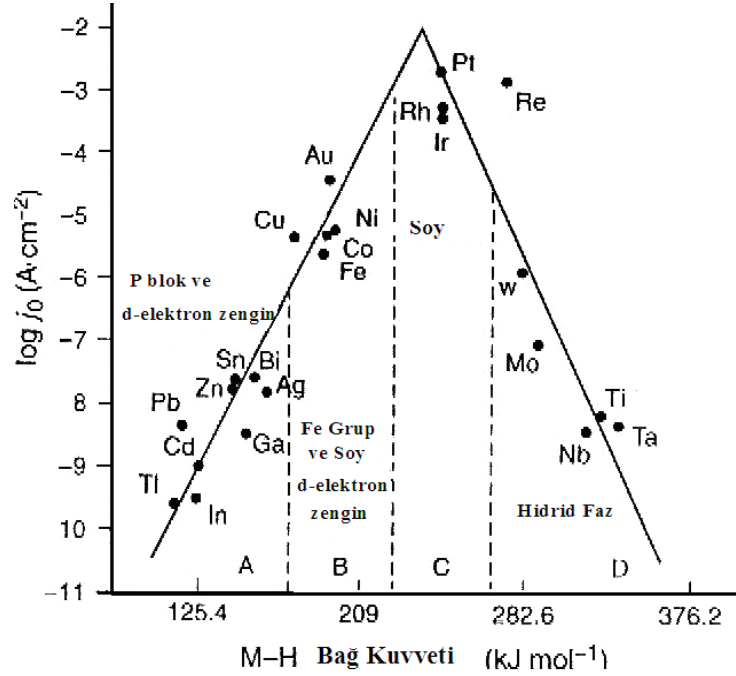
Elektrokimyasal kaplama yöntemi kullanılarak oluşturulan alaşım kaplamalar ile elektrotların elektrokatalitik aktivitesi artırılabilir. Özellikle geçiş metalleri ile oluşturulan kompozit metal kaplamalar son yıllarda yaygın olarak çalışılmaktadır (Chen ve Lasia 1993; Birry ve Lasia 2004). Brewer-Engel teorisine göre, birden fazla metal bir arada kaplandığında oluşturulan alaşım içinde yarı dolu d orbitallerinde oluşan bağlar saf metaldekine göre daha kararlı ve güçlü oluşmaktadır (Vielstich vd 2005). Jaksic alaşımlardaki ve kompozit kaplamalardaki HER aktifliğini bu teoriye dayanarak açıklamaktadır (Jaksic 2001). Brewer-Engel teorisi katının iç yapısı ile ilişkilendirilen bir özellik olup birçok çalışmada elektrokatalitik aktifliğin yüzey özellikleri ile ilişkili olduğu belirtilmektedir (Belanger ve Vijn 1987; Gonzalez vd 1993). Yüzey pürüzlülüğü ve gözenekliliğinin elektrokatalitik etkinliği arttırmada etkili olduğu belirtilmektedir.

Alkali ortamda hidrojen gazı oluşum reaksiyonu aşağıda verilen 3 basamakta oluştuğu kabul edilmektedir.



Yukarıdaki reaksiyonlara göre hidrojen indirgenmesi $M\text{-H}$ (M : metal) oluşumu ile başlamaktadır. Buna göre eğer hidrojenin adsorpsiyon serbest enerjisi yüksek ise (4.1) hidrojen gazı oluşumunun hızlı olması beklenir. Ancak hidrojen adsorpsiyon serbest enerjisinin yüksek olması hidrojenin desorpsiyonunu zorlaştırır. Bu nedenle hidrojen oluşum reaksiyonunun hızlı olması için katot materyali (4.1) ve (4.2 veya 4.3) reaksiyonları arasında bir denge kurulmalıdır (Elumalai 2002; Navvaro-Flores 2005; Rosalbino 2005). Yani suyun ayrışması için $M\text{-H}_2\text{O}$ bağının yeteri kadar güçlü olması gerekir. Aynı zamanda hidrojenin kolay bir şekilde metal yüzeyinden ayrılabilmesi için de $M\text{-H}$ etkileşiminin zayıf olması gerekmektedir. Bazı metallerin üzerinde gerçekleşen $2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{H}_2$ yük değişimi akım yoğunlukları $M\text{-H}$ bağ enerjisine karşı grafiğe geçirilmiş ve Şekil 4.15'te verilmektedir. Volkan eğrisi olarak adlandırılan bu grafikten de, görüldüğü

gibi $M-H$ bağ enerjisi arttıkça yük değişimi akım yoğunluğu (i_0) önce artmakta sonra azalmaktadır.



