

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**PEM ELEKTROLİZÖRLER İÇİN TİN İLE KAPLANMIŞ
ANOT GAZ DİFÜZYON ELEKTROTLARI
GELİŞTİRİLMESİ**

**Hazırlayan
Emre ÖZDOĞAN**

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet Fatih KAYA**

Yüksek Lisans Tezi

**Şubat 2025
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**PEM ELEKTROLİZÖRLER İÇİN TİN İLE KAPLANMIŞ
ANOT GAZ DİFÜZYON ELEKTROTLARI
GELİŞTİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Emre ÖZDOĞAN**

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet Fatih KAYA**

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2023-12811 kodlu proje ve 1649B022315393 numaralı TÜBİTAK-BİDEB 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

**Şubat 2025
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Emre ÖZDOĞAN

İmza

“PEM Elektrolizörler için TiN ile Kaplanmış Anot Gaz Difüzyon Elektrotları Geliştirilmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Emre ÖZDOĞAN

Danışman

Doç. Dr. Mehmet Fatih KAYA

Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Gamze GENÇ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden, destek ve yönlendirmelerini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Fatih KAYA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarında yanımda olan ve her zorluğu birlikte aşmamı sağlayan Erciyes Üniversitesi H2FC Hidrojen Enerjisi Araştırma Grubu'na ve tüm ekip arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesine, FYL-2023-12811 kodlu proje ile katkı sağlayan Erciyes Üniversitesi'ne ve 1649B022315393 numaralı TÜBİTAK-BİDEB 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında desteklerini sunan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkürlerimi borç bilirim.

Hayatımın her anında olduğu gibi bu süreçte de sabır, hoşgörü ve desteklerini esirgemeyen sevgili annem Hatice ÖZDOĞAN, babam Hayri ÖZDOĞAN ve kardeşlerime, sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi ifade etmek isterim.

Emre ÖZDOĞAN

Ocak 2025, KAYSERİ

PEM ELEKTROLİZÖRLER İÇİN TİN İLE KAPLANMIŞ ANOT GAZ DİFÜZYON ELEKTROTLARI GELİŞTİRİLMESİ

Emre ÖZDOĞAN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2025
Danışman: Doç. Dr. Mehmet Fatih KAYA

ÖZET

Bu çalışmada, Polimer Elektrolit Membran (PEM) elektrolizörler için Titanyum Nitrür (TiN) kaplamalı anot gaz difüzyon elektrotlarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın ana hedefi, TiN kaplamalarının elektrot yüzeyinde elektrokimyasal performansı artırarak, korozyon direncini güçlendirmektir. Farklı kalınlıklarda TiN kaplamaları (0.7 μm , 1.1 μm , 1.5 μm , 2.0 μm) ve farklı mesh yapıları (1000, 1200, 1400, 1600) kullanılarak, elektrotlar üzerindeki korozyon davranışı ve elektrokimyasal reaksiyonlar incelenmiştir. Yapılan elektrokimyasal testler, LSV ve Tafel analizleri, TiN kaplamalarının elektrot yüzeyinde korozyon direncini artırdığını ve özellikle F4 (2.0 μm TiN) kaplamalı yüzeylerin en yüksek elektrokimyasal performansı sergilediğini ortaya koymuştur. F1_1000 numunesinin empedans değeri 120 Ω iken, F4_1000 numunesinde bu değer 40 Ω 'a düşmüştür. Benzer şekilde, F0_1000 numunesinde akım yoğunluğu 6.3 A/cm² iken, F4_1000 numunesi 8.2 A/cm² ile en yüksek akım yoğunluğunu göstermektedir. Ayrıca, yüksek yüzey alanına sahip 1000 mesh yapılarının, TiN kaplamalarının etkisini belirginleştirerek elektrokimyasal performansı önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. 1000 mesh yapısındaki F4_1000 numunesi, en düşük empedans değeri ve en yüksek elektrokimyasal aktiviteyi sergileyerek diğer mesh yapılarından daha iyi bir performans göstermektedir. Bu bulgular, TiN kaplamaların elektrokimyasal iyileştirmeler ve korozyon direnci artışı sağladığını ve bu özelliklerinin PEM elektrolizörlerinin maliyetini düşürmek için önemli bir malzeme seçeneği sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: TiN kaplama, PEM elektrolizörü, anot gaz difüzyon elektrodu, korozyon direnci, elektrokimyasal performans, mesh yapıları,

DEVELOPMENT OF TIN-COATED ANODE GAS DIFFUSION ELECTRODES FOR PEM WATER ELECTROLYZERS

Emre ÖZDOĞAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, February 2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Fatih KAYA

ABSTRACT

This study aims to develop Titanium Nitride (TiN) coated anodic gas diffusion electrodes for Polymer Electrolyte Membrane (PEM) electrolyzers. The main objective of the study is to enhance the electrochemical performance of TiN coatings on the electrode surface, thereby improving corrosion resistance. Different thicknesses of TiN coatings (0.7 μm , 1.1 μm , 1.5 μm , 2.0 μm) and different mesh structures (1000, 1200, 1400, 1600) were used to investigate the corrosion behavior and electrochemical reactions on the electrodes. Electrochemical tests, including LSV and Tafel analyses, have shown that TiN coatings increase the corrosion resistance on the electrode surface, with the F4 (2.0 μm TiN) coated surfaces exhibiting the highest electrochemical performance. The impedance value of the F1_1000 sample was 120 Ω , while it decreased to 40 Ω for the F4_1000 sample. Similarly, the current density for the F0_1000 sample was 6.3 A/cm², whereas the F4_1000 sample exhibited the highest current density of 8.2 A/cm². Furthermore, high surface area structures, such as the 1000 mesh, have been observed to enhance the effect of TiN coatings, significantly improving the electrochemical performance. The F4_1000 sample with a 1000 mesh structure demonstrated the lowest impedance and the highest electrochemical activity, outperforming other mesh structures. These findings indicate that TiN coatings provide electrochemical improvements and increased corrosion resistance, offering a promising material option for reducing the cost of PEM electrolyzers.

Keywords: TiN coating, PEM electrolyzer, anodic gas diffusion electrode, corrosion resistance, electrochemical performance, mesh structures.

İÇİNDEKİLER

PEM ELEKTROLİZÖRLER İÇİN TİN İLE KAPLANMIŞ ANOT GAZ DİFÜZYON ELEKTROTLARI GELİŞTİRİLMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Enerji.....	2
1.1.1. Küresel Enerji Arzı İle İlgili Zorluklar.....	3
1.1.2. Yenilenebilir Enerji ve Hidrojen	3
1.1.3. Hidrojen Üretim Yöntemleri.....	5
1.1.3.1. Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi.....	6
1.1.3.1.1. Doğal Gaz Reformasyonu.....	6
1.1.3.1.2. Kömür Gazlaştırma	7
1.1.3.1.3. Karbon Yakalama ve Depolama (CCS)	7
1.1.3.1.4 Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretiminin Geleceği.....	8
1.1.3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Hidrojen Üretimi	8
1.1.3.2.1 Suyun Elektrolizi.....	8
1.1.3.3. Hidrojen Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması	11
1.2. PEM Elektrolizörler	14
1.2.1. PEM Elektrolizörlerin Çalışma Prensibi ve Avantajları	14
1.2.1.1. Elektrokimyasal Reaksiyonlar ve Kinetik	15

1.2.2. PEM Elektrolizörlerin Bileşenleri	17
1.2.2.1. PEM.....	18
1.2.2.2. Anot ve Katot Elektrotları.....	18
1.2.2.3. Gaz Difüzyon Elektrotları (GDE).....	19
1.2.2.4. Bipolar Plakalar ve Yardımcı Bileşenler	20
1.3 Anot GDE ve Fonksiyonu	21
1.4. Literatür Çalışması	22

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Paslanmaz Çelik Elektrotların TiN Kaplanması	28
2.2. Elektrokimyasal Karakterizasyon.....	31
2.3. Yüzey Karakterizasyonu	32

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Elektrokimyasal Analizler Öncesi Yüzey Karakterizasyonu.....	33
3.2. Elektrokimyasal Analizler.....	37
3.3. Elektrokimyasal Analizler Sonrası Yüzey Karakterizasyonu	46

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma	54
4.2. Sonuç ve Öneriler	55
KAYNAKÇA	62
ÖZGEÇMİŞ.....	69

KISALTMALAR

AEL	: Alkalın Elektrolizör
BP	: Bipolar Plaka
CCS	: Karbon Yakalama ve Depolama
CH ₄	: Metan
CO	: Karbon Monoksit
CO ₂	: Karbon Dioksit
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
EIS	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
GDE	: Gaz Difüzyon Elektrotu
IPCC	: Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
ICR	: Elektrik Kontak Direnci
KOH	: Potasyum Hidroksit
LSV	: Lineer Kaydırmalı Voltametri
PEM	: Polimer Elektrolit Membran
PEMFC	: Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi
PEMWE	: Polimer Elektrolit Membranlı Su Elektrolizi
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
RES	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
SMR	: Buhar Metan Reformasyonu
SOEC	: Katı Oksit Elektrolizör
SS	: Paslanmaz Çelik
SS316	: 316 Kalite Paslanmaz Çelik
j	: Reaksiyon Akım Yoğunluğu
j ₀	: Düzeltilmiş Denge Akım Yoğunluğu
α	:Yük Taşıyıcısının Geçiş Katsayısı
n	: Reaksiyona Giren Elektron Sayısı
F	: Faraday Sabiti
η	: Aşırı Gerilim
R	: Gaz Sabiti
T	: Sıcaklık Değeri

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.	Hidrojen üretim yöntemlerinin karşılaştırılması	13
Tablo 2.	Numunelerin adlandırma tablosu	29
Tablo 3.	EİS Eşdeğer Devresi.....	44

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.	Üretim yöntemlerine göre hidrojenin renklere göre sınıflandırılması	5
Şekil 2.	Tek hücreli bir PEM elektrolizörün bileşenleri.....	17
Şekil 3.	H2FC Hidrojen Enerjisi Araştırma Grubu tarafından tasarlanan PEM Elektrolizör Hücresi	24
Şekil 4.	Hazırlanan numuneler	29
Şekil 5.	Kimyasal Buhar Biriktime (CVD) yöntemi	30
Şekil 6.	Elektrokimyasal analizlerde kullanılan üç elektrot yöntemi	31
Şekil 7.	F0_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel dağılım grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü	33
Şekil 8.	F1_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel dağılım grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü	34
Şekil 9.	F2_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel dağılım grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü	35
Şekil 10.	F3_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel dağılım grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü	36
Şekil 11.	F4_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü	37
Şekil 12.	Mesh yapılarının ((a) 1000, (b) 1200, (c) 1400, (d) 1600) farklı kaplama kalınlıklarında EIS davranışları.....	38
Şekil 13.	Mesh yapılarının ((a) 1000, (b) 1200, (c) 1400, (d) 1600) farklı kaplama kalınlıklarında Tafel eğrileri.....	40
Şekil 14.	Mesh yapılarının ((a) 1000, (b) 1200, (c) 1400, (d) 1600) farklı kaplama kalınlıklarında LSV eğrileri	42
Şekil 15.	F0_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü	46
Şekil 16.	F1_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü	47
Şekil 17.	F2_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü	48

Şekil 18.	F3_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü	49
Şekil 19.	F4_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü	50
Şekil 20.	Elektrotların XRD desenleri: (a) F1_1000, (b) F2_1000, (c) F3_1000, (b) F4_1000.....	51



GİRİŞ

Son yıllarda, hidrojen üretimi, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile daha fazla önem kazanmaktadır. Hidrojen, temiz enerji üretimi ve depolama açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Polimer Elektrolit Membranlı (PEM) elektrolizörler, suyu doğrudan hidrojen ve oksijene ayırarak hidrojen üretiminde verimli bir çözüm sunmaktadır. Ancak, bu sistemlerin verimliliği, elektrot yüzeylerinin performansı ve dayanıklılığına büyük ölçüde bağlıdır. PEM elektrolizörlerinde kullanılan elektrot yüzeylerinin yüksek elektrokimyasal aktiviteye sahip olması ve korozyon direncinin yüksek olması gerekmektedir. Bu bağlamda, Titanyum Nitrür (TiN) kaplamaları, elektrot yüzeylerinin performansını artıran ve korozyon direncini iyileştiren önemli bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. TiN kaplamaları, elektrokimyasal reaksiyonları hızlandırma kapasitesine sahip olmasının yanı sıra, yüzeyde korozyona karşı koruyucu bir bariyer oluşturur. Bu çalışmanın amacı, 0,7 μm , 1,1 μm , 1,5 μm ve 2,0 μm kalınlıklardaki TiN kaplamalarının ve 1000, 1200, 1400, 1600 mesh yapılarının elektrokimyasal performans ve korozyon direnci üzerindeki etkilerini incelemektir. TiN kaplamalar, CVD yöntemi ile, 0,2 μm kalınlığında Cr ara katmanı kullanılarak uygulanmıştır. Bu kaplamanın elektrot yüzeyleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma, TiN kaplamalarının özellikle PEM elektrolizörlerinin verimliliğini artırma potansiyeline sahip olduğunu ve enerji sistemlerinde uzun ömürlü, dayanıklı elektrot yüzeyleri elde edilmesine katkı sağladığını göstermeyi amaçlamaktadır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Enerji

Enerji, modern toplumların temel taşıdır ve ekonomik kalkınma, yaşam kalitesi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynamaktadır. İnsanlığın varoluşundan bu yana, enerji üretimi ve kullanımı her zaman toplumsal ve teknolojik gelişmelerin merkezinde yer almıştır. Günümüzde enerji, sanayiden ulaşım sektörüne, konutlardan tarıma kadar birçok alanda hayatımızı yönlendiren bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik, ısınma, soğutma ve ulaşım gibi temel ihtiyaçların karşılanmasında enerji, vazgeçilmez bir kaynak haline gelmiştir [1, 2]. Ancak, enerji kaynaklarının kullanımı ve bunların çevresel etkileri, giderek daha fazla tartışılan bir konu haline gelmiştir. Küresel enerji talebinin hızla artması [3], fosil yakıtların tükenmesi ve iklim değişikliği gibi sorunlar, enerji sistemlerinde köklü değişimlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Fosil yakıtların neden olduğu çevresel sorunlar, sera gazı emisyonlarının artması ve hava kirliliği, bu sorunların başında gelmektedir [4]. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi giderek artmaktadır. Güneş, rüzgar, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal gibi kaynaklar, fosil yakıtlara alternatif olarak geliştirilmesi gereken ve çevresel sürdürülebilirliği artıran potansiyele sahip enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji, sadece çevre dostu bir alternatif sunmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji güvenliğini sağlama ve ekonomik büyümeye katkıda bulunma kapasitesine de sahiptir [5]. Ancak, bu geçiş süreci birçok zorlukla karşı karşıyadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, enerji depolama sistemleri, şebeke altyapısı ve politika destekleri gibi unsurlar, başarılı bir geçiş için kritik öneme sahiptir [6, 7].

1.1.1. Küresel Enerji Arzı İle İlgili Zorluklar

21. yüzyıl, küresel enerji sistemlerinin ciddi dönüşüm ihtiyaçlarıyla karşı karşıya olduğu bir dönem olarak öne çıkmaktadır. Enerjiye olan talep, dünya nüfusunun artması ve sanayileşme sürecinin hızlanmasıyla birlikte giderek büyümektedir [8]. Aynı zamanda, enerji üretiminde kullanılan geleneksel fosil yakıtların çevresel etkileri, iklim değişikliğinin önemli bir itici gücü olarak karşımıza çıkmaktadır [9]. Bu durum, küresel çapta çevresel sürdürülebilirliği tehdit eden sera gazı emisyonlarının artmasına yol açmıştır. Fosil yakıtların yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu da önemli bir zorluk oluşturmaktadır [10]. Rüzgâr, güneş ve biyokütle gibi kaynaklar, geleneksel enerji üretim yöntemlerine kıyasla çevreye daha az zarar verse de, bu teknolojilerin sürdürülebilir bir şekilde geniş çapta kullanılabilmesi için altyapı ve teknoloji geliştirme gereksinimleri oldukça fazladır. Özellikle enerji depolama, şebeke altyapısının modernizasyonu ve enerji verimliliğini artıran politikalar bu geçiş sürecinde kritik öneme sahiptir [11, 12]. Enerji arz güvenliği, ülkelerin enerji kaynaklarına olan bağımlılıklarını azaltma çabaları, karbon emisyonlarını düşürme hedefleri ve uluslararası anlaşmalar arasında bir denge kurmayı zorunlu kılmaktadır. Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası girişimler, ülkelerin bu konularda ortak hareket etmesini teşvik ederken, küresel çapta koordineli eylemlerin hayata geçirilmesi hâlâ büyük bir mücadele alanı olarak karşımıza çıkmaktadır [13, 14].

Bu zorluklar, enerji sistemlerinin yeniden şekillendirilmesi için yeni teknolojilere, altyapı yatırımlarına ve politik reformlara olan ihtiyacı göstermektedir. Sürdürülebilir ve güvenli bir enerji geleceği inşa edebilmek için bu zorlukların üstesinden gelinmesi gerekmektedir [15].

1.1.2. Yenilenebilir Enerji ve Hidrojen

Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltmak ve sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişi sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Güneş, rüzgar, biyokütle, hidroelektrik ve jeotermal gibi kaynaklar, enerji üretiminde karbon emisyonlarını büyük ölçüde azaltmakta ve iklim değişikliğiyle mücadelede kilit bir rol oynamaktadır [16]. Ancak bu enerji kaynaklarının doğal olarak kesintili olması (örneğin, güneşten sadece gündüz saatlerinde yararlanılabilmesi veya rüzgarın sürekli olmayışı), enerji arz güvenliği ve kesintisiz enerji sağlanması açısından büyük zorluklar

yaratmaktadır [17]. Bu zorluklar, enerji depolama sistemlerinin önemini daha da artırmaktadır.

Yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonunda kullanılan bazı enerji depolama çözümleri arasında bataryalar, pompaj depolama hidroelektrik sistemleri ve süperkapasitörler yer almaktadır. Lityum-iyon bataryalar, özellikle elektrikli araçlar ve şebeke entegrasyonu için yaygın bir depolama seçeneği haline gelmiştir [18]. Ancak, lityum-iyon bataryaların sınırlı kapasitesi ve uzun süreli enerji depolama için yetersiz kalabilmesi, geniş ölçekli enerji sistemlerinde yeni çözümler arayışını tetiklemektedir. Diğer bir alternatif olan pompaj depolama hidroelektrik sistemleri, büyük enerji depolama kapasitesine sahip olsa da coğrafi sınırlamalar nedeniyle her yerde uygulanabilir değildir. Bu bağlamda, hidrojen enerjisi, uzun vadeli enerji depolama sorunlarına çözüm sunan güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [19, 20].

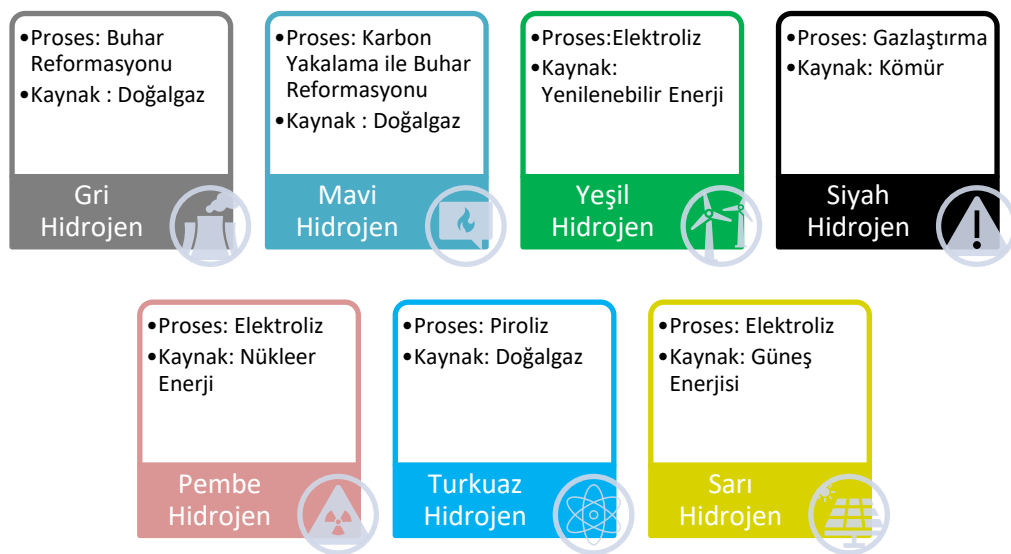
Hidrojen, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları ile üretildiğinde, neredeyse sıfır emisyonlu bir enerji taşıyıcısı olarak önemli bir rol oynamaktadır [21]. Diğer enerji depolama teknolojilerine kıyasla hidrojenin birçok avantajı bulunmaktadır [22]:

- **Yüksek Enerji Yoğunluğu:** Hidrojen, birim kütle başına diğer enerji depolama sistemlerine kıyasla daha fazla enerji taşıyabilir. Bu, uzun vadeli enerji depolama ve büyük ölçekli enerji üretimi için ideal bir seçenektir.
- **Uzun Süreli Depolama Kapasitesi:** Bataryalar enerji depolamak için kısa süreli çözümler sunarken, hidrojen, mevsimsel depolama gibi uzun süreli enerji depolama ihtiyaçlarını karşılayabilir. Özellikle yenilenebilir enerjinin fazla üretildiği dönemlerde hidrojen üretimi yapılabilir ve talebin yüksek olduğu zamanlarda kullanılmak üzere saklanabilir.
- **Çok Yönlülük:** Hidrojen sadece elektrik üretiminde değil, aynı zamanda ulaştırma, sanayi ve ısınma gibi farklı sektörlerde de kullanılabilir. Bu, enerji depolama ve kullanımında esneklik sağlar.
- **Karbon Yoğun Sektörlerde Kullanılabilirlik:** Çelik üretimi gibi enerji yoğun endüstrilerde fosil yakıtların yerini alabilecek bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, ulaştırma sektöründe yakıt hücreli araçlar için temiz bir yakıt alternatifi sunar.

Hidrojenin bu avantajları, sadece enerji depolama çözümlerini güçlendirmekle kalmaz, aynı zamanda fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve karbon emisyonlarını sıfıra indirme hedeflerine ulaşmada önemli bir araç haline getirir [23]. Bu nedenle, hidrojen enerjisi, sürdürülebilir enerji sistemlerinin geleceği için kilit bir unsur olarak kabul edilmektedir.

1.1.3. Hidrojen Üretim Yöntemleri

Hidrojen, bir enerji taşıyıcısı olarak dünyada enerji dönüşümü konusunda sürdürülebilirliği ile daha fazla önem kazanmaktadır [22]. Ancak hidrojen doğada serbest halde bulunmadığı için çeşitli yöntemlerle üretilmesi gerekmektedir [21]. Bu üretim yöntemleri, kullanılan enerji kaynağına bağlı olarak çevresel etkiler ve maliyetler açısından farklılık göstermektedir. Günümüzde hidrojen üretiminde başlıca iki yöntem öne çıkmaktadır: fosil yakıtlardan elde edilen hidrojen (buhar metan reformasyonu) ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen hidrojen (suyun elektrolizi vs.). Fosil yakıtlardan hidrojen üretimi, şu an dünya genelinde en yaygın kullanılan yöntem olmasına rağmen, önemli miktarda karbon emisyonuna neden olmaktadır [24]. Öte yandan, yenilenebilir enerji kaynaklarından su elektrolizi ile üretilen hidrojen, çevre dostu bir alternatif sunarak sıfır karbon emisyonu potansiyeline sahiptir [25]. Şekil 1’de üretim yöntemlerine göre hidrojenin renk sınıflandırması gösterilmiştir.



Şekil 1. Üretim yöntemlerine göre hidrojenin renklere göre sınıflandırılması

Şekil 1 incelendiğinde hidrojen, üretildiği yönteme ve kaynağına bağlı olarak renk sınıflandırılmasına tabii tutulmaktadır. Sıfır karbon emisyonuna sahip hidrojen üretim yöntemi olan yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrolizörler vasıtasıyla üretilen hidrojen yeşil renkle adlandırılırken, kömürün gazlaştırılması prosesine dayalı üretilen hidrojen ise siyah renkle kodlanır.

