



**PEO VE PVD YÖNTEMİ İLE BÜYÜTÜLEN
KATI YAĞLAYICI KAPLAMALARIN
TRİBOLOJİK VE TRİBOKOROZYON
DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

Reza MATİN

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Prof. Dr. Yaşar TOTİK

Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU

2021

Her hakkı saklıdır

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**PEO VE PVD YÖNTEMİ İLE BÜYÜTÜLEN KATI YAĞLAYICI KAPLAMALARIN
TRİBOLOJİK VE TRİBOKOROZYON DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of Tribological and Tribokorrosion Behavior of Solid Lubricant Coatings
Grown with PEO and PVD Methods)

DOKTORA TEZİ

Reza MATİN

Danışman: Prof. Dr. Yaşar TOTİK
Ortak danışman: Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU

Erzurum
Eylül, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Reza MATIN tarafından hazırlanan “ PEO ve PVD Yöntemi ile Büyütülen Katı Yağlayıcı Kaplamaların Tribolojik ve Tribokorozyon Davranışlarının Araştırılması ” başlıklı çalışması 26 /10 /2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. İhsan EFOĞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Yaşar TOTİK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Recep SADELER <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Fatih YILDIZ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Mehmet KARAKAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
İkinci Tez Danışmanı	Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU <i>Gümüşhane Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Hikmet ÇİÇEK <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 8471

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Yaşar TOTİK danışmanlığında sunulan “ PEO ve PVD Yöntemi ile Büyütülen Katı Yağlayıcı Kaplamaların Tribolojik ve Tribokorozyon Davranışlarının Araştırılması ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	22	30
Kuramsal Temeller	22	30
Materyal ve Yöntem	17	35
Bulgular	5	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	14	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Reza MATİN	Prof. Yaşar TOTİK
26.10.2021	26.10.2021
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren, tecrübesini, hoşgörüsü ve anlayışı ile hiçbir yardımı esirgemeyen, değerli tez yöneticisi Sayın Prof. Dr. Yaşar TOTİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın hazırlanmasında, yardımını, tecrübesini ve hoşgörüsünü esirgemeyen, değerli tez ortak danışmanım: Sayın Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince desteklerini esirgemeyen, deneysel, teorik çalışmalarımındaki desteklerinden ve yardımlarından dolayı Sayın Prof. Dr. İhsan EEFEÖGLÜ'e teşekkür ederim.

BAP-ID:8471nolu proje kapsamında yapmış olduğum tüm çalışmalarda finansal desteklerinden dolayı Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi (BAP)'ne teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu zamana kadar bana destek olan, hep güvenen aileme de sonsuz teşekkür ederim.

Reza MATIN

Ekim, 2021

ÖZET

DOKTORA TEZİ

PEO VE PVD YÖNTEMİ İLE BÜYÜTÜLEN KATI YAĞLAYICI KAPLAMALARIN TRİBOLOJİK VE TRİBOKOROZYON DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI

Reza MATIN

Danışman: Prof. Dr. Yaşar TOTİK

Ortak Danışman: Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU

Amaç: Enerji kaybını ve yüzey problemlerinin sebep olduğu hasarların etkisini azaltmak için son zamanlarda malzemelere yeni özellikler katma veya özellikleri geliştirmeye yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Hafif alaşımların özellikle aşırı yük ve agresif ortamlarda aşınma, korozyon ve tribokorozyon gibi davranışlarının yetersiz olması, bu alaşımların yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmamızda AA2014 ve Cp-Ti alaşımlarının mekanik, tribolojik ve tribokorozyon davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla, plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) ve Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemleri ile malzemeler kaplanmıştır.

Yöntem: PEO ve PVD yöntemleri kullanılarak AA2014 ve Cp-Ti üzerine Al_2O_3/MoS_2 ve TiO_2/MoS_2 ve MoS_2 -Ti kompozit kaplamalar büyütülmüştür. Farklı parametrelerde ve kaplama yöntemleri ile büyütülen nanokompozit kaplamaların, yapısal, mekanik, tribolojik, korozyon ve tribokorozyon davranışları XRD, SEM, çizik testi, pin-on-disk aşınma, elektrokimyasal korozyon ve tribokorozyon testleri kullanılarak analiz edilmiştir.

Bulgular: PEO ile büyütülen Al_2O_3/MoS_2 ve TiO_2/MoS_2 kaplamalarda en yüksek kritik yük (L_c) değerleri sırasıyla 14 N ve 32 N ve PVD ile büyütülen MoS_2 -Ti kaplamaların, 10N ve 27N olarak elde edilmiştir. PEO ile büyütülen kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri 0,117-0,453 arasında değişirken, PVD ile yapılan kaplamalarında sırasıyla 0,086-0,147 aralığında elde edilmiştir. En düşük korozyon akım yoğunlukları PEO kaplamalarda 25.10^{-9} A/cm², 55.10^{-9} A/cm² ve PVD kaplamalarda ise 119.10^{-5} A/cm², 102.10^{-8} A/cm² olarak elde edilmiştir. Büyütülen nanokompozit kaplamaların, açık devre potansiyel (OCP) değerleri yaklaşık olarak sırasıyla -0,29 V, -0,34 V, -0,43 V ve -0,22 V olarak belirlenmiştir.

Sonuç: PEO ve PVD yöntemleriyle büyütülen kaplamaların, yapısal, mekanik, korozyon, aşınma ve tribokorozyon davranışları üzerinde etkili olduğu ve bu davranışları önemli derecede iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: PEO, PVD, Katı yağlayıcı, Hafif Alaşımlar, Aşınma, Korozyon ve Tribokorozyon

Ekim 2021, 171 sayfa

ABSTRACT

PH.D. THESIS

INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL AND TRIBOKOROSION BEHAVIOR OF SOLID LUBRICANT COATINGS GROWN WITH PEO AND PVD METHODS

Reza MATIN

Supervisor: Prof. Dr. Yaşar TOTİK

Co- Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU

Purpose: As to reduce the energy loss or the effects of damages caused by surface problems, study for adding new properties to materials or improving properties has been recently significant. The insufficient manner of light alloys like abrasion, korosion and tribokorosion especially in high-load and aggressive environments, has revealed the need to improve the surface properties of these alloys. In this study, base materials were coated with plasma electrolytic oxidation (PEO) and Physical Vapor Deposition (PVD) methods in order to improve the mechanical, tribological and tribokorosion manner of AA2014 and Cp-Ti alloys.

Method: By using PEO and PVD methods, Al_2O_3/MoS_2 , TiO_2/MoS_2 and MoS_2-Ti composite coatings were coated on AA2014 and Cp-Ti. Structural, mechanical, tribological, korosion and tribokorosion manners of nano-composite coatings which were developed by different coating parameters and methods, were analysed by using XRD, SEM, scratch test, pin-on-disc wear test, electrochemical korosion and tribokorosion.

Method: The highest critical load (L_c) values of Al_2O_3/MoS_2 and TiO_2/MoS_2 coatings developed by PEO, were obtained as 14 N and 32 N, and 10 N and 27 N for MoS_2-Ti coatings developed by PVD, respectively. While the friction coefficient values of the coatings developed by PEO varied between 0.117 and 0.453, they were obtained in the range of 0.086-0.147, respectively, for the coatings made of PVD. Korosion current densities were obtained as $-25.10^{-9} A/cm^2$, $55.10^{-9} A/cm^2$ for PEO coatings and $-119.10^{-5} A/cm^2$, $102.10^{-8} A/cm^2$ for PVD coatings. The open circuit potential (OCP) values of the developed nano-composite coatings were determined as approximately -0.29 V, -0.34 V, -0.43 V and -0.22 V, respectively.

Findings: It was observed that coatings developed by PEO and PVD methods, were effective in structural, mechanical, korosion, abrasion and tribo-korosion manners as the coatings improved the manners significantly.

Results: PEO, PVD, Solid lubricant, MoS_2 , AA2014, Cp-Ti, Wear, Korosion, Tribological and Tribokorosion Properties.

October 2021, 171 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ	8
Alüminyum ve Alaşımları.....	8
Titanyum ve Alaşımları.....	14
Triboloji ve Tribokorozyon.....	17
Aşınma	18
Korozyon.....	20
Tribokorozyon.....	23
Katı Yağlayıcılar	26
Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) Yöntemi.....	32
Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi	36
MATERYAL ve YÖNTEM	40
Taban Malzemesi ve Kaplama Öncesi Yüzey Hazırlıkları	40
Kaplama Prosesi.....	41
PEO yöntemi ile Al ₂ O ₃ /MoS ₂ ve MoS ₂ -Ti kaplamaların Büyütülmesi.....	41
CFUBMS yöntemi ile MoS ₂ -Ti kaplamaların Büyütülmesi	43
XRD ve SEM Çalışmaları.....	45
Çizik (Scratch) Testi	46
Aşınma Deneyleri.....	47
Korozyon Deneyleri	48
Tribokorozyon Deneyleri	49
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	51
Kaplamaların Yapısal Karakterizasyonu ve Yüzey Morfolojileri	51
XRD Sonuçlar	61

Scratch (Çizik) Test Sonuçları	64
Korozyon Deney Sonuçları	84
Tribo-Test Bulguları ve Tartışma.....	100
Tribokorozyon Test Sonuçları	112
SONUÇ ve ÖNERİLER	139
Sonuç	139
Öneriler	141
KAYNAKLAR	142
ÖZGEÇMİŞ	150



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Saf Alüminyum Özellikleri (Vargel; 2004).....	9
Tablo 2. AA2014 Alaşımın Kimyasal Bileşimi (Smith 1993).....	9
Tablo 3. Mukavemet Artırma Mekanizmaları İle Dövme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması (<i>Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview</i> , 2001).....	11
Tablo 4. Çeşitli Dövme Alüminyum Alaşımlarının Mukavemet Aralıkları (<i>Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview</i> , 2001)	12
Tablo 5. Çeşitli Dökme Alüminyum Alaşımlarının Mukavemet Aralıkları (<i>Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview</i> , 2001)	12
Tablo 6. Tribolojik Uygulamalarda Katı ve Sıvı Yağlayıcıların Önemli Avantajları (Donnet ve Erdemir 2001)	28
Tablo 7. Katı Yağlayıcıların Sınıflandırılması ve Karakteristik Sürtünme Katsayıları (Erdemir 2001).....	31
Tablo 8. AA2014 Taban Malzemesinin Kimyasal Bileşimi	40
Tablo 9. Cp-Ti Taban Malzemesinin Kimyasal Bileşimi	40
Tablo 10. PEO Kaplama Prosesi İçin L ₄ Ortogonal Dizi Deney Planı	42
Tablo 11. PEO Kaplama Parametrelerine Ait Detaylı Bilgiler.....	42
Tablo 12. PVD Kaplama Prosesinde Kullanılan Deney Parametreleri.....	45
Tablo 13. PVD Kaplama Prosesinde Kullanılan Parametreler	45
Tablo 14. Aşınma Testi Deney Şartları.....	48
Tablo 15. Tribokorozyon Deneyleri İçin Belirlenen Deney Parametreleri ve Şartları	50
Tablo 16. PEO Kaplamaların Kalınlıkları	57
Tablo 17. PVD Kaplamaların Kalınlıkları	61
Tablo 18. PEO Yöntemi İle Oluşturulan Filmlerin Kritik Yük Değerleri	65
Tablo 19. PVD Yöntemleri İle Oluşturulan Filmlerin Kritik Yük Değerleri	75
Tablo 20. PEO ile Büyütülen Al ₂ O ₃ /MoS ₂ Kaplamaların Korozyon E _{kor} ve I _{kor}	87
Tablo 21. PEO ile Büyütülen TiO ₂ /MoS ₂ Kaplamaların E _{kor} ve I _{kor}	91
Tablo 22. PVD ile AA2014 Üzerine Büyütülen MoS ₂ -Ti Kaplamaların E _{kor} ve I _{kor} değerleri	95
Tablo 23. PVD İle Cp-Ti üzerine Büyütülen MoS ₂ -Ti Kaplamaların E _{kor} ve I _{kor} değerleri	98
Tablo 24. AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri	102

Tablo 25. PEO yöntemiyle büyütülen Al_2O_3/MoS_2 kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri	102
Tablo 26. PEO yöntemiyle büyütülen TiO_2/MoS_2 kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri.....	102
Tablo 27. PVD ile AA2014 üzerine büyütülen MoS_2-Ti kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri	108
Tablo 28. PVD ile Cp-Ti üzerine büyütülen MoS_2-Ti kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri	108
Tablo 29. AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerinin tribo-korozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri	114
Tablo 30. PEO ile büyütülen Al_2O_3/MoS_2 kaplamaların tribo-korozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri.....	117
Tablo 31. PEO ile büyütülen TiO_2/MoS_2 kaplamaların tribo-korozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri.....	121
Tablo 32. PVD ile AA2014 üzerine büyütülen MoS_2-Ti kaplamaların tribo-korozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri.....	126
Tablo 33. PVD ile Cp-Ti üzerine büyütülen MoS_2-Ti kaplamaların tribo-korozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri.....	133

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Yüzey modifikasyon işlemleri	4
Şekil 2. İnce film kaplama teknikleri (Panchal, 2014)	5
Şekil 3. Alüminyum alaşımlarının kullanım alanlarına ait bazı örnekler.....	9
Şekil 4. Titanyum ve alaşımlarının kullanım alanlarına ait bazı örnekler.....	15
Şekil 5. Anataz ve Rutil fazlarının kristal kafes yapıları (Diebold et al. 2003).	15
Şekil 6. a) α -HSP ve b) β -HMK'nın kristal yapıları (Leyens 2003).....	16
Şekil 7. Aşınmaya ait bazı örnekler.....	18
Şekil 8. Aşınma Türleri (Holmberg 1994).	20
Şekil 9. Korozyona ait bazı örnekler	21
Şekil 10. Tribokorozyon sisteminin şematik gösterimi (Priya <i>et al.</i> 2013).	24
Şekil 11. a) Korozyon potansiyeli ölçümü şematik gösterimi, b) Örnek bir OCP ölçümü (Mischler 2008).	25
Şekil 12. a) Potansiyostatik tribokorozyon ölçümü şematik gösterimi, b) Örnek bir Potansiyostatik test ölçümü (Landolt 2011)	25
Şekil 13. Tabakalı katı yağlayıcıların kristal yapılarının şematik gösterimi.....	29
Şekil 14. MoS ₂ 'nin kristal yapısı (Renevier et al. 2000).....	30
Şekil 15. Plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yönteminin şematik gösterimi	33
Şekil 16. PEO yöntemini etkileyen parametreler (Dehnavi 2014).....	34
Şekil 17. PEO işlemi sırasında deşarj olayı için Akım- voltaj diyagramı (Yerokhin <i>et al.</i> 1999).....	34
Şekil 18. PEO yöntemi sırasında geliştirilen kaplama mikroyapısı ile geçici gerilim şeması (Wang et al. 2010).	35
Şekil 19. Manyetik alanda sıçratma tekniği (Monaghan and Arnell, 1992)	37
Şekil 20. (a) Geleneksel Magnetron (b) Dengesiz Magnetron (c) Kapalı Alan Dengesiz Magnetron (Window and Savvides, 1986).....	37
Şekil 21. CFUBMS sistemini manyetik alan tasarımının şematik gösterimi (Teer, 1991).....	38
Şekil 22. AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeler	41
Şekil 23. PEO kaplama sistemi	42
Şekil 24. PEO işleminde kullanılan elektrolitlerin hazırlanması.	43
Şekil 25. Teer Coatings, PVD sistemi.....	44
Şekil 26. Teer CFUBMS sistemi (Teer, 1991).....	44
Şekil 27. X ışını kırınım ölçer	46
Şekil 28. Taramalı elektron mikroskop	46

Şekil 29. Çizik test cihazı	47
Şekil 30. Aşınma deneylerinde kullanılan pin-on-disk aşınma test cihazı.....	47
Şekil 31. Korozyon Deney Düzenekinin Şematik Gösterimi.....	49
Şekil 32. Tribokorozyon deney sistemi.....	50
Şekil 33. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen Al_2O_3/MoS_2 nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojileri.	53
Şekil 34. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen TiO_2/MoS_2 nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojileri.	55
Şekil 35. PEO yöntemi ile büyütülen Al_2O_3/MoS_2 filmlerin SEM kesit görüntüsü ve kalınlık değerleri	56
Şekil 36. PEO yöntemi ile büyütülen TiO_2/MoS_2 filmlerin SEM kesit görüntüsü ve kalınlık değerleri	57
Şekil 37. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde büyütülen MoS_2 - Ti nanokompozit kaplamaların yüzey SEM görüntüleri.	59
Şekil 38. PVD yöntemi ile Cp-Ti üzerine R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde büyütülen MoS_2 -Ti nanokompozit kaplamaların yüzey SEM görüntüleri.....	60
Şekil 39. PVD yöntemi ile büyütülen filmlerin SEM kesit görüntüsü ve kalınlık değerleri....	61
Şekil 40. PEO yöntemi ile büyütülen Al_2O_3/MoS_2 filmlerin XRD grafikleri	62
Şekil 41. PEO yöntemi ile büyütülen TiO_2/MoS_2 filmlerin XRD grafikleri.....	62
Şekil 42. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine büyütülen MoS_2 -Ti filmlerin XRD grafikleri....	63
Şekil 43. PVD yöntemi ile Cp-Ti üzerine büyütülen MoS_2 -Ti filmlerin XRD grafikleri	63
Şekil 44. PEO yöntemi ile P1 kaplama parametrelerinde büyütülen Al_2O_3/MoS_2 filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	66
Şekil 45. PEO yöntemi ile P2 kaplama parametrelerinde büyütülen Al_2O_3/MoS_2 filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	67
Şekil 46. PEO yöntemi ile P3 kaplama parametrelerinde büyütülen Al_2O_3/MoS_2 filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	68
Şekil 47. PEO yöntemi ile P4 kaplama parametrelerinde büyütülen Al_2O_3/MoS_2 filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	69

Şekil 48. PEO yöntemi ile P1 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	70
Şekil 49. PEO yöntemi ile P2 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	71
Şekil 50. PEO yöntemi ile P3 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	72
Şekil 51. PEO yöntemi ile P4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	73
Şekil 52. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine R1 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS_2 -Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	76
Şekil 53. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine R2 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS_2 -Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	77
Şekil 54. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine R3 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS_2 -Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	78
Şekil 55. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine R4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS_2 -Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	79
Şekil 56. PVD yöntemi ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine R1 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS_2 -Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	80
Şekil 57. PVD yöntemi ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine R2 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS_2 -Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	81
Şekil 58. PVD yöntemi ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine R3 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS_2 -Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.	82

Şekil 59. PVD yöntemi ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine R4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS ₂ -Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görün.....	83
Şekil 60. P1, P2, P3 ve P4 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	87
Şekil 61. AA2014 taban malzemesinin korozyon sonrası SEM görüntüsü.	87
Şekil 62. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen Al ₂ O ₃ /MoS ₂ nanokompozit kaplamaların korozyon sonrası SEM görüntüleri.	88
Şekil 63. P1, P2, P3 ve P4 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	90
Şekil 64. Cp-Ti taban malzemesinin korozyon sonrası SEM görüntüsü.....	91
Şekil 65. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen TiO ₂ /MoS ₂ nanokompozit kaplamaların korozyon sonrası SEM görüntüleri.....	92
Şekil 66. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	95
Şekil 67. AA2014 taban malzemesinin korozyon sonrası SEM görüntüsü.	95
Şekil 68. PVD yöntemi ile R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde AA2014 üzerine büyütülen MoS ₂ -Ti kaplamaların korozyon SEM görüntüleri.....	96
Şekil 69. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	98
Şekil 70. Cp-Ti taban malzemesinin korozyon sonrası SEM görüntüsü.....	98
Şekil 71. PVD yöntemi ile R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde Cp-Ti üzerine büyütülen MoS ₂ -Ti nanokompozit kaplamaların korozyon sonrası SEM görüntüleri.	99
Şekil 72. AA2014 taban malzeme aşınma grafikleri ve 3D profilometre görüntüsü.	103
Şekil 73. Cp-Ti taban malzeme aşınma grafikleri ve 3D profilometre görüntüsü	103
Şekil 74. PEO yöntemiyle P1 kaplama parametrelerinde büyütülmüş Al ₂ O ₃ /MoS ₂ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü.	104
Şekil 75. PEO yöntemiyle P2 kaplama parametrelerinde büyütülmüş Al ₂ O ₃ /MoS ₂ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü	104
Şekil 76. PEO yöntemiyle P3 kaplama parametrelerinde büyütülmüş Al ₂ O ₃ /MoS ₂ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü	104

Şekil 77. PEO yöntemiyle P4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü	105
Şekil 78. PEO yöntemiyle P1, P2, P3 ve P4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri görüntüsü	105
Şekil 79. PEO yöntemiyle P1 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü	105
Şekil 80. PEO yöntemiyle P2 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü	106
Şekil 81. PEO yöntemiyle P3 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü	106
Şekil 82. PEO yöntemiyle P4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü	106
Şekil 83. PEO yöntemiyle P1, P2, P3 ve P4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri görüntüsü	107
Şekil 84. PVD yöntemiyle AA2014 üzerine R1 şartlarında büyütülmüş $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü.....	109
Şekil 85. PVD yöntemiyle AA2014 üzerine R2 şartlarında büyütülmüş $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü.....	109
Şekil 86. PVD yöntemiyle AA2014 üzerine R3 şartlarında büyütülmüş $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü.....	110
Şekil 87. PVD yöntemiyle AA2014 üzerine R4 şartlarında büyütülmüş $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü.....	110
Şekil 88. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülmüş $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ kaplamaların aşınma grafikleri görüntüsü	110
Şekil 89. PVD yöntemiyle Cp-Ti üzerine R1 şartlarında büyütülmüş $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü.....	111
Şekil 90. PVD yöntemiyle Cp-Ti üzerine R2 şartlarında büyütülmüş $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü.....	111
Şekil 91. PVD yöntemiyle Cp-Ti üzerine R3 şartlarında büyütülmüş $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü.....	111

Şekil 92. PVD yöntemiyle Cp-Ti üzerine R4 şartlarında büyütülmüş MoS ₂ -Ti kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü.....	112
Şekil 93. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülmüş MoS ₂ -Ti kaplamaların aşınma grafikleri görüntüsü	112
Şekil 94. AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerinin tribokorozyon deneylerinin OCP potansiyeli-zaman ve sürtünme katsayısı eğrileri.....	114
Şekil 95. Tribokorozyon deneylerinden sonra AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerinin SEM görüntüleri.	115
Şekil 96. P1 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen Al ₂ O ₃ /MoS ₂ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	117
Şekil 97. P2 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen Al ₂ O ₃ /MoS ₂ kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	118
Şekil 98. P3 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen Al ₂ O ₃ /MoS ₂ kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	118
Şekil 99. P4 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen Al ₂ O ₃ /MoS ₂ kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	119
Şekil 100. P1, P2, P3 ve P4 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen Al ₂ O ₃ /MoS ₂ kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP -zaman eğrileri.	119
Şekil 101. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen Al ₂ O ₃ /MoS ₂ nanokompozit kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden sonra SEM görüntüleri.....	120
Şekil 102. P1 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen TiO ₂ /MoS ₂ kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	121
Şekil 103. P2 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen TiO ₂ /MoS ₂ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	122
Şekil 104. P3 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen TiO ₂ /MoS ₂ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	122

Şekil 105. P4 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen TiO ₂ /MoS ₂ kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	123
Şekil 106. P1, P2, P3 ve P4 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen TiO ₂ /MoS ₂ kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP -zaman eğrileri.	123
Şekil 107. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen TiO ₂ /MoS ₂ nanokompozit kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneyleri sonrası SEM görüntüleri.	124
Şekil 108. R1 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS ₂ -Ti kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	127
Şekil 109. R2 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS ₂ -Ti kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	127
Şekil 110. R3 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS ₂ -Ti kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	128
Şekil 111. R4 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS ₂ -Ti kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	128
Şekil 112. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS ₂ -Ti kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP -zaman eğrileri.	129
Şekil 113. PVD yöntemi ile R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS ₂ -Ti nanokompozit kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneyleri sonrası SEM görüntüleri.	130
Şekil 114. R1 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen MoS ₂ -Ti kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	133
Şekil 115. R2 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	134

Şekil 116. R3 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen MoS ₂ -Ti kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.....	134
Şekil 117. R4 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)- <i>zaman eğrileri</i>	135
Şekil 118. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine MoS ₂ -Ti büyütülen kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.	135
Şekil 119. PVD yöntemi ile R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde Cp-Ti üzerine büyütülen MoS ₂ -Ti nanokompozit kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneyleri sonrası SEM görüntüleri.	136

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

α	İyonizasyon ihtimali
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
$^{\circ}\text{K}$	Kelvin derece
μ	Mikron
$\text{\AA}$	Angstrom
A	Amper
<i>Ar</i>	<i>Argon</i>
<i>cm</i>	<i>Santimetre</i>
E _{cor}	Korozyon Potansiyeli
<i>eV</i>	<i>Elektro volt</i>
<i>f</i>	Frekans
<i>g</i>	<i>Gram</i>
GPa	Giga paskal
I _{cor}	Korozyon akımı
mV	Milivolt
N	Newton
n	Nano
R _a	Ortalama Yüzey pürüzlülüğü
<i>V</i>	<i>Volt</i>
<i>W</i>	<i>Watt</i>
β	Geri dönüş ihtimali
γ	Sıçratma verimi
θ	Kırınım Açısı
λ	Dalga boyu

Kısaltmalar

AA2014	Al-Cu-Mg alaşımı
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
CFUBMS	Closed-Field Unbalanced Magnetron Sputtering-Kapalı Alan Dengelenmemiş Manyetik Alanda Sıçratma)
Cp-Ti	Saf Titanyum
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
DC	Doğru akım
DLC	Elmas Benzeri Karbon
h-BN	Polieter eter keton
HK	Knoop sertlik
HV	Vickers sertlik
KOH	Potasyum Hidroksit
Lc	Kritik yük (Adezyon)
MAO	Mikro Ark Oksidasyon
MoS ₂	Molibden disülfid
Na ₂ HPO ₄	Sodyum Fosfat
Na ₂ SO ₄	Sodyum Sülfat
NaAlO ₂	Sodyum Alüminat
NaPO ₂ H ₂	Sodyum Hypophosphite
OCP	Açık devre potansiyeli
PEEK	Hegzagonal bor nitrür
PEO	Plazma elektrolitik oksidasyon
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	Scanning Elektron Mikroskop
TiO ₂	Titanyum Oksit
Wa	Aşınma oranı
Wh	Aşınma Hacmi
XRD	X-Ray Difraktometre

GİRİŞ

Toplum sürekli çevresi ile etkileşimde bulunmuş, yaşadığı zamana göre çevresinde bulunan çeşitli malzemeleri kendi ihtiyaçları doğrultusunda kullanmaya başlamıştır. Günümüzde de ihtiyaçları karşılanması için mühendislik çalışmalarının önemli bir bölümü yeni malzemelerin geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Yaşam standardını ve yaşam kalitesini artıracak yeni malzemelerin tasarlanması, geliştirilmesi, üretilmesi ve mevcut malzemelere yeni özellikler katarak kullanım alanlarının artırılması araştırmacıların hedefleri arasında yer almaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte endüstride her geçen gün malzemelerden beklenen performans değişmekte olup, son zamanlarda malzemelere yeni özellikler ekleme veya mevcut özellikleri geliştirmeye yönelik çalışmalar daha da önem kazanmıştır. Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin daha hafif, daha yüksek mekanik özellikler, daha yoğun ve aynı zamanda ısıya ve aşınmaya karşı daha dayanıklı olmaları beklenmektedir. Özellikle uygulamalarda ağırlık ve sürtünmeden kaynaklanan kayıpları azaltmak, asgari yakıt tüketimi sağlamak ve çevreye verilen zararları önlemek amacıyla demir esaslı malzemelerin yerine düşük ağırlık-yüksek mukavemet özelliklerine sahip hafif metallerin kullanımına yönelik araştırma ve geliştirmeler giderek artmaktadır. Bununla birlikte, hafif metaller düşük spesifik ağırlıklarından dolayı çok ilgi çeken malzemeler olmalarına rağmen, endüstriyel uygulamalardaki kullanımları beklenildiği kadar genişlememiştir. Bu durum hafif metal ve alaşımların aşırı yük altında mekanik-tribolojik özelliklerinin zayıf, agresif saldırgan ortamlarda korozyon dirençlerinin sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sınırlamalar, hafif metal ve alaşımlardan imal edilmiş makine elemanlarının kullanım ömürlerini azaltmakta ve güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle bu malzemelerin ömürlerini yükseltmek, sürtünme, aşınma ve korozyonu kontrol altına almak ancak tasarım değişikliği, uygun yüzey modifikasyon veya yağlama gibi tekniklerle sağlanabilmektedir. Bu bağlamda, hafif metallerin yüzey problemlerini kontrol etmek veya azaltmak için son yıllarda termokimyasal işlemler ve kaplama gibi yüzey modifikasyon tekniklerinin en etkili çözüm yöntemleri arasında olduğu görülmektedir (Dong, 2010; Dzhurinskiy et al., 2021; Krug et al., 2006; Simchen et al., 2017; Yerokhin et al., 1999; Yilbas et al., 1996; J. Zhang & Alpas, 1993).

Tasarım ve malzeme seçimi kriterlerinin doğru bir şekilde belirlenmesine rağmen uygulamalarda kullanılan makine parçaları çalışma esnasında oluşan sürtünme, aşınma, korozyon ve tribokorozyon gibi hasarlardan dolayı beklenen performansından düşük çalışma

verimi ile karşılaşılabilmektedir. Makine elemanlarının çalışma verimini azaltan ve üretim maliyetlerini artıran hasar tipleri arasında aşınma önemli bir yere sahiptir. Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte makine elemanlarındaki çalışma toleranslarının azalması, daha kompleks ve hassas parçalara ihtiyaç duyulması aşınmadan kaynaklı hasarlar oldukça önemli bir konuma gelmiştir.

Malzemelerin yüzeylerinde oluşan hasarların çoğu, sürtünme, aşınma, korozyon ve tribokorozyon gibi mekanizmalardan meydana gelmektedir. Yüzey hasarları, tarih öncesi zamanlardan günümüze kadar önemli sorunlar olarak varlığını sürdürmektedir. Üretilen enerjinin yaklaşık üçte birinin sürtünme nedeniyle harcandığı ve sürtünme nedeniyle malzemelerin yüzeylerinde meydana gelen yüzey hasarlarının da çok büyük kayıplara sebep olduğu bilinmektedir (Arslan et al., 2013; Becker, 2004; Efeoğlu et al., 2019; Farnoush et al., 2015; Ghafaripoor et al., 2018; Holmberg et al., 2017; Irfan Ul Haq et al., 2018; L. Li et al., 2021; Sukuroglu et al., 2015; Yang et al., 2020; Jingwen Zhang et al., 2020)

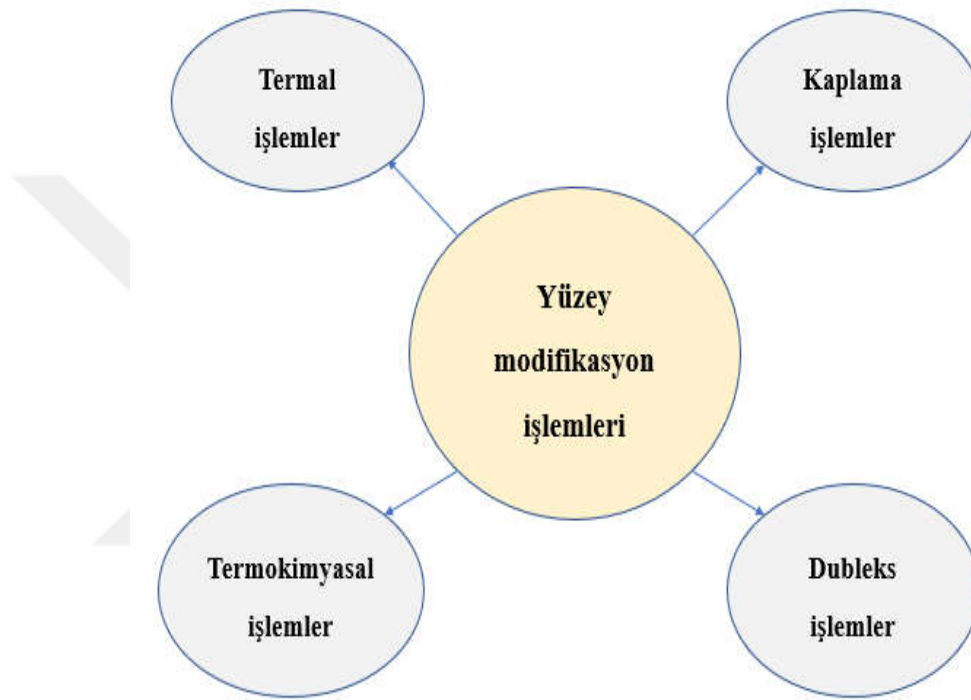
Sürtünme; Birbirine göre bağlı hareket yapan veya yapma eğiliminde olan yüzeyler (sıvı, katı, gaz vb.) arasında harekete karşı oluşan dirençtir. Başka bir deyişle; sürtünme, makine elemanlarının hareketli temas yüzeylerindeki aşınma ve enerji kaybının esas nedenidir. Aşınma; fiziksel veya kimyasal etkilerle malzeme yüzeyinde oluşan ve istenmeyen malzeme kaybına sebep olur ve enerjinin önemli bir harcanmasına neden olur. Aşınmanın sonucunda malzemenin şeklinin bozulması, performans kaybı, yüksek enerji tüketimi, düşük verimlilik ve üretimde düşüş olarak ortaya çıkar. Bu durum önemli maliyeti ve malzemenin ömrü üzerinde etkilidir. Malzemelerde aşınma mekanizmalarının mümkün olan en iyi karakterizasyonunu sağlamak için, üç unsurun ele alınması gerekmektedir. Bunlardan ilki ana malzemedir ve kimyasal bileşimi, üretim yöntemi, mekanik özellikleri, geometrisi aşınmada önemli rol oynar. İkinci unsur ana malzemenin aşınmasına sebep olan aşındırıcıdır ve dinamik ve fiziksel özellikleri ile karakterize edilir. Üçüncü olarak aşınmanın meydana geldiği ortamdır ve sıcaklık, basınç ve nem gibi şartlar etkili olmaktadır. Malzemelerde aşınma hasarının azaltılarak malzeme ve enerji kaybının en düşük seviyelere indirilebilmesi için ana malzemeye uygulanacak işlemler (ısıtma işlemleri, mekanik işlem, yüzey işlemleri vb.) büyük önem taşımaktadır (Busby et al., 2010; Curry et al., 2016; Lee, 2012; J. Zhang & Alpas, 1993; Taylor, 1998;)

Uygulamada malzemelerin kullanımı sırasında hasara uğratarak devre dışı kalmasına sebep olan diğer bir hasar türüde korozyondur. Malzeme hasarları ile istatistik verilere bakıldığında, malzemelerin en fazla korozyon nedeni ile hasara uğradıkları görülmektedir. Korozyon metalik malzemelerin bulundukları ortam ile fiziksel, kimyasal ve elektro kimyasal reaksiyona girmeleri sonucu dışardan enerji vermeye gerek duymadan doğal olarak meydana

gelir. Yüzeyleri uygun şekilde korunmayan metal ve metal alaşımlarının hasarı önemli bir teknolojik sorundur. Korozyona uğramış malzemelerde kütle kayıplarının meydana gelmesi malzemelerin mukavemetinin ve çalışma ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca korozyon sırasında oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu malzemelerin mekanik özelliklerinin değişmesine de neden olmaktadır. Korozyonun etkilediği sektörler bakıldığında enerji, ulaştırma, kimya, gıda, petrol ve gaz, eczacılık, makine, boru hatları, hava, kara ve deniz ulaştırma altyapıları, açık deniz yapıları, kimyasal tesisler ve nükleer reaktörler, elektrik santralleri, elektronik cihazlar, vücut implantları gibi geniş alanları kapsamaktadır. Korozyonun tamamen önlenmesi oldukça zor olduğu için metallerde büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Günümüzde korozyondan korunmak için uygun tasarım, korozyona dayanıklı malzeme seçimi ve koruyucu kaplama yöntemlerine başvurulur. Etkin bir korozyon önleme yöntemi metal ile korozyona neden olan elektrokimyasal yükün akışını önleyen elemanlar arasında bir bariyer görevi gören yüzey uygulanan farklı türdeki kaplamalardır (Cui et al., 2019; James et al. 2015; Hoseini et al., 2021; Kaseem & Dikici, 2021; Irfan Ul Haq et al., 2018; QIN et al., 2021; Revathi et al., 2017).

Uygulamada karşımıza çıkan yüzey problemlerinden biride aşınma ve korozyonun sinerjik etkisi ile ortaya çıkan tribokorozyon olayıdır. Tribokorozyon, tribolojik temas altında ve korozif ortamlarda metallerin hasarlarına yol açan; kimyasal, elektrokimyasal ve mekanik süreçler olarak gerçekleşmektedir. Tribokorozyon nükleer, deniz, uçak, otomotiv, tekstil, maden, metalurji, mikro ve nano teknolojik kaplama, biyomekanik, doku mühendisliği gibi alanlarda karşımıza çıkmaktadır. Bu gibi alanlardaki uygulamalarda karşılaşılan tribokorozyon sebebiyle her yıl milyonlarca dolar harcanarak tribokorozyon etkilerinden korunmaya çalışılmaktadır. Bunlara örnek olarak pompalardaki, kompresör çıkışlarındaki, pervanelerde, valflerde, ısı değiştirici tüplerinde ve diğer akışkan dağıtım sistemlerinde erozyon-korozyon kayıpları verilebilir. Ülkemiz başta olmak üzere gelişmekte olan ülkeler için bu kayıplar ekonomik çerçevede değerlendirildiğinde üzücü sonuçlar doğurabilmektedir. Aşınma ve korozyon kendi başlarına karmaşık bir yapı olduklarından bu konular üzerine çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Tribokorozyonun ise bu iki karmaşık olayın etkileşimi olduğu düşünüldüğünde kompleksliğin daha fazla olacağı aşikârdır. Yukarıda bahsi geçtiği gibi çok çeşitli uygulama alanlarında karşılaşılan tribokorozyon çok büyük maddi kayıplara neden olmakla birlikte mühendislik sistemlerinin sahip olması gereken sağlamlık, güvenilirlik, emniyet, performans, optimizasyon ve ekonomi gibi olguları da beraberinde getirecektir. Sayılan tüm bu nedenler, aşınma ve elektrokimyasal olaylar bir anda olduğunda sonucu tahmin etme arzusu mühendislerin ilgisini çekmiş ve araştırmalar başlamıştır (Benea et al. 2006; Demirci et al., 2013; Sukuroglu et al., 2017; Garcia and Celis 2001; Mischler 2008; Oltra1991).

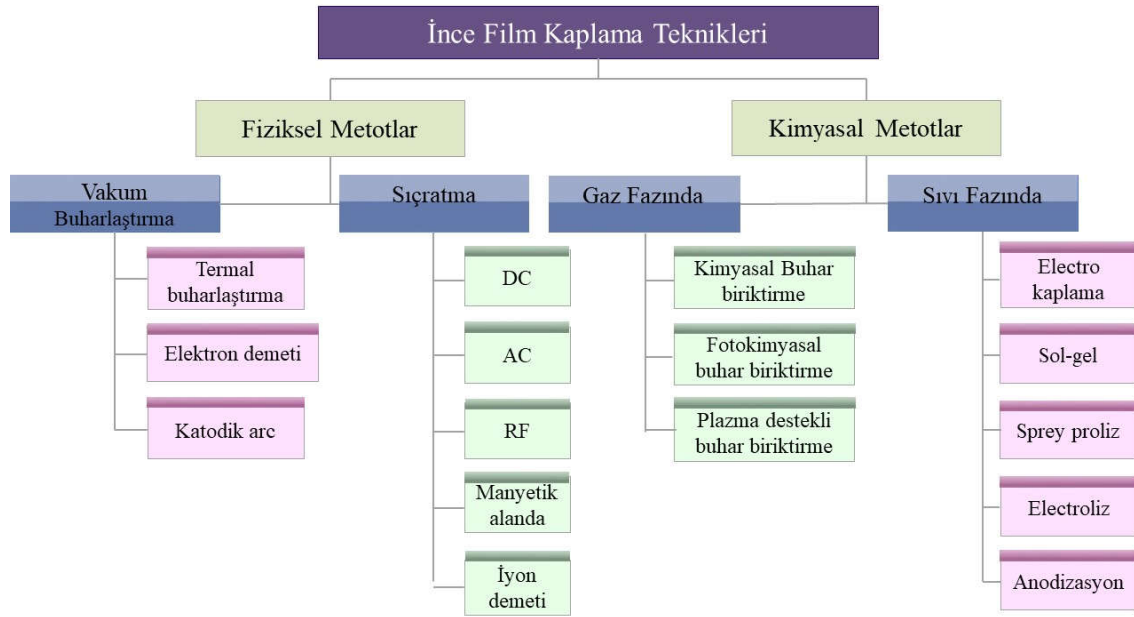
Yukarıdaki hasarları önlemek için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bu sebeple, makine elemanlarının yağlanması, düşük sürtünme katsayısıyla enerji kaybının önlenmesini ve aşınma miktarının düşmesiyle çalışma ömrü artırılmıştır. Fakat makine elemanının bazı çalışma şartları (yüksek sıcaklık, kroyejenik sıcaklıklar, vakum vb.) altında sıvı yağların kullanılması uygun olmamaktadır. Bu durumu çözebilmek için yüzey modifikasyon teknikleri (Şekil 1) gelişmiştir (Barnett, 1970; Erdemir, 1995; Kimura et al., 1999; Ma et al., 2014; Mcmurtrey, 1985; Stachowiak ve Batchelor, 2001; Wang et al., 2007)



Şekil 1. Yüzey modifikasyon işlemleri

Yüzey modifikasyon tekniklerindeki hızlı gelişmeler sayesinde gelecek yüzyılda hafif metallerin ve alaşımlarının kullanımı daha da artırılabilir. Bu yüzden hafif metallerin ve alaşımlarının dezavantajlarının üstesinden gelmek için büyük çabalar sarf edilmektedir.

Bu amaçla, alaşımların yüzeyindeki korozyon, mekanik, tribolojik ve tribokorozyon özelliklerini geliştirmek için birçok farklı yüzey modifikasyon (yüzey iyileştirme) ve ince film kaplama teknikleri uygulanmaktadır. İnce film terimi, birkaç atomik katmandan birkaç mikrometreye kadar değişen kalınlıklara sahip katmanlardır ve film yapısına bağlı olarak birçok uygulamaya sahip özellikler taşıyabilir. İnce film kaplama teknikleri Şekil 2’de verilmiştir. İnce film sentezleme teknikleri, sürecin öncelikle kimyasal mı yoksa fiziksel mi olduğuna bağlı olarak iki geniş kategoriye ayrılır (Abbasi et al., 2012; Cicek et al., 2017; Martin, 2009; Mazzi et al., 2016; Panchal, 2014; Wasa, K., Kitabatake, M., Adachi, 2004).



Şekil 2. İnce film kaplama teknikleri (Panchal, 2014)

Bu tekniklerin yüzeye uygulanan malzeme ilaveleri; kaplama ve dubleks işlemler, yüzey mikroyapısının/kimyasının değiştirilmesi; termal ve termokimyasal yüzey işlemleri olmak üzere sıralanmaktadır. Kaplama yöntemleri (elektrokimyasal kaplama, elektroliz kaplama, CVD, PVD, termal sprej kaplama, kaynak vb.), malzemenin yüzeyine farklı bir malzemenin nano-mikro veya makro yapıda kütsel olarak transfer olmasıdır; dubleks işlemler ise, termal ve termokimyasal kaplama yöntemlerinin en az ikisinin malzeme yüzeyine uygulanmasıdır. Yüzey sertleştirme, shot peening, derin çekme, haddeleme gibi işlemler ile malzemenin sadece mikroyapısı ve mekanik özellikleri değiştirilebilir. Karbürleme, nitrürleme ve borlama gibi termokimyasal işlemler ile de malzemenin hem kimyasal kompozisyonu hem de mikroyapısı değiştirilebilir (Bloyce *et al.* 1998; Khaled *et al.* 2001; Fernandes *et al.* 2005)

Hafif metaller ve alaşımları üzerine büyütülen seramik kaplamalar yüksek aşınma ve korozyon direncine sahiptirler. Bu kaplamaların büyütülmesi için kimyasal buhar biriktirme (CVD), iyon destekli manyetik sıçratma (PVD) ve termal sprej gibi kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen bu yöntemler düşük ergime noktasına sahip hafif metaller alaşımları (Ti ve Al) için sıklıkla tercih edilmemektedir. Hafif metaller ve alaşımları üzerindeki çalışmaların çoğunluğu genellikle uygun yüzey modifikasyon işlemlerinin seçimine yöneliktir (Cheng *et al.* ; Dehnavi 2014 Gupta *et al.* 2007; Matin *et al.*, 2020; Sarkar 1975; Xu *et al.* 2009; 2012).

Son yıllarda çok yüksek sertliğe sahip ince filmlerin kaplanması ve özellikle makine elemanlarının tribolojik özelliklerini ve tribokorozyon davranışlarını iyileştirmek için PVD yöntemi özelinde pek çok çalışma yapılmaktadır. PVD yöntemlerinden olan dengesiz manyetik

alandaki sıçratma, kaplamanın büyümesi sırasında iyon bombardımanını kontrol etmek için kaplama özelliklerinin iyileşmesini sağlamaktadır. Manyetik alanda sıçratma tekniğinin en teknolojik hali ise; kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) kaplama yöntemidir. CFUBMS tekniğinde; birden çok manyetik alan vardır. Dengesiz manyetik alanlar, aynı/zıt kutuplar karşılıklı (ayna görüntüsü/kapalı alan) yerleştirilerek, çiftli manyetik kapalı alan oluşturulmuştur (Efeoğlu et al. 2017; Cicek et al. 2018; Teer. 1991; Wang et al., 2007).

Hafif metaller ve alaşımlarının yüzey modifikasyonu ve yüzey problemlerinin iyileştirmesi için anodizasyon, elektrolitik kaplama, elektriksiz kaplama ve plazma spreylere kaplama yöntemleri de kullanılmaktadır. Anodizasyon yöntemi bu alaşımlarının yüzey modifikasyonunda önemli bir yere sahiptir. Ancak korozyon ve aşınmaya karşı etkili koruma sağlayamamasının yanında çevre için zararlı asit esaslı çözeltiler ile hazırlanması bu yöntemin kullanılmasında dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca, yüzey iyileştirme yöntemlerinden plazma elektrolitik oksidasyon (PEO), hafif alaşımlar üzerinde önemli sonuçları ortaya çıkarmıştır. Bu yöntemle yapılan kaplamalar, birçok konuda diğer yöntemlere göre daha iyi performans göstermiştir. Bu durum yüksek mekanik özellikler ile aşınma ve korozyon direncinin yanı sıra biyouyumluluğun da oluşumlarında etki etmiştir (Aliofkhazraei and Rouhaghdam 2011).

PEO yöntemi, kaplama alanında nispeten yaygın olan bir yöntem sayılmaktadır. Bu yöntemin; PVD'ye göre daha yüksek adezyon ve kompleks malzemeleri uniform kaplama imkanı gibi avantajları yüzey mühendislerinin bu yönteme daha çok yönelmelerini sağlamıştır. PEO yönteminin, PVD yöntemiyle yapılan kaplamalara göre, kompleks ve pahalı ekipmanlara ihtiyacı yoktur ve ayrıca bu yöntemle daha fazla kalınlıkta kaplamalar yapmak mümkündür (Fanya *et al.* 2006). PEO yöntemi ile yapılan yüksek kalitedeki kaplamalarda minimum aşınma, maksimum korozyon direnci, iyi elektriksel direnci, mükemmel adezyon, yüksek sertliğe sahip ürünler elde edilmektedir.

Düşük yüzey özelliklerine sahip malzemelerden üretilen makine elemanları üzerine büyütülen sert filmler taban malzeme üzerinde plastik deformasyonun oluşmasına ve kaplamanın kırılmasıyla birlikte malzemenin fonksiyonel özelliklerini kaybetmesine neden olur. Bunun sonucunda taban malzemedan ayrılan filme temas eden yüzeylerde abrazyon etki oluşturur. Yani transfer filmi oluşturamazlar. Bu sebeple karşı yüzeyi koruyabilecek, aşınma direnci sağlayabilecek ve karşı yüzeyde transfer filmi oluşturabilecek yağlayıcılara gereksinim duyulmaktadır. Makine elemanlarının yağlanması, düşük sürtünme katsayısıyla enerji kaybının önlenmesini ve aşınma miktarının düşmesiyle çalışma ömrünün artırılmasını sağlamıştır. Tribolojik uygulamalarda, sürtünme ve aşınmaya karşı çoğunlukla sıvı ve gres yağlayıcılar kullanılmaktadır. Fakat kullanım şartlarında (vakum, düşük veya yüksek sıcaklıklar, aşırı temas

basınçları vb.) bu yağlayıcıların olumsuzluklarından dolayı tribolojik uygulamalarda sürtünme ve aşınmayı kontrol etmek için katı yağlayıcılar tercih edilmektedir. Nanopartiküler katı yağlayıcılar, sıvı ve gres yağlayıcıların içerisine eklendiğinde, birbirleri üzerinde kayan yüzeylerde sürtünme ve aşınma performanslarını artırıcı etkiler göstermektedir. Tribolojik problemleri önlemek için değişik yöntemler kullanılmaktadır(Lansdown, 2004).

Katı yağlayıcılar ile sıvı ve gres yağlayıcıların birleşimi, birbirlerine temas eden yüzeylerin sürtünme ve aşınma performansına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle katı yağlayıcılar, aşırı sıcaklık ve yüksek basınç şartları altında aşınma ve sürtünme özelliklerini iyileştirmek için su, yağ ve gres içerisinde dağıtılmaktadır (Barnett 1976; Dehnavi *et al.* 2013; Erdemir 1995; Han *et al.*, 2021; Hanjun *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2018; Hudec *et al.*, 2021; Qin *et al.*, 2016; Sethulekshmi *et al.*, 2021). PEO ve PVD yöntemlerinde en çok kullanılan katı yağlayıcılar; MoS₂, grafit, hegzagonal bor nitrür (h-BN) ve borik asit gibi farklı inorganik malzemelerdir. MoS₂, son yıllarda en yaygın katı yağlayıcı olarak farklı yöntemlerle aşındırıcı yüzeylere kullanılarak uygulanmaktadır (Erdemir 2001; Ma *et al.* 2014).

Bu çalışmada, AA2014 ve Cp-Ti alaşımlarının mekanik, korozyon, tribolojik ve tribokorozyon davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla, farklı iki kaplama yöntemi ile taban malzemeler kaplanmıştır. İlk aşamada Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemi kullanılarak katı yağlayıcı özelliğe sahip molibden disülfid (MoS₂) nanopartiküller içeren bir standart elektrolit içerisinde Al₂O₃/MoS₂ ve TiO₂/MoS₂ kaplamalar büyütülmüştür. İkinci aşamada ise aynı taban malzemeler üzerine fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemlerinden kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) kullanılarak MoS₂-Ti kompozit kaplamalar büyütülmüştür. Kaplamaların yüzey, yapısal, mekanik, korozyon, tribolojik özellikleri ve tribokorozyon davranışları incelenmiştir. Kaplama parametrelerinin optimizasyonu için farklı seviyelerde Taguchi L₄ deney planı seçilmiştir.

PEO işlemini etkileyen kaplama parametreleri; süre, frekans, voltaj değerleri ve elektrolit çözeltisi (standart çözelti+MoS₂ nanopartikül) miktarıdır. PVD işleminde ise MoS₂ ve Ti alaşım filmler hedef kullanılarak; akım, çalışma basıncı ve taban malzeme gerilimi değerleridir. Farklı parametrelerde, seviyelerde ve kaplama yöntemleri ile büyütülen nanokompozit kaplamaların; yüzey morfolojileri, kalınlıkları, yapısal özellikleri, kristal yapıları, adezyonu, aşınma, tribolojik özellikleri, korozyon ve tribokorozyon davranışları sırasıyla; SEM, XRD, çizik testi, pin-on-disk aşınma testi, korozyon testi ve tribokorozyon test üniteleri kullanılarak incelenmiştir.

KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum ve alaşımları yüksek dayanım/ağırlık oranı, elektriksel iletkenlik özelliği ve oksidasyona karşı dirençli olmasından dolayı endüstriyel üretimde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat alüminyumun ve alaşımlarının düşük sertliğe sahip olması, aşınma, parça ömrünün azalmasına sebep olmakta ve aşırı yük altında kullanımını sınırlamaktadır. Agresif ve aşırı yük altında düşük aşınma ve korozyon özellikleri, alüminyumun dezavantajlarından sayılır. Dolayısıyla bu alaşımların kullanım alanlarını ve ömürlerini artırmak için, korozyon ve aşınmaya karşı dayanıklı bir kaplama uygulamak veya yüzeyin mikroyapısını değiştirmeye ihtiyaç duyulur. Bu alaşımların üzerine kaplama oluşturmak (yüzey modifikasyonu) için, anodizasyon, elektrolitik kaplama, elektriksiz kaplama ve plazma sprej kaplama vs. gibi değişik yöntemler uygulanmaktadır. Söz konusu yöntemlerin her birinin kendilerine özgün avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır (Dong 2010; Dejun et al., 2015; Dai et al., 2019; Ignjatović et al., 2021; Li et al., 2015; Tran et al., 2016; XIANG et al., 2016)

Günümüzde teknik ve ekonomik getirilerinden dolayı, alüminyum ve alaşımları çok geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Alüminyum ve alaşımları yüksek dayanım/ağırlık oranı, düşük yoğunluğu, fiziksel ve kimyasal olarak görece iyi performansı, plastisitesi, ısı iletkenliği, kolay şekillendirilebilirliği ve yüksek rezervi nedeniyle en çok tercih edilen metallerdendir. Alüminyum alaşımları son yıllarda endüstriyel üretimde, çelikten sonra en çok kullanım alanına sahiptir. Bu kullanım alanlarından bazıları; makine parçaları, havacılık, uzay, uçak, otomotiv, sağlık, medikal, gıda, inşaat vb. dir. Kullanım alanlarına ait örnekler Şekil 3'te, saf alüminyum özellikleri Tablo 1'de ve alüminyum alaşımları arasında en çok tercih edilen AA2014 alaşımının kimyasal bileşimi ise Tablo 2'de verilmiştir (Smith 1993). verilmiştir (Vargel; 2004; Xin S.G. et al. 2006).



Şekil 3. Alüminyum alaşımlarının kullanım alanlarına ait bazı örnekler

Tablo 1. Saf Alüminyum Özellikleri (Vargel; 2004)

Özellik	Birim	Alüminyum(değer)
Özgül Ağırlık	g/cm ³	2.70
Ergime sıcaklığı	°C	660,32
Isıl iletkenliği	W/ (m.K)	237
Isıl genleşme katsayısı (25 °C)	µm/ (m.K)	23.1
Elastisite Modülü	kN/mm ²	70
+20°C' de direnç ısı değişim katsayısı	1/°C	0,0040
+20°C' de iletkenlik	IACS %	61,62
+20°C' de özgül direnç	nΩ.m	26,50
Çekme Gerilmesi (sert ...tavlı)	Kg/mm ²	180...80
Kopma uzaması (sert ...tavlı)	%	2...35

Tablo 2. AA2014 Alaşımın Kimyasal Bileşimi (Smith 1993).

(wt. %)	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Al
AA2014	4.68	0,74	0,45	0,16	0,23	Bal.

Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları. Olarak iki ana gruba ayrılmaktadır; Dövme alaşımlarının sınıflandırılmasında dört rakam kullanılmaktadır ve aşağıda verildiği gibi ilk rakam alaşım türünü, ikinci rakam ise özgül alaşım türünü temsil etmektedir (Çetin A.,2017, William F.S.,2006).

- 1xxx: Saf alüminyum, öncelikle elektrik ve kimya endüstrilerinde kullanılır.
- 2xxx: Başta magnezyum olmak üzere diğer elementler belirtilmesine rağmen, bakırın ana alaşım elementi olduğu alaşımlardır. 2xxx-serisi alaşımlar, yüksek mukavemetlerin (455 MPa akma mukavemeti) söz konusu olduğu havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.
- 3xxx: Manganezin ana alaşım elementi olduğu bu alaşımlar, mimari uygulamalar ve çeşitli ürünler için genel amaçlı alaşımlar olarak kullanılmaktadır.
- 4xxx: Silikonun/Silisyumun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar, kaynak çubuklarında ve lehim işlemi uygulanacak saclarda kullanılır.
- 5xxx: Magnezyumun başlıca alaşım elementi olduğu alaşımlar, iskele ve deniz ortamlarına maruz kalan ürünlerde kullanılmaktadır.
- 6xxx: Magnezyum ve silikonun başlıca alaşım elementleri olduğu alaşımlar, mimari ekstrüzyonlar ve otomotiv bileşenleri için yaygın olarak kullanılmaktadır.
- 7xxx: Çinkonun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar uçağa ait yapısal bileşenlerde/havacılık endüstrisinde ve diğer yüksek mukavemetli uygulamalarda kullanılır. 7xxx serisi, en güçlü alüminyum alaşımları arasında yer almaktadır.
- 8xxx: Çeşitli bileşimleri karakterize eden bu alaşım kayda değer miktarda kalay, lityum ve/veya demir içerebilir.
- 9xxx: Gelecekte kullanılmak üzere ayrılmıştır. (*Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview*, 2001)

Isıl işlem uygulanabilir (çökeltme ile sertleşebilen) alüminyum alaşımlarını oluşturan dövme alaşımları 2xxx, 6xxx, 7xxx ve 8xxx alaşımlarından bazılarını içerir. Dövme alüminyum alaşımları için kullanılan alaşım ilaveleri ve güçlendirme mekanizmalarının çeşitli alaşımları Tablo 3'te gösterilmektedir (William F.S.,2006).

Çeşitli dövme ve döküm alaşımlarının mukavemet aralıkları Tablo 4 ve 5'te verilmiştir.

Döküm Al alaşımlarında da Amerikan Alüminyum Derneği sınıflandırmasına göre, birinci rakam alaşıma katılan ana elementi ifade etmektedir.

