

T.C.  
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PVD YÖNTEMİ İLE AISI 4140 MALZEMESİ ÜZERİNE SENTEZLENEN  $Al_2O_3$   
FİLMLEİN KOROZYON VE TRİBOKOROZYON DİRENCİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ

Zeynep GELENGEÇ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Taha ACAR

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Dr. Öğr. Üyesi Çiğdem ALBAYRAK

Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Taha ACAR

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan GÜLTEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2025

© 2025 [Zeynep GELENGEÇ]. Tüm hakları saklıdır.

## Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Taha ACAR danışmanlığında, Zeynep GELENGEÇ tarafından hazırlanan bu çalışma 17/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul oybirliği (3/3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Çiğdem ALBAYRAK İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Taha ACAR İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gökhan GÜLTEN İmza:

Yukarıdaki Yüksek Lisans/Doktora Tezi Enstitü Yönetim Kurulunun .... / .... / 20.... tarih ve ...../..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

**Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR**  
Enstitü Müdür V.

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## **Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası**

“PVD Yöntemi ile AISI 4140 Malzemesi Üzerine Sentezlenen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Filmlerin Korozyon ve Tribokorozyon Direncine Etkisinin İncelenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim.

17/06/2025

(İmza)

**Zeynep GELENGEÇ**

## ÖZET

### PVD YÖNTEMİ İLE AISI 4140 MALZEMESİ ÜZERİNE SENTEZLENEN $Al_2O_3$ FİLMLEİN KOROZYON VE TRIBOKOROZYON DİRENCİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Zeynep GELENGEÇ

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Taha ACAR

2025, 37 sayfa

Bu tez çalışması, AISI 4140 çeliği üzerine Fiziksel Buhar Birikimi (PVD) yöntemiyle kaplanan  $Al_2O_3$  filmlerinin yapışma, korozyon ve tribokorozyon direnci üzerine farklı kumlama basınçlarının etkilerini araştırmaktadır. Çeliğin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla 4, 6 ve 8 bar basınçlarda kumlama işlemi uygulanmış ve ardından  $Al_2O_3$  kaplama yapılmıştır. Sonuçlar, kumlama basıncının artırılmasının adezyon direncini iyileştirdiğini göstermiştir.  $Al_2O_3$  kaplamanın ardından korozyon direnci iyileşmiş, bu iyileşme koruyucu oksit tabakasına bağlanmıştır. Tribokorozyon test sonuçları,  $Al_2O_3$  kaplama sonrasında örneklerin daha düşük sürtünme katsayıları sergilediğini ve daha düşük aşınma seviyeleri elde edildiğini ortaya koymuştur. Bu durum, yüzey sertliğinin artması ve sürtünmenin azalması ile ilişkilendirilmiştir. Bu tez çalışması, kumlama yüzey işleminin ve  $Al_2O_3$  PVD kaplamasının AISI 4140 örneklerinin adezyon direnci, korozyon direnci ve tribokorozyon direncini önemli ölçüde geliştirdiğini ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** AISI 4140,  $Al_2O_3$ , Korozyon, Tribokorozyon, İslanabilirlik

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION of THE EFFECT of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FILMS SYNTHESIZED on AISI 4140 MATERIAL BY PVD METHOD ON CORROSION AND TRIBOCORROSION RESISTANCE**

**Zeynep GELENGEÇ**

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,**

**Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Taha ACAR**

**2025, 37 pages**

This thesis explores the impact of varying sandblasting pressures on the adhesion, corrosion, and tribocorrosion resistance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings applied to AISI 4140 steel using the Physical Vapor Deposition (PVD) technique. Sandblasting was carried out at pressures of 4, 6, and 8 bar to improve the surface characteristics of the steel before applying the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating. The findings indicated that higher sandblasting pressures resulted in better adhesion resistance. Following the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating, an improvement in corrosion resistance was observed, which was attributed to the formation of a protective oxide layer. Tribocorrosion tests showed that the coated samples exhibited lower friction coefficients and reduced wear rates, which were linked to increased surface hardness and decreased friction. This thesis concludes that sandblasting treatment combined with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PVD coating significantly enhances the adhesion, corrosion, and tribocorrosion resistance of AISI 4140 steel.

**Keywords:** AISI 4140, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Corrosion, Tribocorrosion, Wettability

## TEŞEKKÜR

Tez alıŐmamn her aŐamasında değerli rehberliği ve desteğiyle bana yšn veren, akademik ve kiŐisel geliŐimime bryk katkı sağlayan danıŐmanım Dr. Őęr. Őyesi Muhammet Taha ACAR'a en içten duygularımla teŐekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez alıŐmamn tamamlanmasında bana her turlü destek ve motivasyonu sağlayan değerli aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım. Őzellikle annem ve babam, her zaman yanımda oldular, bana gven verdiler ve her zorluğun üstesinden gelmem için cesaretlendirdiler. Tüm aileme en içten duygularımla tekrar teŐekkür ediyorum.

Zeynep GELENGEÇ

Haziran, 2025

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Çelik ve Alaşım lar .....	3
2.1.1. Karbon çelikleri .....	3
2.1.2. Alaşım çelikleri .....	4
2.1.3. Paslanmaz çelikler .....	4
2.1.4. Takım çelikleri.....	5
2.1.5. Düşük sıcaklık çelikleri .....	5
2.1.6. Yapısal çelikler .....	5
2.1.7. Özel çelikler.....	6
2.1.8. Bütünleşik çelikler.....	6
2.2. AISI 4140 Çeliği: Özellikler ve Kullanım Alanları.....	6
2.3. AISI 4140 Çeliği Üzerine Uygulanan Yüzey İşleme Yöntemleri .....	7
2.3.1. Karbürleme (Carburizing) .....	7
2.3.2. Nitrasyon (Nitriding) .....	7
2.3.3. Kimyasal buhar biriktirme (CVD).....	8
2.3.4. Fiziksel buhar biriktirme (PVD).....	9
2.4. PVD Yönteminin Diğer Yüzey İşlem Yöntemlerine Göre Avantajları.....	10
2.5. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Kaplamaların Diğer Kaplamalara Göre Avantajları.....	10
2.6. Kumlama Yöntemi ve Uygulama Alanları .....	11
2.7. PVD Yöntemi İle Yapılan Kaplamalar Üzerinde Kumlama Yönteminin Avantajları .....	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. Materyal.....	13
3.2. Yöntem .....	13
3.3. Karakterizasyon .....	14

4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	16
4.1. Karakterizasyon Analiz Sonuçları .....	16
4.2. Elektrokimyasal Analiz Sonuçları .....	22
4.3. Tribokorozyon Analiz Sonuçları .....	24
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	29
KAYNAKÇA .....	30
EKLER .....	37
Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar .....	37

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Korozyon testlerinin sonuçları .....	22
---	----

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Karbürleme işlemi .....	7
Şekil 2.2. (a) Basınçlı gaz nitrürleme ekipmanının basitleştirilmiş diyagramı. (b) Gaz üflemeli indüksiyonlu ısıtma nitrürleme tesisinin şematik diyagramı .....	8
Şekil 2.3. Kimyasal buhar biriktirme görseli .....	9
Şekil 2.4. Fiziksel buhar biriktirme .....	9
Şekil 4.1. XRD grafiği .....	16
Şekil 4.2. (a) 4 bar kumlanmış, (b) 6 bar kumlanmış, (c) 8 bar kumlanmış, (d) 4 bar kumlanmış + Al PVD, (e) 6 bar kumlanmış + Al PVD, (f) 8 bar kumlanmış + Al PVD ve (g) filmlerinin kesit SEM görüntüleri.....	17
Şekil 4.3. Mikrosertlik değerleri.....	18
Şekil 4.4. Yüzey pürüzlülüğü değerleri .....	19
Şekil 4.5. (a) işlenmemiş AISI 4140, (b) 4 bar kumlanmış, (c) 6 bar kumlanmış, (d) 8 bar kumlanmış ve (e) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> PVD temas açısı ölçümleri.....	20
Şekil 4.6. Adezyon testlerinden elde edilen optik görüntüler ve kritik yük değerleri.....	21
Şekil 4.7. Açık devre potansiyeli.....	22
Şekil 4.8. Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri .....	22
Şekil 4.9. Nyquist grafikleri .....	24
Şekil 4.10. Bode grafikleri .....	24
Şekil 4.11. Tribokorozyon açık devre potansiyeli.....	24
Şekil 4.12. Sürtünme katsayısı ve aşınma oranı .....	26
Şekil 4.13. Aşınma izinin SEM görüntüsü ve aşınma derinliği (a) İşlenmemiş AISI 4140, (b) 4 bar ile kumlanmış, (c) 6 bar ile kumlanmış, (d) 8 bar ile kumlanmış,.....	27
Şekil 4.14. (e) 4 bar ile kumlanmış + Al PVD, (f) 6 bar ile kumlanmış + Al PVD ve (g) 8 bar ile kumlanmış + Al PVD .....	28

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Derece
$\mu s$	Mikrosaniye
%	Yüzde
f	Frekans
MEB	Zaman
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum Oksit
EIS	Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XPS	X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
PVD	Physical Vapor Deposition
Lc	Kritik Yük
AISI	American Iron and Steel Institute
CVD	Chemical Vapor Deposition
Fe	Demir (Iron)
Cr	Krom (Chromium)
Mo	Molibden (Molybdenum)
Mn	Manganez (Manganese)
N <sub>2</sub>	Azot Gazı (Nitrogen)
H <sub>2</sub>	Hidrojen Gazı (Hydrogen)
CO <sub>2</sub>	Karbon Dioksit (Carbon Dioxide)

## 1. GİRİŞ

AISI 4140 çeliği, birçok endüstride yaygın olarak kullanılan, yüksek dayanıklılık, sertlik ve aşınma direnci açısından mükemmel bir dengeye sahip bir malzemedir (Das, Dhupal, ve Kumar 2015). Otomotiv ve havacılık sektörlerinde, özellikle dişliler, miller, eksenler ve yüksek stres altındaki diğer bileşenlerin üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir (Jarrett vd. 2023). Petrol ve gaz sektöründe de önemli bileşenlerde yaygın olarak kullanılır; mesela, dayanıklılık ve güvenilirliğin kritik olduğu delme uçları ve alet bağlantıları gibi parçalar bu çelikten yapılır (Leslie 2007). AISI 4140 çeliği, yüksek yorulma dayanımı, işlenebilirlik ve ısıl işlemle mekanik özelliklerin artırılabilmesi gibi avantajlar sunar (Skubisz ve Lisiecki 2023). Bu özellikler, AISI 4140 çeliğini zorlu koşullarda üstün performans gerektiren uygulamalar için ideal bir malzeme yapmaktadır.

Ancak, AISI 4140 çeliği çevresel şartlar ve bazı asidik ortam gibi zorlu şartlarda korozyon ve aşınma direnci konusunda yetersiz kalabilir. Aşağı yukarı belirli bir düzeyde aşınma direnci sağlasa da bu çelik, aşınmaya karşı daha dirençli olan özel çeliklere kıyasla daha az dayanıklıdır (Al-Samarai ve Al-Douri 2024). Çeliğin korozyona karşı da hassasiyet gösterdiği bilinir, özellikle uygun bir yüzey işlem veya kaplama uygulanmadığında, nem ve kimyasal maddelere maruz kaldığında, malzeme hızla bozulabilir (Kumar ve Choubey 2024). Bu durum, özellikle zorlu çalışma koşullarında güvenilirliği ve uzun ömrü azaltır. Bu nedenle, AISI 4140 çeliğinin performansını artırmak için korozyon ve aşınma direncini iyileştirmek amacıyla çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır (Bhalerao ve Lakade 2022).

AISI 4140 çeliğinin yüzey özelliklerini iyileştirmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri nitrasyon işlemidir (Podgornik vd. 2001). Bu süreç, çelik yüzeyine nitrojen ekleyerek, aşınmaya karşı dirençli sert bir tabaka meydana getirir. Bir diğer yaygın yüzey işlemi ise karbürleştirmedir. Bu işlemde, çelik yüzeyine karbon enjekte edilerek, malzemenin sertliği ve aşınma direnci artırılır (Ulutun vd. 2010). Bunun yanı sıra, alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) kaplamaları, özellikle nemli ve aşındırıcı ortamlarda korozyon direncini artırmak için oldukça etkili bir çözüm sunar. Alüminyum oksit kaplama, stabil bir oksit tabakası oluşturarak çeliğin korozyona karşı korunmasını sağlar (Mirhashemihaghighi vd. 2016).  $Al_2O_3$  ayrıca, aşınmaya dirençli uygulamalarda da güvenilir bir malzeme olarak tercih edilmektedir çünkü çevreyle minimum etkileşimde bulunarak uzun ömürlü performans sergiler (Ng, Rao, ve Nicholls 2020).

Fiziksel Buhar Birikimi (PVD), AISI 4140 çeliği üzerine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplaması uygulamak için en etkili yöntemlerden biridir. PVD, düşük sıcaklıklarda kaplama yapılmasını sağlayarak, termal deformasyon riskini azaltırken son derece sert kaplamalar üretir. Bu kaplamalar, aşınma direncini büyük ölçüde artırır (Krella 2020). PVD aynı zamanda çevre dostu bir yöntem olarak dikkat çeker, zira diğer yöntemlere oranla daha az zararlı yan ürün ortaya çıkarır (Schulz ve Quinto 1999). Ancak, PVD kaplamalarının metal yüzeylere olan adezyon direnci çevresel şartların değişmesi ve asidik ortam gibi zorlu koşullarda sınırlı olabilir (Gerth ve Wiklund 2008). Bu sorunu çözmek amacıyla, kumlama işlemi sıklıkla kullanılır. Kumlama, metal yüzeyinde daha pürüzlü bir doku oluşturarak, PVD kaplamalarının daha iyi yapışmasını sağlar. Kumlama işlemi, yüzeyin daha fazla mekanik kilitlenme sağlayacak şekilde şekillendirilmesini ve kaplamanın alt malzeme ile daha güçlü bir bağ kurmasını sağlar (Zhang vd. 2018).

Kumlama, metal yüzeylerinde PVD kaplamalarının yapışma gücünü artırmak için etkili bir yöntemdir (Singh, Ghosh, ve Aravindan 2019). Bu işlemde, aşındırıcı malzemeler metal yüzeye püskürtülerek yüzeyin pürüzlülüğü artırılır. Artan pürüzlülük, kaplamanın daha iyi tutunmasına ve daha güçlü bir bağın oluşmasına olanak tanır. Kumlama sayesinde, PVD kaplamalarının genel performansı ve dayanıklılığı önemli ölçüde iyileşir, bu da onları daha zorlu uygulamalarda kullanılabilir hale getirir (Wu vd. 2024). Kumlama, aynı zamanda kaplama işleminin etkili bir şekilde yapılmasını sağlayarak, kaplanmış bileşenlerin ömrünü uzatır ve zorlu çalışma koşullarında daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlar (Sidky ve Hocking 1999).