1.1.3.1. Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi

Hidrojen üretimi, enerji sistemlerinde karbon emisyonlarını azaltma ve enerji güvenliğini artırma potansiyeline sahip olsa da günümüzde hidrojenin büyük bir kısmı hala fosil yakıtlardan üretilmektedir [26]. Fosil yakıtlardan hidrojen üretimi, özellikle doğal gaz ve kömür gibi kaynaklar üzerinden gerçekleşen reforming ve gazlaştırma süreçlerine dayanır. Bu yöntemler ekonomik olarak avantajlı olsa da yüksek karbon emisyonları üretmeleri nedeniyle çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler olarak değerlendirilmemektedir [24, 27].

1.1.3.1.1. Doğal Gaz Reformasyonu

Dünyada hidrojen üretiminin yaklaşık %95'i, doğal gaz reformasyonu ile elde edilmektedir. Doğal gazın reformasyonu (SMR), hidrojen üretiminde en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu süreçte, doğal gaz (esas olarak metan), yüksek sıcaklıklarda su buharı ile tepkimeye girerek hidrojen, karbon monoksit ve karbondioksit üretir. Süreç iki aşamada gerçekleşir [28]:

Bunlardan ilki metan reformasyonudur; Metan (CH₄) ve su buharı (H₂O) yüksek sıcaklıkta katalizör yardımıyla reaksiyona girerek hidrojen (H₂) ve karbon monoksit (CO) üretir. Eş. 1.1'de bu prosese ait reaksiyon gösterilmiştir.



İkincisi de Su-gaz değişim reaksiyonudur; bu reaksiyonda, üretilen karbon monoksit, ek su buharı ile tepkimeye girerek daha fazla hidrojen ve karbondioksit üretir. Eş. 1.2'de bu prosese ait reaksiyon gösterilmiştir.



Bu yöntem, büyük miktarda hidrojen üretebilme kapasitesine sahip olmasına rağmen, ciddi miktarda karbondioksit (CO₂) emisyonu yaratır. Doğal gaz reformasyonu ile üretilen hidrojenin her birimi için atmosfere büyük miktarda CO₂ salınmaktadır. Bu nedenle, bu sürecin sürdürülebilirliği sorgulanmakta ve daha çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesi gerekmektedir [29, 30].

1.1.3.1.2. Kömür Gazlaştırma

Bir diğer fosil yakıt temelli hidrojen üretim yöntemi ise kömür gazlaştırmadır. Bu süreçte, kömür yüksek sıcaklıkta ve oksijen veya buharla tepkimeye sokularak sentetik gaz üretilir. Sentetik gaz, karbon monoksit ve hidrojen karışımından oluşur [31]. Bu yöntem, özellikle kömür zengini ülkelerde tercih edilen bir hidrojen üretim yoludur. Ancak, kömür gazlaştırma süreci de büyük miktarda karbon emisyonu üretir ve enerji verimliliği açısından doğal gaz reformasyonuna kıyasla daha düşük verimliliğe sahiptir [32].

1.1.3.1.3. Karbon Yakalama ve Depolama (CCS)

Fosil yakıtlardan hidrojen üretiminin çevresel etkilerini azaltmanın bir yolu, CCS teknolojileridir. CCS, reforming ve gazlaştırma süreçlerinde açığa çıkan karbondioksitin atmosfere salınmadan önce yakalanarak yer altına depolanmasını sağlar. Bu sayede, hidrojen üretimi sırasında üretilen karbon emisyonları büyük ölçüde azaltılabilir. Ancak, CCS teknolojisinin uygulanabilmesi için yüksek maliyetler ve altyapı gereksinimleri söz konusudur. Ayrıca, karbonun uzun vadede güvenli bir şekilde depolanması ile ilgili teknik ve çevresel kaygılar devam etmektedir [33].

CCS teknolojisi ile doğal gaz reformasyonu ve kömür gazlaştırma gibi yöntemlerin daha sürdürülebilir hale getirilebileceği düşünülmektedir. Ancak, bu yöntemlerin karbon emisyonlarını sıfıra indirme potansiyeli sınırlıdır ve uzun vadede yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen hidrojen, fosil yakıt bazlı yöntemlere karşı daha temiz bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [34].

1.1.3.1.4 Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretiminin Geleceği

Fosil yakıtlardan hidrojen üretimi, kısa vadede ekonomik bir çözüm sunmaya devam etse de uzun vadede karbon emisyonlarını azaltma hedefleriyle uyuşmamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve ekonomik olarak rekabetçi hale gelmesi, gelecekte fosil yakıt bazlı hidrojen üretiminin yerini alabilir. Ancak bu geçişin gerçekleşebilmesi için hem teknik hem de politik anlamda ciddi yatırımlara ihtiyaç duyulmaktadır [22].

1.1.3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Hidrojen Üretimi

Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretimi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve karbon ayak izini minimuma indirmek amacıyla giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu yöntemler, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir enerji çözümleri sunarak, uzun vadede enerji güvenliği ve iklim değişikliği ile mücadelede kritik bir rol oynar. Yenilenebilir enerji kullanarak hidrojen üretimi, özellikle güneş, rüzgâr, biyokütle ve su gibi doğal kaynakların enerji potansiyelinden yararlanmayı içerir. Bu yöntemler, enerjinin çevresel etkilerini en aza indirerek, daha temiz bir hidrojen ekonomisine geçişi teşvik eder. Su elektrolizi, fotokimyasal su ayrıştırma, termokimyasal su ayrıştırma, biyokütle gazlaştırma ve mikrobiyal elektroliz gibi yöntemlerle yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretilebilir [35].

1.1.3.2.1 Suyun Elektrolizi

Su elektrolizi, elektrik enerjisi kullanılarak suyun H_2 ve O_2 gazlarına ayrılması sürecidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik ile gerçekleştirildiğinde, sıfır karbon emisyonuyla hidrojen üretmek mümkündür. Elektroliz işlemi, üç temel teknoloji ile uygulanır: Alkalın elektroliz, PEM elektrolizi ve katı oksit elektroliz (SOEC). Alkalın elektroliz, ticari ölçekte yaygın olsa da enerji verimliliği daha düşüktür. PEM elektrolizi, yüksek verimlilik ve hızlı başlatma-durdurma yeteneğiyle dikkat çekerken, maliyetleri yüksektir. SOEC, yüksek sıcaklıklarda çalışır ve en yüksek verimlilik sunar, ancak hala ticari olarak yaygınlaşmamıştır. Elektroliz işlemi fosil yakıtlara bağımlılığı azaltırken, maliyet etkinliği sağlamak için geniş çapta yenilenebilir enerji kullanımı gerektirir [36].

- **Alkalın Elektrolizörler (AEL)**

Alkalın elektroliz, hidrojen üretimi için en eski ve en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu elektrolizörler, genellikle bir potasyum hidroksit (KOH) veya sodyum hidroksit (NaOH) gibi alkalın bir çözeltinin elektrolit olarak kullanıldığı sistemlerdir. İki elektrot (anot ve katot) elektrolit çözeltisine batırılır ve elektrik akımı uygulandığında su molekülleri ayrışarak hidrojen ve oksijen gazları üretir.

Çalışma Prensibi: Negatif yüklü hidroksil (OH^-) iyonları, katotta hidrojen gazı üretirken, oksijen iyonları anotta oksijen gazı üretir. AEL anot reaksiyonu Eş. 1.3'te, katot reaksiyonu ise Eş. 1.4'te gösterilmiştir.



Avantajlar: Alkalın elektroliz teknolojisi iyi bilinen ve ticari olarak geniş çapta kullanıma sahip bir teknolojidir. Görece düşük maliyetli malzemeler kullanır ve 100 kW ile birkaç MW'a kadar sistem boyutlarında çalışabilir.

Dezavantajlar: Verimlilik açısından diğer teknolojilere göre daha düşük olabilir ve basınçlı hidrojen üretiminde ek kompresyon sistemlerine ihtiyaç duyabilir. Ayrıca yüksek enerji tüketimi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarıyla verimli çalışması için geniş enerji kaynakları gerektirir [37].

- **PEM Elektrolizörler:**

PEM elektrolizörler, gelişmiş bir elektroliz teknolojisidir ve suyun ayrıştırılması sırasında protonların (H^+) proton iletken bir membran aracılığıyla taşındığı bir süreçtir. Bu elektrolizörlerde kullanılan elektrolit, katı polimer bazlı bir proton iletken membrandır.

Çalışma Prensibi: Katotta (negatif elektrot), su molekülleri ayrışarak proton (H^+) ve elektronlar (e^-) açığa çıkar. Protonlar, PEM membranından geçerek anota ulaşır ve burada oksijen gazı açığa çıkar. Elektronlar, harici bir devre üzerinden taşınarak katotta hidrojen gazı üretimini sağlar. PEM elektrolizörlerin anot reaksiyonu Eş. 1.5'te, katot reaksiyonu Eş. 1.6'da ve toplam reaksiyon ise Eş. 1.7'de gösterilmiştir.



Avantajlar: PEM elektrolizörler, daha kompakt bir tasarıma sahiptir ve hızlı başlatma-durdurma yeteneğine sahiptir. Ayrıca yüksek basınçta doğrudan hidrojen üretme yeteneği vardır, bu da hidrojenin sıkıştırılma ihtiyacını azaltır. Yüksek enerji verimliliği ile yenilenebilir enerji kaynaklarına daha iyi entegre olabilir.

Dezavantajlar: PEM elektrolizörlerin dezavantajı, kullanılan katalizörler (platin gibi) ve membranların (genellikle pahalı olan Nafion) maliyetinin yüksek olmasıdır. Bu nedenle, başlangıç yatırımı alkalın elektrolizöre göre daha pahalıdır [38].

- **Katı Oksit Elektrolizörler (SOEC)**

Katı oksit elektrolizörler, çok yüksek sıcaklıklarda (genellikle 700-1000°C) çalışan ve oksijen iyonlarını taşıyan katı oksit (genellikle zirkonyum oksit bazlı) bir seramik membran kullanan sistemlerdir. Bu elektrolizörlerde suyun yüksek sıcaklıklarda ayrışma enerjisi azaltılarak daha verimli bir elektroliz süreci sağlanır.

Çalışma Prensibi: Yüksek sıcaklıkta su buharı, katotta hidrojen ve oksijen iyonlarına ayrılır. Oksijen iyonları, seramik membran boyunca taşınarak anotta oksijen gazı olarak dışarı salınır, hidrojen ise katotta toplanır. Eş. 1.8'de SOEC anot reaksiyonu, Eş. 1.9'da SOEC katot reaksiyonu ve Eş.1.10'da SOEC toplam reaksiyonu gösterilmiştir.



Avantajlar: SOEC teknolojisi, yüksek sıcaklıkların sağladığı termal enerjiyi kullanarak suyun ayrışması için gereken elektrik enerjisini önemli ölçüde azaltır. Bu sayede en yüksek enerji verimliliği sağlayan elektroliz yöntemidir. Ayrıca, bu teknoloji yüksek sıcaklık nükleer reaktörler veya konsantre güneş enerjisi gibi ısı kaynaklarıyla entegre edilebilir.

Dezavantajlar: SOEC'nin en büyük dezavantajı, çok yüksek sıcaklıkta çalışması nedeniyle malzeme dayanıklılığı ve güvenilirlik sorunlarının olmasıdır. Bu sistemler henüz ticari ölçekli yaygın bir kullanımda değildir ve özellikle malzeme maliyetleri ve uzun vadeli stabilite sorunları üzerinde çalışmalar sürmektedir [39].

1.1.3.3. Hidrojen Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Hidrojen üretim yöntemleri, fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli farklılıklar göstermektedir. Bu yöntemler; çevresel etkileri, maliyetleri, verimlilikleri ve enerji sistemlerine entegrasyon yetenekleri açısından incelendiğinde, her birinin farklı avantajlar ve dezavantajlar sunduğu görülmektedir. Fosil yakıtlardan hidrojen üretimi, özellikle doğal gaz reformasyonu ve kömür gazlaştırma gibi teknikler, günümüzde büyük ölçekli hidrojen üretimi için en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Doğal gaz reformasyonu, küresel hidrojen üretiminin %95'ini sağlamakla birlikte, yüksek karbon dioksit (CO₂) emisyonu ile çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu yöntem, fosil yakıtların mevcut enerji sistemlerindeki büyük rolü nedeniyle kısa vadede ekonomik avantajlar sunmakla birlikte, sürdürülebilirlik açısından uzun vadede uygun bir çözüm sunmamaktadır [40].

Kömür gazlaştırma ise, özellikle kömür kaynakları bakımından zengin ülkelerde tercih edilen bir yöntemdir. Ancak, bu süreç de büyük miktarda karbon emisyonu üretmekte ve düşük enerji verimliliğine sahiptir. Fosil yakıt temelli bu yöntemlerin çevresel etkilerini azaltmak için CCS teknolojileri geliştirilmektedir. CCS, açığa çıkan CO₂'nin atmosfere salınmadan önce yakalanarak yer altına depolanmasını sağlar. Ancak, CCS teknolojisinin yüksek maliyetler ve teknik zorluklar içermesi, bu teknolojinin geniş çapta uygulanabilirliğini sınırlamaktadır [41].

Buna karşın, yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretimi, özellikle çevresel sürdürülebilirlik açısından fosil yakıtlara kıyasla çok daha avantajlı bir alternatiftir. Su

elektrolizi, yenilenebilir enerji kullanılarak hidrojen üretiminde en önemli teknolojidir. Bu süreç, suyun elektrik enerjisi ile hidrojen ve oksijen gazlarına ayrılmasını içerir. Yenilenebilir enerji ile beslenen AEL, PEM elektroliz ve SOEC süreçleri, karbon emisyonu yaratmadan hidrojen üretme potansiyeline sahiptir ve bu da uzun vadede daha temiz enerji sistemlerine geçişi teşvik eder.

Alkalın elektrolizörler, düşük maliyetli malzemelerle çalışabilen ticari olarak yaygın bir teknoloji olsa da enerji verimliliği sınırlıdır ve yüksek basınçlı hidrojen üretimi için ek enerji gerektirir. PEM elektrolizörler, daha kompakt bir tasarım ve hızlı başlatma-durdurma kapasitesiyle öne çıkar. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre olabilme ve doğrudan yüksek basınçlı hidrojen üretme yeteneği, bu teknolojiyi geleceğin hidrojen üretimi için daha uygun hale getirmektedir. Katı oksit elektrolizörler ise yüksek sıcaklıklarda çalışarak daha yüksek verimlilik sağlar, ancak yüksek maliyetler ve malzeme dayanıklılığı sorunları nedeniyle henüz geniş çapta kullanılmamaktadır. Tablo 1'de hidrojen üretim yöntemlerinin geniş bir karşılaştırılması sunulmuştur [42].

Bu üretim yöntemleri ve teknolojileri karşılaştırıldığında, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışan PEM elektrolizörlerin, hidrojen üretiminde daha çevre dostu ve uzun vadeli bir çözüm sunduğu görülmektedir. PEM elektrolizörler, özellikle yüksek verimlilik, düşük emisyon ve ticari uygulanabilirlik açısından gelecekteki enerji dönüşümünde kilit rol oynamaya adaydır.

Tablo 1. Hidrojen üretim yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Kullanılan Kaynak	Verimlilik (%)	Çevresel Etki	Maliyet (USD/kgH ₂)	Ticari Uygulanabilirlik	Karbon Emisyonları (gCO ₂ /kg H ₂)
Doğal Gaz Reformasyonu	Doğal Gaz	65-75	Yüksek CO ₂ Emisyonu	1-3	Yüksek (Ticari Olarak Kullanılıyor)	9.000-12.000
Kömür Gazlaştırma	Kömür	50-60	Çok Yüksek CO ₂ Emisyonu	1,5-2,5	Orta (Kömür Zengini Ülkelerde)	20.000-25.000
Karbon Yakalama ve Depolama	Fosil Yakıtlar		Daha Düşük CO ₂ Emisyonu		Orta (CSS ile Uygulanabilir)	Düşük
Fotokimyasal Su Ayırıştırma	Güneş Işığı		Sıfır Emisyon		Orta (Araştırma Aşamasında)	0
Termokimyasal Su Ayırıştırma	Yüksek Sıcaklık + Güneş/Nükleer Enerji		Sıfır Emisyon (Güneş ile)		Orta (gelişim Aşamasında)	0
Biyokütle Gazlaştırma	Biyokütle	50-65	Düşük CO ₂ Emisyonu	2-3	Orta (Atık Yönetimi ile Uygulanabilir)	~500-1000
Mikrobiyal Elektroliz	Organik Atıklar		Düşük CO ₂ Emisyonu		Düşük (Araştırma Aşamasında)	~100-500
Alkalın Elektrolizör	Yenilenebilir Enerji	60-70	Sıfır Emisyon	4-6	Yüksek (Geniş Ticari Kullanım)	0
Katı Oksit Elektrolizör	Yenilenebilir Enerji	85-90	Sıfır Emisyon	8-10	Düşük (Ar-Ge Aşamasında)	0
PEM Elektrolizör	Yenilenebilir Enerji	70-80	Sıfır Emisyon	6-8	Yüksek (Gelişmekte Olan Teknoloji)	0

1.2. PEM Elektrolizörler

PEM teknolojisine dayanan elektrolizörler, suyun elektrik enerjisi kullanılarak hidrojen ve oksijen gazlarına ayrıştırılması prensibine dayanır. Bu sistemler, elektriksel enerji kaynağından elde edilen akımı, su molekülünün elektrokimyasal olarak ayrışması için kullanır ve süreçte temel bileşen olarak PEM'lerden faydalanır.

1.2.1. PEM Elektrolizörlerin Çalışma Prensibi ve Avantajları

PEM elektrolizörlerin çalışma prensibi, membran elektrot grubu (MEA) olarak adlandırılan bir yapı üzerine kuruludur. Bu yapı, proton değişim membranının yanı sıra, elektrotların üzerinde yer alan katalizör tabakaları ve gaz difüzyon elektrotlarından oluşur. Su, anottan elektrolizöre beslenir. Burada, elektriksel potansiyel farkı uygulanarak su molekülleri ayrıştırılır. Bu ayrışma sırasında oksijen gazı ve protonlar anotta oluşurken, elektronlar harici bir devre aracılığıyla katoda aktarılır. Protonlar ise membran üzerinden katoda taşınır ve burada elektronlarla birleşerek hidrojen gazını oluşturur. Bu süreç, PEM elektrolizörlerin hızlı, verimli ve temiz bir şekilde çalışmasını sağlar [43].

PEM elektrolizörler, diğer elektroliz türleri ile karşılaştırıldığında çok sayıda önemli avantaja sahiptir. Örneğin, PEM teknolojisi, çalışma sıcaklığının genellikle 50 ila 80 °C arasında olması nedeniyle, alkalın elektrolizörlere kıyasla daha kompakt bir tasarım ve düşük enerji kaybı ile çalışabilir. Ayrıca, PEM elektrolizörler, genellikle saf su kullandıkları için, çözeltide bulunan kimyasal kalıntıların hidrojen üretim kalitesine etkisi minimumdur. Bu nedenle, PEM elektrolizörler son derece yüksek saflıkta hidrojen (çoğu zaman %99,999'un üzerinde) üretebilir. Bu teknoloji ayrıca, hızlı tepki süreleriyle dikkat çeker. Geleneksel alkalın elektrolizörlerde sistemin başlatılması ve kararlı hale gelmesi çoğu zaman çok daha uzun sürebilirken, PEM elektrolizörler düşük başlatma sıcaklıkları ve sistem yapıları sayesinde saniyeler içinde tam kapasitede çalışabilir. Bu özellik, yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş ve rüzgar gibi) dalgalı enerji çıktıları ile uyumlu çalışmasını sağlar. Diğer bir avantaj ise PEM elektrolizörlerin çevre dostu yapısıdır. Bu sistemler, toksik veya aşındırıcı sıvılar kullanmadan çalıştığı için çevreye zarar verme riski düşüktür. Ayrıca, bakım gereksinimleri minimaldir ve uzun ömürlüdür. Bu nedenle, PEM elektrolizörler endüstriyel hidrojen üretiminden taşınabilir enerji çözümlerine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir [44].

1.2.1.1. Elektrokimyasal Reaksiyonlar ve Kinetik

PEM elektrolizörlerinde suyun elektrolizi, hidrojen ve oksijen gazlarının üretildiği temel elektrokimyasal reaksiyonlara dayanır. Bu reaksiyonlar, elektrot yüzeylerinde gerçekleşir ve her iki elektrotun da farklı işlevleri vardır. Anotta su molekülleri oksitlenir ve oksijen gazı ile H^+ üretirken, katotta $2H^+$ elektronlar ile birleşerek hidrojen gazı (H_2) oluşturur. Reaksiyon hızı, bu süreçlerin ne kadar hızlı gerçekleştiğini belirler ve genellikle hidrojen ve oksijen gazlarının üretim hızını etkiler [45].

Reaksiyon hızını belirleyen bir dizi faktör vardır: İlk olarak, elektrot malzemelerinin türü ve yüzey özellikleri reaksiyonun hızını etkiler. Yüksek sıcaklıklar da moleküllerin hareketini hızlandırır ve elektrot yüzeyindeki reaksiyonların daha hızlı gerçekleşmesini sağlar. Ancak sıcaklık artışı, aynı zamanda elektrot malzemelerinin dayanıklılığını olumsuz etkileyebilir, bu nedenle sıcaklık kontrollü bir şekilde artırılmalıdır. Proton iletkenliği de önemli bir faktördür. PEM, protonların geçişini sağlar ve iyi bir proton iletkenliği, protonların elektrotlar arasında hızlı bir şekilde hareket etmesine imkan verir. Bu durum, reaksiyon hızını artırır. Son olarak, elektrotlar arasındaki elektriksel potansiyel farkı, reaksiyon hızını etkileyen bir diğer önemli faktördür. Elektriksel potansiyel arttıkça, reaksiyon hızı da artar. Ancak, çok yüksek potansiyeller, aşırı potansiyel oluşturarak verimliliği düşürebilir.

Elektrokimyasal reaksiyonların kinetiği, reaksiyon hızının değişimi ve hızın hangi koşullar altında arttığını anlamak amacıyla incelenmektedir. Bu bağlamda, PEM elektrolizörlerdeki reaksiyonlar, genellikle Butler-Volmer denklemi ile açıklanmaktadır. Bu denklem, elektrot yüzeyindeki potansiyel fark ile reaksiyon hızı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Reaksiyon hızı ile potansiyel farkı arasındaki ilişki, doğrusal olmamakla birlikte, potansiyel fark arttıkça reaksiyon hızının da arttığını ortaya koymaktadır. Ancak, çok yüksek potansiyellerde reaksiyon hızı artarken verimlilik kayıpları da oluşmaktadır. Bu nedenle, optimum potansiyel değerlerinin belirlenmesi, verimliliği artırırken enerji kayıplarını minimize etmek açısından kritik bir rol oynamaktadır. Eş. 1.11'de Butler-Volmer denklemi gösterilmiştir.

$$j = j_0 \left(\exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha) n F \eta}{RT}\right) \right) \quad (1.11)$$

Bu denklemde; j , reaksiyon akımı yoğunluğunu; j_0 , düzeltilmiş denge akımı yoğunluğunu; α , yük taşıyıcısının geçiş katsayısını; n , reaksiyona giren elektron sayısını; F , Faraday sabitini; η , aşırı gerilim, R , gaz sabitini ve T , sıcaklık değerini ifade etmektedir.

Elektrokimyasal reaksiyonlar için gereken enerji, genellikle teorik olarak hesaplanabilirken, pratikte sistemde ekstra bir enerji gereksinimi ortaya çıkar. Bu ekstra enerji, aşırı gerilim olarak adlandırılır ve reaksiyonların daha verimli bir şekilde gerçekleşebilmesi için gerekli olan ilave enerjiyi ifade eder. Aşırı gerilim, elektrot yüzeyinin özellikleri, kullanılan elektrot malzemesinin aktivitesi ve elektrokimyasal ortamın koşullarına bağlı olarak değişir. Bu nedenle, düşük aşırı gerilim değerlerine sahip elektrotlar, daha verimli reaksiyonlar sağlar ve hidrojen üretim verimliliğini artırır.