- 1xx.x: Saf alüminyum, özellikle rotor üretimine ait olan kontrollü alaşımsız bileşimler
- 2xx.x: Ana alaşımı/elementi bakır olan alaşımlar.

- 3xx.x: Ana alaşım elementi silikon olan alaşımlar.
- 4xx.x: Ana elementi silikon olan alaşımlar.
- 5xx.x: Magnezyumun başlıca alaşım elementi olduğu alaşımlar.
- 6xx.x: Kullanılmamış seri
- 7xx.x: Çinkonun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar.
- 8xx.x: Kalayın başlıca alaşım elementi olduğu alaşımlar.
- 9xx.x: Kullanılmayan seri (*Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview*, 2001)

Tablo 3. Mukavemet Artırma Mekanizmaları İle Dövmeye Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması (*Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview*, 2001)

Alaşım sistemi	Alüminyum serisi
Soğuk deformasyon ile sertleşebilen alaşımlar	
Saf Al	1xxx
Al-Mn	3xxx
Al-Si	4xxx
Al-Mg	5xxx
Al-Fe	8xxx
Al-Fe-Ni	8xxx
Çökeltme ile sertleşebilen alaşımlar	
Al-Cu	2xxx
Al-Cu-Mg	2xxx
Al-Cu-Li	2xxx
Al-Mg-Si	6xxx
Al-Zn	7xxx
Al-Zn-Mg	7xxx
Al-Zn-Mg-Cu	7xxx
Al-Li-Cu-Mg	8xxx

Tablo 4. Çeşitli Dövme Alüminyum Alaşımlarının Mukavemet Aralıkları (*Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview*, 2001)

Alüminyum serisi	Bileşim türü	Mukavemet Artırma Yöntemi	Çekme Mukavemet Aralığı	
			MPa	ksi
1xxx	Al	Soğuk şekillendirme	70–175	10–25
2xxx	Al-Cu-Mg (1–2.5% Cu)	Isıl işlem	170–310	25–45
2xxx	Al-Cu-Mg-Si (3–6% Cu)	Isıl işlem	380–520	55–75
3xxx	Al-Mn-Mg	Soğuk şekillendirme	140–280	20–40
4xxx	Al-Si	Soğuk şekillendirme	105–350	15–50
5xxx	Al-Mg (1–2.5% Mg)	Soğuk şekillendirme	140–280	20–40
5xxx	Al-Mg-Mn (3–6% Mg)	Soğuk şekillendirme	280–380	40–55
6xxx	Al-Mg-Si	Isıl işlem	150–380	22–55
7xxx	Al-Zn-Mg	Isıl işlem	380–520	55–75
7xxx	Al-Zn-Mg-Cu	Isıl işlem	520–620	75–90
8xxx	Al-Li-Cu-Mg	Isıl işlem	280–560	40–80

Tablo 5. Çeşitli Dökme Alüminyum Alaşımlarının Mukavemet Aralıkları (*Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview*, 2001)

Alaşım Sistemi (AA)	Çekme mukavemet aralığı	
	MPa	ksi
Isıl işlem görebilen döküm alaşımları		
Al-Cu (201–206)	353–467	51–68
Al-Cu-Ni-Mg (242)	186–221	27–32
Al-Cu-Si (295)	110–221	16–32
Al-Si-Cu (319)	186–248	27–36
Al-Si-Cu-Mg (355, 5% Si, 1.25% Cu, 0.5% Mg)	159–269	23–39
Al-Si-Mg (356, 357)	159–345	23–50
Al-Si-Cu-Mg (390, 17% Si, 4.5% Cu, 0.6% Mg)	179–276	26–40
Al-Zn (712, 713)	241	35
Isı işlem görmeyen döküm alaşımlar		
Al-Si (413, 443, °F)	228–296	33–43
Al-Mg (513, 515, 518, °F)	276–310	40–45
Isı işlem görmeyen kalıcı kalıp döküm alaşımları		
Al-Sn (850, 851, 852, T5)	138–221	20–32

Alüminyum ve alaşımlarının mekanik ve tribolojik özellikleri zayıftır. Oksitlenmeye sebep olan ortamlarda korozyon ve aşınmaya karşı dayanıklılık seviyesi düşüktür. Ayrıca düşük sertliği nedeniyle, aşınması ve erozyonu, parçanın kullanım süresini azaltır ve yük taşıma kapasitesini azaltır. Alüminyumun üzerinde, çoğu çıplak gözle görebilir şekilde olmak üzere, galvanik, erozyon, aralık, homojen, taneler arası korozyon, gerilim, çukur (oyuklanma), kaviteasyon vb. gibi çeşitli korozyon türleri oluşur. Baskın korozyon türü, metalin ve alaşımsal unsurlarının eğilimi, parçanın bulunduğu ortam ve koşullar vb. bir takım şartlara bağlı olarak belirlenir. Alüminyumun uniform korozyonu, oksit filmin çözünürlüğünün yüksek olduğu veya düşük asidik (asidik veya alkali) ortamlarda görülmektedir. Alüminyumun kaviteasyonik korozyonu, yüzeysel sular, deniz suyu ve nemli havalar gibi bütün nötr ortamları kapsayan nötr asidik ortamlarda gerçekleşebilmektedir. Ayrıca hidrojen kırılabilirliği, gerilimli korozyona sebep olmaktadır. Bu nedenle alüminyum alaşımlarının korozyon ve tribokorozyon özelliklerinin iyileştirilmesi gerekir. Alüminyum alaşımlarının korozyonu, uygun alaşım ve sistem tasarımı seçimi, ortam denetimi, engelleyicilerden ve koruyucu kaplamalardan yararlanmak gibi çeşitli yöntemlerle kontrol edilebilmektedir (Metals handbook; 2002). Koruyucu kaplamalar, alüminyum alaşımlarının korozyona karşı direncini yükseltmek için çeşitli yüzey modifikasyon yöntemlerinin gelişmesini sağlamıştır.

Bunlardan bazıları elektrolitik kaplamalar, anodizasyon prosesi (anodizing), polimer kaplamalar, iyonik implantasyon, sol-jel, kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve termal sprej yöntemleridir (Smith ve Williams 1995; Täschner et al. 1998; Masalski et al. 1999). Bu yöntemlerin her birinin kendine özgün avantajları olduğu gibi, dezavantajları da vardır. Bu yöntemlerin (PVD, CVD ve termal sprej) uygulanmasında ve/veya ön işlem esnasında ortaya çıkan yüksek sıcaklık kaplama kalitesini düşürmektedir (Nie et al. 2002). Günümüzde bazı yöntemler kullanılarak yüksek sıcaklığın düşürülmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Twite et al. 1998). Alüminyum ve alaşımların aşırı yüklere karşı direncini artırmak amacıyla yüzey modifikasyon yöntemlerinden olan, anodizasyon yöntemi ekonomik bir çözüm olduğu için tercih edilmektedir. Anodizasyon, nispeten kalın, kompakt ve sert film üretebilme özelliğinden dolayı, kullanılabilecek en uygun yüzey modifikasyon yöntemlerindendir. Fakat düşük kalınlığı ve gözenekliliği nedeniyle, korozyona ve tribokorozyona karşı direnç gösterememektedir. Bu yöntemin eksik yönlerini ortadan kaldırmak için çalışmamızda ilk aşamada Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemi kullanılarak katı yağlayıcı özelliğe sahip molibden disülfid (MoS_2) nanopartiküller içeren bir standart elektrolit içerisinde $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalar ile büyütülmüş ve ikinci aşamada ise, Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemi kullanılarak MoS_2 ve Ti alaşım filmleri; AA2014 taban malzemeler üzerine kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS)

teknikleriyle kaplanmış ve bu kaplamaların mekanik, tribo ve tribokorozyon davranışlarını incelenmiştir (Dhatarwal & Sengwa, 2021; Matin et al., 2020; Shi et al., 2021).

Titanyum ve Alaşımları

Hafif metaller grubunda özgül ağırlığı 4.5 gr/cm^3 yüksek dayanım oranına sahip olan titanyum ilk defa 1952 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olması havacılık, uçak ve uzay sanayisi, savunma sanayisi, denizcilik uygulamaları, tıbbi uygulamalar da, gıda endüstrisi, spor ekipmanları vb. alanlarda kullanılmasına katkı sağlamıştır. Titanyum aktif bir metal olup, yüzeyde oluşan pasif TiO_2 tabakası nedeniyle korozyona karşı dirençlidir. Titanyumun eritme ve kaynağının nötr atmosferde yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde metal gazı emilmesinden dolayı kırılgan olur ve bu nedenle yüksek sıcaklıkta kullanılmaz (Lütjering et al. 2003). Titanyumun korozyona karşı dirençli bir metal oluşu, kimyasal endüstrilerde ve tıp alanında da yararlanılmaktadır.

Titanyumun diğer hafif metallere göre aşağıda sıralanan bir takım avantajları bulunmaktadır:

- 1- Titanyum, atomik yapılarında tamamlanmamış elektron katmanı bulunan geçiş metallerindendir, bu durum, katı çözeltilerin oluşmasını sağlar.
- 2- Titanyum ve alaşımları, oksijen, nitrojen ve hidrojen gibi elementlerle tepki göstermektedir. Bu reaksiyonlar, ergime noktasının çok altında sıcaklıklarda gerçekleşebilmektedir. Titanyum başka elementlerle reaksiyon içinde, katı çözeltileri ve iyonik ya da kovalent metaller arası bileşikler oluşturabilir.

Titanyum, aşındırıcı ortamlarda kullanılmasına sebep olan üç önemli özelliğe sahiptir:

(1) Deniz suyunda ve klorlu tuz çözeltilerde korozyon direnci, (2) hipokloritler ve nemli klorin karşısında dayanıklılık, ve (3) dumanlı tuz asidi kapsayan asit nitriğe karşı dayanıklılık. Çoğu metal ve alaşımların kaviteye sebep olan FeCl_3 ve CuCl_2 gibi tuzlar, pratikte titanyumun korozyona uğramasını önlemektedir. Bu metal nispeten saf sülfürik ve hidroklorik asite dirençli olmayıp, bu asitlerin metalik kirlilikler içerdiği durumda çok iyi performans sergiler. Titanyum çok az galvanik etki gösterir çünkü kolaylıkla pasif olur (Burstein 1994; Fontana 1986).

% 3 molibden içeriğine sahip titanyum alaşımı hidroklorik asite karşı çok dirençlidir. Düşük kalay miktarı sıcak haddeleme sırasında yüzeysel kabuklanmanın azalmasına sebep olmaktadır. Az miktarda paladyum, platin ve başka değerli metallerden eklemek, hafif rejeneratif ortamlarda dayanıklılığın artmasını sağlar. Örneğin, titanyumun ticari alaşımlarından biri yüzde 0,15 civarında paladyum içermektedir. Titanyumun ticari alaşımları

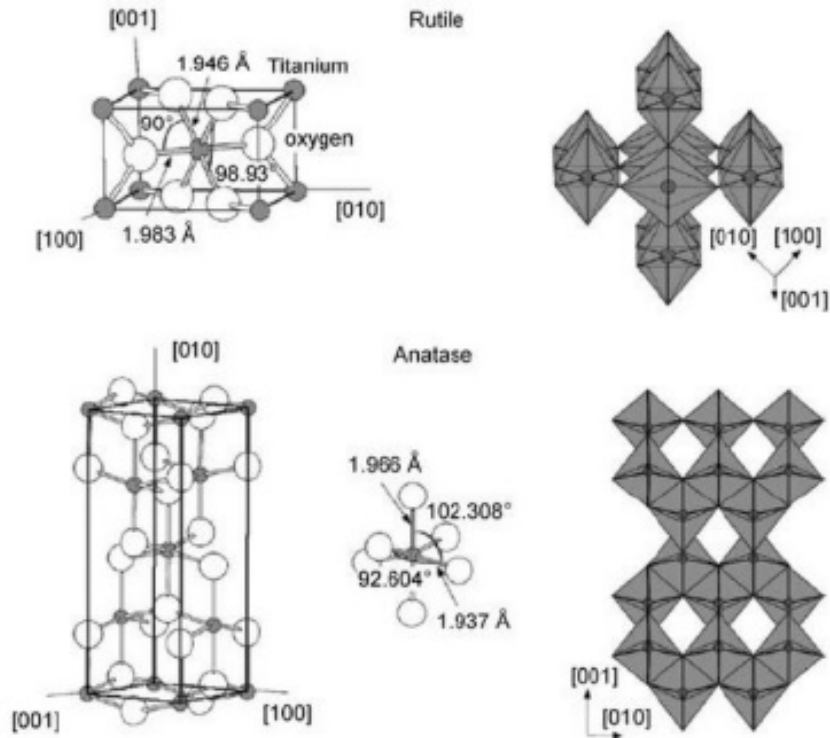
alüminyum, krom, demir, manganez, molibden, kalay, vanadyum ve zirkonyum gibi metallere yapılmaktadır (Lütjering et al. 2003).

Titanyum ve alaşımları şekil 4'te gösterildiği gibi havacılık, savunma sanayi, otomotiv, tıp (protezler, implantlar) ve diğer endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır.



Şekil 4. Titanyum ve alaşımlarının kullanım alanlarına ait bazı örnekler

Yüzeyde oluşan oksit tabakası, titanyum esaslı malzemelerin yüksek korozyon dayanımlarının nedenidir. Meydana gelen bu oksit tabakaları Brokit, Rutil ve Anataz olmak üzere üç kristalografik formdan teşekkül etmektedir. Şekil 5'te Rutil ve Anataz fazlarının kristalografik kafes yapıları gösterilmektedir.

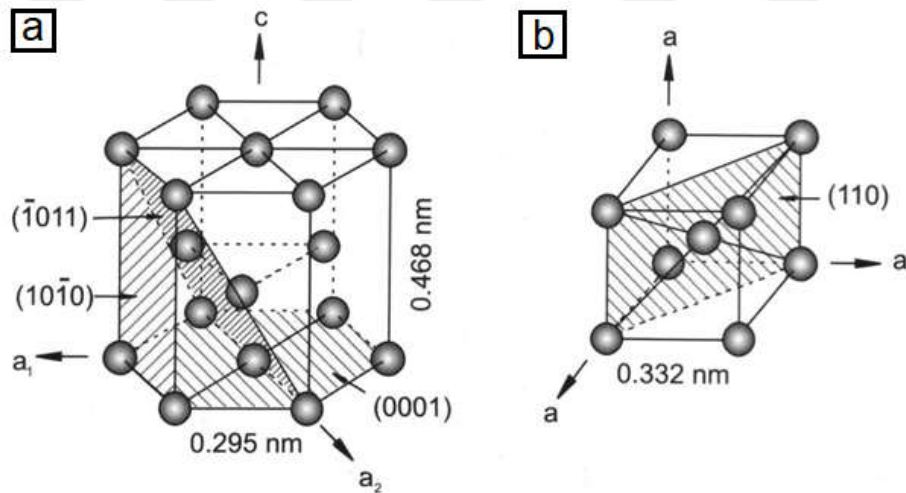


Şekil 5. Anataz ve Rutil fazlarının kristal kafes yapıları (Diebold et al. 2003).

Çok sert olan rutil yapı, en yüksek kırınım indisi göstermektedir ve termodinamik açıdan en kararlı yapıdır. Anataz'da rutil gibi tetragonal, brokit fazı ise ortorombik yapıya sahiptir (Mergel *et al.* 2000; Abalı 2007).

Oda sıcaklığında titanyum ve alaşımları hangi kristal yapıya sahip olacakları, alaşımı oluşturan elementler tarafından belirlenmektedir. Endüstriyel uygulamalar için Anataz yapı genellikle 350°C civarındaki düşük sıcaklıklarda sağlanır. Rutil fazı ise 400°C ve 800°C arasındaki sıcaklıklarda oluşmaya başlar ve daha yüksek sıcaklıklarda sadece rutil fazı bulunur. Başka bir faz olan brokit fazı da bir kısım çalışmalarda ifade edildiği gibi çok daha yüksek sıcaklık ve basınçlarda meydana gelmektedir (Lütjering et al. 2003).

Saf titanyum ve titanyum alaşımları alfa (α), beta (β) ve $\alpha+\beta$ olmak üzere üç ana grupta toplanmaktadır. Genellikle Titanyum ve alaşımlarının özellikleri, α ve β fazlarının yapıdaki hacimsel oranı ve dağılımlarına bağlıdır. Titanyum düşük sıcaklıkta hekzagonal sıkı paket (HSP) yapı göstermekte ve alfa (α)-Ti olarak adlandırılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda hacim merkezli kübik (HMK) bir yapı ve β -Ti olarak tanımlanmaktadır. Saf titanyum için $\alpha \rightarrow \beta$ geçiş sıcaklığı 882 °C' tır. Şekil 6'da α -HSP ve β -HMK'nın kristal yapılarına ait şematik gösterimi görülmektedir (Matthew 2000).



Şekil 6. a) α -HSP ve b) β -HMK'nın kristal yapıları (Leyens 2003)

α -fazında HSP kristal yapıdaki titanyum oda sıcaklığında kararlı bir halde bulunurken, β -fazında HMK (Hacim Merkezli Kübik) kristal yapıdaki titanyum ise yüksek sıcaklıklarda kararlı bir halde bulunmaktadır. β -fazındaki titanyuma alaşım elementleri katılmak suretiyle yüksek sıcaklık değerleri yerine oda sıcaklığında kararlı hale getirilebilir. α -alaşımlarının korozyon dayanımları, β -alaşımlarından daha yüksektir. β -HMK ile karşılaştırıldığında, α -HSP daha yoğun paketlenmiş olup anizotropik bir yapıya sahiptir. α fazı β ile karşılaştırıldığında; sünekliliğinin daha düşük olduğu, plastik deformasyona daha yüksek dayanım gösterdiği,

mekanik ve fiziksel özelliklerinin anizotropik olduğu, difüzyon hızının yaklaşık olarak β difüzyon hızından iki kat daha fazla olduğu ve daha yüksek sürtünme dayanımı gösterdiği söylenebilmektedir. α alaşımları genelde orta derecede mukavemete, $\alpha+\beta$ alaşımları yüksek mukavemete ve yarı kararlı β alaşımları ise çok daha yüksek mukavemete sahip olabilmektedirler (Güleryüz, 2003).

Titanyum yüzeylerinde koruyucu ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için farklı yöntemler ile yüzey modifikasyonu kullanılmaktadır. Örnek olarak Ti ve alaşımlarının yüzeylerinde TiO_2 kaplamaları en yaygın bilinen türlerdendir.

Cp-Ti mükemmel korozyon direnci ve yüksek biyo-uyumluluk özellikleri nedeniyle sağlık sektöründe implant malzemesi olarak kullanılır. Ancak, saf titanyum zayıf tribolojik özelliklere sahiptir. Bu nedenle, bu malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için yüzey modifikasyonu teknikleri kullanılmaktadır (Rituerto *et al.* 2013; Songur *et al.*, 2019; Zarka *et al.*, 2021)

Titanyum ve alaşımları önemli mekanik/tribolojik özelliklere sahiptir ancak düşük sürtünme ve aşınma özellikleri kullanımlarını sınırlamaktadır. Normal koşullarda yüzeyinde bulunan ince oksit film tabakası hareketli temasın olduğu durumlarda çok çabuk aşınır ve kullanılamaz hale gelir. Bu durum titanyum ve alaşımlarının yüzeyinde aşırı hasar oluşumuna yol açar. Bu yüzden titanyum ve alaşımlarının kullanım alanlarını sınırlar, oluşan bu hasarları iyileştirmek için çeşitli yüzey modifikasyon yöntemleri; anotlama, termal oksitleme (Lütjering *et al.* 2003; Xiaoa *et al.* 2013; iyon implantasyon (Shanaghi *et al.* 2013) ve paladyum termal oksitleme (Kumar *et al.* 2009) kullanılmaktadır.

Bu yöntemlerin eksik yönlerini ortadan kaldırmak için bu çalışmada Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemi kullanılarak katı yağlayıcı özelliğe sahip molibden disülfid (MoS_2) nanopartiküller içeren bir standart elektrolit içerisinde $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalar ile büyütülmüş ve ikinci aşamada ise, Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemi kullanılarak MoS_2 ve Ti alaşım filmleri; Cp-Ti taban malzemeler üzerine kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) tekniğiyle kaplanmış ve bu kaplamaların, mekanik, tribo ve tribokorozyon özellikleri incelenmiştir (Bao *et al.*, 2021; R. Liu *et al.*, 2021; Zarka *et al.*, 2021).

Triboloji ve Tribokorozyon

Günümüzde üretim oranındaki artış nedeniyle, makinelerin ve yapıların çeşitli kısımlarında yüzey hasarları ortaya çıkmaktadır. Yüzey hasarları, tarih öncesi zamanlardan günümüze kadar önemli sorunlar olarak varlığını sürdürmektedir. Mühendislik malzemelerinin kullanımını sınırlayan faktörler; bunların zayıf mekanik, triboloji ve tribokorozyon

özellikleriyle ve en önemlisi de aşınma ve korozyon davranışlarıyla ilgilidir. Aşınma ve korozyon hem ekonomik kayıplara hem de trajik kazalara sebep olmaktadır (Becker, 2004; Irfan Ul Haq et al., 2018; Holmberg et al., 2017; Hudec et al., 2021).

Triboloji bilimi 1967 yılından beri: Aşınma, sürtünme ve yağlama ve bunlarla ilgili fiziksel olayları inceleyen bilim ve teknoloji dalıdır. Triboloji'nin alt disiplinleri; Sürtünme, birbirine göre bağlı hareket yapan veya yapma eğiliminde olan yüzeyler (katı, sıvı, gaz vb.) arasında harekete karşı oluşan dirençtir. Aşınma, fiziksel veya kimyasal etkilerle malzeme yüzeyinde oluşan ve istenmeyen malzeme kaybıdır. Enerji kaynaklarının üçte birinde aşınma ve sürtünme kaynaklı problemler vardır ve bu problemlerin azaltılması büyük önem taşımaktadır. Yağlama ise sürtünme direncini düşürmek ve aşınmaları azaltmak için tribofonksiyon yüzeylerine iç sürtünme direnci düşük malzeme (yağ) uygulaması olarak tanımlanmaktadır. Tribolojik problemleri önlemek için değişik yöntemler kullanılmaktadır (Barnett, 1970; Erdemir, 1995; Kimura et al., 1999; Ma et al., 2014; McMurtrey, 1985; Ordoñez et al., 2021; Stachowiak ve Batchelor, 2001; Hudec et al., 2021; Wang et al., 2007)

Aşınma

Fiziksel veya kimyasal etkilerle malzeme yüzeyinde oluşan istenmeyen malzeme kaybına sebep olur ve enerjinin önemli ölçüde harcanmasına neden olur. Aşınmanın sonucunda malzemenin şeklinin bozulması, performans kaybı, yüksek enerji tüketimi, düşük verimlilik ve üretimde düşüş olarak ortaya çıkar. Bu durum önemli maliyet artışına ve malzemenin ömrü üzerinde etkilidir. Malzemelerde aşınma mekanizmalarının mümkün olan en iyi karakterizasyonunu sağlamak için, üç unsurun ele alınması gerekmektedir. Bunlardan ilki ana malzemedir ve kimyasal bileşimi, üretim yöntemi, mekanik özellikleri, geometrisi aşınmada önemli rol oynar. İkinci unsur ana malzemenin aşınmasına sebep olan aşındırıcıdır ve dinamik ve fiziksel özellikleri ile karakterize edilir. Üçüncü olarak aşınmanın meydana geldiği ortamdır ve sıcaklık, basınç ve nem gibi şartlar etkili olmaktadır (Busby et al., 2010; Tyagi et al., 2021). Malzemelerde aşınma hasarının azaltılarak malzeme ve enerji kaybının en düşük seviyelere indirilebilmesi için ana malzemeye uygulanacak işlemler (ısıl işlemler, mekanik işlem, yüzey işlemleri vb.) büyük önem taşımaktadır (Hudec et al., 2021).



Şekil 7. Aşınmaya ait bazı örnekler

Genel olarak aşınma türleri Şekil 8’de gösterildiği gibi dört temel sınıfa ayrılır. Abrasif aşınma, Adezif aşınma, Koroziif aşınma ve Yorulma aşınması.

Adezif aşınma, birbirine göre bağıl hareket yapan iki cismin arasına yabancı sert parçacıkların girerek yumuşak yüzeye gömülmesi ve bu parçacıkların, sert yüzeyden sanki zımparalarcasına veya eğelercesine materyal kaldırmasıyla oluşan bir aşınma şeklidir. Bu tür aşınmaya karşı önlem almak için makine elemanlarının yüzeyleri ısıtıl işlem ile sertleştirilir. Cisimlerin gerçek temas yüzeyleri, yüzey pürüzlüğü nedeniyle esasen çok fazla küçük olduğundan, bu yerlerdeki gerilmeler çok az yüklenme olaylarında dahi akma gerilmesi sınırına varırlar ve akarak plastik deformasyona maruz kalırlar. Cisimler mikro kaynaklar ile birbirine bağlanırlar. Bu esnada iki cisim arasında devam eden bağıl hareket nedeniyle kaynak bağı kopar ve bu kopma neticesinde diğer cisme nispetle yumuşak olan malzemeden yapılmış cismin yüzeyinde boşluklar meydana gelir, diğer yüzeyde ise çıkıntılar oluşur ve iki yüzey arasına adezif parçacıklar dökülür. Hızla bir yüzeye püskürtülen katı parçacıkların, gaz ya da sıvı jetlerinin o yüzeyi aşındırarak kütle kaybetmesine sebep olmasıdır. Çöllerde savrulan kum taneciklerinin, makineleri, araçları ve yapıları aşındırdıkları görülür, Çizilme veya yırtılma aşınması olarak da adlandırılan abrasif aşınma, sistemde daha çabuk hasara sebep olan mühim bir aşınma türüdür (Kato and Adachi 2001).

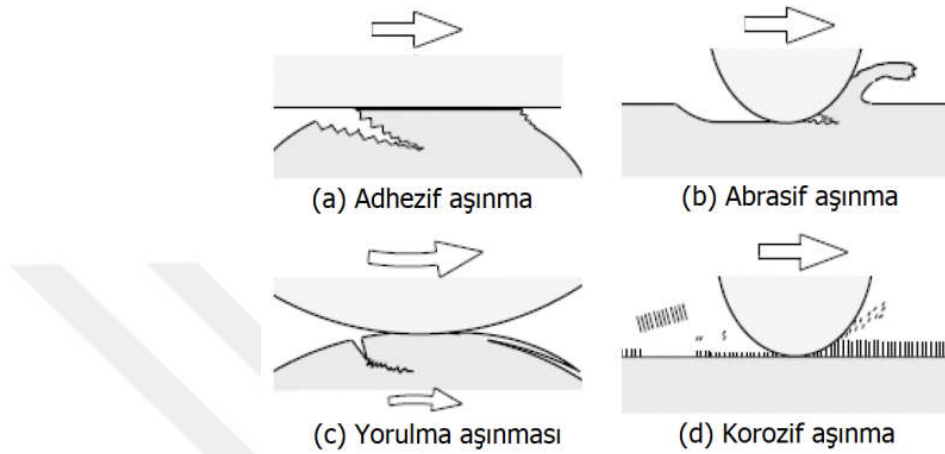
Abrasif aşınma; biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbiriyle temas halindeyken sürtünmesi esnasında oluşur. Sert parçacıkların yumuşak metale batması abrasif aşınmaya yol açabilmektedir. Buna örnek olarak, dışarıdan sisteme giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin yol açtığı aşınma şekli gösterilebilir. Malzeme yüzeyine etki eden yük azaltılarak bu tür aşınmanın hızı azaltılabilir. Böylelikle yüzeye daha az parçacık batması ve çapak kaldırılması esnasında daha az iz bırakma olayı gerçekleşir (Kato and Adachi 2001).

Yorulmalı aşınma; rulmanlı yataklar, dişli çarklar ve kam mekanizmaları gibi birbirleriyle devamlı temas halinde olan yüzeylerde sık sık görülen bir aşınma türüdür. Bu çeşit makine elemanlarında temas yerleri küçük olduğu için temas ettikleri yerlerde yüksek basınç oluşur ve neticede yüzeyin tam altında kayma gerilmeleri meydana gelir. Plastik deformasyon, kayma gerilmelerinin en fazla olduğu noktada meydana gelir, deformasyon giderek yüzeye ilerlerler ve yüzeyde çukurcuklar oluşmasını sağlar (Kato and Adachi 2001).

Koroziif aşınma; bu tür aşınmadaki malzeme kaybı ise, aşınma yüzeyindeki kimyasal reaksiyon filminin büyümesi ile belirlenmektedir. Kimyasal reaksiyonlar aşınma yüzeyinde rahat bir şekilde aktive edilmektedir ve sürtünme ısısı, sürtünme deformasyonu, mikro-

kırılmalar ve reaksiyon ürünlerinin artarda kopması ile de hızlandırılmaktadır. Genellikle bu çeşit bir aşınma; tribo-kimyasal aşınma veya kimyasal aşınma olarak adlandırılır.

Isıl gerilmelerin sebep olduğu yüzey çatlakları veya sürtünme ısısı nedeniyle meydana gelen yüzeysel ergime, bazı durumlarda malzeme kaybına yol açar. Bu aşınma türleri, sürtünme ısısı ve kısmi yüksek sıcaklığın belirleyici olduğu, termal (ısıl) aşınma olarak tanımlanır (Kato and Adachi 2001).



Şekil 8. Aşınma Türleri (Holmberg 1994).

Korozyon

Uygulamada malzemelerin kullanımı sırasında hasara uğratarak devre dışı kalmasına sebep olan bir hasar türünde de korozyondur. Malzeme hasarları ile istatistik verilere bakıldığında, malzemelerin en fazla korozyon nedeni ile hasara uğradıkları görülmektedir. Korozyon metalik malzemelerin bulundukları ortam ile fiziksel, kimyasal ve elektro kimyasal reaksiyona girmeleri sonucu dışardan enerji vermeye gerek duymadan doğal olarak meydana gelir. Yüzeyleri uygun şekilde korunmayan metal ve metal alaşımlarının hasarı önemli bir teknolojik sorundur. Korozyona uğramış malzemelerde kütle kayıplarının meydana gelmesi malzemelerin mukavemetinin ve çalışma ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca korozyon sırasında oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu malzemelerin mekanik özelliklerinin değişmesine de neden olmaktadır. Korozyonun etkilediği sektörlere bakıldığında sanayi, enerji, ulaştırma, kimya, gıda, petrol ve gaz, eczacılık, makine, boru hatları, hava, kara ve deniz ulaştırma altyapıları, açık deniz yapıları, kimyasal tesisler ve nükleer reaktörler, elektrik santralleri, elektronik cihazlar, vücut implantları gibi geniş alanları kapsamaktadır. Korozyonun tamamen önlenmesi oldukça zor olduğu için metallerde büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Günümüzde korozyondan korunmak için uygun tasarım, korozyona dayanıklı malzeme seçimi ve koruyucu kaplama yöntemlerine başvurulur. Etkin bir korozyon önleme yöntemi metal ile korozyona neden olan elektrokimyasal yükün akışını önleyen elemanlar

arasında bir bariyer görevi gören yüzey uygulanan farklı türdeki kaplamalardır (Bao et al., 2021; Fattah-alhosseini et al., 2020; Jamesh et al. 2015; Kaseem & Dikici, 2021; Matykina et al., 2017; Mousavi et al., 2021; Rahimi et al., 2018).



Şekil 9. Korozyona ait bazı örnekler

Günümüzde neredeyse her alanda kullanılan malzemelerde gördüğümüz korozyonun farklı türü vardır. Bunlar; uniform (homojen) korozyon, galvanik korozyon, çukurcuk korozyon, taneler arası korozyon, filiform korozyon, kaplama altı korozyon, pullanma (exfoliation) korozyon, stres korozyon, yorulmalı korozyon, kaçak akım korozyon, seçimli korozyon, erozyonlu korozyon, aşınmalı korozyon.

1. Uniform (Homojen) Korozyon; polarizasyon sebebiyle katod ve anotun devamlı yer değiştirmesi ile, kimyasal reaksiyonlar metallerin yüzeyinde düzgün bir şekilde ve her yerde eşit şiddette oluşur. Bu korozyon türü, diğer korozyon türlerine göre daha az önemli ve daha güçlüdür ve sıvılarda ve/veya kirli ortamda, metal yüzeylerinde kimyasal bir etki ile atmosferik koşullarda meydana gelir. Atmosfer ortamında hiç bir dış etkenden etkilenmemiş aynı cins malzemeden üretilen metaller, Uniform korozyona maruz kalır (Covino *et al.* 2003).
2. Galvanik korozyon; iki heterojen metal bir elektrolit içinde bir hücre oluşturduğunda meydana gelir. Yani farklı türdeki alaşım ve metallerin aynı nem ve ısı ortamında birbirleriyle temasa geçmeleri durumunda bu tip korozyon oluşmaktadır. Temas

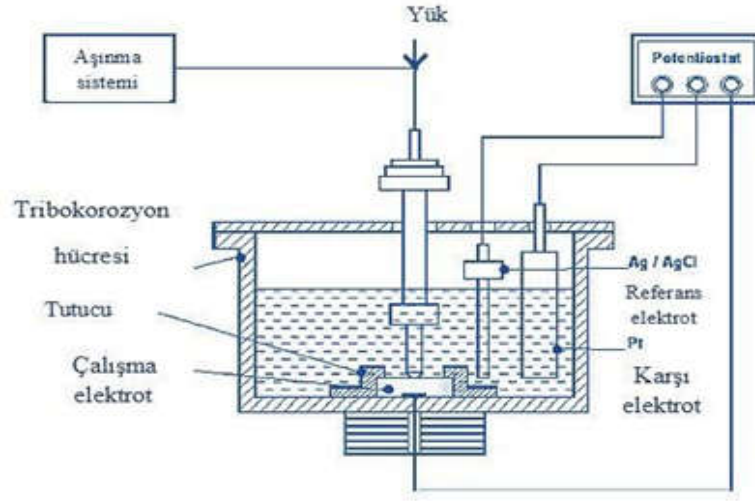
- halindeki metallere daha soy metal katot, aktif olanı ise anot görevi görür ve aktif olan metal korozyona uğrar (Covino *et al.* 2003).
3. Çukurcuk korozyon; metal yüzeyde oluşan boşlukların takip ettiği bir lokalize korozyon türüdür ve pasif hareket devam ettikçe boşluğun korozyonu derinleşerek borularda deliklere neden olur. Bu tür korozyon çok yaygın görülmektedir. Mühendislik yapıları için çok yıkıcı ve bozucu etkiye sahip olduğundan ve zor kontrol edildiğinden dolayı istenmeyen korozyon türüdür (Covino *et al.* 2003).
 4. Taneler Arası Korozyon; Bir metalin kristal yapısında tanelerin sınır çizgisi boyunca meydana gelen korozyona taneler arası korozyon denir. Bu tür korozyon, gözle tespit etmek mümkün olmadığından en tehlikeli korozyon türü olarak kabul edilir ve malzemede ağırlık kaybı çok az olmasına rağmen korozyon hızının tane sınırlarında çok yüksek değerlere ulaşması bu tür korozyonun en önemli özelliğidir. Bu durum malzeme dayanımını düşürür (Covino *et al.* 2003).
 5. Filiform Korozyon; Metal yüzeyinde bulunan boya veya kaplama tabakası altında yürüyen bir korozyon olayıdır. Filiform korozyonu, çatlak korozyonunun bir türü olarak kabul edilebilir (Covino *et al.* 2003).
 6. Kaplama altı Korozyon; Metal yüzeyinde korozyon ürünlerinin veya diğer nedenlerin oluşturduğu bir kabuk altında meydana gelen korozyona kabuk altı korozyonu denir. Kabuğun çevresi katot, kabuk altı ise anot olur (Anonim 2009).
 7. Pullanma (Exfoliation) Korozyon; Pullanma korozyonu, taneler arası korozyonun ilerlemiş halidir (Covino *et al.* 2003).
 8. Gerilmeli (Stres) Korozyon; taneler arası korozyonun özel bir türüdür. Korozi ortamda bulunan bir metal aynı zamanda statik bir gerilmeye maruz kalmış ise , metalin çatlayarak kırılması, korozyon başlangıcı için elverişli bir ortam sağlar (Covino *et al.* 2003).
 9. Yorulmalı Korozyon; Periyodik olarak yükleme - boşaltma şeklinde etkiyen dinamik bir stres altında bulunan bir metal zamanla yorulur ve gerilmeli korozyon çatlağına benzer şekilde, dinamik yükler ve metaldeki korozyonun etkisiyle çatlamlar oluşur (Covino *et al.* 2003).
 10. Kaçak akım korozyon; Doğru akım taşıyan yüksek voltajlı elektrik hatları, kaynak makineleri ve doğru akım ile çalışan raylı taşıt araçları zemin içerisine doğru kaçak akım gönderirler. Bu kaçak akımlar etrafta bulunan metalik yapılara girerek korozyon oluştururlar (Covino *et al.* 2003).
 11. Seçimli korozyon; Bir alaşım içindeki elementlerden birinin korozyona maruz kalarak uzaklaşması neticesinde meydana gelen korozyon olayıdır (Covino *et al.* 2003).

12. Erozyonlu korozyon; Korozif çözeltilerin metal yüzeyinden hızla akması durumunda, korozyona ek olarak erozyon da meydana gelir (Covino *et al.* 2003).
13. Aşınmalı korozyon; Birbiri üzerinde kayan iki yüzeyin aşınması ile beraber yürüyen korozyon olaylarına denir. Aşınmalı korozyonun meydana gelmesi için su lazım değildir (Covino *et al.* 2003).

Yukarıda açıklanan korozyon türlerini önlemek için birçok teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler: uygun malzeme seçimi, dizayn ve üretim, ısıt işlemler, katodik koruma, anodik koruma, korozyon önleyicilerin kullanılması, alaşım elementi ilavesi ve yüzey modifikasyonu (kaplama)

Tribokorozyon

Uygulamada karşımıza çıkan yüzey problemlerinden biri de aşınma ve korozyonun sinerjik etkisi; ortaya çıkan tribokorozyon olayıdır. Tribokorozyon, tribolojik temas altında ve korozif ortamlarda metallerin hasarlarına yol açan; kimyasal, elektrokimyasal ve mekanik süreçler olarak gerçekleşmektedir. Tribokorozyon; nükleer, deniz, uçak, otomotiv, tekstil, maden, metalurji, mikro ve nano teknolojik kaplama, biyomekanik, doku mühendisliği gibi alanlarda karşımıza çıkmaktadır. Bu gibi alanlardaki uygulamalarda karşılaşılan tribokorozyon sebebiyle her yıl milyonlarca dolar harcanarak tribokorozyon etkilerinden korunmaya çalışılmaktadır. Bunlara örnek olarak pompalardaki, kompresör çıkışlarındaki, pervanelerde, valflerde, ısı değiştirici tüplerinde ve diğer akışkan dağıtım sistemlerinde erozyon-korozyon kayıpları verilebilir. Ülkemiz başta olmak üzere gelişmekte olan ülkeler için bu kayıplar ekonomik çerçevede değerlendirildiğinde üzücü sonuçlar doğurabilmektedir. Aşınma ve korozyon kendi başlarına karmaşık bir yapı olduklarından bu konular üzerine çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Tribokorozyonun ise bu iki karmaşık olayın etkileşimi olduğu düşünülürse kompleksliğin daha fazla olacağı aşîkârdır. Yukarıda bahsi geçtiği gibi çok çeşitli uygulama alanlarında karşılaşılan tribokorozyon çok büyük maddi kayıplara neden olmakla birlikte mühendislik sistemlerinin sahip olması gereken sağlamlık, güvenilirlik, emniyet, performans, optimizasyon ve ekonomi gibi olguları da beraberinde getirecektir. Sayılan tüm bu nedenler, aşınma ve elektrokimyasal olaylar bir anda olduğunda sonucu tahmin etme arzusu mühendislerin ilgisini çekmiş ve araştırmalar başlamıştır (Benea *et al.* 2004; Benea *et al.* 2006; Cui *et al.*, 2019; Garcia and Celis 2001; Mischler 2008; Oltra1991; Revathi *et al.*, 2017).



Şekil 10. Tribokorozyon sisteminin şematik gösterimi (Priya *et al.* 2013)

Tribokorozyon, Şekil 10’da şematik olarak gösterilen sistemde aynı anda gerçekleşen korozyon ve aşınmanın sinerjisinin sonucunda meydana gelen bir mekanizmadır (Mischler 2008). Yani uygulanan mekanik faktörler altında ve aynı anda bir elektrokimyasal ortamında meydana gelen aşınma ve korozyonun birbirine etkilerinin araştırılmasıdır (Wood 2007; Alves *et al.* 2013).

Tribokorozyon sistemlerinde korozyon ve aşınma neticesinde taban malzemeden malzeme kaybı işlemi; bölgesel olarak hasara uğrayan metal yüzeyinin hızla bozulması ve malzeme yüzeyinde bulunan pasif filmin bölgesel olarak aşınması şeklinde gerçekleşmektedir. Sonrasında yüzeyin tekrardan pasifleşmesi olayı meydana gelir. Korozyon ile oluşan sert oksit partiküllerinin abrasif etkileri ile malzeme kaybı hızlanmakta ve ayrıca aşınma esnasında karşı malzeme yüzeyinden transfer olan malzeme korozyon hızında düşüşe yol açabilmektedir (Fernandes *et al.* 2006).

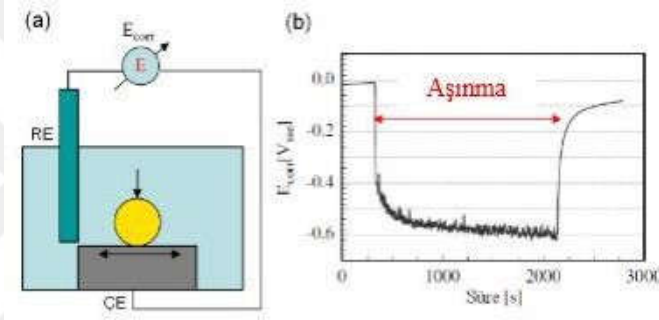
Malzemelerin Tribokorozyon davranışları aşağıda sırayla getirildiği gibi, dört farklı metod istifade edilerek yapılmaktadır ki bunlar: Galvanik hücre tekniği, Korozyon potansiyeli ölçümü, Potansiyodinamik testler ve Potansiyostatik deneylerdir.

Bu metodlardan en çok kullanılanları; potansiyostatik testler ve korozyon potansiyeli ölçümü teknikleridir. Bu tekniklere ek olarak, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve elektrokimyasal gürültü (electrochemical noise) gibi metodlar da kullanılmaktadır (Mischler 2008; Priya *et al.* 2013).

Korozyon potansiyeli ölçümü; Şekil 11-a’da şematik olarak gösterilen test boyunca çalışma elektrotu (ÇE-numune) ile çözelti içinde çalışma elektrotuna yakın olacak şekilde yerleştirilen referans elektrot (RE) arasındaki potansiyel farkının ölçülmesi esasına

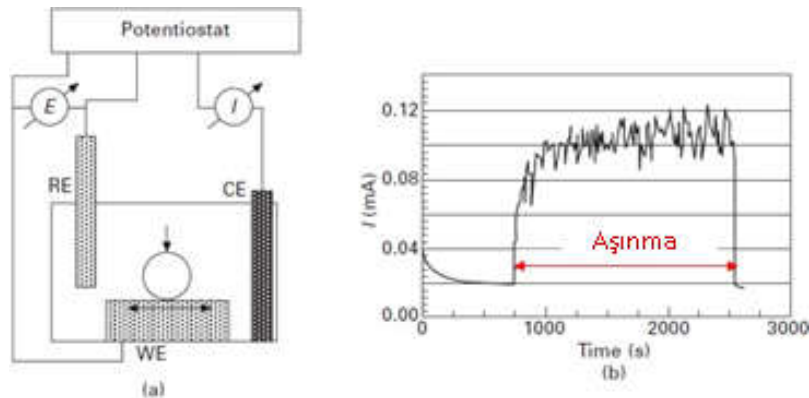
dayanmaktadır (Toptan 2011). Bu metod, aşınan metalin yüzey durumu konusunda bize bilgi veren sade bir metottur ancak korozyon reaksiyonlarının kinetiği konusunda bize bilgi veremez (Mischler 2008).

RE herhangi bir şekilde aşınmaya uğramamaktadır. ÇE ve RE galvanik akımı ölçmek hedefiyle, hiç direnmeden Potansiyostatike ya da ölçüm aletine bağlıdır. Şekil 11-b'den de görüldüğü üzere, aşınma koşullarından önce RE ve ÇE birbirine benzer korozyon potansiyeline sahip olup herhangi bir potansiyel değeri geçmemektedir. Fakat aşınma koşullarının başlamasının ardından ÇE ve RE arasında galvanik bir çift oluşumu meydana gelmekte ve ÇE nin korozyon potansiyeli değişmektedir. Aşınma koşulları bittiğinde ise ÇE tekrardan pasifleşerek galvanik akımı sıfıra doğru çekmektedir. Bu galvanik akım aşınmayan ve aşınan bölgeleri göstermektedir. Bu değişim de aşınma koşullarının başlamasıyla korozyon durumundaki artışı ifade etmektedir (Demirci 2014).



Şekil 11. a) Korozyon potansiyeli ölçümü şematik gösterimi, b) Örnek bir OCP ölçümü (Mischler 2008).

Şekil 12-a'da gösterildiği üzere Potansiyostatik Testler; referans elektrot (RE), çalışma elektrotu (WE- numune) ve karşı elektrot (CE-platin bir malzeme) düzeneğindenoluşan üç elektrotlu sisteme belirli bir potansiyelinin uygulanması ile yapılmaktadır. Sistemdeki reaksiyonların elektrokimyasal kinetiğinin nasıl değiştiğini gözlemlemek hedefiyle test süresince sabit potansiyelde akım, zamanın fonksiyonu olarak ölçülmektedir (Demirci 2014).



Şekil 12. a) Potansiyostatik tribokorozyon ölçümü şematik gösterimi, b) Örnek bir Potansiyostatik test ölçümü (Landolt 2011)

Şekil 12-b’de, Potansiyostatik Tribokorozyon testi sırasında zamana bağlı akım değişimi gösterilmektedir. Aşınmanın başlaması ile birlikte yüzeyde bulunan pasif filmin abrazyonu sonucu çözeltiye temas başlayan numunenin oksidasyonu sonucu akım değerlerinde artış meydana gelmektedir. Aşınma koşulları ortadan kalktığında ise metalin tekrardan pasifleşmesiyle beraber akım yeniden aşınma öncesi değerlere dönmeye başlamıştır (Mischler 2008). Genel olarak Tribokorozyon testlerinde tribometre cihazları istifade edilmektedir. Tribometre, elektrokimyasal teknikleri ve sürtünme kuvvetini ölçme olanağı sunan bir cihazdır (Demirci 2014).

Elektrokimyasal olguları ölçen kısım 3 elektrot parçasını ve bir potansiyostat cihazını kapsar. Bunlar; karşıt elektrot (grafit çubuk ya da platin tel gibi), referans elektrot (SHE ve SCE gibi) ve çalışma elektrotu (numune) olarak sisteme bağlanır (Mischler 2008).

Aşınma sırasında, ölçülen korozyon potansiyeli değerleri; taban malzemenin aşınma sonucu çözeltiye maruz kalan metal (aşınan bölge) ve pasif metalin (aşınmayan bölge) galvenik çift meydana getirmesinin etkisini yansıtmaktadır. Şekil 12-b de de geldiği üzere aşınmanın başlamasıyla beraber pasif filmin zarara uğraması neticesinde çözelti ile temas etmeye başlayan metal, oksidasyon sonucunda ani bir akım artışı oluşturmaktadır. Aşınma bittiğinde ise metalin tekrardan pasifleşmesi sonucu akım yeniden aşınma öncesi değerine düşmektedir (Demirci 2014).

Katı Yağlayıcılar

Endüstride enerji tasarrufu yapmanın ve ayrıca hareketli cihazların ömrünü uzatmanın bir yolu, hareketli parçalar arasındaki sürtünmeyi ortadan kaldırmaktır. Tribolojik uygulamaların bir çoğunda aşınma ve sürtünmeyi minimize etmek için, sıvı ve gres yağlayıcılar tercih edilmektedir. Fakat kullanım şartlarının zor olduğu durumlarda (düşük/yüksek sıcaklık, vakum, aşırı basınç altında vb.) aşınma ve sürtünmeyi kontrol altında tutabilmek için katı yağlayıcılar kullanılmaktadır. Birbirleriyle temas halinde olan iki farklı yüzeyin aşırı ısınma ve sürtünmesinden kaynaklanabilecek zararları önlemek için kullanılan yağlama çeşidi katı yağlamadır (Lansdown, 2004).

Katı yağlayıcılardan beklenen özellikler;

- Yüksek olmayan, durağan ve kontrollü sürtünme,
- Farklı sıcaklık derecelerinde kimyasal kararlılığın bozulmaması,
- Taşıyıcı malzemeye olumsuz bir etki vermemesi,
- Taşıyıcı malzemelere iyi adezyon sağlaması,
- Sürtünme ve aşınmaya karşı dirençli olması,

- Uygulanmasının kolay olması,
- Çevre dostu olması,
- Ekonomik açıdan avantajlı olması (Lansdown, 2004).

Yağlama ise; sürtünme direncini düşürmek ve aşınmaları azaltmak için tribofonksiyon yüzeylerine iç sürtünme direnci düşük malzeme (yağ) uygulaması olarak tanımlanmaktadır. Tribolojik problemleri önlemek için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Aşınma ve korozyon bir yüzey olayıdır. Buna rağmen, yüzey sürtünmesi ve aşınma kayıpları, tarih öncesi zamanlardan günümüze kadar önemli sorunlar ile varola gelmiştir. Bu sebeple, makine elemanlarının yağlanması, düşük sürtünme katsayısıyla enerji kaybının önlenmesini ve aşınma miktarının düşmesiyle çalışma ömrünün artırılmasını sağlamıştır. Fakat makine elemanlarının bazı çalışma şartları (yüksek sıcaklık, kroyejenik sıcaklıklar, vakum vb.) altında sıvı yağların kullanılarak yağlanması uygun olmamaktadır. Karşı yüzeyi koruyabilecek, aşınma direnci sağlayabilecek ve karşı yüzeyde transfer filmi oluşturabilecek yağlayıcılara gereksinim duyulmaktadır. Tribolojik uygulamalarda, sürtünme ve aşınmaya karşı çoğunlukla sıvı ve gres yağlayıcılar kullanılmaktadır. Fakat kullanım şartlarında (vakum, düşük veya yüksek sıcaklıklar, aşırı temas basınçları vb.) bu yağlayıcıların olumsuzluklarından dolayı tribolojik uygulamalarda sürtünme ve aşınmayı kontrol etmek için katı yağlayıcılar tercih edilmektedir. Nanopartiküller katı yağlayıcılar, sıvı ve gres yağlayıcıların içerisine eklendiğinde, birbirleri üzerinde kayan yüzeylerde sürtünme ve aşınma performanslarını artırıcı etkiler göstermektedir (Lansdown, 2004).

PEO ve PVD yöntemlerinde en çok kullanılan katı yağlayıcılar; molibden disülfür (MoS_2), grafit, hegzagonal bor nitrür (h-BN) ve borik asit gibi farklı inorganik malzemelerdir.

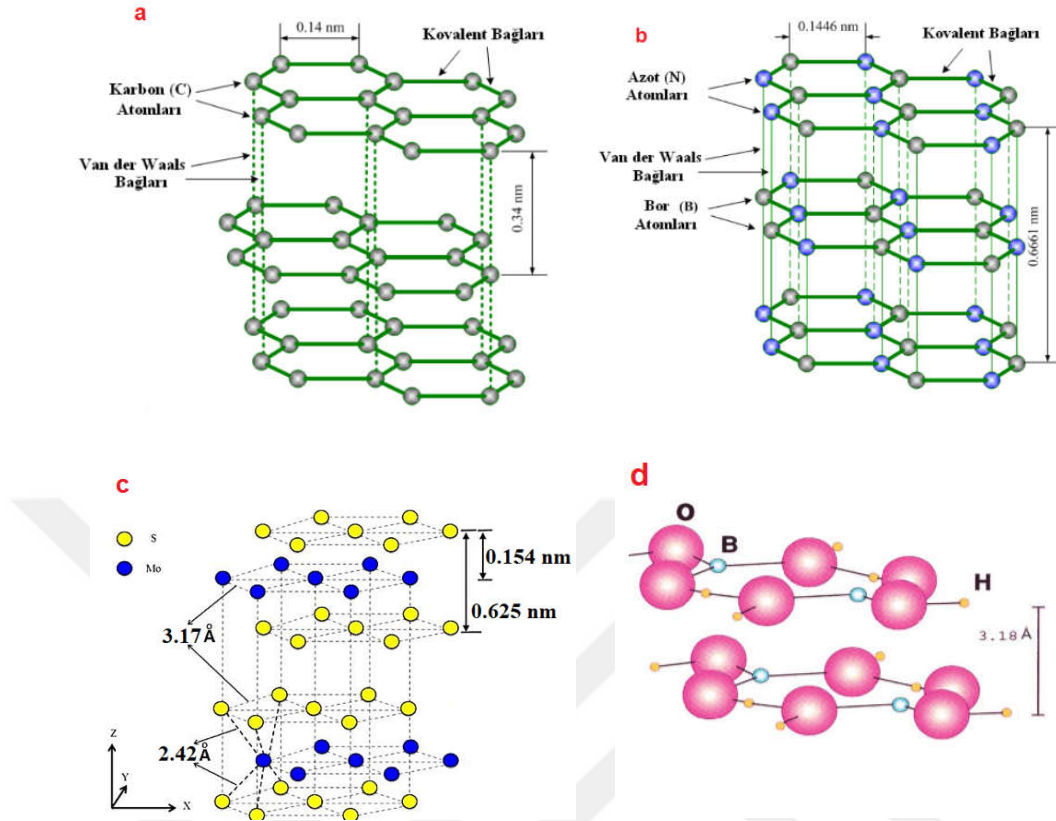
Katı yağlayıcılar ile sıvı ve gres yağlayıcıların birleşimi, birbirlerine temas eden yüzeylerin sürtünme ve aşınma performansına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle katı yağlayıcılar, aşırı sıcaklık ve yüksek basınç şartları altında aşınma ve sürtünme özelliklerini iyileştirmek için su, yağ ve gres içerisinde dağıtılmaktadır (Barnett 1976; Broman *et al.* 1978; Erdemir 1995; Kimura *et al.* 1999). Tablo 6'da tribolojik uygulamalarda kullanılan katı yağlayıcıların, sıvı ve gres yağlayıcılara karşılık önemli avantajları verilmiştir. (Donnet ve Erdemir, 2001)

Tablo 6. Tribolojik Uygulamalarda Katı ve Sıvı Yağlayıcıların Önemli Avantajları (Donnet ve Erdemir 2001)

Uygulama Ortamı ve/veya Durumu	Katı Yağlayıcılar	Sıvı ve Gres yağlayıcılar
Vakum	Geçiş metali çalkojenleri gibi bazı katılar yüksek vakumda iyi bir yağlayıcı olmakla beraber çok düşük buhar basıncına sahiptirler.	Çoğu Sıvılar buharlaşır, ancak Polialfaoletin (PAO) ve Perfloropolialkalieter (PFPE) iyi dayanıma sahiptir.
Basınç	Her türlü yüksek basınçlara karşı dayanıklıdır.	Bir takım ilaveler olmazsa çok fazla basınca tahammül edemeyebilirler.
Sıcaklık	Yüksek ve düşük ısılarda çalışabilirler. Kayma sebebiyle düşük ısı üretimi olmaktadır.	Yüksek sıcaklıklarda parçalanma ya da oksitlenme ihtimalleri vardır ve düşük sıcaklıklarda ise katılaşabilirler. Viskoziteye göre ısı üretimi değişmektedir.
Elektriksel İletkenlik	Katı yağlayıcıların bazısının kusursuz bir elektriksel iletkenliği vardır.	Genelde yalıtkan olmaktadır.
Radyasyon	Nükleer radyasyona karşı pek duyarlı değildir.	Zamanla parçalanabilir ya da bozulabilirler.
Aşınma	Sürtünme durumlarında ve düşük hızlarda aşınmaya karşı kusursuz bir performans ve dayanım sağlarlar. Aşınma hızı ile yağlayıcı film kalınlığı, ömrü belirlemektedir.	Sürtünme durumlarındaki ve düşük hızlardaki performansları ile aşınma dayanımları pek de iyi değildir. Sınır yağlama için ilavelere gereksinimleri vardır.
Sürtünme	Düşük sürtünme katsayıları olabilmektedir.	Viskozite; sıcaklık ile sınır filmlerine bağlıdır.
Termal İletkenlik ve Isı Kaybı Kapasitesi	Metalik yağlayıcılar için kusursuzdur ancak çoğu inorganik yada katmanlı katı için zayıf olmaktadır.	İyi
Depolama	Uzun süre depolanmaları mümkündür (Kalkojenler, oksijen ve neme karşı hassas ve duyarlıdır).	Depolama esnasında; kuruma, buharlaşma, sürtünme malzeme göçü müşahade edilebilir.
Tribolojik Yüzeylerle Uyumluluk	Al, Ti, Paslanmaz çelik ve seramikler gibi yağlanması zor yüzeylere uyum sağlamaktadır.	Seramik ya da demirdışı yüzeylerde kullanılmaya elverişli değildir.
Sulu ve Kimyasal Ortamlara Direnç	Kimyasal çözücülere, sulu ortamlara, bazı asitlerle, bazlara ve yakıtlara karşı duyarsızdır.	Özelliği;sulu ve asidik ortamlardan etkilenerek değişim gösterebilir.