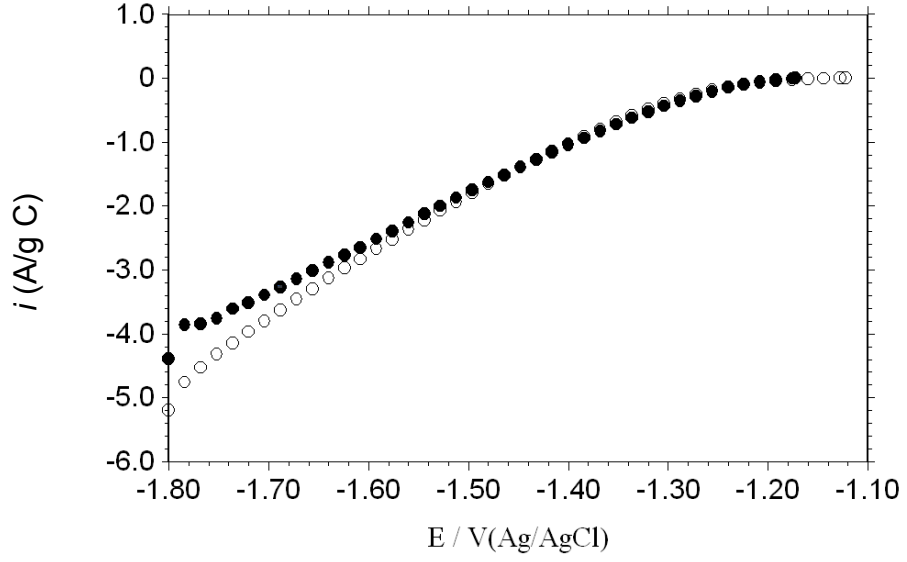
Şekil 4.15. Volkan eğrisi

Mo'nin ve Cu metalinin yük değişim akım yoğunluğu yüksektir. Bu iki metalin $M-H$ bağ enerjileri orta büyüklüktedir. Elde edilen deneysel bulgulara göre Mo ve Cu bir arada çöktürüldüğünde elde edilen elektrotların hidrojen gazı üretimine katalitik etkisi, bu iki metal tek başına çöktürüldüğünde elde edilen elektrotların katalitik etkisinden çok daha yüksek olduğunu göstermektedir. Dolayısı ile MoCu çöktürülmüş elektrotun yüksek etkinliği elektrotların yüzey alanının artması ve Mo ile Cu arasındaki sinerjistik etki ile açıklanabilir (Solmaz vd 2012; Solmaz, 2013).

4.4. Elektrotun Katalitik Etkisinin Zamanla Kararlılığı

Pratik uygulamalar için elektrotun katalitik etkisinin zamanla azalmaması gerekmektedir. Hidrojen gazı üretimi için en etkin olduğu belirlenen C/MoCu-5 elektrotunun katalitik etkisinin zamanla değişimi elektroliz sistemine $-1,20$ V (Ag/Ag/Cl) potansiyel altında 24 saat boyunca test edilmiştir. Elektrotun etkinliğindeki değişim başlangıç ve 24 saat sonunda elde edilen akım-potansiyel eğrilerinin kıyaslanması ile Şekil 4.16'da

değerlendirilmiştir. Elde edilen eğriler kıyaslandığında elektrotun uzun süreli elektroliz sisteminde kullanılması durumunda katalitik etkisinin hemen hemen değişmediği görülmektedir.