Anot Reaksiyonu

Anot tarafında gerçekleşen reaksiyon, suyun oksitlenmesiyle başlar. PEM elektrolizörlerinde, su molekülleri (H_2O), anot elektrotunda oksitlenerek oksijen gazı (O_2) üretir ve protonlar (H^+) serbest kalır. Bu reaksiyon, Eş. 1.5’de gösterilmiştir. Burada, su molekülleri, oksijen gazı, H^+ ve elektronlara dönüşür. Oksijen gazı, elektrolizörün dışına atılırken, serbest kalan protonlar PEM üzerinden katoda doğru hareket eder. Anot reaksiyonunun verimliliği, elektrot malzemesinin kalitesine, sıcaklığa ve elektrot yüzeyinin özelliklerine bağlı olarak değişir. İyi bir elektrot, bu reaksiyonu daha düşük enerji ile gerçekleştirir, bu da sistemin genel verimliliğini artırır [46].

Katot Reaksiyonu

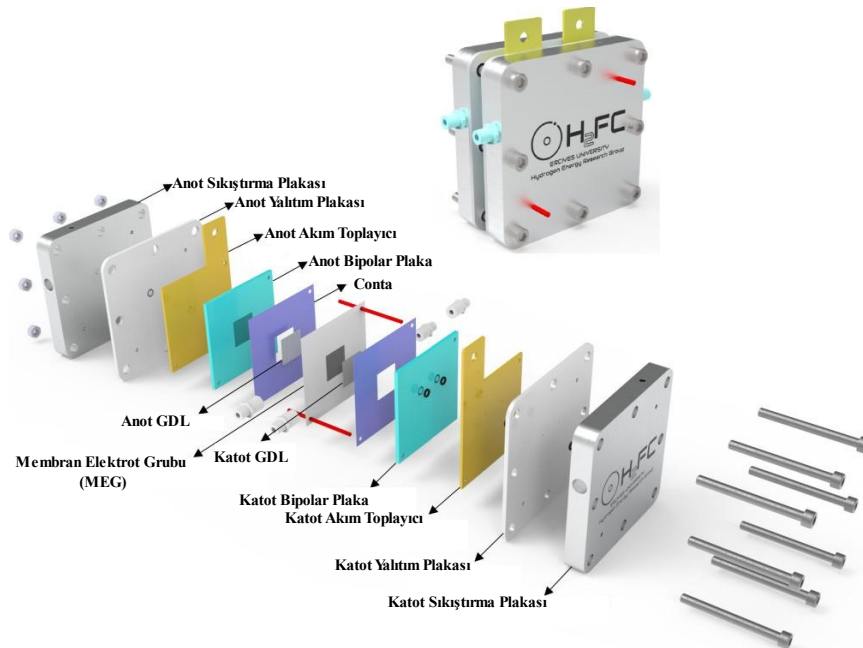
Katot tarafında protonlar, anotdan geçtikten sonra katot elektrotunda elektronlarla birleşir ve hidrojen gazı üretir. Bu reaksiyon, Eş. 1.6’de gösterilmiştir. Burada, H^+ , elektrot yüzeyine ulaşarak elektronlarla birleşir ve hidrojen gazı üretir. Katot reaksiyonunun verimliliği, protonların katoda hızlı bir şekilde taşınması ve elektrot malzemesinin hidrojen gazı üretimi için uygun bir yüzey sunması ile doğrudan ilişkilidir. Elektron transferi ve proton iletimi, reaksiyonun hızını belirleyen temel faktörlerdir.[46]

1.2.2. PEM Elektrolizörlerin Bileşenleri

PEM elektrolizörler, birkaç temel bileşenden oluşur. Her bir bileşen, sistemin genel verimliliği, dayanıklılığı ve performansı üzerinde kritik bir etkiye sahiptir.

PEM elektrolizörlerinin temel bileşenleri arasında PEM, elektrotlar, gaz difüzyon elektrotları (GDE), bipolar plakalar ve yardımcı bileşenler yer alır. PEM, protonların hareketini sağlayarak reaksiyonların gerçekleşmesi için gerekli olan proton iletkenliğini sunar. Elektrotlar, elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği yüzeyler olup, anottaki oksidasyon ve katottaki indirgenme süreçlerini mümkün kılar. Gaz difüzyon elektrotları, elektrot yüzeyine düzgün bir şekilde gazın dağıtılmasını sağlayarak reaksiyon verimliliğini artırır. Bipolar plakalar ise, elektrotlar arasında elektriksel bağlantıyı sağlarken, gazların ayrılmasına ve yönlendirilmesine yardımcı olur.

Bu bileşenlerin her biri, PEM elektrolizörünün performansını optimize etmek için özel malzemeler ve tasarımlar kullanılarak üretilir. Bu bileşenlerin verimli bir şekilde çalışabilmesi, hidrojen üretim sürecinin verimliliğini ve sistemin genel enerji tüketimini doğrudan etkiler. Dolayısıyla, her bir bileşenin doğru seçimi ve tasarımı, PEM elektrolizörlerinin etkinliğini ve uzun ömürlülüğünü belirleyen temel unsurlardır [47].



Şekil 2. Tek hücreli bir PEM elektrolizörün bileşenleri [47]

1.2.2.1. PEM

Membran, PEM elektrolizörlerinin temel bileşenlerinden biridir ve sistemin etkinliğini doğrudan etkileyen kritik bir rol oynar. Bu membran, elektroliz sürecinde H^+ iletilmesini sağlarken, elektronların ve gazların birbirine karışmasını engeller. Bu özellik, PEM elektrolizörünün güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını mümkün kılar. PEM, elektrolizörün merkezinde yer alır ve protonların anot tarafından serbest bırakılmasını sağlayarak katoda taşınmasını mümkün kılar.

PEM, genellikle asidik ortamda çalışan bir tür iyonik iletken malzeme olup, polimerler kullanılarak üretilir. Bu membranlar, protonları geçirebilen ancak elektronları geçiremeyen özel bir yapıya sahiptir, bu da elektrolizörün verimli çalışmasını sağlar. Ayrıca, PEM'in mekanik dayanıklılığı, yüksek sıcaklıklara ve asidik ortamlara karşı dirençli olması gerekir. Bu özellikler, membranın uzun ömürlü olmasını ve elektrolizörün genel performansını iyileştirir. Membran malzemeleri, proton iletkenliğini artıracak şekilde seçilir. Bu, hidrojen üretim verimliliğini doğrudan etkileyen bir faktördür [48].

1.2.2.2. Anot ve Katot Elektrotları

PEM elektrolizörlerinde, anot ve katot elektrotları, elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği yüzeylerdir ve hidrojen üretim sürecinin temel bileşenleridir. Elektrotlar, elektrolizörün performansını doğrudan etkileyen unsurlardır, çünkü bu yüzeylerde gerçekleşen reaksiyonlar oksijen ve hidrojen gazının üretimini sağlar. Anot ve katot elektrotlarının doğru seçimi, elektrolizörün verimliliği ve uzun ömürlülüğü için kritik öneme sahiptir [48].

Anot, oksidasyon reaksiyonlarının gerçekleştiği elektrot olup, burada su molekülleri (H_2O) oksitlenerek oksijen gazı (O_2), hidrojen iyonları (H^+) ve elektronlar (e^-) üretir. Bu reaksiyon, Eş. 1.5'de gösterilmiştir. Bu reaksiyon sonucunda, su molekülleri parçalanarak oksijen gazı ve protonlar serbest kalır. Serbest kalan protonlar, proton değişim membranı üzerinden katoda doğru hareket ederken, elektronlar dış devre üzerinden katoda ulaşır.

Katot ise indirgenme reaksiyonlarının gerçekleştiği elektrot olup, burada protonlar (H^+) ve elektronlar birleşerek hidrojen gazı (H_2) üretir. Bu reaksiyon, Eş. 1.6'da gösterilmiştir. Katotta hidrojen gazı üretimi, sistemin ana hedefidir ve elektrot yüzeyindeki etkinlik,

hidrojen üretim hızını belirler. Katodun tasarımı, yüzey alanı, porozite ve malzeme özellikleri, hidrojen üretiminin verimliliği üzerinde doğrudan etki yapar.

Elektrot malzemeleri, yüksek elektriksel iletkenlik, dayanıklılık ve kimyasal stabilite özelliklerine sahip olmalıdır. Genellikle Platin (Pt) , İridyum (Ir) veya bu metallerin alaşımları gibi maddeler, yüksek elektrokimyasal aktiviteye sahip oldukları için tercih edilir. Ancak bu malzemeler pahalı olduğundan, son yıllarda elektrotlar için daha ekonomik ve verimli alternatif malzemeler araştırılmaktadır.

Anot ve katot elektrotlarının doğru tasarımı, elektrot yüzeyinin etkinliğini artırırken, elektrot malzemesinin seçimi, elektrot ömrünü de uzatabilir. Elektrotlar arasındaki uzaklık ve iletkenlik, sistemin genel enerji verimliliğini etkileyen önemli faktörlerdir. Ayrıca, elektrot yüzeyine uygulanan kaplamalar, elektrotların performansını iyileştirebilir ve koruyabilir.

1.2.2.3. Gaz Difüzyon Elektrotları (GDE)

GDE, PEM elektrolizörlerinin önemli bileşenlerinden biridir. Bu elektrotlar, gazların elektrot yüzeylerine düzgün bir şekilde dağıtılmasını sağlayarak elektroliz sürecinin verimliliğini artırır. GDE'lerin temel işlevi, gazların elektrot yüzeyine etkili bir şekilde ulaşmasını ve burada gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktır. Bu, elektrolizörün genel performansını iyileştiren önemli bir faktördür [48].

GDE'ler, özellikle anottan oksijen gazı (O_2) ve katottan hidrojen gazı (H_2) üretiminin sağlanmasında önemli rol oynar. Anotta, suyun oksitlenmesi sonucu oksijen gazı ve protonlar (H^+) oluşur. Bu protonlar, proton değişim membranı üzerinden katoda doğru hareket ederken, oksijen gazı elektrot yüzeyinden dışarıya salınır. Katotta ise protonlar ve elektronlar birleşerek hidrojen gazı (H_2) üretir. GDE'ler, bu gazların elektrot yüzeylerine eşit bir şekilde ulaşmasını ve reaksiyona girmesini sağlar.

GDE etkinliği, kullanılan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Bu elektrotlar, gözenekli yapıları sayesinde gazların elektrot yüzeyine difüzyonunu kolaylaştırır. Gözenekli yapıları, aynı zamanda proton iletkenliği sağlayan suyun elektrot yüzeyine ulaşmasını destekler ve elektrotların verimliliğini artırır. Su birikmesinin engellenmesi ve suyun

uzaklaştırılması, elektrot yüzeyinin etkinliğini korur ve elektrotların uzun ömürlü olmasına katkıda bulunur [48].

Anot GDE'leri, özellikle yüksek korozyon direncine sahip malzemeler kullanılarak tasarlanır. Bu, anodun oksijen oluşum evresinde maruz kaldığı yüksek oksidasyon koşullarında uzun ömürlü olmasını sağlar. Oksijen Üretim Reaksiyonu (OER) sırasında anodun yüzeyinde meydana gelebilecek korozyon, elektrotun etkinliğini ve ömrünü kısaltabilir. Bu nedenle, korozyon direncine sahip malzemelerin seçimi, GDE tasarımında önemli bir faktördür. Katot GDE'lerinde ise genellikle daha az korozyon sorunu söz konusu olmasına rağmen, iyi elektriksel iletkenlik sağlayan malzemeler tercih edilir.

Gaz difüzyon elektrotlarının malzemeleri genellikle karbon bazlıdır. Karbonun yüksek elektriksel iletkenliği, elektrotların etkinliğini artırır ve aynı zamanda kimyasal dayanıklılığı sağlar. Karbon fiberler veya karbon kağıtları gibi malzemeler, gazların homojen bir şekilde elektrot yüzeyine dağılmasını sağlar. Ayrıca, bu malzemeler suyun yönetimi ve buharlaşma süreçlerini optimize ederek elektrolizörün genel verimliliğini artırır.

1.2.2.4. Bipolar Plakalar ve Yardımcı Bileşenler

Bipolar plakalar, PEM elektrolizörlerinde elektrotlar arasında elektriksel bağlantıyı sağlayan ve enerji transferini yönlendiren önemli bileşenlerdir. Bu plakalar, elektrotların arasındaki akımı taşıyarak sistemin genel verimliliğini artırır. Bir bipolar plaka, genellikle elektrotlar arasındaki iletimi kolaylaştıran bir malzeme ile yapılır ve aynı zamanda birbirleriyle elektriksel bağlantı kuran bir yapı işlevi görür. Her bir bipolar plaka, bir elektrotla doğrudan temas halindeyken, diğer yüzeyi ise bir başka elektrotla temas eder [48].

Bipolar plakaların üretimi sırasında, yüksek elektriksel iletkenlik ve kimyasal dayanıklılık özelliklerine sahip malzemeler kullanılır. Genellikle, grafit veya metal alaşımlarından yapılan bu plakalar, yüksek sıcaklık ve asidik ortamlarda uzun süre dayanabilmesi için özel olarak tasarlanır.

Yardımcı bileşenler ise sistemin bütünsel işlevini destekleyen ek parçalar olup, genellikle ısıyı dağıtma, yığın montajını destekleme, gazların düzenli bir şekilde akışını sağlama ve

suyun yönetilmesi gibi işlevlere yardımcı olurlar. Bu bileşenler, sistemin verimliliğini artıran, ısınma ve soğuma dengesini sağlayan, aynı zamanda elektrolizörün güvenli bir şekilde çalışmasını garantileyen unsurlardır.

1.3 Anot GDE ve Fonksiyonu

Anot GDE, PEM elektrolizörlerinde, özellikle OER'in gerçekleştiği kritik bileşenlerdir. Bu elektrotlar, oksijen üretiminin verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda reaksiyon sırasında oluşan yan ürünlerin uzaklaştırılmasına da yardımcı olur. Anot GDE'lerinin işlevi, suyun elektrot yüzeyinde oksitlenerek oksijen gazı üretmesi ve bu oksijenin yüzeyden dışarıya salınmasını sağlamak olarak özetlenebilir. Elektrolizörlerde protonlar, PEM üzerinden katoda doğru hareket ederken, anotta oksijen gazı, su buharı ve elektronlar, elektrot yüzeyinde gerçekleşen reaksiyonlarla birlikte salınır. Bu elektrotlar, gazların elektrot yüzeyine homojen bir şekilde dağılmasını sağlayarak reaksiyonların verimliliğini artırırken, aynı zamanda reaksiyon sırasında oluşan yan ürünlerin uzaklaştırılmasına da yardımcı olur [49].

Anot GDE'lerinin verimli çalışabilmesi için kullanılan malzemelerin özellikleri büyük önem taşır. Anot reaksiyonları, özellikle oksijen üretimi sırasında yüksek oksidasyon koşullarına maruz kaldığından, kullanılan malzemenin korozyon direnci çok kritik bir faktördür. Bu sebeple, anodun işlevselliği, sadece gazların difüzyonunu sağlamakla sınırlı kalmaz, aynı zamanda elektrot yüzeyindeki reaksiyonların sürdürülebilirliğini sağlamak için malzemenin kimyasal dayanıklılığı da yüksek olmalıdır. Anot GDE'lerinin tasarımında, bu koşullarda bile uzun süre dayanabilen ve yüksek korozyon direncine sahip malzemeler tercih edilmektedir.

Anot GDE'lerinde korozyon direncini sağlamak için genellikle metal oksitler, karbon bazlı malzemeler ve metal alaşımları kullanılır. Ir ve Pt gibi nadir ve pahalı metaller, oksijen üretimi sırasında yüksek verimlilik sağlasa da daha ekonomik alternatifler üzerine araştırmalar devam etmektedir. Karbon bazlı malzemeler, düşük maliyetleri ve yüksek korozyon direnci ile dikkat çekmektedir. Ayrıca, bu malzemelerin korozyon direncini artırmak için çeşitli kaplama teknikleri geliştirilmiştir.

TiN kaplamaları, anodun uzun ömürlü ve yüksek verimli çalışmasını sağlamak için Anot GDE'lerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. TiN kaplamalar, yüksek korozyon direnci,

yüksek sertlik ve iyi elektriksel iletkenlik gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikler, TiN'i OER sırasında elektrot yüzeylerini korumak ve oksijen üretimini hızlandırmak için ideal bir kaplama malzemesi yapmaktadır. TiN, elektrot yüzeyini oksidasyona karşı koruyarak, elektrotun dayanıklılığını artırırken, aynı zamanda yüksek verimlilikle çalışan bir elektrot yüzeyi sağlar. TiN, oksijen üretimi sırasında genellikle daha düşük aşırı potansiyel ile reaksiyonun gerçekleşmesini sağlayarak enerji verimliliğini artırır. Bu sayede, TiN kaplamalar, özellikle uzun süreli ve yüksek performans gerektiren uygulamalarda etkili bir çözüm sunar [50].

TiN kaplama uygulamalarının bir diğer avantajı, yüzeyin kimyasal dayanıklılığını artırmasının yanı sıra, elektrot yüzeyinin elektriksel iletkenliğini de artırmasıdır. TiN kaplaması, elektrot malzemesinin yüksek elektriksel iletkenliğini destekleyerek, protonların elektrot yüzeyinde daha hızlı difüzyonunu sağlar. Bu özellik, elektrotun oksijen üretim verimliliğini artırır ve elektrolizörün genel verimliliğini iyileştirir.

1.4. Literatür Çalışması

Dünyada ve ülkemizdeki teknolojik gelişmeler, nüfus artışı gibi etkilere enerjiye olan talebin her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Ülkemizde enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil kaynaklı yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu kaynakların tüketimi sonucunda sera gazı emisyonu artık bilinen ve önlenmesi gereken bir sorundur. Bu amaçla dünya ülkeleri çeşitli yasal düzenlemeler ve anlaşmalar ile karbon nötr hedefleri için eylem planları açıklamaktadır. 2015 Paris anlaşmasını imzalayan ülkeler küresel ısınmayı 2°C düşürmek için sera gazı emisyonlarını azaltma taahhüdünde bulundular [51]. AB Konseyi Paris anlaşması doğrultusunda 2030 yılına kadar sera gazı emisyonunu en az %40 azaltma hedefi için 2030 İklim ve Enerji Politikaları Çerçevesini hazırlamıştır. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), Küresel Isınma Özel Raporunda, karbon nötrlüğüne ulaşmak için aşağıdakilere dayanan çok yönlü bir yaklaşımın önemini açıkça belirtmektedir [52]:

- Fosil yakıtları aşamalı olarak ortadan kaldırma,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması,

- Hem arz hem de talep için enerji verimliliğinin iyileştirilmesi ve negatif emisyon önlemlerinin getirilmesi.

Paris Anlaşması'ndan bu yana, İsveç, Fransa, Birleşik Krallık, Yeni Zelanda ve Kosta Rika dahil olmak üzere ülkeler 2050 veya daha önce iklim nötrlüğüne ulaşma taahhüdünde bulunan yasalar çıkardılar. BM'nin 2019 İklim eylemi zirvesi sonrasında yüzün üzerinde şehir iklim kriziyle mücadele için önemli ve somut yeni adımlar duyurdu [53]. Ayrıca AB 2030 yılına kadar, sera gazı emisyonlarını %40 azaltmak, tüketilen enerjinin en az %32'sini yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesini sağlamak ve enerji verimliliğini %32,5 iyileştirmek gibi ara hedef belirlemiştir [54]. Yenilenebilir enerji kaynakları sunduğu birçok avantaja rağmen tamamen coğrafi konuma ve hava koşullarına bağlı olması öncelikle doğal özelliklerinden kaynaklanmaktadır, yani yenilenebilir kaynağın değişkenliği ve öngörülemezliği elektrik üretiminde önemli bir sınırlama ve zorluktur [55]. Üretilen enerjinin her an kullanıma hazır olması ve ihtiyaç duyulan bölgelere kolay ulaştırılması gerekmektedir. Bu noktada yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, çevre dostu bir kaynak olması ve yakıt tanklarında kolaylıkla güvenli bir şekilde depolanabilir olması gibi özellikleri ile hidrojen geleceğin enerji kaynağı olarak görülmektedir [56]. Hidrojen üretim yöntemine de bağlı olarak yeşil enerji kaynağıdır [57]. Bu yönüyle sera gazı azaltma ve karbon nötr hedefleri için son derece önemli bir enerji taşıyıcısıdır. Günümüzde hidrojenin büyük bir kısmı buhar metan reformasyonu ile üretilmektedir. Ancak bu üretim yönteminde hidrokarbonlar ile hidrojen üretimini temel alan yöntemlerde de olduğu gibi atmosfere CO_x salınımı yapmaktadır [58, 59]. Yeşil hidrojen üretimi için karbon emisyonuna neden olmayan ve yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilebilen suyun elektrolizi bu noktada ön plana çıkmaktadır [60]. Çeşitli hidrojen üretim teknolojileri arasında PEM su elektrolizi, yüksek verimlilik, yüksek hidrojen saflığı, hızlı başlatma-durdurma ve yüksek uyumluluk avantajlarına sahiptir ve bilimsel ve endüstriyel alanlarda geniş ilgi görmüştür [61]. PEM elektrolizörleri temelde elektrik enerjisi kullanarak suyu hidrojen ve oksijene ayıran bir enerji dönüştürücüsüdür. Anot bölgesine su uygulanan elektrolizörlerde elektrik enerjisi ile su, hidrojen iyonuna ve oksijene ayrışır ve oksijen kullanılmayan su molekülleri ile anot bölgesinden dışarı bırakılır. Proton geçirgen membran üzerinden katoda aktarılan hidrojen iyonları ile elektronlar ise hidrojen gazını oluştururlar. Hidrojen gazı katot bölgesinden hücre dışına aktarılır.