Hareketli ara yüzeylerde katı yağlayıcılar diğer yağlayıcılarla aynı faydayı sağlamaktadır. Katı yağlayıcıların kayganlık özelliğinin fazla oluşu birbirine temas eden yüzeylerin sürtünme oranını düşürür ve aşınmadan doğabilecek hasarı azaltır. Çeşitli inorganik malzemeler ve tabakalı kristal yapıları katı yağlayıcılar; molibden disülfür, grafit, hekzagonal bor

nitrür, borik asit vb. mükemmel yağlama sağlarlar. Şekil 13'te bu katıların tabakalı kristal yapıları gösterilmiştir (Lansdown 1999; Erdemir 1994; Donnet ve Erdemir, 2001)



Şekil 13. Tabakalı katı yağlayıcıların kristal yapılarının şematik gösterimi

a) Grafit b) Hegzagonal bor nitrür c) Molibden disülfür d) Borik asit (Erdemir 1994; Öz et al., 2016)

Şekil 13'te gösterildiği üzere, bu lamelerin kristal yapıları incelendiğinde, her bir tabakadaki atomları bir arada tutan kuvvetler güçlü kovalent bağdır. Bununla birlikte tabakalar arasındaki bağlanma ise zayıf van der Waals bağıdır. Bu zayıf bağlanmaya bağlı olarak düşük sürtünme direnci ve bunun sonucu olarak yağlayıcı özelliği sağlanmış olur. (Winer 1967; Farr 1975; Erdemir 2001). Kendinden yağlayıcı özelliğe sahip dikalkojenidlerin sürtünme katsayıları kuru ve inert atmosferlerde 0,002–0,05 aralığındayken, nemli havada bu değer hızlı bir şekilde 0,2'ye yükselmektedir. Bu durumdan da anlaşılacağı üzere katı yağlayıcıların sürtünme ve aşınma özellikleri, çalışma ortamı ve test şartlarına doğrudan bağlıdır (Erdemir 2001).

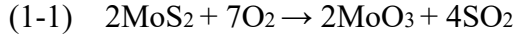
Molibden Disülfit (MoS_2);

Molibden disülfür (MoS_2), son yıllarda en yaygın lameli katı yağlayıcı olarak (özellikle uzay çalışmalarında) farklı yöntemler ile aşındırıcı yüzeylere kullanılarak uygulanmıştır.

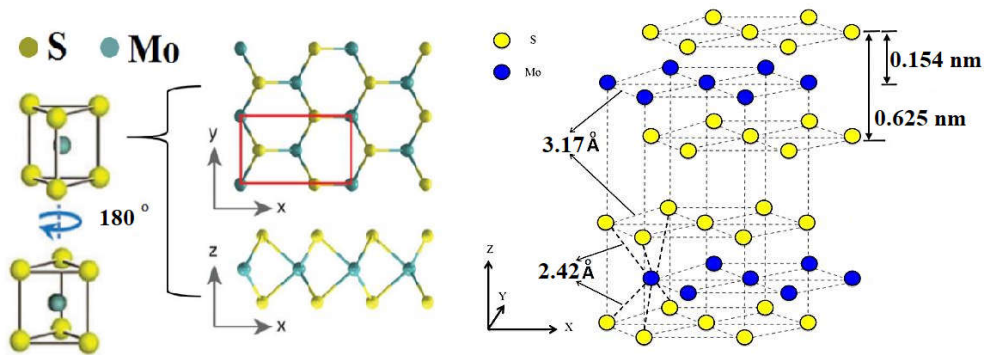
Ortam sıcaklıklarında katı yağlayıcıların yağlama özellikleri değişir ve büyük bir etkiye sahip olur. MoS_2 400°C'ye kadar yağlama özelliğini korurken, bu sıcaklık Grafit 400°C, h-BN

1000°C ve WS₂ 500°C'ye kadar yağlama sağlayabilir (Erdemir *et al.* 1990; Ghorbanian *et al.*, 2020; İmece *et al.*, 2018; Lin *et al.*, 2021; Maillat *et al.* 1993; Sliney 1982).

MoS₂ farklı ortamlarda 315°C'nin üzerindeki sıcaklıkta, aşağıdaki 1-1 reaksiyonuna göre oksitlenir ama bu kaplama bir yağlayıcı olarak, oksijensiz veya kuru havada 700°C'ye kadar iyi yağlayıcılık özelliği sağlamaktadır. Ayrıca eğer nemli hava ile reaksiyona girerse, sülfüroksit ve sülfirik asit tabakası oluşturur (1-2 reaksiyonu) ve bu yüzden metal ve alaşımlarında korozyona uğrar.



Molibden disülfürün oksit kaplamaları Molybdenum trioxide (MoO₃) ve sülfür dioxidleridir. Molibden Disülfürün (MoS₂), kesme gerilimi 25 Mpa'dır ve bundan yapılan kaplamanın sertliği yaklaşık 400 HV'dir. Ama kaplama esnasında ona bazı unsurlar ekleyerek, sertlik oranı 1000-2000 HV'e yükselmektedir (Renevier *et al.* 2000). Bazal düzlemler arasındaki kayma direnci çok küçük olduğu için sürtünme katsayısı normal hava da yaklaşık 0,1 dir. Takım çeliği yüzeyine büyüyen MoS₂ kaplaması, sürtünme katsayısının 0/8'den 0/02'ye (az uygulanan yüklerde 0/1 -2N) düşmesine sebep olmaktadır (Booser 2010). Şekil 14'de molibden disülfürün kristal yapısı (hekzagonal tabakalı) verilmiştir. MoS₂ yağlayıcı kaplamalarının kusurlarından biri ise; şiddetli kayma koşullarında az ömürlü olması ve zayıf aşınma direncidir. S-Mo-S sandviç düzlemleri arasındaki zayıf Van der Waals kuvvetleri nedeniyle, bu tabakalar aşınma sırasında sürekli olarak birbirini üzerinde kaymakta ve bunların bağlantı direnci giderek daha da zayıflamaktadır. Bu yüzden, daha fazla aşınma mesafelerinde lamellerin birbirinden ayrılmasına sebep olmaktadır.



Şekil 14. MoS₂'nin kristal yapısı (Renevier *et al.* 2000)

Katı yağlayıcıları yağlayıcı özelliklerine, kristal yapılarına ve kimyasal yapılarına göre Tablo 7'de sınıflandırılmıştır (Erdemir 2001).

Tablo 7. Katı Yağlayıcıların Sınıflandırılması ve Karakteristik Sürtünme Katsayıları (Erdemir 2001).

Sınıflandırma	Örnekler	Karakteristik Sürtünme Katsayısı Oranları
Tabakalı katılar	MoS ₂	0,002-0,25
	WS ₂	0,01-0,2
	h-BN	0,150-0,7
	Grafit	0,07-0,5
	Grafit florid	0,05-0,15
	H ₃ BO ₃	0,02-0,2
	GaSe, GaS, SnSe	0,15-0,25
Yumuşak metaller	Ag	0,2-0,35
	Pb	0,15-0,2
	Au	0,2-0,3
	In	0,15-0,25
	Sn	0,2
Karma oksitler	CuO-Re ₂ O ₇	0,3-0,1
	CuO-MoO ₃	0,35-0,2
	PbO-B ₂ O ₃	0,2-0,1
	CoO-MoO ₃	0,47-0,2
	Cs ₂ O-MoO ₃	0,18
	NiO- MoO ₃	0,3-0,2
	Cs ₂ O-SiO ₂	0,1
Yalnız Oksitler	B ₂ O ₃	0,15-0,6
	Re ₂ O ₇	0,2
	MoO ₃	0,2
	TiO ₂	0,1
	ZnO	0,1-0,6
Toprak alkali metallerin halojen ve sülfatları	CaF ₂ , BaF ₂ , SrF ₂ CaSO ₄ , BaSO ₄ , SrSO ₄	0,2-0,4
		0,15-0,2
Karbon esaslı katılar	Elmas	0,02-1
	Elmas benzeri karbon	0,003-0,5
	Camsı karbon	0,15
	Karbon nanotüp	-
	Fuleren	0,15
	Karbon-karbon ve karbon-grafit esaslı kompozitler	0,05-0,3
Organik malzemeler/polimerler	Çinko sterat	0,1-0,2
	Vaks	0,2-0,4
	Sabun	0,15-0,25
	PTFE	0,04-0,15
Bulk veya kalın kompozit film (>50 µm)	Grafit, WS ₂ , MoS ₂ , Ag, CaF ₂ , BaF ₂ içeren metal, polimer ve seramik matrisli kompozit	0,05-0,4
İnce kompozit film (<50 µm)	Yağlayıcı olarak PTFE, grafit, elmas, B ₄ C partikülleri içeren elektrolizle kaplanmış Ni ve Cr filmler	0,1-0,5
	MoS ₂ , Ti, DLC içeren nanokompozit veya çoklu tabakalı kaplamalar	0,05-0,15

Tablo 7’de görüldüğü gibi verilen katı yağlayıcıların sürtünme katsayı aralıkları oldukça geniştir. Bu da sürtünmenin çalışma şartlarına ve ortamlarına bağlıdır. Kullanılan taban malzemelerin cinsi ve ortam sıcaklığı büyük ölçüde katı yağlayıcıların sürtünme özelliklerini etkiler. Katı yağlayıcıları genellikle, toz, ince film, kompozit, bulk ve amorf olarak tanınmaktadır ve bunların türleri de sürtünme katsayısını etkiler (Erdemir 2001).

PEO yöntemiyle yapılan kaplamaların özelliklerini etkileyen en önemli parametre, kullanılan elektrolit bileşimidir. Bu çalışmada, katı yağlayıcı özelliğe sahip molibden disülfid (MoS_2) nanopartiküller içeren bir standart elektrolit içerisine eklenmiştir. PVD yönteminde de MoS_2 filmi, sert katı yağlayıcı olarak kullanılmıştır.

Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) Yöntemi

Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO), hafif metaller için yeni bir yüzey modifikasyon tekniğidir. PEO tekniğinin gelişimi, Gunterschultze ve Betz tarafından 1934 yılında yüksek gerilim altında metal elektrotlar üzerindeki kıvılcım deşarjı araştırılmasıyla başlamış ve 1970’li Rusya’da somutlaşarak diğer ülkelerde de kullanılmaya başlandı. PEO taban malzemenin yüzeyini oksit seramik tabakayla kaplayan bir elektrokimyasal dönüştürme işlemidir. Uygulanabilirliği, düşük maliyeti ve çevre dostu olması nedeniyle hafif metallerin oksit seramik kaplamalarda kullanılması büyük fayda sağlamaktadır (Güntherschulze et al. 1934).

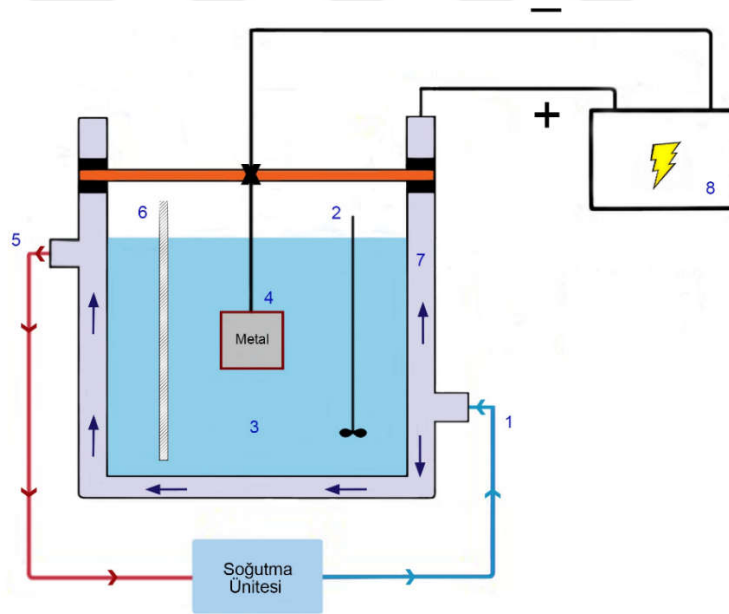
Hafif metaller ve alaşımları (hava ile temas ettiğinde yüzeyde yarı iletken oksit filmler oluşturan alaşımlar) son yıllarda en çok kullanılan kaplama malzemelerindendir. Alüminyum, titanyum, magnezyum ve alaşımları, yüksek dayanım/ağırlık oranı, yüksek ergime noktası v.s özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv, kimya ve medikal sektörlerinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Yılbas *et al.* 1996).

PEO prosesinde kullanılan elektrolitler asidik yerine alkaliyle değiştirilerek yöntemin araştırma artışına olumlu katkı sağlamıştır. Bu sayede, PEO yöntemin tanınırlığı artarak diğer ülkelerde bu yöntem üzerinde araştırmalar yapılmasına sebep oldu. Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemi ayrıca Micro arc oxidation (MAO) yöntemi olarak da adlandırılmaktadır (Yerokhin *et al.* 1999). PEO, bir elektrokimyasal prosesi olduğu için mikro plazma deşarjlarının oluşumuyla metal yüzeylerde anodik oksit kaplama oluşturan bir yöntemdir. Yüksek voltaj aralığında (400-800V) meydana gelen mikro plazma deşarjlarının, termal iyonizasyonla başlatılan elektronik yoğunluğun sonucu olarak başlamıştır) Funatani 2000; Dong 2010; Mirelman *et al.* 2012; Li *et al.* 2013; Dehnavi 2014).

PEO işlemi, geleneksel anodizasyon (10-50V) ile kıyasla daha yüksek potansiyellerde ve akım yoğunluklarında çalışır. Anodizasyon yöntemi bu alaşımların yüzey modifikasyonunda

önemli bir yere sahiptir. Ancak korozyon ve aşınmaya karşı etkili koruma sağlayamamasının yanında çevre için zararlı asit esaslı çözeltiler ile hazırlanması bu yöntemin kullanılmasında dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca, yüzey iyileştirme yöntemlerinden olan plazma elektrolitik oksidasyon (PEO), hafif alaşımlar üzerinde önemli sonuçları ortaya çıkarmıştır. Bu yöntemle yapılan kaplamalar, bir çok konuda diğer yöntemlere göre daha iyi performans göstermiştir. Bu da mekanik özelliklerden beklenen kombinasyonun oluşumunda yine aynı şekilde aşınma ve korozyon direncinin yanı sıra biyoyumluluğun da oluşumlarında etki etmiştir.

Şekil 15'te PEO ünitesinin şematik olarak gösterimi verilmiştir. Güç kaynağı (doğru akım (DC) veya alternatif akım (AC)), elektrolit banyosu (paslanmaz çelik - katot görevi), numune (anot görevi), soğutma sistemi elektrolit karıştırıcından oluşmaktadır. Doğru akım (DC) veya alternatif akım (AC) güç kaynakları kullanılarak paslanmaz çelik bir banyo içerisinde homojenliği sağlamak için devamlı karıştırılan bazik bir çözelti aracılığıyla kaplama prosesi yapılmaktadır. Taban malzeme yüzeyinde, yüksek voltaj ile beraber oluşan mikro-plazma deşarjlar çözelti sıcaklığının artmasına yol açtığından dolayı paslanmaz çelik banyo etrafından soğuk su geçirilmektedir. (Yerokhin *et al.* 1999; Curran 2011; Li *et al.* 2013).



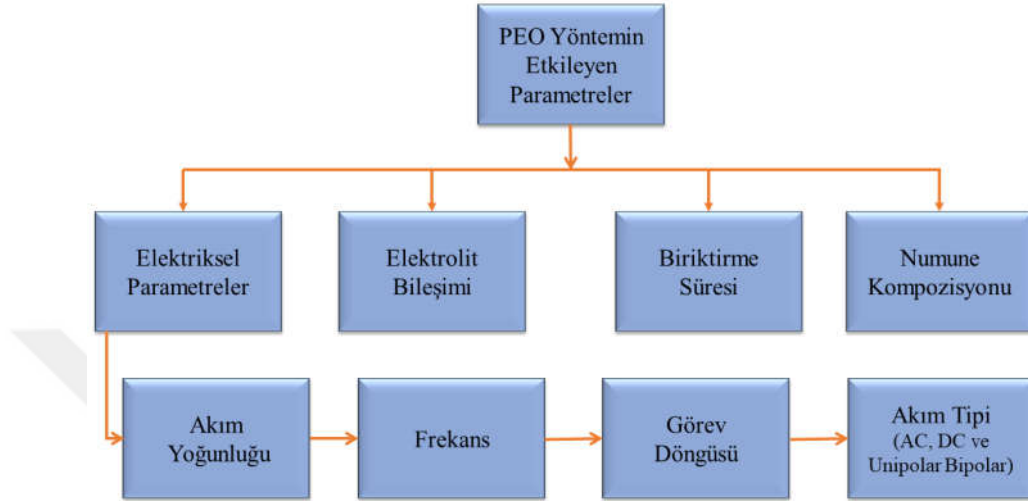
1. Soğutma su girişi	3. Elektrolit	5. Soğutma suyu çıkışı	7. Paslanmaz çelik (Katot)
2. Karıştırıcı	4. Numune (anod)	6. Termometre	8. Güç kaynağı ünitesi

Şekil 15. Plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yönteminin şematik gösterimi

PEO yöntemi ile yapılan yüksek kalitedeki kaplamalarda minimum aşınma, maksimum korozyon direnci, iyi elektriksel direnci, mükemmel adezyon, yüksek sertliğe sahip ürünler elde edilmektedir. Sünek bir malzeme seçilerek üretilen makine elemanları üzerine büyütülen sert

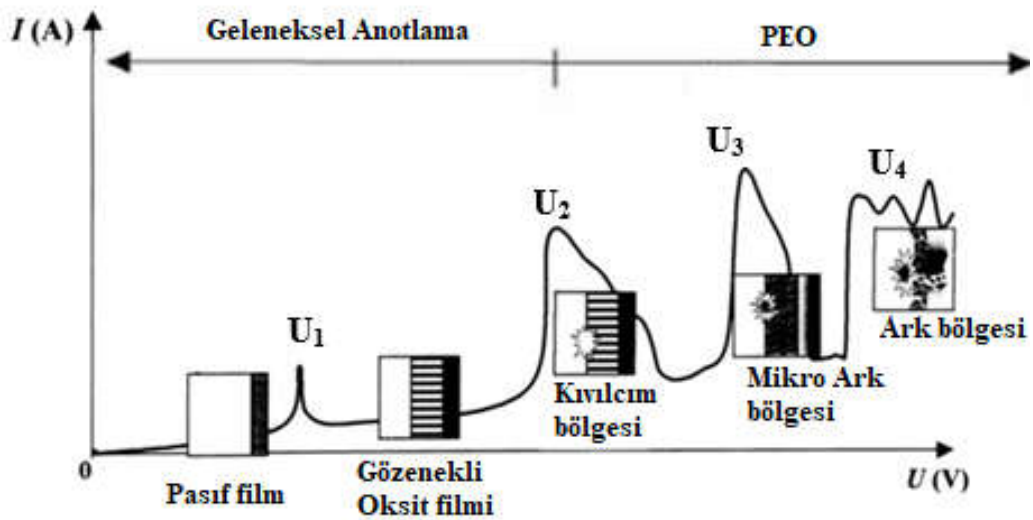
filmler taban malzeme üzerinde plastik deformasyonun oluşmasına ve kaplamanın kırılmasıyla birlikte malzemenin fonksiyonel özelliklerini kaybetmesine neden olur.

PEO yöntemiyle iyi kaplamalar büyütmek için elektrolitin konsantrasyonu, bileşimi ve elektriksel parametreler önemlidir. Şekil 16’da PEO yöntemini etkileyen iç ve dış önemli parametreler gösterilmiştir (Yerokhin *et al.* 1999; Jiang and Wang 2010).



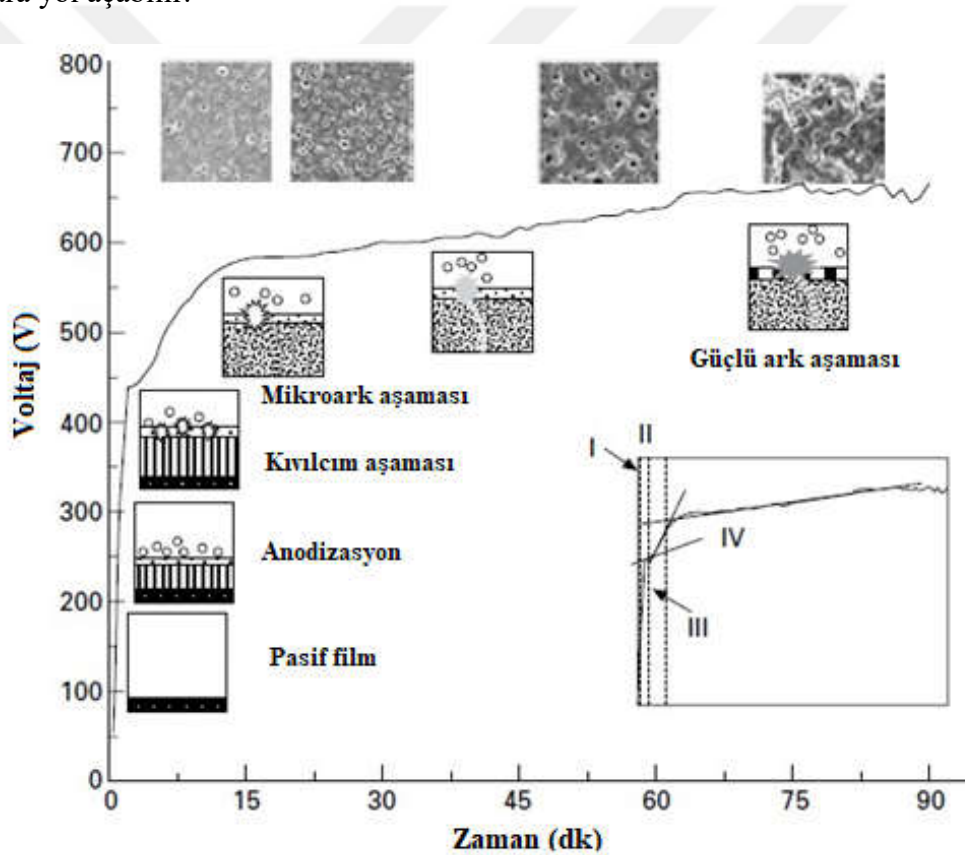
Şekil 16. PEO yöntemini etkileyen parametreler (Dehnavi 2014)

Şekil 17’de, Yerokhin ve arkadaşları tarafından önerilen PEO yöntemiyle sabit akım modunda büyüyen oksit kaplamaların işlemi sırasında elektrokimyasal sistemin karakteristik akım-voltaj davranışını gösterilmiştir. Aşağıdaki şekilde, PEO yönteminin deşarj olayları dört aşamada gösterilmektedir (Yerokhin *et al.* 1999).



Şekil 17. PEO işlemi sırasında deşarj olayı için Akım- voltaj diyagramı (Yerokhin *et al.* 1999).

Geniş bir voltaj aralığında metal numune yüzeyinde meydana gelen deşarj olaylarından, büyüyen oksit film U1'de zirve, ohm kanununa uygun davranış göstermektedir ve pasif filmin çözülmeye başladığı noktayı gösterir. Voltaj artmaya devam ettikçe U1 - U2 aralığında, yüzey boyunca gözenekli oksit film büyümesinin bir sonucu olarak akım düşer. U2 noktasında, oksit filmdeki elektrik alan kuvveti kritik bir değere ulaşır ve bunun ötesinde, atomlar üzerindeki darbe nedeniyle film kırılır ve elektriksel çığ kırılması meydana gelir. Bu geleneksel anodizasyon sonunu işaret eder ve voltajdaki daha fazla artış, kıvılcım aşaması başlayacaktır. U3 noktasında, darbe iyonizasyon mekanizması, termal iyonizasyon işleminin başlamasıyla desteklenir ve kısa ömürlü ama daha büyük ark deşarjları gözlemlenir. U3-U4 aralığında, kalınlaşan oksit filminin büyük bölümünde negatif yük oluşur ve bu da deşarjın azalmasına neden olur. U4'te mikro-ark deşarjı güçlü bir ark halini gösterir ve kaplamanın termal çatlaması gibi hasara yol açabilir.



Şekil 18. PEO yöntemi sırasında geliştirilen kaplama mikroyapısı ile geçici gerilim şeması (Wang et al. 2010).

Şekil 18'de gerçekleşen plazma oksidasyon işleminin dört değişik aşamaları; I. Anodlama, II. Anodlama ve anodik çözünme, III. Anodlama, anodik çözünme ve oksijen çıkışı, IV. Mikro ark oluşumu olarak gösterilmektedir (Snizhko and Matthews 2004; Wang et al. 2010).

Özetle, işlemin aşamalarında (Bölge I), anodik şekillendirme voltajı zamanla hızlı şekilde artar ve bu daha önce belirtildiği gibi anodizasyon aşamalarındandır. Bundan sonra voltaj büyüme oranı azalmaya başlar (Bölge II), bu da kaplama büyümesi ile çözünme arasındaki rekabeti gösterir. Voltaj aralığında gözle görülen kıvılcımlar ortaya çıkar. Voltaj yükselmeye devam ettikçe (Bölge III), eşik voltaj aralığını geçer ve yüzeyde mikro bölgesel kararsızlığa neden olur. Bölge IV'te voltaj sabit hale gelir ve mikro ark aşamasıyla ilişkilendirilir. Oksidasyon prosesi devam ettiğinde, voltaj bozulması gözlemlenebilir, bu da güçlü ark fazını gösterir.

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi

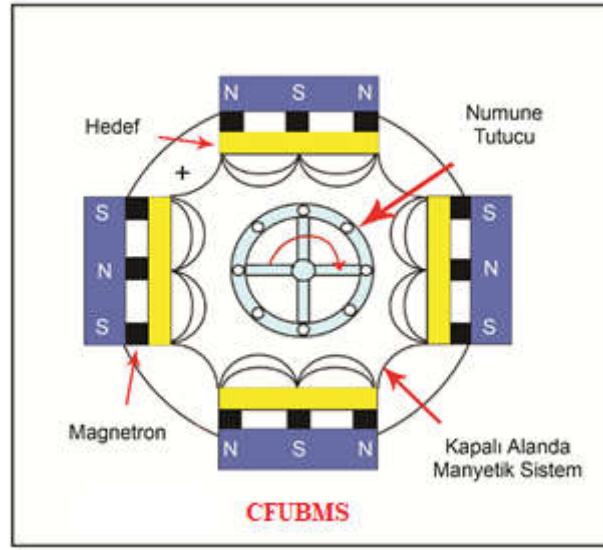
Son yıllarda çok yüksek sertliğe sahip ince filmlerin kaplanması ve özellikle makine elemanlarının tribo ve tribokorozyon davranışlarını iyileştirmek için Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemini özelinde pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu yöntemde, malzeme fiziksel olarak katı veya sıvı bir kaynaktan buharlaştırılır, düşük basınçlı gaz veya vakum ortamından buhar şeklinde taban malzeme üzerinde ince bir tabaka halinde yoğunlaşma prosesidir. Bu yöntem endüstride ve araştırmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde kimyasal reaksiyon meydana gelmez ve yüksek verimliliğe sahiptir. Bu yöntem ile, tungsten gibi yüksek ergime noktasına sahip elementler dışında hemen hemen tüm elementler kaplanabilir. Ayrıca birkaç angstromdan birkaç mikrona kadar kalınlıkta kaplamalar da bu yöntemle uygulanabilir.

PVD prosesi üç farklı yöntemle yapılmaktadır. Bunlar; buharlaşma, sıçratma ve iyon yöntemidir. Bu yöntemde taban malzemeler, bir kaynağın yüksek enerji ile bombardımanı ile buhar fazında fiziksel olarak yapılır (Martin 2010).

PVD yöntemi, araştırma ve endüstride diğer MoS₂ kaplama yöntemlerinden daha fazla çalışılmış ve kullanılmıştır. Daha iyi proses kontrolü, kaplamanın düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilme olasılığı ve kaplamanın homojenliği bu yöntemin benzersiz özellikleridir. Ayrıca kaplama işleminin parametreleri değiştirilerek kaplamanın yapısı ve özellikleri kolaylıkla kontrol edilebilir. PVD yönteminin ortak süreçleri arasında, şimdiye kadar MoS₂ biriktirme için manyetik alanda sıçratma yöntemi daha çok kullanılmıştır.

Manyetik alanda sıçratma yöntemi ilk olarak 1852'de Grove tarafından önerildi ve sonraki yıllarda çeşitli uygulama alanlarında gelişmeyi başardı. 1990 yılında, bu yöntem Langmuir (Nobel Ödülü sahibi) tarafından ince film kaplamalar için kullanıldı, elektrik deşarjını kullanarak gümüş ince tabakayı soğuk bakır katot üzerine kapladı. Şekil 19'da manyetik alanda sıçratma tekniğin şematik gösterimi verilmiştir (Kelly and Arnell, 2000).

2018). Dengesiz manyetik alanda sıçratma işleminde yapılan kaplamaların özelliklerini iyileştirmek için, kaplamaların büyümesi sırasında iyon bombardımanının kontrolü, taban malzeme seçimi ve düşük sıcaklık gibi parametreler etkili olabilmektedir. Bu tekniğinin en geliştirilmiş hali Kapalı Alan Dengesiz Manyetik Alanda Sıçratma (CFUBMS) kaplama yöntemidir. Bu yöntemde iki veya daha fazla dengesiz manyetik alanlar aynı/zıt kutuplar karşılıklı (ayna görüntüsü/kapalı alan) yerleştirilerek, çiftli manyetik kapalı alan oluşturulmuştur. (Şekil 21) (Bunshah et al. 1977; Pranevicius 2007; Mohammed et al. 2012; Ao et al. 2016).



Şekil 21. CFUBMS sisteminin manyetik alan tasarımının şematik gösterimi (Teer, 1991)

MoS₂ kaplamaları; düşük sürtünme katsayılarına rağmen, zayıf mekanik özelliklerinden dolayı (düşük sertliği olmak üzere) iyi bir aşınma direncine sahip değildir. Diğer taraftan, MoS₂'nin nispeten düşük oksidasyon direnci nedeniyle, ortam havasında yüksek hızda aşınma veya yüksek nemde düşük aşınma hızı koşullarında, tribolojik özellikleri önemli ölçüde azalır ve böylece etkinliğini hızla kaybeder. Bu nedenle günümüzde bu kaplama, sektörün ihtiyaçlarını tek başına karşılayamamaktadır.

MoS₂ kaplamalarının özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla son yıllardaki çalışmalar kaplama yöntemlerinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Araştırmacılar farklı yöntemlerle, yüksek kaliteli MoS₂ nanokompozit kaplamaların geliştirilmesiyle bu kaplamaların kullanımı her geçen gün daha da artmakta olduğunu ifade etmektedirler. Bu çalışmada; uniform ve kararlı MoS₂ yağlama özelliklerine sahip nanokompozit kaplamalar, Taguchi L₄ deney planını seçerek, farklı iki kaplama yöntemi ile (PEO ve PVD), AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeler üzerine (mekanik, tribolojik özelliklerinin ve tribokorozyon davranışlarının iyileştirilmesi için) büyütülecektir.

İlk aşamada Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemi kullanılarak katı yağlayıcı özelliğe sahip molibden disülfid (MoS_2) nanopartiküller içeren bir standart elektrolit içerisinde $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalar ile büyütülmüş ve ikinci aşamada ise aynı taban malzemeler, Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemi kullanılarak MoS_2 ve Ti filmleri; AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeler üzerine kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) tekniğiyle kaplanmış ve bu nanokompozit kaplamaların yüzey, yapısal, mekanik, tribolojik özellikleri ve tribokorozyon davranışları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.



MATERYAL ve YÖNTEM

Taban Malzemesi ve Kaplama Öncesi Yüzey Hazırlıkları

Bu çalışmada, AA2014 ve Cp-Ti alaşımlarının mekanik, korozyon, tribolojik ve tribokorozyon davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla, farklı iki kaplama yöntemi ile taban malzemeler kaplanmıştır. İlk aşamada Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemi kullanılarak katı yağlayıcı özelliğe sahip molibden disülfid (MoS_2) nanopartiküller içeren bir standart elektrolit içerisinde $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ kaplamalar büyütülmüştür. İkinci aşamada ise aynı taban malzemeler üzerine fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemlerinden kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) kullanılarak MoS_2 -Ti kompozit kaplamalar büyütülmüştür. Kaplamaların yüzey, yapısal, mekanik, korozyon, tribolojik özellikleri ve tribokorozyon davranışları incelenmiştir. Kaplama parametrelerinin optimizasyonu için farklı seviyelerde Taguchi L_4 deney planı seçilmiştir.

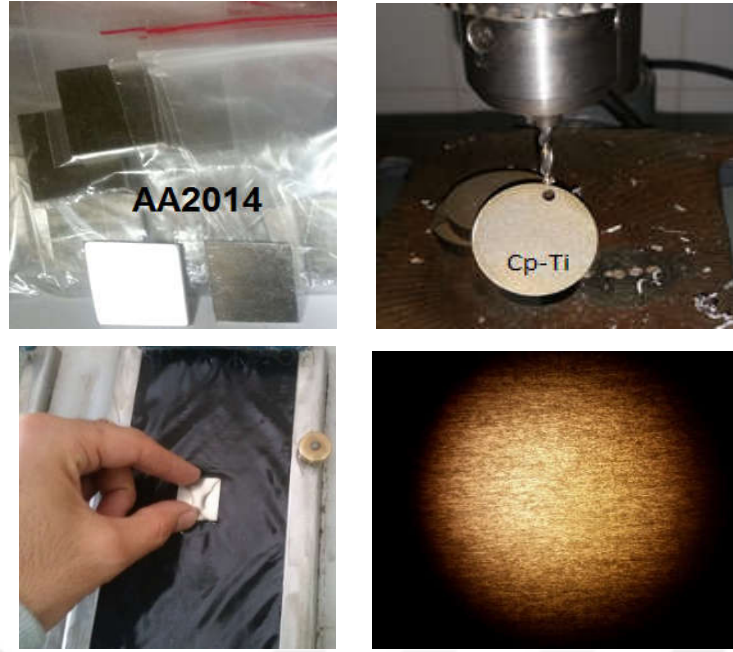
Çalışmamızda kullanılan taban malzemeler AA2014, 20 x 20 x 10 mm ve Cp-Ti, 30 x 5 mm boyutlarında kesilerek hazır hale getirilmiştir. AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerin yüzeyi sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh SiC zımparalar ile parlatılmış ardından numuneler alkolle temizlenerek sıcak hava ile kurutulmuştur. Kullanılan taban malzemeler şekil 22’de ve onların kimyasal bileşimleri Tablo 8’de ve Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 8. AA2014 Taban Malzemesinin Kimyasal Bileşimi

wt. %	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Al
AA2014	4.68	0,74	0,45	0,16	0,23	Bal.

Tablo 9. Cp-Ti Taban Malzemesinin Kimyasal Bileşimi

wt. %	C	Fe	H	N	O	Ti
Cp-Ti	0,1	0,3	0,015	0,03	0,25	Bal.



Şekil 22. AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeler

Kaplama Prosesi

Bu çalışmada, AA2014 ve Cp-Ti alaşımlarının mekanik, tribolojik özelliklerinin ve tribokorozyon davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla, farklı iki kaplama yöntemi ile taban malzemeler kaplanmıştır. İlk aşamada Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemi kullanılarak katı yağlayıcı özelliğe sahip molibden disülfid (MoS_2) nanopartiküller içeren bir standart elektrolit içerisinde $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalar ile büyütülmüştür. İkinci aşamada ise aynı taban malzemeler üzerine fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemlerinden kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) kullanılarak MoS_2 -Ti kompozit kaplamalar büyütülmüştür. Kaplama parametrelerinin optimizasyonu için farklı seviyelerde Taguchi L_4 deney planı seçilmiştir. PEO işlemini etkileyen kaplama parametreleri; PEO işlemi için süre, frekans, voltaj değerleri ve elektrolit çözeltisi (standart çözelti+ MoS_2 nanopartikül), PVD işlemi için ise MoS_2 ve Ti alaşım filmler hedef kullanılarak; akım, çalışma basıncı ve taban malzeme gerilim değerleri olarak belirlenmiştir.

PEO yöntemi ile $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve MoS_2 -Ti kaplamaların Büyütülmesi

AA2014 ve Cp-Ti alaşımları üzerine katı yağlayıcı özelliğe sahip nanopartikül içeren kaplamalar büyütülebilmesi için plazma elektrolit oksidasyon (PEO) yöntemi ile farklı parametre ve seviyelerde standart elektrolit içerisinde MoS_2 partikülleri kullanılmıştır. Bu işlem için kullanılan PEO sistemi (Faraday Micro Arc Oxidation Generator) Şekil 23'te gösterilmiştir.



Şekil 23. PEO kaplama sistemi

Kontrol edilebilen parametrelerin optimum değerlerini belirlemek için Taguchi L₄ deney planı seçilmiştir. Prosesi etkileyen kaplama parametreleri (süre, frekans, voltaj) üç farklı seviyede ve MoS₂ ilave edilmiş elektrolit içerisinde gerçekleştirilmiştir. Uygulanan deney planı Tablo 10’da, İlgili parametre ve seviyeleri ise Tablo 11’de gösterilmiştir.

Tablo 10. PEO Kaplama Prosesi İçin L₄ Ortogonal Dizi Deney Planı

Değişken Parametreler			
Deney No	Süre	Voltaj	Frekans
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Tablo 11. PEO Kaplama Parametrelerine Ait Detaylı Bilgiler

Değişken Parametreler			
Deney No	Süre(dk)	Voltaj(V)	Frekans(Hz)
1	5	500	50
2	5	550	250
3	15	500	250
4	15	550	50

PEO işleminde kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini gözlemleyebilmek amacıyla her deney farklı parametrelerde Al2014 ve Cp-Ti taban malzemeler için iki defa tekrar edilmiştir. PEO yönteminde kullanılan elektrolit çözeltisi olarak 1lt saf su içerisinde; 4gr/l MoS₂ ilave edilen 4gr/l KOH, 16gr/l Na₂SiO₃ ve 12gr/l NaPO₂H₂ kullanılmıştır (Şekil 24).



Şekil 24. PEO işleminde kullanılan elektrolitlerin hazırlanması.

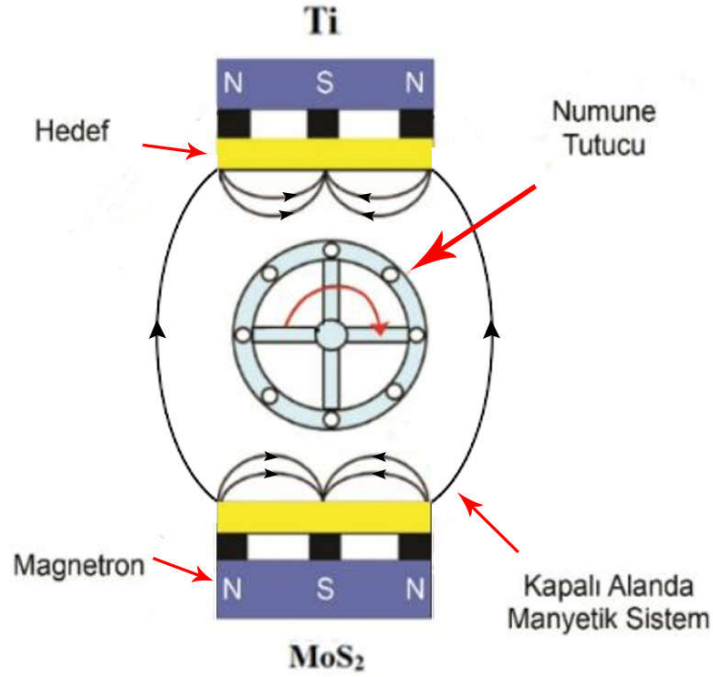
PEO yöntemiyle yapılan tüm kaplamalarda, anot (numune) ve katot (Paslanmaz çelik tank) ve bipolar modda AC güç kaynağı kullanılmıştır. İşlem süresinde elektrolit sürekli olarak karıştırılmıştır ve elektrolit sıcaklığının 30°C de sabit tutulması için soğutma sistemi kullanılmıştır. PEO işlemi bittikten sonra kaplamalar saf su ile yıkanmış ardından alkolle temizlenip sıcak hava ile kurutulmuştur.

CFUBMS yöntemi ile MoS₂-Ti kaplamaların Büyütülmesi

Kaplama işlemi Şeki25’de ve Şeki26’da şematik olarak gösterilen, Teer Coating Ltd. tarafından üretilen Kapalı Alan Dengesiz Manyetik Alanda Sıçratma Sistemi (CFUBMS) ile gerçekleştirildi. Kaplama işleminde 1 adet Ti ve 1 adet MoS₂ hedefler kullanılmıştır. İnert gaz olarak Argon (Ar) ve reaktif gaz olarak azot (N₂) kullanıldı. Kaplama işleminden önce hedeflere inert gaz ile sıçratma yapılarak yüzey temizliği yapıldı.



Şekil 25. Teer Coatings, PVD sistemi



Şekil 26. Teer CFUBMS sistemi (Teer, 1991)

CFUBMS kaplama işleminde de PEO kaplama işleminde olduğu gibi kontrol edilebilen parametrelerin optimum değerlerini belirlemek için Taguchi L₄ deney planı seçilmiştir. Prosesi etkileyen kaplama parametreleri; akım, çalışma basıncı ve taban malzeme gerilimi olarak seçilmiştir ve parametrelere ait detaylı bilgi Tablo 12’de ve Tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 12. PVD Kaplama Prosesinde Kullanılan Deney Parametreleri

Değişken Parametreler			
Deney No	Akım	Taban Malzeme Gerilimi	Çalışma Basıncı
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Tablo 13. PVD Kaplama Prosesinde Kullanılan Parametreler

Değişken Parametreler			
Deney No	Akım (A)	Taban Malzeme Gerilimi (-V)	Çalışma Basıncı Pa
1	0,6	50	0,26
2	0,6	100	0,33
3	0,9	50	0,33
4	0,9	100	0,26

XRD ve SEM Çalışmaları

PEO ve PVD yöntemleriyle büyütülen nanokompozit kaplamaların, yapısal özelliklerini incelemek için, $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip Cu-K α kaynaklı Rigaku- 2000D/Max XRD (X ray diffraction) cihazı kullanılarak yapıldı (Şekil 27). XRD ölçüm değerleri, $2\theta=10-90^\circ$ aralığında tarama ve 2.5°dak^{-1} de elde edilerek, kaplamalardan elde edilen kırınımilar sonucunda ortaya çıkan grafikler, mevcut XRD standart ICDD (International Centre for Fiffraction Data) pik listeleriyle kıyaslanarak değerlendirildi.



Şekil 27. X ışını kırınım ölçer

PEO ve PVD yöntemleriyle büyütülen nanokompozit kaplamaların, mikro yapısı, kalınlığı ve aşınma izleri Taramalı Elektron Mikroskop (ZEISS-Gemini-Sigma 300 -SEM, Şekil 28) ile incelendi.



Şekil 28. Taramalı elektron mikroskop

Çizik (Scratch) Testi

PEO ve PVD yöntemleriyle büyütülen nanokompozit kaplamaların, kaplama ile taban malzeme ara yüzeyindeki adezyonunu belirlemek için CSM Instruments tarafından üretilen Revetest scratch test cihazı (Şekil 29) kullanıldı. Çizik testleri uç yarıçapı 200 μm olan koni

elmas Rockwell-C tip batıcı uç, 100 N/dk ya kadar artan yük altında ve 10 mm/dk kayma hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 29. Çizik test cihazı

Aşınma Deneyleri

AA2014 ve Cp-Ti Taban malzemeler üzerine büyütilen Al_2O_3/MoS_2 , TiO_2/MoS_2 ve MoS_2-Ti nanokompozit kaplamaların, tribolojik özelliklerini tespit etmek için Teer POD-2 pin-on-disk aşınma cihazı kullanıldı. Aşınma deneyleri Şekil 30'da gösterilen bilgisayar kontrollü pin-on-disk cihazında Tablo 14'de belirtilen şartlarda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma izleri Taramalı Elektron Mikroskop (ZEISS-Gemini-Sigma 300 -SEM) ve aşınma oranları Bruker- 3D Optical Profilometer cihazları ile belirlenmiştir.



Şekil 30. Aşınma deneylerinde kullanılan pin-on-disk aşınma test cihazı

Tablo 14. Aşınma Testi Deney Şartları

Parametreler	Deney şartları
Uygulanan yük, N	2
Hız, m/dk	100
İz çapı, mm	5
Test ortamı	Atmosfer
Ortam sıcaklığı, °C	20-25
İzafi nem, %RH	40- 45
Test süresi, sn	300
Yüzey pürüzlülüğü, Ra / μm	0,99
Pin çapı (Al_2O_3), mm	5

Korozyon Deneyleri

Taban malzemelerin ve PEO ve PVD yöntemleri ile büyütülmüş $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$, $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ ve $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ nanokompozit kaplamaların, korozyon deneyleri %3,5 NaCl çözeltisi içinde gerçekleştirilmiştir. Korozyon deneyleri hazırlanan çözelti içerisinde normal atmosfer şartlarında ve şematik olarak Şekil 31’de gösterilen VersaSTAT3 polarizasyon test cihazında gerçekleştirilmiştir. Polarzasyon ölçümleri Ag/AgCl referans elektrot (RE), karşıt elektrot (CE) olarak platin tel ve çalışma elektrotu (WE) deney numunesi kullanılarak üç elektrot tekniğine göre yapılmıştır. Numune açık devre potansiyeline erişinceye kadar yaklaşık 5 dakika bekletildi. Daha sonra numuneler -1000/1000 mV potansiyel aralığı içinde 1,5mV/sn’lik tarama hızında potansiyodinamik olarak polarize edildi.



Şekil 31. Korozyon Deney Düzenekinin Şematik Gösterimi

Tribokorozyon Deneyleri

PEO ve PVD yöntemleri ile büyütülmüş Al_2O_3/MoS_2 , TiO_2/MoS_2 ve MoS_2-Ti nanokompozit kaplamaların, tribokorozyon deneylerinde, Teer-POD-2 pin on disk aşınma cihazına uygun olarak tasarlanan, polimer malzemeden üretilen korozyon hücresi içerisinde yapılmıştır. Yüzeylerin elektrokimyasal davranışlarını kontrol etmek için VersaSTAT3 Potansiyostat cihazı kullanılmıştır. Tribokorozyon deneylerinde, sert olması, yüksek aşınma direncine sahip olması, kimyasal reaksiyona girmemesi ve yalıtkan olması nedeniyle karşı elaman olarak 5mm çapında Al_2O_3 bilye kullanılmıştır.

Tüm tribokorozyon deneyleri oda sıcaklığında, 2 N'luk sabit yük altında ve %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Tribokorozyon deneylerinin gerçekleştirildiği üç elektrotlu elektrokimyasal hücre ile modifiye edilen Teer-POD-2 pin on disk aşınma cihazı Şekil 32'de gösterilmiştir. Tribokorozyon deneylerinde kullanılan parametreler Tablo 15'de verilmiştir. Tasarlanan bu Tribokorozyon hücresinde numune çalışma elektrotu (WE), Ag/AgCl çubuk referans elektrotu (RE) ve platin çubuk ise karşı elektrot (CE) olarak kullanıldı. Tribokorozyon deneyleri OCP ve Potansiyostatik olmak üzere iki şekilde yapılmıştır.



Şekil 32. Tribokorozyon deney sistemi

Tablo 15. Tribokorozyon Deneyleri İçin Belirlenen Deney Parametreleri ve Şartları

Parametreler	Deney Şartları
Tribokorozyon sistemi	Elektrokimyasal hücreli <i>pin on disk</i> aşınması
Çözelti	% 3,5 NaCl
Uygulanan Yük (N)	2
Bilye Çapı (mm)	5
Bilye Malzemesi	Al ₂ O ₃
Hız, (dev./dak.)	100
İz Çapı (mm)	5
Toplam Deney Süresi (sn)	600

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

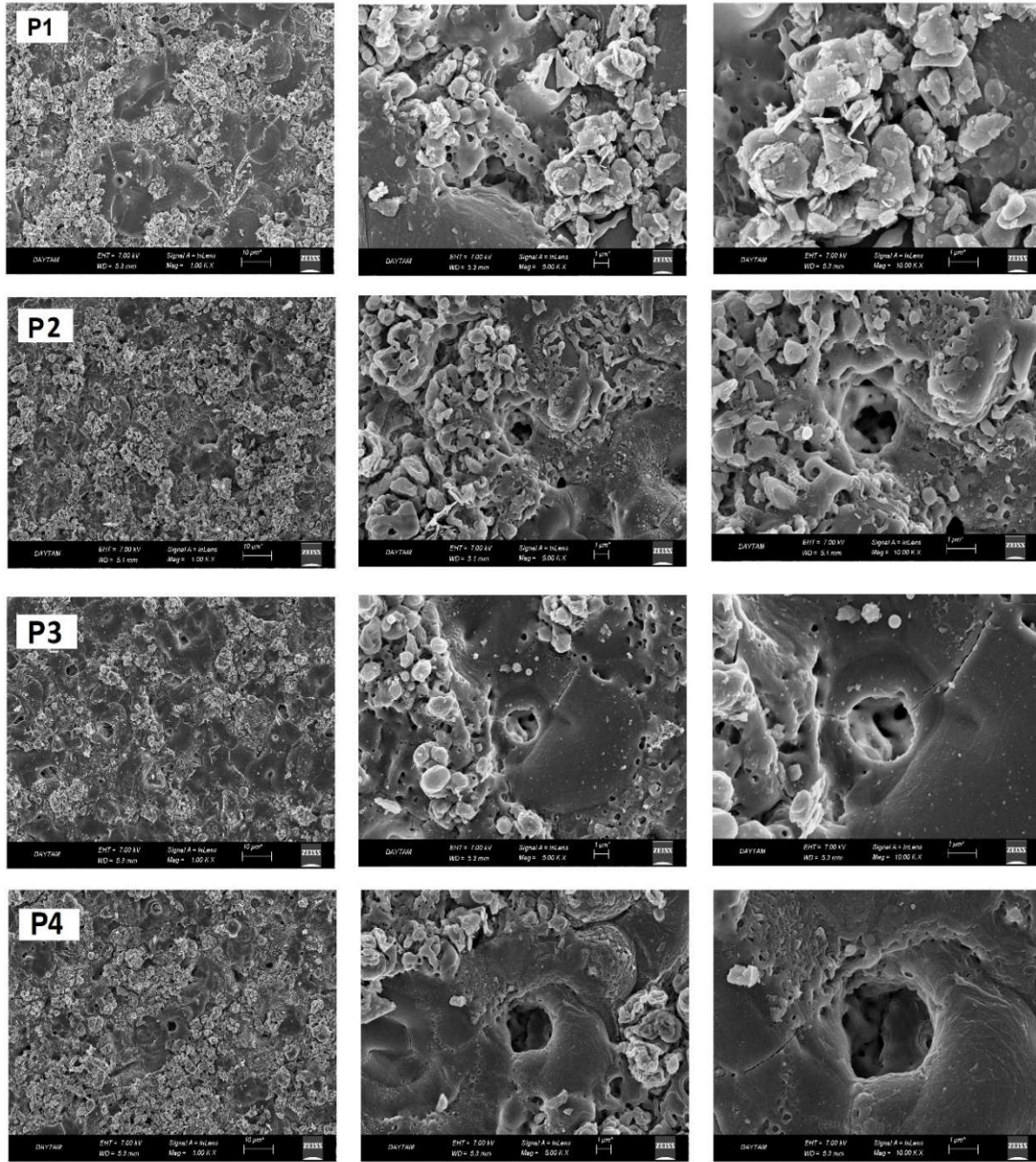
Kaplamaların Yapısal Karakterizasyonu ve Yüzey Morfolojileri

AA2014 ve Cp-Ti alaşımlarının korozyon, tribolojik ve tribokorozyon davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla, farklı iki kaplama yöntemi ile taban malzemeler kaplanmıştır. İlk aşamada Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemi kullanılarak katı yağlayıcı özelliğe sahip molibden disülfid (MoS_2) nanopartiküller içeren standart elektrolit içerisinde $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ kaplamalar büyütülmüştür. İkinci aşamada ise aynı taban malzemeler üzerine fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemlerinden kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) kullanılarak MoS_2 -Ti kompozit kaplamalar büyütülmüştür. Kaplamaların morfolojik ve yapısal özellikleri, korozyon, tribolojik özellikleri ve tribokorozyon davranışları incelenmiştir. Kaplama parametrelerinin optimizasyonu için farklı seviyelerde Taguchi L_4 deney planı seçilmiştir.

Farklı parametrelerde ve kaplama yöntemleriyle taban malzemeler üzerinde büyütülen nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojileri, kesit görüntüleri ve kalınlık değerleri, taramalı elektron mikroskopundan (SEM) alınan görüntüler ile belirlenmiştir. Büyütülen nanokompozit kaplamaların SEM görüntüleri şekil 33-39'da, kalınlık değerleri Tablo16-17'de ve XRD analiz sonuçları ise şekil 40– 43'te verilmiştir.

PEO ile farklı proses parametrelerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların SEM görüntüleri Şekil 33'te verilmiştir. PEO ile büyütülen kaplamalar üç farklı bölgeden (geçiş tabakası, fonksiyonel ana tabaka ve kayıp gözenekli/pürüzlü tabaka) oluşmaktadır. Bu durum büyütülen kaplamaların SEM görüntülerinde belirlenmiştir. PEO işlemi sonrası oluşan pürüzlü dış tabaka oldukça kırılğan yapıya sahiptir. Bu nedenle en dış yüzeyde aşınma direnci oldukça yoğun ve düşük gözenek yapılarına sahiptir. Şekil 33'te gösterildiği gibi, PEO yöntemiyle büyütülen nanokompozit kaplamaların süre, voltaj ve frekans değerlerinin kaplama büyüme oranında ve kaplamaların yüzey morfolojisinde çok etkili olduğu gözlenmiştir (Dzhurinskiy et al., 2021; Fattah-alhosseini et al., 2020; Y. Qin et al., 2015c; Ebru Emine Sukuroglu et al., 2016; Yerokhin et al., 1999). P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojilerini incelediğimizde, bütün filmler ince/yoğun ve uniform/uniform olmayan bir yapıya sahiptir. PEO yöntemi işlem esnasında elektrolit çözeltisi (standart çözelti+ MoS_2 nanopartikül) içinde, anot (numune) ve katot (Paslanmaz çelik) arasında yüksek bir voltaj uygulanır. Bu yüksek voltaj belirli bir kritik voltaj değerini (bozunum voltajı) aştığında numune üzerinde mikro-kıvılcımlar oluşmaya başlar ve

bir dizi elektrokimyasal reaksiyon sonucunda numune üzerinde mikro-gözenekler (en belirgin P4 değerlerinde görüldüğü gibi) oluşur(Ersin Arslan et al., 2013b; Demirci et al., 2013; Lin et al., 2021; Martin et al., 2020; Yerokhin et al., 1999). Şekil 33'te, AA2014 taban malzeme üzerinde oluşan pasif oksit tabakanın (Al_2O_3/MoS_2) homojen büyümesi, gözeneklerin boyutları ve yüzey üzerindeki dağılımları P1, P2, P3 ve P4 değerlerine bağlı olarak gösterilmiştir. Kaplama prosesi esnasında meydana gelen bölgesel katılaşmadan oluşan dairesel gözeneklerin yüzey morfolojileri incelendiğinde, P1 ve P2 değerlerinde büyütülen Al_2O_3/MoS_2 nanokompozit kaplamalarda değişik boyutlarda (daha küçük porlar) çok sayıda (ince ve uniform) volkanlar oluşmaktadır ve pürüzlü bir yüzey elde edilmiştir. Aynı şekilde görüldüğü gibi P3 ve P4 değerlerinde büyütülen Al_2O_3/MoS_2 nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojileri birbirine çok yakın olduğu için, P3 değerlerinde büyütülen Al_2O_3/MoS_2 nanokompozit kaplamalar (yüksek voltaj ve yüksek frekans) diğer kaplamalara göre yoğun, düşük pürüzlülüğe, az sayıda gözeneklere ve uniform bir yapıya sahiptir. Daha büyük büyütme oranlarındaki (Şekil 33'te -10.000X) görüntülerde büyütülen kaplamalar karşılaştırıldığında; uygulanan yüksek voltaj, frekans ve yüksek sıcaklığa neden olduğu için, elektrolit aracılığıyla hızlı şekilde soğutma sebebiyle kanallara katı yağlayıcı özelliğe sahip MoS_2 nanopartiküller (beyaz renkler) dolmaya başlayarak ergimiş oksit içerisinde hapsolür. Aynı şekillerde görüldüğü gibi MoS_2 partikülleri; kaplamaların yüzeylerinde ve gözeneklerin arasında görülmektedirler. En iyi yüzey morfolojisi P3 şartlarında büyütülen kaplamalarda tespit edilmiştir. Bu durum literatürdeki çalışmalarla paralelik göstermektedir (Demirci et al. 2014; Huang et al. 2018a; Sethulekshmi et al., 2021; Wang *et al.* 2006; Xue *et al.* 1998; Yerokhin et al 1999; Zhang *et al.* 2012)

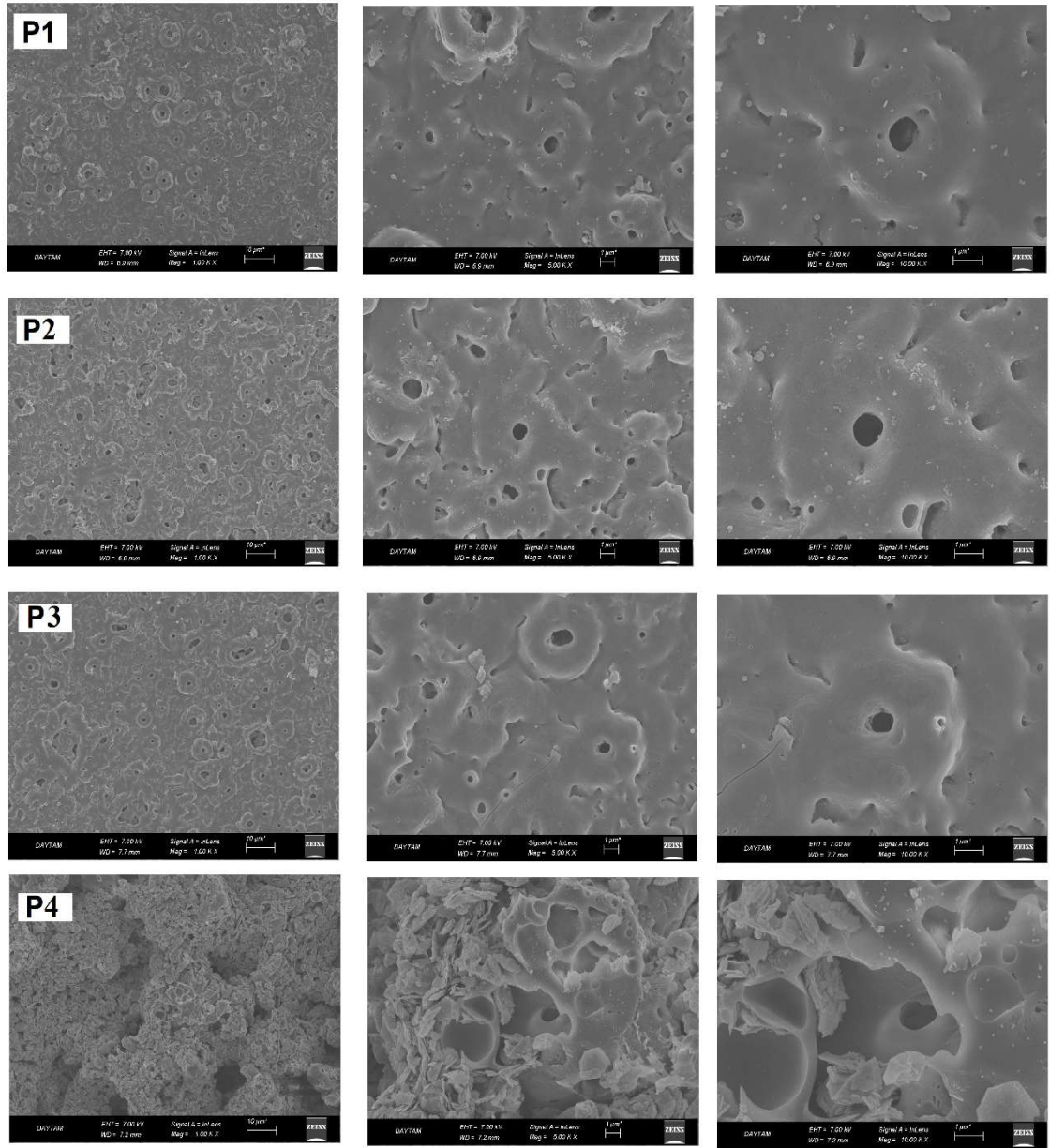


Şekil 33. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojileri.