Şekil 4.16. C/MoCu-5 (○) elektrotun başlangıç (○) ve (●) -1,20 V (Ag/AgCl) 24 saat uygulandıktan sonra alınan akım-potansiyel eğrileri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Geleceğin enerjisi olarak kabul edilen hidrojen, değişik yöntemler kullanılarak elde edilebilmektedir. Hidrojen gazı elde edilmesinde en uygun yöntem suyun elektrolizi olmakla beraber bu yöntemle hidrojen üretimi mevcut koşullarda sistemde oluşan aşırı gerilimler nedeni ile ilave enerji harcandığından ekonomik değildir. Elektrolizde kullanılan katalizörlerin pahalı olması yöntemin maliyetini daha da arttırmaktadır. Hidrojen elde edilmesinde düşünülen sistem güneş enerjisi ile suyun elektrolizidir. Ancak bu sistemin verimli olabilmesi için aşırı gerilimi düşük, katalitik etkisi yüksek, ekonomik ve zamanla kararlı elektrot malzemelerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Literatür çalışmaları Pt grubu metallerin hidrojen gazı çıkış reaksiyonunu en iyi katalizlediğini göstermiştir. Ancak Pt ve diğer Pt grubu metallerin (Ru, Pd vb.) pahalı olması nedeni ile bu metallerin endüstriyel uygulamalarda kullanılması uygun değildir. Son yıllarda, Pt grubu metallerine alternatif olarak Ni, Fe, Co, Mo, Cu gibi geçiş metallerin elektroliz sistemlerinde kullanılabilirliği ile ilgili yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Kataliz bir yüzey işlemi olduğuna göre yüzeyin mümkün olduğu kadar yüksek olması istenir. Bu amaçla karbon nano tüpler çok yaygın bir şekilde kullanılmakta ancak bu malzemelerin maliyeti çok fazla olduğundan ekonomik olarak pratik uygulamalarda kullanımı uygun değildir.

Bu çalışmada elektroliz sistemindeki aşırı gerilimleri düşürmek ve hidrojen gazı oluşum reaksiyonu hızını artırmak için geniş yüzey alanına sahip C'nin yüzeyi öncelikle farklı miktarlarda ve farklı akımlar uygulanarak Cu ve Mo çöktürülmüştür. Belirlenen uygun çöktürme akımı ve metal miktarında Mo ve Co farklı oranlarda çöktürülerek elektrotun katalitik etkisi daha da arttırılmaya çalışılmıştır. Hazırlanan elektrotlar katot olarak kullanılmış ve hidrojen gazı üretimine katalitik etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

C yüzeyine farklı çöktürme akımlarında ve miktarlarda Cu çöktürülerek hazırlanan C/Cu elektrotlarının yüzey yapıları ve hidrojen gazı oluşumuna katalitik etkisi elektrotların

hazırlanma koşullarına bağlı olarak değişmektedir. En yüksek katalitik etkinlik 100 mA akımda 1,0 g Cu/g C çöktürülmüş *C/Cu elektrotta elde edilmiştir.

Benzer koşullar Mo kaplı elektrotlarda elde edilmiştir. Ancak, Mo çöktürme sırasında C yüzeyinde hidrojen gazı çıkışından dolayı, Mo ince filmlerinde çok sayıda delik ve kırılmalar oluşmaktadır. C/Mo elektrotların katalitik etkileri hazırlanma koşullarına bağlı olarak değişmekle birlikte C/Cu elektrotların katalitik etkilerinden daha iyidir.

100 mA akımda C yüzeyinde Mo:Cu mol oranları 1:0,001, 1:0,005, 1:0,01, 1:0,05, 1:0,1 ve 1:0,5 olacak şekilde $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ tuzları ve kütlece %5 $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ karıştırılarak hazırlanan çözelti banyolarında Mo ve Cu bir arada çöktürüldüğünde hazırlanan elektrotlar sadece Cu veya Mo çöktürülmüş elektrotlara göre daha düşük hidrojen aşırı gerilimi göstermekte ve katalitik etkileri çok daha artmaktadır.

İkili MoCu kaplamaların yüzey yapıları saf Cu ve saf Mo kaplamaların arasında değişmektedir. MoCu ikili katalizörlerin katalitik etkisi çöktürülen metal oranlarına bağlı olup çalışılan koşullarda en etkin elektrot çöktürme banyosunda Mo ve Cu tuzlarının mol oranının 1:0,1 olduğu (*C/MoCu-5) koşullarda elde edilmiştir.

C/MoCu-5 elektrotu elektroliz sisteminde katot olarak kullanıldığında elektrotun hidrojen gazı oluşumuna katalitik etkisi zamanla hemen hemen sabit kalmıştır.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, yüksek katalitik etkisi, zamanla kararlı olması ve özellikle Pt grubu metallere göre çok daha ucuz olması nedeni ile *C/MoCu-5 elektrotunun elektroliz sisteminde katot olarak kullanılması önerilmiştir.