Ancak, önceki çalışmalar kumlanmış AISI 4140 çeliği örneklerinin üzerine farklı kumlama basınçlarında uygulanan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalarının yapışma, korozyon ve tribokorozyon direncinin birleşik etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmemiştir. Bu tez çalışmasında, kumlama basıncının, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalı AISI 4140 çeliğinin performansını nasıl etkilediğini sistematik bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmanın bulguları, özellikle zorlu ortamlarda kullanılan kritik bileşenlerin güvenilirliğini ve ömrünü artırmak için yüzey işleme süreçlerinin nasıl optimize edilebileceği konusunda önemli bilgiler sunacağı düşünülmektedir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde, çelik ve alaşımlar hakkında genel bilgiler verildikten sonra, AISI 4140 çeliği ve bu malzemenin yüzey işleme yöntemleri hakkında bilgiler sunulacaktır. Ayrıca, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaların diğer yüzey işleme yöntemlerine göre avantajları ve PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) yönteminin üstünlükleri açıklanacaktır. AISI 4140 çeliği, dayanıklılığı ve mukavemeti ile sanayide yaygın olarak kullanılmakla birlikte, çevresel etkiler nedeniyle korozyon ve aşınma gibi sorunlarla karşılaşabilir. Bu sorunlarla başa çıkmak için kullanılan yüzey işleme tekniklerinin etkili bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

### 2.1. Çelik ve Alaşımlar

Çelikler, genellikle **demir ve karbon** karışımından oluşan ve bu karışımda ek alaşım elementleri bulunan malzemelerdir. Çeliğin ana bileşeni demir olmakla birlikte, karbon oranı ve alaşım elemanları çeliğin özelliklerini büyük ölçüde etkiler (Bhadeshia ve Honeycombe 2017). Çeliklerin sınıflandırılması, içerdikleri bileşim elemanlarına, özelliklerine ve kullanım alanlarına göre yapılır. Aşağıda, çeliklerin genel sınıflandırılması detaylı olarak açıklanmıştır:

#### 2.1.1. Karbon çelikleri

Karbon çelikleri, en temel çelik türlerinden biridir ve sadece demirle karbon içerir. Bu çeliklerin özellikleri, içerdiği karbon miktarına göre değişir. Karbon oranı arttıkça, çeliğin sertliği ve dayanıklılığı artar, ancak şekillendirilebilirliği düşer.

Düşük karbonlu çelikler (0.05%- 0.3% Karbon) düşük sertlikleri ile tanınır (Xiao vd. 2020). Şekil alma özellikleri iyidir ve genellikle yapı inşaatlarında, otomotiv ve beyaz eşya endüstrisinde kullanılır. Düşük karbonlu çelikler, işlenmesi kolay ve kaynak yapılabilir olmalarıyla öne çıkar.

Orta karbonlu çelikler (0.3%- 0.6% Karbon) dengeyi sağlayarak hem sertlik hem de işlenebilirlik sunar (Kwak vd. 2022). Makine parçaları, dişliler ve aksamlar gibi uygulamalarda kullanılır. Dayanıklı ve sağlamdır, ancak şekil alması ve kaynağı daha zordur.

Yüksek karbonlu çeliklerde (0.6% - 1.0% Karbon) ise yüksek karbon içeriği, bu çeliklere sertlik kazandırır, ancak kırılabilirlikleri arttığı için dikkatli kullanılması gerekir (Tkalec 2004). Bu tür çelikler genellikle kesici takımlar, bıçaklar, yaylar ve diğer yüksek aşınma dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

### **2.1.2. Alaşım çelikleri**

Alaşım çelikleri, sadece demir ve karbon içermekten daha fazlasını sunan çeliklerdir. İçlerine eklenen alaşım elementleri (örneğin, krom, nikel, molibden) çeliğin özelliklerini geliştirir ve bu tür çelikler genellikle daha fazla dayanıklılık, aşınma direnci ve ısıya dayanıklılık gibi özellikler sunar (Cunat 2004).

Düşük alaşımlı çelikler, dayanıklılık, korozyon direnci ve aşınma dayanımı gibi avantajlar sağlar. Ancak alaşım elementlerinin oranı, bu çeliklerin maliyetini artırabilir. Bu çelikler, genellikle otomotiv sektöründe, köprü yapımında ve inşaat sektöründe kullanılır (Klenam 2019).

Yüksek alaşımlı çelikler, çok sayıda farklı alaşım elemanına sahip olup, özellikle yüksek sıcaklıklarda dayanıklıdır. Paslanmazlık özellikleri de bu çeliklerin kullanımını yaygınlaştırır. Genellikle havacılık, enerji santralleri ve kimya endüstrilerinde kullanılır (Francis ve Byrne 2021).

### **2.1.3. Paslanmaz çelikler**

Paslanmaz çelikler, yüksek oranda krom içeren çeliklerdir. Krom, çeliğin oksitlenmesine karşı direnç göstererek paslanmasını engeller. Paslanmaz çelikler genellikle üç ana tipe ayrılır:

Ferritik paslanmaz çelikler, yüksek krom içeriklerine sahip olup, paslanmaya karşı dirençli ve iyi korozyon dayanımına sahiptir. Bununla birlikte, düşük sıcaklık dayanımları nedeniyle genellikle soğuk iklim koşullarında kullanıma uygun değildir (Fahim vd. 2019).

Östenitik paslanmaz çelikler, nikel içeriği yüksek olan, paslanmaya karşı mükemmel direnç gösterir ve aynı zamanda yüksek şekillendirilebilirlik sunar. Ayrıca, düşük sıcaklık koşullarına da dayanıklıdır. Bu nedenle, gıda işleme, tıbbi aletler ve denizcilik sektörlerinde yaygın olarak kullanılır (Talha, Behera, ve Sinha 2013).

Martensitik paslanmaz çelikler, yüksek sertlik ve dayanıklılık sunar, ancak şekillendirilebilirlikleri sınırlıdır. Genellikle yüksek dayanım gerektiren kesici takımlar ve endüstriyel aletlerde kullanılır (Gowthaman, Jeyakumar, ve Saravanan 2020).

#### **2.1.4. Takım çelikleri**

Takım çelikleri, yüksek sertlik, uzun ömür ve aşınma direnci isteyen uygulamalarda tercih edilen çeliklerdir. Bu çelikler, genellikle kesme, şekillendirme ve kalıplama işlemleri için özel olarak üretilir. İki ana türü vardır.

Hız çelikleri yüksek hızda çalışan makine parçaları için kullanılır, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olup kesme takımlarında kullanılır. Yüksek miktarda tungsten ve molibden içerir (Chaus, Chovanec, ve Legerská 2006).

Soğuk iş çelikleri, genellikle kesme, şekillendirme ve soğuk işleme takımlarında kullanılır. Yüksek sertlik ve aşınma direnci sağlar. Ağır olarak otomotiv ve imalat sanayinde kullanılır (Essam vd. 2023).

#### **2.1.5. Düşük sıcaklık çelikleri**

Düşük sıcaklık çelikleri, çok düşük sıcaklıklarda dahi dayanıklı olabilen çeliklerdir. Genellikle kriyojenik ortamda, yani sıvı gazların depolanması ve taşınmasında kullanılır. Bu çelikler, kırılma riskini minimize ederek sıvılaştırılmış gazlarla çalışan sistemlerde güvenliği sağlar (Zohuri 2019).

#### **2.1.6. Yapısal çelikler**

Yapısal çelikler, binalar, köprüler, yüksek yapılar ve diğer büyük mühendislik projelerinde kullanılan çeliklerdir. Çelik, bu yapıları destekleyen iskeletleri oluşturmak için yaygın olarak kullanılır. Yapısal çelikler genellikle yüksek dayanıklılığa sahip olup, korozyon direncine sahip alaşımlar içerir (Csernak ve McCormac 2012).

### **2.1.7. Özel çelikler**

Özel çelikler, belirli endüstriyel ihtiyaçlar için tasarlanmış çeliklerdir. Bu çelikler, genellikle çok özel bileşimlere sahip olup, belirli koşullar altında üstün performans gösterirler. Örneğin, gemi yapımında, uzay sanayisinde veya otomotiv sektöründe kullanılan çelikler bu kategoriye girer (Baker 2016).

### **2.1.8. Bütünleşik çelikler**

Bütünleşik çelikler, yüksek saflıkta metaller içeren ve belirli endüstriyel ihtiyaçları karşılamak üzere tasarlanmış çeliklerdir. Genellikle elektronik ve havacılık gibi hassas alanlarda kullanılır (Raabe 2023).

## **2.2. AISI 4140 Çeliği: Özellikler ve Kullanım Alanları**

AISI 4140 çeliği, yüksek mukavemetli, düşük alaşımlı bir çelik türüdür ve kimyasal bileşimi, karbon, krom, molibden gibi elementlerle güçlendirilmiştir (Akhtar vd. 2023). Bu özellikleri, çeliği yüksek stres altındaki ve aşınmaya maruz kalan uygulamalarda tercih edilen bir malzeme yapar. Çeliğin özellikleri hakkında daha ayrıntılı bilgi vermek gerekirse:

AISI 4140 çeliği, yaklaşık %0.40 karbon, %0,95 krom, %0.20 molibden ve %0,75 manganez içerir (Steels 1998). Bu alaşımlar, çeliğin mukavemetini artırır. Çeliğin sertlik, kırılabilirlik ve gerilim altındaki davranışları detaylı bir şekilde tartışılabilir. Bu özellikler, çeliğin hangi uygulamalarda kullanılabileceğini belirler.

Çeliğin kullanım alanları arasında otomotiv sanayisi, inşaat makineleri, savunma sanayisi ve enerji sektöründeki kritik parçalar bulunmaktadır. Dişli çarklar, şaftlar, miller ve benzeri mekanik bileşenler, AISI 4140 çeliği kullanılarak üretilir.

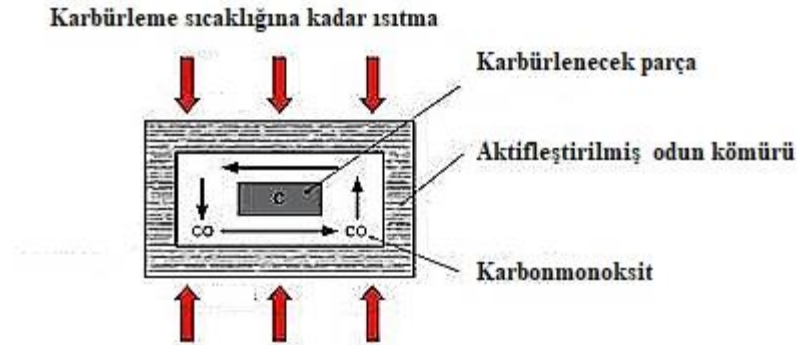
Ancak, AISI 4140 çeliği gibi malzemelerin korozyon direnci sınırlıdır ve çevresel faktörlere maruz kaldığında aşınma gibi olumsuz etkiler gösterebilir (Prabhu vd. 2020). Bu durum, malzemenin ömrünü kısaltarak ekonomik kayıplara yol açabilir. Dolayısıyla, bu tür çeliklerin kullanım ömrünü artırmak amacıyla yüzey işleme yöntemleri büyük önem taşır.

### 2.3. AISI 4140 Çeliği Üzerine Uygulanan Yüzey İşleme Yöntemleri

AISI 4140 çeliği üzerine uygulanan yüzey işleme yöntemlerinin amacı, malzemenin korozyon ve aşınma direncini artırmak, aynı zamanda malzemenin performansını iyileştirmektir. Bu yöntemlerin her biri, çeliğin yüzeyine koruyucu tabakalar ekleyerek, malzemenin dayanıklılığını artırmayı amaçlar. Çeliğin yüzeyine uygulanan işlem yöntemlerinin her biri farklı özellikler kazandırır. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır:

#### 2.3.1. Karbürleme (Carburizing)

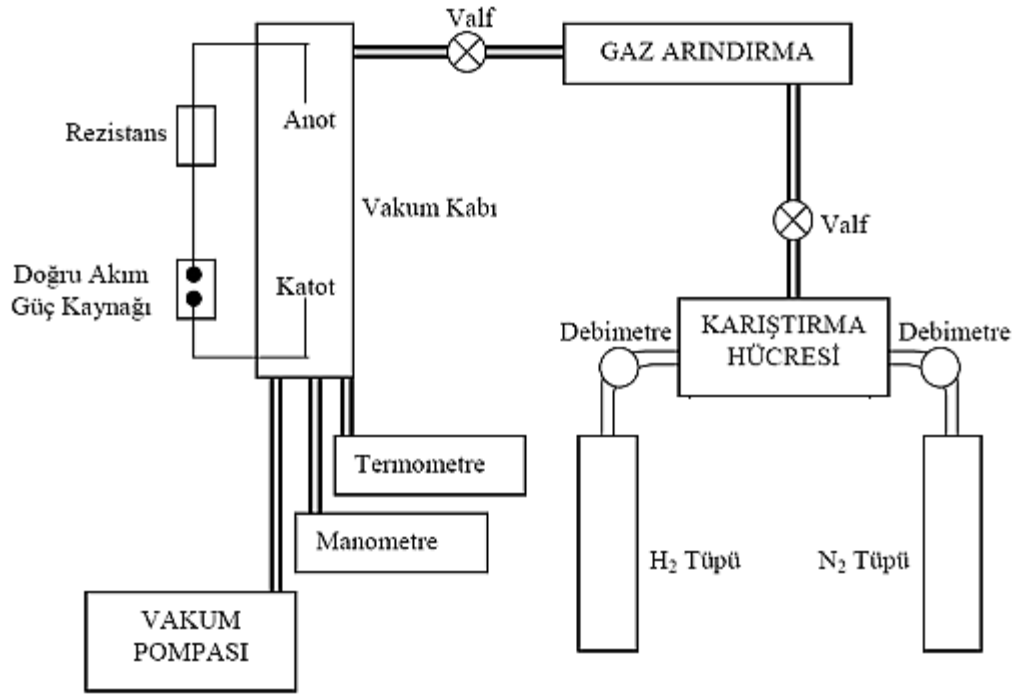
Karbürleme, çeliğin yüzeyine karbon gazlarının verilmesiyle yapılan bir işlemdir. Bu işlem sırasında, çelik yüzeyinde karbon yoğunluğu artırılır ve bu sayede çeliğin yüzeyi sertleşir (Parrish 1999). Karbürleme, yüksek sürtünme ve aşınmaya maruz kalan parçalar için ideal bir işlemdir. Özellikle dişli çarklar gibi sürekli hareket eden parçalarda, çeliğin yüzeyinin sertleşmesi aşınma direncini önemli ölçüde artırır. Otomotiv parçaları, dişli sistemleri, tahrik sistemleri gibi yüksek gerilim ve aşınma altında çalışan parçalarda kullanılır.