Şekil 34’de, PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojilerinin SEM görüntüleri verilmiştir. P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojilerini incelendiğinde, bütün filmlerin uniform bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir (P4 hariç). PEO yöntemi işlem esnasında elektrolit çözeltisi (standart çözelti+ MoS_2 nanopartikül) içinde, anot (numune) ve katot (Paslanmaz çelik) arasında yüksek bir voltaj uygulanır. Bu yüksek voltaj belirli bir kritik voltaj değerini (bozunum voltajı) aştığında numune üzerinde mikro-kıvılcımlar oluşmaya başlar. Uygulanan yüksek voltaj/frekans, yüksek sıcaklığa neden olur ve elektrolit

aracılığıyla hızlı şekilde soğuduğu için numune üzerinde mikro-gözenekler oluşur (Ersin Arslan et al., 2013b; Demirci et al., 2013; Lin et al., 2021; Yerokhin et al., 1999).

Şekil 34’de, Cp-Ti taban malzeme üzerinde oluşan oksit tabakanın ($\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$) homojen büyümesi, gözeneklerin boyutları ve yüzey üzerindeki dağılımları P1, P2, P3 ve P4 şartlarına bağlı olarak gösterilmiştir. Kaplama prosesi esnasında meydana gelen bölgesel katılaşmadan oluşan dairesel gözeneklerin yüzey morfolojileri incelendiğinde, P1, P2 ve P3 değerlerinde büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalarda değişik boyutlarda (birbirine yakın) çok sayıda (geniş) volkanlar oluşmuştur. Ama aynı şekilde görüldüğü gibi P4 değerlerinde büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojisi, yüksek voltaj ve işlem süresinden dolayı diğer kaplamalara göre yoğun ve az sayıda gözeneklere ve uniform olmayan bir yapıya sahiptir. Şekil 34’de-10.000X büyütme şartlarındaki SEM görüntüleri karşılaştırıldığında; uygulanan yüksek voltaj ve frekans, yüksek sıcaklığa neden olmakta ve mikro ergimeleri başlatmaktadır. Sıcak yüzeylerin elektrolit aracılığıyla hızlı şekilde soğuması, oluşan kanallara katı yağlayıcı özelliğe sahip MoS_2 nanopartiküllerin (beyaz renkler) dolmaya başlamasına sebep olmaktadır. Aynı şekillerde görüldüğü gibi MoS_2 nanopartiküller kaplamaların hem yüzeylerinde hem de gözeneklerin arasında görülmektedirler. En iyi yüzey morfolojisinin P4 şartlarında büyütülen kaplamalarda olduğu gözlenmiştir. Bu durum literatürle paralellik göstermektedir (Demirci et al. 2014; Huang et al. 2018a; Krishna *et al.* 2003; Qin et al., 2016; Sethulekshmi et al., 2021; Wang *et al.* 2006; Xue *et al.* 1998; Xue *et al.* 2000; Yerokhin et al 1999; Zhang *et al.* 2012)



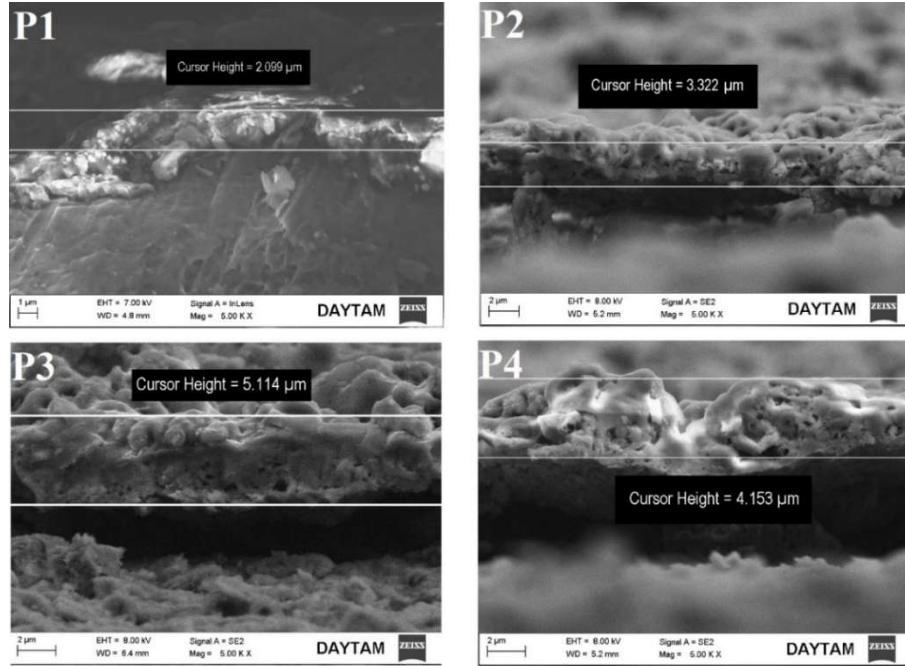
Şekil 34. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojileri.

Taguchi L_4 deney tasarımı, PEO yöntemi kullanılarak parametrelerin farklı seviyelerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalarına ait SEM kesit görüntüleri, sırasıyla Şekil 35–36’da verilmiştir. Büyütülen nanokompozit kaplama kalınlıkları ise Tablo 16’da gösterilmiştir.

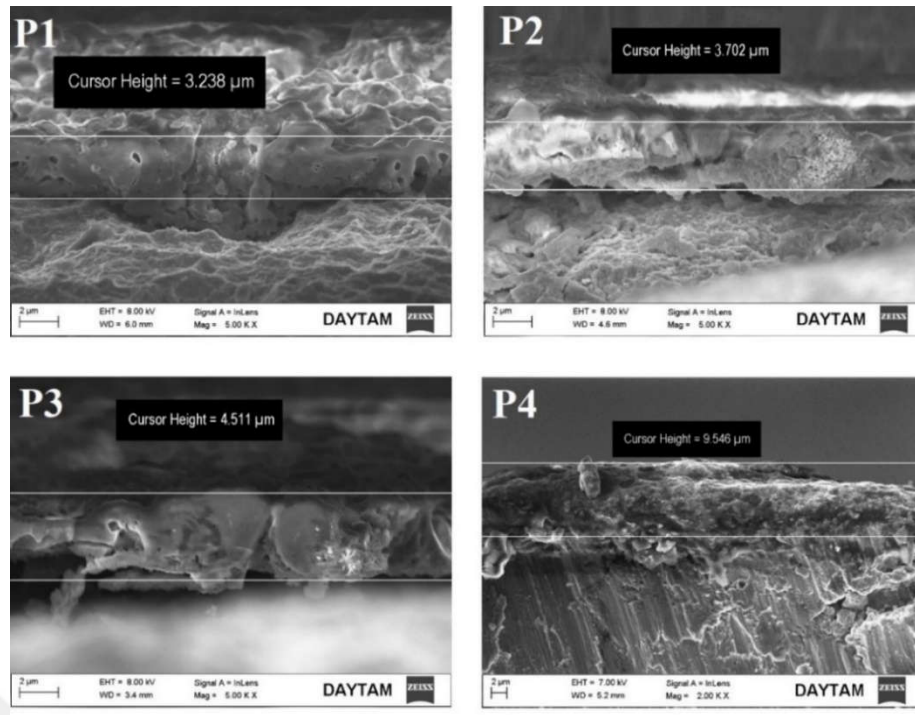
PEO yöntemiyle büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların, SEM kesit görüntülerine bakıldığında; sürekli ve belirgin bir oksit tabakasının yüzeyde olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; PEO ile büyütülen oksit kaplamalar üç farklı bölgeden (geçiş tabakası, fonksiyonel ana tabaka ve kayıp gözenekli/pürüzlü tabaka) oluşmaktadır. Taban malzeme üzerinde oluşan pasif oksit tabakanın morfolojisi oksit tabakanın homojen büyümesini açıkça ortaya koymaktadır. İşlem sonucu

oluşan pürüzlü dış tabaka oldukça kırılğan yapıya sahiptir. Bu nedenle en dış yüzeyde aşınma direnci oldukça zayıftır. Seramik kaplamanın iç katmanları ise tam tersi özellik sergilemektedir (Yerokhin et al. 1999; Demirci et al 2014). Büyütülen oksit kaplamaların kesit görüntüleri incelendiğinde parametre değerlerinin değişimiyle kaplama kalınlıklarının değiştiği tespit edilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda süre, voltaj ve frekans değerlerinin artmasıyla kaplama kalınlığının da arttığı, malzeme yüzeyindeki pürüzlülüğün ve yüzeyde oluşan gözeneklerin çaplarının ise azaldığı belirlenmiştir (Kumar et al. 2010). Artan frekansın kaplama büyüme oranını arttırdığı, dolayısıyla aynı sürede yapılan işlemlerde frekansın artışıyla kaplama kalınlığının arttığı belirtilmiştir (Yang and Wu 2010). Mevcut çalışmada kaplama parametrelerinin optimizasyonu için farklı seviyelerde Taguchi L₄ deney planı seçilmiştir. İlgili kaplama parametreleri ve seviyeleri incelendiğinde işlem süresi, voltaj ve frekansın artışı ile kaplama kalınlığının arttığı tespit edilmiştir.

Plasma elektrolit oksidasyon sonucunda Al₂O₃/MoS₂ kaplamaların SEM kesit görüntülerine göre en yüksek kalınlık değeri P3=5,114 µm (15dk, 500V, 250Hz), en düşük kalınlık değeri P1=2,099 µm (5dk, 500V, 50Hz) değerlerinde büyütülen nanokompozit kaplamalarda ve TiO₂/MoS₂ kaplamaların SEM kesit görüntülerine göre en yüksek kalınlık değeri P4=9,546 µm (15dk, 550V, 50Hz), en düşük kalınlık değeri P1=3,238 µm (5dk, 500V, 50Hz) değerlerinde büyütülen nanokompozit kaplamalarda elde edilmiştir.



Şekil 35. PEO yöntemi ile büyütülen Al₂O₃/MoS₂ filmlerin SEM kesit görüntüsü ve kalınlık değerleri



Şekil 36. PEO yöntemi ile büyütülen TiO_2/MoS_2 filmlerin SEM kesit görüntüsü ve kalınlık değerleri

Tablo 16. PEO Kaplamaların Kalınlıkları

PEO	Kaplama No	P1	P2	P3	P4
Kaplama kalınlığı	Al_2O_3/MoS_2	2,099	3,322	5,114	4,153
(μm)	TiO_2/MoS_2	3,238	4,511	3,702	9,546

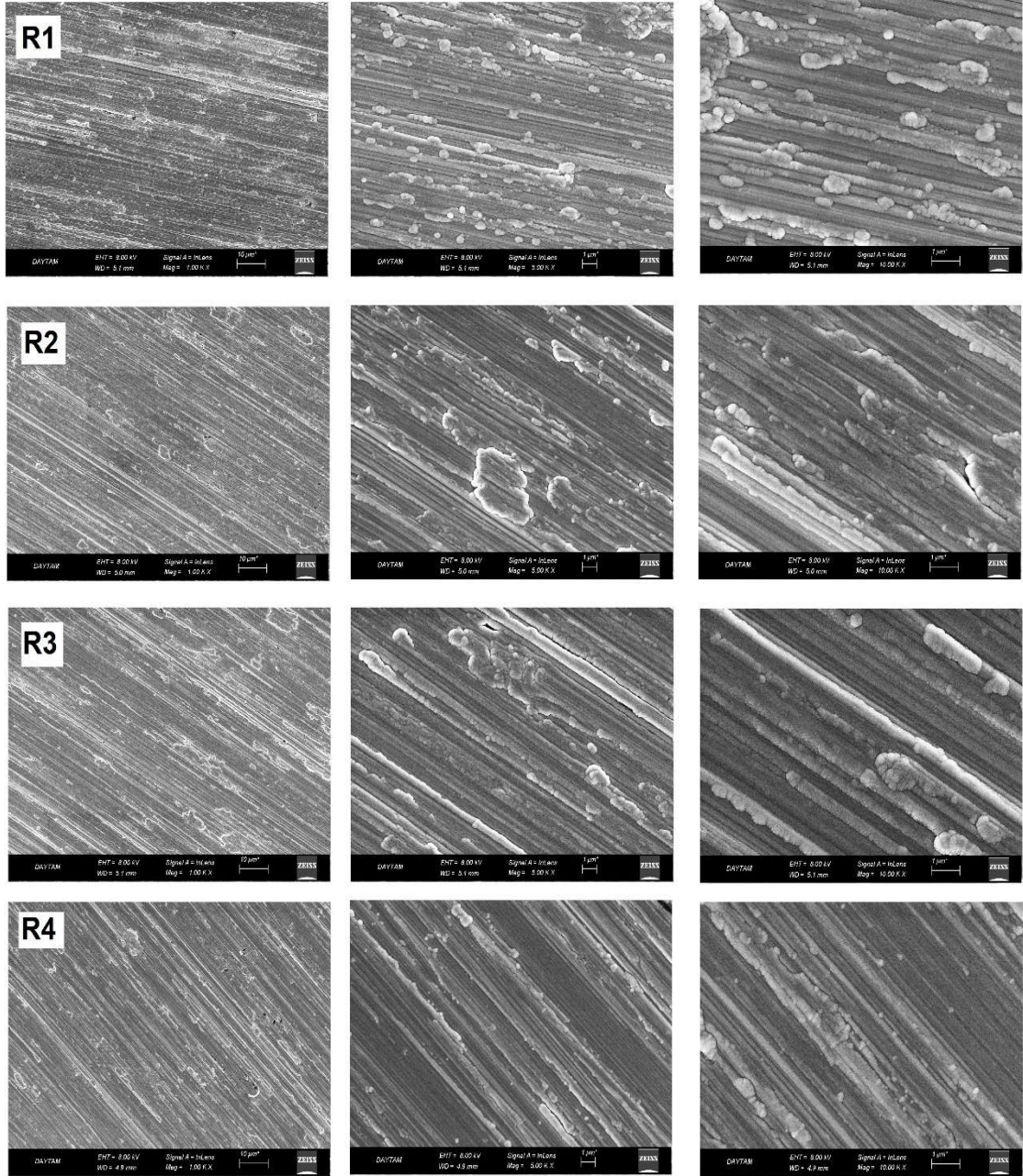
İkinci yöntem ise aynı taban malzemeler üzerine, Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) tekniğinin en gelişmiş prosesi olan kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) kaplama yöntemiyle MoS_2 -Ti nanokompozit kaplamalar büyütülmüştür.

PVD yöntemlerinin geliştirilmesinin nedeni çok yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahip nano kompozit kaplamaların büyütülebilmesidir. Dengesiz manyetik alanda sıçratma işleminde yapılan kaplamaların özelliklerini iyileştirmek için, kaplamaların büyümesi sırasında iyon bombardımanının kontrolü, taban malzeme seçimi ve düşük sıcaklık gibi parametreler etkili olabilmektedir. Bu tekniğinin en geliştirilmiş hali Kapalı Alan Dengesiz Manyetik Alanda Sıçratma (CFUBMS) kaplama yöntemidir. Bu yöntemde iki veya daha fazla dengesiz manyetik alanlar aynı/zıt kutuplar karşılıklı (ayna görüntüsü/kapalı alan) yerleştirilerek, çiftli manyetik kapalı alan oluşturulmuştur (Ao et al. 2016; Baran et al. 2015; Bunshah et al. 1977; Bao et al., 2021; Cicek et al. 2014; do Amaral et al., 2021; Efeoglu et al. 2018; Mohammed et al. 2012; Mu et al. 2013; Pranevicius 2007; Qin et al. 2015; Raveh et al. 2007).

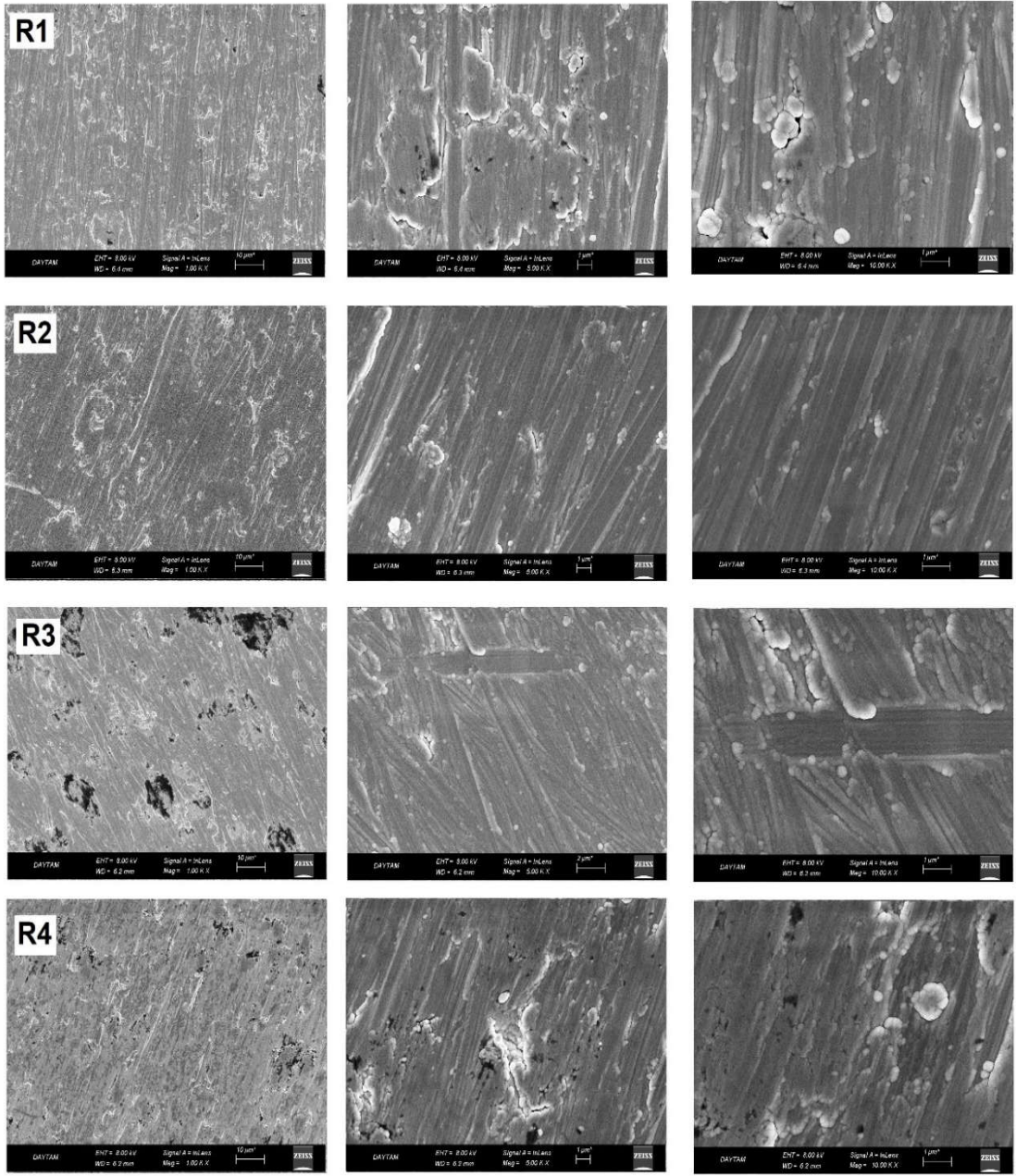
Taguchi L₄ deney tasarımı, PVD (CFUBMS) yöntemi kullanılarak parametrelerin farklı seviyelerinde büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalarına ait SEM görüntüleri, sırasıyla Şekil 37-39’da verilmiştir. Büyütülen nanokompozit kaplamaların kalınlıkları ise Tablo 17’de gösterilmiştir.

Şekil 37-39’da verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, literatürde de belirtildiği gibi PVD yöntemi ile büyütülen tüm kaplamalarda yoğun kolonsal bir yapının elde edilmesi arzu edilmektedir. Movchan ve Demchishin yapı zone modeli (MD) taban malzemenin sıcaklığına bağlı olarak, yapı zone modeli üç bölgeli bir desen sağlar. Bu üç bölgede; düşük enerjilerde konik sütunlu tanelerden oluşur, yüksek enerjilerde atomların indüklenen hareketliliğini arttırmasıyla “yoğun kolonsal” yapısı oluşur ve daha yüksek enerjilerde yeniden kristalleşme ve tane büyümesine neden ile “tamamen yoğun” kaplamalar oluşur (Hibbs et al. 1984; Holmberg et al. 2009). R1 değerlerinde büyütülen nanokompozit kaplamalarda yoğun bir yapı görülürken , R2, R3 ve R4 değerlerinde büyütülen nanokompozit kaplamalar hem yoğun hem de kolonsal bir yapı görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde taban malzemeye uygulanan bias geriliminin artması sonucu taban malzemeye yönelen atomların kinetik enerjisi artmakta yani iyon bombardımanını artarak yapı daha yoğun hale gelmektedir (Olaya et al, 2005). R1 ve R2 kaplamalarının mikroyapısı Thornton’un Zone 3 (çok yoğun) modelinde büyümüş, R3 ve R4 kaplamalarında ise mikroyapısı Zone 2 (yoğun ve kolonsal) modelinde büyümüştür. (Baran et al., 2014; Cicek et al., 2015; Efeoglu et al., 2018; Ordoñez et al., 202; Thornton 1974).

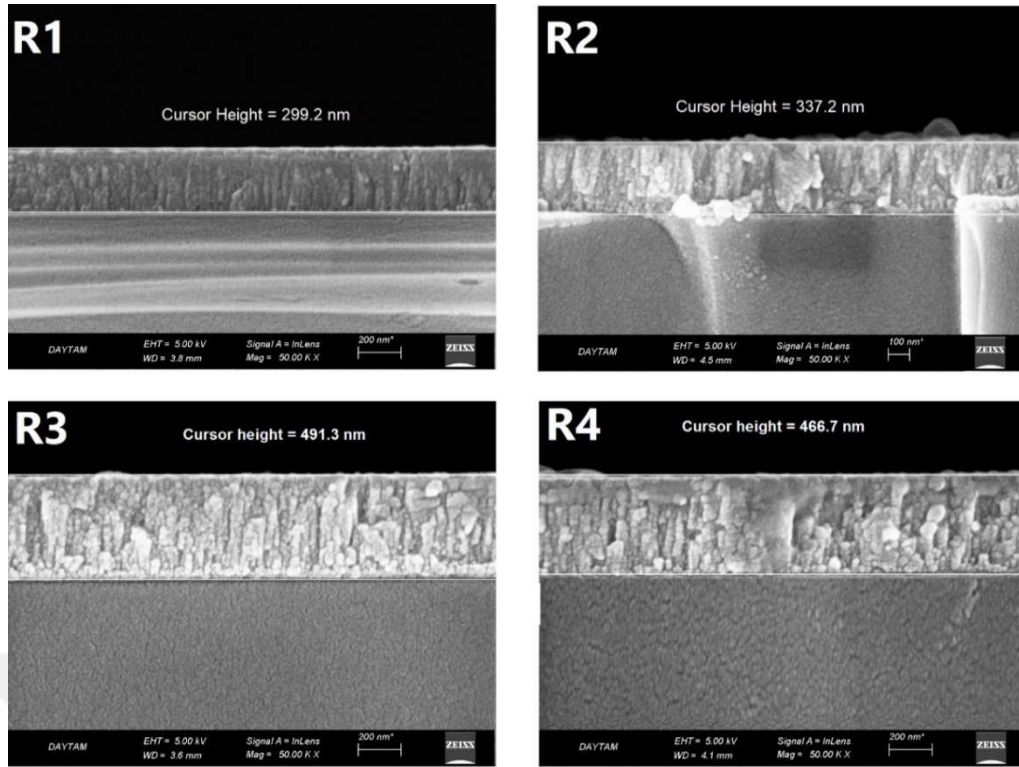
Şekil 39’da verilen SEM kesit görüntüleri incelendiğinde en yüksek kaplama kalınlık değerinin R3= 491,3 nm (0,9A, -50V, 0,33Pa) kaplamasında ve en düşük kaplama kalınlık değerinin ise R1= 299 nm (0,6A, -50V, 0,26Pa) kaplamasında olduğu görülmüştür. Elde edilen kaplama kalınlığı işlem parametrelerine göre değişmektedir. İşlem çalışma basıncı ve hedef malzemelere uygulanan akım değeri arttıkça (sıçratma oranı artırılır), artan difüzyon ile birlikte oluşan kaplama kalınlığı da artmaktadır. Dolayısıyla; aynı anda taban malzemeye uygulanan bias arttıkça, oluşan kaplama kalınlığı da artmaktadır (Han et al. 2003; Jantasom et al. 2017; Ding et al. 2018). Ayrıca yapılan çalışmalara göre hedeflere uygulanan akım değerleri ile kaplama oranı arasında bir doğru orantının olduğu görülmektedir. Bu nedenle, hedef malzemelere uygulanan akım değerleri arttıkça kaplama kalınlığı da artmaktadır (Baran et al., 2014; Cicek et al., 2015; Efeoglu et al., 2019; Han et al., 2021).



Şekil 37. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların yüzey SEM görüntüleri.



Şekil 38. PVD yöntemi ile Cp-Ti üzerine R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların yüzey SEM görüntüleri.



Şekil 39. PVD yöntemi ile büyütülen filmlerin SEM kesit görüntüsü ve kalınlık değerleri

Tablo 17. PVD Kaplamaların Kalınlıkları

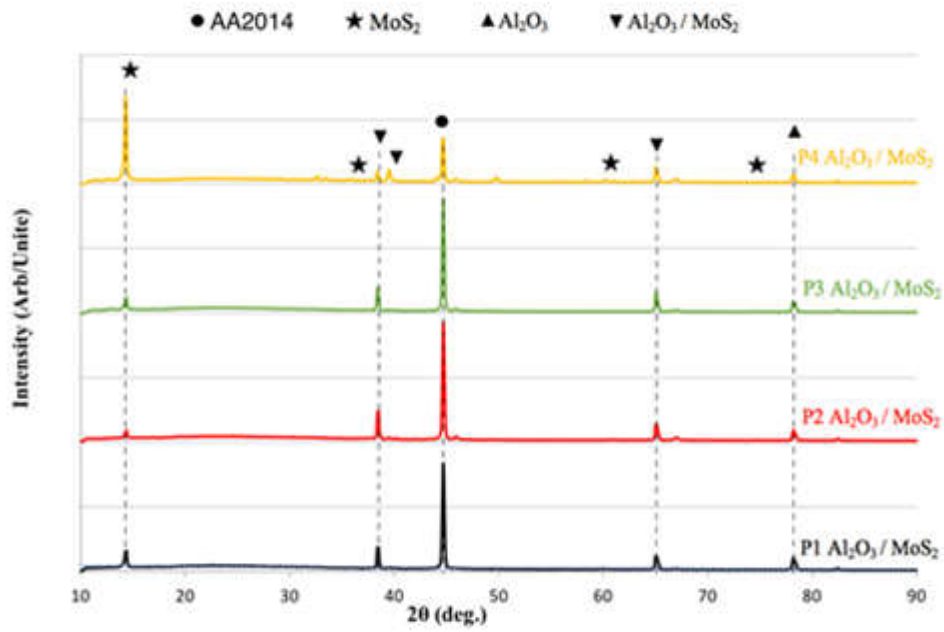
PVD	Kaplama No	R1	R2	R3	R4
Kaplama kalınlığı (nm)	MoS_2 -Ti	299,2	337,2	491,3	466,7

XRD Sonuçlar

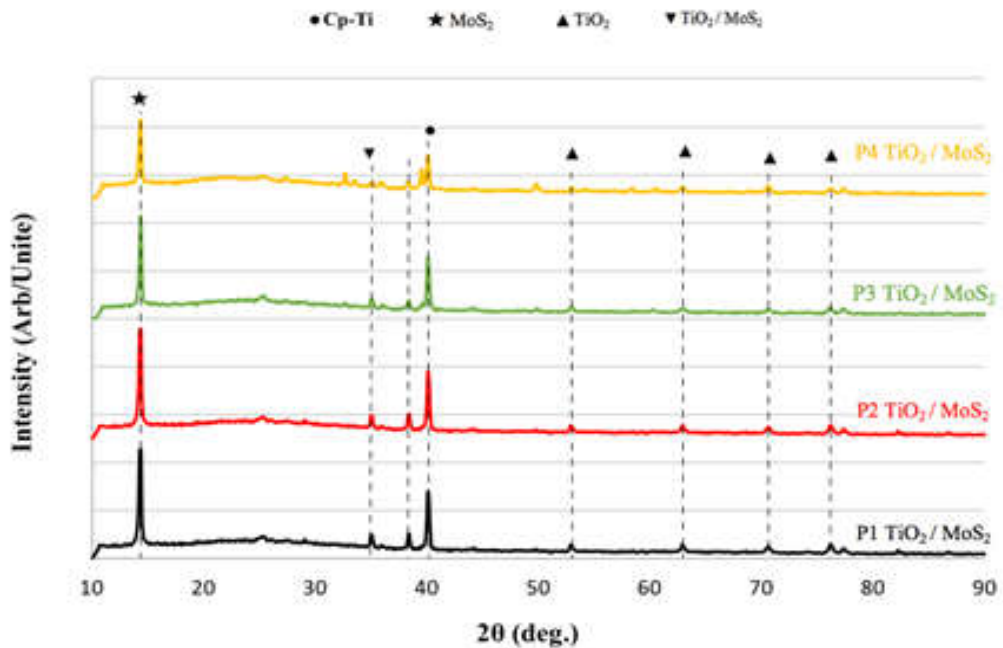
Kaplama parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi L_4 deney planı, farklı iki kaplama yöntemi kullanılarak parametrelerin farklı seviyelerinde AA2014 ve Cp-Ti alaşımlarının üzerine büyütülen nanokompozit kaplamaların XRD analiz sonuçları şekil 40-43'te verilmiştir.

PEO yöntemiyle farklı seviyelerde büyütülen nanokompozit kaplamalara ait XRD sonuçları şekil 40-41'de gösterilmiştir. Şekil 40-41'de görüldüğü gibi Al_2O_3/MoS_2 nanokompozit kaplamalar için Al_2O_3 ve MoS_2 fazları ve TiO_2/MoS_2 nanokompozit için TiO_2 ve MoS_2 fazları karakterize eden pikler (farklı yoğunluklarda ve taban malzemeden yansıyan pikler) belirlenmiştir (Min *et al.* 2012; Neupane *et al.* 2013). Farklı seviyelerde PEO yöntemi esnasında meydana gelen yüksek sıcaklıkla oluşan Al_2O_3 ve Rutil (termodinamik olarak en kararlı yapı) fazının oluşumunda yardımcı olduğu açıklanabilir (Chuan(Matin *et al.*, 2020)g *et al.* 2011; Matin *et al.*, 2020; Sundararajan and Krishna 2003; Vallant *et al.* 2000). Kaplama

süresini sabit tutarak, artan voltaj ve frekansla birlikte akım yoğunluğu ve buna bağlı olarak mikro arkların şiddetindeki artış, Al_2O_3 fazının oluşumunu arttırmaktadır (Khan *et al.* 2010) Bu durum yüksek voltaj ve frekans değerlerinde büyütülen (P2 ve P3) kaplamaların XRD spektrumları ile doğrulanmaktadır. Literatürdeki çalışmalara benzer olarak MoS_2 pikleri incelendiğinde; en net görülen PEO yöntemiyle farklı parametrelerde büyütülen nanokompozit kaplamalara ait P4- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve P3- $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ $2\theta=14^\circ$ 'de yansımıştır(Huang et al., 2018b; Sethulekshmi et al., 2021; Y. Qin et al., 2015a).

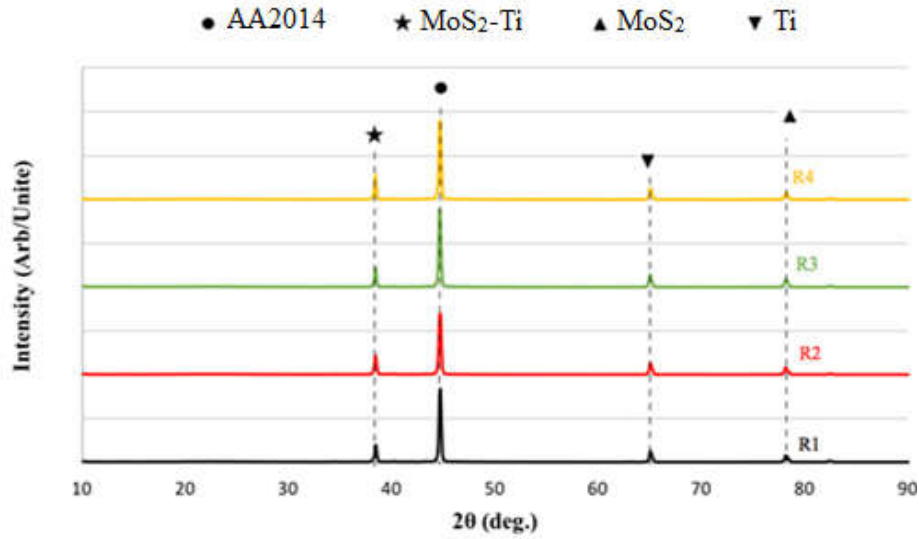


Şekil 40. PEO yöntemi ile büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ filmlerin XRD grafikleri

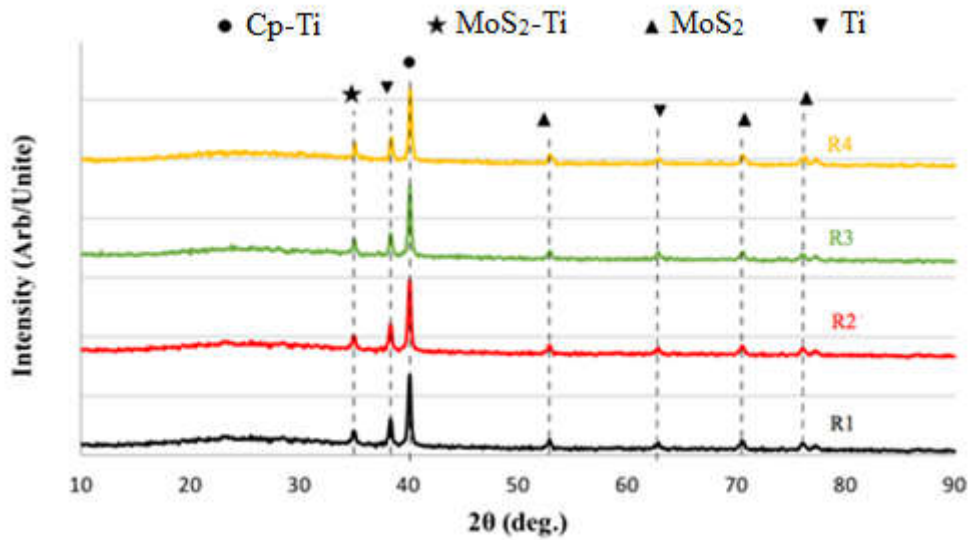


Şekil 41. PEO yöntemi ile büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ filmlerin XRD grafikleri

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) tekniğinin en gelişmiş prosesi olan kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) kaplama yöntemiyle farklı seviyelerde büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalara ait XRD sonuçları şekil 42 ve 43'te gösterilmiştir. Şekil 42 ve 43'te PVD yöntemiyle farklı seviyelerde elde edilen pikler incelendiğinde; MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalar için Ti ve MoS₂ fazları karakterize eden pikler (farklı yoğunluklarda ve taban malzemedan yansıyan pikler) belirlenmiştir (Ö Baran et al., 2016; E E Sukuroglu et al., 2018; Sun et al., 2020). Literatürdeki çalışmalara benzer olarak bu yöntem ile büyütülen nanokompozit kaplamalarda, en belirgin yansıma, R4 şartlarında AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamalarda ve R3 şartlarında Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamalarda $2\theta=37^\circ$ 'de yansımıştır (Cicek et al., 2021; Han et al., 2021; Hudec et al., 2021; Ebru Emine Sukuroglu et al., 2015b).



Şekil 42. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine büyütülen MoS₂-Ti filmlerin XRD grafikleri



Şekil 43. PVD yöntemi ile Cp-Ti üzerine büyütülen MoS₂-Ti filmlerin XRD grafikleri

Scratch (Çizik) Test Sonuçları

PEO ve PVD kaplama yöntemleri kullanılarak parametrelerin farklı seviyelerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$, $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ ve $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ nanokompozit kaplamaların adezyon özelliklerini belirlemek için scratch (çizik) testi kullanılmıştır ve çizik testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı–normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri Şekil 44-59’da verilmiştir. Elde edilen kritik yük değerleri ise Tablo 18-19’da verilmiştir.

PEO ve PVD yöntemleri ile büyütülen nanokompozit kaplamaların adezyonunu ölçmek için literatürdeki çalışmalara dayanarak, en çok kullanılan yöntem çizik testidir. Bu yöntemde, Rockwell-C elmas uç ($200\mu\text{m}$ yarı çaplı) ile kaplama yüzeyine yük uygulanır ve yük altındaki kaplamanın yüzeyinde hasarlar meydana gelir. Çizik testi, bir kaplamada çeşitli hasar türlerine neden olabilir. Örneğin, wear (aşınma), spallation (kaplamanın taban malzemeden tamamen uzaklaştırıldığı yük), cracking (çatlak) ve chipping (yonganın meydana geldiği yük) olarak gözlenmektedir (Burnett and Rickerby, 1988; Bull and Rickerby, 1989; Hintermann *et al.* 1984; Perry *et al.* 1983; Valli *et al.* 1986). En önemli faktörler; taban malzemesi, kaplama parametreleri, kaplama kalınlığı, sürtünme katsayısı, batıcı uç geometrisi ve yükleme hızı, çizik testlerinin sonuçlarını etkileyebildiğinden, adezyonu değerlendirmek için yararlı, ama büyük oranda kalitatif bir yöntem olmaya devam etmektedir. Kaplamaların taban malzemeden ayrıldığı veya kırıldığı yük kritik yük (L_c) olarak tanımlanır (Arnell and Efeoglu, 1993; Efeoglu *et al.*, 2019; Yerokhin *et al.*, 2000). Kaplamada adezyon hasarı, kaplamadaki bası gerilmesinin kritik bir değeri aştığında oluşur (Xie and Hawthorne 2001). Bununla birlikte, uygulanan normal yük sadece kaplamanın adeziv hasarına değil, aynı zamanda koheziv hasarına da neden olur (Xie and Hawthorne 2002). Ayrıca kaplamanın taban malzemeye yapışmasına rağmen meydana gelen enine çatlamlar gibi hasar meydana gelmektedir (Bull 1997).

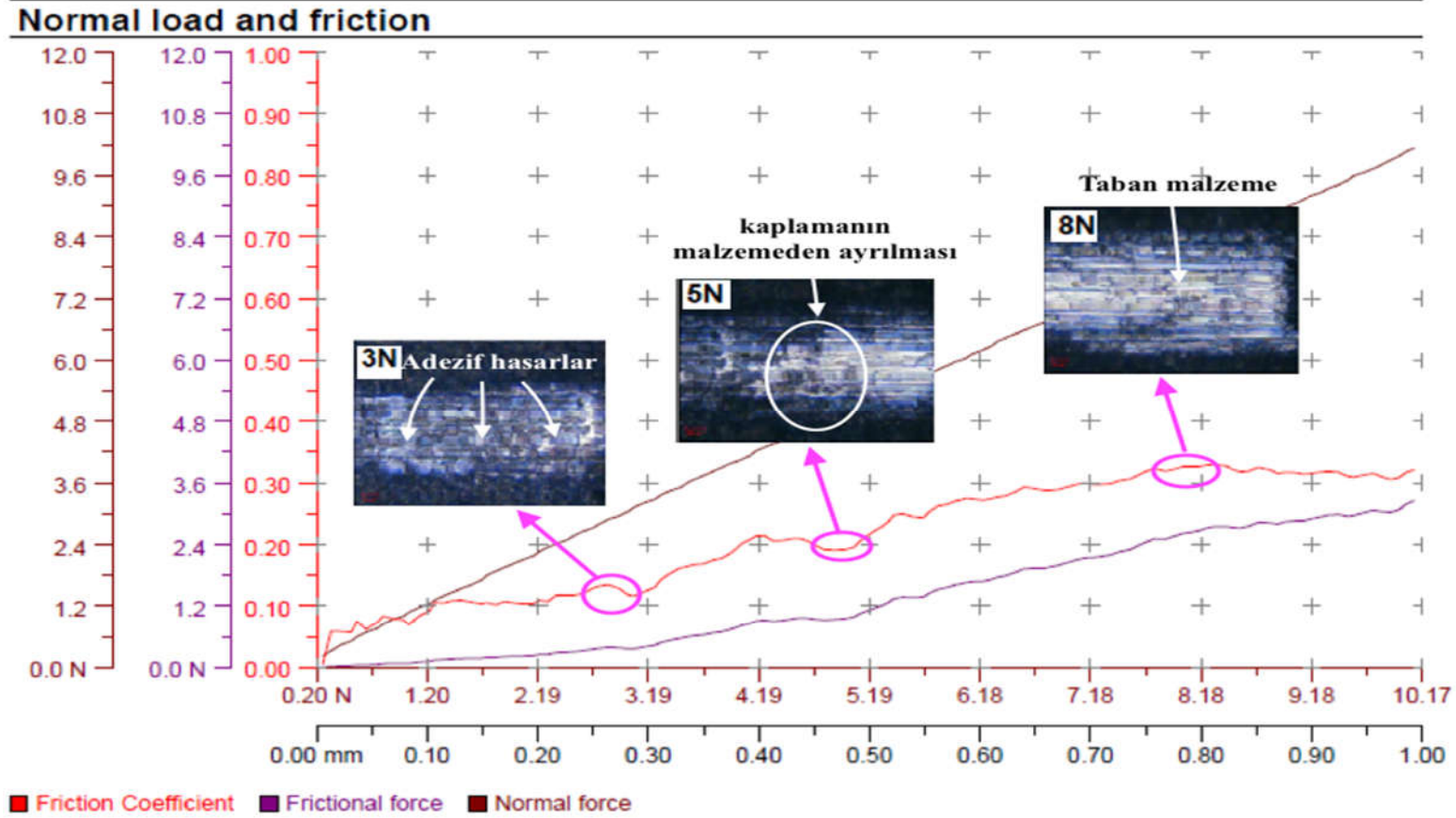
PEO yöntemiyle farklı seviyelerde büyütülen nanokompozit kaplamaların çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı–normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri şekil 44-51’de gösterilmiştir. Elde edilen kaplamaların kritik yük değerleri Tablo 18’da gösterilmiştir.

PEO ile AA2014 ve Cp-Ti üzerine büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$, $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalara yapılan scratch (çizik) testi sonucu elde edilen kritik yük değerleri incelendiğinde; kritik yük değerleri bir birlerine yakındır ve sırasıyla L_c 3-14N ve L_c 4-32N arasında değişmektedir. En yüksek kritik yük (L_c) değeri kaplama süresinin 15 dk, voltajın 550 ve frekansın 50 Hz olduğu P4- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ (14N) ve P4- $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ (32N) şartlarında olarak elde edilmiş ve en düşük kritik yük değeri ise kaplama süresinin 5 dk, voltajın 500 ve frekansın 50Hz olduğu P1- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ (5N) ve P1- $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ (6N) şartlarında olarak elde edilmiştir. P4

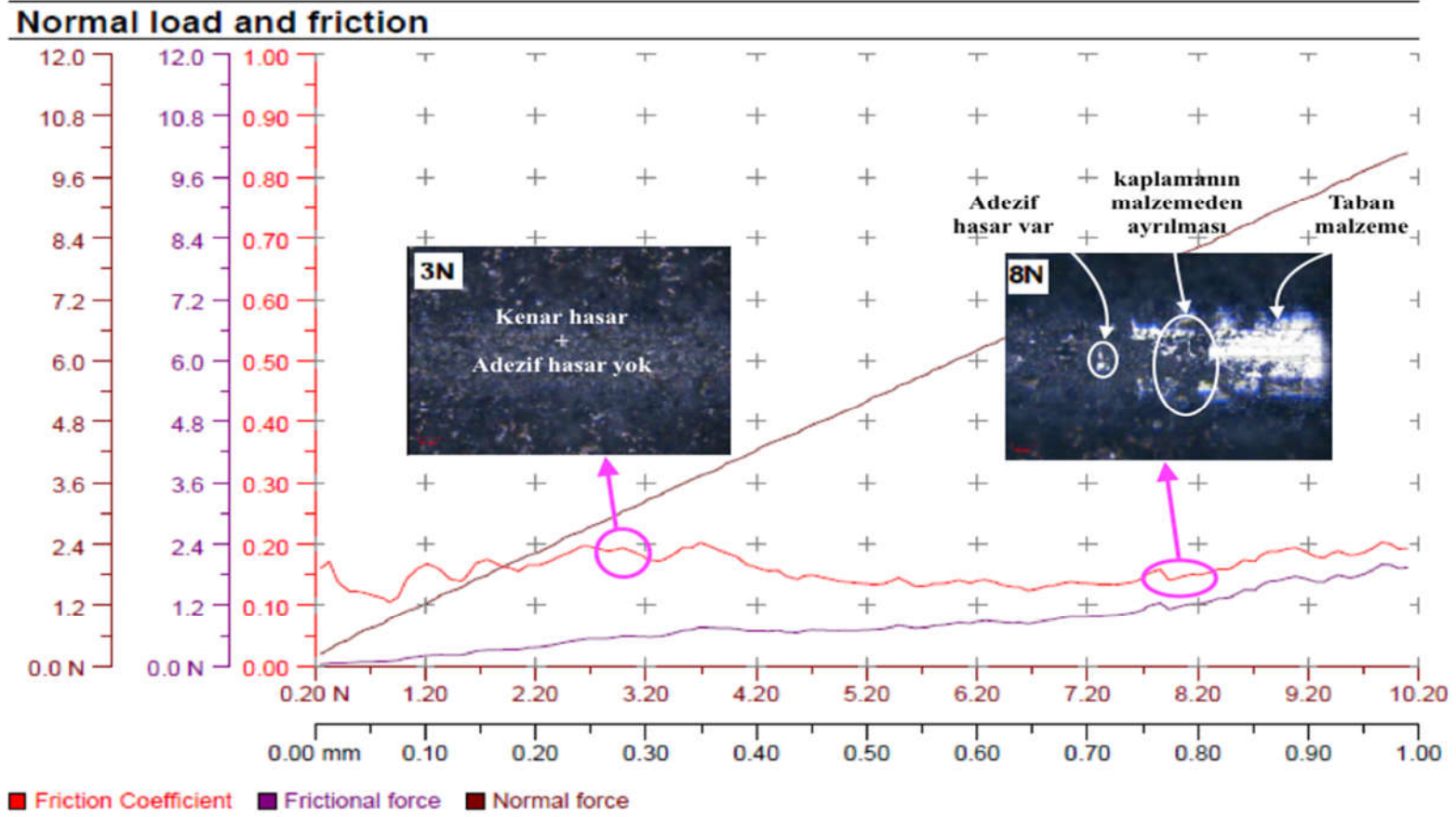
şartlarında büyütülen kaplamaların mikroyapısı P1, P2 ve P3 kaplamalara göre daha kalın ve yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Literatürdeki çalışmalara dayanarak, P4 ve P1 şartlarında büyütülen nanokompozit kaplamaların en yüksek/en düşük kritik yük değerine sahip olması kaplama yoğunluğu ve kaplama kalınlığı ile ilişkilendirilmiştir. Yani seramik kaplamalarda kaplama kalınlığı arttıkça, kaplama yüzeyine uygulanan yük ve kaplamaların adezyonu da artmaktadır (Şüküroğlu, 2016; Yerokhin et al., 2000). Böylece adezyon üzerinde etkili olan parametrelerin bu çalışmada da benzer etkiyi gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 44-51’de gösterildiği gibi çizme izlerinin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde; PEO yöntemiyle büyütülen P1, P2, P3 ve P4- Al_2O_3/MoS_2 nanokompozit kaplamalarda 3-14N aralığında ve P1, P2, P3 ve P4- TiO_2/MoS_2 nanokompozit kaplamalarda ise 4-32N aralığında sırasıyla; kenar hasar, adeziv hasar ve kaplamaların taban malzemeden ayrılması meydana gelmiştir (Arslan et al., 2013; Kucukosman et al., 2021; Y. Qin et al., 2015; Şüküroğlu, 2016; Yerokhin et al., 2000).

Tablo 18. PEO Yöntemi İle Oluşturulan Filmlerin Kritik Yük Değerleri

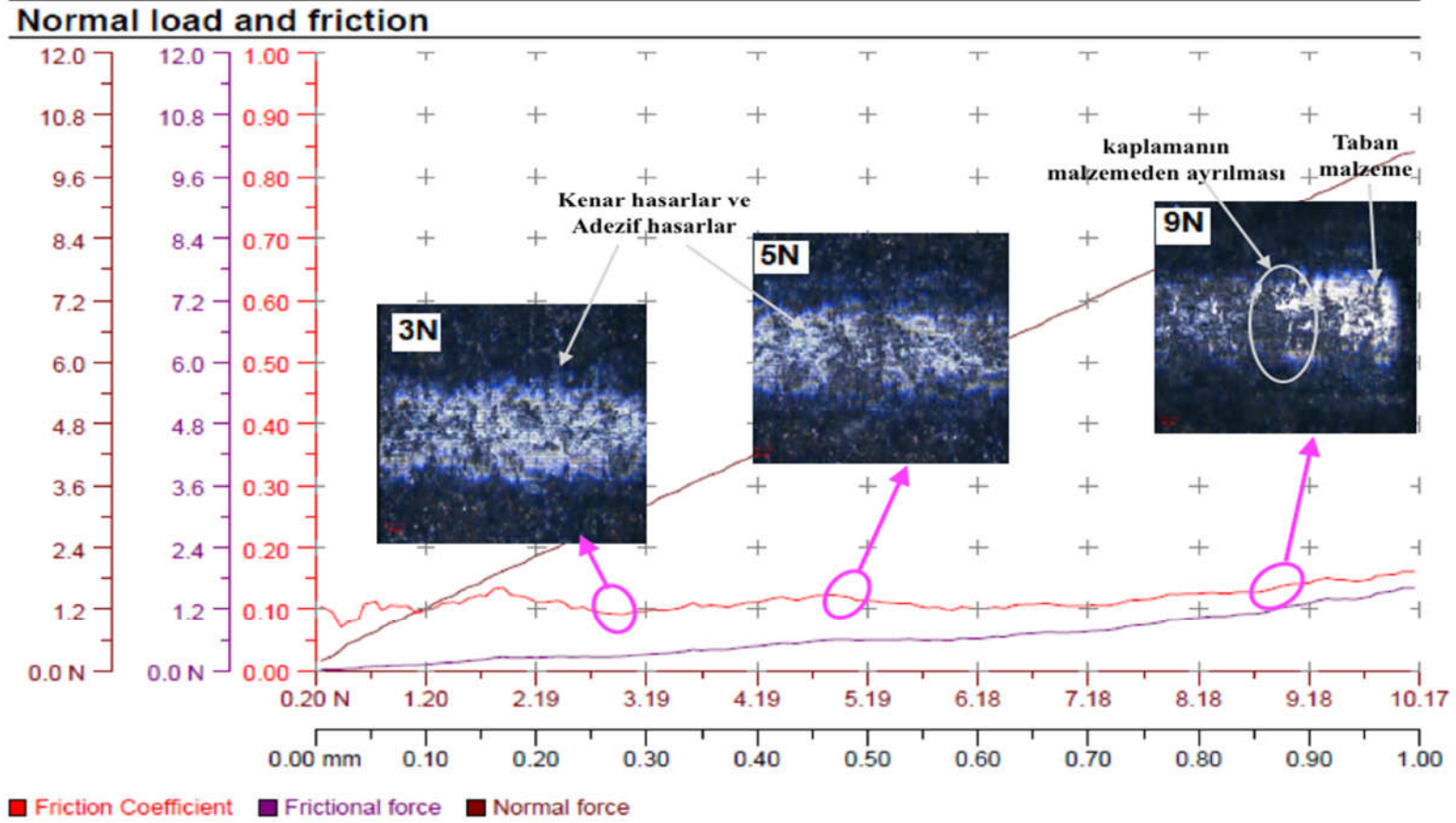
PEO	Kaplama No	P1	P2	P3	P4
Kritik yük (N)	Al_2O_3/MoS_2	5	8	9	14
	TiO_2/MoS_2	6	10	15	32



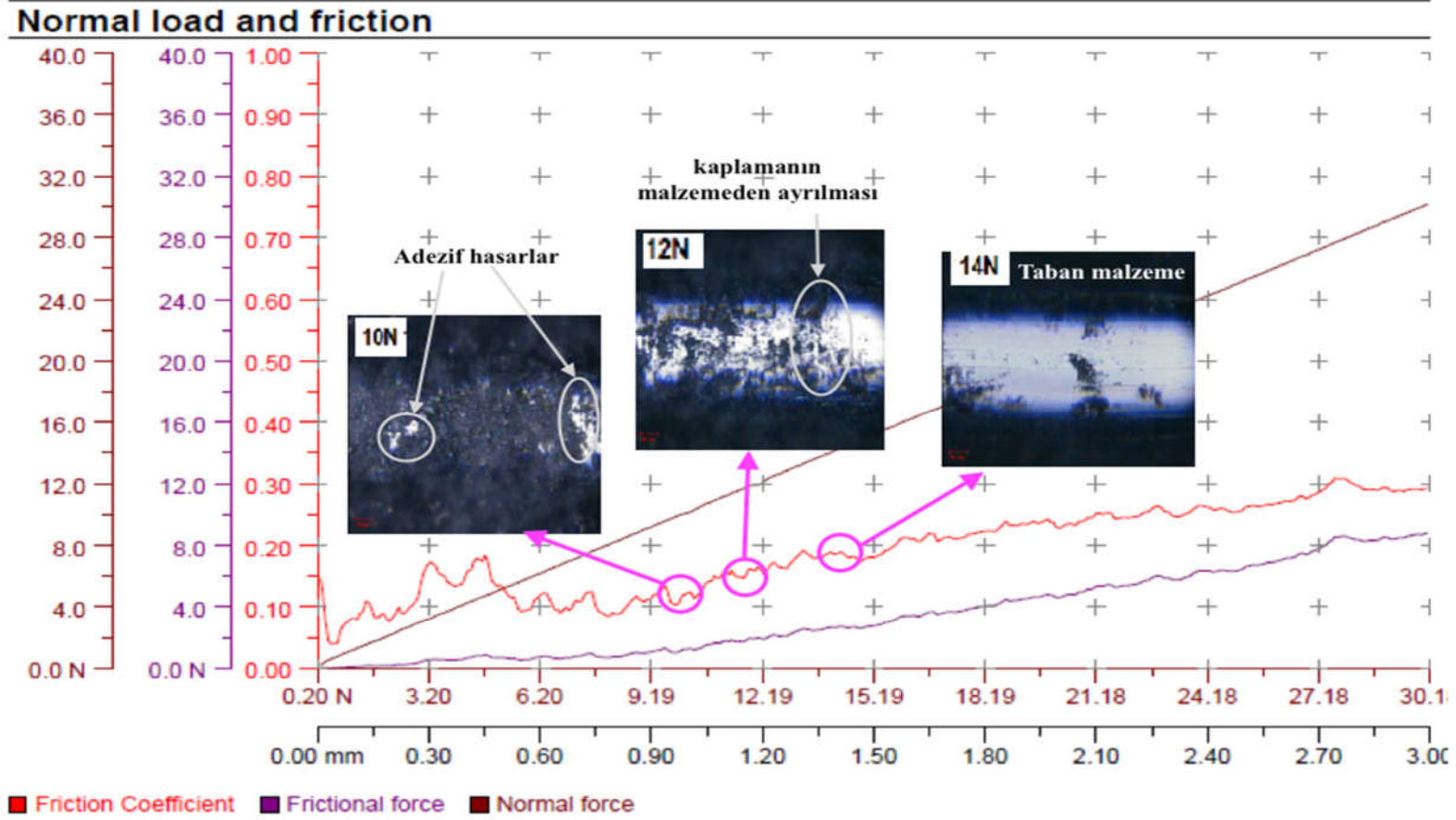
Şekil 44. PEO yöntemi ile P1 kaplama parametrelerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.