KAYNAKLAR

Abbaspour A., Mirahmadi E., Electrocatalytic hydrogen evolution reaction on carbon paste electrode modified with Ni ferrite nanoparticles, *Fuel* 104 (2013) 575–582, 2013.

Acaroğlu, M., Biyokütle enerji üretimi ve uygulamaları, Yüksek Lisans ders notları, Konya, 1998.

Ananthachar., V and Dufy, J. E., Efficiencies of hydrogen storage systems on board fuel cells vehicles electrodes in alkaline solution. *Electrochimica Acta*, 39: 1757-1761, 2004.

Anonymous, Bmft., Renewable energy Germany, 1992.

Aydemir S., Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen retim Yntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstits, Edirne-1998

Barbir, F., Transition to renewable energy systems with hydrogen as an energy carrier. *Energy*, 34, 3, 308-312, 2008.

Baykara, Z.S., Enerji Sektrnde Hidrojen, Tbitak MAM “Kritek 2001” Kritik Teknolojiler Sempozyumu Kitabı, İstanbul, 2002.

Belanger, A. and Vijn, A.K., Electrocatalysis of the hydrogen evolution reaction with nickel tin alloys and intermetallics, *Int.J.Hydrogen Energy*, 12, 227-233, 1987.

Berberoğlu N., Türkiye'nin Ekonomik Gelişmesinde Elektrik Enerjisi Sorunu, E.İ.T.İ.A Yayını No:245/165 Eskişehir, s.9, 1982.

Burchardt, T, The Hydrogen Evolution Reaction On NiPx Alloys. *Int. J.Hydrogen Energy*, 25: 627–634, 2000.

Bockris, J.O'M. and Veziroğlu, T.N., Asolar Economy For U.S.A. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8, 323-340, 1983.

Chen, L. and Laisia, A., Ni-Al Powder electrocatalyst for hydrogen evolution - effect of heat-treatment on morphology, composition, and kinetics, *J Electrochem Soc*, 140, 2464-2473, 1993.

Cho K., Kwon H., Effects of electrodeposited Co And Co-P Catalysts on the hydrogen generation properties from hydrolysis of alkaline sodium borohydride solution. *Catalysis Today*, 120: 298-304, 2007.

Crnkovic F.C., Machado S.A.S., Avaca L.A., International Journal of Hydrogen Energy, Volume 29, Issue 3, Pages 249-254, 2004.

Çağlayan N., Fe-Pt Çöktürülmüş Karbon Keçe Elektrotun Bazik Ortamda Hidrojen Gazı Çıkışına Katalitik Etkisinin İncelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi, Danışman. Yrd. Doç. Dr. Ramazan Solmaz), Bingöl, 2013.

Çelik V., Oral E., Hidrojen Yakıtlı Motor Teknolojisi, Tütev dergisi Şubat 2006

Çınar, H.Y., Yenilenebilir Enerjide Mevzuat Sorunları Bağlamında Teşvik Mekanizması, www.etisan.net., 2010.

Danaee I., Jafarian M., Forouzandeh F., Gobal F., Mahjani M.G., Electrocatalytic oxidation of methanol on Ni and NiCu alloy modified glassy carbon electrode. International Journal of Hydrogen Energy, 33: 4367-4376, 2008.

Dehri İ., Erbil M., The Effect of Relative Humidity on the Atmospheric Corrosion of Defective Organic Coating Materials With a new Approach: An EIS Study, Corrosion Science 42, 969-978 (2000).

Döner A., Karcı İ. ve Kardaş G., Effect of C-felt supported Ni, Co and NiCo catalysts to produce hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy Volume37, Issue 12, June 2012, Pages 9470–9476, 2012.

Döner A., Solmaz R. ve Kardaş, G., Enhancement of hydrogen evolution at cobalt–zinc deposited graphite electrode in alkaline solution, Int J Hydrogen Energy, 36, 7391-7397, 2011.

El-Meligi Ismail A.A., Hydrogen Evolution Reaction of Low 78Carbon Steel Electrodes in HCl Acid as a Source for Hydrogen Production. Inretnational Journal of Hydrogen Energy, 34, 1, 91-97, 2009.

Elumalai, P., Vasan, HN., Munichandraiah, N. and Shivashankar, S.A., Kinetics of hydrogen evolution on submicron size Co, Ni, Pd and Co–Ni alloy powder electrodes by d.c. polarization and a.c. impedance studies. J Appl Electrochem, 32, 1005–10, 2002.