Şekil 2.1. Karbürleme işlemi (Wadhwa ve Akhai 2014)

#### 2.3.2. Nitrasyon (Nitriding)

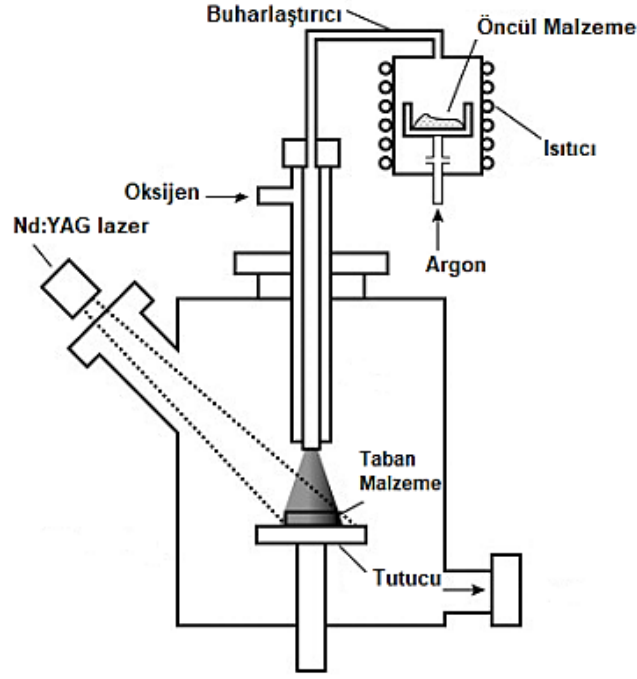
Nitrasyon, çeliğin yüzeyine azot gazı verilerek nitrür tabakaları oluşturulmasını sağlayan bir işlemdir. Bu işlem, çeliğin yüzeyini hem sertleştirir hem de korozyona karşı dayanıklı hale getirir (Casteletti, Neto, ve Totten 2014). Nitrasyon işlemi, yüksek sıcaklıklar altında bile etkili bir koruma sağlar ve yüksek aşınma dirençleri sunar. Ayrıca, işlem sırasında çeliğin iç yapısına müdahale edilmez, bu da malzemenin esnekliğini korur. Otomotiv sanayisinde, özellikle motor parçalarında ve dişli sistemlerinde kullanılır.



Şekil 2.2. (a) Basınçlı gaz nitrüleme ekipmanının basitleştirilmiş diyagramı. (b) Gaz üflemeli induksiyonlu ısıtma nitrüleme tesisinin şematik diyagramı (Güven, Delikanlı, ve Öncel 2014)

### 2.3.3. Kimyasal buhar biriktirme (CVD)

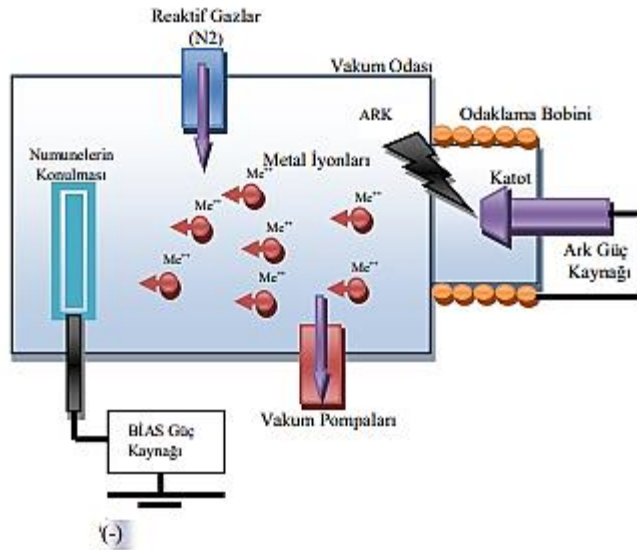
CVD yöntemi, yüzeylerde ince kaplamalar elde etmek için kullanılan bir yüzey işlemidir. Bu işlemde, kimyasal bileşikler buharlaştırılır ve buharlar yüksek sıcaklıkta metal yüzeylere yerleştirilir. CVD, aşınmaya karşı dayanıklı kaplamalar sağlar, ancak yüksek işlem sıcaklıkları gerektirir (Carlsson ve Martin 2010). Bu nedenle, işlem sırasında bazı malzemelerin mekanik özellikleri olumsuz etkilenebilir. Yüksek sıcaklık ve aşındırıcı ortamlarda çalışan makine parçaları için uygundur.



Şekil 2.3. Kimyasal buhar biriktirme görseli (Çoşğun, Taşcıoğlu, ve Yılmaz 2021)

#### 2.3.4. Fiziksel buhar biriktirme (PVD)

PVD, metal buharlarının vakum ortamında biriktirilerek yüzeylere kaplama yapılması işlemidir. Düşük sıcaklıkta uygulama yapılabilir. Düşük sıcaklıklarda yapılan PVD, malzemenin özelliklerini koruyarak yüksek kaliteli kaplama sağlar (Baptista vd. 2018). Ayrıca, çevre dostu bir yöntemdir ve kimyasal çözücüler kullanılmaz. Yüksek saflık gereksinimi olan uygulamalar, otomotiv parçaları, tıbbi cihazlar gibi çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılır.



Şekil 2.4. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) görseli (Aytaç ve Malayoğlu 2018)

## 2.4. PVD Yönteminin Diğer Yüzey İşlem Yöntemlerine Göre Avantajları

PVD yöntemi, AISI 4140 çeliği ve benzeri malzemelerin yüzeylerini kaplamak için en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. PVD'nin diğer yüzey işleme yöntemlerine göre sunduğu avantajlar şu şekildedir:

- PVD, düşük işlem sıcaklıklarında yapılan bir yöntemdir. Bu özellik, ısıl işlem gereksinimlerini ortadan kaldırarak, malzemenin yapısal bütünlüğünü korur. Bu da özellikle hassas malzemeler için önemli bir avantaj sağlar (Panjan vd. 2020).
- PVD, homojen ve ince kaplama tabakaları üretir. Bu tabakalar, yüzeyle mükemmel bir şekilde birleşir ve düzgünlük sağlar. Yüksek kaplama kalitesi, özellikle yüksek saflık ve düzgünlük gerektiren uygulamalar için büyük önem taşır (Alique 2018).
- PVD işlemi, kimyasal çözücüler veya zararlı gazlar kullanmadan kaplama yapar. Bu, çevre dostu bir yöntem olarak endüstriyel üretimde çevresel düzenlemelere uyum sağlar. Ayrıca, bu özellik, PVD'yi birçok endüstriyel uygulama için çekici kılar (Tewari vd. 2024).
- PVD, farklı malzeme ve kaplama seçenekleri sunar.  $Al_2O_3$  gibi seramik kaplamalarla birlikte metal kaplamalar da uygulanabilir. Bu esneklik, PVD'yi çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılabilir hale getirir.

## 2.5. $Al_2O_3$ Kaplamaların Diğer Kaplamalara Göre Avantajları

$Al_2O_3$  kaplamalar, AISI 4140 çeliği gibi malzemelerde yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci sağlar.  $Al_2O_3$ 'nin doğal olarak sahip olduğu bu özellikler, diğer kaplama türlerine kıyasla bazı belirgin avantajlar sunar:

- $Al_2O_3$  kaplamalar, doğal olarak yüksek sertliğe sahip oldukları için, aşınmaya karşı son derece dayanıklıdır. Bu, yüksek sürtünme koşullarında malzemenin ömrünü uzatır.  $Al_2O_3$ , diğer kaplama türlerine göre daha üstün aşınma direnci sağlar (Diab vd. 2025).
- $Al_2O_3$ , korozyona karşı mükemmel direnç gösterir. Asidik ve alkali ortamlar gibi zorlu koşullarda,  $Al_2O_3$  kaplama, metal yüzeyde koruyucu bir oksit tabakası oluşturur. Bu tabaka, çeliğin korozyon etkilerinden korunmasına yardımcı olur (Yu vd. 2019).

- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalar, yüksek sıcaklıklarda bile stabil kalabilir. Bu özellik, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalarını özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan uygulamalar için ideal hale getirir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'nin bu özelliği, onu diğer kaplama türlerine göre üstün kılar(Mondal vd. 2021).
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalar, düşük sürtünme katsayısı sayesinde sürtünme nedeniyle oluşan aşınmayı önler. Bu özellik, özellikle hareketli parçaların yer aldığı uygulamalarda malzeme verimliliğini yükseltir (Antonov vd. 2018).

## 2.6. Kuşlama Yöntemi ve Uygulama Alanları

Kuşlama, yüzeylere çeşitli partiküllerin (genellikle kum, çelik bilyalar, cam kürecikler gibi malzemeler) yüksek hızda çarpmasıyla yapılan bir yüzey işleme yöntemidir. Bu işlem, yüzeydeki kir, pas, oksit tabakalarını temizlemek, pürüzlülük oluşturmak ve kaplama öncesi hazırlık yapmak için kullanılır (Momber 2007). Kuşlama, yüzeyin mekanik özelliklerini iyileştirir ve kaplama uygulamalarının adezyon direncini artırır.

Kuşlama işlemi genellikle aşağıdaki alanlarda kullanılır:

- Pas, korozyon, kir ve diğer kirleticilerin temizlenmesi.
- Kaplama ve boya uygulamalarına uygun yüzey pürüzlülüğü sağlanması.
- Boya ve kaplamaların daha iyi tutunması için yüzeyin pürüzlü hale getirilmesi.
- Cam, taş veya metal yüzeylerinde estetik desenlerin oluşturulması.

Bu işlem, otomotiv, havacılık, gemi yapımı, inşaat, makine mühendisliği gibi pek çok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

## 2.7. PVD Yöntemi İle Yapılan Kaplamalar Üzerinde Kuşlama Yönteminin Avantajları

PVD (Physical Vapor Deposition) yöntemi, ince kaplama tabakalarının vakum altında buharlaştırılarak yüzeye kaplanmasını sağlayan bir kaplama yöntemidir. Kuşlama işlemi, PVD kaplamalarının başarısı için kritik bir hazırlık sürecidir. Kuşlama ile yüzeyin temizlenmesi, pürüzlü hale getirilmesi ve istenilen özelliklerin sağlanması, PVD kaplamanın kalitesini artırır (Panjan vd. 2020). İşte kuşlama yönteminin PVD kaplama üzerindeki avantajları:

- Kumlama, yüzeydeki oksit, pas, kir ve diğer kirleticilerin temizlenmesinde oldukça etkilidir. Bu, PVD kaplamanın daha homojen bir şekilde yüzeye tutunmasına yardımcı olur. Temiz ve düzgün bir yüzey, kaplamanın kalitesini artırır ve daha sağlam bir tutunma sağlar (Thakur vd. 2022).
- Kumlama, yüzeyde istenilen pürüzlülüğü oluşturur. Bu, özellikle kaplama uygulamalarında çok önemlidir. PVD kaplamalar, pürüzlü yüzeylere daha iyi yapışır, çünkü pürüzlü yüzeyler, kaplamanın mekanik bağlanma özelliğini güçlendirir. Kumlama, bu pürüzlülüğü sağlamak için mükemmel bir yöntemdir (Okokpujie vd. 2024).
- Yüzey hazırlığı, PVD kaplamanın yüzeye daha sağlam tutunmasını sağlar. Kumlama ile yüzeydeki kirleticiler temizlendiği ve uygun pürüzlülük sağlandığı için, kaplama uygulamaları daha iyi tutunur ve uzun süre dayanır. Yüzeydeki oksit tabakalarının uzaklaştırılması, kaplamaların yüzeye mükemmel bir şekilde bütünleşmesine olanak tanır (Panjan vd. 2020).
- Kumlama işlemi sırasında, yüzeydeki mikroskobik çatlaklar ve gerilimler dağılır. Bu, PVD kaplamanın uygulandığı yüzeyin daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlar. Kumlama, ayrıca yüzeydeki gerilme noktalarını azaltarak kaplamanın kırılma veya aşınma riskini en aza indirir (Thakur vd. 2022).
- Kumlama, yüzeyin düzgünlüğünü artırarak PVD kaplamaların daha homojen ve düzgün bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu, kaplamanın aşınmaya karşı daha dirençli olmasına yardımcı olur. Kumlama ile sağlanan uygun yüzey pürüzlülüğü, kaplamaların performansını artırarak uzun süreli kullanımda daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlar (Awang, Khalili, ve Pedapati 2019).

Sonuç olarak, AISI 4140 çeliği üzerine uygulanan yüzey işleme yöntemlerinin her biri, belirli avantajlar ve sınırlamalar taşır.  $Al_2O_3$  kaplamalar, yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci ile düşük sürtünme katsayısı gibi üstün özelliklere sahip olup, bu yönleriyle dikkat çeker. Ayrıca, PVD yöntemi, düşük sıcaklıklarda kaplama yapabilme, yüksek kaplama kalitesi sağlama ve çevre dostu olma gibi avantajlarla diğer yüzey işleme yöntemlerine göre önemli üstünlükler sunmaktadır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan  $15 \times 15 \times 2 \text{ mm}^3$  boyutlarındaki AISI 4140 çeliği, kimyasal bileşimi bakımından %0.20 Mo, %0.41 C, %0.025 P, %0.75 Mn, %0.95 Cr, %0.02 S, %0.22 Si ve geri kalanı Fe (tüm değerler ağırlıkça %) içermektedir; bu bileşim, önceki bir çalışmayla aynıdır (Kovacı vd. 2019). AISI 4140 çeliği örnekleri, 700  $\mu\text{m}$  Alüminyum Oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) parçacıkları kullanılarak 4 bar, 6 bar ve 8 bar olmak üzere farklı basınçlarda aşındırıcı püskürtme işlemine tabi tutulmuştur. Çelik örnekleri, önceden belirlenen süre boyunca belirtilen basınçlarda aşındırıcı parçacıkların püskürtüleceği patlatma odasına yerleştirilmiş ve işlem başka bir çalışmada açıklandığı şekilde gerçekleştirilmiştir (Rakngarm ve Mutoh 2009).

#### 3.2. Yöntem

AISI 4140 çeliği üzerinde  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplama işlemi, Fiziksel Buhar Birikimi (PVD) yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Kaplama öncesi, örnekler sırasıyla 4 bar, 6 bar ve 8 bar basınç seviyelerinde kumlama işlemine tabi tutuldu. PVD yöntemi ile  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplamalar, Nanovak NVTS-400 cihazı ile AISI 4140 çeliği üzerinde üretilmiştir. Örnekler, yaklaşık  $3 \times 10^{-5}$  Pa'ya kadar vakumlanan bir ortamda işleme alındı. Yüzeylerin temizlenmesi ve kirleticilerden arındırılması amacıyla, örnekler 35 dakika boyunca -800 V argon gazı ile sputter edilerek hazırlık aşamasına tabi tutuldu. Hedef gücü 300 W olarak ayarlanmış olup, bu güç değeri  $\text{Al}_2\text{O}_3$  filminin yüzeye homojen bir şekilde kaplanmasını sağladı. Kaplama süresi, 2.1  $\mu\text{m}$  kalınlığında bir kaplama elde etmek için 4 saat olarak belirlendi. Kaplama hedef gücü her zaman 300 W olarak sabit tutuldu (sıcaklıkları  $420^\circ\text{C}$ -  $460^\circ\text{C}$ ). Bu parametreler, AISI 4140 çeliği üzerinde kaliteli  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplama elde edilmesi amacıyla optimize edilmiştir. Çalışmada kullanılan örnek grupları aşağıda belirtilmiştir:

- İşlem görmemiş 4140 (İşlem görmemiş AISI 4140)
- 4 bar kumlanmış (4 bar basınçla kumlama yapılmış AISI 4140)
- 6 bar kumlanmış (6 bar basınçla kumlanmış AISI 4140)
- 8 bar kumlanmış (8 bar basınçla kumlanmış AISI 4140)
- Al kaplama (AISI 4140 çeliği üzerine PVD yöntemiyle  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplama uygulanmış)

- 4 bar kumlanmış + Al kaplama (4 bar basınçta kumlanmış AISI 4140 çeliği üzerine PVD yöntemiyle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama yapılmış)
- 6 bar kumlanmış + Al kaplama (6 bar basınçta kumlanmış AISI 4140 çeliği üzerine PVD yöntemiyle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama yapılmış)
- 8 bar kumlanmış + Al kaplama (8 bar basınçta kumlanmış AISI 4140 çeliği üzerine PVD yöntemiyle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama yapılmış)

### 3.3. Karakterizasyon

AISI 4140 örneklerinin kristal düzeni ve faz yapısı X-ışını kırınımı (XRD) tekniği kullanılarak belirlenmiştir. XRD ölçümleri, Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1.54059 \text{ \AA}$ ) radyasyon kaynağına sahip bir GNR Explorer difraktometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. GNR Explorer difraktometre cihazı, 30 mA akım ve 40 kV gerilimle çalıştırılmış olup, veriler belirli standartlara göre  $2\theta$  aralığında kaydedilmiştir. Örneklerinin yüzey ve kesit SEM görüntüleri, FEI-Quanta FEG-250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilmiştir.