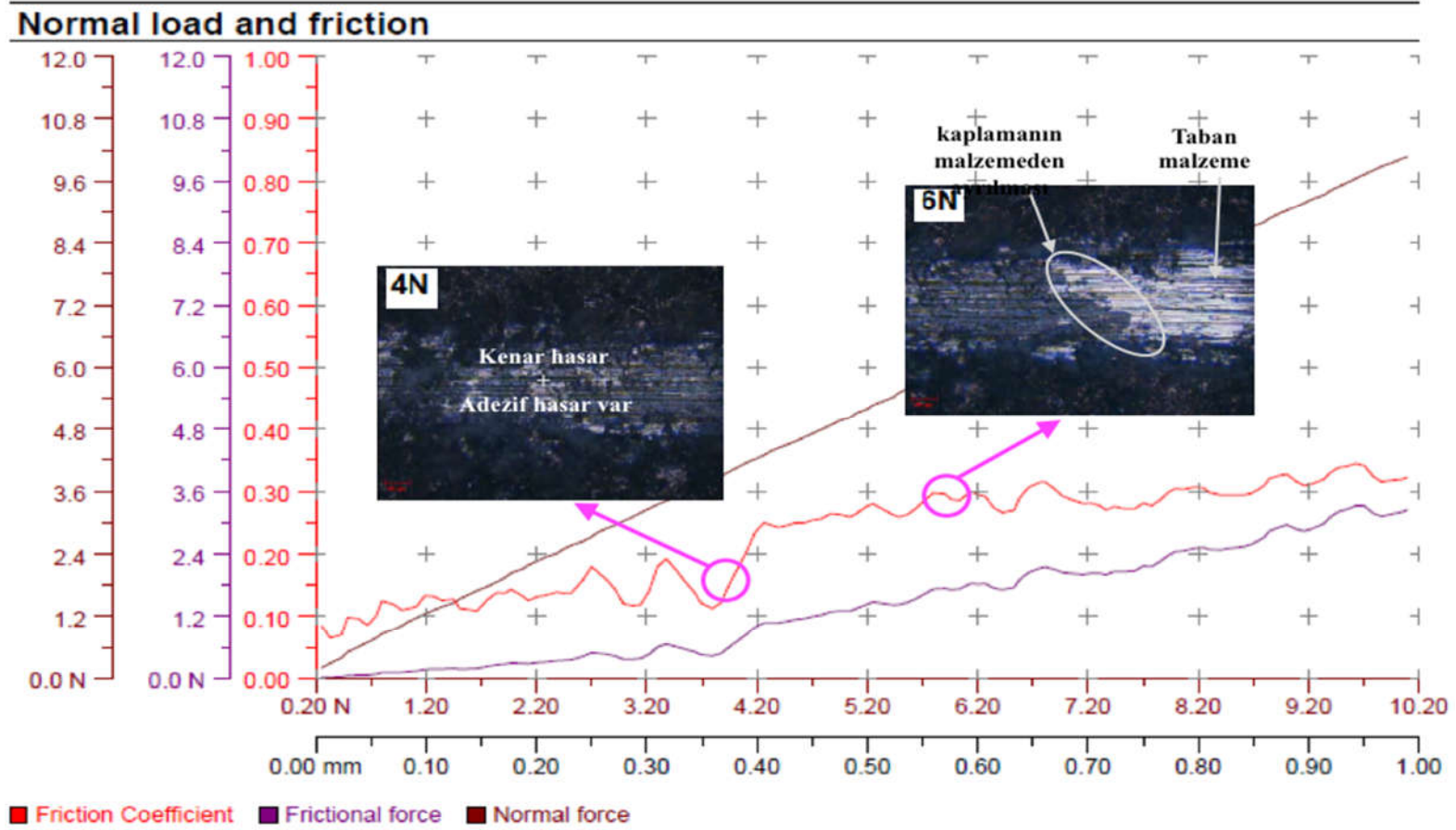
Şekil 45. PEO yöntemi ile P2 kaplama parametrelerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.



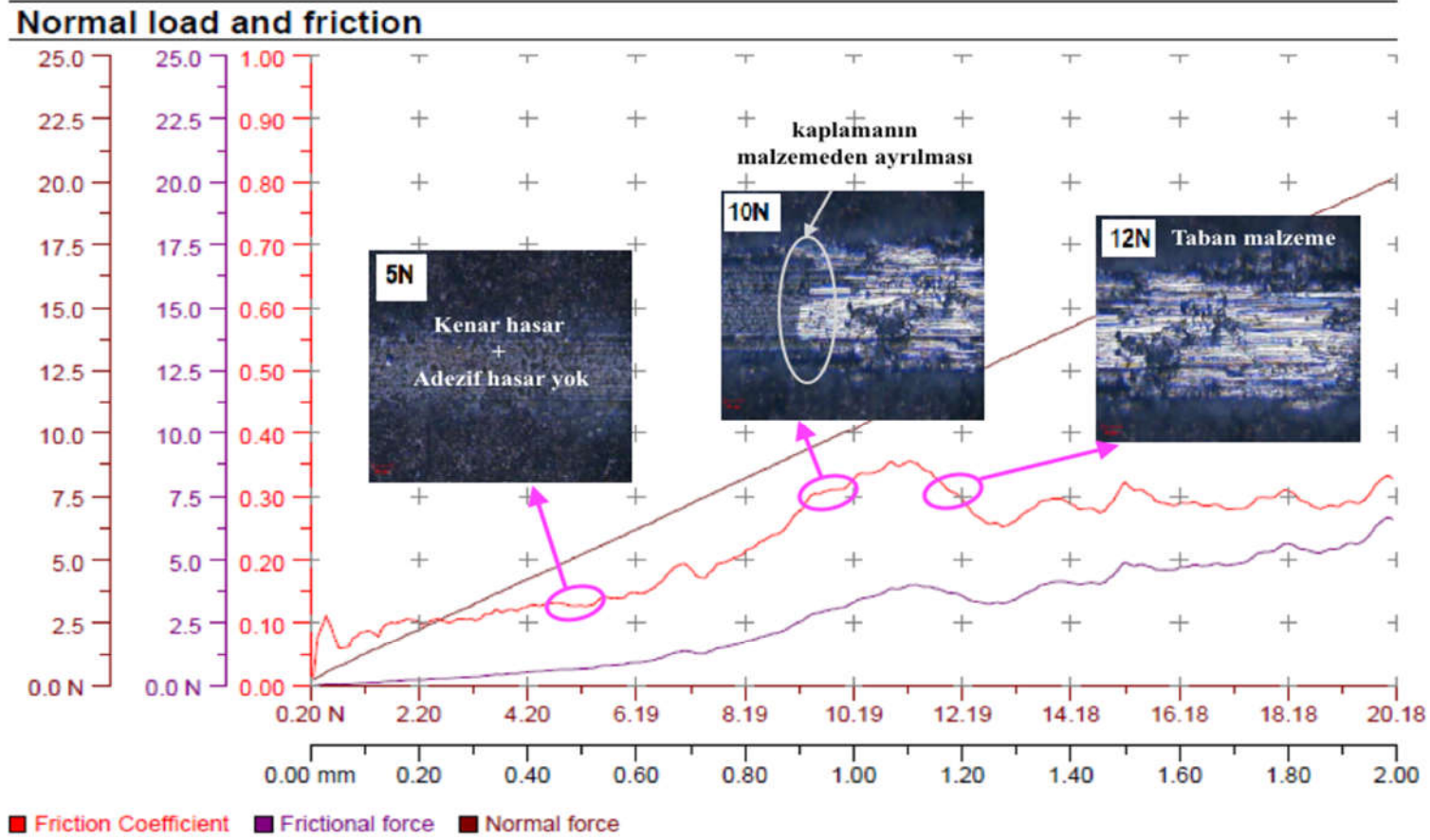
Şekil 46. PEO yöntemi ile P3 kaplama parametrelerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.



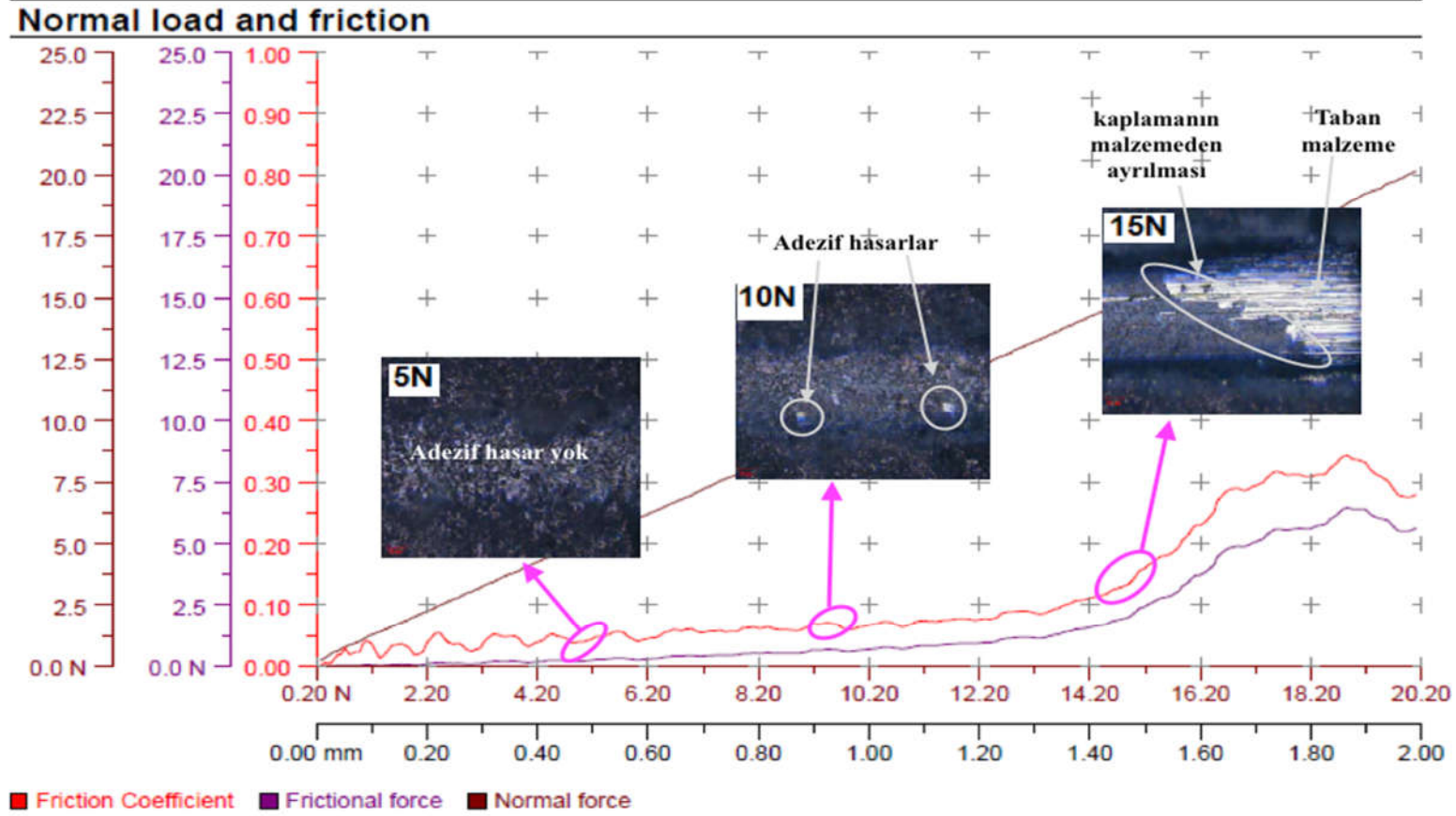
Şekil 47. PEO yöntemi ile P4 kaplama parametrelerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.



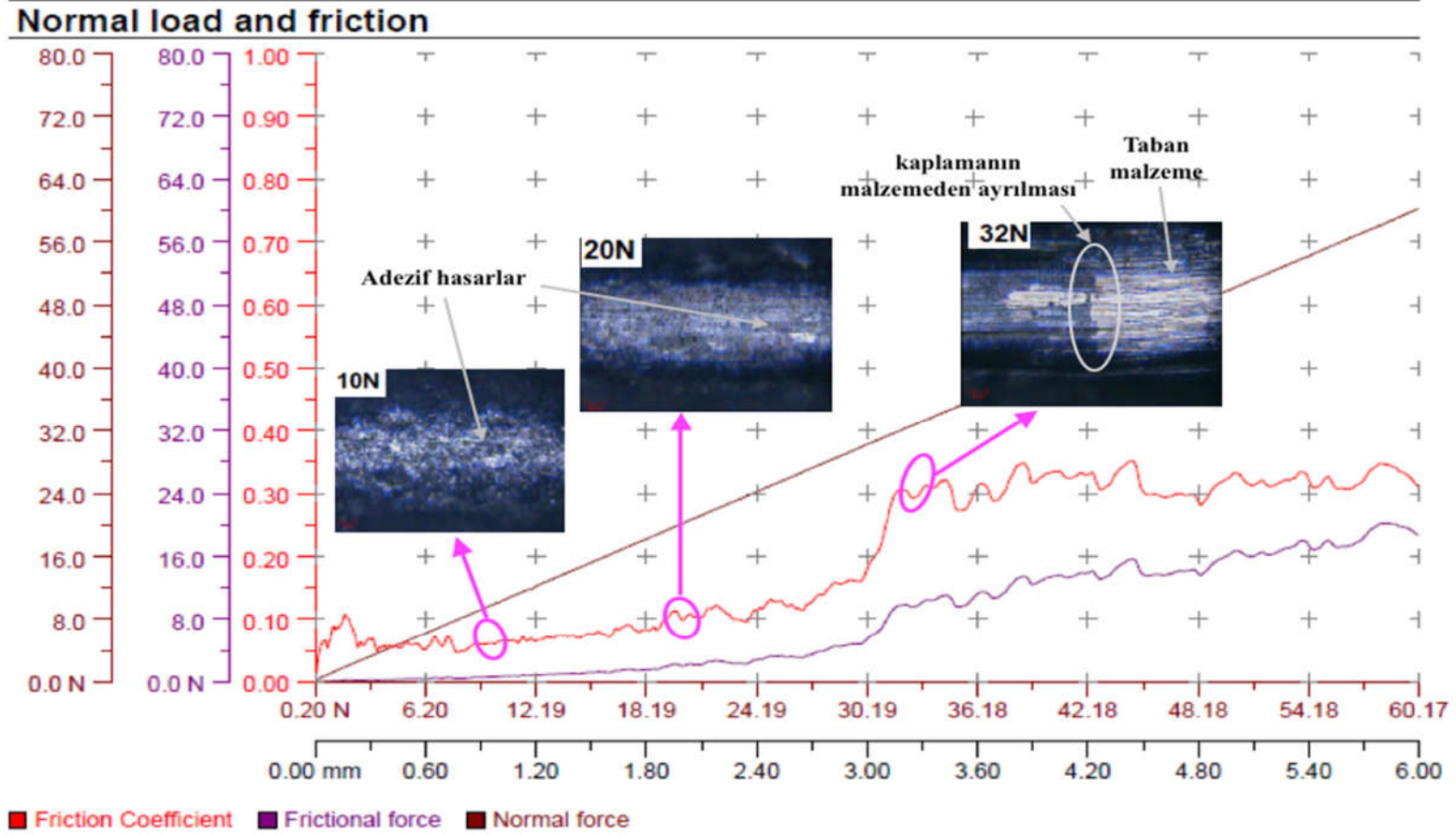
Şekil 48. PEO yöntemi ile P1 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 49. PEO yöntemi ile P2 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 50. PEO yöntemi ile P3 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 51. PEO yöntemi ile P4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.

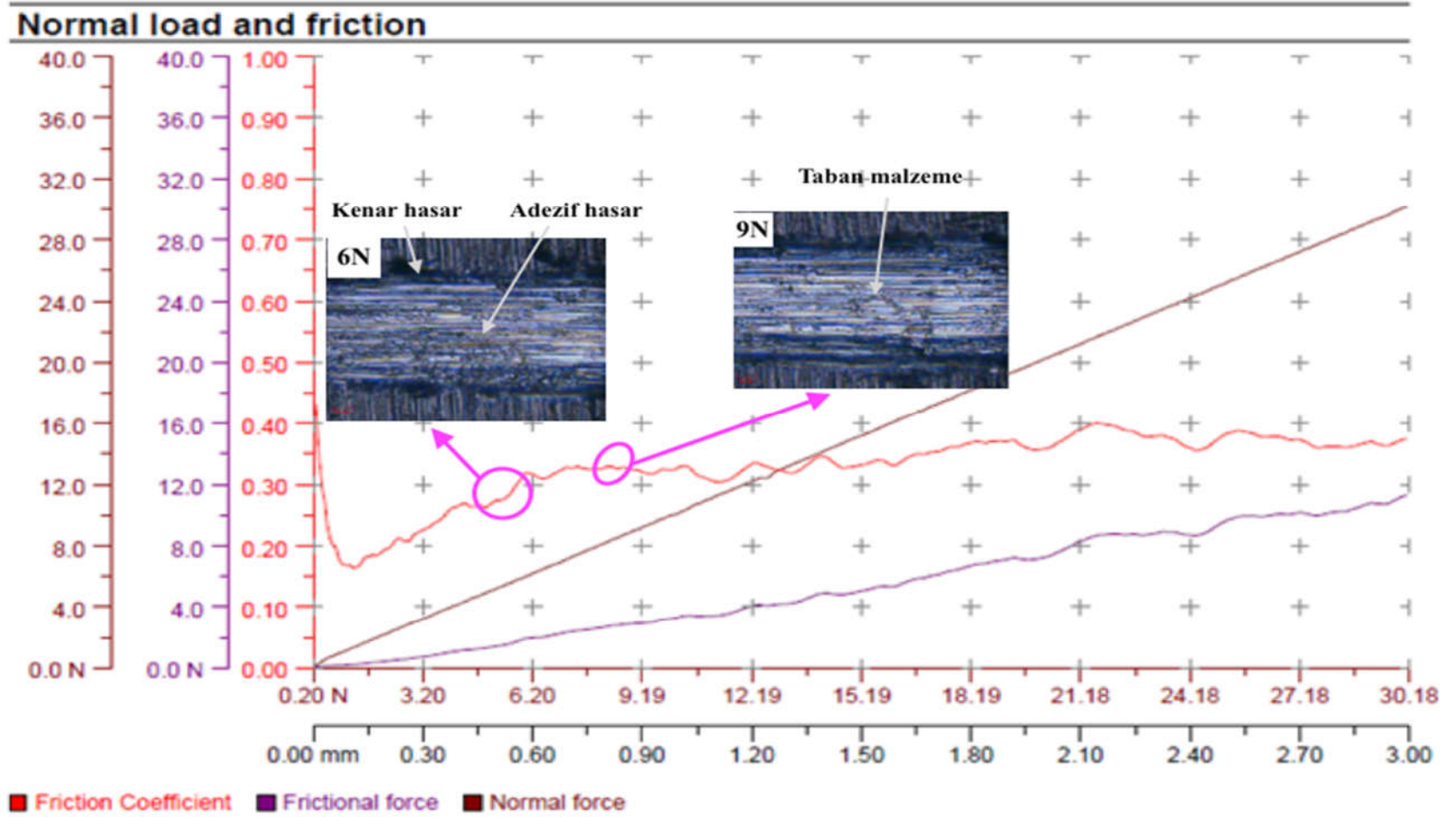
İkinci yöntem ise aynı taban malzemeler üzerine, Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) tekniğinin en gelişmiş prosesi olan kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) kaplama yöntemiyle farklı seviyelerde büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların adezyon özelliklerini belirlemek için scratch (çizik) testi kullanıldı ve yapılan çizme testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı–normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri Şekil 52-59’da verilmiştir. Elde edilen kritik yük değerleri ise Tablo 19’te verilmiştir.

Yang ve Yan; gerilime bağlı olarak kritik yüklerin değiştiğini gerilim ne kadar yüksek olursa, kritik yüklerin de artacağını ifade etmişlerdir. Yüksek adezyon, asıl olarak plazmanın implantasyonuna bağlıdır. Daha yüksek voltaj, darbeli plazma demetine daha yüksek hızlar kazandırabilir, bu ise hacimde daha uzun bir projeksiyon aralığına yol açacaktır. Daha uzun yansıtılan aralık, taban malzeme ve kaplamalar arasında daha geniş geçiş tabakasına sebep olabilmektedir. Daha geniş geçiş tabakası, termal genleşme farkı ve kafes uyumsuzluğundan kaynaklanan kaplamaların gerilimini aza indirmek için olumlu bir etkidir. İç gerilmenin azalması ise, kaplamaların taban malzemeye adezyonunun artmasına yol açmaktadır (Yan and Yang, 1995). Lin ve çalışma arkadaşları; çeşitli Ar/N₂ miktarlarında CFUBMS yöntemiyle pulsed-dc güç kaynağından istifade ederek farklı kaplamalar yapmışlardır. Yürüttükleri çalışmada; kaplamalarda amorf fazının oluşmasına N₂ miktarındaki artışın neden olduğunu belirtmişlerdir. Amorf fazlarının miktarının artması ile kaplamaların aşınma direnci ve sertliğinin azalmasına ve adezyon değerinin artmasına sebep olduğunu rapor etmişlerdir (Lin et al. 2010). Tian ve çalışma arkadaşları, filmlerde azotun artması ile adezyonun arttığını yaptıkları çalışmada rapor etmişler ve artan azot miktarı ile kaplamada iç gerilme miktarının azaldığını ve bu nedenle adezyonun fazlaştığını beyan etmişlerdir (Tian et al. 2004). Onoprienko ve arkadaşları; farklı N₂ miktarlarında, Ti hedefini kullanarak dc manyetik alanda sıçratma tekniği ile taban malzemeler üzerine biriktirmişlerdir. Adezyon miktarının, artan N₂ miktarı ile arttığını rapor etmişler ve adezyondaki artışı taban malzeme ile kaplama arasında bulunan gerilim gradyanındaki azalma ile irtibatlandırmışlardır (Onoprienko et al. 2015). Drabik ve arkadaşları; WC/a-C:H nanokompozit filmleri asetilen gaz kullanarak tungsten ve karbür hedeflerle reaktif manyetik alanda sıçratma tekniği kullanarak çeşitli taban malzeme gerilimleri ve görev sürelerinde büyütmüşlerdir. Bu araştırmacılar ise; düşük görev döngülerinde daha iyi adezyona sahip kaplamalar yaptıklarını beyan etmişlerdir (Drabik et al. 2018).

PVD ile AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeler üzerine büyütilen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalara yapılan scratch (çizik) testi sonucu elde edilen kritik yük değerleri incelendiğinde; kritik yük değerleri bir birlerine yakındır ve sırasıyla L_c 3-9N, ve L_c 6-27N arasında değişmektedir. En yüksek kritik yük (L_c) değeri AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelere uygulanan gerilimin (-50 V) olduğu, MoS₂ ve Ti hedeflerine uygulanan akım (0,6 A) olduğu ve çalışma basıncına (0,26) sahip, AA2014 üzerine R1 şartlarında büyütilen MoS₂-Ti (9N) ve Cp-Ti üzerine R1 şartlarında büyütilen MoS₂-Ti (27N) olarak elde edilmiştir. R1 şartlarında büyütilen nanokompozit kaplamaların en yüksek değerine sahip olması MoS₂ ve Ti hedeflerine uygulanan akımın en düşük değeri aldığı görülmüştür. Bu değer yapı içerisindeki bası gerilmelerinin homojen olarak dağıldığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürdeki çalışmalara göre, adezyon üzerinde etkili olan parametrelerin bu çalışmada da benzer etkiyi gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 52-59'da gösterildiği gibi çizme izlerinin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde; PVD yöntemiyle AA2014 üzerine büyütilen nanokompozit kaplamalarda 3-6 N aralığında ve Cp-Ti üzerine büyütilen nanokompozit kaplamalarda ise 6-10 N aralığında sırasıyla; kenar hasar, adeziv hasar ve ara yüzey parçalanması meydana gelmiştir. Meydana gelen tüm hasarlar, artan yük miktarı ile artmıştır (Arslan et al., 2008, 2013; Baradaran et al., 2013; Becerikli et al., 2021; Bidev et al., 2013; Cicek et al., 2018; Efeoğlu et al., 2019; Kouicem et al., 2021; Liu et al., 2021; Meng et al., 2021; Nonckreman et al., 2010; W. Qin et al., 2020; Zarka et al., 2021)

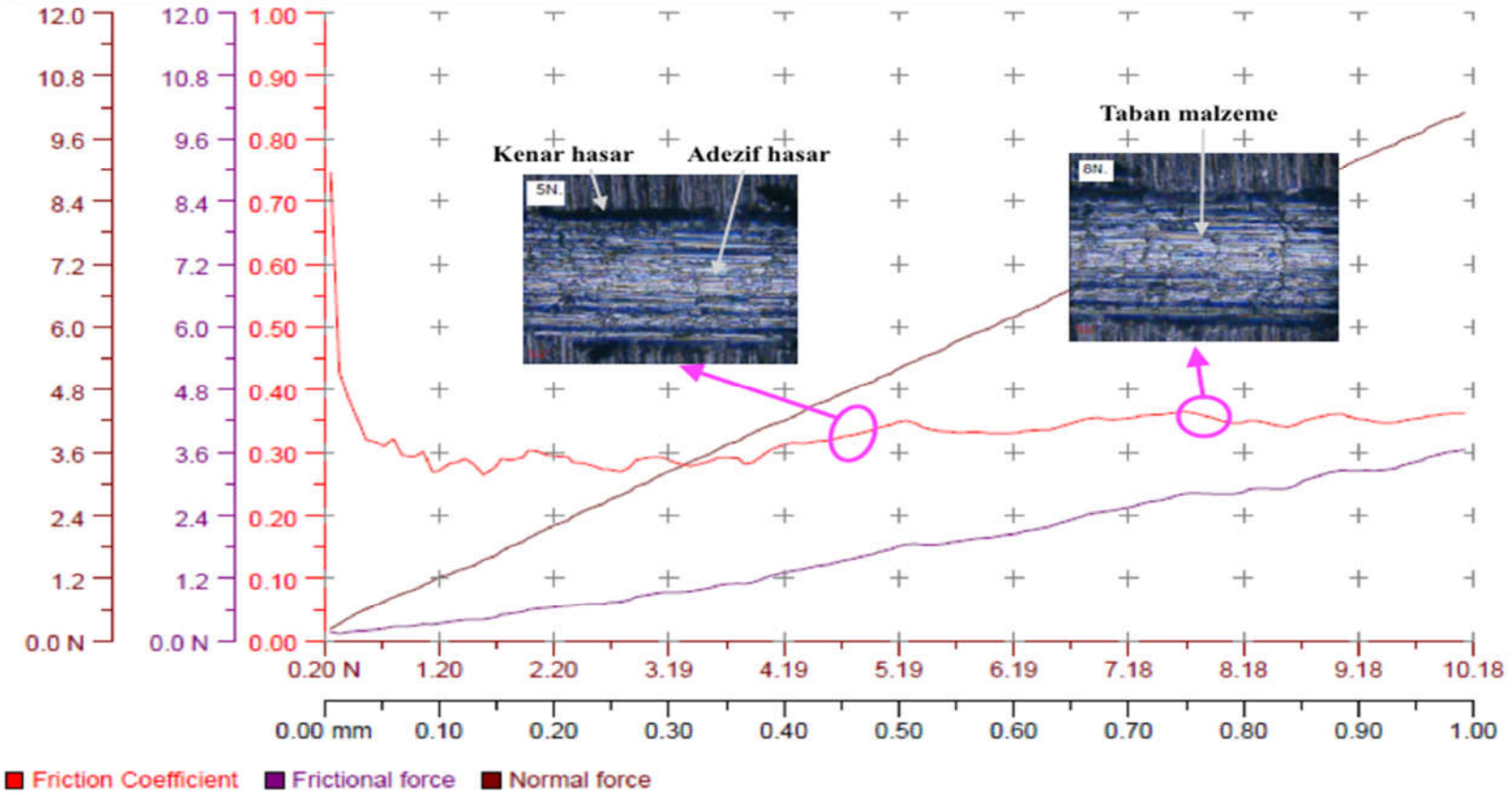
Tablo 19. PVD Yöntemleri İle Oluşturulan Filmlerin Kritik Yük Değerleri

PVD	Kaplama No	R1	R2	R3	R4
Kritik yük (N)	AA2014/MoS ₂ -Ti	9	8	8	5
	Cp-Ti /MoS ₂ -Ti	27	15	18	25



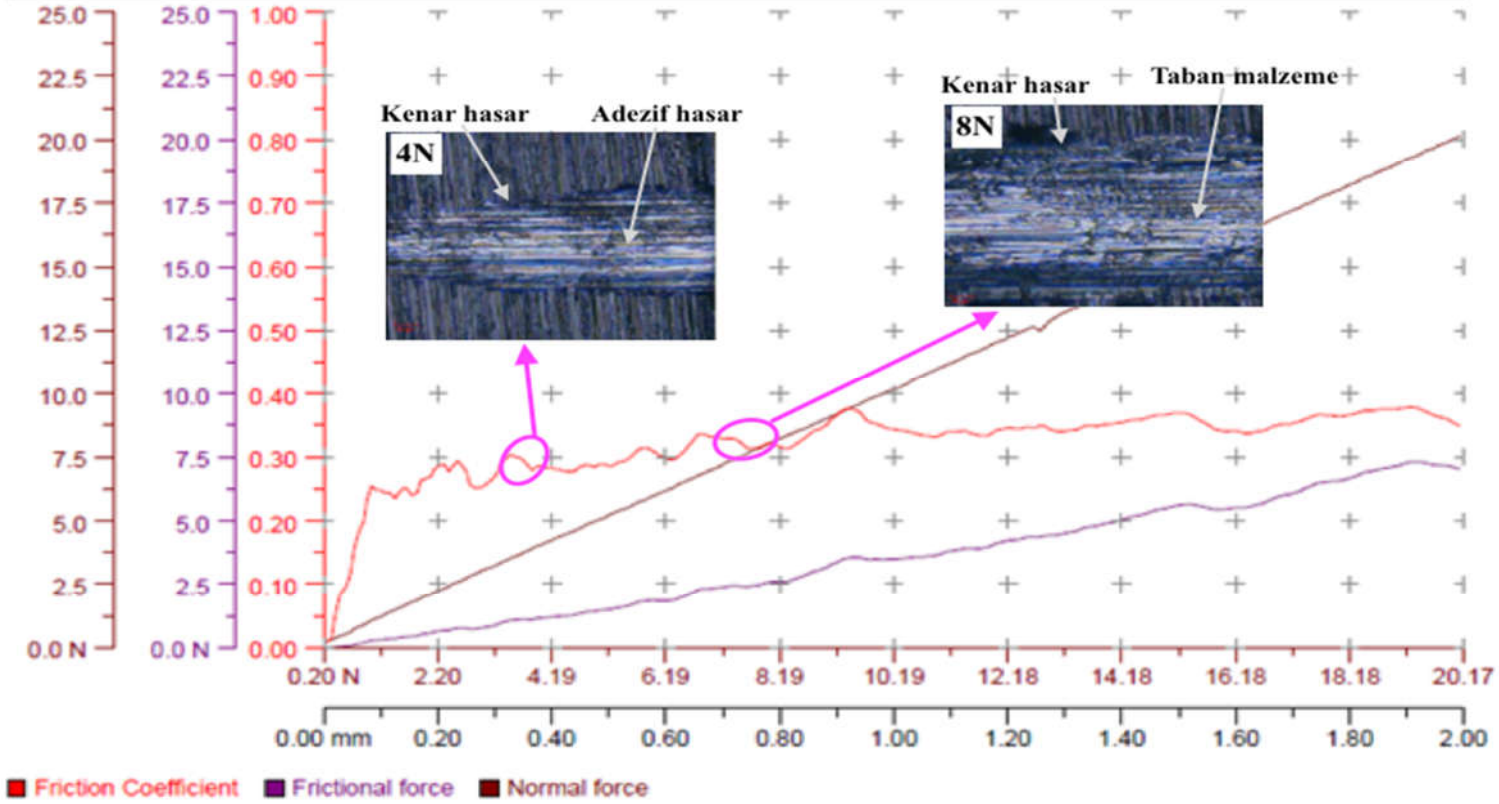
Şekil 52. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine R1 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS₂-Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.

Normal load and friction



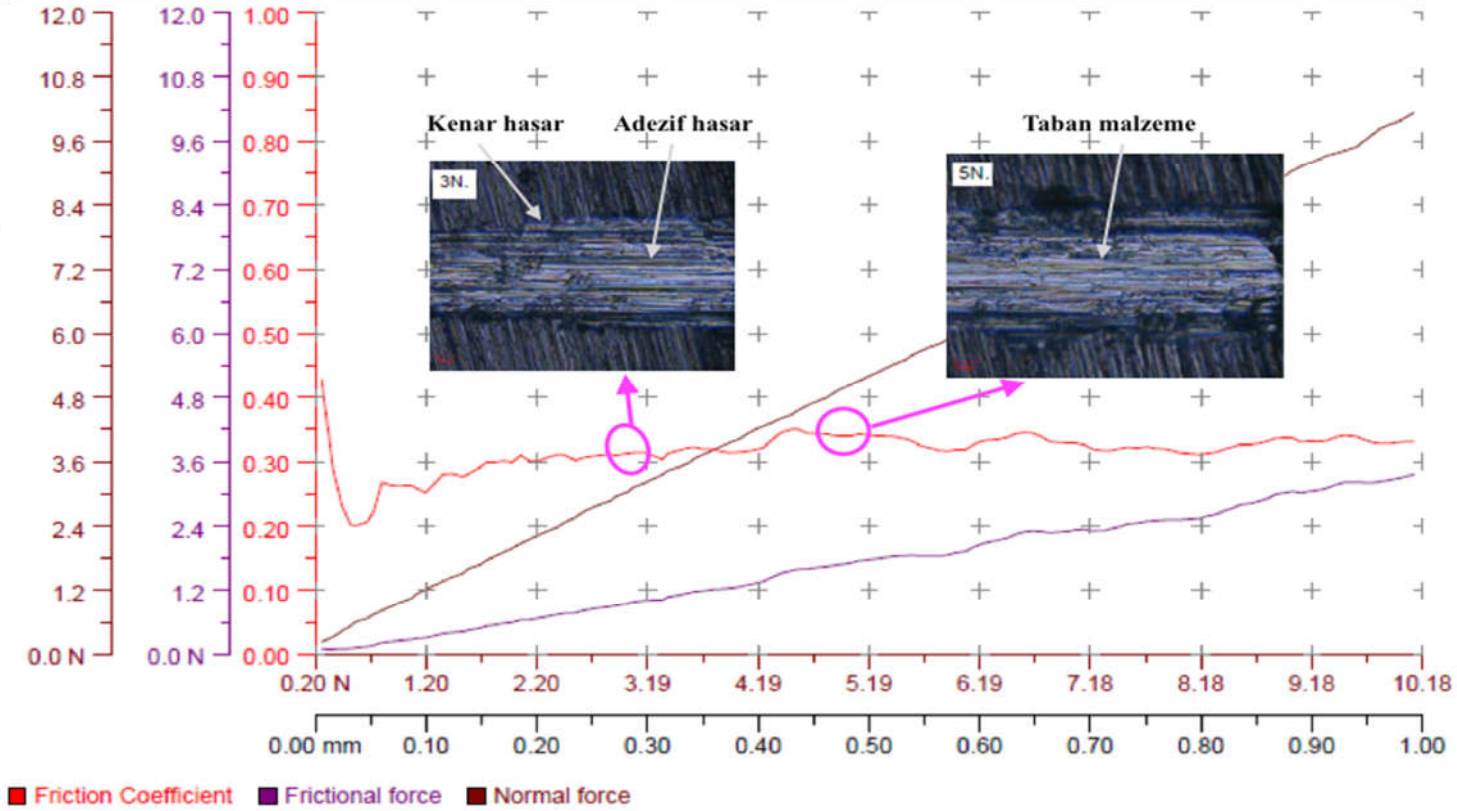
Şekil 53. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine R2 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS₂-Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.

Normal load and friction

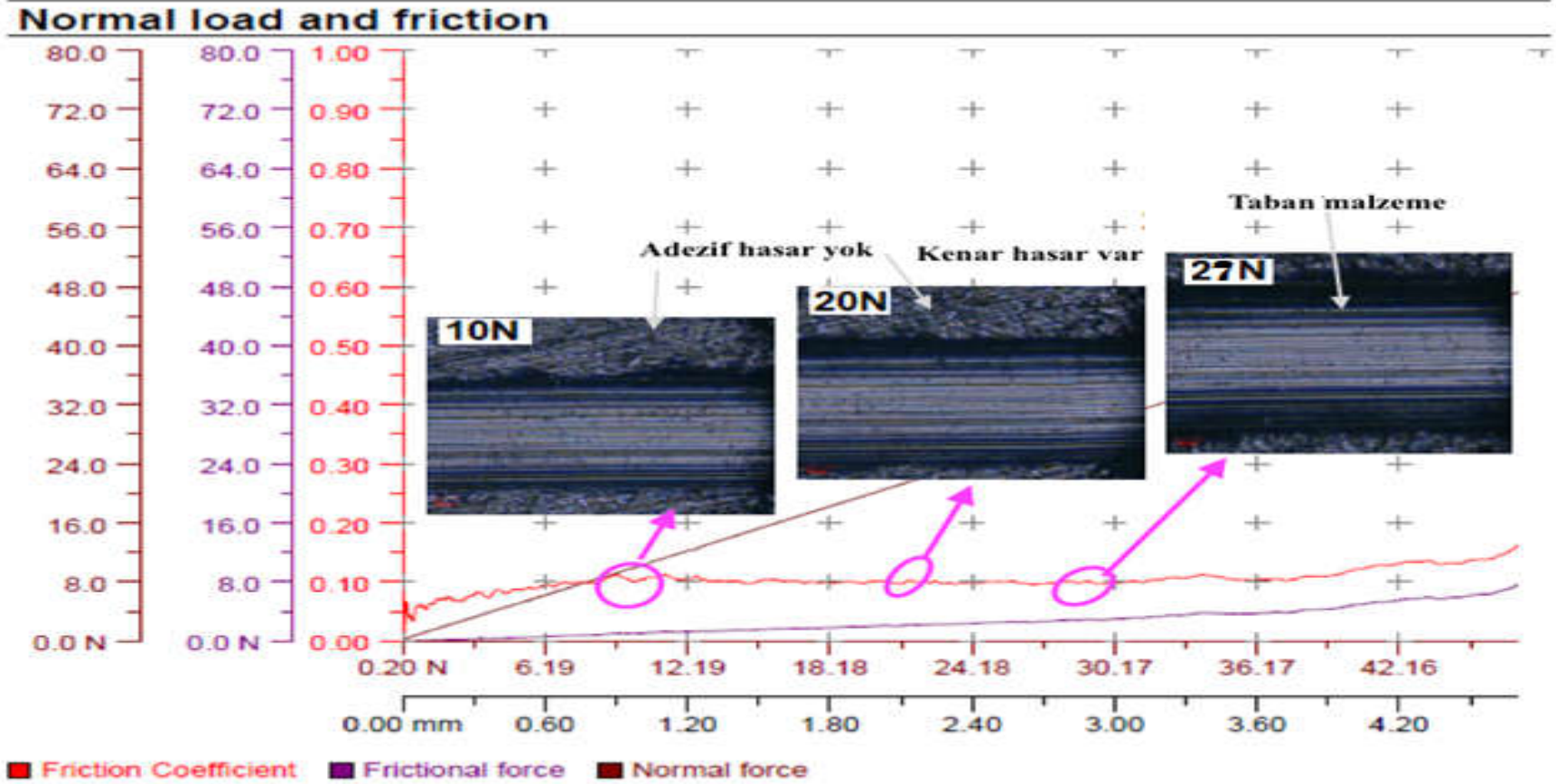


Şekil 54. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine R3 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS₂-Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.

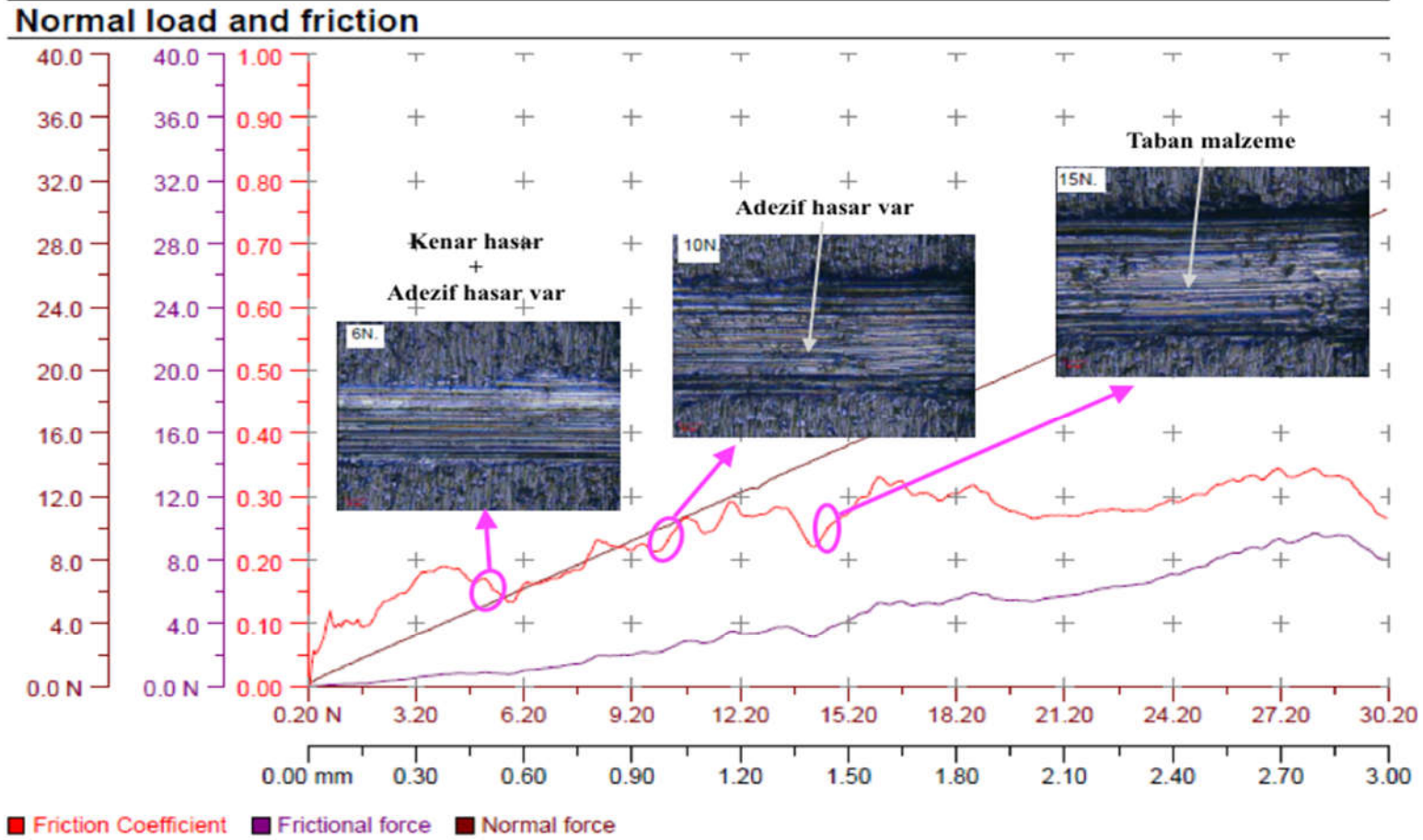
Normal load and friction



Şekil 55. PVD yöntemi ile AA2014 üzerine R4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS₂-Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.

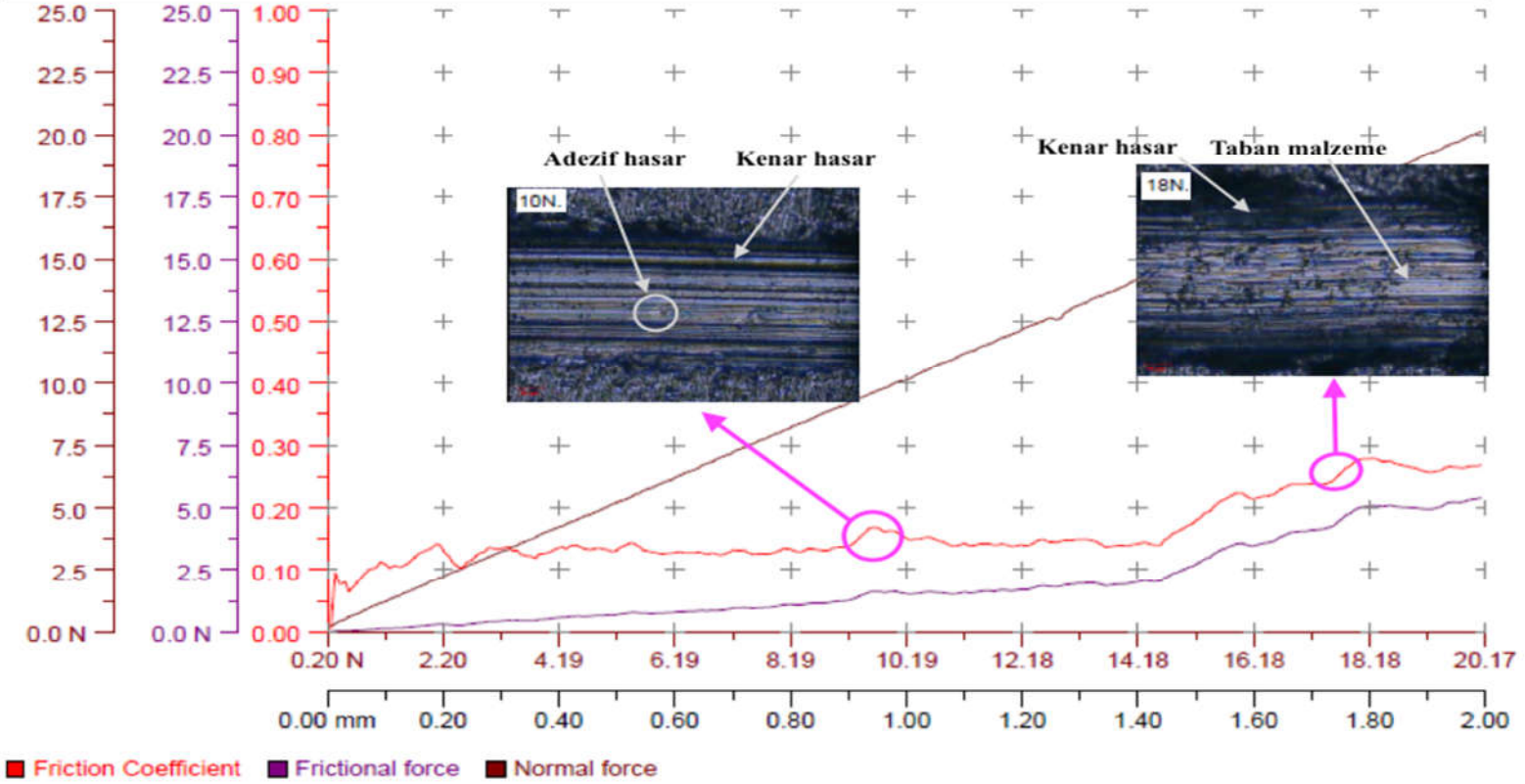


Şekil 56. PVD yöntemi ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine R1 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS₂-Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.



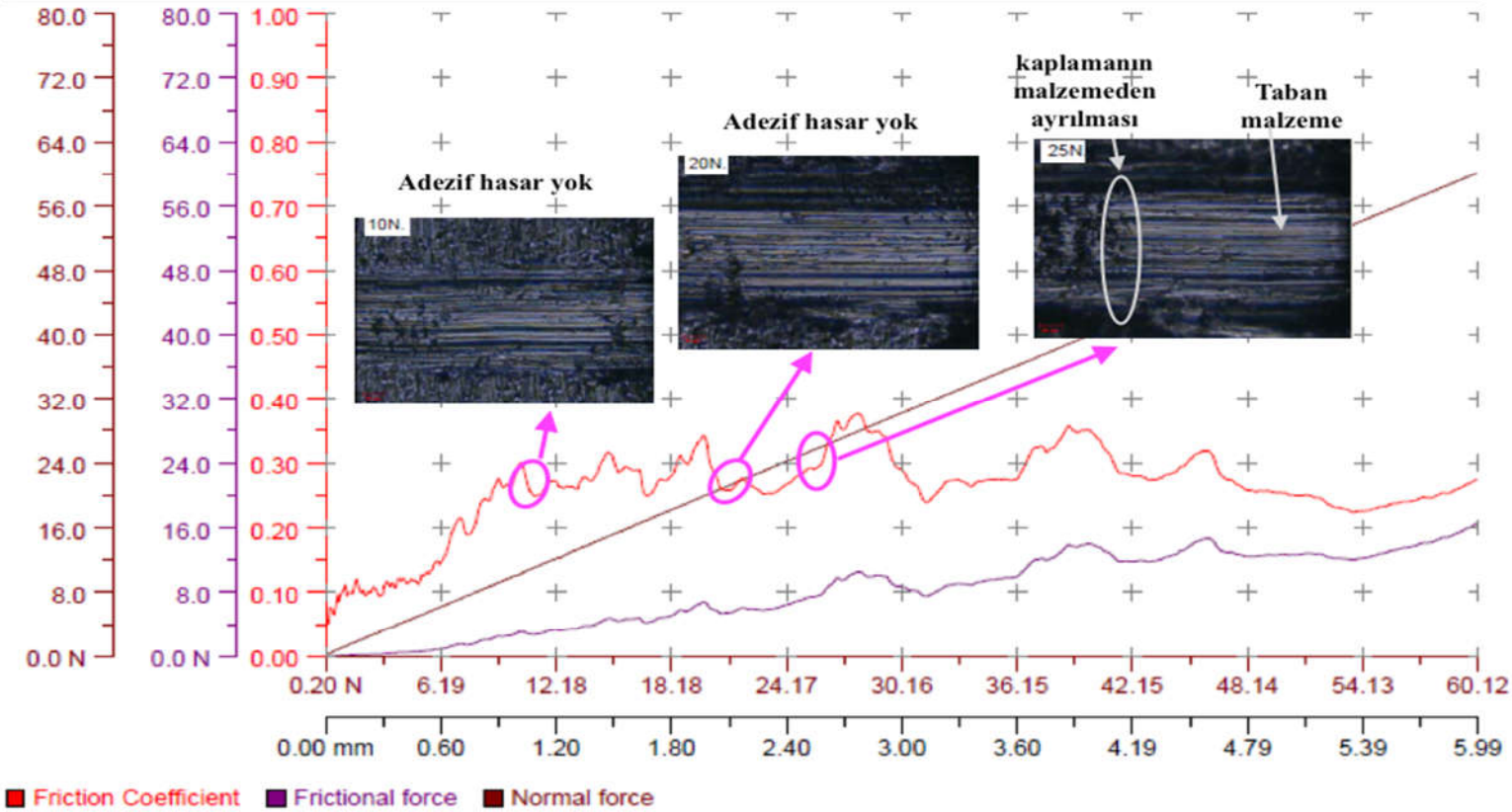
Şekil 57. PVD yöntemi ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine R2 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS₂-Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.

Normal load and friction



Şekil 58. PVD yöntemi ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine R3 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS₂-Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görüntüleri.

Normal load and friction



Şekil 59. PVD yöntemi ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine R4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş MoS₂-Ti filmlerin çizik (adezyon) testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı –normal yük grafikleri ve optik mikroskop görün

Korozyon Deney Sonuçları

Farklı iki yöntem ile kullanılarak katı yağlayıcı (Molibden disülfid) özelliğe sahip $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$, $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ ve $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ kaplamaların %3.5 NaCl çözeltisi içinde korozyon davranışlarını değerlendirmek için elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 60, 63, 66 ve 68’de, polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyel (E_{kor}) ve akım (I_{kor}) değerleri Tablo 20, 21, 22 ve 23’te gösterilmektedir. Korozyon deneyine tabi tutulan numunelerin SEM görüntüleri ise Şekil 61, 62, 64, 65, 67, 69, 70 ve 71’de verilmiştir.

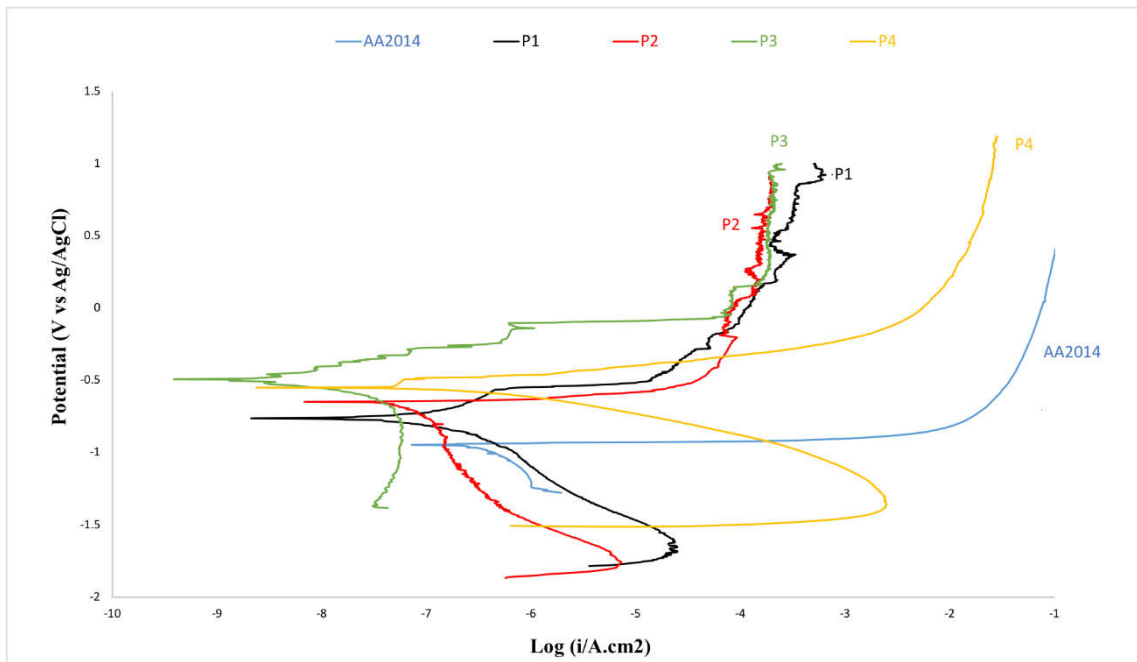
AA2014 ve Cp-Ti alaşımlarının kullanım alanlarında karşılaştıkları yüzey problemlerinden biri de korozyon hasarıdır. Hem biyomedikal alandaki kullanımları sırasında hem de endüstriyel alanda kullanımda bu hasarlar AA2014 ve Cp-Ti alaşımlarının kullanımını sınırlamaktadır. Alaşım ve metallerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için, iyon salınımını azaltarak korozyon davranışını iyileştirmek için çeşitli yüzey yöntemleri kullanılmaktadır. Yüzey kaplamaları son dönemlerde en sık kullanılan yöntemler arasındadır. Literatürdeki çalışmalar ışığında; PEO ve PVD tekniğinin en gelişmiş prosesi olan CFUBMS kaplama yöntemleri bu yöntemler arasında son yıllarda en çok tercih edilenlerdendir (Becerikli et al., 2021; Irfan Ul Haq et al., 2018; Ebru Emine Sukuroglu et al., n.d., 2016; Z. Zhao et al., 2020).

PEO ve PVD yöntemleriyle AA2014 ve Cp-Ti üzerinde büyütülen nanokompozit kaplamaların korozyon davranışını belirlemek için, %3.5 NaCl çözeltisi içinde korozyon deneyleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Korozyon davranışlarını değerlendirmek için yapılan deneylerde amaç, daha yüksek voltajlara eş değer olan daha düşük akımlar çekebilmektir. Yapılan korozyon deneyleri sonucunda; büyütülen nanokompozit kaplamaların korozyon direncini her iki yöntemde artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durumların sebebi, PEO ve PVD yöntemleri sonunda yüzeyde oluşan kararlı ve yoğun yapıya sahip olan $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$, $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ ve $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ nanokompozit tabakalarıdır. AA2014 ve Cp-Ti alaşımlarının üzerinde büyütülen nanokompozit tabakalar, bir bariyer gibi görev yaparak taban malzemelerini korozyonun negatif etkilerinden korumuş ve bu tabakaların, daha yüksek voltaj değerlerinde daha düşük akımlar çekmeye sebep olduğu gözlenmiştir (E Arslan et al., n.d.; CUI et al., 2019; Demirci et al., 2013; Irfan Ul Haq et al., 2018; Karabudak et al., 2017; W. Yang et al., 2020).

AA2014 taban malzeme üzerine PEO yöntemi kullanılarak $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ büyütülen kaplamaların %3.5 NaCl çözeltisi içinde korozyon davranışlarını değerlendirmek için elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 60’ta, polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyel (E_{kor}) ve akım (I_{kor}) değerleri Tablo 20’de gösterilmiştir. NaCl çözeltisi içerisinde korozyon deneyine tabi tutulan numunelerin SEM görüntüleri ise Şekil 61 ve 63’te verilmiştir.

Şekil 60'ta, PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamalardan elde edilen polarizasyon tafel eğrileri sonuçları karşılaştırıldığında, açıkça görülmektedir ki; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalar P1, P2, P3 ve P4 kaplama parametrelerinde AA2014 alaşımının korozyon davranışını iyileştirmiştir. Bu durumun sebebi, PEO yöntemi sonunda yüzeyde oluşan kararlı ve yoğun yapıya sahip olan $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit tabakalarıdır. Bu tabakalar, bir bariyer gibi görev yaparak AA2014 alaşımının korozyonun negatif etkilerinden korumuştur. Tablo 21'de verilen korozyon potansiyelleri (E_{kor}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}) sonuçları incelendiğinde, en yüksek akım yoğunluğu AA2014 kaplamasız olan numunede $78.10^{-4} \text{ A/cm}^2$ olarak elde edilirken, en düşük akım yoğunluğu P3 kaplama parametrelerinde büyütülen nanokompozit kaplamadan $25.10^{-9} \text{ A/cm}^2$ olarak elde edilmiştir. P1, P2 ve P4 kaplama parametrelerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalarda ise korozyon akım yoğunlukları sırasıyla 67.10^{-7} , 39.10^{-7} ve $83.10^{-8} \text{ A/cm}^2$ olarak elde edilmiştir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların korozyon akım yoğunluklarının P1, P2, P3 ve P4 kaplama parametrelerinde taban malzemeye göre önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. PEO yöntemi kullanılarak farklı parametrelerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalarının korozyon özellikleri karşılaştırıldığında; en yüksek korozyon direnci P3 ile kaplanan numunede ve en düşük korozyon direnci ise AA2014 kaplama yapılmayan alaşımda görülmektedir. Elde edilen Şekil 60 ve Tablo 20'deki polarizasyon sonuçlarına göre ve literatür çalışmalarına dayanarak, P3 şartlarında büyütülen kaplamaların yüzeyinde oluşan kararlı ve yoğun $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ tabakaları, iyi bir bariyer gibi görev yapmış ve P1, P2 ve P4 kaplamalara göre, yüksek voltajlara eş değer olan düşük akımlar çekmiştir. Ayrıca kaplama kalınlığının artmasının korozyon direncinin de artmasına neden olduğu belgelendirilmiştir (Fenker *et al.* 2006; Liang *et al.* 2005; Mu and Han 2008). Bu çalışmada ise, PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine P3'te kaplanmış $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların yapılan dört deney içinde en yüksek kalınlık değerine ($5,114 \mu\text{m}$) ayrıca homojen, gözenek çapları küçük, kararlı $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı, yoğun ve kalın yapıya sahip olduğu için daha iyi korozyon direnci elde edilmiştir. En düşük pasifleşme eğilimi $-0,737 \text{ V}$ korozyon potansiyelinde kaplanmamış AA2014 alaşımı olduğu görülmektedir. Korozyon akım yoğunluğu ve polarizasyon tafel eğrilerinden anlaşılabileceği gibi PEO yöntemi kullanılarak farklı parametre ve seviyelerde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalarda pasifleşmenin yaklaşık olarak $1,5 \text{ V}$ civarına kadar devam ederken, P3 ile kaplama yapılan numunesinde $-0,185 \text{ V}$ potansiyelinde korozyona uğradığı ve kısa bir sürede tekrardan pasifleşmeye başladığı anlaşılmaktadır. Kaplama işlemi uygulanmayan numunede ise pasifleşme yaklaşık olarak $1,5 \text{ V}$ korozyon potansiyelinde tamamlandığı tespit edilmiştir.