PEM elektrolizörler; başlıca sıkıştırma plakaları, akım toplayıcı plakalar, bipolar plakalar, GDE, MEA, katalizör tabaka, gibi elemanlardan oluşmaktadır. PEM elektrolizörlerin elemanları Erciyes Üniversitesi H₂FC Hidrojen Enerjisi Araştırma grubu tarafından tasarlanan PEM elektrolizörü ile Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. H₂FC Hidrojen Enerjisi Araştırma Grubu tarafından tasarlanan PEM Elektrolizör Hücresi [47]

PEM elektrolizörlerde kullanılan anot GDE'nin görevi, suyun hücreye homojen dağılımını sağlamak ve katalizör tabakasına iletmektir. Oksijen molekülleri ile doğrudan temas halinde olduğundan, anot GDE'lerin yüksek korozyon direncine, iyi elektriksel iletkenliğe ve hafif özelliklere sahip olması gerekir [62]. Korozyon, PEM elektrolizörlerde kontak dirençlerinin, ohmik ve aktivasyon kayıplarının artmasına sebep olarak hücre verimini düşürmektedir. Dolayısıyla anot bölgesinde korozyon direncine sahip malzemeler ile komponent üretimi ya da kaplamaları gerçekleştirilmelidir. PEM elektrolizör maliyetlerinin büyük bir kısmını ise bu malzemeler oluşturmaktadır [63]. Çünkü genellikle yüksek maliyete sahip Pt gibi malzemeler tercih edilmektedir [64]. Pt dışında Ti, Ni ve çeşitli paslanmaz çelik malzemeleri taban malzemesi üzerine çeşitli kaplamalarla performans iyileştirmeleri yapılmaktadır [65-67]. Bunun yanı sıra bazı metal malzemelerin asidik ortam ve PEMWE anotunun yüksek potansiyeli altında aşınması ve çözülmesi çok kolaydır ve bu nedenle PEMWE için uygun değildir. Yüksek maliyet PEM elektrolizörlerin ve hidrojen enerjisinin yaygınlaşmasındaki büyük bir engeldir. Yüksek maliyete sahip malzemeler yerine daha düşük maliyetli alternatif geliştirilmesi son derece önemlidir. Ti asidik ortamda yüksek korozyon direncine sahip olmasına rağmen yüksek maliyetli malzemelerden birisidir. TiN, Ti ile kıyasla daha düşük öz dirence sahiptir. Ayrıca iyi oksidasyon direnci gösterdiği ve Sülfürik asit ile

reaksiyona girmediğinden PEMWE için koruyucu kaplama olarak çok uygundur [61]. Kullanılan malzeme miktarı azaltılarak maliyetinde önemli ölçüde azaltılabilmesi mümkündür. Ancak malzeme miktarı azaltıldığında da yüksek verimlilik büyük ölçüde korunmalıdır. Bu noktada paslanmaz çelik günlük yaşantımızda hemen her noktada karşımıza çıkmaktadır. Kolay ulaşılabilir, işleme elverişli ve en önemlisi düşük maliyetleri ile PEM elektroliz uygulamaları için elverişli görülmektedir. Farklı metal kaplamalar ile 316 paslanmaz çeliğinden GDE üretimi, korozyon direnci ve düşük maliyeti ile PEM elektrolizörlerinde yüksek maliyet etkisinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

Liu ve arkadaşları [61], Ti üzerine TiN ve Karbonlu fazlardan oluşan nano boyutlu hibrit bir kaplam hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda Ti'den daha iyi ICR ve üstün korozyon direnci sağlamışlardır. Ayrıca, hazırlanan BP, 300 saatten fazla 1,7 V'ta polarizasyon altında simüle edilmiş PEMWE ortamına ve PEMWE hücre testlerine tabi tutuldu. PEMWE'nin gerçek çalışmasında yüksek anot potansiyeli, asidik ortam ve reaktant suyun neden olduğu yıkama altında mükemmel dayanıklılık gösterdi. Cho ve arkadaşları [68], 1kw PEM yakıt pili için paslanmaz çelik üzerine TiN kaplamalı bipolar plaka üreterek grafit ve TiN kaplı 316 çelik ile karşılaştırmışlardır. Sonucunda TiN kaplı bipolar plakada, elektrik temas direnci ve su temas açısı grafit ile karşılaştırılabilir seviyelerdeydi. 1,18kW güçte tasarlanan 12 hücreli yakıt pili 1028 saat çalıştırıldığında yıgın bozunma oranı 1000 saatte ortalama %11 olarak gerçekleşmiştir. Kıstı ve arkadaşları [49], Ağ yapılı SS316 GDE elektrotlarına farklı molar oranlarında Pt kaplayarak yüzey morfolojisi ve elektrokimyasal ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Kaplanmamış numunelere göre akım yoğunluğunda yaklaşık %300 artış olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca korozyon potansiyelinin 218,28 mV'den 689,5 mV'a çıktığı görülmüştür. Bu çalışmada Pt kaplı SS elektrotların, PEMWE'lerin ticarileşmesinin önündeki en büyük engellerden biri olan Pt kaplı Ti ağ gibi pahalı GDE bileşenlerine iyi bir alternatif olabileceği öne sürülmüştür. Yi ve arkadaşları [69], magnetron sıçratma yöntemi kullanarak SS316 çeliğini TiN ve ZrN kaplayarak PEM yakıt hücreleri için katot bölgesinde korozyon direnci ve hidrofobikliği incelemişlerdir. Çalışma korozyon direncinin önemli ölçüde artırıldığını öne sürmüştür. EIS ve polarizasyon eğrisi sonuçları, TiN kaplamanın ZrN kaplamaya göre daha fazla korozyon direncine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kaplanmış numunelerin deiyonize su ile temas açısı, boş numune

ile karşılaştırıldığında artar, bu da TiN ve ZrN'nin hidrofobikliği iyileştirebileceğini ve arayüzey temas dirençlerinin önemli ölçüde azalacağını gösterir. Jin ve arkadaşları [70], PEM yakıt hücrelerinde Bipolar plaka uygulaması için SS316 çelik üzerine magnetron sıçratma kullanarak Cr-TiN kaplamalar gerçekleştirmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon, EIS testleri ve gözeneklilik sonucu, CrTiN kaplamadaki nispeten yüksek Ti elementi içeriğinin daha iyi korozyon direnci sağlayabildiğini göstermiştir. Ayrıca kaplamanın potansiyostatik polarizasyondan önceki ve sonraki temas açıları sırasıyla 109,0 ve 99,5'tir ve bu katodik PEMFC ortamındaki suyu uzaklaştırmak için iyi olduğunu göstermiştir. Mohsen ve arkadaşları [71], PEM Yakıt hücreleri bipolar plakları için SS410 çeliği üzerine TiN ve CrN kaplama gerçekleştirmişlerdir. Korozyon direncinin kaplamasın SS410 a kıyasla önemli ölçüde artırıldığı kaydedilmiştir. CrN ve TiN örnekleri için ICR'nin ortalama değerleri 9,26 ve 11,23 $m\Omega \cdot cm$ olarak tespit edildiğini belirtmiş ve yakıt hücrelerinde bipolar plaklar için üstün performansı kanıtladığını bildirmişlerdir. Wang ve arkadaşları [72], yakıt pili bipolar plakları için 316 paslanmaz çeliği üzerine PVD yöntemi ile TiN kaplamışlardır. Simüle edilmiş katot ortamında, TiN kaplama, çukur korozyonunun varlığı nedeniyle ölçülen korozyon akım yoğunluğunu arttırdığı belirtilmiştir. Perego ve arkadaşları [73], PEMFC için TiN nano yapıli ince film elektrotu geliştirmişlerdir. Optimal olmayan performanslara rağmen, PEMFC önemli güç yoğunlukları ve yüksek Elektrokimyasal aktif yüzey alanı değerleri gösterdi, bu da yeni elektrotun gelecekteki MEA uygulamaları ve ölçeklendirme vaat ettiğini göstererek, verimli ve son derece kararlı yakıt hücreleri için gelecek vadettiği belirtilmiştir.

Bu kapsamda, nadir elementlerin kullanımını azaltarak veya daha erişilebilir ve yenilikçi malzemeler kullanarak PEM elektrolizörlerin yaygınlaşmasına katkı sağlanması mümkün görünmektedir. Paslanmaz çelik (SS316) elektrotların TiN ile ince film kaplanması bu bağlamda dikkate değer bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. SS316 paslanmaz çeliği, yaygın olarak kullanılan ve maliyet açısından avantajlı bir malzemedir. TiN kaplamaları ise korozyon direncini artırarak, elektrokimyasal performansı iyileştiren etkili bir yöntemdir.

Bu tez çalışması, PEM elektrolizörlerin anot gaz difüzyon tabakalarında kullanılan mesh yapılarına alternatif bir çözüm sunmayı hedeflemektedir. CVD yöntemiyle TiN ince film kaplanmış SS316 elektrotlar, yüksek korozyon direnci ve stabilite sergilemektedir. Ayrıca, bu çalışmada farklı mesh yapılarına ve kaplama kalınlıklarına bağlı olarak

korozyon etkileri incelenmiş ve elektrotların elektrokimyasal davranışları uzun süreli testlerle değerlendirilmiştir. Elde edilen bulguların literatüre katkı sağlaması ve PEM elektrolizörlerin ticari uygulamalarda yaygınlaşma potansiyelini artırması beklenmektedir.



2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Paslanmaz Çelik Elektrotların TiN Kaplanması

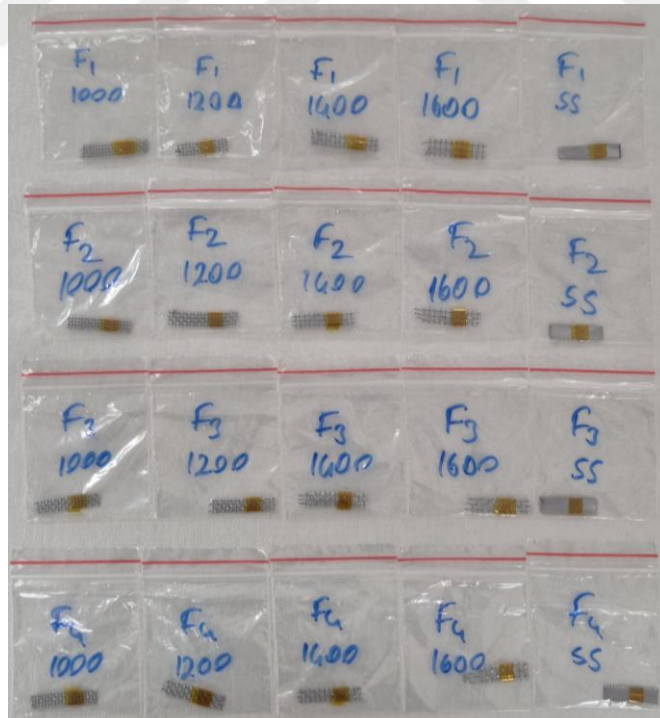
Bu tez çalışmasında, 316 paslanmaz çelikten üretilen dört farklı ağ (mesh) yapısına sahip elektrotlar ve bir adet düz çelik levha, kaplama işlemi öncesi uygun ebatlarda kesilerek hazırlanmıştır. TiN kaplamanın dört farklı kalınlıkta gerçekleştirilmesi planlandığı için her bir yapıdan dört özdeş numune elde edilmiştir. Bu doğrultuda, her biri 50 x 50 mm boyutlarında toplamda 20 adet elektrot hazırlanmıştır.

1000, 1200, 1400 ve 1600 mesh yapıları ve düz SS316 paslanmaz çelik plaka CVD kaplama için hazırlanmıştır. Hazırlanan elektrotlar, ince film kaplama yöntemi ile kaplanmış ve her bir numuneye 0,2 µm kalınlığında Cr ara katman uygulanmıştır. Bu işlemten sonra, 0,7, 1,1, 1,5 ve 2,0 µm kalınlıklarda TiN kaplama yapılmıştır. Bu kaplama kalınlıkları, Dur ve arkadaşlarının[74] metalik kaplamalarla üretilen bipolar plaka uygulamaları üzerine yaptığı çalışmalar referans alınarak belirlenmiştir. Kaplama işlemi öncesinde, tüm numuneler sabit bir temizleme sürecine tabi tutulmuştur. Bu süreçte numuneler sırasıyla 5'er dakika boyunca saf su, aseton, etil alkol ve izopropil alkol içinde ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Temizleme işlemleri tamamlandıktan sonra numuneler azot gazı akışı altında kurutulmuştur. Temizlenen numuneler, son aşamada Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemi ile Cr ara katman ve TiN ince film kaplanarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Tablo 2'de belirtildiği şekilde isimlendirilmiştir.

Tablo 2. Numunelerin adlandırma tablosu

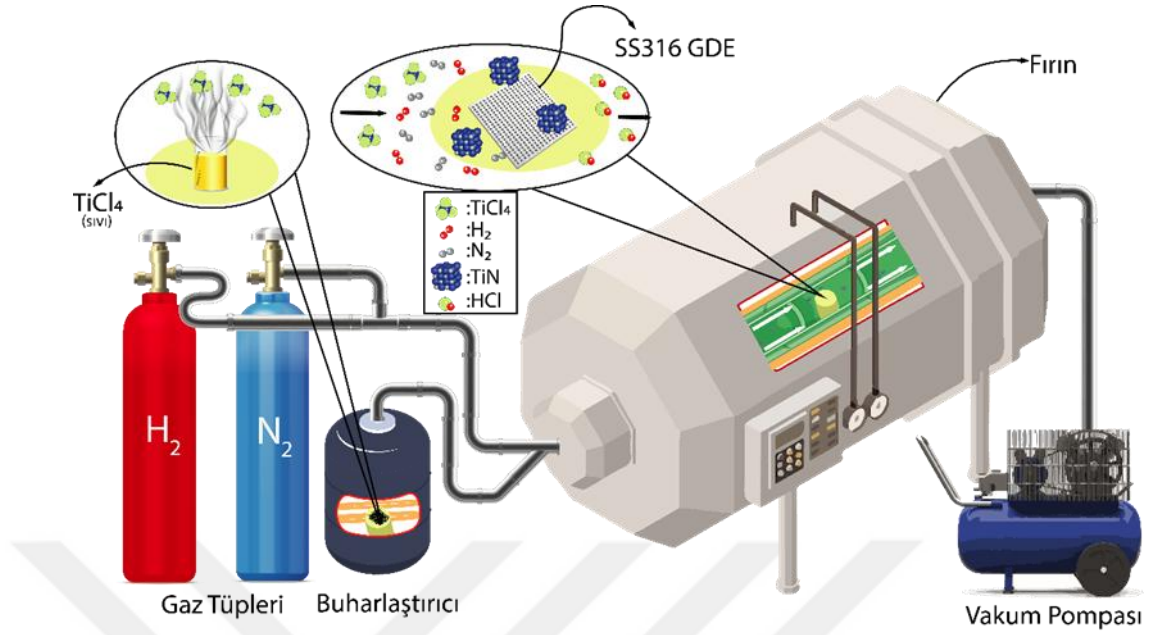
	Kaplamasız	0,2 μm Cr 0,7 μm TiN	0,2 μm Cr 1,1 μm TiN	0,2 μm Cr 1,5 μm TiN	0,2 μm Cr 2,0 μm TiN
1000 Mesh	F0_1000	F1_1000	F2_1000	F3_1000	F4_1000
1200 Mesh	F0_1200	F1_1200	F2_1200	F3_1200	F4_1200
1400 Mesh	F0_1400	F1_1400	F2_1400	F3_1400	F4_1400
1600 Mesh	F0_1600	F1_1600	F2_1600	F3_1600	F4_1600
SS316 Levha	F0_SS	F1_SS	F2_SS	F3_SS	F4_SS

Tablo 3'te çalışma elektrotlarının isimlendirilme matrisi görülmektedir. Yatay ekseninde mesh yapıları, dikey ekseninde ise kaplama kalınlıkları gösterilmiştir. XX_YY formatında düzenlenen isimlerde ilk kısım (XX) kaplama kalınlığını, ikinci kısım (YY) ise mesh yapısını temsil etmektedir. F0 kaplama olmayan numuneyi, F1, F2, F3 ve F4 ise sırasıyla 0,7 μm , 1,1 μm , 1,5 μm , 2,0 μm TiN kaplama kalınlıklarını ifade etmektedir. Şekil 4'te hazırlanan elektrotlar gösterilmektedir.



Şekil 4. Hazırlanan numuneler

TiN ince film kaplaması, TiCl_4 buharı, N_2 ve H_2 gazlarının vakum altında kimyasal reaksiyonları ile gerçekleşmektedir [75]. Reaksiyon işleyişi Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Kimyasal Buhar Biriktime (CVD) yöntemi

Reaktör içerisinde $TiCl_4$, H_2 ve N_2 yüksek sıcaklık altında kimyasal reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda TiN ve HCl oluşur. Oluşan HCl yüksek sıcaklık altında buhar fazında olduğu için süpürme gazı olan N_2 ile reaktörden atılır. Kalan TiN ise altlık malzeme üzerine kaplanır.

Reaktör içerisinde gerçekleşen reaksiyon Eş. 2.1’de gösterilmiştir



Bu reaksiyon, TiN kaplamalarının üretimi için kullanılan bir süreçtir. Reaksiyonun temel bileşenleri arasında titanyum tetraklorür ($TiCl_4$), N_2 ve hidrojen H_2 gazları bulunmaktadır. $TiCl_4$, N_2 ve H_2 ile reaksiyona girerek TiN kaplamasının elde edilmektedir. Reaksiyon, yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir ve titanyum nitrür katı formda çökmesiyle elde edilmektedir.

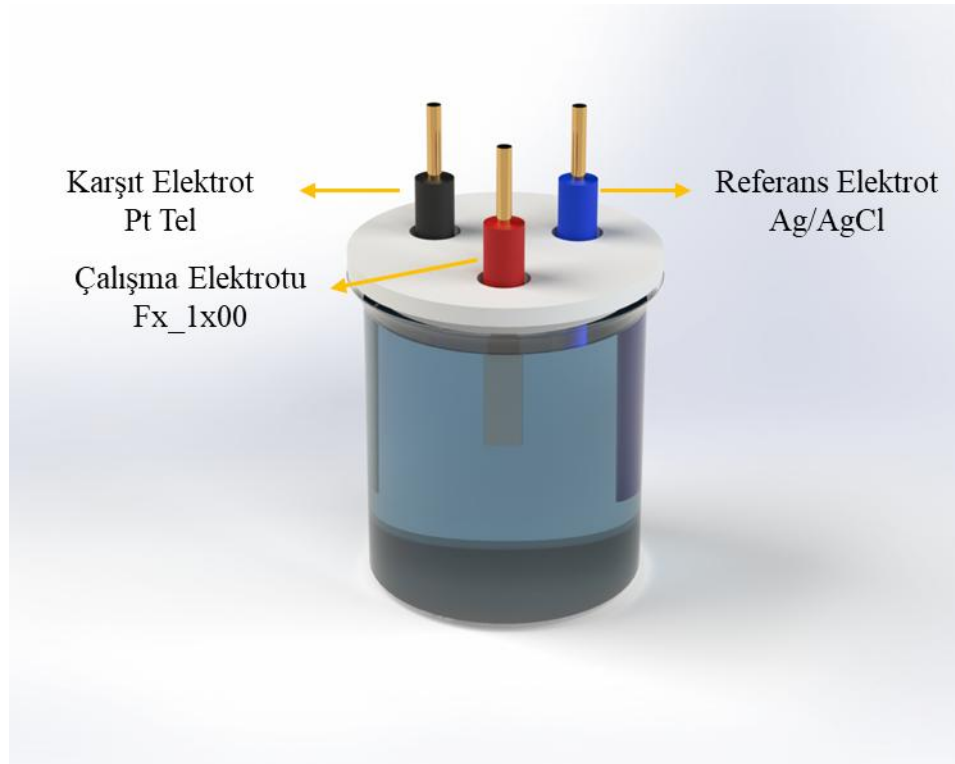
Bu reaksiyonda hidrojen, titanyum tetraklorürde bulunan klor atomlarını indirgeme işlevi görmektedir. Bu indirgeme işlemi, hidrojenin klor ile reaksiyona girerek HCl gazını oluşturmaktadır. Azot, titanyum ile birleşerek titanyum nitrür TiN oluşturmaktadır. Bu birleşim, nitrürleşme reaksiyonunu başlatır ve sonucunda yüksek sertlik ve korozyon

direnci gösteren titanyum nitrür kaplamaları oluşmaktadır. Reaksiyonun sonunda, TiN katı formda oluşmaktadır. Oluşan yan ürün olan HCl reaktörden dışarı salınır.

2.2. Elektrokimyasal Karakterizasyon

Kaplanmış elektrotların elektrokimyasal performansları ve kinetik davranışları, stabilite, polarizasyon özellikleri ve korozyon davranışları Tafel eğrisi analizleri ve kronoampermetri (CA) yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

Elektrokimyasal ölçümler, 0,5 M H_2SO_4 çözeltisi kullanılarak, üç elektrotlu bir sistemle gerçekleştirilmiştir. Çalışma sırasında kullanılan cihaz, Autolab PGSTAT 204 potansiyostat/galvanostat (Metrohm, Türkiye) olup; çalışma elektrodu olarak kaplanmış SS316 elektrotlar, karşı elektrodu olarak platin tel ve referans elektrodu olarak da Ag/AgCl (3 M KCl) tercih edilmiştir. LSV ve EIS yöntemleriyle incelenmiştir. LSV 0-1,9V aralığında 0,01 V/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir. EIS 10.000-0,01Hz aralığında, OCP voltajında gerçekleştirilmiştir. CA analizi ise 1,3V sabit gerilimde 10 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Kullanılan üç elektrotlu sistemin şematik bir gösterimi Şekil 6'te verilmiştir.



Şekil 6. Elektrokimyasal analizlerde kullanılan üç elektrot yöntemi

2.3. Yüzey Karakterizasyonu

Hazırlanan elektrotların yüzey morfolojileri ve kimyasal bileşimleri, FE-SEM ve FE-SEM/EDX (Zeiss Gemini SEM 500-71-08) teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. SEM görüntüleme, 10.000X ve 50X büyütme oranlarında, 5 ve 20 kV hızlandırma gerilimi, 8,4 mm çalışma mesafesi (WD) ve 567 V ESB ızgara gerilimi (ESB grid voltage) koşullarında yapılmıştır. Bu analiz koşulları, nanometre ölçeğindeki detayların yüksek çözünürlükle görüntülenmesini ve enerji seçici dedektör ile sinyalin optimize edilmesini sağlamıştır. SEM-EDX analiz parametreleri, 20 kV hızlandırma voltajı, 500X büyütme oranı ve 35,1° take-off açısı olarak belirlenmiştir. Dedektörün enerji çözünürlüğü 127,5 eV olup, canlı toplama süresi 30 saniye olarak ayarlanmıştır. Analiz edilen alanın yüzey morfolojisi, SEM görüntüsü ile desteklenmiş ve EDX sonuçları yüzde ağırlık ve atomik oranlar olarak rapor edilmiştir. Numunelerin elementel haritalama analizi, 20 kV hızlandırma gerilimi, 500X büyütme oranı, 35,2° take-off açısı, 327,7 saniye canlı ölçüm süresi, 1,92 μ s amplifikatör zamanı ve 127,5 eV enerji çözünürlüğü parametreleri ile gerçekleştirilmiştir.

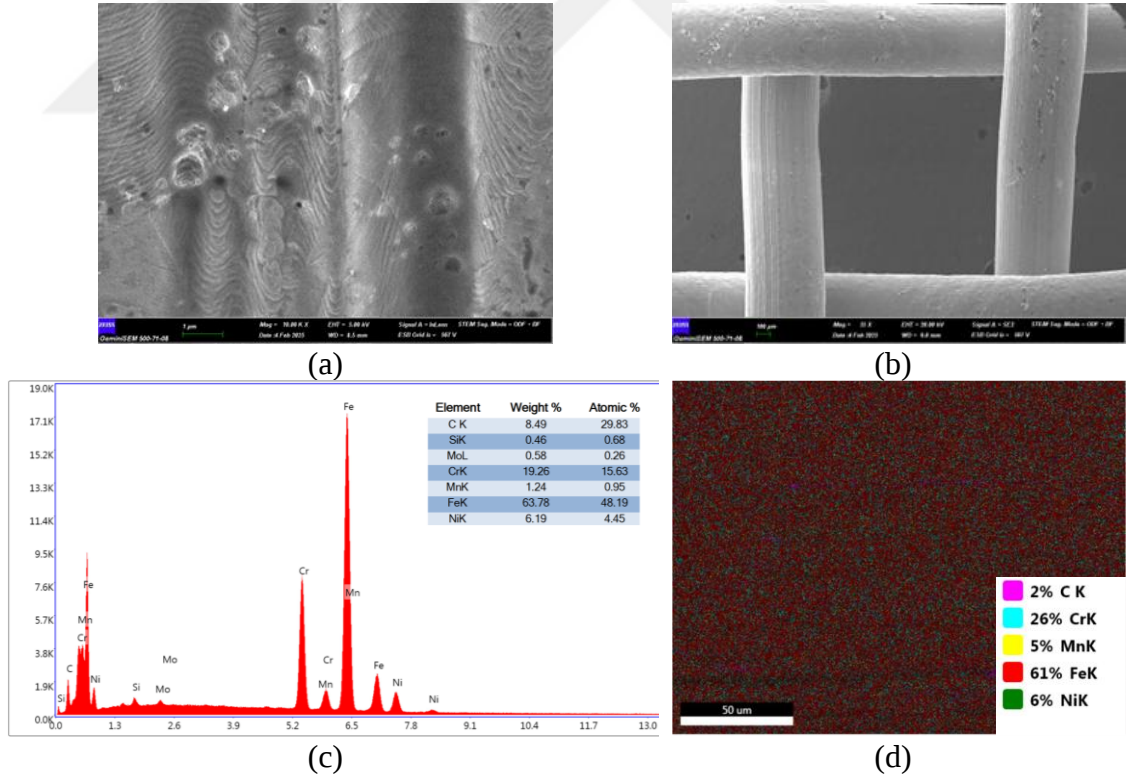
Elektrotların yapısal ve faz özellikleri, X-ışını Difraksiyonu (XRD) yöntemi ile incelenmiştir. XRD ölçümleri, Panalytical Empyrean difraktometresi kullanılarak, Cu K α radyasyon kaynağı ve 0,02°/dakika tarama hızında yapılmıştır.