AISI 4140 örneklerinin ıslanabilirliği, bir temas açısı gonyometresi (Attension Theta Lite, C204A, Biolin Scientific, İsveç) ile ölçülmüştür. Test sıvısı olarak damıtılmış su kullanılmış ve 5 ml'lik bir damla dikkatlice örneğin yüzeyine yerleştirilmiştir. Temas açısı ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir ve 3 kez tekrar edilmiştir.

AISI 4140 çeliği yüzeyine uygulanan ince kaplama filmlerinin kritik yük değerleri, CSM markalı bir çizik test cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm işlemleri, her örnek için üç farklı noktada gerçekleştirilmiştir. Testler, 100 N/dakika hızında artan yükleme oranıyla yapılmıştır. Çizik testleri, 200  $\mu\text{m}$  uç yarıçapına sahip bir elmas indentör ile gerçekleştirilmiştir. Bu koşullar, ince filmlerin yapışmasını ve mekanik bütünlüğünü değerlendirmek amacıyla seçilmiştir. Vickers mikrosertlik ölçümleri, bir cihaz kullanılarak yapılmış ve her ölçüm için 100 g'lık bir yük 10 saniye boyunca uygulanarak beş farklı noktadan ortalama alınmıştır. Örneklerin yüzey pürüzlülüğü, (Bruker Contour GT-K1) 3D yüzey profilometresi ile belirlenmiştir.

Elektrokimyasal testlerin tamamında, grafit çubuk karşı elektrodu, Ag/AgCl referans elektrodu ve üç elektrotlu bir sistem kullanılmıştır. Çalışma elektrodu olarak, 0.38 cm<sup>2</sup>'lik bir alanı açığa çıkan AISI 4140 çeliği örneği kullanılmıştır. Elektrokimyasal testlerin tamamı, %3.5 NaCl

çözeltisi içerisinde oda sıcaklığında yapılmıştır. Ölçüm işlemleri, GAMRY Series G750TM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

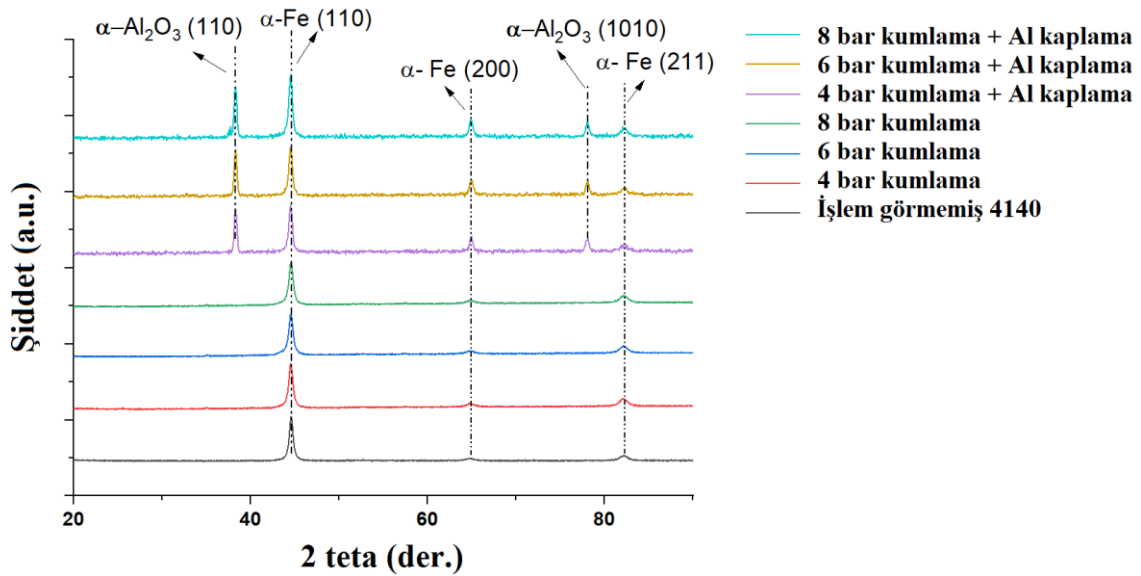
OCP, 7200 saniye süresince izlenmiştir. EIS testleri, alternatif akım (AC) genliği 10 mV olarak, 100 kHz ile 0.01 Hz frekans aralığı arasında yapılmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon deneyleri, 1 mV/s tarama hızında ve -1 V ile +1 V arasında, referans elektroduna (VRef) göre yapılmıştır. Bu deneylerin amacı, AISI 4140 çeliği örneklerinin korozyon davranışını ve elektrokimyasal özelliklerini değerlendirmektir.

AISI 4140 çeliği, bir geri dönen tribotest cihazı (Turkyus) ve elektrokimyasal ölçüm cihazı ile tribokorozyon testlerine tabi tutulmuştur. Test koşulları 22 °C ve %50 bağıl nem olarak sabit tutulmuştur. Tribokorozyon testlerinde, sürtünme, açık devre potansiyeli koşulları altında potansiyel dengelemesi yapıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir. 6 mm çapında bir alüminyum oksit topu, pin olarak kullanılmış ve 1 N'lik bir normal kuvvet uygulanmıştır. 8 mm'lik bir darbe uzunluğu seçilmiş, geri dönüş frekansı olarak ise 1 Hz tercih edilmiştir. Örneklerin aşınma derinliği ve yüzey pürüzlülüğü, Bruker Contour GT-K1 model 3D yüzey profilometresi ile analiz edilmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Karakterizasyon Analiz Sonuçları

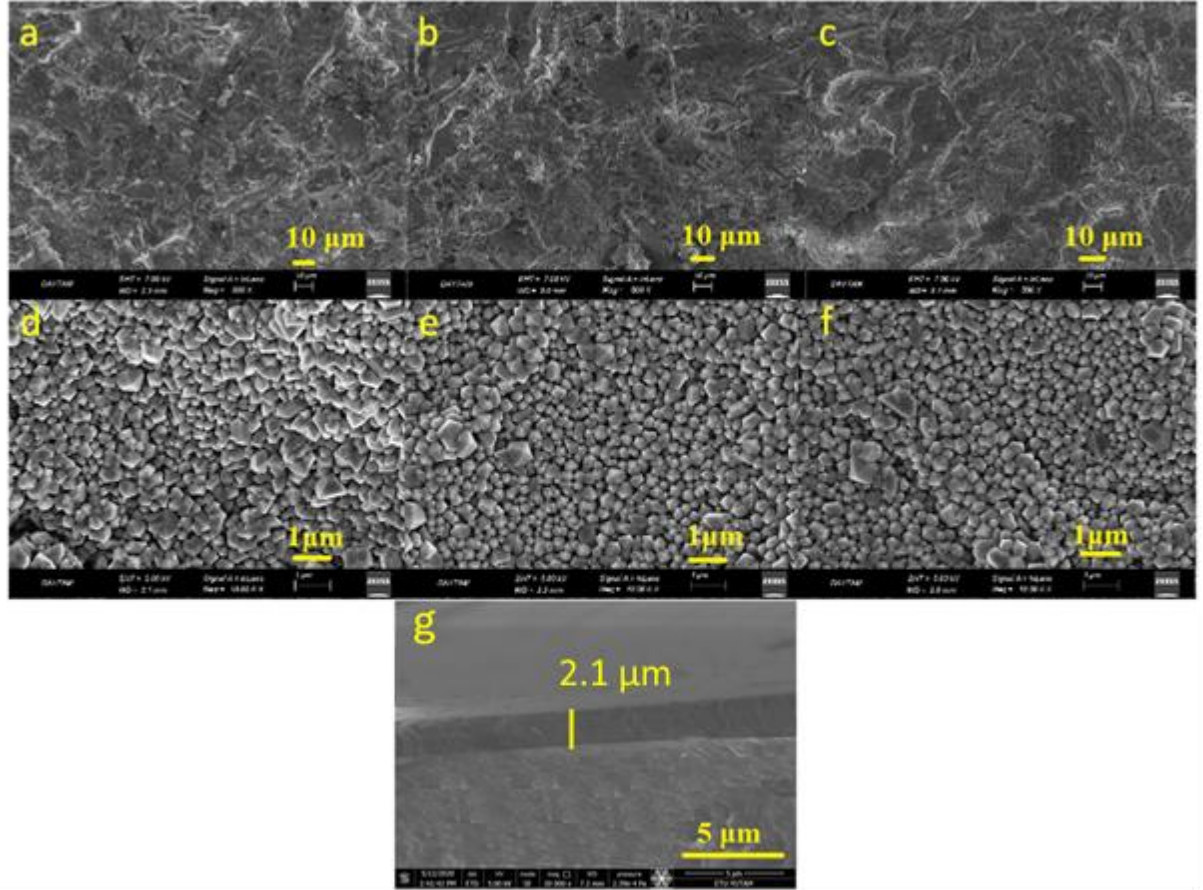
Şekil 4.1, 4, 6 ve 8 bar basınçlarda kumlanmış hem PVD kaplama uygulanmış hem de kaplamasız AISI 4140 çeliği örneklerinin XRD desenlerini göstermektedir. XRD analizleri, işlenmemiş örneğin temel olarak  $\alpha$ -ferrit fazlarından oluştuğunu göstermiştir. Kumlama işlemi, AISI 4140 çeliği yüzeylerinin XRD desenlerinde belirgin değişikliklere neden olmamış olsa da küçük pik kaymaları gözlemlenmiştir. 4, 6 ve 8 bar basınçlarla yapılan kumlama işleminin ardından uygulanan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  PVD kaplama ile  $\text{Al}_2\text{O}_3$  varlığı karakteristik XRD pikleri ile doğrulanmıştır. XRD sonuçlarına göre, kaplama filmi çoğunlukla  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazını içeriyor ve (110) ile (1010) düzlemlerine ait belirgin kristal yönelimleri sergilemektedir (Al-Mushaki, Al-Ariki, ve Alnehia 2023).



Şekil 4.1. XRD grafiği (Acar ve Gelengeç 2025)

Şekil 4.2, 4, 6 ve 8 bar basınçlarda kumlanmış AISI 4140 çeliği örneklerinin SEM görüntülerini sunmaktadır ve yüzey morfolojisi ile mikro yapısında belirgin farklılıklar göstermektedir. 4 bar basınçta, yüzey daha pürüzsüzdür, ince bir pürüzlülük ve minimal deformasyonlar gözlemlenir. 6 bar basınçta ise, orta düzeyde pürüzlülük ve daha belirgin yüzey deformasyonları görülmekte, tane sınırları daha net bir şekilde tanımlanmıştır. 8 bar basınçta ise, yüzey yüksek pürüzlülük sergileyip, önemli tane sınırı hasarları ve mikroskobik çukurlar ile çatlaklar içerir. Mikro yapısal hasar seviyesi, kumlama basıncı arttıkça artmakta olup, en belirgin etkiler 8 barda

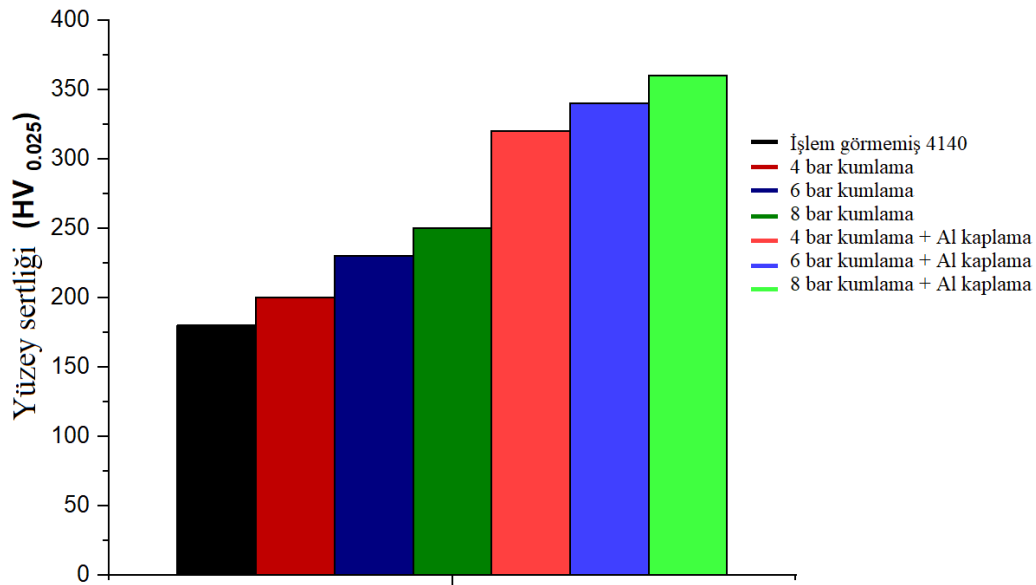
gözlemlenmiştir. Bu morfolojik değişiklikler, yüzey sertliğini de etkilemektedir. 4, 6 ve 8 bar basınçlarla kumlanmış  $Al_2O_3$  PVD kaplamalı AISI 4140 çeliği örneklerinin SEM görüntüleri, farklı basınçlarda benzer  $Al_2O_3$  yapılarını göstermektedir. Kaplamadaki tane sınırlarının sıkı bir şekilde yapışması ve dikey büyüme, Thornton modelindeki Bölge 1 ile uyumlu bir şekilde ( $T_s/T_m < 0.3$ ), olacak şekilde burada  $T_s/T_m = 0.27$  hesaplanmıştır (Senocak vd. 2021). PVD işlemi sonrasında  $Al_2O_3$  film kalınlığı yaklaşık olarak  $2.1 \mu m$  olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.2. (a) 4 bar kumlanmış, (b) 6 bar kumlanmış, (c) 8 bar kumlanmış, (d) 4 bar kumlanmış + Al PVD, (e) 6 bar kumlanmış + Al PVD, (f) 8 bar kumlanmış + Al PVD ve (g) filmlerinin kesit SEM görüntüleri (Acar ve Gelengeç 2025)