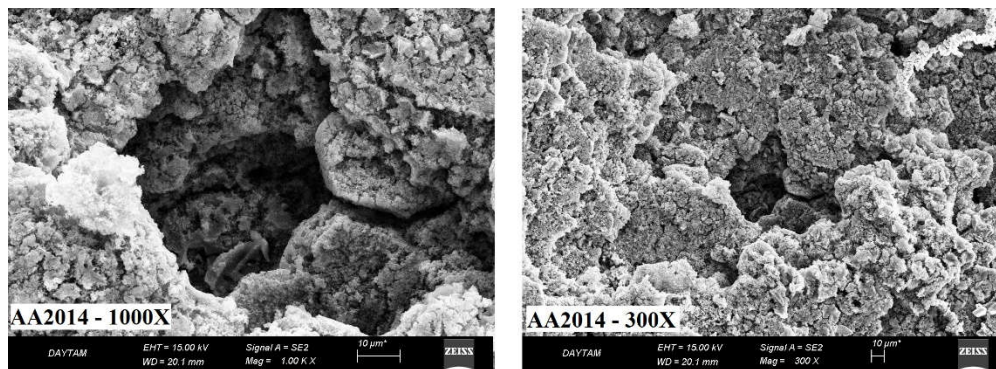
Şekil 61 ve 62’de verilen AA2014 alaşımlı taban malzeme ve PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların %3.5 NaCl çözeltisi içerisinde korozyona uğratılmış SEM görüntüleri incelendiğinde; kaplama yapılmayan taban malzemesi AA2014 alaşımında korozyon hasarı net bir şekilde görülmektedir. Literatürdeki çalışmalara göre; PEO yöntemiyle yapılan nanokompozit kaplamalar işlem süresi ve işlem süresinden sonra yüzeyde oluşan gözeneklerin sayısı artarsa, gözeneklerin boyutları da azalır. Böylece korozif ortamlarda veya elektrolitin numune yüzeylerinde (gözenekli bölgelerde) daha az kalmasına sebep olur ve korozyon direncini artırır (Becerikli et al., 2021; Cheng *et al.* 2013; CUI et al., 2019; Irfan Ul Haq et al., 2018; Karabudak et al., 2017; Sukuroglu et al., 2016; Yang et al., 2020; Zhao et al., 2020). AA2014 alaşımlı taban malzemelerin özellikle çukurcuk korozyonunun aktif olduğu (beyaz bölge) ve yoğun olarak korozyona uğradığı görülmektedir. Genellikle NaCl çözeltisi içinde büyütülmüş kaplamalarda görülen korozyon çukurcuk korozyon türüdür ve bunun da sebebi Cl^- iyonlarıdır (Dehnavi et al., 2018; Demirci et al., 2013; Irfan Ul Haq et al., 2018; Jiang & Wang, 2010; Spencer et al., 2009; Ebru Emine Sukuroglu et al., 2016; Z. Zhao et al., 2020). SEM resimlerinden de görüldüğü gibi PEO yöntemi ile P1/P2/P3/P4- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalarda çukurcuk korozyonu olduğu, bununla birlikte, kaplama yüzeyinde oluşan mikro çatlaklar (Şekil 62) korozyonun yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Şekil 64’de verilen korozyon yüzey SEM görüntülerinden de anlaşılabileceği gibi P3 şartlarında (yüksek voltaj ve frekans) yapılan $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ kaplamalarının homojen, gözenek çapları küçük, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı, yoğun ve kalın yapıya sahip olduğu için AA2014 kaplamasız taban malzemeye ve diğer P1, P2 ve P4 numunelere göre daha iyi korozyon direncini gösterdiği anlaşılmaktadır. Elde edilen bütün sonuçların literatür çalışmaları ile benzerlik gösterdiği görülmüştür. Ayrıca bütün kaplamaların korozyon dirençleri; kaplama kalınlığı, partikül ve gözenek boyutu, taban malzemenin mikro yapısı ve kimyasal bileşimi üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. (Arslan et al., n.d.; Bayatia *et al.* 2010; Becerikli et al., 2021; Cheng *et al.* 2013; CUI et al., 2019; Demirci et al., 2013; Irfan Ul Haq et al., 2018; Karabudak et al., 2017; Sukuroglu et al., 2016; Yang et al., 2020; Zhang *et al.* 2010; Zhao et al., 2020).



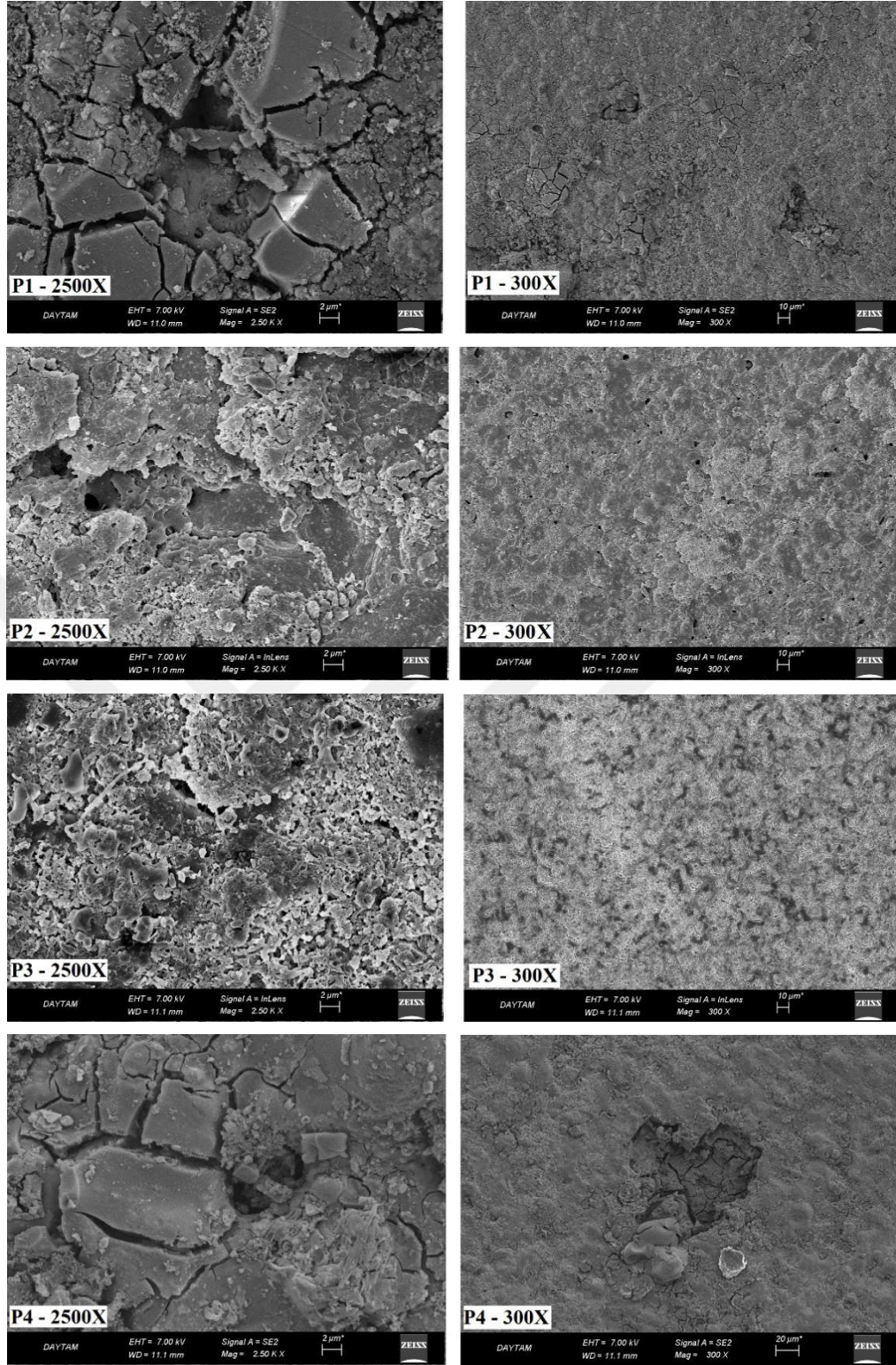
Şekil 60. P1, P2, P3 ve P4 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

Tablo 20. PEO ile Büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ Kaplamaların Korozyon E_{kor} ve I_{kor}

PEO	E_{kor} (V)	I_{kor} (A/cm ²)
AA2014	-0,737	78.10^{-4}
P1	-0,598	67.10^{-7}
P2	-0,551	39.10^{-7}
P3	-0,489	25.10^{-9}
P4	-0,501	83.10^{-8}



Şekil 61. AA2014 taban malzemesinin korozyon sonrası SEM görüntüsü.



Şekil 62. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen Al₂O₃/MoS₂ nanokompozit kaplamaların korozyon sonrası SEM görüntüleri.

Cp-Ti taban malzeme üzerine PEO yöntemi kullanılarak $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ büyütülen kaplamaların %3.5 NaCl çözeltisi içinde korozyon davranışlarını değerlendirmek için elde edilen potansiyodinamik polarizasyon Tafel eğrileri Şekil 63'te, polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyel (E_{kor}) ve korozyon akım yoğunluk (I_{kor}) değerleri Tablo 21'de ve NaCl çözeltisi içerisinde korozyon deneyine tabi tutulan numunelerin SEM görüntüleri Şekil 64 ve 65'te verilmiştir.

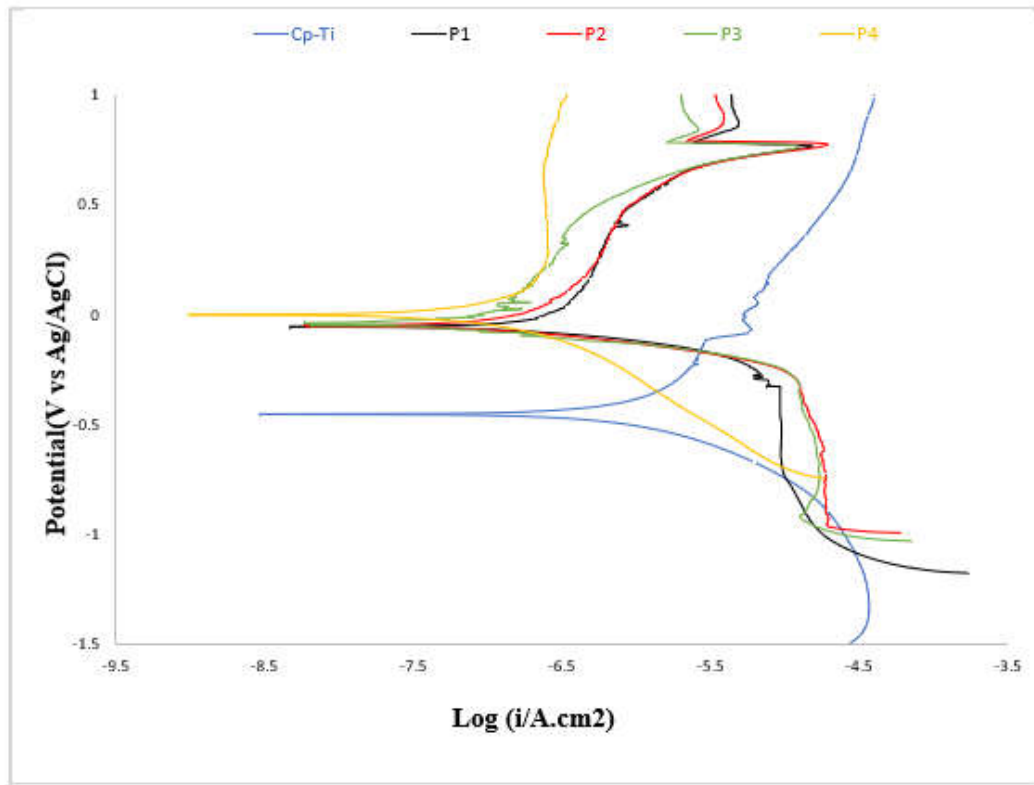
Elde edilen polarizasyon tafel eğrileri sonuçları karşılaştırıldığında, açıkça görülmektedir ki $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalar P1, P2, P3 ve P4 kaplama parametrelerinde Cp-Ti korozyon davranışını iyileştirmiştir ve kaplamaların korozyon akım yoğunluklarının P1, P2, P3 ve P4 kaplama parametrelerinde taban malzemeye göre önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Cp-Ti taban malzemesi için elde edilen korozyon akım yoğunluğu $20.10^{-6} \text{ A/cm}^2$ iken en düşük korozyon akım yoğunluğu ($55.10^{-9} \text{ A/cm}^2$) ise P4 kaplama parametrelerinde büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamadan elde edilmiştir. P1, P2 ve P3 kaplama parametrelerinde büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların korozyon akım yoğunlukları yaklaşık olarak aynıdır ve sırasıyla 49.10^{-8} , 52.10^{-8} ve $89.10^{-8} \text{ A/cm}^2$ olarak elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen korozyon potansiyel değerlerinde de önemli değişimler gözlenmiştir. En düşük pasifleşme eğilimi $-0,476 \text{ V}$ korozyon potansiyelinde kaplanmamış Cp-Ti olduğu görülmektedir. P1, P2 ve P3 ile kaplama yapılan numunelerde yaklaşık $0,467 \text{ V}$ potansiyelinde korozyona uğradığı ve tekrardan pasifleşmeye başladığı anlaşılmaktadır. Kaplama işlemi uygulanmayan numunede ise pasifleşme yaklaşık olarak 1 V korozyon potansiyelinde tamamlandığı anlaşılmaktadır.

Şekil 63, 64 ve 65'te ve tablo 21 verilen sonuçlarına göre ayrıca literatür çalışmalarına dayanarak, PEO yöntemiyle yapılan nanokompozit kaplamalar işlem süresi ve işlem süresinden sonra yüzeyde oluşan gözeneklerin sayısı artarsa, gözeneklerin boyutları da azalır. Böylece koroziif ortamlarda veya elektrolitin gözenekli bölgelerde daha az kalmasına sebep olur ve korozyon direncini artırır.

Cp-Ti taban malzemesi üzerine P4 şartlarında yapılan $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların, yapılan dört deney içinde en yüksek kalınlık değerine (9.546 mikron) ayrıca kararlı ve yoğun şekilde oluşan rutil fazları, gözenek çaplarının homojen ve küçük olduğu için iyi korozyon direnci elde edilmiştir. P4 şartlarında büyütülen kaplamaların yüzeyinde oluşan kararlı ve yoğun $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ tabakaları, iyi bir bariyer gibi görev yapmış ve P1, P2 ve P3 kaplamalara göre, yüksek voltajlara eş değer olan düşük akımlar çekmiştir (Becerikli et al., 2021; Irfan Ul Haq et al., 2018; Karabudak et al., 2017; Liang *et al.* 2005; Mu and Han 2008; Sukuroglu et al., 2016; Yang et al., 2020; Zhang *et al.* 2010; Zhao et al., 2020).

PEO ile yapılan kaplamalarda kompakt tabaka oranı ve rutil fazının oranı arttıkça korozyon direncinin de arttığı gözlenmiştir. Ayrıca bütün kaplamaların korozyon dirençleri üzerinde kaplama kalınlığı, partikül ve gözenek boyutu, taban malzemenin mikro yapısı ve kimyasal bileşimi etkilidir. Daha yoğun ve daha kalın kaplama, NaCl çözeltisindeki Cl⁻'den gelen olumsuz etkiyi engelleyerek korozyon direncini artırmaya yardımcı olur. Cp-Ti ve P1/P2/P3/P4-TiO₂/MoS₂ nanokompozit kaplamalarda korozyon hasarı net bir şekilde çukurcuk olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlarda, voltaj ve frekans değerleri yükseldikçe kaplamalar daha yoğun ve daha kalın hale gelir ve korozyon direnci artar. Ancak P1 ve P2 de, kaplama yüzeyinde oluşan çatlaklar ve azalan kompaktlık, kaplamaların NaCl çözeltisine karşı koruma etkisini bir miktar azaltır. Bununla birlikte, NaCl çözeltisindeki Cl⁻ iyonları TiO₂/MoS₂ kaplamalara kolayca nüfuz eder ve sonunda daha belirgin yüzey korozyonuna yol açar.

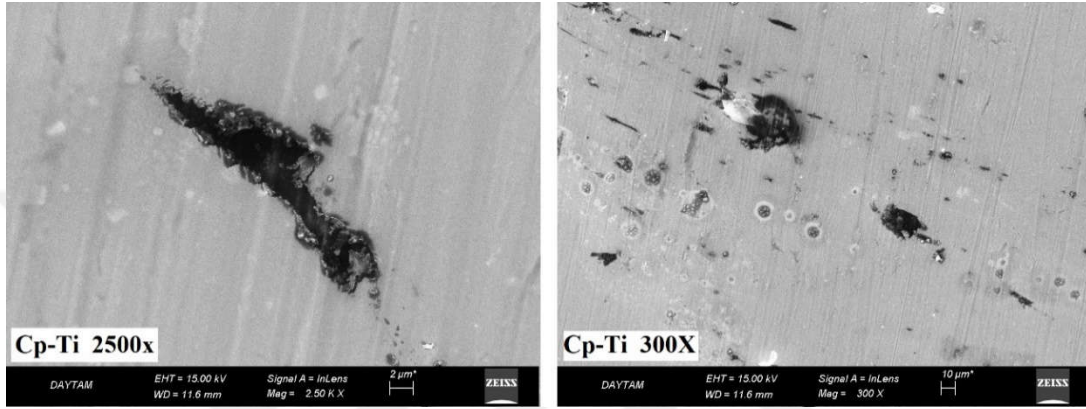
Tablo 21’de verilen korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu sonuçları incelendiğinde, en yüksek akım yoğunluğu Cp-Ti kaplamasız olan numunede 20.10^{-6} A/cm² olarak elde edilmiş ve en düşük akım yoğunluğu P4 kaplama parametrelerinde büyütülen nanokompozit kaplamadan 55.10^{-9} A/cm² olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada yapılan TiO₂/MoS₂ kaplamaların literatür çalışmaları ile paralellik gösterdiği belirlenmiştir (Becerikli et al., 2021; Bayatıa *et al.* 2010; Cheng *et al.* 2013; Mu *et al.* 2008; Sukuroglu et al., 2016; Zhang *et al.* 2012).



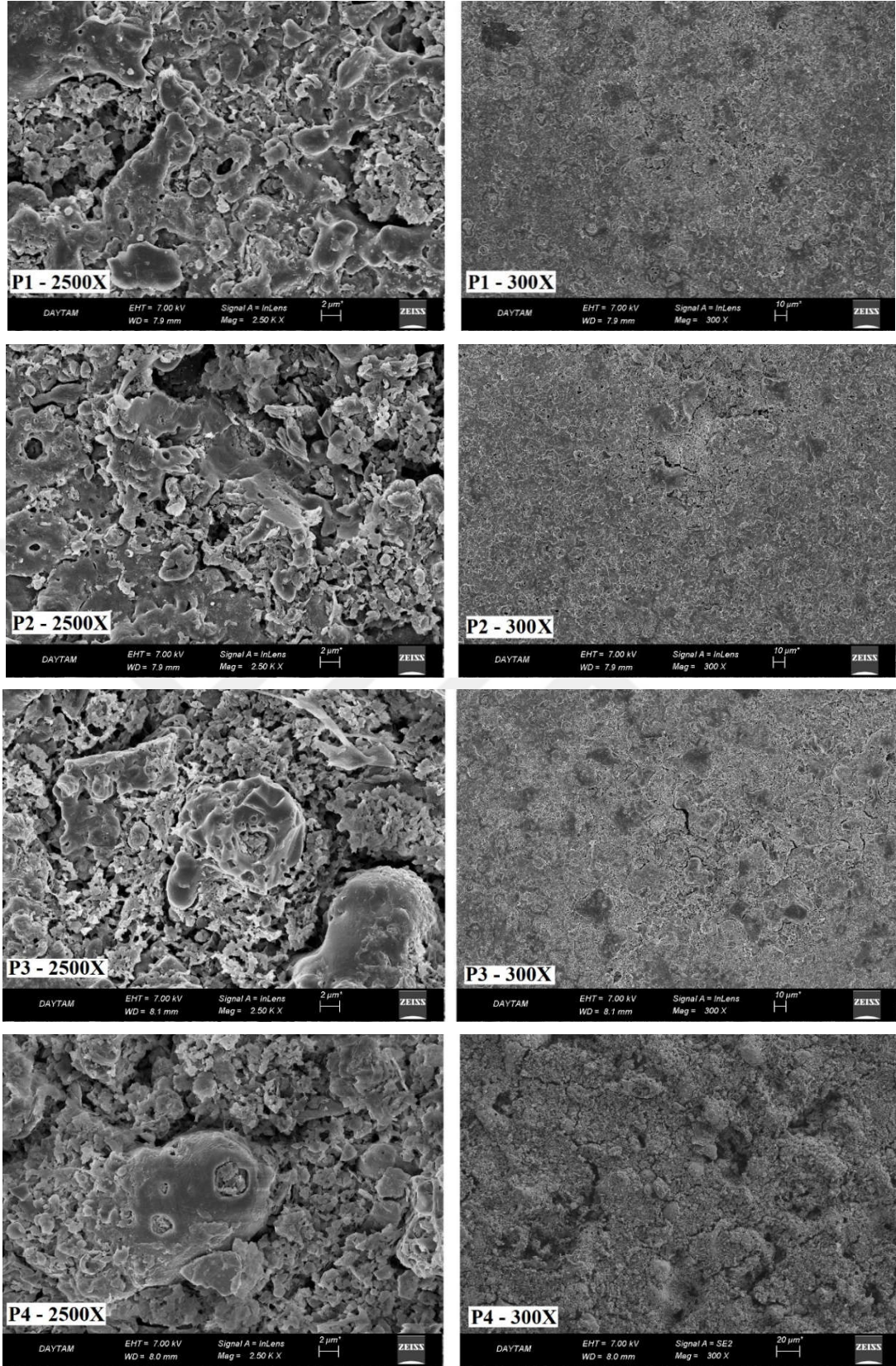
Şekil 63. P1, P2, P3 ve P4 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

Tablo 21. PEO ile Büyütülen TiO₂/MoS₂ Kaplamaların E_{kor} ve I_{kor}

PEO	E _{kor} (V)	I _{kor} (A/cm ²)
Cp-Ti	-0,476	20.10 ⁻⁶
P1	-0,032	49.10 ⁻⁸
P2	-0,054	52.10 ⁻⁸
P3	0,119	89.10 ⁻⁸
P4	0,202	55.10 ⁻⁹



Şekil 64. Cp-Ti taban malzemesinin korozyon sonrası SEM görüntüsü.

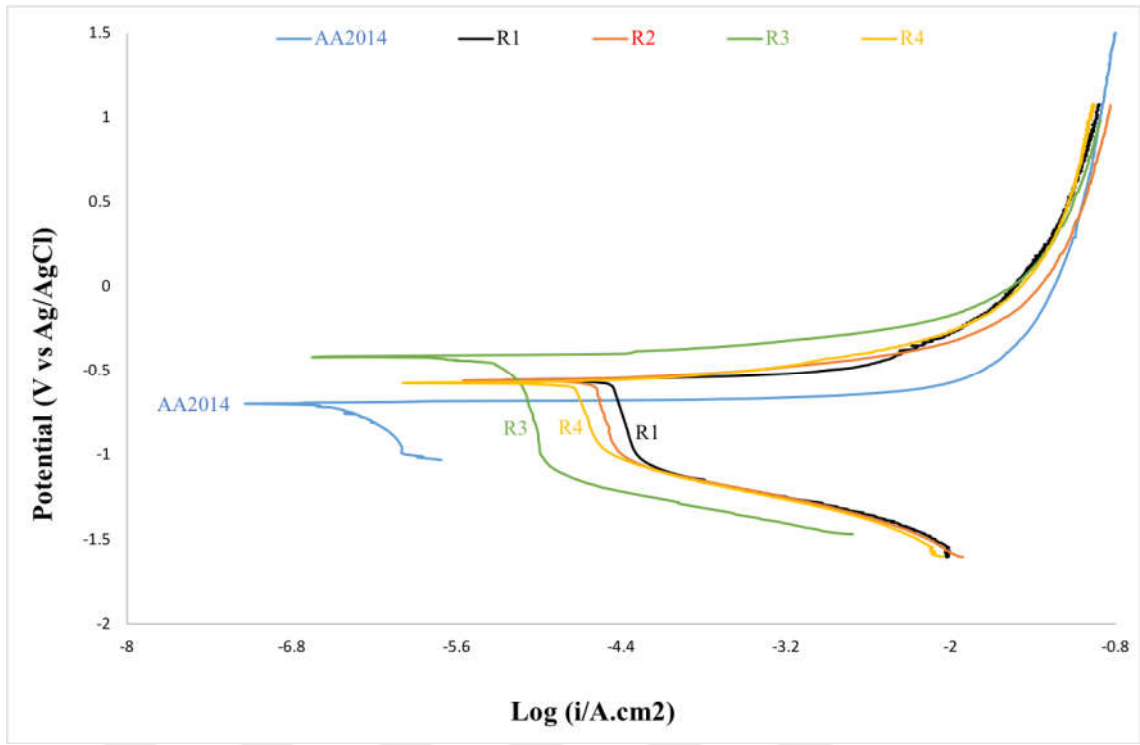


Şekil 65. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen TiO₂/MoS₂ nanokompozit kaplamaların korozyon sonrası SEM görüntüleri.

AA2014 alaşımlı taban malzeme üzerine PVD yöntemi kullanılarak MoS₂-Ti büyütülen kaplamaların %3.5 NaCl çözeltisi içinde korozyon davranışlarını değerlendirmek için elde edilen potansiyodinamik polarizasyon Tafel eğrileri Şekil 66'da, polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyel (E_{kor}) değerleri Tablo 22'de ve NaCl çözeltisi içerisinde korozyona uğratılan kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 67 ve 69'da verilmiştir.

Şekil 66, 67, 68'de ve tablo 22'te PVD yöntemi kullanılarak farklı parametre ve seviyelerde, AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamalardan elde edilen sonuçlarına göre ayrıca literatür çalışmalarına dayanarak, açıkça görülmektedir ki MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalar R1, R2, R3 ve R4 kaplama parametrelerinde AA2014 alaşımının korozyon davranışını iyileştirmiştir. PVD yöntemi ile yüzeyde oluşan kararlı, kolonsuz ve uniform MoS₂-Ti nanokompozit tabakalar bir bariyer gibi görev yaparak taban malzemelerini korozyonun negatif etkilerinden korumuş ve bu tabakaların, daha yüksek voltaj değerlerinde daha düşük akımlar çekmeye sebep olduğu gözlenmiştir. MoS₂-Ti kaplamaların %3.5 NaCl çözeltisi içerisinde korozyon deneyine tabi tutulan numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde açıkça görülmektedir ki bütün numunelerde korozyon hasarı net bir şekilde (özellikle çukurcuk korozyonunun) yoğun korozyona uğramış bölgeler elde edilmiştir. Genellikle NaCl çözeltisi içinde büyütülmüş kaplamalar çukurcuk korozyon türüdür ve bunun sebebi Cl⁻ iyonlarıdır (Spencer et al., 2009; Yan et al., 2010; Z. Zhao et al., 2020). Ayrıca kaplama yüzeyinde oluşan mikro çatlaklarda (Şekil 68) korozyonun ilerlediği düşünülmektedir. R3 şartlarında büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların AA2014 kaplamasız taban malzemeye ve diğer R1, R2 ve R4 numunelerine göre iyi korozyon direncine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi R3 şartlarında kaplanmış MoS₂-Ti kaplamaların, yüksek gerilim değerinde, uzun kaplama süresinden dolayı ve yapılan dört deney içinde en yüksek kalınlığa (491,3 nm) ve yoğunluğa sahip olması korozyon direncini iyileştirdiği düşünülmektedir. Böylece R3 şartlarında büyütülen kaplamalar korozif ortamlarda veya elektrolitin numune yüzeylerinde daha az kalmasına sebep olur ve korozyon direnci artırır (Becerikli et al., 2021; Cheng *et al.* 2013; CUI et al., 2019; Irfan Ul Haq et al., 2018; Karabudak et al., 2017; Sukuroglu et al., 2016; Yang et al., 2020; Zhao et al., 2020). Kaplama esnasında oluşan çukur, çatlak ve por gibi hatalardan dolayı, sıçratma tekniğiyle kaplanan sert filmler yoğun olmamaktadırlar. Bu kusurlar nedeniyle, PVD yöntemiyle kaplanan sert filmlerin, filmler ile taban malzeme arasında çatlak ve galvanik korozyonu gösterdikleri ve elektrolitin taban malzemeye nüfuz ederek işlediği belirtilmiştir. Eğer porozite yüksekse, anot durumundaki taban malzeme ve katod durumunda olan film arasında galvanik korozyonun olduğu ve kaplanan malzemenin taban malzeme gibi davrandığı, ancak porozite çok düşük ise, taban malzeme davranışının film ile tamamen aynı olduğu ifade edilmiş ve dolayısıyla

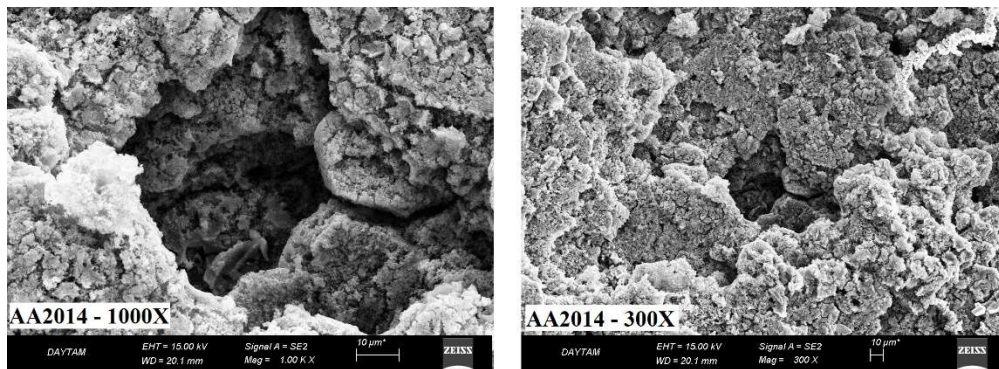
korozyon akımının filmin porozitesinin iyi bir ölçüsü olduğu belirtilmiştir. Darbeli–doğru akım kullanılarak yapılan sert kaplamaların korozyon davranışını iyileştirmek için kolonsal olmayan yapıların büyütülmesi gerekmektedir. Çukurlar ve mikroporlar şeklinde oluşan kusurlar mikro-arka neden olduğu gözlenmiştir (Barshilia and Rajam 2006; De Araujo et al., 2003). Tablo 22’de verilen korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu sonuçları incelendiğinde, en düşük akım yoğunluğu R3 kaplama parametrelerinde büyütülen nanokompozit kaplamadan 119.10^{-5} A/cm² olarak elde edilirken, en yüksek akım yoğunluğu taban malzemede 78.10^{-4} A/cm² olarak elde edilmiştir. Yani en yüksek korozyon direnci R3 ile kaplanan numunede, en düşük korozyon direnci ise AA2014 kaplamasız taban malzemede görülmektedir. Bununda sebebi yüzey morfolojisi ve SEM görüntülerine göre R3 şartlarında kaplanmış MoS₂-Ti kaplamaların, uniform ve kolonsuz bir yapıya sahip olması, yüksek gelirim değerinde ve yapılan dört deney içinde en yüksek kalınlığa (491,3 nm) sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, R1, R2 ve R4 kaplama parametrelerinde büyütülen kaplamalarda ise korozyon akım yoğunlukları sırasıyla 185.10^{-5} , 164.10^{-5} ve 123.10^{-5} A/cm² olarak elde edilmiştir. Öte yandan AA2014 üzerine büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların korozyon potansiyellerinde de önemli değişimler saptanmıştır. En düşük pasifleşme eğilimi -0,654 V korozyon potansiyelinde kaplanmamış AA2014 alaşımı olduğu görülmektedir. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında AA2014 üzerine büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalarda pasifleşme yaklaşık olarak 1V civarında korozyon potansiyelinde tamamlandığı anlaşılmaktadır. Literatürdeki çalışmalara göre; kaplama kalınlığının artmasının (yüzey pürüzlülüğünün azalması ve bölgesel çukurcukların kaybolması) korozyon direncinin de artmasına neden olduğu rapor edilmiştir (Bayatia *et al.* 2010; Becerikli et al., 2021; Cheng *et al.* 2013; CUI et al., 2019; Demirci et al., 2013; Irfan Ul Haq et al., 2018; Karabudak et al., 2017; Sukuroglu et al., 2016; Yang et al., 2020; Zhang *et al.* 2010; Zhao et al., 2020).



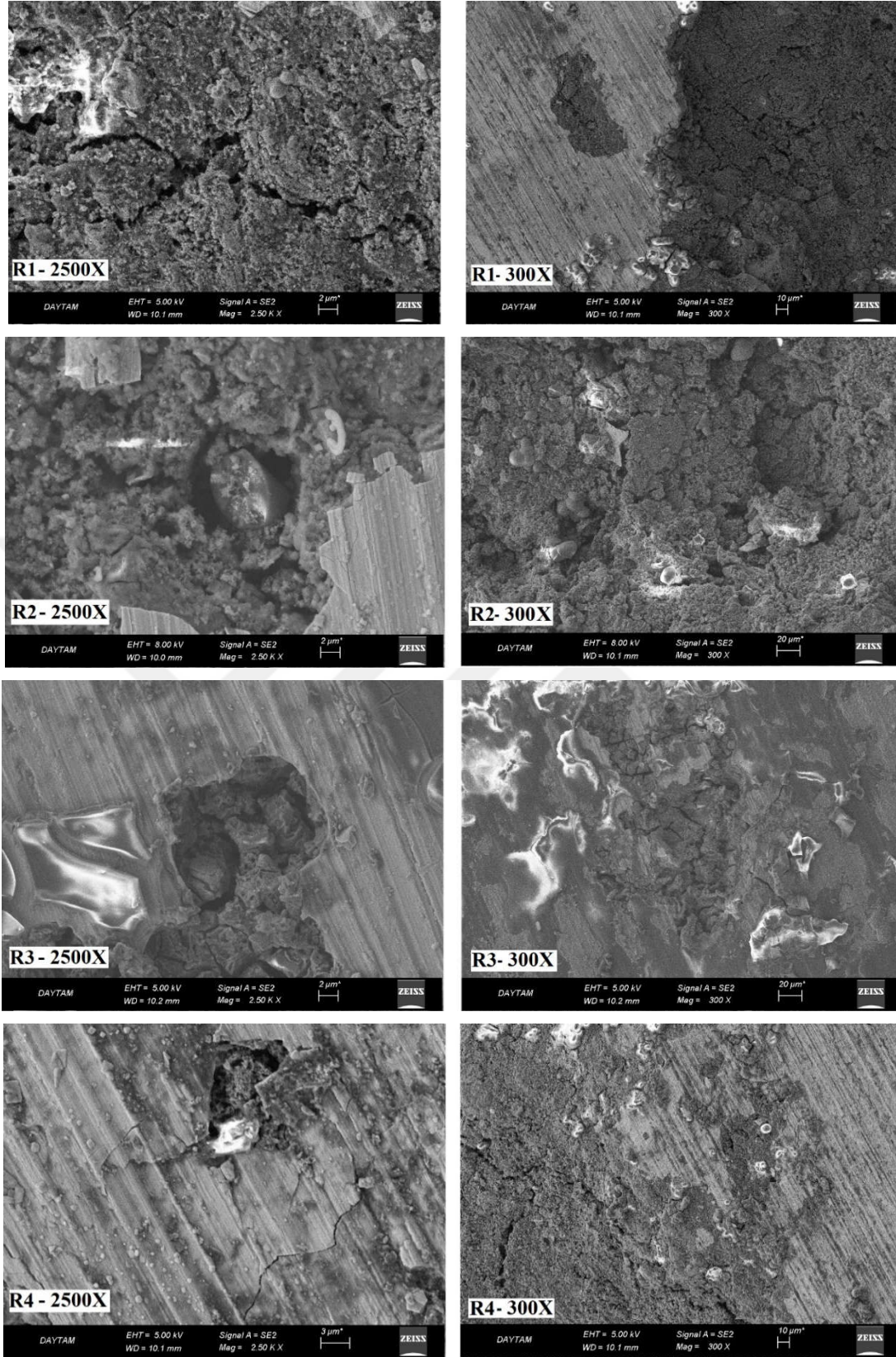
Şekil 66. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon eğrileri .

Tablo 22. PVD ile AA2014 Üzerine Büyütülen MoS₂-Ti Kaplamaların E_{kor} ve I_{kor} değerleri

PVD	E _{kor} (V)	I _{kor} (A/cm ²)
AA2014	-0,737	78.10 ⁻⁴
R1	-0,648	185.10 ⁻⁵
R2	-0,641	164.10 ⁻⁵
R3	-0,400	119.10 ⁻⁵
R4	-0,643	123.10 ⁻⁵



Şekil 67. AA2014 taban malzemesinin korozyon sonrası SEM görüntüsü.

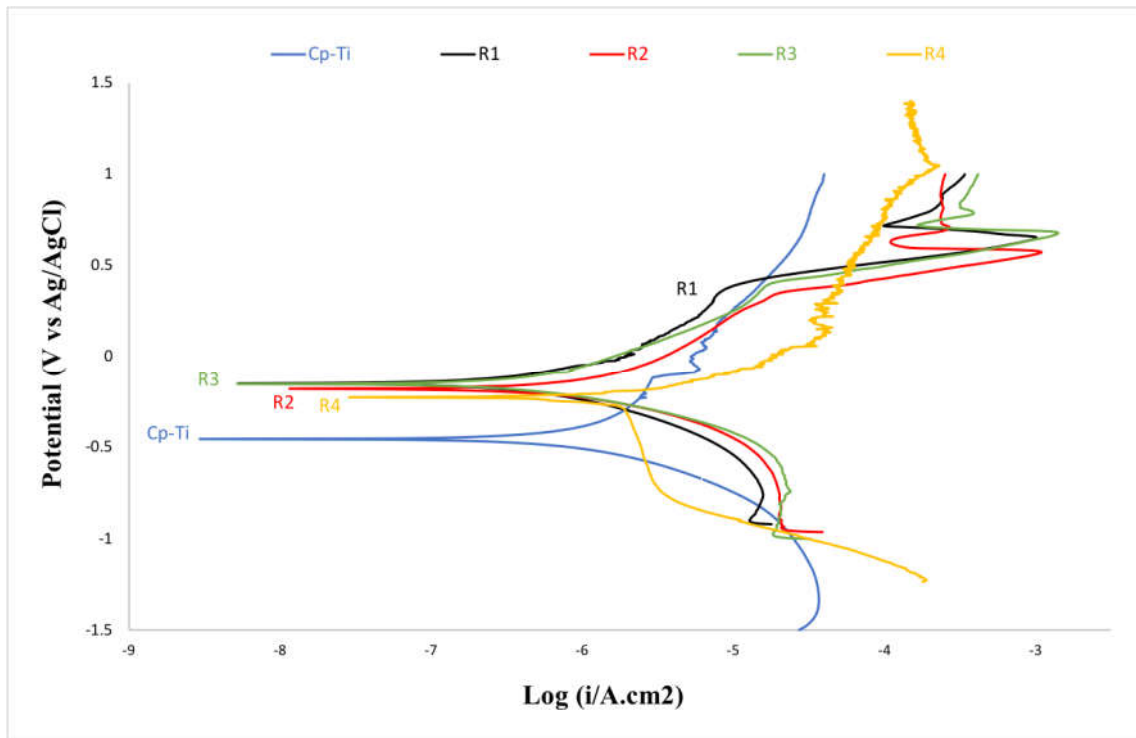


Şekil 68. PVD yöntemi ile R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde AA2014 üzerine büyütülen MoS_2 -Ti kaplamaların korozyon SEM görüntüleri.

Cp-Ti taban malzeme üzerine PVD yöntemi kullanılarak MoS_2 -Ti nanokompozit kaplamaların %3.5 NaCl çözeltisi içinde korozyon davranışlarını değerlendirmek için elde edilen potansiyodinamik polarizasyon Tafel eğrileri Şekil 69’da, polarizasyon eğrilerinden elde

edilen korozyon potansiyel (E_{kor}) değerleri Tablo 23'te ve NaCl çözeltisi içerisinde korozyon deneyine tabi tutulan numunelerin SEM görüntüleri Şekil 70 ve 71'de verilmiştir.

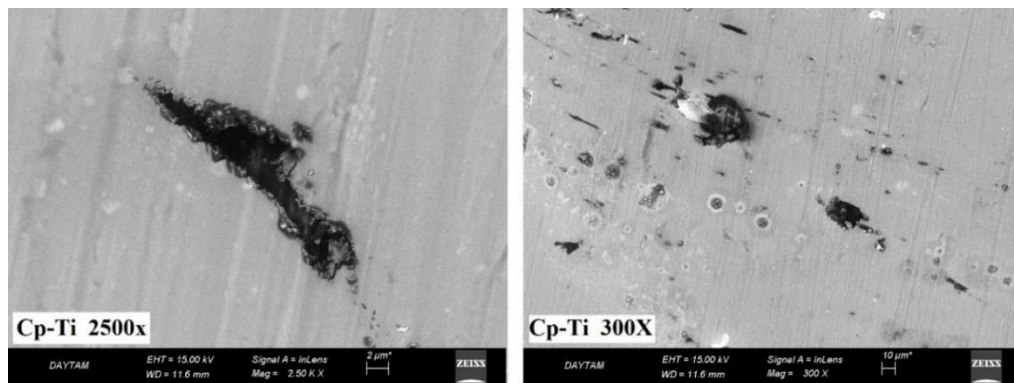
Şekil 71'de PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamalardan elde edilen polarizasyon tafel eğrileri sonuçları karşılaştırıldığında, açıkça görülmektedir ki MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalar R1, R2, R3 ve R4 kaplama parametrelerinde Cp-Ti korozyon davranışını iyileştirmiştir. Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların korozyon akım yoğunluklarının R1, R2, R3 ve R4 kaplama parametrelerinde taban malzemeye göre önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. PVD yöntemi ile büyütülen kaplamalarda küçük porlar, çatlaklar ve büyük katot alanı ile küçük anot yüzeyi arasındaki fark, kaplamaların korozyon korumasını azaltır. Bu nedenle, kaplama kalınlığı artıkça kaplama kusurları azalır ve elektrolitin (Cl⁻ iyonlarının) taban malzemesine nüfuz etmesi için daha fazla zaman gerekir (D'Avico et al., 2019; Dobrzański et al., 2006; Nikolova et al., 2018). Tablo 23'te verilen korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu sonuçları incelendiğinde, en yüksek akım yoğunluğu Cp-Ti kaplamasız olan numunede 20.10^{-6} A/cm² olarak elde edilirken, en düşük akım yoğunluğu R3 kaplama parametrelerinde büyütülen nanokompozit kaplamadan 102.10^{-8} A/cm² olarak elde edilmiştir. R1, R2 ve R4 kaplama parametrelerinde büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalarda ise korozyon akım yoğunlukları sırasıyla 156.10^{-8} , 164.10^{-8} ve 147.10^{-8} A/cm² olarak elde edilmiştir. Elde edilen SEM görüntüleri (Şekil 70 ve 71) ve yüzey morfolojileri incelendiğinde, açıkça görülmektedir ki, R3 şartlarında büyütülen kaplamaların diğer kaplamalara göre az kusurlu, kolonsuz, uniform ve kararlı yapıya sahip olduğu için en iyi korozyon direnci bu kaplamalarda gözlenmiştir. R4 şartlarında büyütülen kaplamaların kalınlıkları, R1 ve R2 şartlarında büyütülen kaplamaların kalınlıklarına göre yüksek olmasına rağmen, elektrokimyasal özelliği zayıftır. PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine R3 şartlarında kaplanmış MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların yapılan dört deney içinde en yüksek kalınlık değeri (491,3 nm) ölçülmüş ve en yüksek korozyon direnci elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalara dayanarak ve yüzey morfolojilerinden elde edilen sonuçlara göre kaplama parametreleri, kaplama kalınlığında çok önemli etki göstermiştir ve kaplama kalınlığının artmasının (yüzey pürüzlülüğünün azalması ve bölgesel çukurcukların kaybolması) korozyon direncinin de artmasına neden olduğu rapor edilmiştir. Kaplama kalınlığının artması, iyon salınımında, kaplama yapısında ve kaplama yüzeyinde önemli rol oynamaktadır. (Bayatia *et al.* 2010; Becerikli et al., 2021; Cheng *et al.* 2013; CUI et al., 2019; Demirci et al., 2013; Irfan Ul Haq et al., 2018; Karabudak et al., 2017; Sukuroglu et al., 2016; Yang et al., 2020; Zhang *et al.* 2010; Zhao et al., 2020).



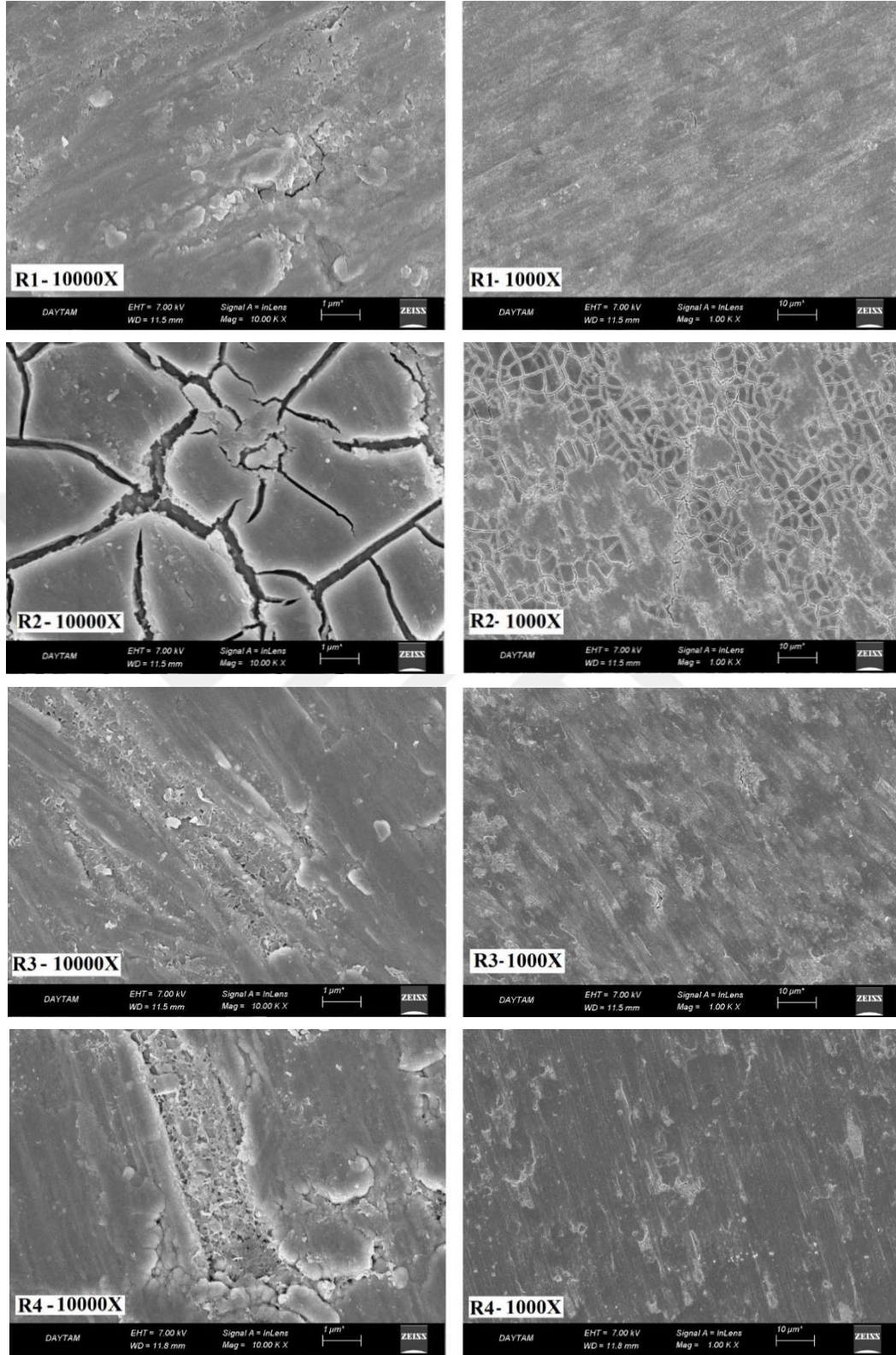
Şekil 69. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

Tablo 23. PVD İle Cp-Ti üzerine Büyütülen MoS₂-Ti Kaplamaların E_{kor} ve I_{kor} değerleri

PVD	E _{kor} (V)	I _{kor} (A/cm ²)
Cp-Ti	-0,476	20.10 ⁻⁶
R1	-0,147	156.10 ⁻⁸
R2	-0,151	164.10 ⁻⁸
R3	-0,145	102.10 ⁻⁸
R4	-0,177	147.10 ⁻⁸



Şekil 70. Cp-Ti taban malzemesinin korozyon sonrası SEM görüntüsü.



Şekil 71. PVD yöntemi ile R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde Cp-Ti üzerine büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların korozyon sonrası SEM görüntüleri.

Tribo-Test Bulguları ve Tartışma

Günümüzde üretim oranındaki artış nedeniyle, makinelerin ve yapıların çeşitli kısımlarında yüzey hasarları ortaya çıkmaktadır. Yüzey hasarları, tarih öncesi zamanlardan günümüze kadar önemli sorunlar olarak varlığını sürdürmektedir. Mühendislik malzemelerinin kullanımını sınırlayan faktörler; zayıf mekanik, triboloji ve tribokorozyon özellikleriyle ve en önemlisi de aşınma ve korozyon davranışlarıyla ilgilidir. Tribolojik hasarlar hem ekonomik kayıplara hem de trajik kazalara sebep olmaktadır (Becker, 2004; Irfan Ul Haq et al., 2018; Holmberg et al, 2017; Hudec et al, 2021).

Triboloji bilimi 1967 yılından beri: Aşınma, sürtünme ve yağlama ve bunlarla ilgili fiziksel olayları inceleyen bilim ve teknoloji dalıdır. Triboloji'nin alt disiplinleri; Sürtünme, birbirine göre bağlı hareket yapan veya yapma eğiliminde olan yüzeyler (katı, sıvı, gaz vb.) arasında harekete karşı oluşan dirençtir. Aşınma, fiziksel veya kimyasal etkilerle malzeme yüzeyinde oluşan ve istenmeyen malzeme kaybıdır. Enerji kaynaklarının üçte birinde aşınma ve sürtünme kaynaklı problemler vardır ve bu problemlerin azaltılması büyük önem taşımaktadır. Tribolojik problemleri önlemek için değişik yöntemler kullanılmaktadır (Barnett, 1970; Erdemir, 1995; Kimura et al., 1999; Ma et al., 2014; McMurtrey, 1985; Ordoñez et al., 2021; Stachowiak ve Batchelor, 2001; Hudec et al., 2021; Wang et al., 2007)

Çalışmamızda, PEO ve PVD yöntemleri kullanılarak farklı parametrelerde büyütülen Al_2O_3/MoS_2 , TiO_2/MoS_2 ve MoS_2-Ti nanokompozit kaplamaların tribolojik özelliklerini tespit etmek için Teer POD-2 pin-on-disk aşınma cihazı kullanılmıştır.

AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeleri için Şekil 72 ve 73'te, PEO yöntemiyle farklı parametre ve seviyelerde büyütülen Al_2O_3/MoS_2 ve TiO_2/MoS_2 nanokompozit kaplamalar için sırasıyla Şekil 74 - 83'te aşınma testi, sürtünme katsayısı-zamangrafikleri, aşınma izlerine ait SEM ve 3D profilometre görüntüleri verilmiştir.

Al_2O_3/MoS_2 ve TiO_2/MoS_2 nanokompozit kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranları incelendiğinde, açıkça görülmektedir ki büyütülen kaplamaların, AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu yüzden yapılan nanokompozit kaplamaların taban malzemelerinin aşınma özellikleri üzerinde koruyucu bir etki oluşturduğu görülmüştür. Şekil 72'de AA2014 ve Şekil 73'te Cp-Ti taban malzemelerinin sürtünme katsayısı-zamangrafikleri verilmiştir. AA2014 taban malzemesi için sürtünme katsayısı değerleri $\mu=0,44-0,7$ ve Cp-Ti taban malzemesi için $\mu=0,06-0,43$ aralığında elde edilmiştir. Sürtünme katsayısındaki bu düzensiz dalgalanmalar aşınma boyunca temas yüzeyleri arasında meydana gelen adezyon ile ilişkilendirilmiştir (Arrabal *et al.* 2015). Taban malzemelerin aşınma izlerinin 3D profilometre görüntüleri incelendiğinde, oldukça geniş aşınma izleri ve

aşınma partiküllerinin aşınma izleri içerisinde sıvandığı gözlenirken yüksek aşınma oranları tespit edilmiştir.

PEO yöntemiyle AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeler üzerine farklı parametre ve seviyelerde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri Tablo 24-26'da verilmiştir. Şekil 74 - 83'te aşınma testi, sürtünme katsayısı-zamangrafikleri, aşınma izlerine ait SEM, 3D profilometre görüntüleri, Tablo 24-26'da verilen sürtünme katsayı sonuçları incelendiğinde; net bir şekilde görülmektedir ki en düşük sürtünme katsayısı en yüksek kaplama kalınlıklarına sahip P3- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ $\mu=0,117$ (Şekil 76) ve P4- $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ $\mu=0,312$ (Şekil 82) olarak gözlenmiştir. Elde edilen deneylerin grafikleri karşılaştırıldığında (Şekil 78) kaplamaların sürtünme katsayıları birbirlerine çok yakın olduğu anlaşılmıştır.

Aşınma deneyin ilk 20 saniyesine kadar kararsız ve yüzey pürüzlülüğünün fazla/gözeneklerin büyük olmasından dolayı sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir. İlk başlangıçta sürtünme katsayısının yüksek olmasının nedeni; kaplama yüzeyinin pürüzlü yapısına bilyenin temas etmesi ile açıklanabilir. Aşınma testinin devamında kaplamaların yüzey pürüzlülüğü azaldığı için sürtünme katsayıları kararlı hale gelmektedir (Efeoğlu *et al.* 1993, Yetim 2009). Literatürdeki çalışmalara paralel olarak; PEO yöntemiyle yapılan bütün kaplamalarda, kaplama kalınlığının artmasıyla yüzeyde oluşan kusurlar ve gözeneklerin çaplarının azaldığı ayrıca sürtünme katsayısının da düştüğü gözlenmiştir. Bununla birlikte, aşınma deneyi eğrilerinde taban malzeme yüzeyinde oluşturulan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü olduğunu ortaya koymaktadır (Sundararajan and Krishna 2003; Xu *et al.* 2013).

PEO yöntemiyle yapılan $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri $\mu=0,117-0,453$ aralığında belirlenmiştir. PEO- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalarda $\mu=0,117-0,144$ aralığında (Şekil 76-80'de) ve PEO- $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ kaplamalarda $\mu=0,222-0,453$ aralığında (Şekil 79-83'te) artan bir eğilim göstermiştir. P3- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ (Şekil 76) ve P4- $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ (Şekil 82) büyütülen kaplamalarda sürtünme katsayısı sırasıyla $\mu=0,1$ ve $\mu=0,11$ 'den başlayarak düşük bir artış eğilimiyle test sonunda $\mu=0,13$ ve $\mu=0,237$ değerlerine ulaşılmıştır.