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Elektrokimyasal Analizler Öncesi Yüzey Karakterizasyonu

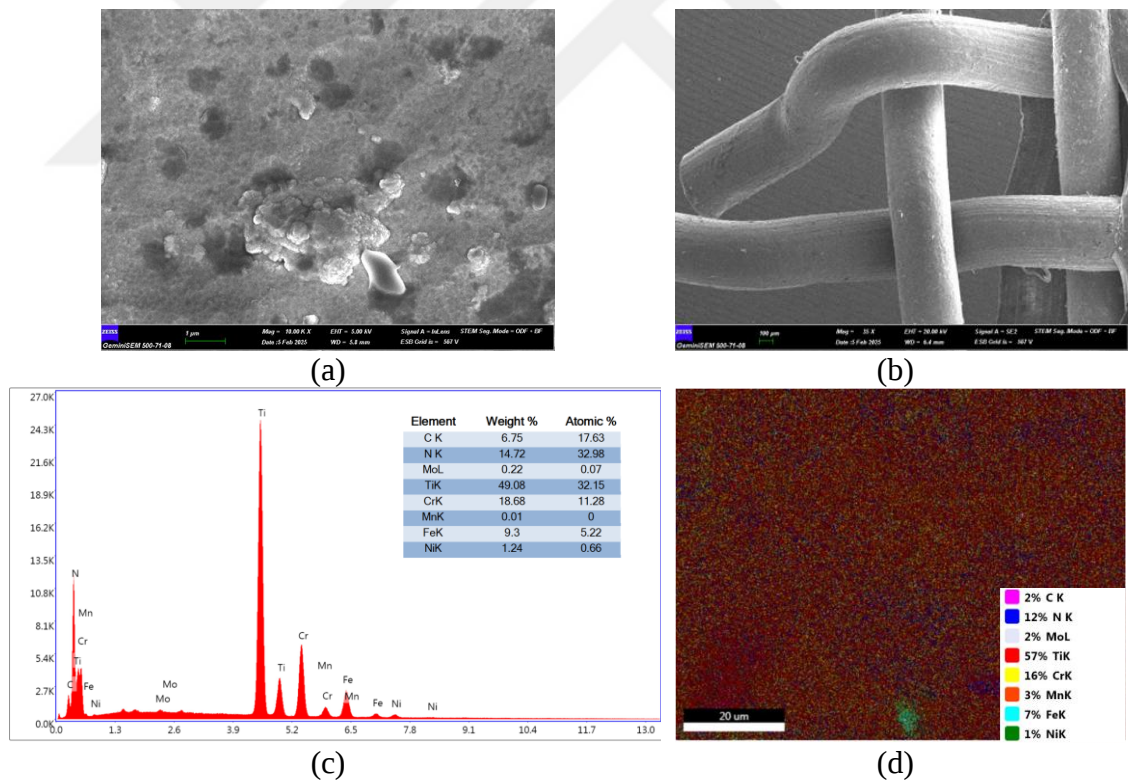
Hazırlanan numuneler elektrokimyasal testler öncesinde SEM, SEM-EDX ve elementel haritalama yöntemleri ile yüzey karakterizasyonlarına tabii tutulmuştur. 1000 mesh yapısı için yüzey karakterizasyon görüntüleri ve sonuçları Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 7. F0_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel dağılım grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü

Şekil 7.a ve Şekil 7.b incelendiğinde F0_1000 numunesinin, kaplama öncesinde 10.000X ve 50X büyütme oranlarında SEM görüntüsü görülmektedir. SEM görüntülerinde yüzeyde düzensizlikler görülmektedir. Şekil 7.c’deki EDX analizi ve Şekil 7.d’deki

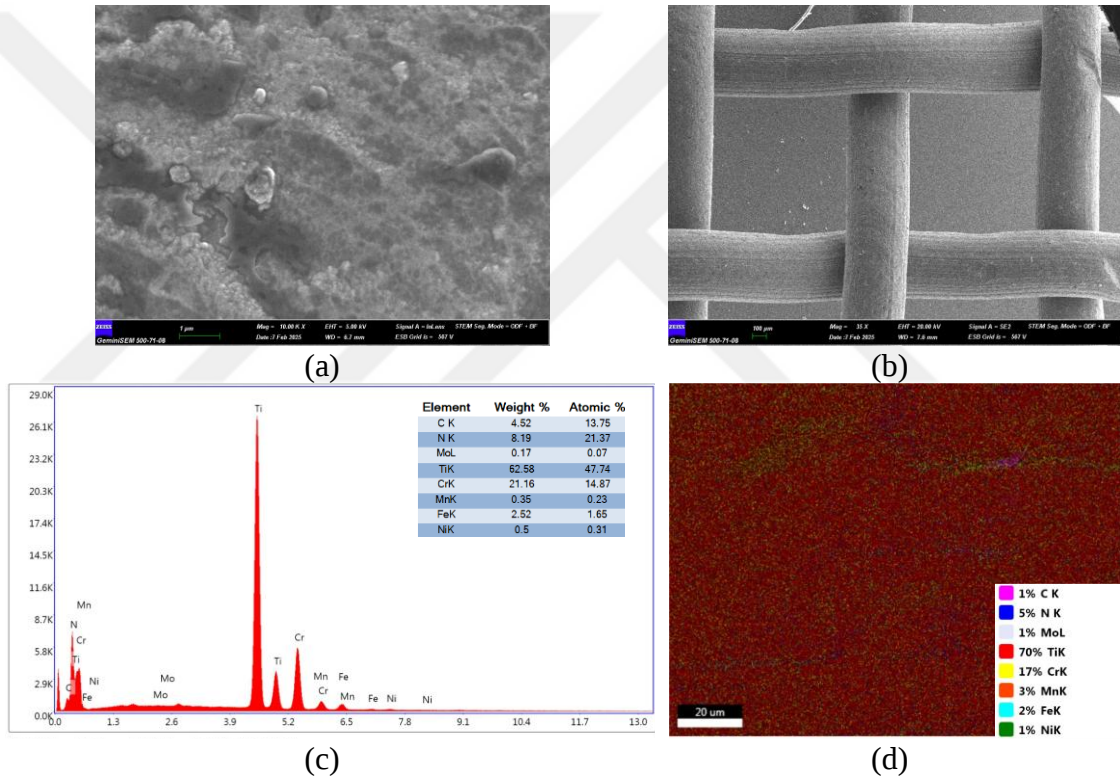
elementel haritalama analizi, F0 numunesinin elementel dağılımını ayrıntılı bir şekilde göstermektedir. Demir (Fe), Krom (Cr) ve Nikel (Ni) gibi elementlerin baskın olması, numunenin paslanmaz çelik özellikleri taşıdığını göstermektedir. Fe, bu yüzeyin ana yapı taşı olarak önemli bir bileşendir ve yüzeyde ağırlıkça %63,78 oranında bulunmaktadır. C ve Mn, malzemenin sertliğini ve mekanik dayanımını artıran özellikler taşır. Ayrıca, Cr ve Ni elementleri, malzemenin paslanmaz özelliklerini artırarak korozyon direncini sağlasa da yüksek Fe ve C oranları malzemenin korozyona uğrama potansiyelini artırmaktadır. Buna göre, F0 numunesinin daha korozif ortamlar altında risk taşıyan bir yapıya sahip olduğu ama düşük korozyon ortamlarında belirli bir dayanıklılığa sahip olabileceği düşünülmektedir. Bu elektrot altlık malzeme olarak kullanılmış ve üzerine farklı kalınlıklarda Cr arakatmanlı TiN kaplaması gerçekleştirilmiştir, kaplamalar sonrasında yüzey karakterizasyonları Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 8. F1_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel dağılım grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü

Şekil 8.c incelendiğinde paslanmaz çelik yüzeyinde Ti ve N elementlerinin arttığı görülmektedir. Kaplama olmayan paslanmaz çelik yüzeyinde %63,78 oranında yer alan Fe elementi, F1 kaplamasında %9,3 oranına düşmüştür. Böylece gerçekleştirilen kaplama yüzeyde %85 oranında Fe elementinin azalmasını sağlamıştır. Aynı zamanda

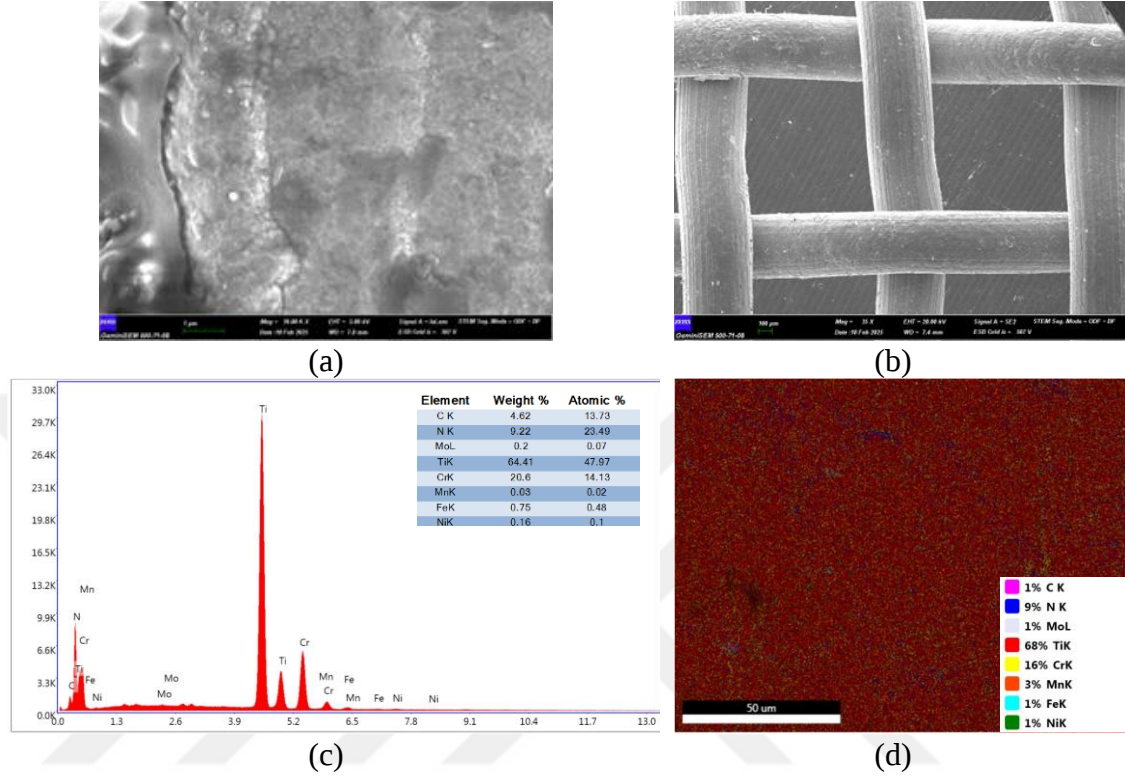
gerçekleştirilen kaplama sonucunda yüzeyde diğer paslanmaz çelik elementlerinin de önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte yüzeyde ağırlıkça %49 oranında Ti oluşumu görülmektedir. Şekil 8.a ve Şekil 8.b SEM görüntüleri incelendiğinde kaplamanın bazı bölgelerde mikro gözenekler ve partiküller görülmektedir. Düşük kaplama kalınlığının yüzeyde homojen kaplama için yeterli olmadığı düşünülebilir. Şekil 8.d incelendiğinde yüzeyde Ti yoğunluğu açıkça görülmektedir. Ti bütün yüzeyde homojen dağılım göstermektedir. Bununla birlikte Cr ve N elementlerinin yüzeyde homojen dağılımından söz etmek mümkündür. Ancak burada hedef kaplama olan TiN varlığının teyidi için XRD analizleri incelenecektir.



Şekil 9. F2_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel dağılım grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü

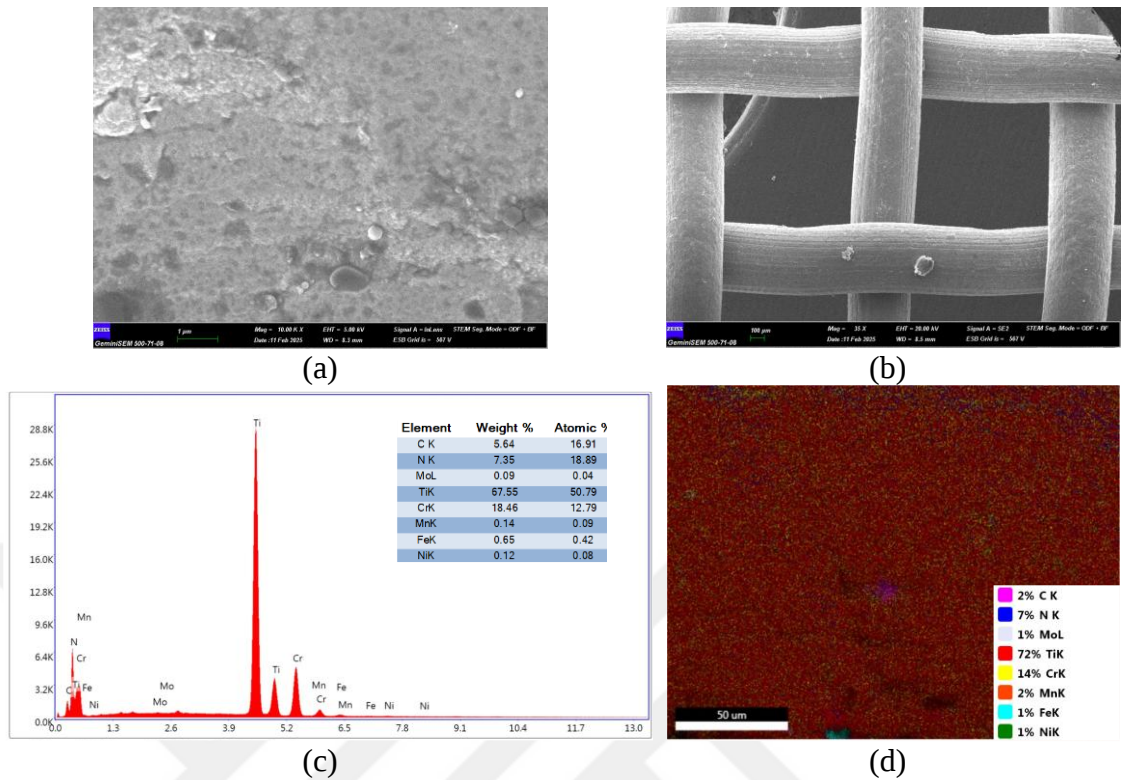
Şekil 9.a ve Şekil 9.b incelendiğinde F1 kaplamasına göre daha homojen bir kaplama görülmektedir. F1 numunesi SEM görüntülerine kıyasla yüzeyde yer alan partiküller ve mikro gözenekler çok daha az görülmektedir. Kaplama kalınlığındaki artışın, yüzeyi daha stabil hale getirdiği görülmektedir. Şekil 9.c incelendiğinde F0 numunesine kıyasla paslanmaz çelik yapısında yer alan demirin yaklaşık %96 oranında yüzeyde azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda Ti elementinde kaplama kalınlığı ile doğru orantılı bir artış görülmekte ve F1 kaplamasında %49 olan Ti miktarı F2 kaplamasında %62,58'e yükselmiştir. Şekil 9.d incelendiğinde yüzeyde Ti ve N elementlerinin yaygın ve homojen

olduğu görülmektedir. Bununla beraber Fe ve diğer paslanmaz çelik elementlerinin yüzeyde azaldığı görülmektedir.



Şekil 10. F3_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel dağılım grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü

Şekil 10.a ve Şekil 10.b SEM görüntüleri incelendiğinde yüzey stabilitesinin kaplama kalınlığı artışıyla arttığı görülmektedir. Bölgesel olarak kaplamalarda düzensizlik görülse de F1 ve F2 numunelerine görece daha yüksek homojenlik göstermektedir. Şekil 10.c incelendiğinde F0 numunesine kıyasla yüzeydeki Fe miktarının %98 oranında azaldığı ve Ti miktarının kaplama kalınlığıyla doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. F1 ve F2 numunelerinde sırasıyla %49 ve %62,58 olarak görülen Ti miktarı F3 kaplamasında %64,41 oranında görülmektedir. Şekil 10.d'de elementel haritalama görüntüsü incelendiğinde Ti kaplamanın yüzeyde homojen dağıldığı görülmektedir. Ti ile beraber Cr ve N elementlerinin yüzeyde yaygın olduğu görülmektedir.



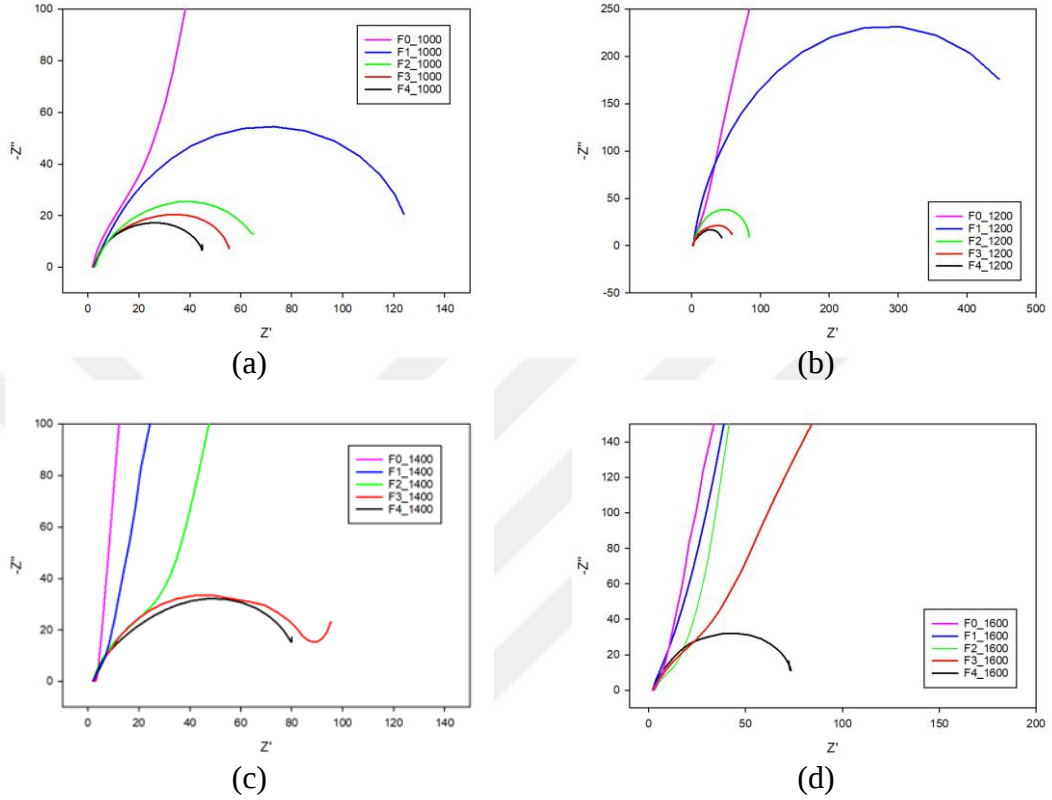
Şekil 11. F4_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü

Şekil 11.a ve Şekil 11.b SEM görüntüleri incelendiğinde paslanmaz çelik yüzeyinin homojen kaplaması açıkça görülmektedir. Şekil 11.c incelendiğinde F0 numunesine kıyasla demir varlığının yüzeyde %99 oranında azaldığı ve Ti miktarının kaplama kalınlığı ile doğru orantılı arttığı görülmektedir. F1, F2 ve F3 numunelerinde sırasıyla %49, %62,58, %64,41 olarak görülen Ti miktarı F4 kaplamasında %67,55 oranında görülmektedir. Aynı zamanda %18,46 oranında Cr, %7,35 oranında N elementi görülmektedir. Şekil 11.d elementel haritalama görüntüsü incelendiğinde paslanmaz çelik elementlerinin neredeyse tamamen kaplandığı ve yüzeyde TiN kaplama nedeniyle yüksek miktarda Ti ve N, ara katman kaplama nedeniyle Cr varlığı görülmektedir. Elementel haritalama analizi, elementel dağılımın homojen bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

3.2. Elektrokimyasal Analizler

TiN kaplaması gerçekleştirilen numuneler 0,5 x 0,5 cm ebatlarında kesilerek elektrokimyasal testlere tabii tutulmuştur. EIS, LSV, Tafel analizleri gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 12’de

mesh yapılarının ve kaplama kalınlıklarının EIS performanslarına etkisi karşılaştırılmıştır.



Şekil 12. Mesh yapılarının ((a) 1000, (b) 1200, (c) 1400, (d) 1600) farklı kaplama kalınlıklarında EIS davranışları

EIS ölçümlerinden elde edilen Nyquist diyagramları, farklı gözenek yapısına ve TiN kaplama kalınlıklarına sahip numunelerin elektrokimyasal performanslarını karşılaştırmaktadır. Her dört grafikte de kaplamasız numunelerin (F0) en yüksek empedans değerlerine sahip olduğu ve eğrilerinin dik bir karakter sergilediği görülmektedir. Bu durum, kaplamasız paslanmaz çelik yüzeyinde yüksek yük transfer direnci ve kütle taşınımı sınırlamaları olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, TiN kaplamalı numunelerde yarım dairelerin çapı küçülmekte, yani yük transfer direnci azalmaktadır. Bu, kaplamanın elektrot yüzeyinde daha iyi bir iletkenlik sağlayarak elektron transferini kolaylaştırdığını ve elektrokimyasal süreçleri hızlandırdığını göstermektedir.

Şekil 11.a'da 1000 mesh gözenekli yapıya sahip numuneler incelenmiştir. F0_1000 numunesinin oldukça yüksek empedansa sahip olduğu ve büyük bir yük transfer direnci sergilediği görülmektedir. Kaplamalı numunelerde ise empedans değerleri F1_1000'de

120 Ω F4_1000'de ise yaklaşık 40 Ω ölçülmüştür. 1000mesh numunesi içinde en düşük direnç değeri en yüksek kaplama kalınlığı olan F4_1000'de elde edilmiştir.

Şekil 11.b'de 1200 mesh yapıya sahip numuneler karşılaştırıldığında, benzer bir eğilim gözlenmektedir. Kaplamasız numune yüksek empedansa sahipken, TiN kaplama kalınlığı arttıkça yük transfer direnci düşmektedir. F1_1200'de yaklaşık 550 Ω ölçülen direnç değeri F4_1200'de 50 Ω olarak ölçülmüştür. Belirli bir kalınlık seviyesinden sonra empedans değerlerinde büyük bir değişim gözlenmemektedir. 1000 mesh yapısında olduğu gibi F2, F3 ve F4 birbirine yakın direnç değeri sergilemektedir. Bu da yüzey karakterizasyon verilerinde Ti miktarının birbirine yakınlığı ile ilişkilendirilebilir.

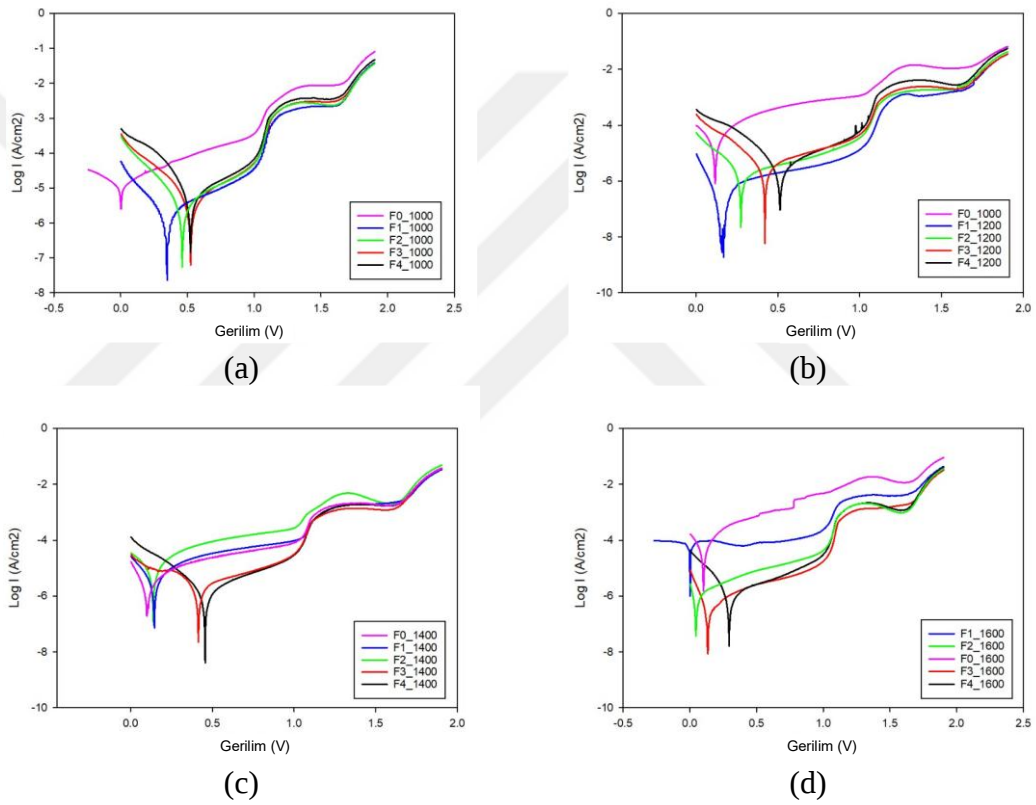
Şekil 11.c'de ise 1400 mesh yapısındaki numuneler değerlendirilmiştir. Bu yapıda, kaplamasız ve en ince kaplamalı numuneler (F0_1400, F1_1400 ve F2_1400) dik bir eğim sergileyerek yüksek yük transfer direncine sahip olduklarını göstermektedir. Ancak, kaplama kalınlığı arttıkça (F3_1400 ve F4_1400) F1 ve F2 kaplamalarına kıyasla daha düşük direnç görülse de F3_1000 ve F4_1000 numuneleri ile karşılaştırıldığında 2 kat daha yüksek direnç değeri sergilediği görülmektedir. Bu da performansın yalnızca kaplama kalınlığına bağlı olmadığını, mesh yapısının da performans üzerinde belirgin bir etkisinin olduğunu göstermektedir. 1,1 μ m kalınlıkta TiN kaplama gerçekleştirilen F2_1000 elektrodunun, 2,0 μ m kalınlıkta TiN kaplama gerçekleştirilen F4_1400 elektrotundan, %81 oranında daha az kaplama gerçekleştirilmesine rağmen yaklaşık %15 daha düşük direnç sergilediği görülmektedir.