Mikrosertlik test sonuçları Şekil 4.3'te sunulmuştur. 4, 6 ve 8 bar basınçlarla kumlanmış AISI 4140 çeliği üzerinde yapılan testler, kumlama basıncı arttıkça sertliğin arttığını göstermektedir. 4 bar basınçta malzeme, temel bir sertlik sergilerken, basınç 6 ve 8 bar'a çıktıkça önemli bir sertlik artışı gözlemlenmiştir. Bu iyileşme, yüzey sertleşmesi ve daha yüksek kumlama basınçlarında artan plastik deformasyonla açıklanmaktadır, bu da daha yoğun ve sert bir yüzey oluşumuna sebep olmaktadır (Ghara, Paul, ve Bandyopadhyay 2021). Sonrasında,  $Al_2O_3$  PVD

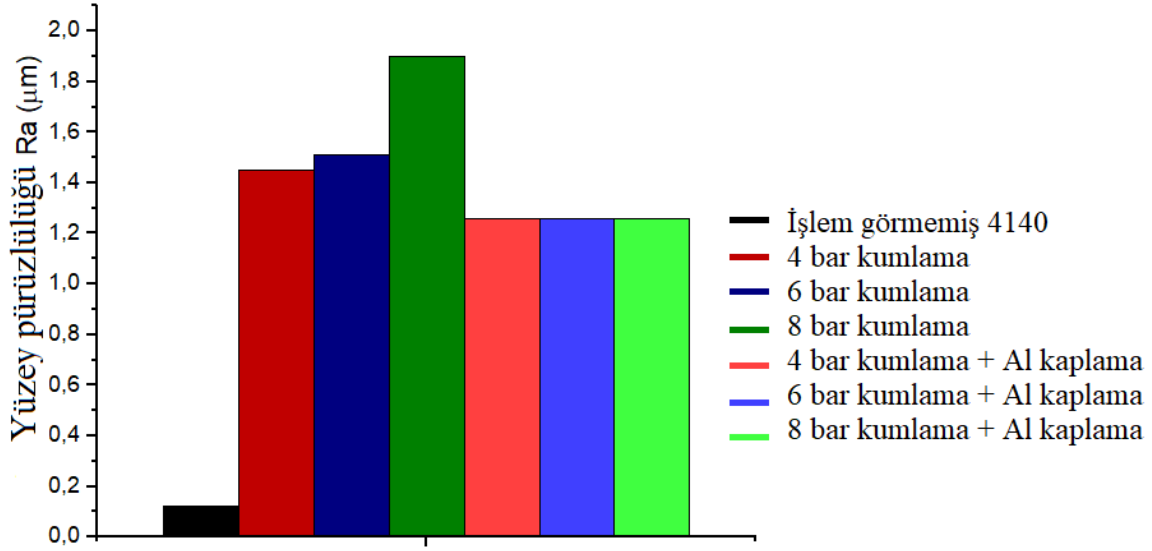
filmleri kumlanmış örneklere uygulanmıştır. Aynı kaplama koşulları kullanılmış olmasına rağmen,  $Al_2O_3$  kaplamalarının sertlik sonuçları, alt tabaka sertliğinden etkilenen farklılıklar göstermektedir. 6 ve 8 barda ölçülen daha yüksek sertlik değerleri, alt tabaka yüzeyinin değiştirilmiş olmasından kaynaklanıyor olabilir, bu da kaplamanın yapışmasını ve performansını etkiler. Buna rağmen,  $Al_2O_3$  yapısının sergilemiş olduğu yüksek sertlik ve koruyucu özellikleri sayesinde yüzey sertliğini daha da artırmıştır. Kumlama ve  $Al_2O_3$  kaplama kombinasyonu, nihayetinde örneklerde üstün sertlik özellikleri sağlamıştır.



Şekil 4.3. Mikrosertlik değerleri (Acar ve Gelengeç 2025)

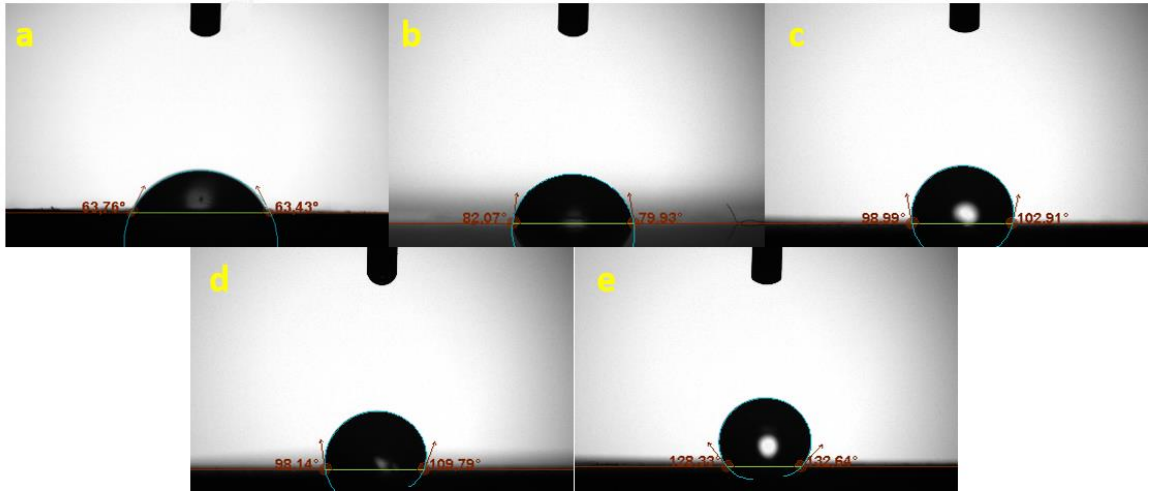
Şekil 4.4, yüzey pürüzlülüğü test sonuçlarını sunmaktadır. 4, 6 ve 8 bar basınçlarla kumlanmış AISI 4140 çeliği üzerinde yapılan yüzey pürüzlülüğü testleri, artan kumlama basıncıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünün arttığını göstermektedir. 4 bar basınçta, yüzey pürüzlülüğü nispeten düşük olup daha düzgün bir yüzey kalitesine işaret etmektedir. Basınç 6 bara yükseldiğinde, yüzey pürüzlülüğü daha belirgin hale gelerek ara bir yüzey dokusu sergiler. 8 bar basınçta ise, yüzey en yüksek pürüzlülüğe sahip olup daha belirgin düzensizlikler ve doku özellikleri göstermektedir. Bu durum, kumlama basıncının arttıkça çelik yüzeyinde aşınma ve malzeme kaymasının daha fazla gerçekleşmesiyle yüzey pürüzlülüğünün yükseldiğini ortaya koymaktadır (Jacob vd. 2017). Daha sonra,  $Al_2O_3$  PVD kaplaması, kumlanmış AISI 4140 çeliği örneklerine uygulanmış ve kaplama sonrasında yüzey pürüzlülüğünde hafif bir azalma gözlemlenmiştir.  $Al_2O_3$  PVD kaplaması, kumlama işlemi nedeniyle oluşan bazı düzensizlikleri gidermiş ve daha az pürüzlü bir yüzey elde edilmesini sağlamıştır. Yüzey pürüzlülüğündeki bu

azalma, kaplama malzemesinin mikro ölçekli çukurları ve vadileri doldurmasıyla genel yüzey düzgünlüğünü iyileştirmesinden kaynaklanmaktadır (Vazirinasab, Jafari, ve Momen 2018).  $Al_2O_3$  yapısı, kumlanmış örneklerin hem yüzey sertliğinin artmasını hem de yüzey kalitesinin iyileşmesini sağlamıştır.



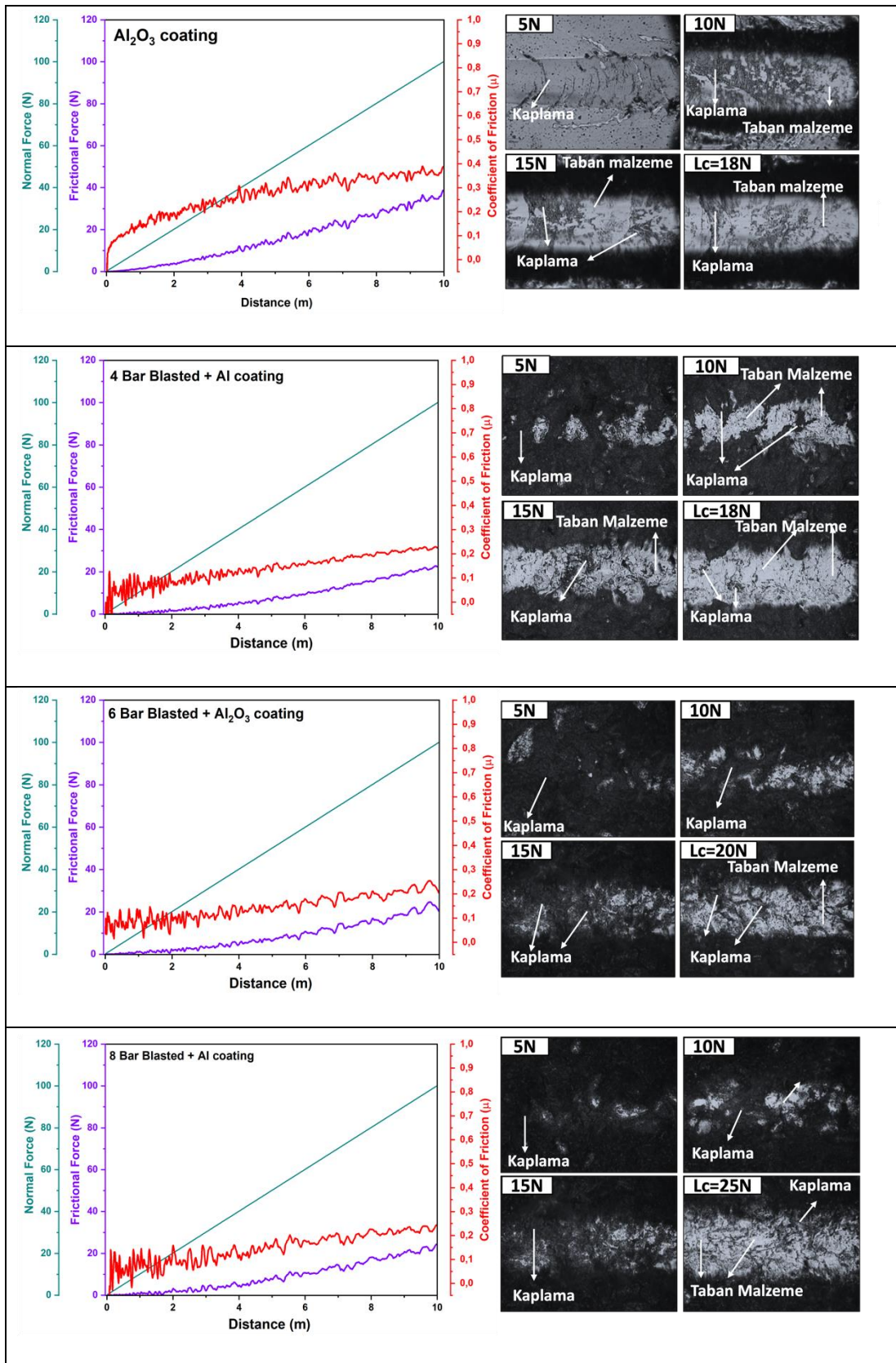
Şekil 4.4. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (Acar ve Gelengeç 2025)

Şekil 4.5, AISI 4140 örneklerinin temas açısı ölçümlerini göstermektedir. Çelik örnekleri, sırasıyla 4, 6 ve 8 bar basınçlarla kumlama yüzey işlemi uygulandıktan sonra PVD yöntemiyle  $Al_2O_3$  filmleri ile kaplanmıştır. Ölçümler, kumlama basıncı arttıkça temas açısının da arttığını, özellikle  $Al_2O_3$  kaplama yapılan filmlerde daha belirgin bir etki gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Bu fenomen, daha yüksek basınçla yapılan kumlamanın yüzey pürüzlülüğünü artırmasıyla açıklanabilir. Yüksek basınçlı kumlama, mikro ölçekli çıkıntılar oluşturarak hava ceplerinin birikmesine neden olur ve Cassie-Baxter etkisiyle temas açısını yükseltir (Heale 2020). Ayrıca, kumlama yüzey enerjisini değiştirir ve basınç arttıkça daha yüksek temas açılarına yol açar.  $Al_2O_3$  kaplaması sonrasında temas açısının artması,  $Al_2O_3$  kaplamasının hidrofobik doğasıyla ilişkilidir (Zhi vd. 2017). Temas açısındaki bu artış,  $Al_2O_3$  katmanının oluşturduğu daha düzgün ve homojen yüzeyin bir sonucudur.  $Al_2O_3$  katmanının, kumlanmış çelikle karşılaştırıldığında daha düşük yüzey enerjisine sahip olması, yüzey pürüzlülüğünü azaltarak su itici özellikler gösteren bir yüzey oluşturur ve böylece daha yüksek temas açısına yol açar. Bu hidrofobik davranış, seramik kaplamalar için tipik bir özellik olup, genellikle daha yüksek ıslanma direnci sergiler (Yao vd. 2023).



Şekil 4.5. (a) işlenmemiş AISI 4140, (b) 4 bar kumlanmış, (c) 6 bar kumlanmış, (d) 8 bar kumlanmış ve (e) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PVD temas açısı ölçümleri (Acar ve Gelengeç 2025)

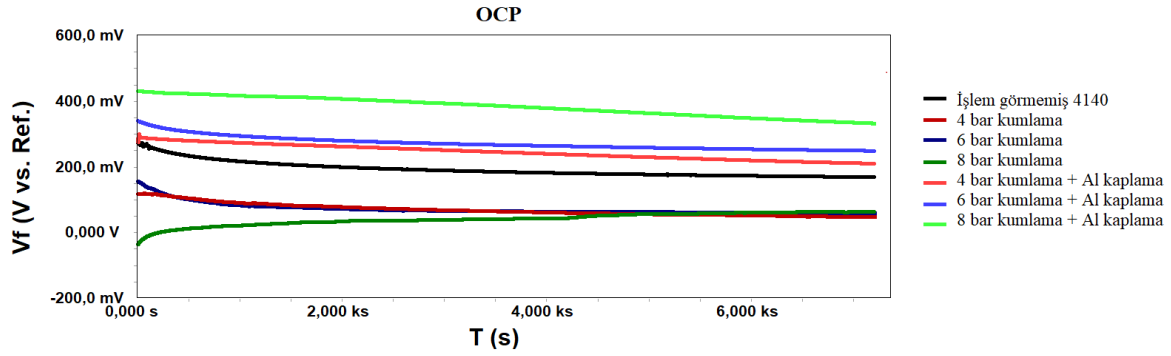
İşlenmemiş ve farklı basınçlarla kumlanmış örnekler üzerine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filmi kaplanmış ve bunların adezyon kuvvetleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Kumlama yüzey işlemi, AISI 4140 malzemesine sırasıyla 4 bar, 6 bar ve 8 bar basınçlarla uygulanmış ve ardından PVD (Fiziksel Buhar Birikimi) yöntemiyle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filmleri kaplanmıştır. Buradaki en önemli parametre kritik yüküdür "Lc". Adezyon testlerinde, "Lc" genellikle kaplamanın adezyon kuvvetinin bir ölçüsü olarak kullanılır (Valli 1986). Kumlama işleminin ardından Lc değerleri 18, 19, 20 ve 25 N olarak işlenmemiş, 4 bar, 6 bar ve 8 bar örneklerinden sırasıyla elde edilmiştir. Bu sonuçlar, kumlama işleminde uygulanan basınç ile adezyon kuvvetinin doğru orantılı bir ilişkisi olduğunu doğrulamaktadır. Bu iyileşme birkaç faktöre bağlanabilir: Kumlama, yüzey pürüzlülüğünü artırır, mikro ölçekli çıkıntılar oluşturarak yüzey alanını artırır ve substrat ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama arasında mekanik kilitleme sağlar (Heidarinejad ve Ashrafizadeh 2024). Ayrıca, kirleticileri temizleyerek filmin daha iyi adezyonunu sağlar. Bu süreç, yüzeydeki geri yükleme gerilmelerini de yaratabilir, böylece çatlağın oluşma ve yayılma olasılığını azaltır. Son olarak, farklı kumlama basınçları farklı yüzey topografileri yaratır, bu da adezyonu maksimize edecek optimum pürüzlülüğü elde etmeye yardımcı olabilir. Bu faktörlerin birleşimi, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filmlerinin AISI 4140 çelik alt tabakasındaki adezyon kuvvetlerinde gözlemlenen artışı açıklamaktadır.