Encyclopedia Britannica Vol. 6

Erbil M., Alternatif Akım (AC) İmpedansı Yöntemiyle Korozyon Hızı Belirlenmesi, Doğa Tr.Kim.D. 11, 3, 100-111 (The Determination of Corrosion Rates by the AC Impedance Tecnique), 1987

Gonzalez, E.R., Tremiliosi-Filho, G. and Giz, M.J., Curr. Top. Electrochem, 2, 167, 1993.

Gündoğdu A., Ni-Pt çöktürülmüş karbon keçe elektrotun bazik ortamda hidrojen gazı çıkışına katalitik etkisinin incelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi, Danışman. Yrd. Doç. Dr. Ramazan Solmaz), Bingöl, 2012.

Gürten A., Kayakirilmaz K., October International Journal of Hydrogen Energy, Volume 28, Issue 10, Pages 1083-1088, 2003.

Habibi, B., Pournaghi-Azar, MH. and Razmi, H., Abdolmohammad-Zadeh, H., Electrochemical preparation of a novel, effective and low cost catalytic surface for hydrogen evolution reaction. Int J Hydrogen Energy, 33, 2668–2678, 2008.

Herraiz-Cardona, I., Ortega, E., Vazquez-Gomez, L. and Perez-Herranz, V., Electrochemical characterization of a NiCo/Zn cathode for hydrogen generation, International Journal of Hydrogen Energy, 36,11578-11587, 2011.

Hitz, C., Lasia, A., Experimental Study and Modeling Of Impedans Of The HER On Porous Ni Electrodes. J. Electroanalytical Chemistry, 500:213–212, 2001.

Jaksic, M.M., Hypo–Hyper-D-Electronic interactive nature of interionic synergism in catalysis and electrocatalysis for hydrogen reactions, Int.J.Hydrogen Energy, 26, 559-578, 2001.

Karcı, İ., Karbon keçe üzerine Ni ve NiCo çöktürerek hidrojen gazı çıkışına etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 2010.

Karaosmanoğlu, F. ve Çetinkaya, M., TürkiyeEnerji Profili ve Hidrojen, 2002.

Kardaş, G. ve Solmaz, R., Hidrojen gazı eldesi için katalitik yüzeyli elektrot geliştirilmesi, 106T542 No’lu TÜBİTAK Projesi, 2008.

Kardaş, G., Yazıcı, B. and Erbil. M., Effect of some primary alcohols on hydrogen yield on platinum cathode in chloride solution, International Journal of Hydrogen Energy, 28, 11, 1213-1218, 2003.

Kojira, K. and Kiryu-Shi., Agriculture and Horticulture Plant Growth Prometed By Carbon Fibers ,High Performance Textiles, 3-4, 1999.

Koyunoğlu, S., Dindar, B. VE İçli, S., Fotokimyasal ve fotobiyolojik hidrojen üretimi.V. Ulusal Temiz Enerji üretimi Sempozyumu Bildiri Kitabı. cilt:2, 705-709 İstanbul: Su Vakfı Yayınları, 2004.

Krstajic, N., Popovic, M., Grgur., B., Vojnovic, M. and Sepa, D., On the kinetics of the hydrogen evolution reaction on nickel in alkaline solution Part I. The mechanism. J. Electroanalytical Chemistry, 512: 16–26, 2001.

Krolikowski, A., Wiecko A., Electrochimica Acta, Volume 47, Issues 13-14, Pages 2065-2069, 2002.

Lasia A., Hydrogen evolution reaction. Vielstich w, lamm a, gasteiger ha., editors. Handbook of fuel cells: Fundamentals Technology and applications. England, 416-40, 2003.

Midilli, A., AY, M., Dincer, I. and Rosen, M.A., On hydrogen and hydrogen energy strategies: I: current status and needs. *Renew Sust Energ Rev*, 9, 3, 255-271, 2005.

Momirlana, M. and Veziroğlu, T.N., The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *Int J Hydrogen Energy*, 2005.

Navvaro-Flores, E., Chong, Z. and Omanovic, S., Characterization of Ni, NiMo, NiW and NiFe electroactive coatings as electrocatalysts for hydrogen evolution in an acidic medium, *J Mol Catal A-Chem*, 26, 179-97, 2005.