Şekil 11.d'de ise 1600 mesh yapısındaki numuneler değerlendirilmiştir. Bu yapıda, kaplamasız ve en kalın kaplamalı numune (F4_1600) haricindeki diğer numuneler (F0_1600, F1_1600, F2_1600 ve F3_1600) dik bir eğim sergileyerek yüksek yük transfer direncine sahip olduklarını göstermektedir. Ancak, kaplama kalınlığı arttıkça (F4_1600) empedans belirgin şekilde düşmektedir

Genel olarak, TiN kaplamanın EIS performansını iyileştirdiği ve yük transfer sürecini kolaylaştırdığı açıkça görülmektedir. Kaplamasız numuneler yüksek empedansa sahipken, kaplama kalınlığı arttıkça empedans değerlerinin yaklaşık 5 kat düştüğü görülmektedir. Ancak, belirli bir noktadan sonra direnç değerinin yalnızca kaplama kalınlığındaki artışla ilgili olmadığı mesh yapısının da empedans üzerinde etkisi olduğu gözlemlenmiştir. F4 kaplama kalınlığı ele alındığında 1000 mesh'de 40 Ω , 1200 mesh'de 50 Ω , 1400 ve 1600 mesh'de ise 80 Ω olduğu görülmüştür. Bu da 1000 mesh'de 1600

mesh'e kıyasla yaklaşık %50 oranında düşük empedansa sahip olduğu görülmektedir. Mesh ve kaplama kalınlıklarının optimizasyonu ile daha düşük miktarda kaplama gerçekleştirilerek performans artışı sağlamak mümkündür. Bu nedenle, optimum kaplama kalınlığının belirlenmesi, sistemin hem verimli hem de ekonomik olması açısından kritik bir faktördür.

Bu numuneler kaplama kalınlığının numune üzerindeki korozyon etkisini incelemek üzere Tafel analizi ile de incelenmiştir. Şekil 13'te Tafel eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 13. Mesh yapılarının ((a) 1000, (b) 1200, (c) 1400, (d) 1600) farklı kaplama kalınlıklarında Tafel eğrileri

Şekil 13'te, dört farklı mesh yapısına sahip TiN kaplamalı numunelerin elektrokimyasal davranışlarını inceleyen Tafel eğrileri sunulmaktadır. Şekil 13.a'da, mesh yapısı 1000 olan numuneler yer almakta olup, paslanmaz çelik numunesi (F0), 0V civarlarında korozyon başlama potansiyeli gösterirken F4_1200 numunesi ise 0,5V civarlarında korozyon başlama potansiyeli göstermektedir. F1_1000 ise diğer TiN kaplamalı numunelere kıyasla daha düşük bir aktiflik sergileyerek, daha düz bir eğri göstermektedir. Bu durumda, paslanmaz çelik numunesinin korozyon başlama potansiyeli 0V civarlarındadır. TiN kaplamalı numunelerde korozyon başlama potansiyelinin 0,5V

bölgelerine kaydığı görölmektedir. Buna göre F0_1000 0V'a yakın bir gerilim seviyesinde korozyona uğramaya başlamaktadır. F1_1000'den F4_1000'e doğru, TiN kaplamalı numunelerin korozyon başlama potansiyelleri artmakta ve bu da kaplama miktarının artmasının, numunenin korozyon direncini yükselttiğini göstermektedir. TiN kaplama miktarının arttıkça, eğrilerin dikleştiğı ve akım yoğunluğunun arttığını gözlemlenmektedir. F0_1000 numunesinde akım yoğunluğu $6,3A/cm^2$ iken F4_1000 numunesi $8,2A/cm^2$ akım yoğunluğu sergilemiştir. Bu, TiN kaplamanın reaksiyon hızını artıran bir etkiye sahip olduğunu ve kaplama miktarının arttıkça elektrokimyasal etkinliğin yükseldiğini göstermektedir. F4_1000 numunesi, en dik eğriyi ve en yüksek akım yoğunluğunu ($8,2A/cm^2$) sergileyerek, en yüksek elektrokimyasal aktiviteyi gösteren numune olmaktadır.

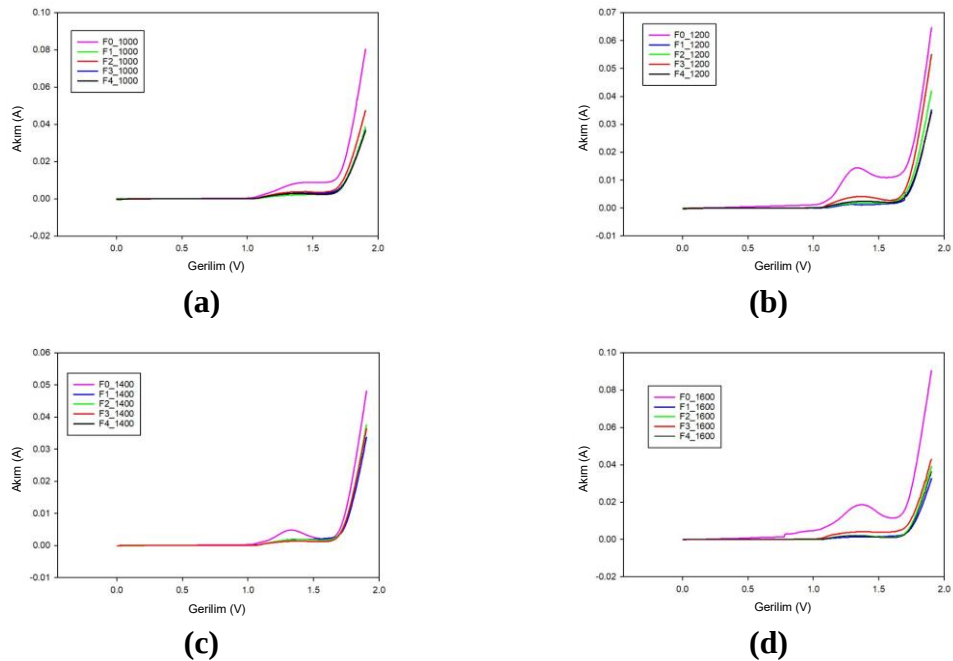
Şekil 13.b'deki eğrilerde, mesh yapısının 1200 olduğu numuneler gösterilmektedir. Korozyon başlama potansiyeli F0_1200'de 0,2V'da ve F4_1200'de ise 0,5V olarak ölçölmüştür. Buda yaklaşık olarak korozyon başlama voltajının 25 kat daha iyileştirildiğini göstermektedir. Akım yoğunlukları incelendiğinde F1 numunesi 1000 mesh 'de de olduğu gibi en yüksek akım yoğunluğunu göstermektedir. Korozyon başlama voltajının F0 numunesine yakın olduğu da değerlendirildiğinde $0,7\mu m$ TiN kaplamanın yüzeyde korozyon etkisini azaltmak için yeterli olmadığı ancak elektrokimyasal aktiviteyi yaklaşık 1,5 kat artırdığını görölmektedir. Paslanmaz çelik numunesi (F0) hâlâ diğer numunelere göre daha düşük bir performans göstermektedir. Bu grafikte de F4_1200 numunesi, en dik eğriyi ve dolayısıyla en yüksek elektrokimyasal aktiviteyi gösteren numune olmaktadır. Kaplama miktarının artışıyla birlikte, korozyon başlama potansiyelinin yükseldiğı ve bu numunelerin korozyona karşı daha dirençli hale geldiğı söylenebilir.

Şekil 13.c'de, mesh yapısının 1400 olduğu numunelere ait Tafel eğrileri gösterilmektedir. Bu grafikte, F3 ve F4 TiN kaplamalı numunelerin, paslanmaz çelik numunesine kıyasla çok daha iyi performans sergilediğı açıkça görölmektedir. Korozyon başlama potansiyeli, F0, F1 ve F2 numunelerinde 0,2V seviyelerdeyken, F4_1400 numunesinde korozyon başlama potansiyeli 0.45V civarlarında ölçölmektedir. F4_1400 numunesi yine en yüksek akım yoğunluğuna sahip ve en dik eğriyi oluşturarak, kaplama miktarının arttıkça performansın arttığını doğrulamaktadır. Ancak mesh gözenek yapısının arttığını

durumlarda düşük kaplama kalınlıklarında hem korozyon başlama potansiyelinin, hem de akım yoğunluğunun düştüğü görülmektedir.

Son olarak, Şekil 13.d'ye bakıldığında, mesh yapısının 1600 olduğu numuneler ele incelenmiştir. Bu grafikte, TiN kaplamalı numunelerinde F0 numunesine yaklaştığı görülmektedir. Korozyon başlama potansiyeli F4_1000 elektrotunda 0,5V seviyelerindeyken F4_1600 numunesinde 0,4V seviyelerine gerilemiştir. Paslanmaz çelik numunesi, yine diğer TiN kaplamalı numunelere kıyasla en düşük performansı sergileyerek, her dört durumda da daha düşük bir akım yoğunluğu ile daha az aktif bir eğriye sahiptir.

Şekil 13'de yer alan tüm grafiklerde, düşük mesh yapısında TiN kaplamalı numunelerin performansının önemli ölçüde arttığı ve en yüksek performansa sahip numunenin F4_1000 olduğu görülmektedir. TiN kaplama miktarının artması, elektrokimyasal reaksiyonların hızını artırarak, numunelerin daha aktif hale gelmesini sağlamakta ve kaplama miktarı arttıkça elektrokimyasal aktivite de artmaktadır. Mesh gözenek yapısının küçük olması da yüzey alanını artırarak, bu etkinliği daha da güçlendirmiştir. Korozyon başlama potansiyelinin, TiN kaplamalı numunelerde artması, bu numunelerin korozyona karşı daha dirençli olduğunu ve TiN kaplamanın korozyon direncini artırdığına işaret etmektedir. Şekil 14'te LSV analizleri gösterilmektedir.



Şekil 14. Mesh yapılarının ((a) 1000, (b) 1200, (c) 1400, (d) 1600) farklı kaplama kalınlıklarında LSV eğrileri

Şekil 14'te, farklı mesh yapıları ve TiN kaplama miktarları ile elde edilen LSV (Linear Sweep Voltammetry) grafikleri yer almaktadır. Bu grafiklerde, her bir mesh yapısı için paslanmaz çelik (F0) ve TiN kaplamalı numunelerin elektrokimyasal davranışları karşılaştırılmaktadır.

Şekil 14.a'da, 1000 mesh elektrotlar yer almaktadır. Paslanmaz çelik numunesi (F0), diğer TiN kaplamalı numunelere kıyasla daha yüksek bir akım yoğunluğu sergilemektedir. 1,9V'da F0_1000 elektrodu 0,8A iken kaplanmış numuneler 0,4-0,5A seviyelerinde akım çekmektedir. 1,3V seviyeleri incelendiğinde F0 numunesinde belirgin bir pik görülmektedir. Bunun nedeni paslanmaz çelik yapısında bulunan Cr elementinden kaynaklı olabilir. Kaplanmamış elektrot 1V seviyelerinde kaplanmış elektrotlara kıyasla 2 kat daha fazla akım çekmektedir. Ancak, akım yoğunluğunun yüksek olması, numunenin daha hızlı reaksiyona girdiğini ve daha düşük bir korozyon başlama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Yani paslanmaz çelik, daha düşük potansiyelde korozyona başlamakta ve bu da daha düşük performans olarak değerlendirilebilmektedir. TiN kaplamalı numuneler, kaplama miktarı arttıkça daha düşük akım yoğunlukları göstermektedir. Ancak, F4_1000 numunesi, korozyon başlama potansiyeli açısından en yüksek performansı göstermekte ve reaksiyon daha yüksek bir potansiyelde başlamaktadır.

Şekil 14.b'de, mesh yapısının 1200 olduğu numuneler incelenmektedir. Mesh yapısının artmasıyla, TiN kaplamalı numunelerinden çekilen akımın düştüğü görülmektedir. F0_1000 numunesinde 1,9V'da 0,8A akım çekilirken, F0_1200 numunesinde 1,9V'da 0,6A'ya düşmüştür. F0 numunesi yine en düşük performansı sergilerken, TiN kaplamalı numuneler daha iyi performans göstermektedir. Özellikle F4_1200 numunesi, daha düşük akım yoğunluğuna sahiptir. Bu da elektrotun daha iyi korozyon dayanımı sergilediğini göstermektedir.

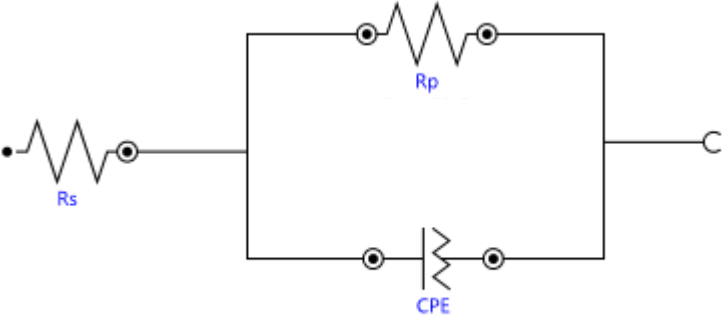
Şekil 14.'de, mesh yapısının 1400 olduğu numunelere bakıldığında, TiN kaplamalı numunelerin yine paslanmaz çelik numunesine kıyasla çok daha yüksek performans sergilediği gözlemlenmektedir. F4_1400 numunesi, korozyon başlama potansiyelinin daha yüksek olduğunu gösteriyor ve reaksiyonun daha geç başladığını işaret ediyor. Bu da TiN kaplamalı numunelerin korozyona karşı daha dayanıklı olduğunu ve daha yüksek performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Son olarak, Şekil 14.d’de mesh yapısının 1600 olduğu numuneler ele alındığında, TiN kaplamalı numunelerin performansının çok daha yüksek olduğu görülmektedir. F4_1600 numunesi, en yüksek akım yoğunluğuna sahip olup, korozyon başlama potansiyeli diğer numunelerden daha yüksektir, bu da TiN kaplamanın korozyona karşı daha yüksek bir direnç gösterdiğini işaret eder.

Şekil 14’te, mesh yapısının artmasıyla birlikte TiN kaplamalı numunelerin performansının önemli ölçüde arttığını, paslanmaz çelik (F0) numunesinin her durumda daha düşük performans sergilediği görülebilmektedir. F0 numunesinin yüksek akım yoğunluğu, numunenin reaksiyonlara daha hızlı girerek korozyona daha hızlı başladığını ve daha az direnç gösterdiğini ortaya koymaktadır. Diğer yandan, TiN kaplamalı numuneler, kaplama miktarının artmasıyla birlikte korozyona karşı daha dayanıklı hale gelerek reaksiyonları daha yüksek potansiyel değerlerinde başlamakta ve daha yüksek performans sergilemektedir. Bu da TiN kaplamanın korozyona karşı dirençli bir kaplama olduğunu ve düşük mesh yapılarında kaplamanın etkinliğinin daha da güçlendiğini göstermektedir.

Tablo 3’de EIS analizleri sonucunda elde edilen EIS eşdeğer devresi gösterilmektedir.

Tablo 3. EIS Eşdeğer Devresi



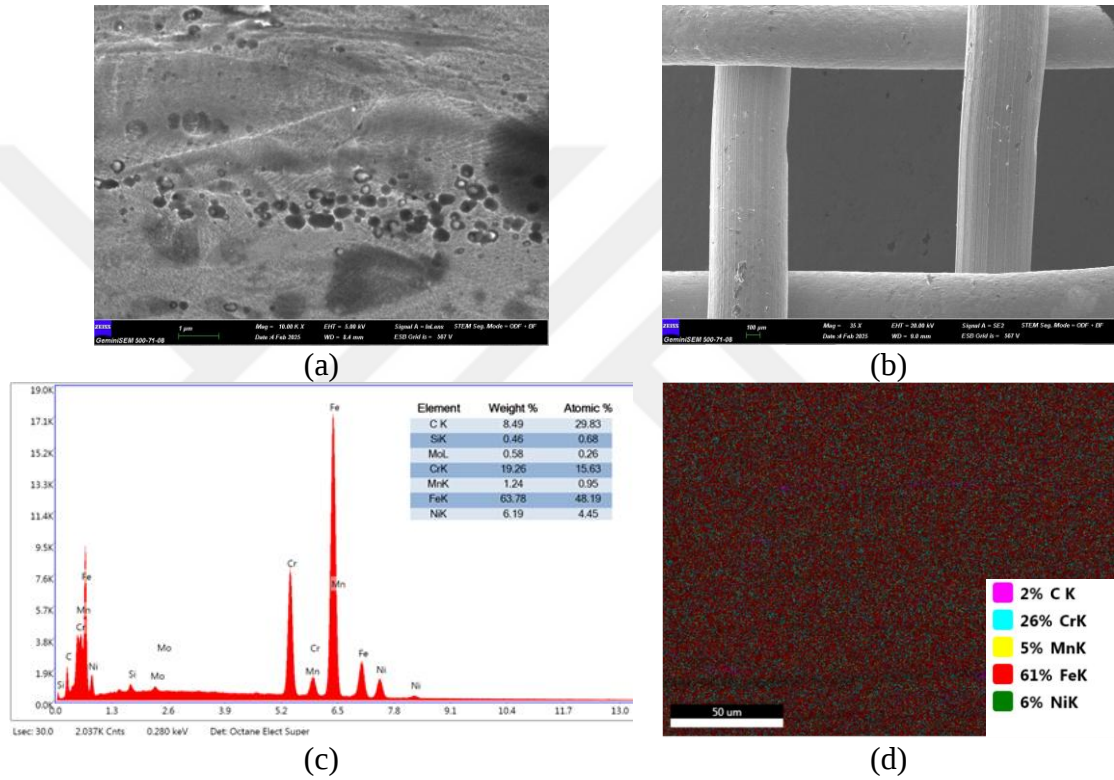
	R_s (Ω)	R_p (Ω)	CPE, Y0 (F)	CPE, N
F0_1000	2,083	2673,3	6,526 E-05	0,9133
F0_1200	1,923	5026,4	9,0054 E-05	0,91672
F0_1400	2,925	97764	2,0788 E-05	0,93987
F0_1600	2,998	44038	5,8717 E-05	0,92635
F0_SS	106,08	7953,4	1,1472 E-05	0,90631
F1_1000	2,2827	110,842	2,7662 E-05	0,86701
F1_1200	2,2733	1479,5	3,6367 E-05	0,87956
F1_1400	1,9042	11406	1,6564 E-05	0,87183
F1_1600	1,89	42994	1,1987 E-05	0,84349

F1_SS	2,0001	5242,34	7,0138 E-05	0,84622
F2_1000	2,6508	76,19	5,7153 E-05	0,88787
F2_1200	2,1806	107,93	4,5851 E-05	0,89031
F2_1400	2,064	89,781	1,7059 E-05	0,86386
F2_1600	1,972	107,76	2,2107 E-05	0,8822
F2_SS	1,9	343,42	9,2611 E-05	0,87598
F3_1000	2,2712	59,57	3,3529 E-05	0,88187
F3_1200	1,9654	64,478	2,3681 E-05	0,75336
F3_1400	2,5234	67,744	2,1483 E-05	0,80579
F3_1600	2,5251	208,2	3,5527 E-05	0,76687
F3_SS	2,3866	116,46	6,031 E-05	0,8761
F4_1000	2,6362	51,191	4,8874 E-05	0,85042
F4_1200	2,46	69,01	3,6142 E-05	0,78608
F4_1400	2,3341	81,094	2,8094 E-05	0,86331
F4_1600	1,9584	1,6263 E+05	9,7862 E-05	0,78853
F4_SS	2,7676	1,0114 E+05	7,2641 E-05	0,85386

Tablo 5’te yer alan veriler, F0, F1, F2, F3 ve F4 numunelerinin EIS ölçümleri ile elde edilen R_s (Çözelti direnci), R_p (polarizasyon direnci), $CPE.Y0$ (kapasitans sabiti) ve $CPE.N$ (dağılım parametresi) değerlerini sunmaktadır. R_s değerleri genellikle 2-3 Ω arasında değişirken, F0_SS numunesi dışında diğer numunelerde çözünürlük direnci daha düşük olup iletkenlik daha iyidir. R_p değerleri, özellikle F1_1000 ve F2_1000 gibi numunelerde düşük olup, yük transferinin daha kolay olduğunu ve bu numunelerin en iyi performansı gösterdiğini işaret eder. Diğer taraftan, F0_1600 ve F0_1400 gibi numunelerde yüksek R_p değerleri, yük transferinin daha zor olduğunu ve bu numunelerin daha düşük performans sergilediğini göstermektedir. $CPE.Y0$ değerleri, kaplama kalınlığı ve mesh yapısı ile ilişkili olarak yük taşıma kapasitesinin arttığını ancak bu kapasitenin belirli bir noktadan sonra daha fazla kaplama kalınlığının performansa çok etki etmediğini gösterir. $CPE.N$ parametresi genellikle 0,8-0,9 arasında olup, kapasitans davranışının yayılma derecesi ile homojenlik hakkında bilgi verir. Genel olarak, F1_1000 en iyi performansı gösterirken, F4_1600 ve F0_1400 gibi numuneler daha yüksek empedans ve düşük performans değerlerine sahiptir. Bu veriler, TiN kaplamanın yük transferini iyileştirdiğini ve kaplama kalınlığı ve mesh yapısının optimum seviyede olması gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.3. Elektrokimyasal Analizler Sonrası Yüzey Karakterizasyonu

Gerçekleştirilen elektrokimyasal analizler sonucunda elektrot yüzeylerindeki farklılıklar SEM, SEM-EDX ve elementel haritalama yöntemleriyle incelenmiştir. SEM görüntüleri ve elementel haritalama analizi Şekil 14-17 arasında paylaşılmıştır. Şekil 14'te kaplamasız F0_1000 numunesinin elektrokimyasal testler sonrasında yüzey karakterizasyon analiz sonuçları gösterilmektedir.