Şekil 4.6. Adezyon testlerinden elde edilen optik görüntüler ve kritik yük değerleri (Acar ve Gelengeç 2025)

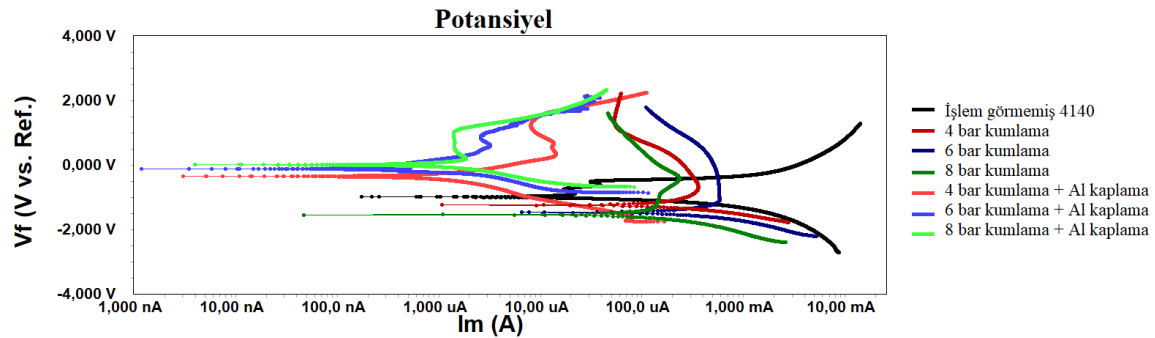
## 4.2. Elektrokimyasal Analiz Sonuçları

Açık devre potansiyelleri (OCP), tüm örnekler için 7200 saniyede Şekil 4.7'de verilmiştir. OCP eğrileri incelendiğinde, 8 bar + Al örneğinden ortalama en yüksek değer elde edildiği görülmüştür. En düşük ortalama değerler ise 8 bar'da kumlanmış örnekten elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Açık devre potansiyeli (Acar ve Gelengeç 2025)

Tüm örnekler için Tafel yöntemiyle elde edilen eğriler Şekil 4.8'de verilmiştir.  $\beta_a$ ,  $\beta_c$  ve korozyon hızı Tablo 3.1.'de verilmiştir.



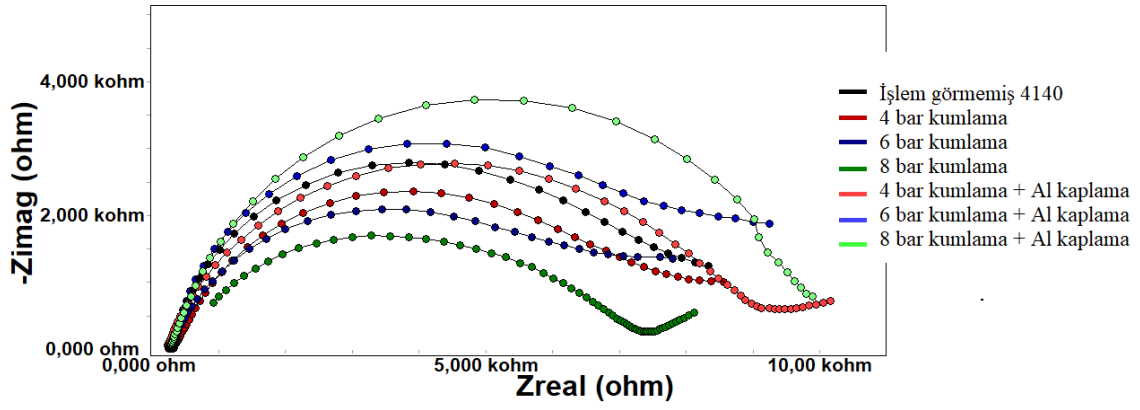
Şekil 4.8. Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri (Acar ve Gelengeç 2025)

Tablo 3.1. Korozyon testlerinin sonuçları (Acar ve Gelengeç 2025)

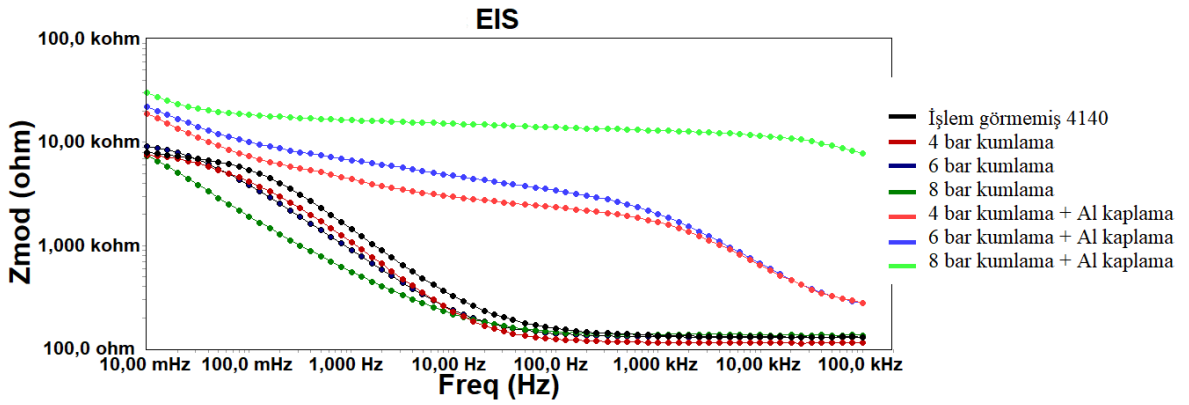
Numuneler	$E_{corr}$ (mV)	$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$\beta_c$ (mV/decade)	$\beta_a$ (mV/decade)	Korozyon oranı
İşlem görmemiş 4140	-735	499.6	167.8	138.6	229.7
4 bar	-808	548.9	184.5	152.6	252.6
6 bar	-815	553.8	186.2	153.8	254.9
8 bar	-823	558	187.9	155.2	257.2
4 bar +Al	-518	124.7	117.4	97.6	91.88
6 bar +Al	-516	121.7	115.7	95.5	89.5
8 bar +Al	-510	118.8	114.1	94.2	87.3

$E_{corr}$  değerleri sırasıyla, işlenmemiş, 4 bar, 6 bar, 8 bar, 4 bar + Al, 6 bar + Al ve 8 bar + Al için -735, -808, -815, -518, -516 ve -510 mV olarak elde edilmiştir. Korozyon direnci ile  $E_{corr}$  değerileri arasında doğru orantılı bir ilişki vardır (Morris vd. 2002). AISI 4140 çeliğinin, 4 bar, 6 bar ve 8 bar basınçlarda kumlanmasından sonra korozyon direncindeki azalma, yüzey pürüzlülüğü ve aşındırıcı işlemler nedeniyle oluşan yüzey hatalarına bağlanabilir (Wang vd. 2022). Yüzeyde oluşan mikro çatlak gibi yüzey hataları, korozyonun başlangıç noktası olarak işlev görür ve malzemenin korozyon direncini zayıflatır. Ancak, sonrasında  $Al_2O_3$  kaplama PVD yöntemiyle 4140 örnekleri üzerinde elde edildiğinde korozyon direnci önemli ölçüde artmaktadır.  $Al_2O_3$  kaplama, yüzey hatalarını etkili bir şekilde kapatan ve çelik alt tabakayı korozif ortamdan izole eden bir koruyucu bariyer olarak işlev görür (Muresan 2023).  $Al_2O_3$ , atmosferle temas ettiğinde yüzeyinde sağlam bir koruyucu oksit katmanı oluşturma özelliği sayesinde korozyona karşı yüksek direnç sağlar. Bu alüminyum oksit tabakası oldukça yapışkan ve geçirimsizdir; ayrıca hasar gördüğünde kendini onarma kapasitesine sahiptir, böylece alttaki malzemenin oksitlenmesini önler. Ayrıca,  $Al_2O_3$  birçok korozif ortamda diğer metallere kıyasla daha az reaktiftir, bu da onu korozyona karşı daha dirençli kılar (Zheng vd. 2016).  $Al_2O_3$  tabakasının kimyasal stabilitesi ve pasivasyon özelliği, kaplanmış alt tabakaların korozyon direncini önemli ölçüde artırmasındaki temel faktörlerdir.

Korozyon direnci ile ilgili elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) de incelenmiştir. Nyquist ve Bode grafikleri sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Nyquist diyagramları, kapasitif döngü genişledikçe korozyon direncinin arttığına işaret etmektedir. Kapasitif döngü alanları incelendiğinde,  $Al_2O_3$  kaplanmış örnekler, kumlanmış ve işlenmemiş örneklere göre daha yüksek korozyon direnci sergilemişlerdir. Nyquist grafiği sonuçları,  $Al_2O_3$  kaplanmış örneklerin korozyon direncinin daha yüksek olduğunu, kumlanmış örneklerin ise daha düşük korozyon direnci sergilediğini göstermiştir. Bode grafikleri incelendiğinde, en düşük faz açıları kumlanmış örneklerden ve en yüksek faz açıları ise  $Al_2O_3$  kaplanmış örneklerden elde edilmiştir. Faz açısındaki artış, korozyon direncinin de yükseldiğini göstermektedir.



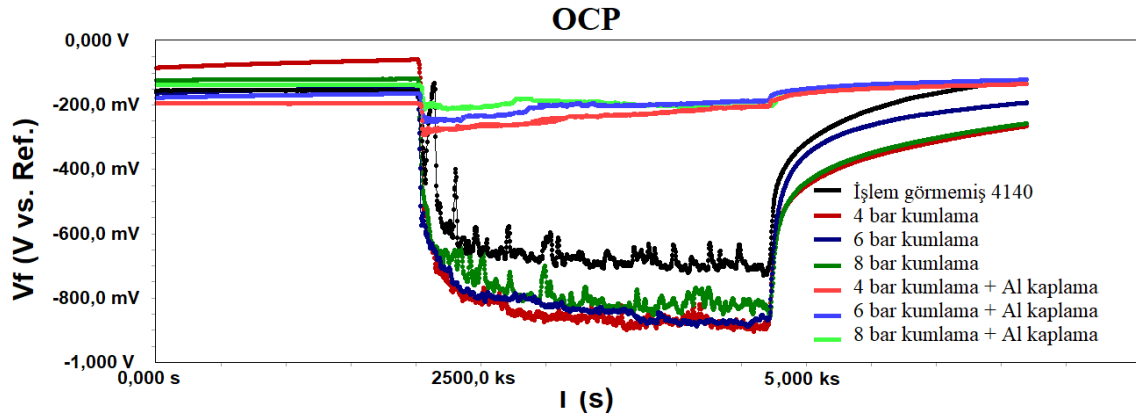
Şekil 4.9. Nyquist grafikleri (Acar ve Gelengeç 2025)



Şekil 4.10. Bode grafikleri (Acar ve Gelengeç 2025)

### 4.3. Tribokorozyon Analiz Sonuçları

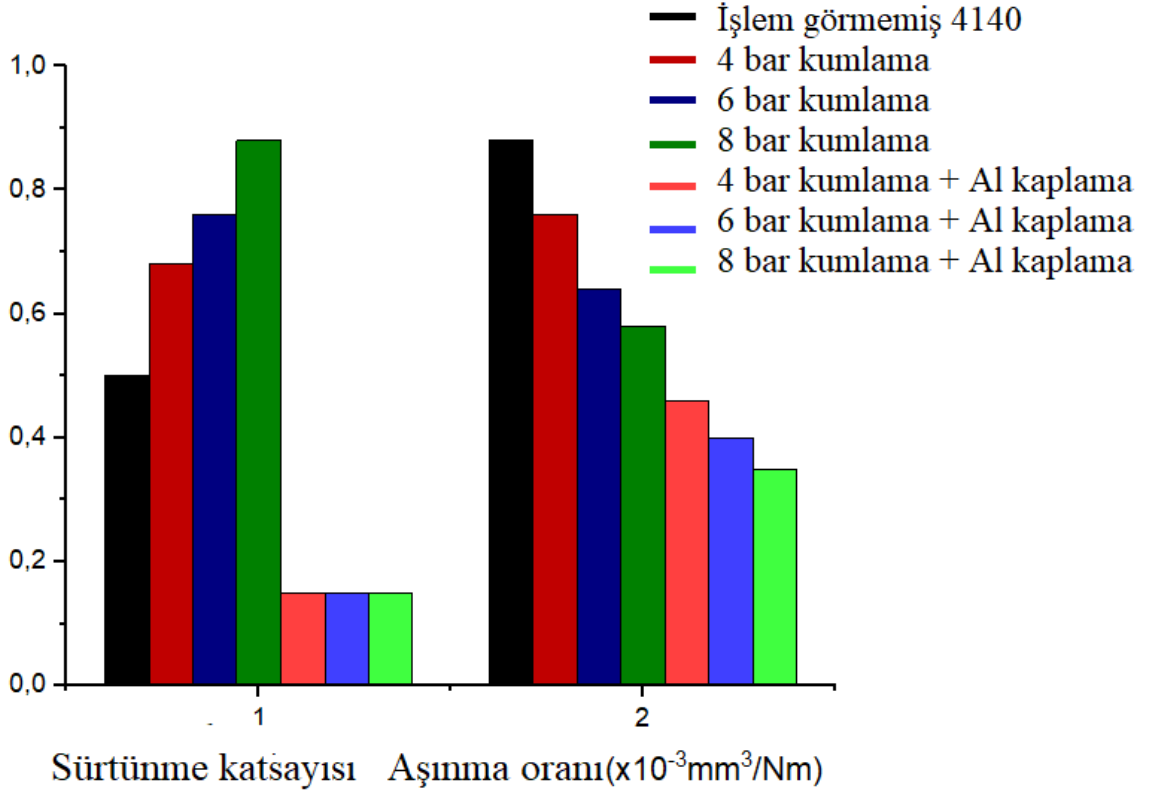
AISI 4140 çeliği örneklerinin kumlama işlemi uygulanmadan önceki hallerinin, 4, 6 ve 8 bar basınçlarla kumlanmış ve  $Al_2O_3$  kaplama uygulanmış hallerinin Açık Devre Potansiyeli (OCP) grafiklerine Şekil 4.11’de yer verilmiştir.