PEO- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve PEO- $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ kaplamalarda aşınma izlerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, aşınma izleri içerisinde kaplamaların taban malzemeden ayrıldığını gösteren pullanmalar gözlenmiştir. Ayrıca P3- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ ve P4- $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ numunelerinde oldukça dar bir aşınma izleri gözlenirken herhangi bir abrazif partiküle rastlanmamıştır. Bu durum MoS_2 nanopartiküllerin katı yağlayıcı özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bu kaplamalarda sırasıyla $21,40 \text{ E-3 mm}^3/\text{Nm}$ ve $2,49 \text{ E-3 mm}^3/\text{Nm}$ değerlerinde aşınma oranları

elde edilmiştir. Diğer taraftan en yüksek sürtünme katsayısı P2-Al₂O₃/MoS₂'te yaklaşık $\mu=0,144$ (Şekil 76) ve P2-TiO₂/MoS₂'te yaklaşık $\mu=0,453$ (Şekil 80) olarak elde edilmiştir. P2-Al₂O₃/MoS₂ ve P2-TiO₂/MoS₂ kaplamalar üzerinde biriken MoS₂ nanopartikül miktarının diğer kaplamalara göre daha az miktarlarda bulunması kaplama kalınlığının düşük olmasıyla açıklanabilmektedir(E. Arslan et al., 2010; Huang et al., 2018b; Rama Krishna et al., 2003; Ebru Emine Sukuroglu et al., n.d.; Sundararajan, G., Krishna, 2003; X. Yang et al., 2019)

Tablo 24. AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri

İşlemsiz	Ortalama sürtünme katsayısı (μ)	Aşınma oranı ($10^{-3} \cdot \text{mm}^3/\text{Nm}$)
AA2014	0,547	74,82
Cp-Ti	0,142	10,06

Tablo 25. PEO yöntemiyle büyütülen Al₂O₃/MoS₂ kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri

Kaplama No	Ortalama sürtünme katsayısı (μ)	Aşınma oranı ($10^{-3} \cdot \text{mm}^3/\text{Nm}$)
P1	0,128	46,82
P2	0,144	44,04
P3	0,117	21,40
P4	0,129	35,09

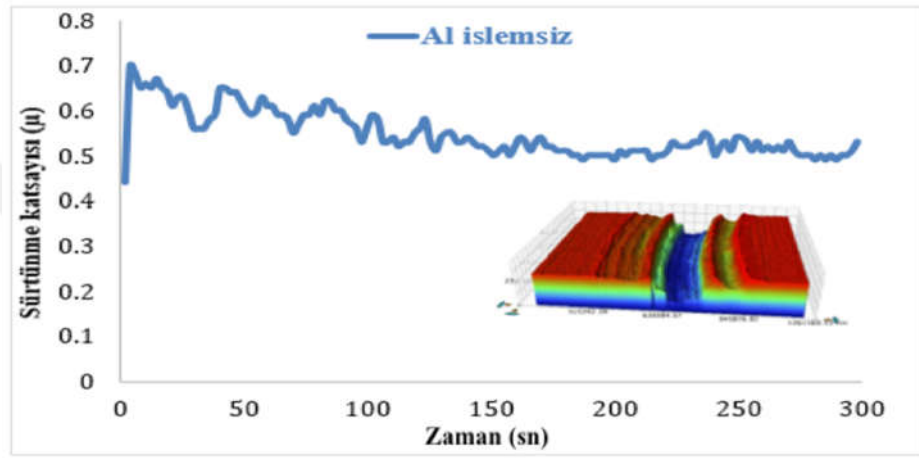
Tablo 26. PEO yöntemiyle büyütülen TiO₂/MoS₂ kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri

Kaplama No	Ortalama sürtünme katsayısı (μ)	Aşınma oranı ($10^{-3} \cdot \text{mm}^3/\text{Nm}$)
P1	0,402	3,01
P2	0,453	6,81
P3	0,451	4,33
P4	0,312	2,49

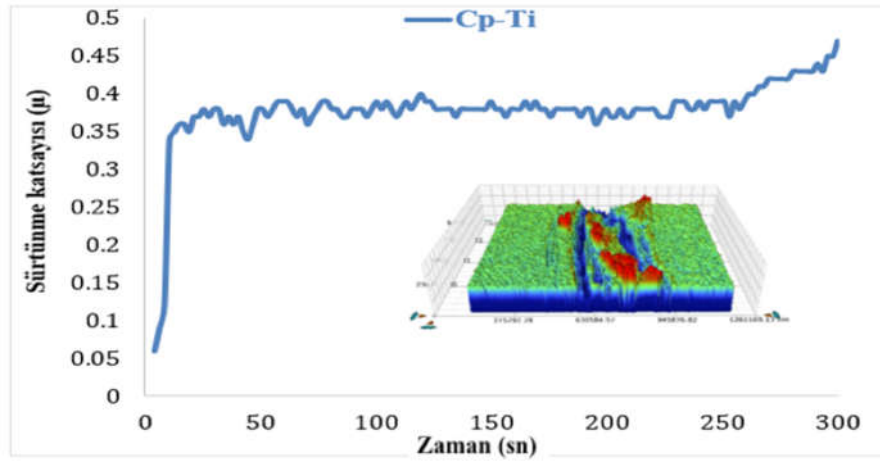
PEO-Al₂O₃/MoS₂ ve PEO-TiO₂/MoS₂ kaplamaların aşınma sonuçları incelendiğinde; PEO yöntemiyle büyütülen Al₂O₃/MoS₂ nanokompozit kaplamaların, en yüksek aşınma oranı P1-Al₂O₃/MoS₂ kaplamada ($46,82 \text{ E-3 mm}^3/\text{Nm}$), en düşük aşınma oranı ise P3-Al₂O₃/MoS₂ kaplamada ($21,40 \text{ E-3 mm}^3/\text{Nm}$) ve PEO-TiO₂/MoS₂ nanokompozit kaplamaların, en yüksek aşınma oranı P2-TiO₂/MoS₂ kaplamada ($6,81 \text{ E-3 mm}^3/\text{Nm}$), en düşük aşınma oranı ise P4-

Al₂O₃/MoS₂ kaplamada (2.49 E-3 mm³/Nm) olarak elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı için en yüksek sürtünme katsayısı P2-Al₂O₃/MoS₂'de yaklaşık $\mu=0,144$ (Şekil 75) ve P2-TiO₂/MoS₂'de $\mu=0,453$ (Şekil 80), en düşük sürtünme katsayısı P3-Al₂O₃/MoS₂ $\mu=0,117$ (Şekil 76) ve P4-TiO₂/MoS₂ $\mu=0,312$ (Şekil 82) olarak elde edilmiştir.

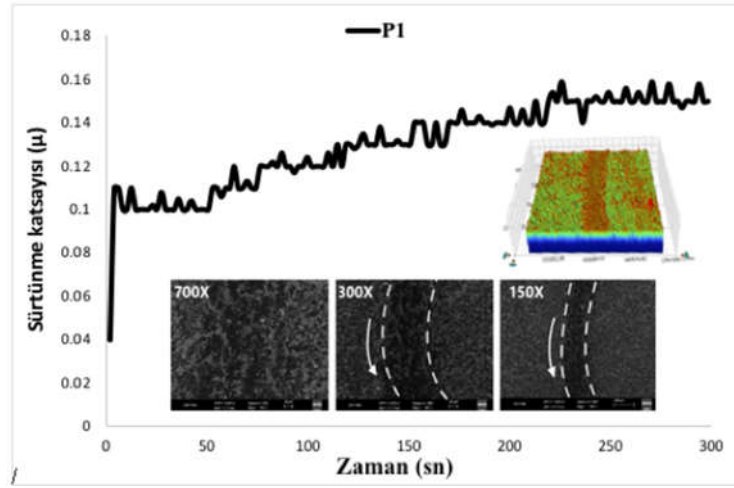
PEO yöntemi kullanılarak parametrelerin farklı seviyelerinde büyütülen Al₂O₃/MoS₂ ve TiO₂/MoS₂ nanokompozit kaplamaların sürtünme katsayısı-zamangrafikleri, aşınma izi SEM görüntüleri ve 3D profilometre görüntüleri sırasıyla Şekil 74-83'te verilmiştir. Bütün kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri yüzey pürüzlülüklerinden dolayı önce artmış sonra uniform olarak devam etmiştir.



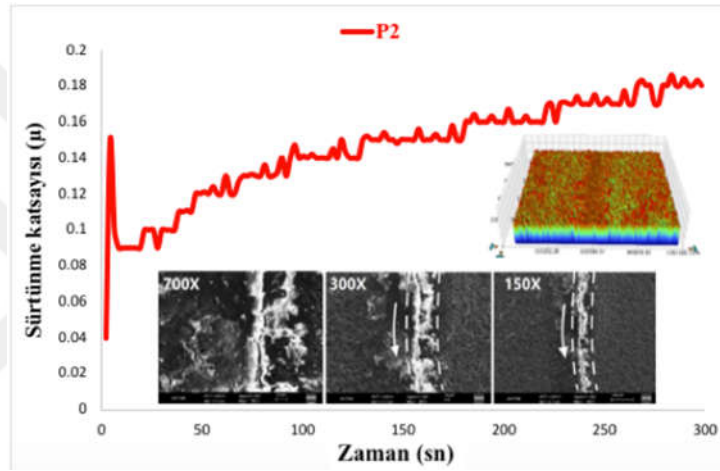
Şekil 72. AA2014 taban malzeme aşınma grafikleri ve 3D profilometre görüntüsü.



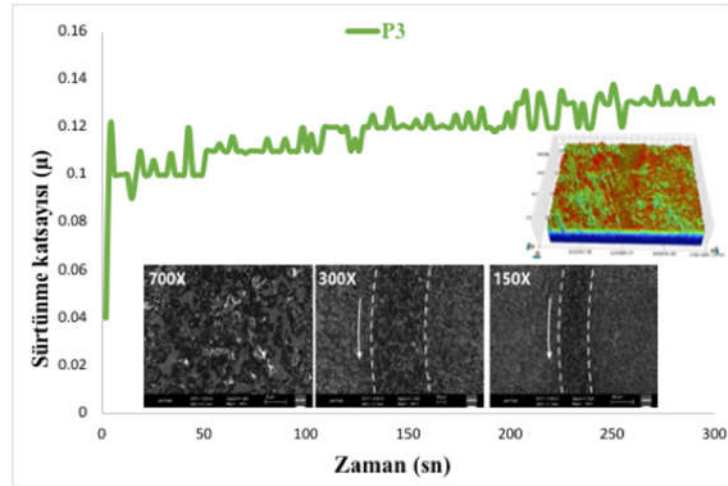
Şekil 73. Cp-Ti taban malzeme aşınma grafikleri ve 3D profilometre görüntüsü



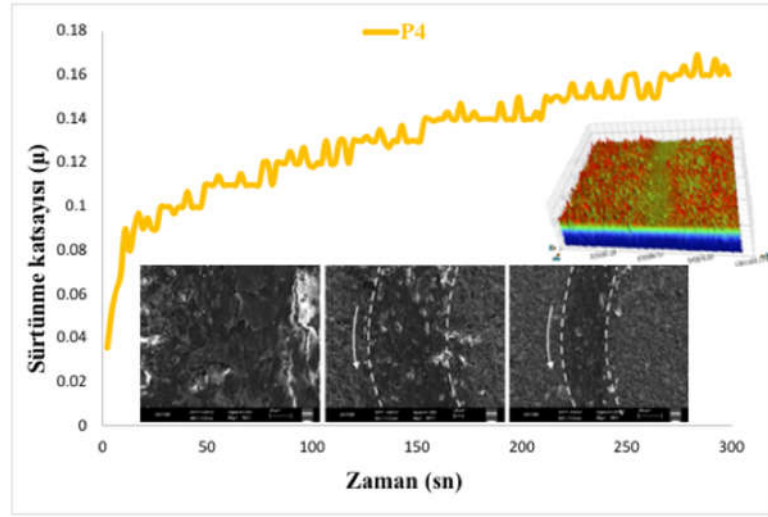
Şekil 74. PEO yöntemiyle P1 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü.



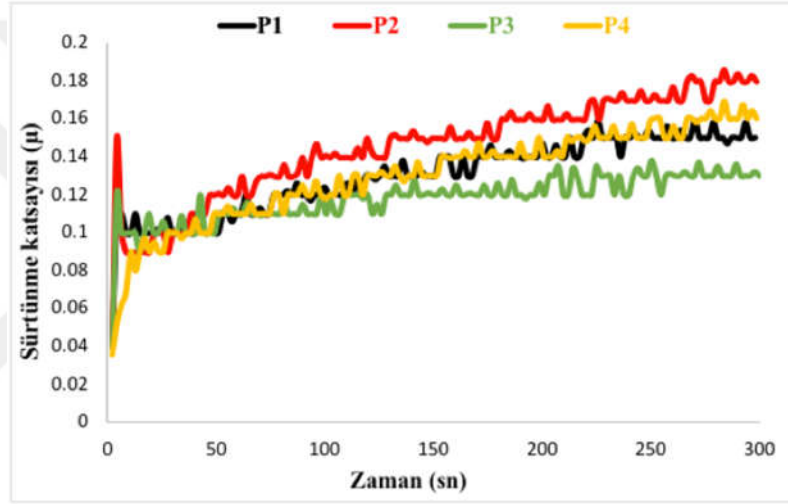
Şekil 75. PEO yöntemiyle P2 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



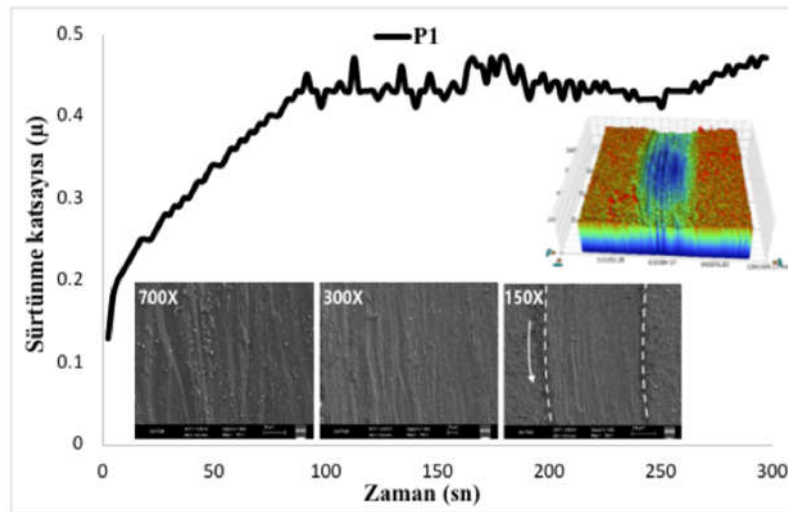
Şekil 76. PEO yöntemiyle P3 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



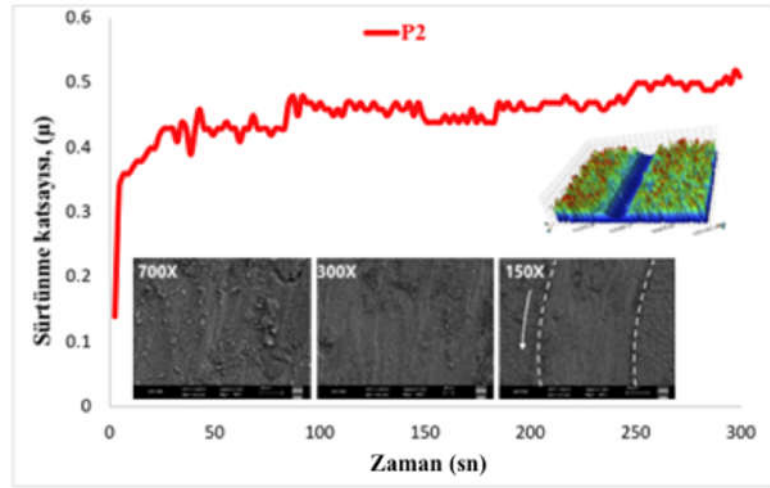
Şekil 77. PEO yöntemiyle P4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



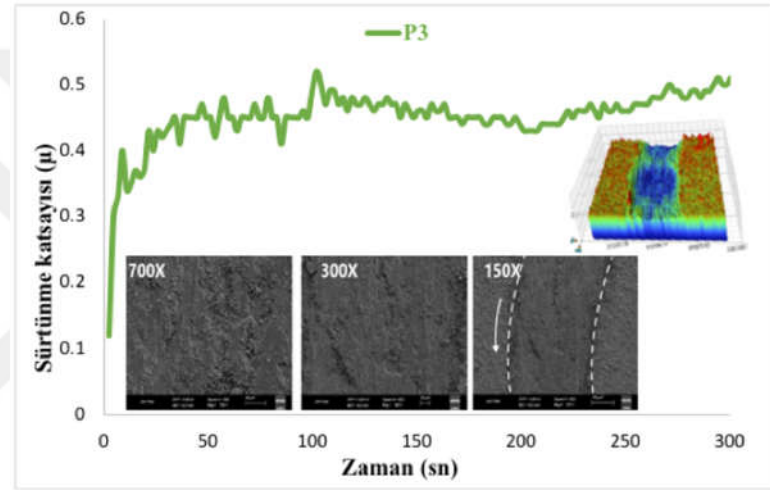
Şekil 78. PEO yöntemiyle P1, P2, P3 ve P4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri görüntüsü



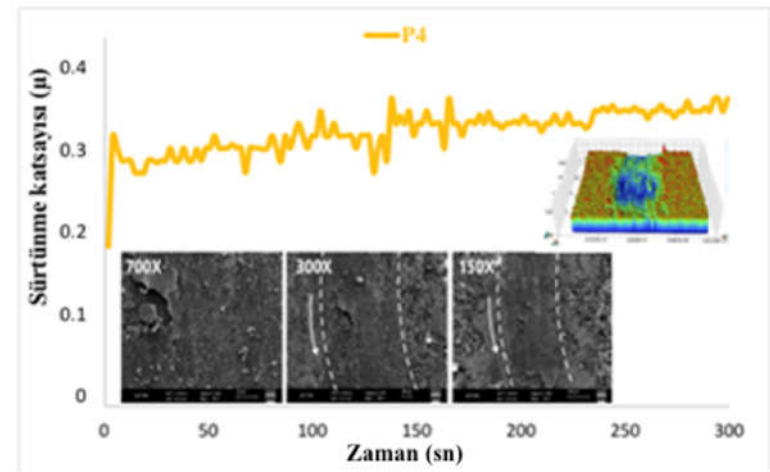
Şekil 79. PEO yöntemiyle P1 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



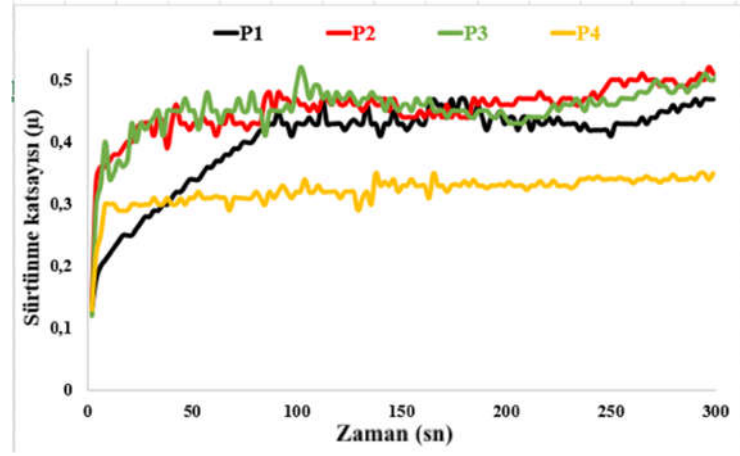
Şekil 80. PEO yöntemiyle P2 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



Şekil 81. PEO yöntemiyle P3 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



Şekil 82. PEO yöntemiyle P4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



Şekil 83. PEO yöntemiyle P1, P2, P3 ve P4 kaplama parametrelerinde büyütülmüş $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit yapıların aşınma grafikleri görüntüsü

PVD yöntemi kullanılarak AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeler üzerine farklı parametre ve seviyelerde büyütülen MoS_2 -Ti nanokompozit kaplamaların sürünme katsayısı-zaman grafikleri, aşınma izi SEM görüntüleri ve 3D profilometre görüntüleri sırasıyla Şekil 84-93'te ve kaplamaların sürünme katsayısı ve ortalama aşınma oranı değerleri Tablo 27 ve 28'de verilmiştir.

Şekil 84-93'te ve Tablo 27 ve 28'de verilen sonuçlara göre; en düşük sürünme katsayısı R3 şartlarında AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeleri üzerine büyütülen MoS_2 -Ti kaplamalarında sırasıyla $\mu=0,086$ (Şekil 86) ve $\mu=0,075$ (Şekil 89) olarak elde edilmiştir. Bu durumun sebebi R3 şartlarında büyütülen kaplamaların diğer kaplamalara göre daha az pürüzlü yapıya sahip olması ve kaplamalar üzerinde biriken katı yağlayıcı özelliğe sahip molibden disülfid (MoS_2) nanopartikül miktarının daha fazla olmasıdır. Ayrıca bu kaplamalarda Ti ve MoS_2 hedef akımının (0.9A) ve çalışma basıncının (0.33Pa) en yüksek olduğu görülmektedir. Düşük sürünme katsayısına sahip kaplamalarda görülen kararlı sürünme davranışı aşınma oranının düşmesine katkı sağlamıştır. Yüksek sürünme katsayısına sahip kaplamalarda görülen kararsız sürünme davranışı ise, aşınan film ile bilye arasında transfer film oluşumunu engelleyerek aşınma oranının artmasına sebep olmuştur. Bütün kaplamalarda aşınmış yüzeylerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri kıyaslandığında, tüm kaplamalarda adeziv aşınma meydana geldiği görülmektedir. Sonuç olarak R3 şartlarına büyütülen kaplamaların aşınma özelliklerini iyileştirmiş ve sürünme katsayısı değerlerini düşürmüştür.

PVD yöntemiyle AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS_2 -Ti kaplamalarda $\mu=0,086-0,147$ aralığında (Şekil 84-88) ve Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen MoS_2 -Ti kaplamalarda $\mu=0,075-0,091$ aralığında (Şekil 89-93) değerleri elde edilmiştir. Ayrıca en yüksek sürünme katsayısı R2 şartlarında AA2014 üzerine büyütülen kaplamalarda $\mu=0,147$ (Şekil 85) ve R4 şartlarında Cp-Ti üzerine büyütülen kaplamalarda $\mu=0,091$ (Şekil 92)

gösterilmiştir. Son olarak Tablo 27 ve 28’de gösterildiği gibi en düşük aşınma oranları; R3 şartlarında AA2014 üzerine büyütülen kaplamasında 7,92 E-2 mm³/Nm ve R3 şartlarında Cp-Ti üzerine büyütülen kaplamasında 1,85 E-2 mm³/Nm değerleri elde edilmiştir.

PEO ve PVD yöntemleri ile büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin sonuçları karşılaştırıldığında, elde edilen aşınma oranı değerlerinin sürtünme katsayısı değerleri ile paralel olduğu açıkça görülmektedir. Yani düşük sürtünme katsayısına sahip kaplamalarda düşük aşınma oranı, yüksek sürtünme katsayısına sahip kaplamalarda ise yüksek aşınma oranı elde edilmiştir (Suh and Saka 1980; Holmberg et al. 2000; Fouvry and Kapsa 2001).

Yüksek sürtünme katsayısına sahip olan bazı kaplamaların aşınma yüzeylerinde çatlama, pullanma ve delaminasyon meydana gelmiştir. Düşük sürtünme katsayısına sahip kaplamaların ise aşınma yüzeylerinde uniform aşınma izlerinin içinde; sıkışma (entrapping), gömülme (embedding) ve gizlenme (hiding) meydana geldiği görülmektedir.

Tablo 27. PVD ile AA2014 üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri

Kaplama No	Ortalama sürtünme katsayısı (μ)	Aşınma oranı ($10^{-2} \cdot \text{mm}^3/\text{Nm}$)
R1	0,104	19,32
R2	0,147	12,95
R3	0,086	7,92
R4	0,101	9,15

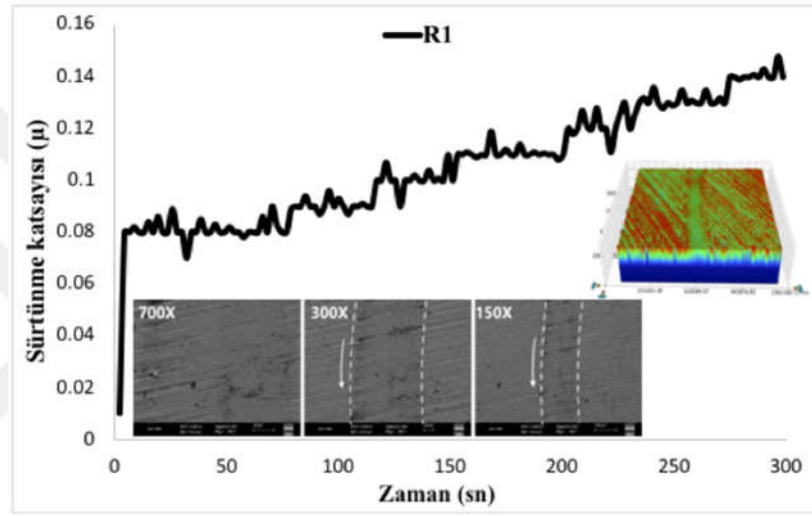
Tablo 28. PVD ile Cp-Ti üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri

Kaplama No	Ortalama sürtünme katsayısı (μ)	Aşınma oranı ($10^{-2} \cdot \text{mm}^3/\text{Nm}$)
R1	0,086	5,57
R2	0,082	4,33
R3	0,075	1,85
R4	0,091	3,15

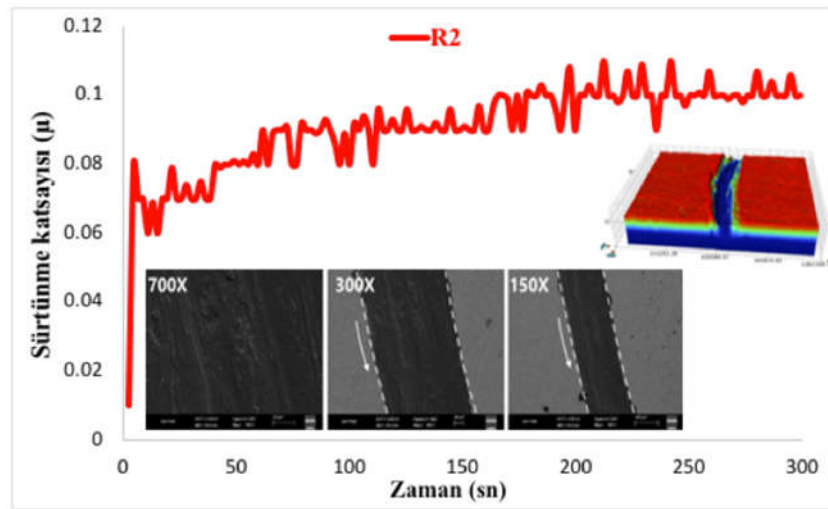
Tablo 27 ve 28’da gösterildiği gibi; PVD yöntemiyle büyütülen kaplamaların aşınma sonuçları incelendiğinde; AA2014 üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamalarda en yüksek aşınma oranı R2 kaplamada (12.95 E-2 mm³/Nm), en düşük aşınma oranı ise R3 kaplamada (7,92 E-2 mm³/Nm) ve Cp-Ti üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamalarda, en yüksek aşınma oranı R1

kaplamada ($5.57 \text{ E-2 mm}^3/\text{Nm}$), en düşük aşınma oranı ise R3 kaplamada ($1,85 \text{ E-2 mm}^3/\text{Nm}$) olarak elde edilmiş, sürtünme katsayısı sonuçları incelediğinde ise en yüksek sürtünme katsayısı R2-AA2014/MoS₂-Ti 'da yaklaşık $\mu = 0,147$ ve Cp-Ti üzerine büyütülen R4-MoS₂-Ti 'da $\mu = 0,091$, en düşük sürtünme katsayısı R3-AA2014/MoS₂-Ti $\mu = 0,086$ ve Cp-Ti üzerine büyütülen R3-MoS₂-Ti 'da $\mu = 0,075$ değerleri bulunmuştur.

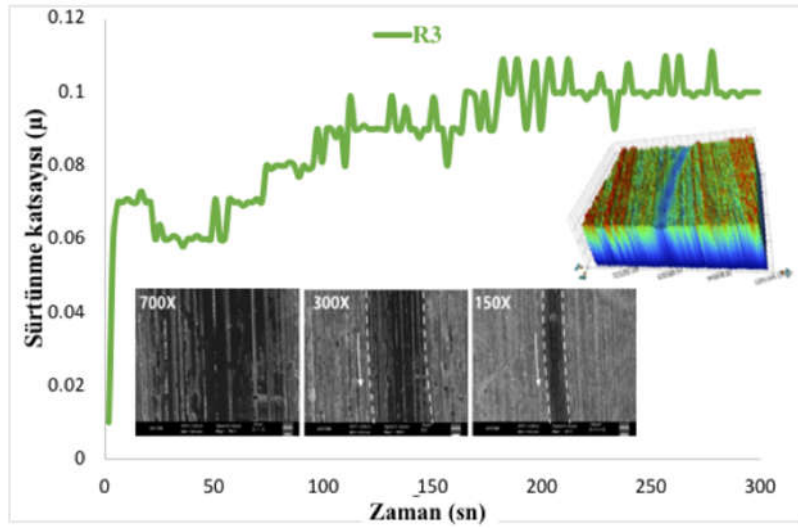
PVD yöntemi kullanılarak parametrelerin farklı seviyelerinde büyütülen Al₂O₃/MoS₂ ve TiO₂/MoS₂ nanokompozit kaplamaların sürtünme katsayısı-zamangrafikleri, aşınma izi SEM görüntüleri ve 3D profilometre görüntüleri sırasıyla Şekil 84-93'te verilmiştir.



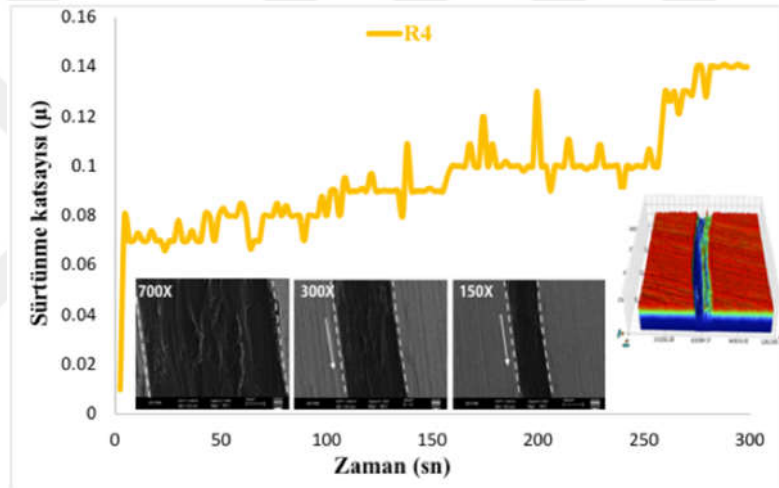
Şekil 84. PVD yöntemiyle AA2014 üzerine R1 şartlarında büyütülmüş MoS₂-Ti kaplamalarının aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



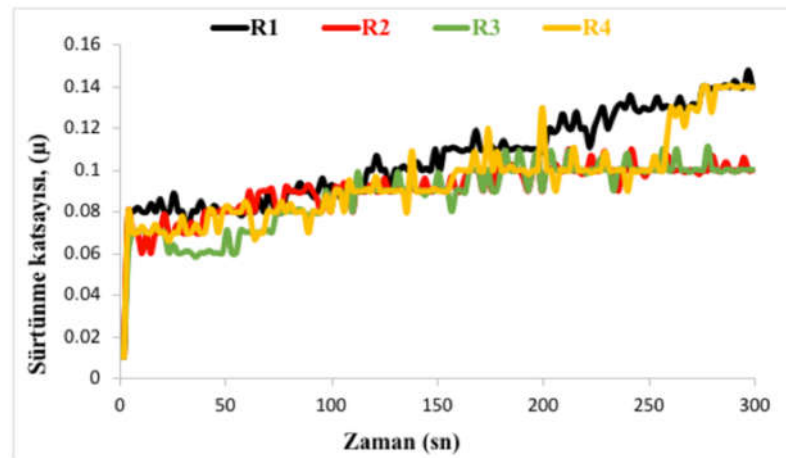
Şekil 85. PVD yöntemiyle AA2014 üzerine R2 şartlarında büyütülmüş MoS₂-Ti kaplamalarının aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



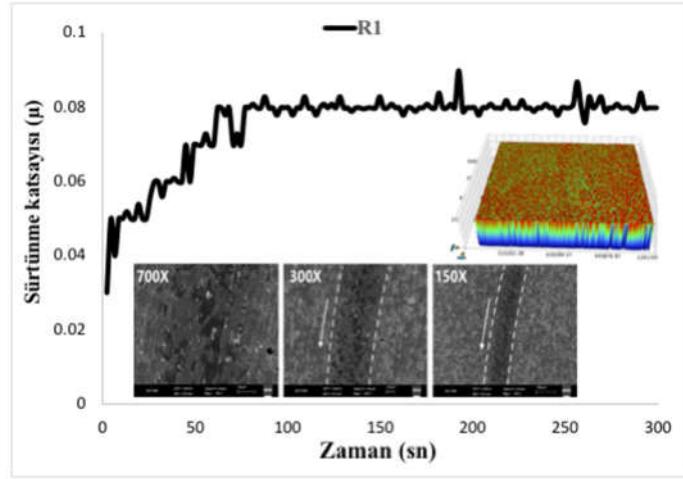
Şekil 86. PVD yöntemiyle AA2014 üzerine R3 şartlarında büyütülmüş MoS₂-Ti kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



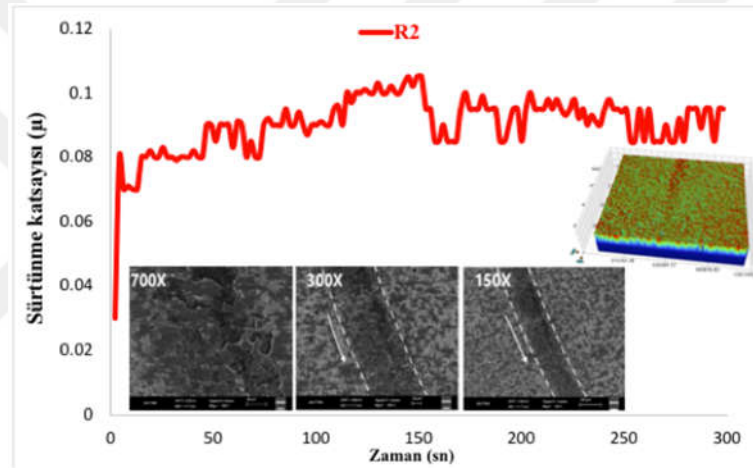
Şekil 87. PVD yöntemiyle AA2014 üzerine R4 şartlarında büyütülmüş MoS₂-Ti kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



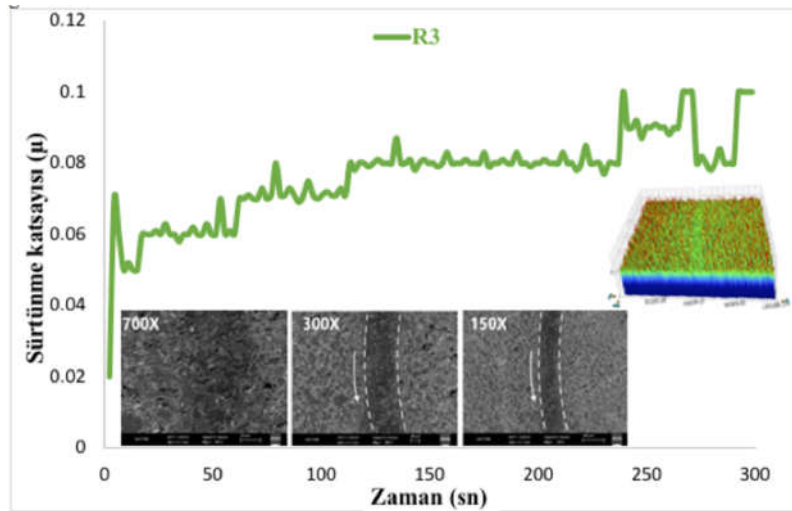
Şekil 88. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülmüş MoS₂-Ti kaplamaların aşınma grafikleri görüntüsü



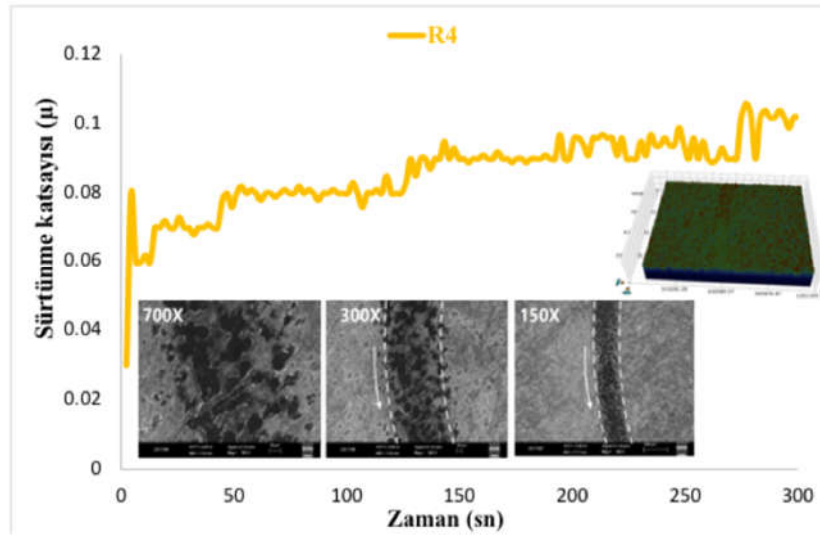
Şekil 89. PVD yöntemiyle Cp-Ti üzerine R1 şartlarında büyütülmüş MoS₂-Ti kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



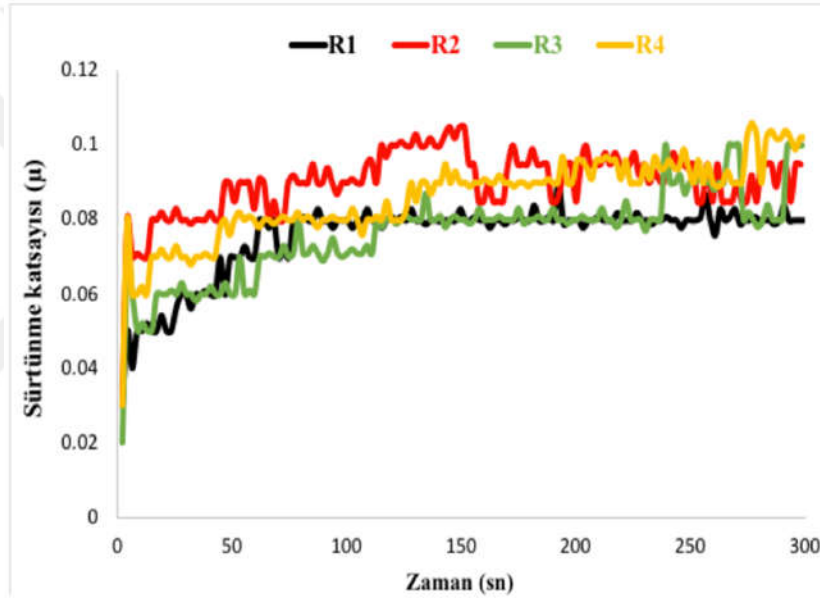
Şekil 90. PVD yöntemiyle Cp-Ti üzerine R2 şartlarında büyütülmüş MoS₂-Ti kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



Şekil 91. PVD yöntemiyle Cp-Ti üzerine R3 şartlarında büyütülmüş MoS₂-Ti kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



Şekil 92. PVD yöntemiyle Cp-Ti üzerine R4 şartlarında büyütülmüş MoS₂-Ti kaplamaların aşınma grafikleri, aşınma izi SEM ve 3D profilometre görüntüsü



Şekil 93. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülmüş MoS₂-Ti kaplamaların aşınma grafikleri görüntüsü

Tribokorozyon Test Sonuçları

Tez çalışmasının bu bölümünde; PEO ve PVD yöntemleri kullanılarak farklı parametrelerde büyütülen Al₂O₃/MoS₂, TiO₂/MoS₂ ve MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların tribokorozyon davranışlarını (aşınma ve korozyonun sinerjik etkisi) belirlemek için tribokorozyon deneyleri; %3.5 NaCl çözeltisi içerisinde, açık devre potansiyeli (OCP) ile aşınma test cihazı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Tribokorozyon; taban malzemeleri aynı zamanda aşınmaya ve korozyona uğrayan bir işlemdir. Tribokorozyon tribolojik temas altında ve korozif ortamlarda taban malzemelerin hasarlarına yol açan; kimyasal, elektrokimyasal ve

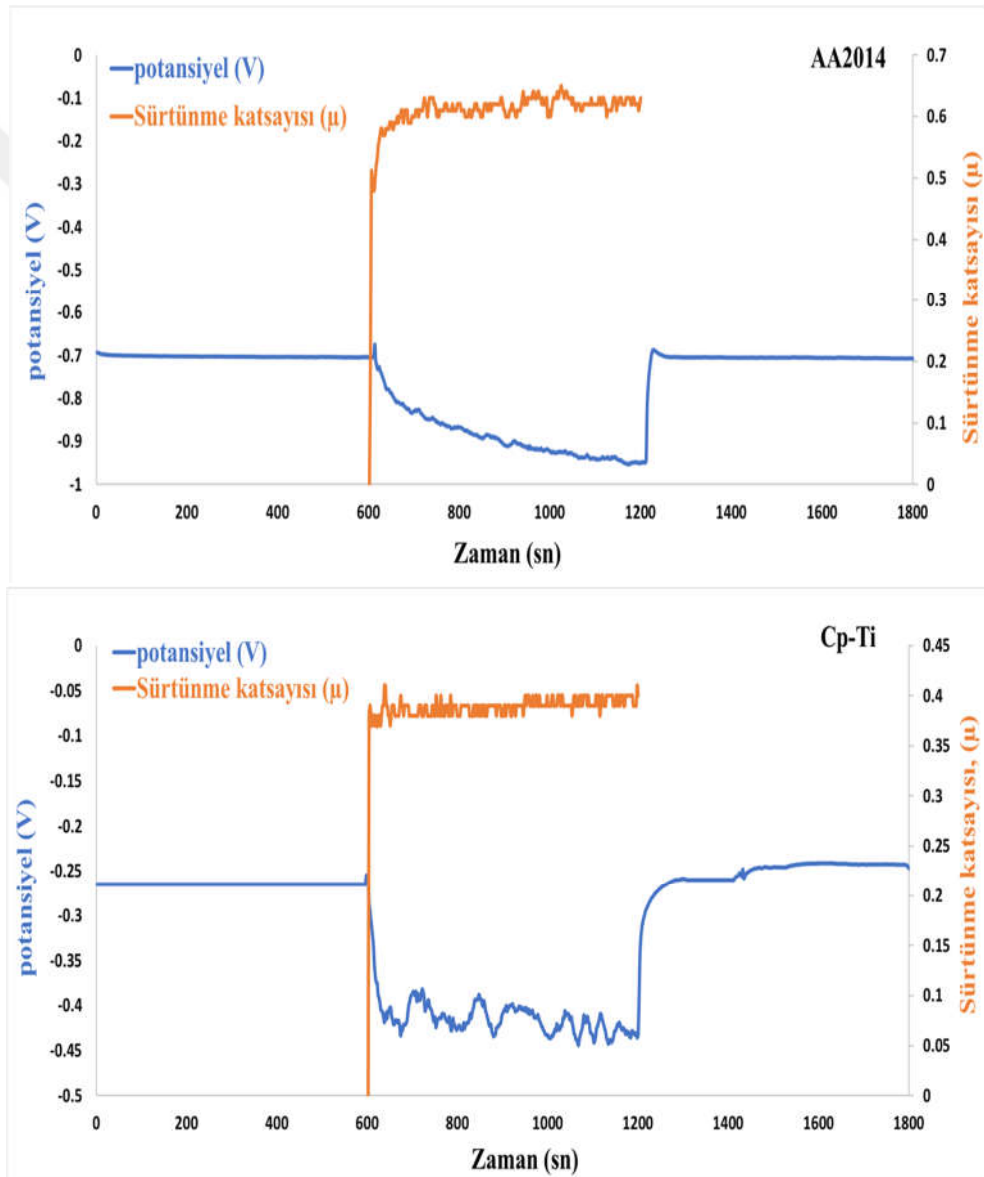
mekanik süreçler olarak gerçekleşmektedir. OCP'lerin belirlenmesi için (sürtünmesiz, sürtünme şartları altında ve sürtünmeden sonra) potansiyel-zaman ve sürtünme katsayısı eğrileri Şekil 94-119'de ve elde edilen potansiyelin değerleri Tablo 29-33'te verilmiştir. PEO ve PVD yöntemleri ile büyütülen nanokompozit kaplamalardan OCP değerleri ilk olarak kararlı hale gelmesi için 600 saniye çözelti (%3.5 NaCl) içerisinde bekletilmiştir. 600 saniye bittikten sonra, uygulanan 2N yük altında sürtünme şartları altında OCP değerleri ani olarak düşmüştür. Sürtünmenin 600-1200 saniye aralığında yüzeyde oluşan oksit tabakalardan dolayı (oksid tabakalar sürtünme süresinde kohezif bir şekilde koparak pin ile numune arasında sürtünme yönünde uzamıştır) OCP eğrilerinde dalgalanmalar meydana gelmiştir. Uygulanan 2N yük kaldırıldıktan sonra tekrar 600 saniyelik süre içinde (1200-1800 saniye aralığında) numuneler tekrar çözelti içerisinde bekletilmiştir ve bu sebeple numunelerin üzerinde tekrardan oluşan oksit tabakası ile pasifleşmesi sağlanmıştır. PEO ve PVD yöntemleri ile büyütülen nanokompozit kaplamaların, AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerin potansiyel değerleri ve OCP potansiyeli-zaman eğrilerine göre daha iyi davranışlar göstermiştir. Tribokorozyon deney sistemin yardımıyla tespit edilen bu açık devre potansiyelleri (OCP), aşınma izi içinde yer alan aşınmış ve aşınmamış yüzey arasındaki birleşme halini yansıtan karışık bir potansiyel değeri olarak karşımıza çıkmaktadır. Böylece aşınmış/aşınmamış yüzey arasında bir galvanik çift olduğu ortaya çıkmıştır (Akbari et al., 2018; Alves *et al.* 2013; Amanov, 2021; ; Benea et al. 2004; Garcia and Celis 2001; Ghafaripoor et al., 2018; Licausia *et al.* 2013; Oltra 1991; Xie et al., 2015). Aşınmış kısmın aşınmamış kısma oranı, aşınan ve aşınmayan kısımlardaki malzemelerin açık devre potansiyelleri ve aşınmış/aşınmamış kısımlardaki katodik ve anodik bölgelerde oluşan reaksiyonların mekanizması ve kinetiği gibi parametreler OCP'yi etkilediği saptanmıştır (Benea et al. 2006).

AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeleri için tribokorozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri (sürtünmeden önce ve sürtünme sırasında) Tablo 29'da, OCP potansiyeli-zaman ve sürtünme katsayısı eğrileri Şekil 94'da ve deneylerden sonra elde edilen yüzeylere ait SEM görüntüleri Şekil 95'te gösterilmektedir. Şekil 94'de gösterildiği gibi; AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerin OCP değerlerinin ilk olarak kararlı hale gelmesi için 600 saniye çözelti (%3.5 NaCl) içerisinde bekletilmiştir ve 600 saniye sonunda uygulanan 2N yük altında sürtünmeden dolayı OCP değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Uygulanan 2N yük kaldırıldıktan sonra tekrar 600 saniyelik süre içinde (1200-1800 saniye aralığında) numuneler tekrar çözelti içerisinde bekletilmiş ve bu sebeple numunelerin üzerindeki oksit tabakanın (koruyucu bir tabaka olduğu) pasifleşmesi sağlanmıştır (Alves *et al.* 2013). Ayrıca AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerin potansiyel değerleri aşınma olmayan durumda sırasıyla yaklaşık -0,7 V ve -0,27 V olarak, sürtünme başladıktan sonra bu değerler sırasıyla yaklaşık -0,9 V ve -0,43 V olarak

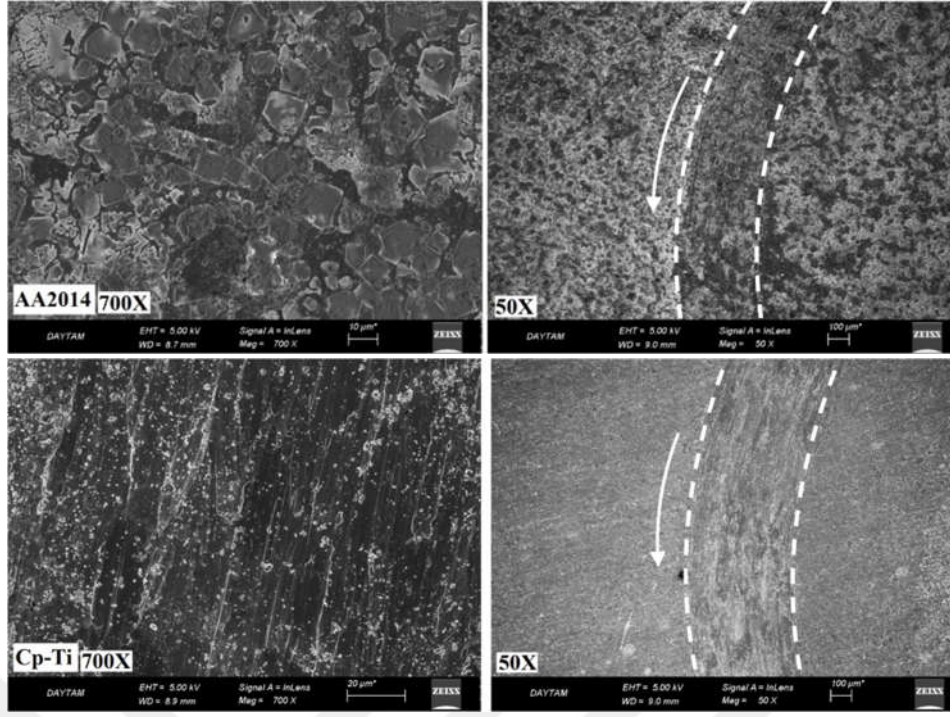
elde edilmiştir. Uygulanan 2N yük kaldırıldıktan sonra, sırasıyla yaklaşık -0,77 V'dan -0,67 V'a ve -0,35 V'dan -0,26 V'a kadar taban malzemede pasif tabaka oluşmuştur ve sırasıyla yaklaşık -0,71 V ve -0,23 V'da potansiyel değeri kararlı hale gelmiştir.

Tablo 29. AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerinin tribo-korozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri

Taban Malzeme	OCP'nin bitme potansiyeli (V)	Sürtünme Potansiyeli(V)
AA2014	-0,7	-0,9
Cp-Ti	-0,27	-0,43



Şekil 94. AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerinin tribokorozyon deneylerinin OCP potansiyeli-zaman ve sürtünme katsayısı eğrileri.



Şekil 95. Tribokorozyon deneylerinden sonra AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerinin SEM görüntüleri.

PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri (sürtünmeden önce ve sürtünme sırasında) Tablo 30’da, OCP potansiyeli-zaman ve sürtünme katsayısı eğrileri Şekil 96-100’de ve yüzeylere ait SEM görüntüleri Şekil 101’de gösterilmektedir.

Şekil 96-101’de gösterildiği gibi; PEO yöntemi ile büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalarının OCP değerleri ilk olarak kararlı hale gelmesi için 600 saniye çözelti (%3.5 NaCl) içerisinde bekletilmiştir. Sürtünmenin 600-1200 saniye aralığına kadar yüzeyde oluşan oksit tabakalardan dolayı OCP eğrilerinde dalgalanmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Bu dağınık dalgalanmalar aşınma boyunca (600-1200 saniye aralığında) temas yüzeyleri arasında meydana gelen adezyon ile tanımlanmaktadır (Akbari et al., 2018; Alves et al. 2013; Amanov, 2021; ; Arrabal et al. 2015). Uygulanan 2N yük kaldırıldıktan sonra tekrar 600 saniyelik süre içinde (1200-1800 saniye aralığında) numuneler tekrar çözelti içerisinde bekletilmiştir ve bu sebeple numunelerin üzerindeki oksit tabakanın pasifleşmesi sağlanmış ve sonra numuneler kararlı hale gelmiştir (Alves et al. 2013). Farklı parametre ve seviyede büyütülen PEO- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların, OCP potansiyeli-zaman eğrileri (Şekil 102), AA2014 taban malzemeye göre (Şekil 96) daha iyi davranışlar göstermiştir. Bu iyi davranışın sebebi $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların koruyucu bir tabaka olduğu sonucuna verilmiştir. Ayrıca elde edilen OCP değerleri karşılaştırıldığında, açıkça görülmektedir ki; AA2014 taban malzemenin OCP değerleri büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$

nanokompozit kaplamalara göre genel olarak daha düşük değerlere sahiptir. Elde edilen düşük değerlerin sebebi; sürtünme şartları altında (600-1200 saniye aralığında) yüzeydeki bulunan pasif oksit tabakasının kolay kırılması ile birlikte korozyon çözeltisiyle ortaya çıkan bu durum taban malzemesine direk temas etmesinden dolayı düşük değerler oluşmaktadır (Amanov, 2021; Barril, *et al.* 2002; Ponthiaux *et al.* 2004; Azzi, *et al.* 2007; Manhabosco *et al.* 2009).

OCP potansiyeli-zaman eğrileri incelendiğinde; farklı parametre ve seviyede büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların, P1, P2, P3 ve P4 potansiyel değerleri aşınma olmayan durumda sırasıyla yaklaşık -0,39 V, -0,43 V, -0,38 V ve -0,19 V olarak, sürtünme başladıktan sonra bu değerler sırasıyla yaklaşık -0,57 V, -0,34 V, -0,35 V ve -0,29 V olarak elde edilmiştir. Uygulanan 2N yük kaldırıldıktan sonra, sırasıyla yaklaşık -0,43 V'dan -0,39 V'a, -0,26 V'dan -0,24 V'a, -0,27 V'dan -0,24 V'a ve -0,27 V'dan -0,23 V'a kadar pasif tabaka oluşmuştur ve sırasıyla yaklaşık -0,37V, 0,21 V, 0,23 V ve -0,21 V'da potansiyel değerleri kararlı hale gelmiştir.

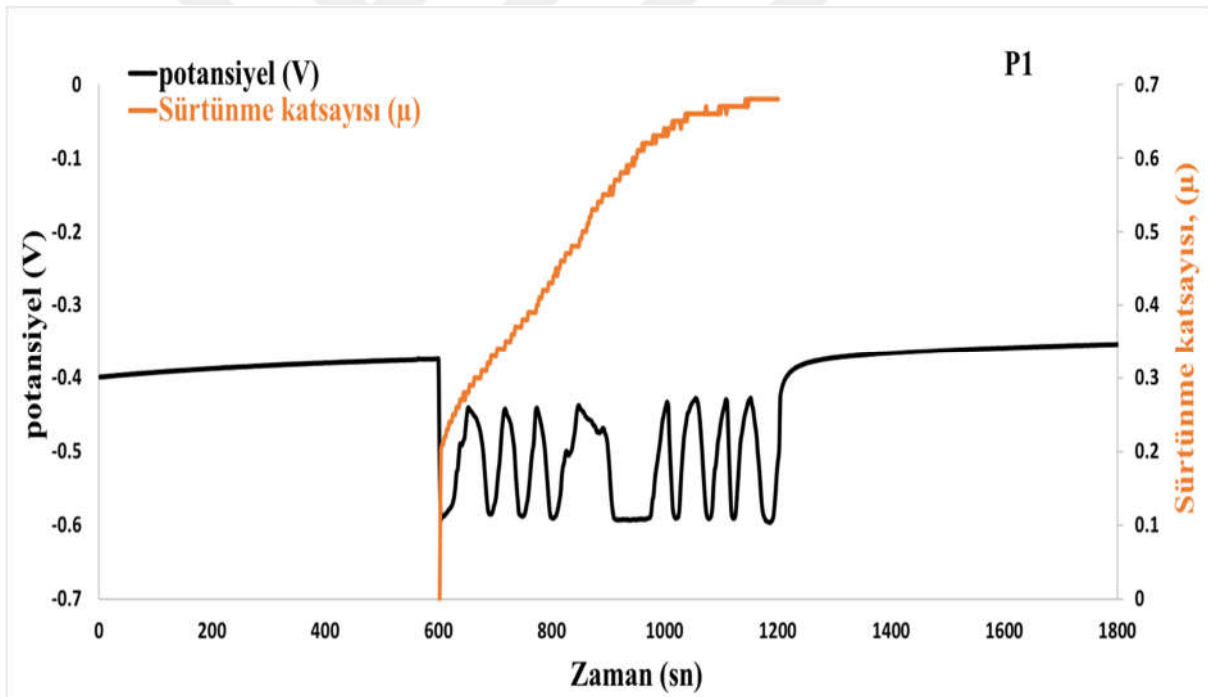
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların P1 ve P4 numunelerinde OCP değerlerinin sürtünme başlamadan önce sabit olarak devam ettiği gözlenmiştir. Fakat P2 ve P3 numunelerinde OCP değerleri azalmaktadır. Sürtünme süresi (600-1200 saniye aralığında uygulanan 2N aşınma yükü) arttıkça potansiyel değerleri yüzeydeki kaplamaların kalınlığı ve dış tabakasından dolayı, çok etkilenmemiştir ve yüzeyde oluşan oksit tabakalardan dolayı OCP eğrilerinde dağınık dalgalanmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durum Al_2O_3 pinin aşınma izi içinde hareketi sırasında potansiyel değerlerinde (yüzeyde pasif oksit tabakasının devamlı kırılması ve yeniden oluşmasından dolayı) bazı dağınık dalgalanmalara sebep olur. Diğer taraftan sürtünme katsayısı, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalarında ortalama $\mu=0,51$, $\mu=0,41$, $\mu=0,32$ ve $\mu=0,99$ olarak sırasıyla P1, P2, P3 ve P4 de tespit edilmiştir. Aşınma kaldırıldıktan sonra OCP değeri tekrar ani olarak artmaktadır ve bu durum numuneler yüzeyinde yeni pasif tabakaların oluşumu ile açıklanmaktadır(şekil 102)(Alves *et al* 2013).