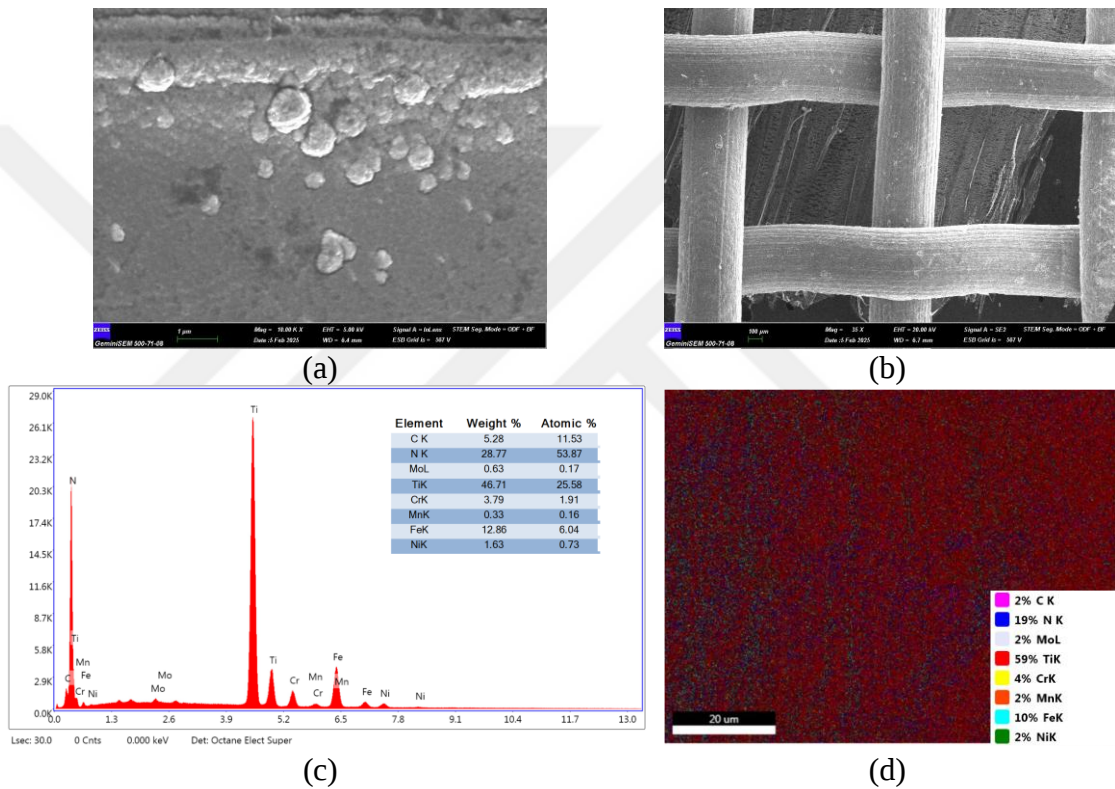


Şekil 15. F0_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü

Şekil 15.a ve Şekil 15.b'de görüldüğü üzere, kaplama yapılmamış (F0) ağ yapılı paslanmaz çelik elektrotun SEM görüntüsünde, yüzeyde belirgin partikül birikimleri ve mikro yapısal düzensizlikler gözlemlenmektedir. Partiküllerin varlığı, yüzeydeki kirlilik veya oksitlenme gibi olasılıkları işaret etmekte olup, elektrokimyasal reaksiyonlar sırasında korozyon gibi sorunlara yol açabilmektedir.

Şekil 15.c'de yer alan EDX analizi, malzemenin elementel bileşimini ortaya koymaktadır. Kaplama yapılmamış elektrotun temel bileşenleri arasında C, Si, Mo, Cr, Mn, Fe ve Ni yer almaktadır. Özellikle Fe (%62,19), Cr (%18,27) ve Ni (%6,45) oranlarının yüksek olması, elektrotun paslanmaz çelik bazlı bir malzeme olduğunu göstermektedir.

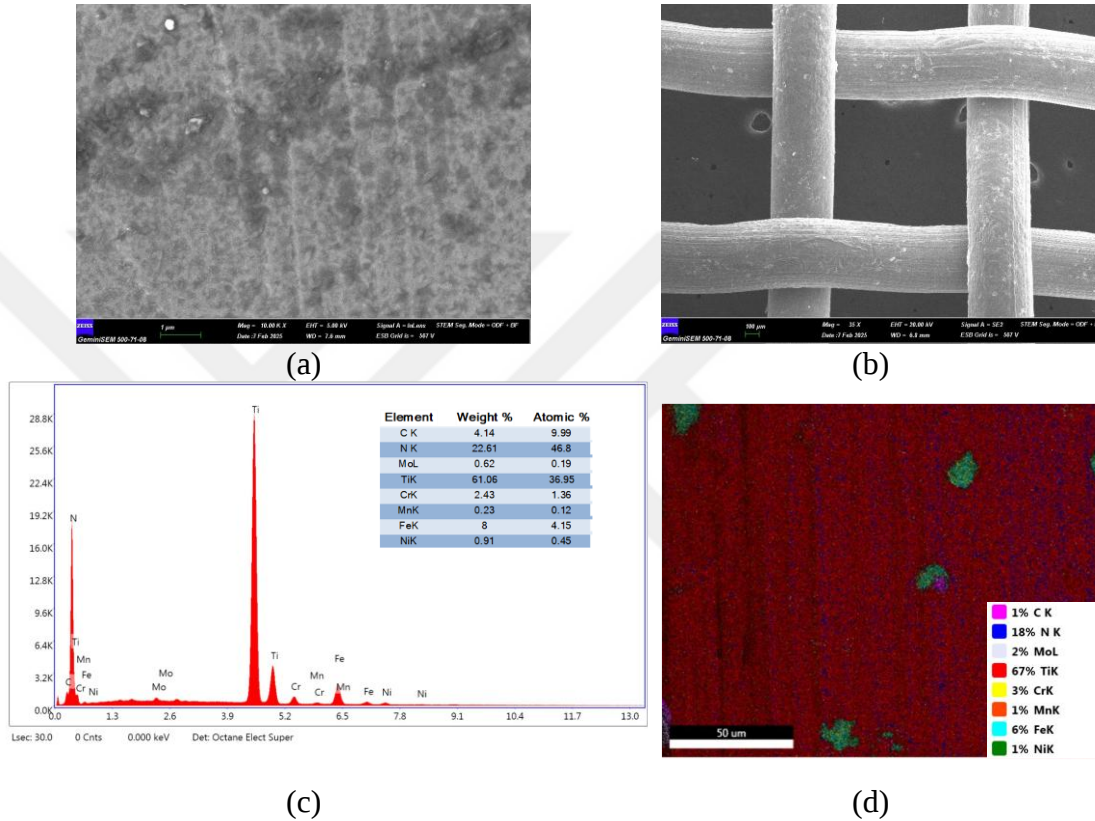
Şekil 15.d'ye bakıldığında, elementlerin yüzeydeki dağılımını gösteren harita yer almaktadır. Bu harita, yüzeydeki elementlerin homojen olmadığını, bazı elementlerin belirli bölgelerde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Cr ve Fe elementlerinin daha yoğun olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, yüzeydeki kimyasal bileşenlerin heterojen bir dağılım gösterdiğini ve elektrokimyasal reaksiyonlar sırasında farklı davranışlar sergileyebileceğini göstermektedir. Şekil 16'da F1_1000 numunesinin yüzey karakterizasyon analizler görülmektedir.



Şekil 16. F1_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü

Şekil 16.a ve Şekil 16.b'de gösterilen SEM görüntüleri incelendiğinde yüzeyde partiküller ve mikro gözenekler görülmektedir. Bu partiküller elektrokimyasal analizler öncesinde gerçekleştirilen yüzey analizlerinde de görülmektedir. Ancak elektrokimyasal analizler sonucunda partiküllerin yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Bunun nedeni analizler esnasında oluşan korozyon veya kaplamayı deformasyonu olabilir. Şekil 16.b incelendiğinde kaplamayı deformasyonu ile ilgili bir analiz gerçekleştirmekte mümkün. Elektrokimyasal analizler öncesinde yüzeyde %49 üzerinde bulunan Ti miktarı %46 seviyelerine gerilerken %9 seviyelerinde bulunan Fe miktarının %13 seviyelerine arttığı görülmektedir. Kaplama ile birlikte yüzeydeki Fe yüksek oranda Ti ve N ile

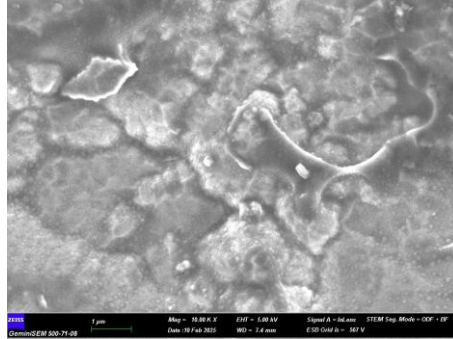
kaplanmıştı. Ancak elektrokimyasal analizlerle birlikte kaplamanın deforme olduğu düşünülebilir. Şekil 16.d elementel haritalama görüntüsü incelendiğinde homojenlikten uzak ve bölgesel dağılımlar görülmektedir. N yoğunluklu bölgelerde Fe elementi de görülmektedir. Bu nedenle yüzeyde yer alan kaplamanın TiN bileşiği oluşturmadığı düşünülebilir. Şekil 17’de F2_1000 numunesine ait yüzey analizleri gösterilmektedir.



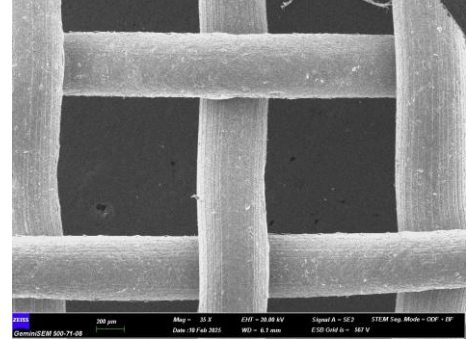
Şekil 17. F2_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü

Şekil 17.a ve Şekil 17.b SEM görüntüleri incelendiğinde yüzeyin F0 ve F1 numunelerine göre daha düzenli olduğu ancak bazı bölgelerde çok küçük partiküllerin bulunduğu görülmektedir. Bu numunedeki bozulmalar F0 ve F1 numunelerine göre daha azdır ancak bazı mikro düzensizlikler hala mevcuttur. Şekil 17.c incelendiğinde elektrokimyasal analizler öncesine göre yüzeydeki Ti miktarı korunsa da Fe miktarında önemli bir artış görülmektedir. Bununla beraber Cr miktarında da önemli bir azalma görülmektedir. Elektrokimyasal analizler esnasında 1.2V civarlarında Cr'nin oksidasyon piki görülmekteydi. Burada Cr oksitlenmiş ve yüzeyde deforme olmuş olduğu görülmektedir. Şekil 17.d elementel haritalama incelendiğinde ise yüzeyde Fe bölgelerinin olduğu görülmektedir. Bu bölgelerde yer alan kaplamanın elektrokimyasal analizlerde bozulması

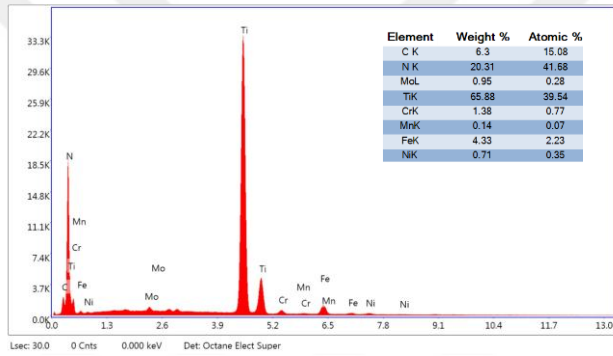
nedeniyle kaplama deforme olmuş ve yüzeyde bozulmalar meydana gelmiştir. Şekil 18’de F3_1000 numunesinin yüzey analizler gösterilmektedir.



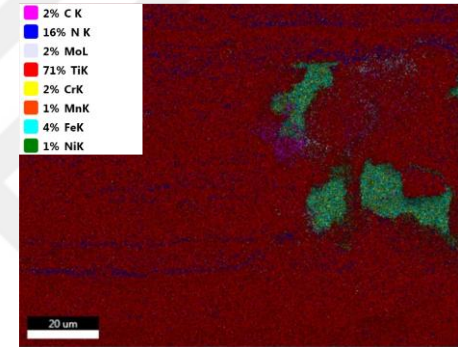
(a)



(b)



(c)

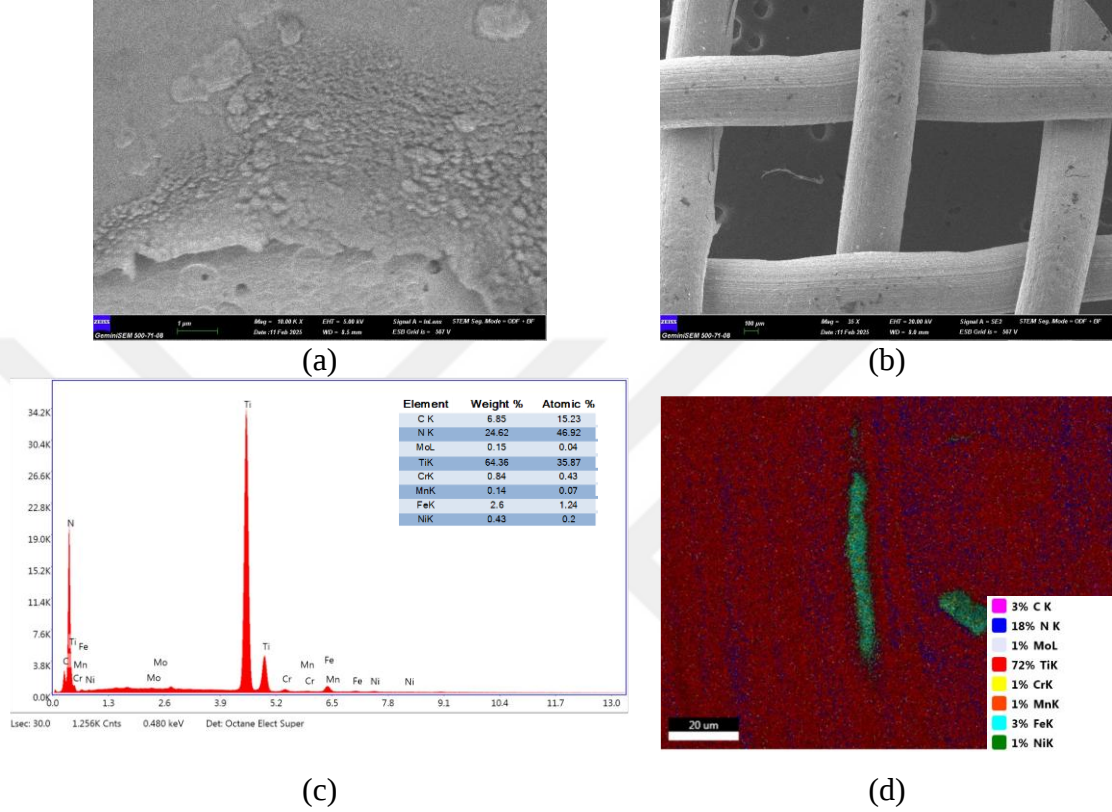


(d)

Şekil 18. F3_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü

Şekil 18.a ve Şekil 18.b’deki SEM görüntüsünde, elektrokimyasal reaksiyonlar sonrasında yüzeyde bazı mikro yapısal değişiklikler ve partikül birikimlerinin olduğu gözlemlenmektedir. Bu tür değişiklikler, elektrokimyasal reaksiyonların etkisiyle yüzeyde meydana gelen fiziksel değişikliklerin bir göstergesi olabilir. Yüzeyde görülen bu bozulmalar, özellikle oksidasyon ve korozyon gibi süreçlerin etkisiyle oluşmuş olabilir. Şekil 18.c EDX analizi incelendiğinde Ti oranının %65,88 ile yüksek kalmaya devam ettiğini, ancak elektrokimyasal işlemler sonrasında Cr oranının ciddi oranda azaldığını ve Fe oranının arttığını ortaya koymaktadır. Cr miktarındaki azalma, yüzeydeki oksidasyon veya korozyon süreçlerinin etkisiyle kromun yüzeyden kısmi olarak uzaklaşmış olabileceğini gösteriyor olabilir. Şekil 18.d elementel haritalama incelendiğinde Ti ve N elementlerinin büyük ölçüde yüzeye yayılmış olduğu görülmektedir. Titanyum bazlı kaplamanın yüzeyde homojen şekilde dağılmaya devam ettiği, ancak Fe oranının belirli bölgelerde daha yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Cr

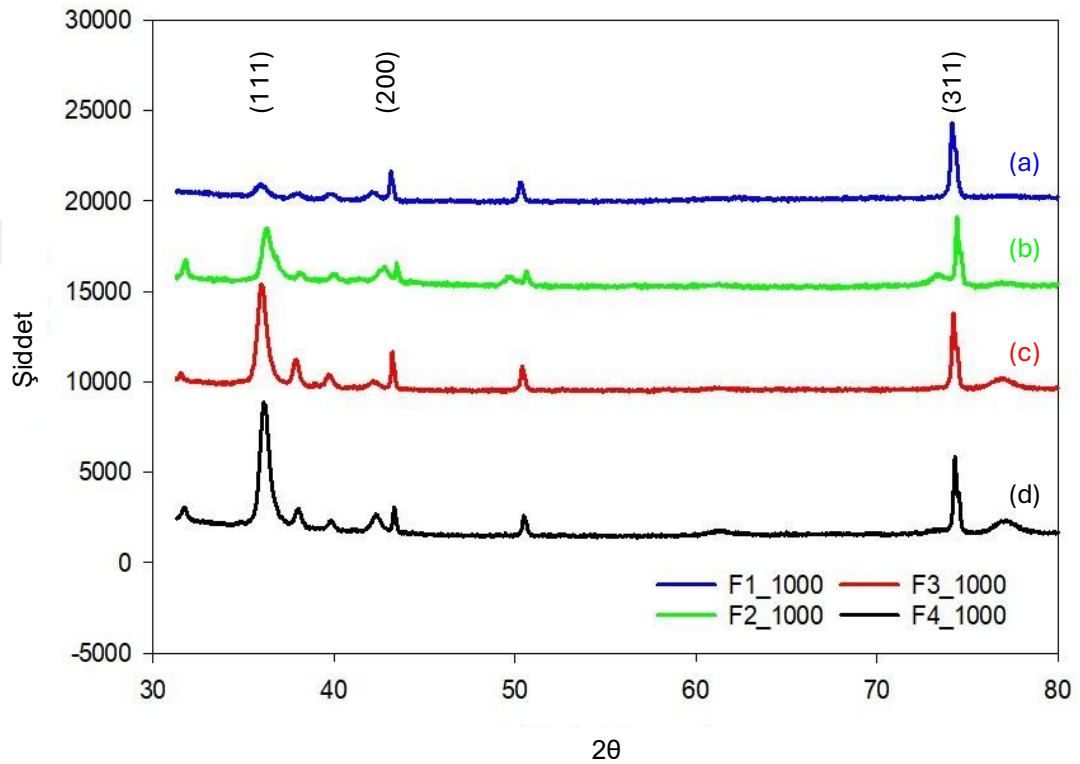
elementinin yoğunluğunun azaldığı, bu da elektrokimyasal reaksiyonlar sırasında kromun yüzeydeki koruyucu etkisinin zayıflamış olabileceğini düşündürmektedir. Şekil 19'da F4_1000 numunesinin yüzey analizleri gösterilmektedir.



Şekil 19. F4_1000 (a) 10.000X, (b) 50X SEM görüntüleri, (c) EDX elementel yoğunluk grafiği, (d) SEM-EDX elementel haritalama görüntüsü

Şekil 19.a ve Şekil 19.b SEM görüntüleri incelendiğinde yüzeyde belirgin olarak bazı mikro yapısal değişiklikler ve partikül birikimleri gözlemlenmektedir. Bu görüntü, elektrokimyasal reaksiyonların yüzeydeki yapıyı değiştirdiğini ve yüzeydeki bozulmaların arttığını göstermektedir. Yüzeydeki bu değişiklikler, oksidasyon veya korozyon gibi reaksiyonların etkisiyle oluşmuş olabilir. Şekil 19.c incelendiğinde Ti oranının %64,36 ile yüksek kalmaya devam ettiğini göstermektedir. Bu, titanyum bazlı kaplamanın yüzeyde etkili bir şekilde yayıldığını ve yüzeyde sağlam bir kaplama sağladığını göstermektedir. Ayrıca, N oranı %24,62 seviyesinde olup, bu, kaplamanın azot içeren bileşikler kullandığını ve bu elementin yüzeydeki koruyucu etkilerini artırdığını göstermektedir. Fe oranı ise %2,6 civarındadır ve yüzeydeki oksidasyon etkisiyle artmış olabilir. Önceki numunelerde olduğu gibi Cr'nin yüksek miktarda yüzeyden uzaklaştığı görülmektedir. Şekil 19.d incelendiğinde Ti ve N elementlerinin büyük ölçüde yüzeye yayılmış olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, titanyum bazlı

kaplamanın yüzeyde homojen bir şekilde dağılmaya devam ettiğini göstermektedir. Cr ve Ni elementlerinin daha düşük yoğunluklarda yer aldığı, ancak Fe'nin belirli bölgelerde daha fazla yoğunlaştığı görülmektedir. Bu da elektrokimyasal reaksiyonlar sonrasında yüzeydeki heterojen yapıyı işaret etmektedir. Şekil 20'de Elektrotların XRD desenleri gösterilmektedir.



Şekil 20. Elektrotların XRD desenleri: (a) F1_1000, (b) F2_1000, (c) F3_1000, (b) F4_1000

Şekil 20'de TiN kaplamalarının XRD analiz sonuçları, kaplama kalınlıklarına göre kristal yapı ve yoğunluk farklarını açıkça göstermektedir. TiN, genellikle yüzeyde (111), (200) ve (311) gibi belirgin kristal düzeylerine sahip bir FCC (Face-Centered Cubic) yapıya sahip bir malzemedir [76]. Bu kristal düzeyler, TiN'in tipik XRD pikeridir ve kristalin yüksek düzenini, büyüklüğünü ve kristallinite seviyesini doğrudan yansıtır. Bu bağlamda, her bir kaplamanın XRD desenleri, TiN kristallerinin yoğunluğu ve düzenliliği hakkında bilgi vermektedir.

F1 kaplamasında (kırmızı çizgi) gözlemlenen pikin yoğunluğu, diğer kaplamalara kıyasla belirgin şekilde daha düşüktür. Bu düşük yoğunluk, TiN kristallerinin daha ince veya kristal yapısının düzensiz olduğunu gösterir. Piklerin daha zayıf olması, kristal yapının

düşük olduğunu ve kaplamanın daha ince veya daha az gelişmiş bir TiN fazına sahip olabileceğini göstermektedir. TiN'in (111), (200) ve (311) fazları yine bu kaplamada gözlemlenmekle birlikte, pikin zayıf olması bu kristallerin tam olarak gelişmediğini ve düzenin bozulmuş olabileceğini gösterir.

F2, F3 ve F4 kaplamaları için (mavi, yeşil ve siyah çizgiler), pik yoğunluğunda artış gözlemlenmektedir. F2 kaplamasında, yoğunluk F1'e göre daha yüksek olup TiN kristallerinin daha düzgün kristalleşmiş olduğunu gösterir. Bu kaplama, F1'e kıyasla daha kalın ve daha düzenli bir yapıya sahiptir. F3 ve F4'te ise yoğunluk, daha da artarak en belirgin seviyeye ulaşır. F4 kaplamasında (siyah çizgi) elde edilen yüksek pik yoğunluğu, TiN kristallerinin en kalın ve düzgün şekilde geliştiğini gösterir. Bu kaplama, en yüksek kristallinite seviyesine sahip olup, TiN'in kristal yapısının tamamen geliştiğini ve daha kalın bir kaplama olduğunu düşündürmektedir.

TiN'in tipik XRD pikerinin, özellikle (111), (200) ve (311) gibi fazların belirgin olarak gözlemlenmesi gerektiği göz önüne alındığında, elde edilen sonuçlar bu kristal yapıya oldukça uyumlu görünmektedir. Tüm kaplamalarda, bu başlıca TiN fazlarının varlığı, TiN'in doğru bir şekilde kaplama materyali olarak kullanıldığını ve malzemenin yapısal olarak beklenen kristal düzeyleriyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, grafikte gözlemlenen bazı küçük piker, TiN'e ait olmayan fazlardan kaynaklanıyor olabilir. Bu tür pikerler, kaplama süreci sırasında meydana gelen yabancı fazlar veya yüzey kirliliği gibi faktörlere işaret edebilir.

Sonuç olarak, XRD desenleri, TiN kaplamalarının kristal yapısının kaplama kalınlığıyla ilişkili olarak geliştiğini ve her bir kaplamanın kristal düzeylerini doğru bir şekilde yansıttığını göstermektedir. TiN malzemesinin tipik kristal yapısı (111), (200) ve (311) fazlarıyla uyumlu olarak gözlemlenmiş ve kaplama kalınlığı arttıkça kristallinite düzeylerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu da TiN'in yüksek kaliteli kaplama uygulamaları için uygun bir malzeme olduğunu ve kristal yapısının arttıkça mekanik ve koruyucu özelliklerinin iyileşebileceğini düşündürmektedir.



4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma

Bu çalışmada, TiN kaplamaların elektrokimyasal performansı ve yüzey özellikleri, kaplama kalınlığı ve mesh yapısının etkileriyle birlikte incelenmiştir. Yüzey karakterizasyonu, farklı TiN kaplama kalınlıklarına sahip numunelerin SEM, SEM-EDX ve elementel haritalama analizleriyle gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları, TiN kaplamalı numunelerde Ti miktarının kaplama kalınlığı ile doğru orantılı olarak arttığını göstermektedir. Örneğin, F1_1000 numunesinde Ti oranı %49,08 iken, F4_1000 numunesinde bu oran %67,55'e çıkmaktadır. Bu artış, kaplamaların homojenliğini iyileştirdiği ve yüzeydeki TiN bileşiğinin etkili bir şekilde dağılmasına katkı sağladığını göstermektedir.