Şekil 4.11. Tribokorozyon açık devre potansiyeli (Acar ve Gelengeç 2025)

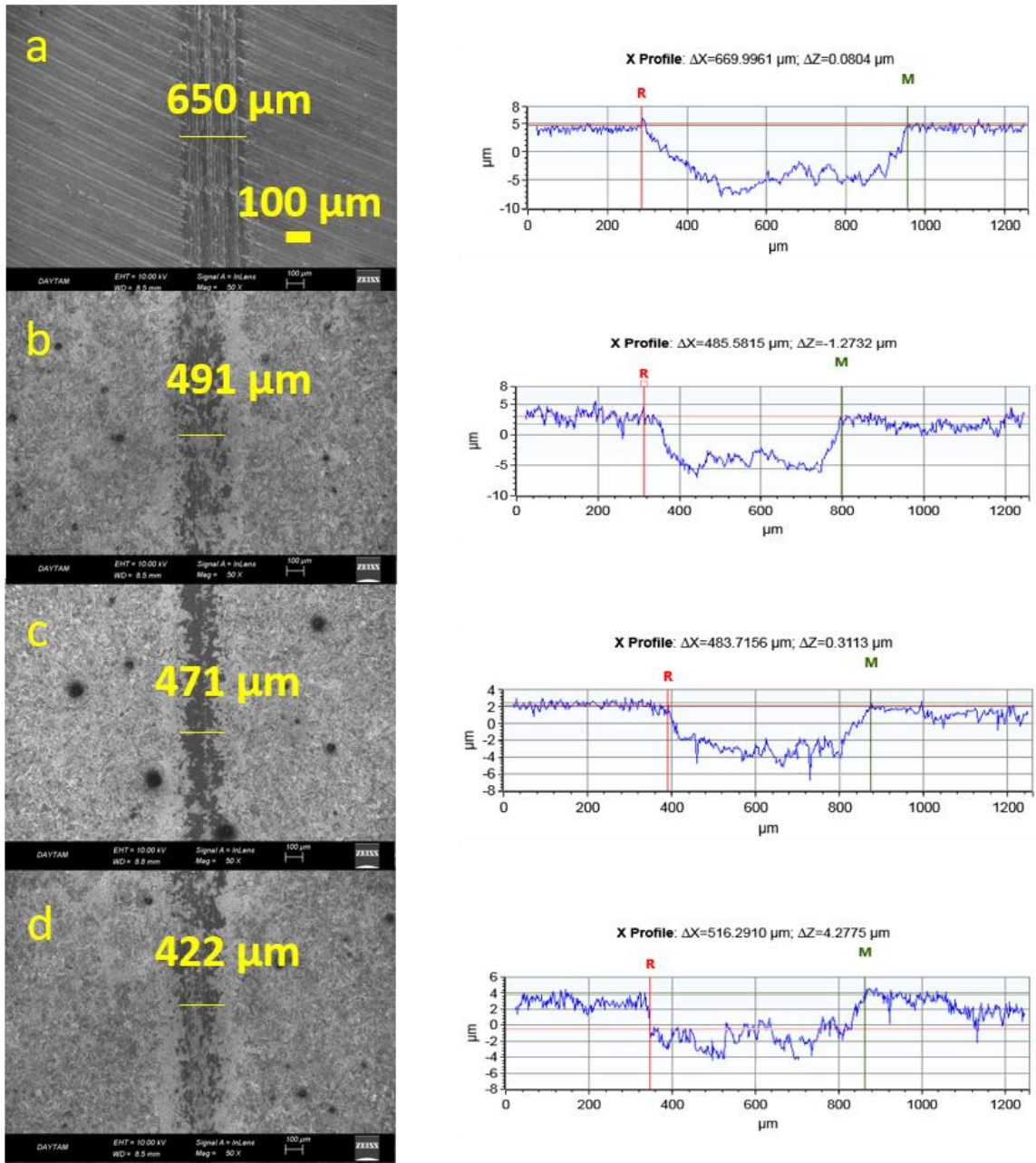
Sistem dengeye ulaştıktan sonra, sürtünme işlemi başlatılmıştır. Sürtünme işlemine başlandığında, 4, 6 ve 8 bar basınçla işlenen örneklerin OCP değerleri, işlenmemiş örneğe göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalı örneklerde 4, 6 ve 8 bar basınçla yapılan işleme sonrası OCP değerlerinde belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir. OCP grafiklerinden, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplanmış örneklerin tribokorozyona karşı en yüksek direnci gösterdiği anlaşılmaktadır. Tribokorozyon ortamlarında, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaları genellikle yüzeyde bir oksit katmanı oluşturarak, çevresel etkilere karşı koruma sağlar ve korozyon direncini artırır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalar, sürtünme sırasında yüzeyin yeniden oksitlenmesini sağlayarak koruyucu bir tabaka oluşumuna yol açar ve böylece tribokorozyon direncini artırır. Ayrıca, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaları daha stabil bir elektrokimyasal yüzey sağlar ve tribokorozyon koşullarında elektro-kimyasal korozyona karşı direnci artırır (Wang vd. 2021). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplanmış örneklerde gözlemlenen anodik kayma, yüzeyin korozyondan koruyucu özelliklerinin iyileştigiğine işaret etmektedir.

Şekil 4.12'de görüldüğü gibi, işlenmemiş örnek için ortalama sürtünme katsayısı (COF) 0.44 ile 0.54 arasında değişmektedir. 4 bar basınçla işlenen örneklerin COF değerleri 0.62 ile 0.72 arasında ölçülmüştür. 6 ve 8 bar basınçla işlenen örneklerde ise COF değerlerinde kademeli artışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca, en düşük ortalama COF değerleri Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalı örneklerde elde edilmiştir ve bu değerler 0.13 ile 0.19 arasında değişmektedir. PVD yöntemi ile elde edilmiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalar genellikle daha pürüzsüz ve homojen bir yüzey sağlar, bu da sürtünmenin azalmasına sebep olarak COF değerlerinin düşmesini sağlar. Bazı durumlarda, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalar, sürtünme katsayısını daha da düşüren yağlama özellikleri sunabilir. Kumlanmış örneklerden elde edilen en yüksek COF değerleri, kumlama sonucu malzeme kaldırma ve yüzey pürüzlülüğünün artması ile ilişkilidir.

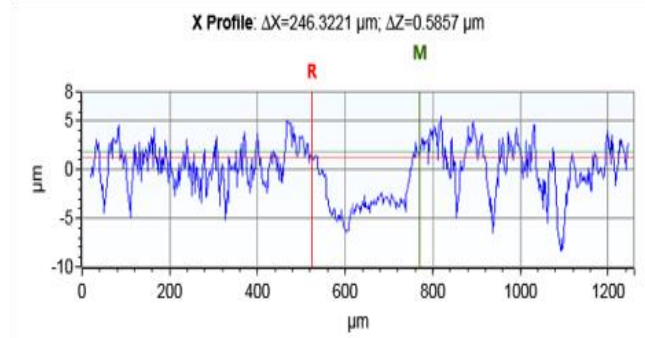
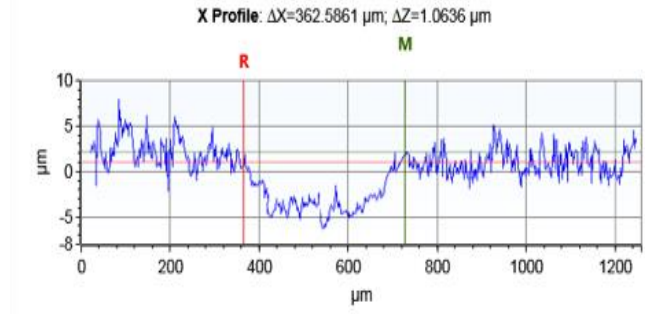
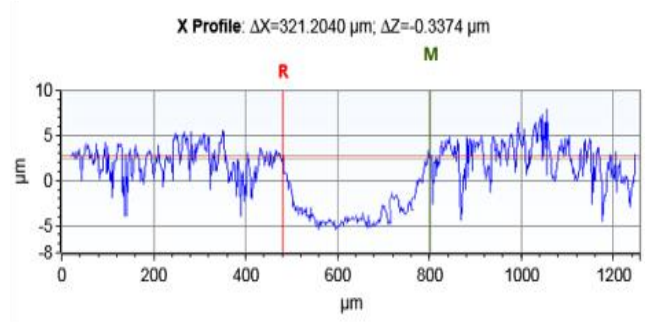
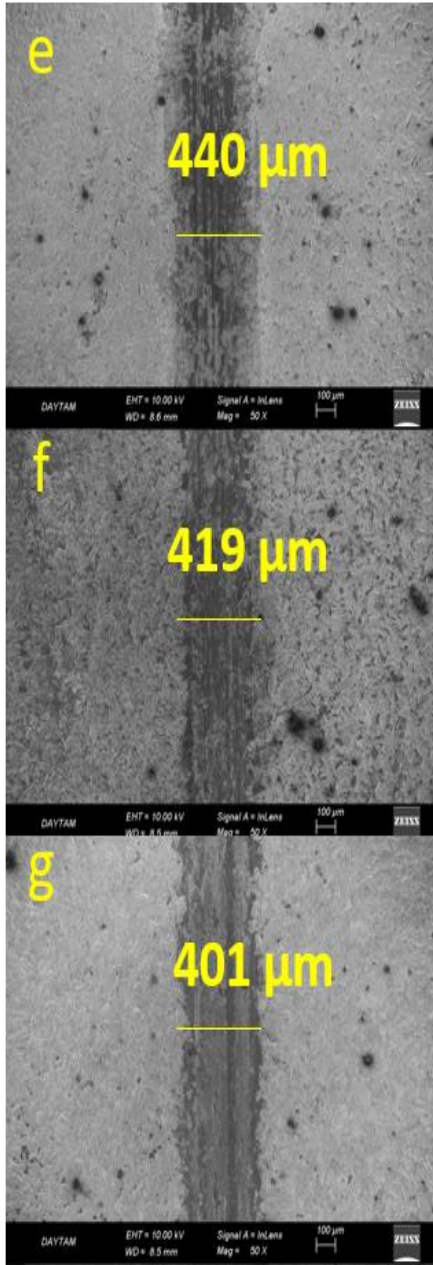


Şekil 4.12. Sürtünme katsayısı ve aşınma oranı (Acar ve Gelengeç 2025)

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'ten de görülebileceği gibi, en yüksek aşınma oranı işlenmemiş örnekte gözlemlenirken, en düşük aşınma oranı  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplamalı örneklerde görülmüştür. Kuşlama yüzey işleminin ardından, yüzeyde plastik deformasyonun arttığı ve dolayısı ile yüzey sertliğinin de artırdığı bilinen bir olgudur (Multigner vd. 2010). Kuşlanmış örneklerdeki aşınma oranındaki azalması, artan yüzey sertliği ile ilişkilendirilmiştir. 8 bar Al kaplamalı örnekte en düşük aşınma ( $0,34\text{-}0,36 \times 10^{-3} \text{mm}^3/\text{Nm}$ ) değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplamaların sağladığı daha sert yüzeyler ve yük taşıma kapasitesi, tribokorozyon direncinin artmasını sağlamıştır.



Şekil 4.13. Aşınma izinin SEM görüntüsü ve aşınma derinliği (a) İşlenmemiş AISI 4140, (b) 4 bar ile kumlanmış, (c) 6 bar ile kumlanmış, (d) 8 bar ile kumlanmış,



Şekil 4.14. (e) 4 bar ile kumlanmış + Al PVD, (f) 6 bar ile kumlanmış + Al PVD ve (g) 8 bar ile kumlanmış + Al PVD (Acar ve Gelengeç 2025)

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, AISI 4140 çeliği üzerine PVD yöntemiyle kaplanan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filmlerinin adezyon, korozyon ve tribokorozyon direnci üzerine kumlama basıncının etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, AISI 4140 çeliğinin zorlu ortam şartlarındaki korozyon ve tribokorozyon performansının iyileştirilmesine yönelik dikkate değer bilgiler sağlamaktadır.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PVD kaplamasının uygulanması, yüzey sertliğini daha da artırmış ve yüzey pürüzlülüğünü biraz düzleştirerek genel mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkıda bulunmuştur.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filmlerinin adezyon direnci, kumlama işlemi sonrasında dikkate değer şekilde artmıştır. Adezyon direncindeki bu artış, alt malzeme ile kaplama arasındaki mekanik kilitlenmeyle ilişkilendirilmiştir.

Kumlama işlemi, yüzey pürüzlülüğünü artırarak ve mikroçatlaklar oluşturarak korozyon direncinin azalmasına neden olmuştur. Ancak, sonrasında yapılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama, korozyon direncini önemli ölçüde iyileştirerek, 4 bar, 6 bar ve 8 bar ile kumlanmış örnekler için E<sub>corr</sub> değerlerini sırasıyla -516 mV, -510 mV ve -508 mV'ye getirmiştir.

Tribokorozyon testlerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplanmış örnekler, özellikle 8 bar ile kumlanmış ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplanmış örnek (0,34-0,36 x10<sup>-3</sup> mm<sup>3</sup>/Nm) için, sürtünme katsayısında (0,13 ila 0,19) belirgin bir azalma ve en düşük aşınma oranını göstermiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama, sürtünmeyi azaltmakla kalmamış, aynı zamanda koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak tribokorozyon direncini artırmıştır.

Sonuç olarak, kumlama işlemi ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PVD kaplamasının AISI 4140 çeliği üzerindeki birleşimi, adezyon, korozyon direnci ve tribokorozyon performansında belirgin bir iyileşme sağlamaktadır. 8 bar kumlama basıncı, yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve kaplama bağlanabilirliği arasında en iyi dengeyi kurarak optimal değer olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, yüksek stres ve korozyon riskine sahip ortamlarda kullanılan bileşenlerin ömrünü ve güvenilirliğini artırmada bu yüzey işleme yönteminin potansiyelini ortaya koymaktadır. Gelecek araştırmalar, bu kaplamaların farklı çalışma koşullarında uzun süreli dayanıklılık ve performanslarını değerlendirerek bu iyileştirmeleri daha da destekleyebilir.