Paunovic, P., Radev, I., Dimitrov, AT., Popovski, O., Lefterova, E., Slavcheva, E. and Jordanov, SH., New nano-structured and interactive supported composite electrocatalysts for hydrogen evolution with partially replaced platinum loading. *Int J Hydrogen Energy*, 34, 2866–2873, 2009.

Raoof, J.B., Ojani, R., Kiani, A. and Rashid-Nadimi, S., Fabrication of highly porous Pt coated nanostructured Cu-foam modified copper electrode and its enhanced catalytic ability for hydrogen evolution reaction, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 452–458, 2010.

Rosalbino F., Delsante S., Borzone G., Angelini E., Correlation of microstructure and catalytic activity of crystalline Ni-Co-Y alloy electrode for hydrogen Reaction in alkaline solution. *Journal of Alloys And Compounds*, 429: 270-275, 2007.

Sherif, S.A., Barbir, F and Veziroğlu, T.N., Towards a Hydrogen Economy. *The Electricity Journal*, 18, 6, 62-76. *Hydrogen Energy*, 30, 7, 795-802, 2005.

Supicova M., Ornakova R., Kupkova M., Kabatova M., Electrolytical modification of fe hollow spheres by Cu, Ni and Ni-Cu binary coatings. *Coating Techonology*, 195. 130-137, 2005.

Song L.J., Meng H.M., *International Journal of Hydrogen Energy*, In Press, Corrected Proof, Available online 31 August 2010 National Research Centre, Physical Chemistry Department, Dokki, Cairo, PO Box 12622, Egypt, 2010.

Solmaz, R., Electrochemical preparation and characterization of C/Ni-NiIr composite electrodes as novel cathode materials for alkaline water electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.11.101, 2012.

Solmaz R., Hidrojen eldesi ve Metanol Elektrokoksasyonu için Katalitik Elektrot Geliştirilmesi, Doktora Tezi (Tez Danışmanı Gülfeza Kardaş), Adana, 2009.

Solmaz R., Değişik Metal Elektrotlarla Elektrokimyasal Yolla Asidik Ve Bazik Ortamlarda Hidrojen Gazı Eldesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 2004.

Solmaz, R., Döner, A. ve Kardaş, A., Preparation, characterization and application of alkaline leached CuNiZn ternary coatings for long-term electrolysis in alkaline solution, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 10045-10049, 2010.

Solmaz, R., Döner, A. and Kardaş, G., Electrochemical deposition and characterization of NiCu coatings as cathode materials for hydrogen evolution reaction, *Electrochemistry Communications*, 10, 2008, 1909–1911, 2008.

Solmaz, R., Döner, A. and Kardaş, G., 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, 2009.

Solmaz, R., Döner, A., Şahin, İ., Yüce, A.O., Kardaş, G., Yazıcı, B. and Erbil, M., The stability of NiCoZn electrocatalyst for hydrogen evolution activity in alkaline solution during long-term electrolysis, *Int J Hydrogen Energy*, 34, 7910-7918, 2009.

Solmaz, R. and Kardas G., Electrochemical deposition and characterization of NiFe coatings as electrocatalytic materials for alkaline water electrolysis, *Electrochim Acta*, 54, 3726-3734, 2009.

Solmaz, R. and Kardaş, G., Hydrogen evolution and corrosion performance of NiZn coatings. *Energy Convers Manage*, 48:583-591, 2007.

Solmaz, R. and Kardaş, G., Fabrication and characterization of NiCoZn–M (M Ag, Pd and Pt) electrocatalysts as cathode materials for electrochemical hydrogen production, *Int J Hydrogen Energy*, 36:12079-12087, 2011.

Solmaz, R., Kardaş, G., Yazıcı, B. ve Erbil, M., NiZn kaplı yumuşak çelik elektrotlarda alkali ortamda hidrojen gazı eldesi. *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları / Enerji Yönetimi Sempozyumu*, Kayseri, 2005.

Solmaz, R., Kardaş, G., Zaimoğlu, Z., Yazıcı, B. ve Erbil, M., Nikel çöktürülmüş karbon keçe elektrotun alkali ortamda hidrojen gazı çıkışına katalitik etkisinin incelenmesi, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 535-541, 2008.