Elektrokimyasal analizler, TiN kaplamalı elektrotların yük transfer performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. EIS sonuçları, kaplama kalınlığının artışıyla empedans değerlerinin düştüğünü ve yük transferinin hızlandığını göstermektedir. F0_1000 numunesinin empedans değeri 2673,3 Ω iken, F4_1000 numunesinde bu değer 40 Ω 'a kadar düşmektedir. Bu, kaplamalı numunelerin daha düşük yük transfer direnci sergileyerek elektrokimyasal reaksiyonları daha hızlı gerçekleştirdiğini ve daha iyi bir iletkenlik sağladığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, F1_1200 numunesinde empedans değeri 1479.5 Ω iken, F4_1200'de 50 Ω 'a kadar düşmüştür. Ancak, empedans değerlerinde belirli bir kaplama kalınlığından sonra büyük bir değişim gözlenmemiştir. F2, F3 ve F4 kaplamalarının empedans değerleri, yüzeydeki Ti yoğunluğuyla uyumlu olarak birbirine oldukça yakındır.

Tafel analizleri, TiN kaplamalı numunelerin korozyon başlama potansiyelini artırarak, paslanmaz çelik (F0) numunesine göre daha yüksek korozyon dirençleri gösterdiğini

ortaya koymuştur. F0_1000 numunesi, 0V civarında korozyon başlarken, F4_1000 numunesinde bu potansiyel 0,5V'a kaymıştır. Benzer şekilde, F1_1000'den F4_1000'e doğru, korozyon başlama potansiyelinin arttığı ve TiN kaplamaların korozyon direncini yükselttiği gözlemlenmiştir. TiN kaplama miktarının arttıkça, eğrilerin dikleştiği ve akım yoğunluğunun arttığı gözlemlenmektedir. Örneğin, F0_1000 numunesinde akım yoğunluğu 6,3 A/cm² iken, F4_1000 numunesinde bu değer 8,2 A/cm²'ye çıkmıştır. Bu, TiN kaplamanın reaksiyon hızını artıran bir etkiye sahip olduğunu ve kaplama miktarının arttıkça elektrokimyasal etkinliğin yükseldiğini göstermektedir.

LSV analizleri de TiN kaplamaların performansını göstermektedir. 1000 mesh yapısında, F0_1000 numunesinin 1.9V'da 0,8A akım çektiği gözlemlenirken, F4_1000 numunesi aynı potansiyelde yalnızca 0,4A akım çekmiştir. F4_1000 numunesi, korozyon başlama potansiyeli açısından en yüksek performansı göstermekte ve reaksiyon daha yüksek bir potansiyelde başlamaktadır. Bu durum, TiN kaplamanın korozyona karşı daha yüksek direnç gösterdiğini ve daha yüksek performans sergilediğini işaret etmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma TiN kaplamalarının elektrokimyasal performansını geliştirme potansiyelini ortaya koymuş, kaplama kalınlığı ve mesh yapı optimizasyonunun TiN kaplamalı elektrotların verimliliğini artırmada kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Kaplama kalınlığının artırılması, yüzeydeki Ti yoğunluğunu artırarak, daha düşük empedans değerleri ve daha yüksek elektrokimyasal aktivite sağlamaktadır. Ayrıca, mesh yapısının etkisi, kaplama kalınlığı ile performansı iyileştirirken, daha geniş mesh yapılarının da performansı artırıcı bir rol oynadığı gösterilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda, daha ince kaplama kalınlıklarının performans üzerindeki etkileri ile daha geniş mesh yapılarının karşılaştırılması, daha verimli ve ekonomik kaplama süreçlerinin geliştirilmesine olanak sağlayabilir.

4.2. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, TiN kaplamaların elektrokimyasal performansı ve yüzey özellikleri, farklı kaplama kalınlıkları ve mesh yapılarının etkisiyle incelenmiştir. Elde edilen bulgular, TiN kaplamalarının elektrokimyasal performansı üzerinde belirgin iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Kaplama kalınlığının artışıyla birlikte, Ti miktarındaki artışın yüzeyde daha homojen bir dağılım sağladığı ve bu durumun kaplamaların elektrokimyasal iletkenliğini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. EIS ve Tafel analizleri, TiN kaplamalı

numunelerde empedans değerlerinin düştüğünü ve korozyon başlama potansiyelinin arttığını, dolayısıyla korozyon direncinin iyileştiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, kaplama kalınlığının artışıyla birlikte elektrot yüzeyindeki Ti yoğunluğunun arttığı ve bu değişimin elektrokimyasal performansa pozitif yönde katkı sağladığı anlaşılmıştır.

Kaplama kalınlığı ve mesh yapısının optimize edilmesiyle, TiN kaplamalı elektrotların performansı daha verimli ve ekonomik hale getirilebilir. Özellikle 1000 mesh yapısında, kaplama kalınlığı arttıkça elektrokimyasal performansın önemli ölçüde iyileştiği görülmüştür. F4_1000 numunesi, en düşük empedans değeri ve en yüksek elektrokimyasal aktiviteyi sergileyen numune olmuştur. Ancak, mesh yapısının büyümesiyle birlikte, kaplama kalınlığının belirli bir noktadan sonra performans üzerindeki etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, optimum kaplama kalınlığının belirlenmesi hem performansı artırmak hem de maliyetleri minimize etmek açısından kritik bir faktördür.

Sonuç olarak, TiN kaplamaların elektrokimyasal performansını artırmak için kaplama kalınlığı ve mesh yapısının dikkatlice optimize edilmesi gerektiği söylenebilir. Bu tez çalışması, TiN kaplamaların korozyon dirençleri ve iletkenlikleri üzerinde sağladığı iyileştirmeleri ortaya koymuş ve gelecekteki uygulamalarda daha verimli ve uzun ömürlü elektrot malzemelerinin geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

Bundan sonraki çalışmalar için birkaç öneri de bulunmaktadır. İlk olarak, kaplama kalınlığının optimizasyonu üzerinde daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Çalışmada, kaplama kalınlığının arttırılmasının performansı iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ancak, belirli bir kalınlık seviyesinden sonra ek kaplama artışı performansı belirgin şekilde etkilememektedir. Bu nedenle, optimum kaplama kalınlığının daha detaylı bir şekilde araştırılması ve belirlenmesi önerilmektedir.

İkinci olarak, mesh yapısının performans üzerindeki etkisinin daha derinlemesine incelenmesi gerekmektedir. Farklı mesh yapılarının, özellikle 1000 mesh yapısının, performansı üzerindeki olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Ancak, geniş mesh yapılarının da performansı artırıcı bir rol oynadığı ortaya çıkmıştır. Mesh yapısı ile kaplama kalınlığı arasındaki etkileşimin daha ayrıntılı şekilde araştırılması, performansı optimize etmek için faydalı olacaktır.

Üçüncü olarak, TiN kaplamaların yanı sıra, farklı metal nitrür kaplamaları veya TiN kaplamalarının bileşikleri de yüzey özellikleri ve elektrokimyasal performans açısından incelenebilir. Bu, daha dayanıklı ve verimli kaplama malzemelerinin geliştirilmesine olanak sağlayabilir. Ayrıca, TiN kaplamanın gelişimi, farklı endüstriyel uygulamalar için de faydalı olabilir.

Son olarak, kaplama malzemelerinin uzun dönemli korozyon ve dayanıklılık testleri ile performanslarının zamanla nasıl değiştiği incelenmelidir. Bu tür testler, kaplama malzemelerinin gerçek dünya koşullarındaki kullanım ömrünü belirlemek açısından kritik önem taşımaktadır. Ayrıca, kaplama kalınlığı ve mesh yapısının optimizasyonunun ekonomik performans üzerindeki etkisi de göz önünde bulundurularak, daha düşük maliyetle yüksek performanslı kaplamalar elde edilmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKÇA

1. Sovacool, B.K. and F.W. Geels, 2016. Further reflections on the temporality of energy transitions: A response to critics. **Energy Research & Social Science**, **22**: p. 232-237.
2. Sovacool, B.K. and F.W. Geels, 2021. Sociotechnical transitions and energy systems: Analysis, frameworks, and implications for the Global South. **Energy Policy**, **147**: p. 111759.
3. International Energy, A., World Energy Outlook 2019.
4. Ipcc, 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
5. International Renewable Energy, 2021. A., Renewable Energy and Jobs: Annual Review.
6. Schiffer, H.W. and J. Trüby, 2020. The future of the European electricity system and the impact of fluctuating renewable energy – A scenario analysis. **Energy Reports**, **6**: p. 1025-1035.
7. Hansen, K., C. Breyer, and H. Lund, 2019. Status and perspectives on 100% renewable energy systems. **Energy**, **175**: p. 471-480.
8. International Energy, A., World Energy Outlook 2021.
9. Intergovernmental Panel on Climate, C., Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
10. Breyer, C., et al., 2017. On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios. Progress in Photovoltaics: **Research and Applications**, **25**(8): p. 727-745.
11. Lund, H., et al., 2014. Renewable energy systems and energy storage: Key issues and challenges. **Energy**, **68**: p. 1-5.
12. International Renewable Energy, A., Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2020.
13. Rogelj, J., et al., 2018. Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report.

14. United Nations Framework Convention on Climate, C., The Paris Agreement and NDCs. 2019.
15. Sovacool, B.K., et al., 2019. The decarbonisation divide: Contextualizing landscapes of low-carbon exploitation and toxicity in Africa. **Global Environmental Change**, **59**: p. 101994.
16. Sovacool, B.K., 2009. Renewable energy policy and administrative capacity: Lessons from small island developing states. **Energy Policy**, **37**(9): p. 3374-3383.
17. Lund, H. and B.V. Mathiesen, 2009. Energy system analysis of 100% renewable energy systems—The case of Denmark in years 2030 and 2050. **Energy**, **34**(5): p. 524-531.
18. Mehrpooya, M. and B. Ghorbani, 2020. Hydrogen production from renewable energies: Systematic study of various integrated configurations. **Energy Conversion and Management**, **209**: p. 112642.
19. Zhang, Z., et al., 2020. Advances in water electrolysis technology with renewable energy sources. **Progress in Energy and Combustion Science**, **80**: p. 100857.
20. Yilmaz, S. and H. Selim, 2020. Hydrogen production using renewable energy resources: A review of potential pathways and carbon footprint analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **133**: p. 110298.
21. Dincer, I. and C. Acar, 2020. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. **International Journal of Hydrogen Energy**, **45**(1): p. 11054-11068.
22. Staffell, I., et al., 2019. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. **Energy & Environmental Science**, **12**(2): p. 463-491.
23. Rashid, M.M., et al., 2020. Hydrogen production, storage, and utilization: Challenges and opportunities. **International Journal of Hydrogen Energy**, **45**(58): p. 32920-32938.
24. El-Emam, R.S. and H. Özcan, 2019. Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. **Journal of Cleaner Production**, **220**: p. 593-609.
25. Fattahi, A., A. Saffar, and H. Yousefi, 2021. Review on hydrogen production from water electrolysis: Materials, methods, and the future of hydrogen production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **138**: p. 110564.

26. International Energy, A., 2019. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities.
27. Gallucci, F. and M. van Sint Annaland, 2020. Catalytic membrane reactors for clean hydrogen production from fossil fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **120**: p. 109623.
28. Decarre, S., et al., 2010. CO₂ capture by oxy-fuel combustion: An opportunity for hydrogen production. **Energy Procedia**, **1**(1): p. 527-534.
29. Dufour, J., et al., 2011. Life cycle assessment of processes for hydrogen production. Environmental feasibility and reduction of greenhouse gases emissions. **International Journal of Hydrogen Energy**, **36**(13): p. 7777-7788.
30. Jaramillo, P., W.M. Griffin, and H.S. Matthews, 2008. Comparative life-cycle air emissions of coal, domestic natural gas, LNG, and SNG for electricity generation. **Environmental Science & Technology**, **41**(17): p. 6290-6296.
31. Higman, C. and M. van der Burgt, 2008. Gasification processes: A primer. Gasification. 5-52.
32. Lu, Y., et al., 2020. Comparative analysis of coal gasification and natural gas reforming hydrogen production with carbon capture. **Energy**, **192**: p. 116634.
33. Fawzy, S., et al., 2020. Strategies for mitigation of climate change: A review of carbon capture, storage and utilization. **Science of the Total Environment**, **748**: p. 141529.
34. Aminu, M.D., et al., 2017. A review of developments in carbon dioxide storage. **Applied Energy**, **208**: p. 1389-1419.
35. Barhoumi, E.M., et al., 2022. Hydrogen production from renewable energy sources, storage, and conversion into electrical energy, in Planning of Hybrid Renewable Energy Systems, **Electric Vehicles and Microgrid: Modeling, Control and Optimization**. Springer. p. 151-176.
36. Hassan, Q., et al., 2024. A review of green hydrogen production by renewable resources. **Energy Harvesting and Systems**, **11**(1): p. 20220127.
37. Sharshir, S.W., et al., 2024. A review of recent advances in alkaline electrolyzer for green hydrogen production: Performance improvement and applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, **49**: p. 458-488.
38. Ayers, K., et al., 2021. PEM electrolysis, a forerunner for clean hydrogen. **The Electrochemical Society Interface**, **30**(4): p. 67.

39. Xu, Y., et al., 2024. Technological limitations and recent developments in a solid oxide electrolyzer cell: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, **50**: p. 548-591.
40. Fan, J.-L., et al., 2022. A levelized cost of hydrogen (LCOH) comparison of coal-to-hydrogen with CCS and water electrolysis powered by renewable energy in China. **Energy**, **242**: p. 123003.
41. Ji, M. and J. Wang, 2021. Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. **International Journal of Hydrogen Energy**, **46**(78): p. 38612-38635.
42. Zainal, B.S., et al., 2024. Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **189**: p. 113941.
43. Kumar, S.S. and V. Himabindu, 2019. Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review. **Materials Science for Energy Technologies**, **2**(3): p. 442-454.
44. Wang, T., X. Cao, and L. Jiao, 2022. PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects. **Carbon Neutrality**. **1**(1): p. 21.
45. Keçebaş, A., M. Kayfeci, and M. Bayat, 2019. Electrochemical hydrogen generation, in *Solar Hydrogen Production*, Elsevier. p. 299-317.
46. Bessarabov, D., et al., 2016. PEM electrolysis for hydrogen production: principles and applications. CRC press.
47. Hüner, B., et al., 2024. Pt thin film-coated 3D-printed polymer anode gas diffusion electrodes for PEM water electrolyzers. **Energy & Fuels**, **38**(14): p. 13228-13244.
48. Ahmed, K.W., et al., 2022. Effect of components and operating conditions on the performance of PEM electrolyzers: a review. **Electrochem**, **3**(4): p. 581-612.
49. Kıstı, M., S. Uysal, and M.F. Kaya, 2022. Development of Pt coated SS316 mesh gas diffusion electrodes for a PEM water electrolyzer anode. **Fuel**, **324**: p. 124775.
50. Butrim, S., et al., 2023. The Research and Development of the Titanium Nitrides TiN x Sublayer, Formed on the Surface of the Anodic Porous Transport Layer of PEM Water Electrolyzer. **Nanobiotechnology Reports**, **18**(Suppl 2): p. S367-S374.

51. Masson-Delmotte, T., et al., 2018 IPCC,: summary for policymakers. Global warming of. **1**.
52. Livingston, J.E. and M. Rummukainen, 2020. Taking science by surprise: The knowledge politics of the IPCC Special Report on 1.5 degrees. **Environmental Science & Policy**, **112**: p. 10-16.
53. Europeo, P., European Parliament resolution of 14 March 2019 on climate change-a European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy in accordance with the Paris Agreement (2019/2582 (RSP)) [https://oeil.secure.europarl.europa.eu/oeil/popups/ficheprocedure.do?lang=en&reference= 2019/2582 \(RSP\)](https://oeil.secure.europarl.europa.eu/oeil/popups/ficheprocedure.do?lang=en&reference=2019/2582%28RSP%29). Última consulta, 2019. **9**.
54. Parliament, E., Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Off. **J. Eur Union Belgium**, **20**: p. 2.
55. Maradin, D., 2021. Advantages and disadvantages of renewable energy sources utilization. International Journal of Energy Economics and Policy.
56. Filippov, S.P. and A.B. Yaroslavtsev, 2021. Hydrogen energy: Development prospects and materials. **Russian Chemical Reviews**, **90**(6): p. 627.
57. Dincer, I., 2012. Green methods for hydrogen production. **International journal of hydrogen energy**, **37**(2): p. 1954-1971.
58. Simpson, A.P. and A.E. Lutz, 2007. Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming. **International journal of hydrogen energy**, **32**(18): p. 4811-4820.
59. Madeira, J.G.F., et al., 2021. Hydrogen production from swine manure biogas via steam reforming of methane (SRM) and water gas shift (WGS): A ecological, technical, and economic analysis. **International journal of hydrogen energy**. **46**(13): p. 8961-8971.
60. Gielen, D., E. Taibi, and R. Miranda, 2019. Hydrogen: A renewable energy perspective. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
61. Liu, G., et al., 2023. Novel hybrid coating of TiN and carbon with improved corrosion resistance for bipolar plates of PEM water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**.

62. Kim, J., et al., 2019. Nanoporous nickel phosphide cathode for a high-performance proton exchange membrane water electrolyzer. **ACS applied materials & interfaces**, **11**(34): p. 30774-30785.
63. Stiber, S., et al., 2022. A high-performance, durable and low-cost proton exchange membrane electrolyser with stainless steel components. **Energy & Environmental Science**, **15**(1): p. 109-122.
64. Litkahi, H.R., A. Bahari, and R. Ojani, 2017. Synthesis of Pt-Ni-Fe/CNT/CP nanocomposite as an electrocatalytic electrode for PEM fuel cell cathode. **Journal of Nanoparticle Research**, **19**: p. 1-17.
65. Fetohi, A.E., et al., 2012. Ni-P and Ni-Co-P coated aluminum alloy 5251 substrates as metallic bipolar plates for PEM fuel cell applications. **International journal of hydrogen energy**, **37**(9): p. 7677-7688.
66. Gago, A., et al., 2016. Protective coatings on stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane (PEM) electrolyzers. **Journal of Power Sources**, **307**: p. 815-825.
67. Ye, F., et al., 2010. Electrocatalytic properties of Ti/Pt-IrO₂ anode for oxygen evolution in PEM water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**(15): p. 8049-8055.
68. Cho, E., et al., 2005. Performance of a 1 kW-class PEMFC stack using TiN-coated 316 stainless steel bipolar plates. **Journal of Power Sources**, **142**(1-2): p. 177-183.
69. Yi, P., et al., 2019. Corrosion and interfacial contact resistance of 316L stainless steel coated with magnetron sputtered ZrN and TiN in the simulated cathodic environment of a proton-exchange membrane fuel cell. **Surface and Coatings Technology**, **363**: p. 198-202.
70. Jin, J., Z. Zhu, and D. Zheng, 2017. Influence of Ti content on the corrosion properties and contact resistance of CrTiN coating in simulated proton exchange membrane fuel cells. **International Journal of Hydrogen Energy**, **42**(16): p. 11758-11770.
71. Forouzanmehr, M., et al., 2022. Detection and analysis of corrosion and contact resistance faults of TiN and CrN coatings on 410 stainless steel as bipolar plates in PEM fuel cells. **Sensors**, **22**(3): p. 750.

72. Wang, Y. and D.O. Northwood, 2007. An investigation into TiN-coated 316L stainless steel as a bipolar plate material for PEM fuel cells. **Journal of Power Sources**, **165**(1): p. 293-298.
73. Perego, A., et al., 2019. Hierarchical TiN nanostructured thin film electrode for highly stable PEM fuel cells. **ACS Applied Energy Materials**, **2**(3): p. 1911-1922.
74. Dur, E., Ö.N. Cora, and M. Koç, 2011. Experimental investigations on the corrosion resistance characteristics of coated metallic bipolar plates for PEMFC. **International journal of hydrogen energy**, **2011**. (12): p. 7162-7173.
75. Rebenne, H.E. and D.G. Bhat, 1994. Review of CVD TiN coatings for wear-resistant applications: deposition processes, properties and performance. **Surface and Coatings Technology**, **63**(1-2): p. 1-13.
76. Lei, D., et al., 2014. Synthesis of TiN@ C nanocomposites for enhanced electrochemical properties. **Sustain Ener**, **2**: p. 1-4.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Emre ÖZDOĞAN

Uyruğu: Türkiye (T.C)

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum:

e-mail:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi - Enerji Sistemleri Müh	2025
Lisans	Erciyes Üniversitesi - Enerji Sistemleri Müh.	2022
Lise	Ali Rıza ÖZDERİCİ AİHL - Kayseri	2017

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2022-Halen	Bataryasan Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş.	AR-GE Mühendisi
2019-Halen	Erciyes Üniversitesi H2FC Hidrojen Enerjisi Araştırma Grubu	Araştırmacı

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. E. Özdoğan, B. Hüner, Y.O. Süzen, T. Eşiyok, İ.N. Uzgören, M. Kıstı, S. Uysal, S.B. Selçuklu, N. Demir, M.F. Kaya, 2022, Effects of tank heating on hydrogen

- release from metal hydride system in VoltaFCEV Fuel Cell Electric Vehicle, *International Journal of Hydrogen Energy* 48 (18), 6811-6823.
2. B. Hüner, M. Kıstı, S. Uysal, I.N. Uzgören, E. Özdoğan, Y.O. Süzen, N. Demir, M.F. Kaya, 2022, An overview of various additive manufacturing technologies and materials for electrochemical energy conversion applications, *ACS Omega* 7 (45), 40638-40658, American Chemical Society.
 3. I.N. Uzgören, B. Hüner, S. Yıldırım, O. Eren, E. Özdoğan, Y.O. Süzen, N. Demir, M.F. Kaya, 2022, Development of IrO₂-WO₃ Composite Catalysts from Waste WC-Co Wire Drawing Die for PEM Water Electrolyzers' Oxygen Evolution Reactions, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 10 (39), 13100-13111, American Chemical Society.
 4. B. Hüner, M. Kıstı, E. Özdoğan, N. Demir, M.F. Kaya, 2024, Pt thin film-coated 3D-printed polymer anode gas diffusion electrodes for PEM water electrolyzers, *Energy & Fuels* 38 (14), 13228-13244, American Chemical Society.
 5. N.C. Ereli, M. Kıstı, T. Eşiyok, E. Özdoğan, B. Hüner, N. Demir, M.F. Kaya, 2024, First pulsed control system design for enhanced hydrogen production performance in proton exchange membrane water electrolyzers, *Fuel* 371, 132027, Elsevier.
 6. M.F. Kaya, M. Kıstı, B. Hüner, E. Özdoğan, M. Conağası, M.A. Durmaz, E.N. Çakıraslan, T. Eşiyok, Y.O. Süzen, A. Taşkın, S. Uysal, N. Demir, 2024, Sustainable Electrocatalyst for PEM Water Electrolyzers, in: *Challenges and Solutions in the Hydrogen Value Chain: State of the Art Perspectives on Decarbonization and the Green Energy Transition*, Springer Nature Switzerland, pp. 67-101.
 7. M. Kıstı, E. Özdoğan, S. Uysal, M.F. Kaya, 2022, Development of Pt-Cr Coated SS316L Electrodes for PEM Electrolyzers by Selective Laser Melting Method, in: *23rd World Hydrogen Energy Conference*, pp. 60.
 8. E. Özdoğan, E. Tuncay, I.N. Uzgören, M. Kıstı, S. Uysal, B. Hüner, N. Demir, M.F. Kaya, 2021, Automatic PEM Water Electrolyzer Control System (PEMECS) Design For Cell Testings, in: *5th International Hydrogen Technologies Congress*, pp. 312-314.
 9. E.N. Çakıraslan, E. Özdoğan, E.B. Orhan, A. Altun, M. Kıstı, M.F. Kaya, 2024, Development of a High-Performance Fully Automatic PEM Water Electrolyzer

Control System for Solar Energy-Assisted Hydrogen Production, in: 8th International Hydrogen Technologies Congress, 12-15 May 2024, Diyarbakır, Türkiye.