## KAYNAKÇA

- Acar, M. T., & Geleñeç, Z. (2025). Tribocorrosion and corrosion behavior of AISI 4140 steel with ceramic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating developed by sandblasting. *Ceramics International*.
- Akhtar, M. N., Lohchab, A., Singh, D., Kumar, R. R., Gaur, P., & Yadav, B. K. (2023). Experimental studies on the effect of chromium plating on the mechanical properties of SAE 4140 steel. *Materials Today: Proceedings*, 72, 2488–2496.
- Alique, D. (2018). Processing and characterization of coating and thin film materials. In J. Zhang & Y.-G. Jung (Eds.), *Advanced ceramic and metallic coating and thin film materials for energy and environmental applications* (pp. 27–72). Springer International Publishing.
- Al-Mushaki, M. A. A., Al-Ariki, S. A., & Alnehia, A. (2023). Effect of copper oxide (CuO) and vanadium oxide (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) addition on the structural, optical and electrical properties of corundum ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). *Scientific Reports*, 13(1), 16100.
- Al-Samarai, Riyadh A., ve Yarub Al-Douri. 2024. “The Wear”. Ss. 1-31 içinde *Friction and Wear in Metals, Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials*. Singapore: Springer Nature Singapore.
- Antonov, M., Afshari, H., Baronins, J., Adoberg, E., Raadik, T., & Hussainova, I. (2018). The effect of temperature and sliding speed on friction and wear of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and ZrO<sub>2</sub> balls tested against AlCrN PVD coating. *Tribology International*, 118, 500–514.
- Awang, M., Khalili, A. A., & Pedapati, S. R. (2019). A review: Thin protective coating for wear protection in high-temperature application. *Metals*, 10(1), 42.
- Aytaç, A., & Malayoğlu, U. (2018). Fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinden PVD ve JVD/DVD ince film kaplamaların karşılaştırılması ve DVD kaplama teknolojisinin endüstriyel uygulamaları üzerine kavramsal, akademik ve teorik bir analiz. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 17(1), 131–164. <https://doi.org/10.17134/khosbd.427054>
- Baker, T. N. (2016). Microalloyed steels. *Ironmaking & Steelmaking*, 43(4), 264–307. <https://doi.org/10.1179/1743281215Y.0000000063>
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018). Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. *Coatings*, 8(11), 402.

- Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, R. W. K. (2017). *Steels: Microstructure and properties*. Butterworth-Heinemann.
- Bhalerao, V. Y., & Lakade, S. S. (2022). Comprehensive review on improvement in surface properties of bearing steel. *Materials Today: Proceedings*, 55, 441–446.
- Carlsson, J.-O., & Martin, P. M. (2010). Chemical vapor deposition. In *Handbook of deposition technologies for films and coatings* (pp. 314–363). Elsevier.
- Casteletti, L. C., Lombardi Neto, A., & Totten, G. E. (2014). *Nitriding of stainless steels*.
- Chaus, A. S., Chovanec, J., & Legerská, M. (2006). Development of high-speed steels for cast metal-cutting tools. *Solid State Phenomena*, 113, 559–564.
- Csernak, S. F., & McCormac, J. C. (2012). *Structural steel design*. Pearson.
- Cunat, P.-J. (2004). Alloying elements in stainless steel and other chromium-containing alloys. *Euro Inox*, 2004, 1–24.
- Çoşğun, A., Taşcıoğlu, A., & Yılmaz, G. (2021). İnce film üretiminde kimyasal buhar biriktirme yöntemi ve çeşitleri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), 351–363.
- Das, S. R., Dhupal, D., & Kumar, A. (2015). Study of surface roughness and flank wear in hard turning of AISI 4140 steel with coated ceramic inserts. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(10), 4329–4340. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0931-2>
- Diab, M. R., Murasawa, K., Ibrahim, A. M. M., Naragino, H., Yoshitake, T., & Egiza, M. (2025). Wear-resistant and stable low-friction nanodiamond composite superhard coatings against Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> counter-body in dry condition. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 126, 106955.
- Essam, M. A., Shash, A. Y., El-Fawakhry, M. K., El-Kashif, E., & Megahed, H. (2023). Effect of deep cryogenic treatment on wear behavior of cold work tool steel. *Metals*, 13(2), 382.
- Fahim, A., Dean, A. E., Thomas, M. D. A., & Moffatt, E. G. (2019). Corrosion resistance of chromium-steel and stainless steel reinforcement in concrete. *Materials and Corrosion*, 70(2), 328–344. <https://doi.org/10.1002/maco.201709942>
- Francis, R., & Byrne, G. (2021). Duplex stainless steels—alloys for the 21st century. *Metals*, 11(5), 836.
- Gerth, J., & Wiklund, U. (2008). The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. *Wear*, 264(9–10), 885–892.

- Ghara, T., Paul, S., & Bandyopadhyay, P. P. (2021). Effect of grit blasting parameters on surface and near-surface properties of different metal alloys. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30, 251–269.
- Gowthaman, P. S., Jeyakumar, S., & Saravanan, B. A. (2020). Machinability and tool wear mechanism of duplex stainless steel—A review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1423–1429.
- Güven, Ş., Delikanlı, K., & Öncel, E. (2014). AISI 4140 çeliğine uygulanan iyon nitrasyon yüzey sertleştirme işleminin yorulma dayanımına etkisi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 4(2), 29–39.
- Heale, F. L. (2020). *Special wettability coatings, films and slippery liquid infused porous surfaces with self-cleaning, anti-icing and anti-fogging applications* (Doctoral dissertation, University College London).
- Heidarinejad, A., & Ashrafizadeh, F. (2024). Influence of surface texture and coating thickness on adhesion of nickel plated coatings to aluminium substrate. *Journal of Manufacturing Processes*, 120, 435–448.
- Jacob, A., Gangopadhyay, S., Satapathy, A., Mantry, S., & Jha, B. B. (2017). Influences of micro-blasting as surface treatment technique on properties and performance of AlTiN coated tools. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 407–418.
- Jarrett, W., Jeffs, S. P., Korkees, F., & Rawson, M. (2023). The opportunities and challenges of hybrid composite driveshafts and their couplings in the aerospace industry: A review. *Composite Structures*, 320, 117203.
- Klenam, D. E. P. (2019). *Composition refinement of medium carbon-low alloy steels to improve wear and corrosion resistance for rail axle applications* (Yayınlanmamış doktora tezi). University of the Witwatersrand.
- Kovacı, H., Bozkurt, Y. B., Yetim, A. F., Aslan, M., & Çelik, A. (2019). The effect of surface plastic deformation produced by shot peening on corrosion behavior of a low-alloy steel. *Surface and Coatings Technology*, 360, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.003>
- Krella, A. (2020). Resistance of PVD coatings to erosive and wear processes: A review. *Coatings*, 10(10), 921. <https://doi.org/10.3390/coatings10100921>
- Kumar, N., & Choubey, V. K. (2024). Recent trends in coating processes on various AISI steel substrates: A review. *Journal of Materials Science*, 59(2), 395–422. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-XXXXX> (eğer DOI yoksa kaldırılabilir)

- Kwak, K., Mine, Y., Morito, S., Ohmura, T., & Takashima, K. (2022). Correlation between strength and hardness for substructures of lath martensite in low- and medium-carbon steels. *Materials Science and Engineering: A*, 856, 144007. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144007>
- Leslie, J. C. (2007). The use of composite materials increase the availability of oil and gas and reduce the cost of drilling and production operations. In *Nondestructive characterization for composite materials, aerospace engineering, civil infrastructure, and homeland security 2007* (Vol. 6531, pp. 94–107). SPIE.
- Mirhashemihaghighi, S., Światowska, J., Maurice, V., Seyeux, A., Zanna, S., Salmi, E., Ritala, M., & Marcus, P. (2016). Corrosion protection of aluminium by ultra-thin atomic layer deposited alumina coatings. *Corrosion Science*, 106, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.10.002>
- Momber, A. (2007). *Blast cleaning technology*. Springer Science & Business Media.
- Mondal, K., Nuñez, L., Downey, C. M., & Van Rooyen, I. J. (2021). Thermal barrier coatings overview: Design, manufacturing, and applications in high-temperature industries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(17), 6061–6077. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00788>
- Morris, W., Vico, A., Vazquez, M., & De Sanchez, S. R. (2002). Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements. *Corrosion Science*, 44(1), 81–99. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00033-6)
- Multigner, M., Ferreira-Barragáns, S., Frutos, E., Jaafar, M., Ibáñez, J., Marín, P., Pérez-Prado, M. T., González-Doncel, G., Asenjo, A., & González-Carrasco, J. L. (2010). Superficial severe plastic deformation of 316 LVM stainless steel through grit blasting: Effects on its microstructure and subsurface mechanical properties. *Surface and Coatings Technology*, 205(7), 1830–1837. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.07.126>
- Muresan, L. M. (2023). Nanocomposite coatings for anti-corrosion properties of metallic substrates. *Materials*, 16(14), 5092. <https://doi.org/10.3390/ma16145092>
- Ng, C.-H., Rao, J., & Nicholls, J. (2020). The role of PVD sputtered PTFE and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films in the development of damage tolerant coating systems. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 675–686. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.008>
- Okokpujie, I. P., Tartibu, L. K., Musa-Basheer, H. O., & Adeoye, A. O. M. (2024). Effect of coatings on mechanical, corrosion and tribological properties of industrial materials: A comprehensive review. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 10(1), 2.

- Panjan, P., Drnovšek, A., Gselman, P., Čekada, M., & Panjan, M. (2020). Review of growth defects in thin films prepared by PVD techniques. *Coatings*, 10(5), 447. <https://doi.org/10.3390/coatings10050447>
- Parrish, G. (1999). *Carburizing: Microstructures and properties*. ASM International.
- Podgornik, B., Vizintin, J., Wänstrand, O., Larsson, M., Hogmark, S., Ronkainen, H., & Holmberg, K. (2001). Tribological properties of plasma nitrided and hard coated AISI 4140 steel. *Wear*, 249(3-4), 254–259. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00633-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00633-4)
- Prabhu, P. R., Prabhu, D., Sharma, S., & Kulkarni, S. M. (2020). Surface properties and corrosion behavior of turn-assisted deep-cold-rolled AISI 4140 steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(9), 5871–5885. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05051-x>
- Raabe, D. (2023). The materials science behind sustainable metals and alloys. *Chemical Reviews*, 123(5), 2436–2608. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00799>
- Rakngarm, A., & Mutoh, Y. (2009). Characterization and fatigue damage of plasma sprayed HAp top coat with Ti and HAp/Ti bond coat layers on commercially pure titanium substrate. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2(5), 444–453.
- Schulz, H., & Quinto, D. T. (1999). Technological development of PVD hard coatings for industry. *International Journal of Materials Research*, 90(10), 831–836. <https://doi.org/10.1515/ijmr-1999-901011>
- Senocak, T. C., Ezirmik, K. V., Aysin, F., Ozek, N. S., & Cengiz, S. (2021). Niobium-oxynitride coatings for biomedical applications: Its antibacterial effects and in-vitro cytotoxicity. *Materials Science and Engineering: C*, 120, 111662.
- Sidky, P. S., & Hocking, M. G. (1999). Review of inorganic coatings and coating processes for reducing wear and corrosion. *British Corrosion Journal*, 34(3), 171–183. <https://doi.org/10.1179/000705999101500815>
- Singh, A., Ghosh, S., & Aravindan, S. (2019). Influence of dry micro abrasive blasting on the physical and mechanical characteristics of hybrid PVD-AlTiN coated tools. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 446–456.
- Skubisz, P., & Lisiecki, Ł. (2023). Effect of forging sequence and heat treatment on microstructure of high-duty power-plant shaft made of Cr-Mo ultra-high strength steel. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 59(2), 299–314.
- Carbon and alloy steels*. (1998).

- Talha, M., Behera, C. K., & Sinha, O. P. (2013). A review on nickel-free nitrogen containing austenitic stainless steels for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 33(7), 3563–3575.
- Tewari, K., Thapliyal, D., Bhargava, C. K., Verma, S., Mehra, A., Rana, S., Gautam, A. K., Verros, G. D., & Arya, R. K. (2024). Innovative coating methods for the industrial applications. In R. K. Arya, G. D. Verros, & J. P. Davim (Eds.), *Functional coatings* (pp. 23–50). Wiley.
- Thakur, A., Kumar, A., Kaya, S., Marzouki, R., Zhang, F., & Guo, L. (2022). Recent advancements in surface modification, characterization and functionalization for enhancing the biocompatibility and corrosion resistance of biomedical implants. *Coatings*, 12(10), 1459.
- Tkalcec, I. (2004). *Mechanical properties and microstructure of a high carbon steel* (Unpublished doctoral dissertation). École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- Ulutan, M., Celik, O. N., Gasan, H., & Er, U. (2010). Effect of different surface treatment methods on the friction and wear behavior of AISI 4140 steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 26(3), 251–257.
- Valli, J. (1986). A review of adhesion test methods for thin hard coatings. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 4(6), 3007–3014.
- Vazirinasab, E., Jafari, R., & Momen, G. (2018). Application of superhydrophobic coatings as a corrosion barrier: A review. *Surface and Coatings Technology*, 341, 40–56.
- Wadhwa, A. S., & Akhai, S. (2014). Comparison of surface hardening techniques for En 353 steel grade. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(10), 194–203.
- Wang, J., Ai, C., Yun, X., Chen, Z., & He, B. (2022). Effects of 3D roughness parameters of sandblasted surface on bond strength of HVOF sprayed WC-12Co coatings. *Coatings*, 12(10), 1451.
- Wang, W., Wang, K., Zhang, Z., Chen, J., Mou, T., Michel, F. M., Xin, H., & Cai, W. (2021). Ultrahigh tribocorrosion resistance of metals enabled by nano-layering. *Acta Materialia*, 206, 116609.
- Wu, X., Han, H., Jiang, Y., Zhu, D., Zuo, B., Bian, S., Chen, C., Zhao, L., Xu, J., & Yu, L. (2024). Opportunities and challenges of the nitride coatings for artificial implants: A review. *Surface and Coatings Technology*, 130587.
- Xiao, H., Zheng, S., Xin, Y., Xu, J., Han, K., Li, H., & Zhai, Q. (2020). Characterization of microstructure in high-hardness surface layer of low-carbon steel. *Metals*, 10(8), 995.

- Yao, D., Shi, G., Zhang, J., & Meng, S. (2023). An investigation on the adhesion of dual-scale micro-nano composite structure on the surface of aluminum. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 11(2), 025026.
- Yu, Y., Zuo, Y., Zhang, Z., Wu, L., Ning, C., & Zuo, C. (2019). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings on zinc for anti-corrosion in alkaline solution by electrospinning. *Coatings*, 9(11), 692.
- Zhang, K., Deng, J., Guo, X., Sun, L., & Lei, S. (2018). Study on the adhesion and tribological behavior of PVD TiAlN coatings with a multi-scale textured substrate surface. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 72, 292–305.
- Zheng, S., Li, C., Fu, Q., Hu, W., Xiang, T., Wang, Q., Du, M., Liu, X., & Chen, Z. (2016). Development of stable superhydrophobic coatings on aluminum surface for corrosion-resistant, self-cleaning, and anti-icing applications. *Materials & Design*, 93, 261–270.
- Zhi, J.-H., Zhang, L.-Z., Yan, Y., & Zhu, J. (2017). Mechanical durability of superhydrophobic surfaces: The role of surface modification technologies. *Applied Surface Science*, 392, 286–296.
- Zohuri, B. (2019). Cryogenics and liquid hydrogen storage. In *Hydrogen energy* (pp. 121–139). Cham: Springer International Publishing.

## EKLER

### Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Acar, M. T., ve Z. Gelengeç. 2025. "Tribocorrosion and Corrosion Behavior of AISI 4140 Steel with Ceramic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating Developed by Sandblasting". *Ceramics International*.