Turonova A., Galova M., Parameteres influencing the electrodeposition of a ni-cu coating on fe powders. 1. effect of the electrolyte composition and current density. *S. S. Electrochem*, 7. 684-688, 2003.

Türkmen Ü., Değişik Elektrotların (fe, fe/ni, fe/ni-zn, fe/ni-al) Hidrojen Gazı eldesine Etkilerinin Araştırılması Yüksek Lisans Tezi (Tez Danışmanı Gülfeza KARDAŞ), 2006.

Url-1, http://tr.wikipedia.org/wiki/Yenilenebilir_enerji, (Erişim tarihi: 22.07.2013)

Url-2, <http://www.enerji.gov.tr/>, (Erişim tarihi: 15.07.2013)

Url-3, <http://www.kozanbilgi.net>, Hidrojen Enerjisi, (Erişim tarihi: 10.07.2013)

Url-4, <http://www.gazi.edu.tr/~enyilmaz/hidrojen>, Yakıt Hücreleri, (Erişim tarihi: 12.07.2013)

Url-5, <http://www.bilgiustam.com/hidrojen-nasil-elde-edilir/> (Erişim tarihi: 15.07.2013)

Url-6, <http://www.bilgesam.org/tr/> Prof. Dr. M. Oktay ALNIAK, Hidrojen Enerjisi Hakkında Düşünceler, 2009 (Erişim tarihi: 17.07.2013)

Url-7, www.tusiad.org.tr, 1998. Türk Sanayicileri ve İşadamları Derneği, "21. Yüzyıla Girenken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi", TÜSİAD-T/98-12/239, İstanbul, 1998 (Erişim tarihi: 17.07.2013)

Url-8, www.youthforhab.org.tr/yayinlar/enerji, 2010. (Erişim tarihi: 17.07.2013)

Ültanır, M.Ö., Temiz enerji olarak hidrojen yakıtı ve teknolojisi, Türkiye 7. Enerji kongresi, teknik oturum tebliğleri, cilt 3, Ankara, 1997.

Ültanır M. Özcan, 21. Yüzyıla Girenken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi, İstanbul: TÜSİAD Yayını, s.277, 1998.

World Energy Outlook IEA, 2012.

Xie Z., He P., Du L., Dong F., Dai K., Zhang T., Comparison of four nickel-based electrodes for hydrogen evolution reaction, *Electrochimica Acta* 88 (2013) 390– 394, 2013.

Xu Y., The hydrogen evolution reaction on single crystal gold electrode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 1, 77-83, 2009.

Xue F.-Q., Zhang H.-T., Wu C.-X., Ning T., Xu X., Performance and mechanism of prussian blue (pb) modified carbon felt electrode. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19,3, 594-599. 2009.

Veziroğlu, T. N. and Barbir, F., Hydrogen: the wonder fuel, *Int. J. Hydrogen Energy*, 17391-404, 1992.

Veziroglu TN, Şahin S. 21st Century's energy: Hydrogen energy system. *Energy Conversion and Management.*, 49, 1820-1831, 2008.

Yadav, J.B., Park, JW., Cho, YJ. and Joo, O.S., Intermediate hydroxide enforced electrodeposited platinum film for hydrogen evolution reaction. *Int J Hydrogen Energy* 35, 10067-10072, 2010.

Yazıcı, B. ve Tatlı, G., Bazı Metallerin 2N NaCl İçindeki Katodik Davranışları. *Türk Kimya Dergisi*, 19: 12-19, 1995.

Yazıcı, B., Tatlı, G., Galip, H. and Erbil, M., Investigation of suitable cathodes for the production of hydrogen gas by electrolysis, *Int. J. Hydrogen Energy*, 20 12, 957–965, 1995.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Bingöl'ün Solhan ilçesinde doğdu. İlkokulu Solhan Merkez İlkokulu, Ortaokul ve Lise öğrenimini Solhan Lisesinde tamamladı. 2000 yılında kazandığı İnönü Üniversitesi Eğitim Fakültesi Kimya Öğretmenliği Bölümü'nden 2005 yılında mezun oldu. 2007-2009 yılları arasında Gümrük Müsteşarlığında memur olarak çalıştı. 2009 yılında Muş Korkut Çok Programlı Lisesine Kimya Öğretmeni olarak atandı. 2011 yılından itibaren Bingöl Solhan Sabiha Bahçivan Anadolu Lisesinde Kimya Öğretmeni olarak çalışmaktadır.