Buna ek olarak, aşınma sırasında sürtünme değerlerinde kaplamanın yüzey özelliğinden dolayı değişiklik meydana gelmiştir. Yüzeyde biriken katı yağlayıcı özelliğine sahip MoS_2 nanopartikül miktarı ve yüzey pürüzlülüğünün etkisi nedeniyle P3 numunesinde sürtünme katsayısı $\mu=0,32$ olarak en iyi sürtünme katsayısı belirlenmiştir(Alves *et al.* 2013; Garcia and Celis 2001; Ghafaripoor et al., 2018; Sundararajan and Krishna 2003; Xu *et al.* 2013; Xie et al., 2015). Ayrıca PEO yöntemi ile büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların OCP eğrileri karşılaştırıldığında(Şekil 102), P2, P3 ve P4 şartlarında büyütülen kaplamalar birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Verilen SEM görüntüleri ve OCP eğrileri incelendiğinde, net bir şekilde görülmektedir ki P4 numunesi yüzeydeki gözeneklerin homojen dağılımı ve dar aşınma

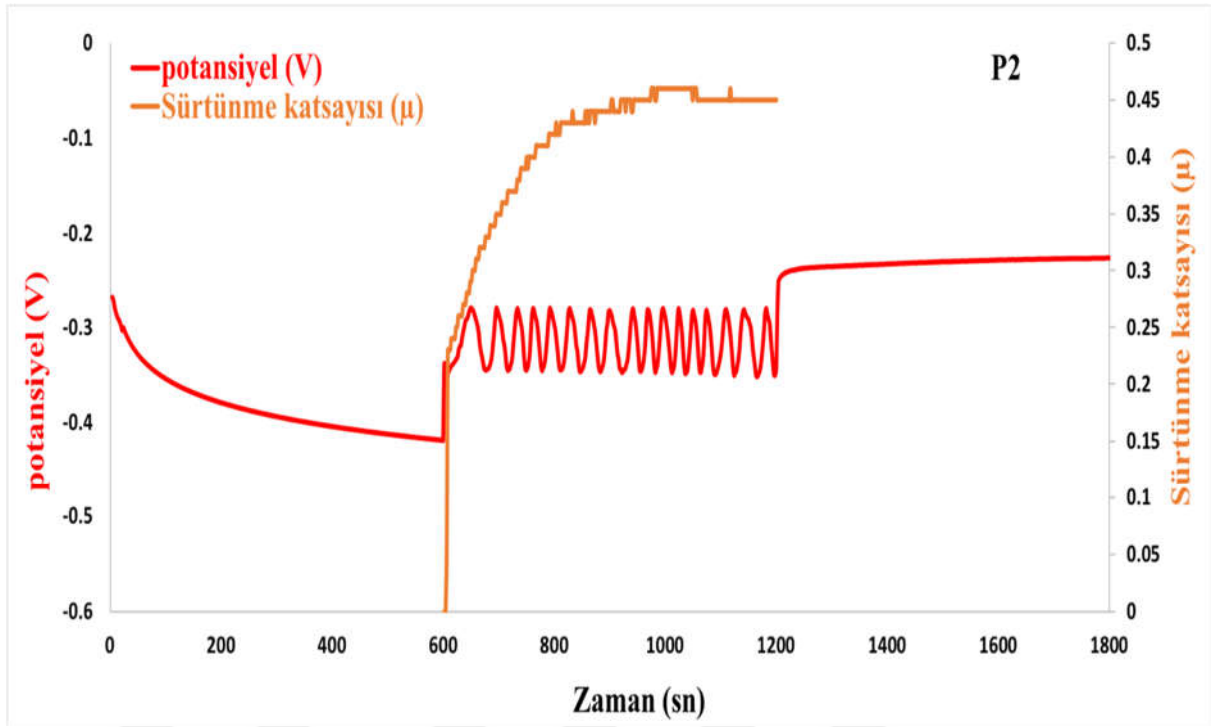
izine sahip olduğu için diğer kaplamalara göre daha iyi tribokorozyon davranış göstermiştir. P4 şartlarında büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların sürtünme şartlarındaki OCP değeri yaklaşık olarak -0,19 V olarak tespit edilmiştir.

Tablo 30. PEO ile büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ kaplamaların tribo-korozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri

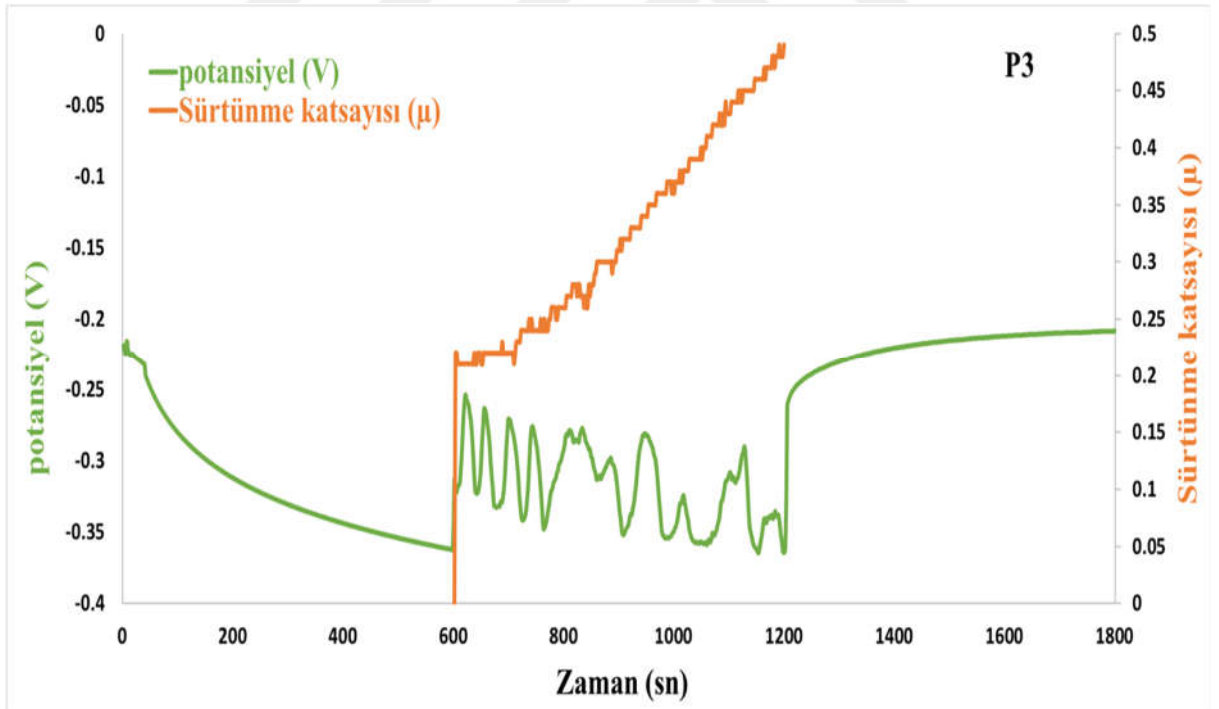
PEO	OCP'nin bitme potansiyeli (V)	Sürtünme Potansiyeli (V)
AA2014	-0,7	-0,9
P1	-0,39	-0,57
P2	-0,43	-0,34
P3	-0,38	-0,35
P4	-0,19	-0,29



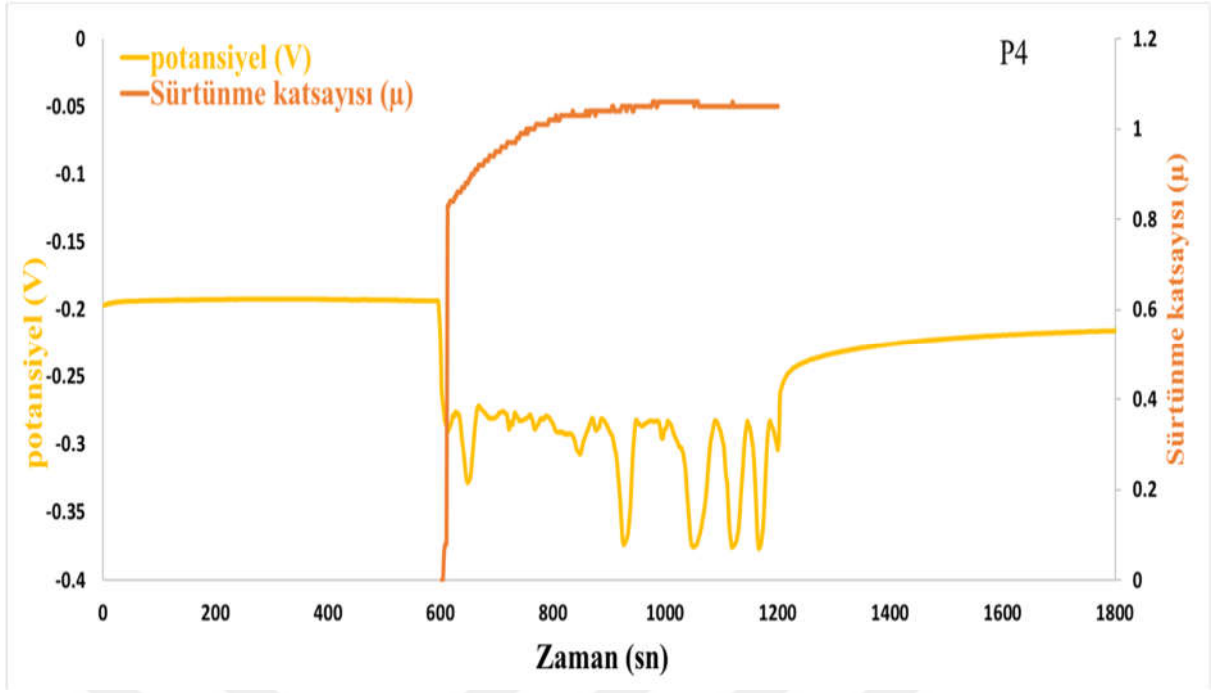
Şekil 96. P1 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.



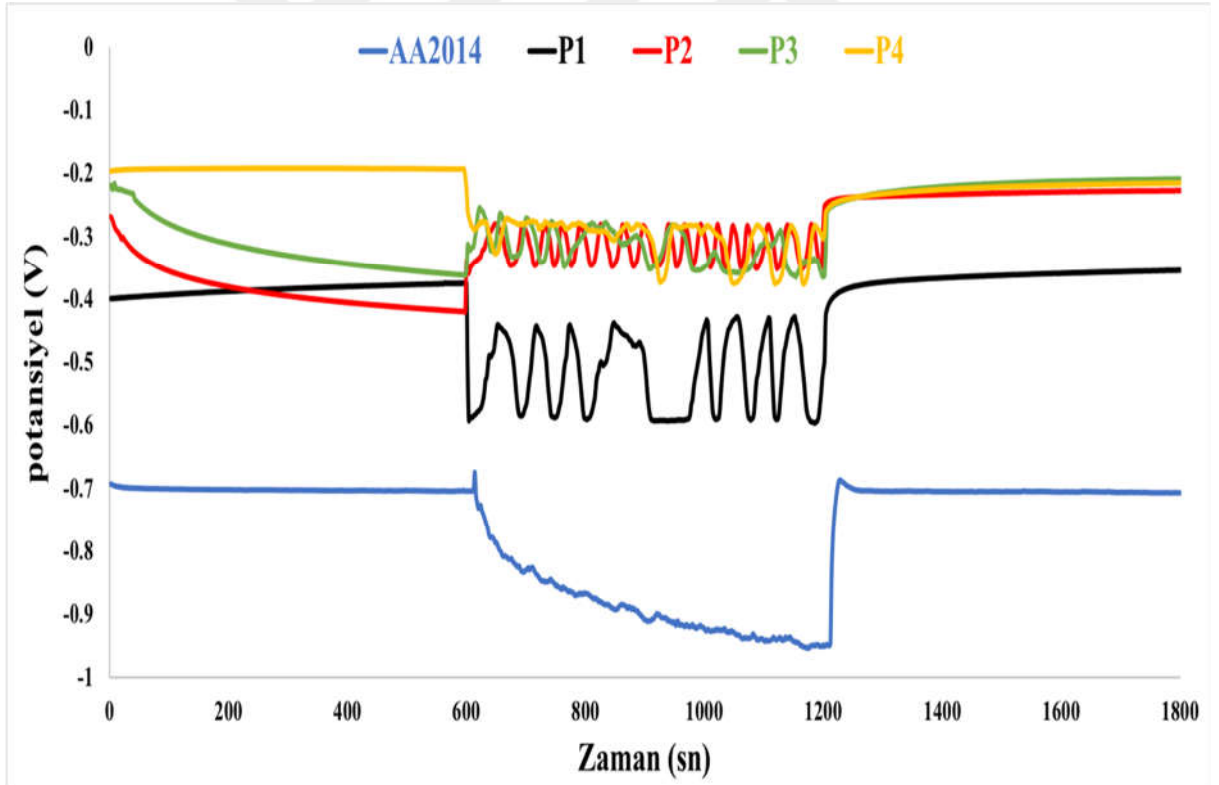
Şekil 97. P2 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri



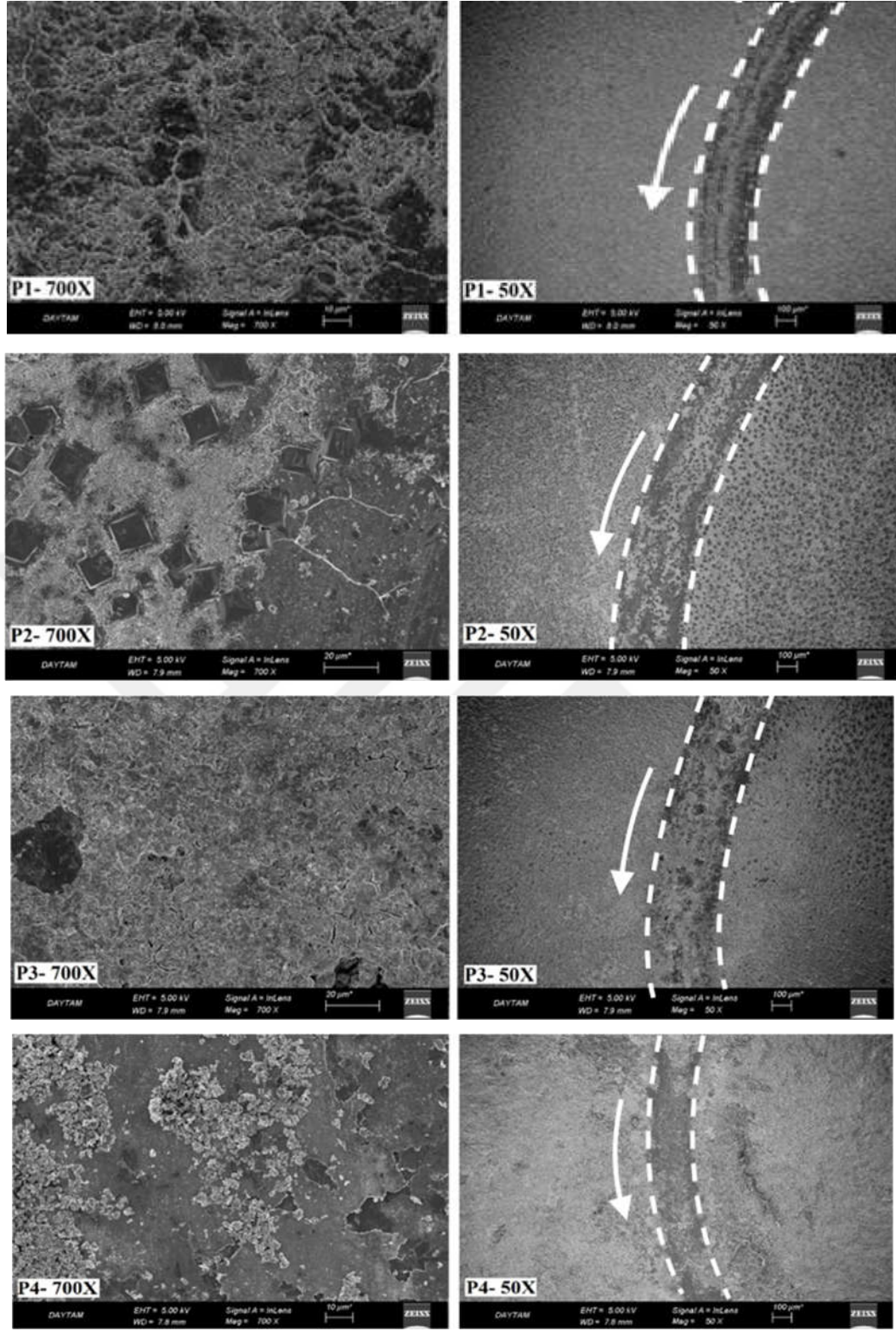
Şekil 98. P3 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri



Şekil 99. P4 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri



Şekil 100. P1, P2, P3 ve P4 şartlarında PEO ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP -zaman eğrileri.

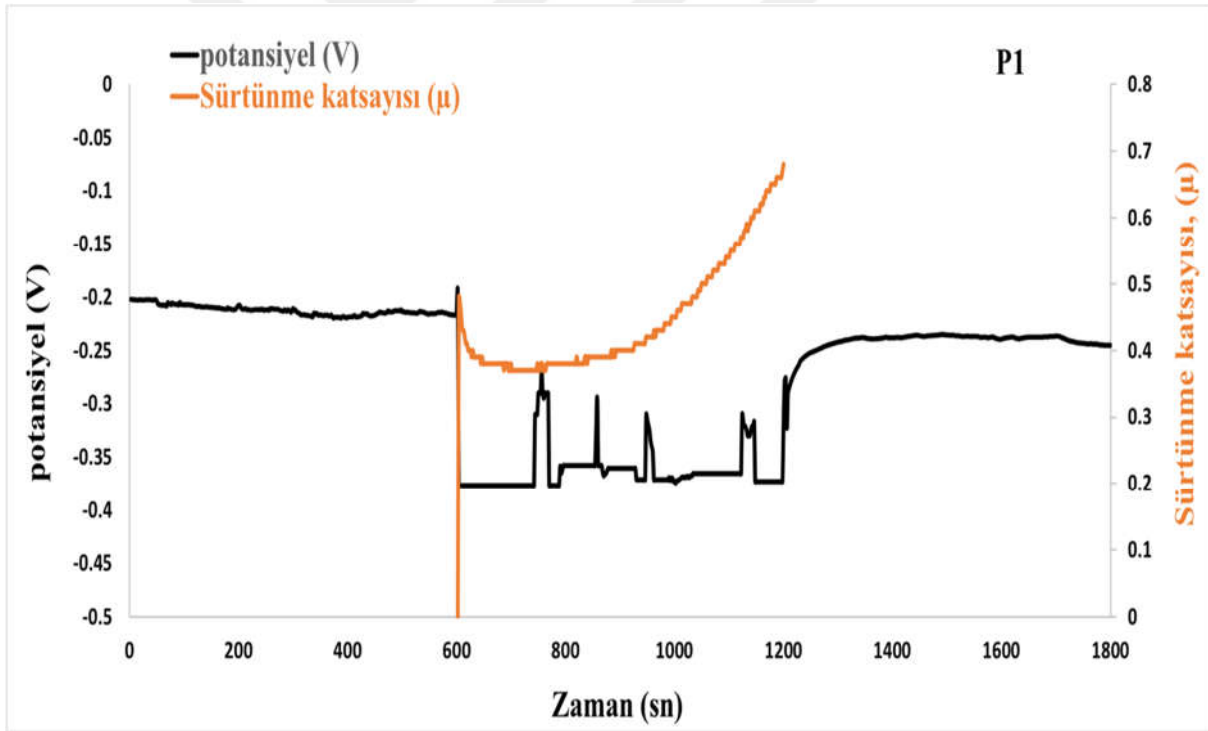


Şekil 101. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden sonra SEM görüntüleri.

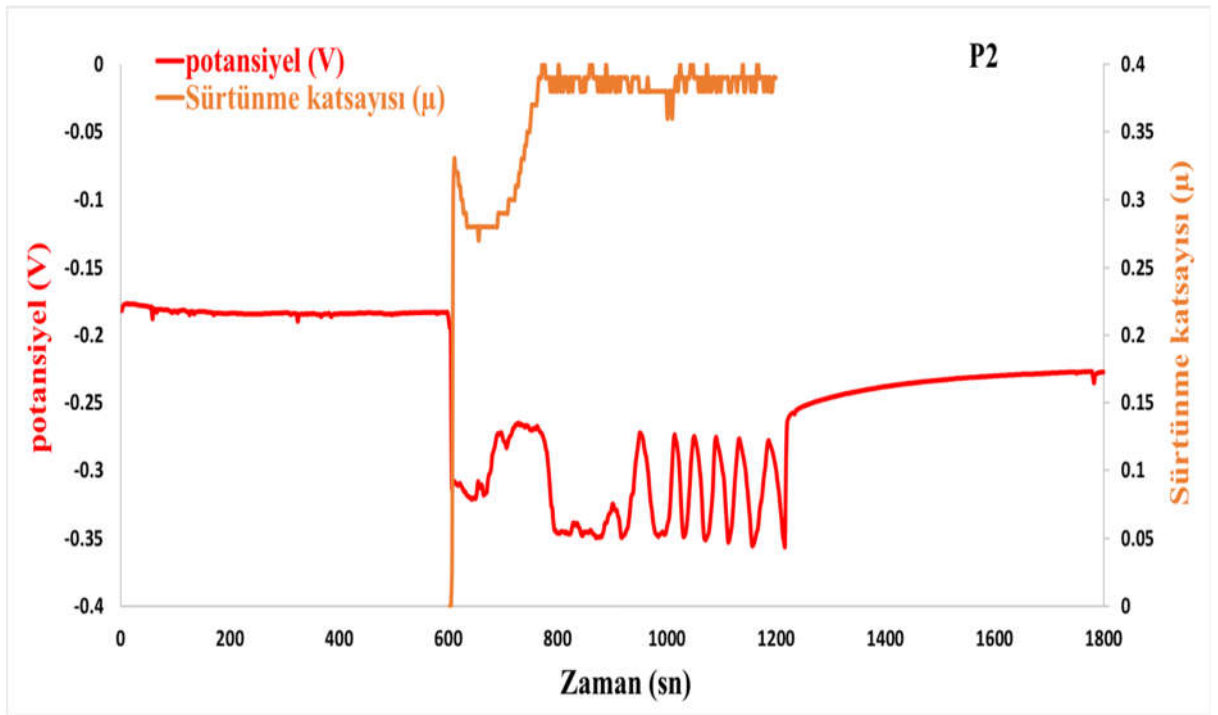
PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri (sürtünmeden önce ve sürtünme sırasında) Tablo 31’de, OCP potansiyeli-zaman ve sürtünme katsayısı eğrileri Şekil 102 - 106’da ve yüzeylere ait SEM görüntüleri Şekil 107’de görülmektedir.

Tablo 31. PEO ile büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ kaplamaların tribo-korozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri

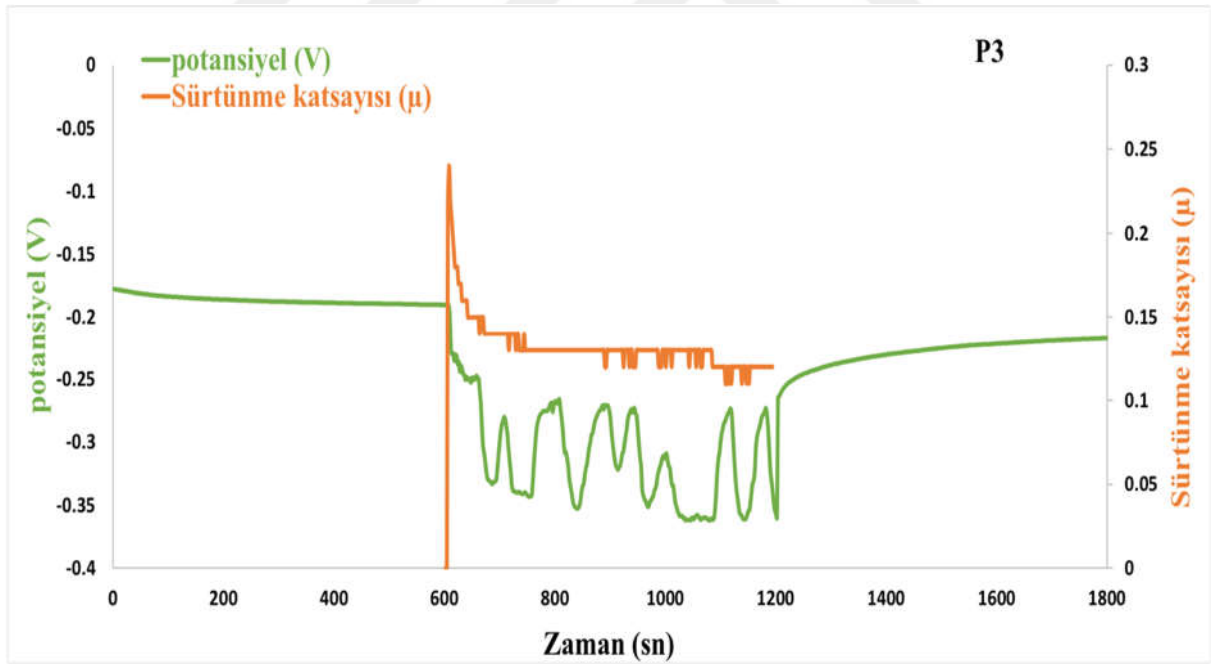
PEO	OCP’nin bitme potansiyeli (V)	Sürtünme Potansiyeli (V)
Cp-Ti	-0,27	-0,43
P1	-0,23	-0,36
P2	-0,18	-0,35
P3	-0,19	-0,35
P4	-0,17	-0,34



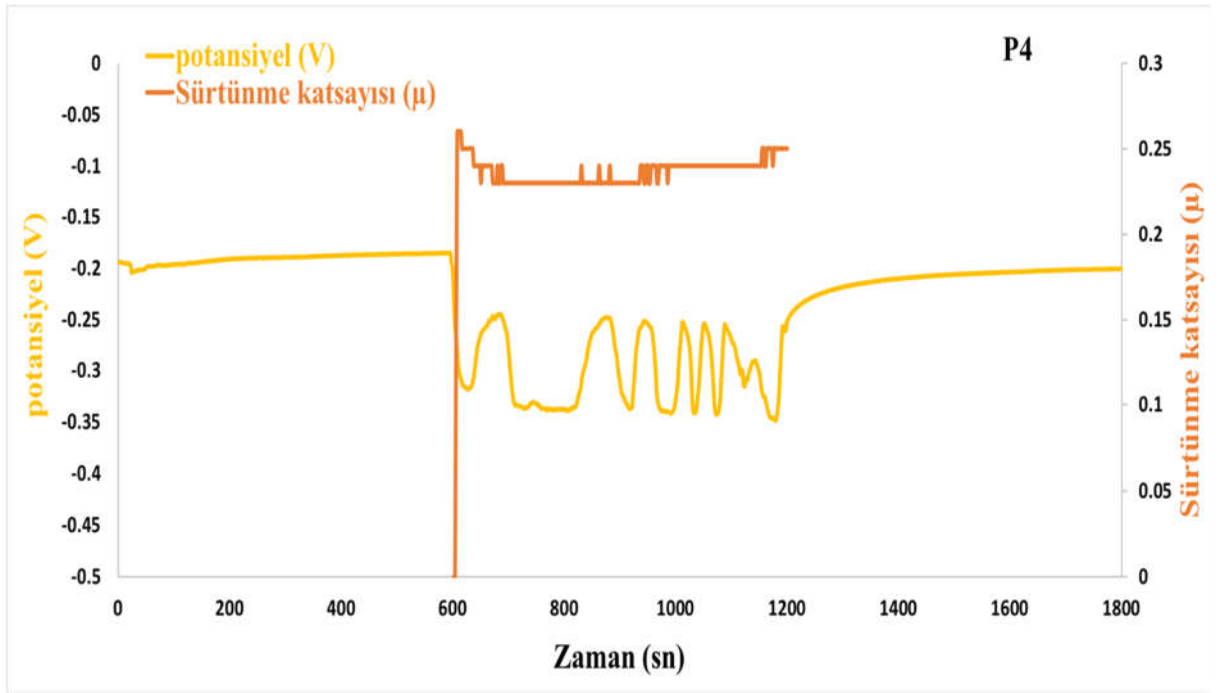
Şekil 102. P1 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri



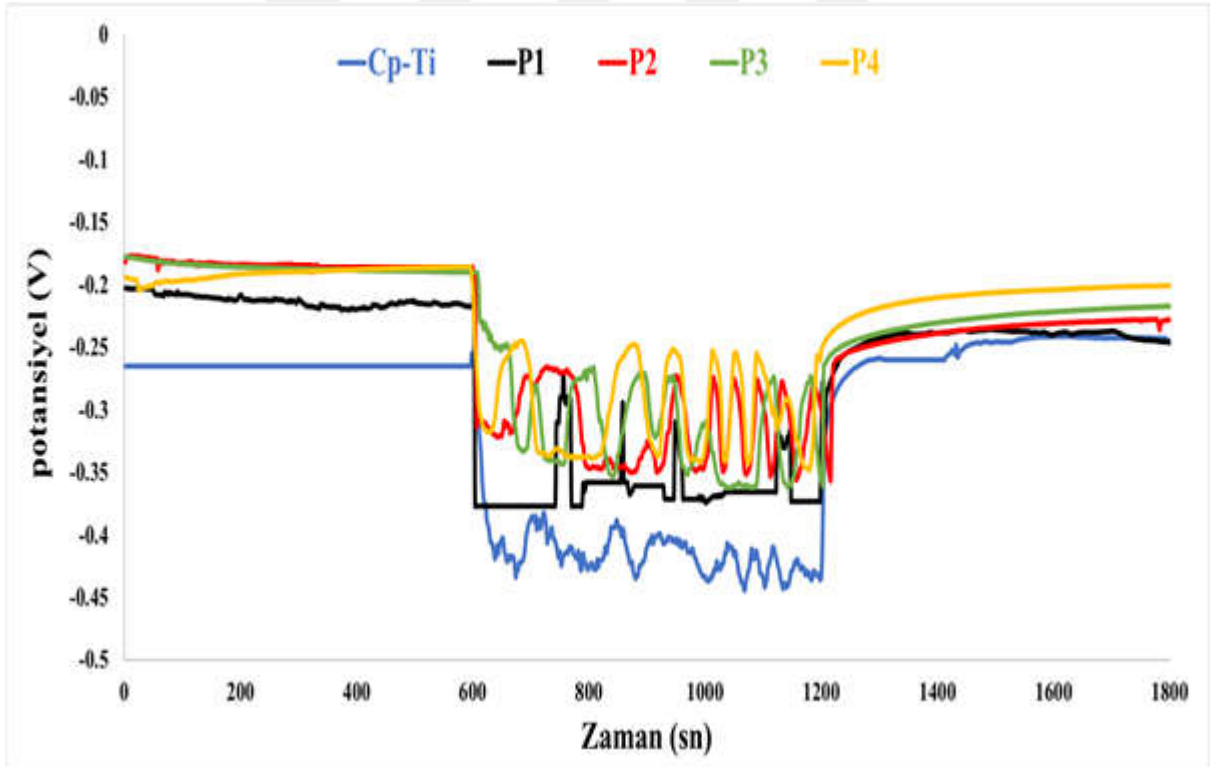
Şekil 103. P2 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri



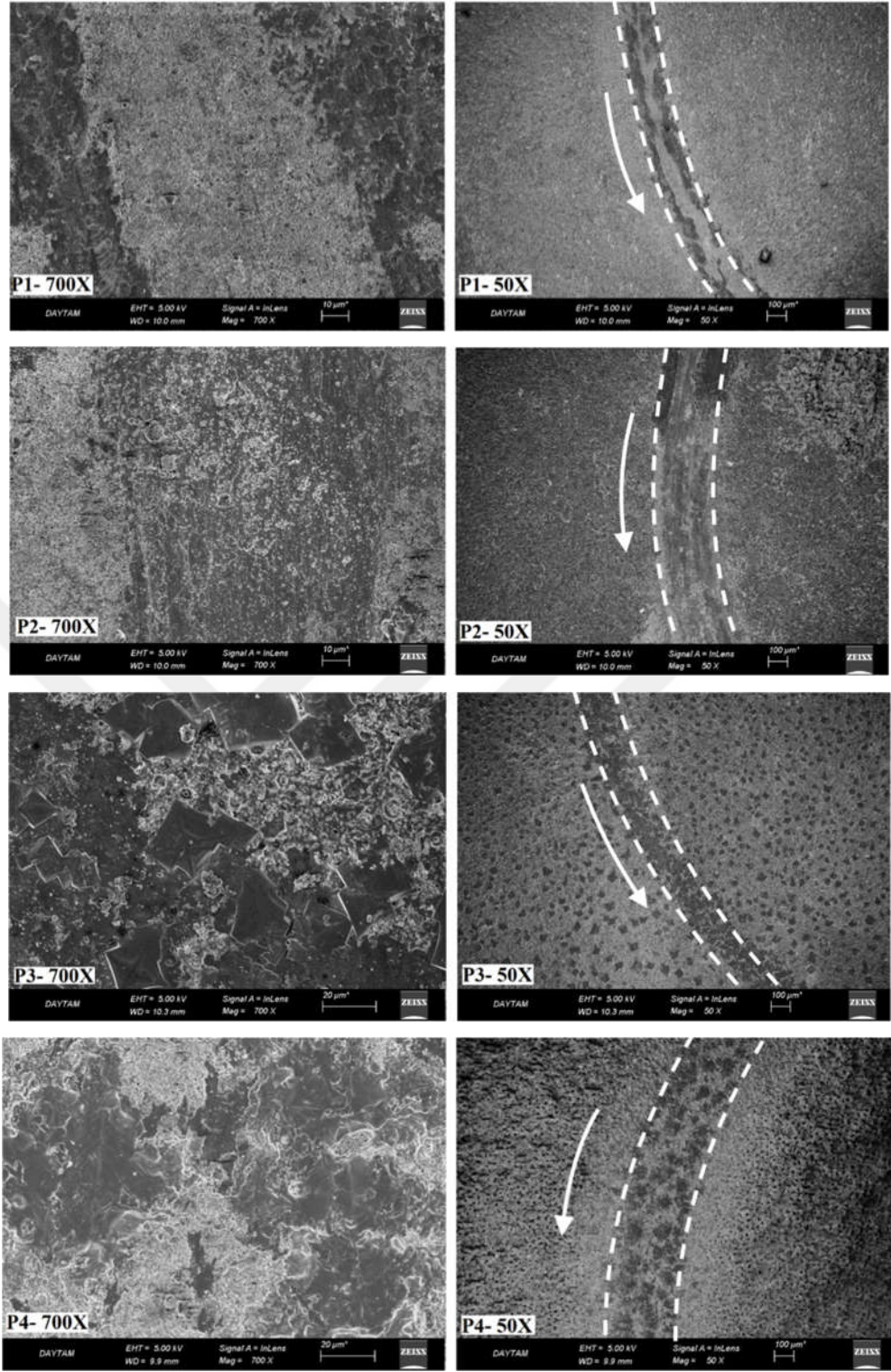
Şekil 104. P3 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri



Şekil 105. P4 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.



Şekil 106. P1, P2, P3 ve P4 şartlarında PEO ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP -zaman eğrileri.



Şekil 107. PEO yöntemi ile P1, P2, P3 ve P4 değerlerinde büyütülen TiO₂/MoS₂ nanokompozit kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneyleri sonrası SEM görüntüleri.

Şekil 102-106'da görüldüğü gibi; PEO yöntemi ile farklı parametre ve seviyelerde büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalardan OCP değerleri ilk olarak kararlı hale gelmesi için 600 saniye çözelti (%3.5 NaCl) içerisinde bekletilmiştir ve 600 saniye bittikten sonra, uygulanan 2N yük altında sürtünme şartları tekrar 600 saniyelik süre içinde iken, sürtünmeden dolayı OCP değerleri, P1, P2, P3 ve P4 numunelerinde ani olarak azalmaktadır. Sürtünmenin 600-1200 saniye aralığına kadar yüzeyde oluşan oksit tabakalardan dolayı OCP eğrilerinde dağınık dalgalanmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Uygulanan 2N yük kaldırıldıktan sonra tekrar 600 saniyelik süre içinde (1200-1800 saniye aralığında) numuneler tekrar çözelti içerisinde bekletilmiştir ve bu sebeple numunelerin üzerindeki oksit tabakanın pasifleşmesi sağlanmış ve sonra numuneler kararlı hale gelmiştir (Alves *et al.* 2013; Amanov, 2021; Ghafaripoor *et al.*, 2018).

P1, P2, P3 ve P4 şartlarında PEO yöntemi ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinin OCP potansiyeli-zaman eğrileri (Şekil 106), Cp-Ti taban malzemeye göre daha iyi davranışlar göstermiştir. OCP potansiyeli-zaman eğrileri incelendiğinde; farklı parametre ve seviyede büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların, P1, P2, P3 ve P4 potansiyel değerleri aşınma olmayan durumda sırasıyla yaklaşık -0,23 V, -0,18 V, -0,19 V ve -0,17 V olarak, sürtünme başladıktan sonra bu değerler sırasıyla yaklaşık -0,36 V, -0,35 V, -0,34 V ve -0,33 V olarak elde edilmiştir. Uygulanan 2N yük kaldırıldıktan sonra, sırasıyla yaklaşık -0,29 V'dan -0,24 V'a, -0,28 V'dan -0,25 V'a, -0,27 V'dan -0,23 V'a ve -0,28 V'dan -0,21 V'a kadar pasif tabaka oluşmuştur ve sırasıyla yaklaşık -0,25 V, 0,23 V, 0,22 V ve -0,21 V'da potansiyel değerleri kararlı hale gelmiştir. Elde edilen bu değişik potansiyel değerleri numuneler üzerine büyütülen oksit tabakaları ile ilişkilidir. Yani numuneler üzerinde oluşan oksit tabakalar sürtünmeden önce, sürtünme sırasında ve sürtünmeden sonra gösterdiği davranışlar ile açıklanabilmektedir.

PEO- $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$; P1, P2, P3 ve P4 şartlarında elde edilen OCP değerleri karşılaştırıldığında, açıkça görülmektedir ki; Cp-Ti taban malzemenin OCP değerleri büyütülen $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamalara göre genel olarak daha düşük değerlere sahiptir. Bunun sebebi sürtünme süresinde Cp-Ti taban malzemenin yüzeydeki bulunan pasif oksit tabakasının kolay kırılması ile birlikte korozyon çözeltisiyle ortaya çıkan bu durum taban malzemesine direk temas etmesinden dolayı düşük değerler oluşmaktadır (Barril, *et al.* 2002; Ponthiaux *et al.* 2004; Azzi, *et al.* 2007; Manhabosco *et al.* 2009).

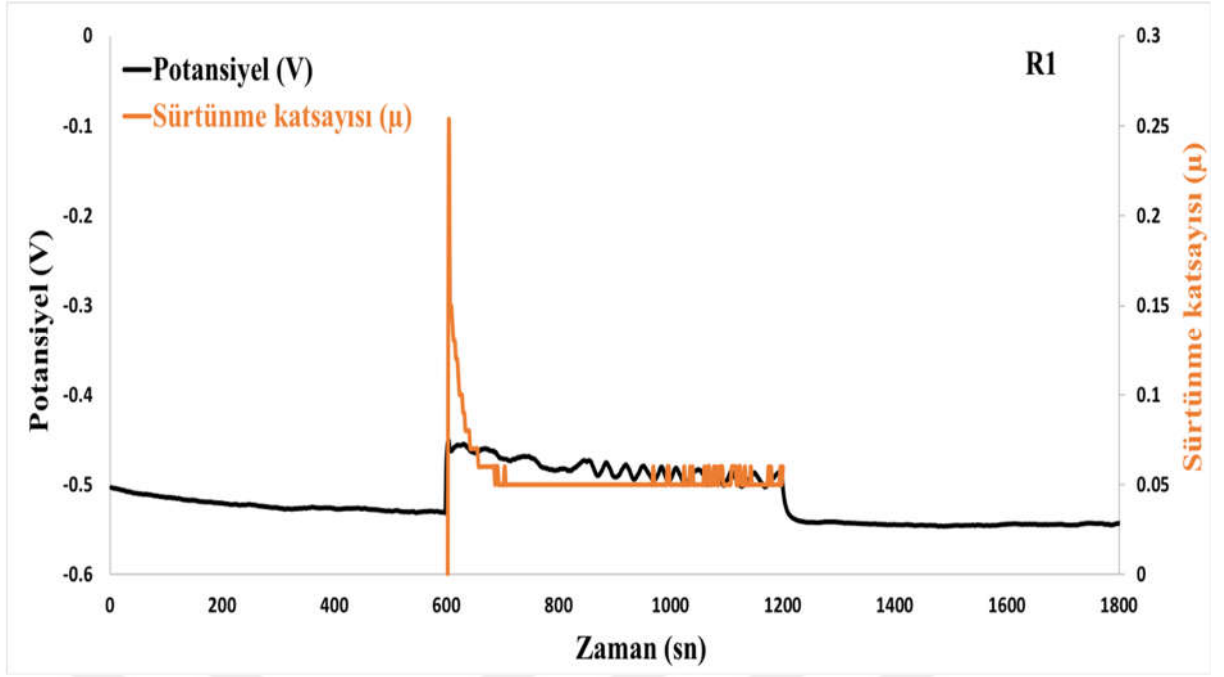
$\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ nanokompozit kaplamaların P2, P3 ve P4 numunelerinde OCP değerlerinin sürtünme başlamadan önce sabit olarak devam ettiği gözlenmiştir. Fakat P1 numunesinde OCP

değerleri dalgalı olarak azalmaktadır. Sürtünme süresi (600-1200 saniye aralığında uygulanan 2N aşınma yükü) arttıkça potansiyel değerleri yüzeydeki kaplamaların kalınlığı ve dış tabakasından dolayı, çok etkilenmemiştir ve yüzeyde oluşan oksit tabakalardan dolayı OCP eğrilerinde dağınık dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu durum Al_2O_3 pinin aşınma izi içinde hareketi sırasında potansiyel değerlerinde bazı dağınık dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu dağınık dalgalanmalar yüzeyde oluşan pasif oksit tabakasının kırılması ve yeniden oluşmasından ileri gelmektedir. Diğer taraftan sürtünme katsayısı, TiO_2/MoS_2 nanokompozit kaplamalarında ortalama $\mu=0,23$, $\mu=0,30$, $\mu=0,40$ ve $\mu=0,20$ olarak sırasıyla P1, P2, P3 ve P4 de tespit edilmiştir. Aşınma kaldırıldıktan sonra OCP değeri tekrar ani olarak artmaktadır ve numuneler yüzeyinde yeni pasif tabakalar oluşmaya başlamıştır (Şekil106). Cp-Ti taban malzemesi üzerine P4 şartlarında PEO yöntemi ile büyütülen TiO_2/MoS_2 nanokompozit kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinin, OCP değeri diğer büyütülen kaplamalara göre daha iyi tribokorozyon davranış göstermiştir. Bunun sebebi P4 şartlarında büyütülen TiO_2/MoS_2 kaplamaların diğer kaplamalara göre homojen ve yoğun yapı, yüksek kaplama kalınlığına sahip olmasıdır. Ayrıca yüzeyde biriken MoS_2 nanopartikül miktarının fazla olması ve yüzeyin minimum pürüzlü olması nedeniyle verilen SEM görüntüleri ile açıklanabilmektedir(Sundararajan and Krishna 2003; Xie et al., 2015). P4 şartlarında büyütülen TiO_2/MoS_2 nanokompozit kaplamaların sürtünme şartlarındaki OCP değeri yaklaşık olarak -0,34 V olarak tespit edilmiştir.

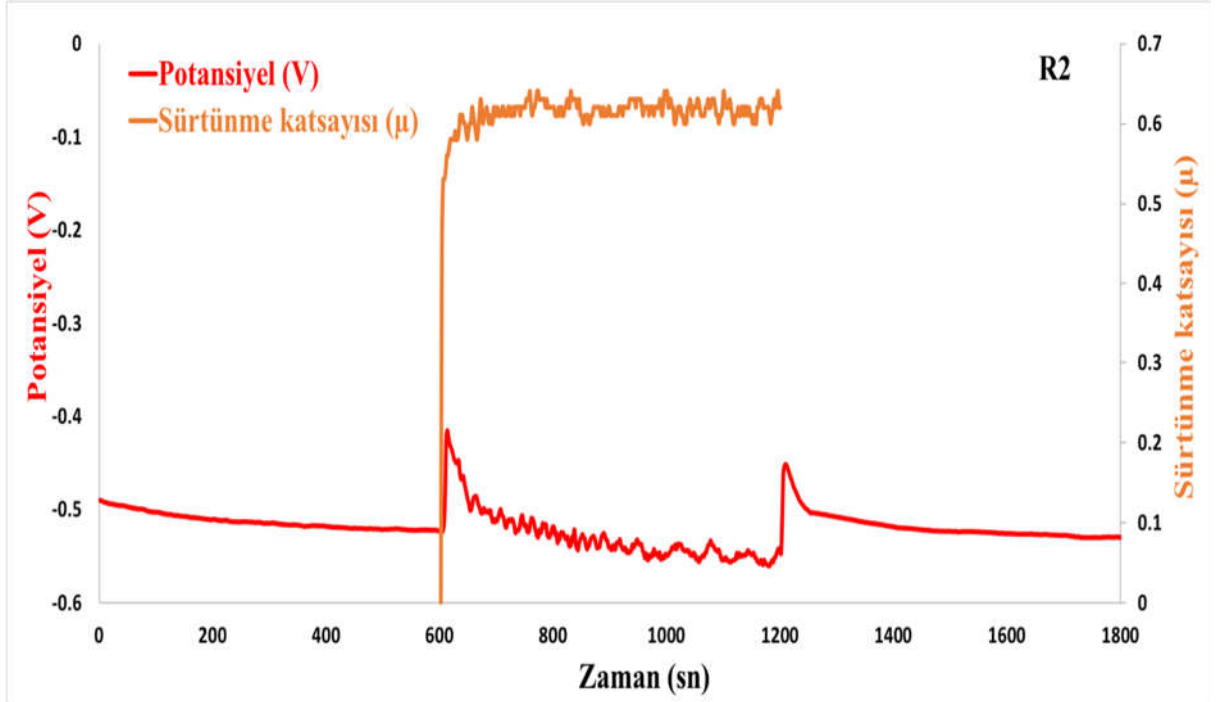
PVD yöntemi ile R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS_2-Ti nanokompozit kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri (sürtünmeden önce ve sürtünme sırasında) Tablo 32’de, OCP potansiyeli-zaman ve sürtünme katsayısı eğrileri Şekil 108 - 112’de ve yüzeylere ait SEM görüntüleri Şekil 113’te görülmektedir

Tablo 32. PVD ile AA2014 üzerine büyütülen MoS_2-Ti kaplamaların tribo-korozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri

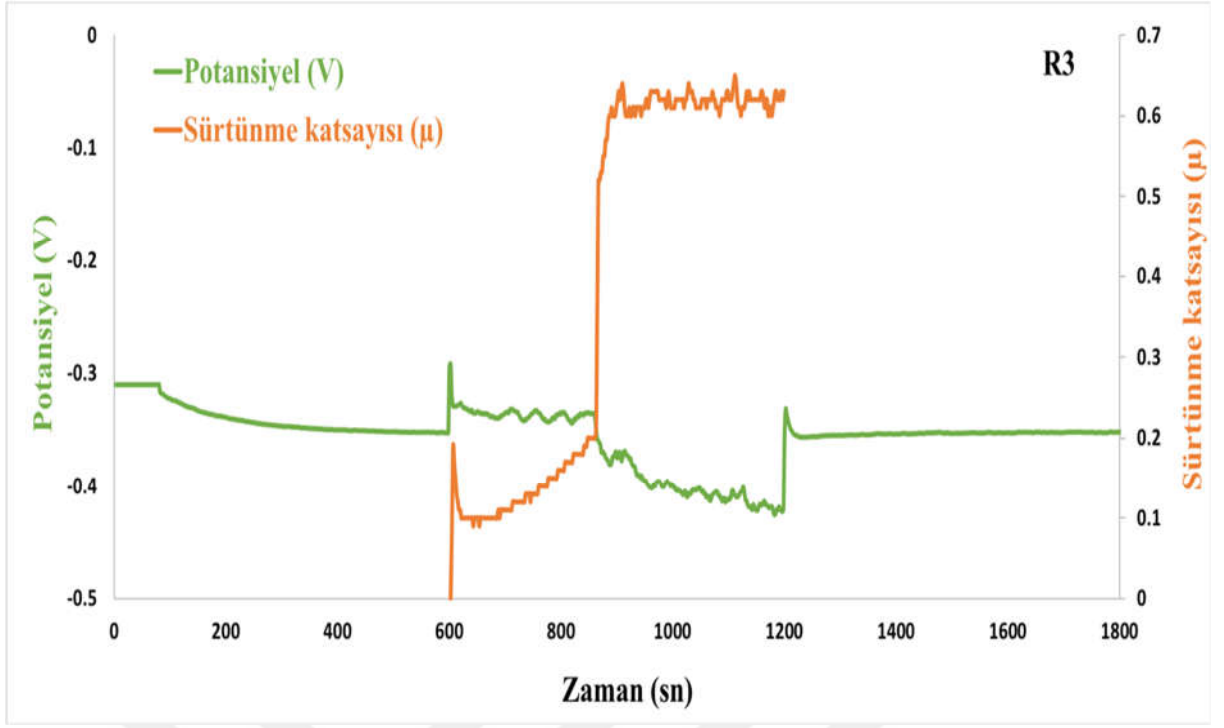
PVD	OCP’nin bitme potansiyeli (V)	Sürtünme Potansiyeli (V)
AA2014	-0,7	-0,9
R1	-0,53	-0,48
R2	-0,52	-0,54
R3	-0,35	-0,43
R4	-0,40	-0,70



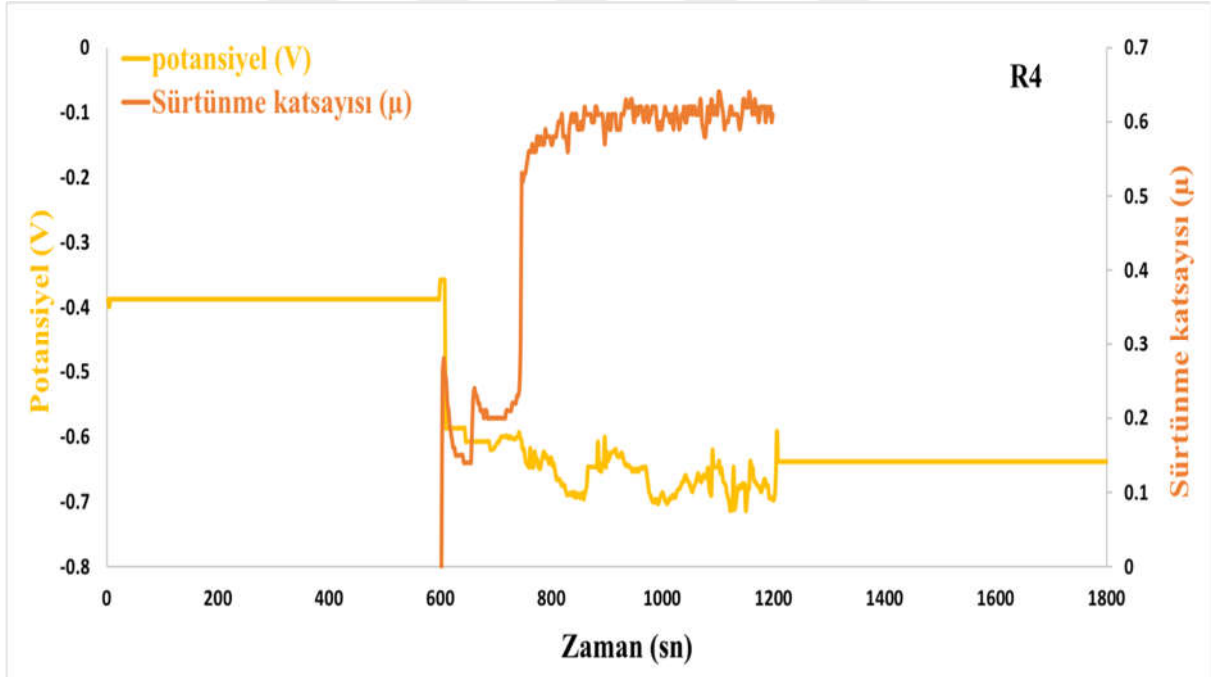
Şekil 108. R1 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.



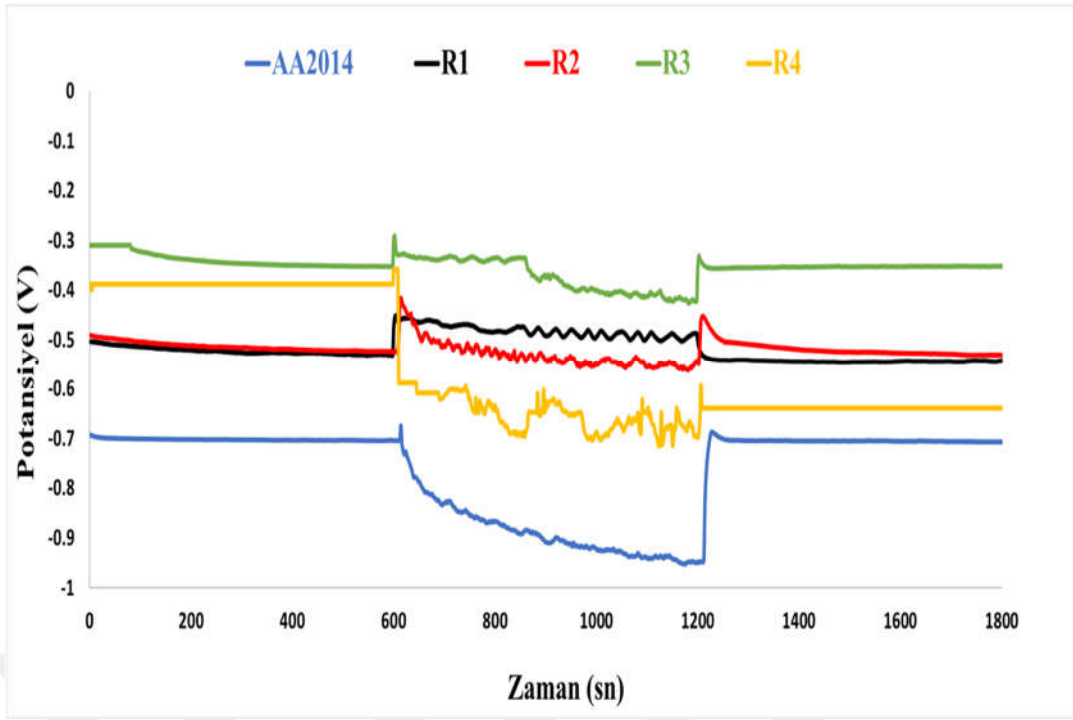
Şekil 109. R2 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.



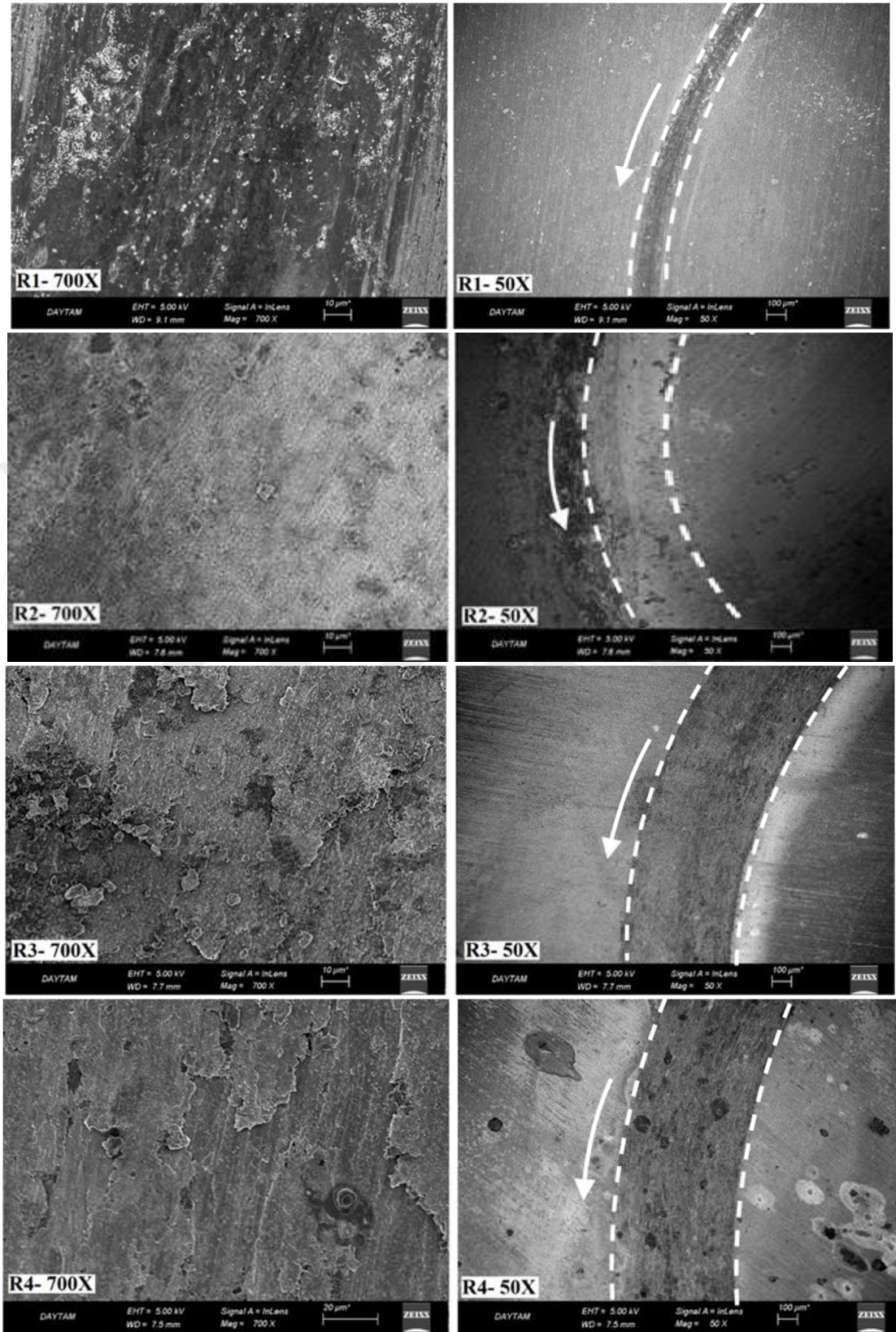
Şekil 110. R3 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri



Şekil 111. R4 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri



Şekil 112. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP -zaman eğrileri.



Şekil 113. PVD yöntemi ile R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ nanokompozit kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneyleri sonrası SEM görüntüleri.

PVD yöntemi ile farklı parametre ve seviyelerde büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların tribokorozyon davranışlarını (aşınma ve korozyonun sinerjik etkisi) belirlemek için tribokorozyon deneyleri %3.5 NaCl çözeltisi içerisinde, açık devre potansiyeli ile (OCP) gerçekleştirilmiştir. Pin-on disk cihazı yardımıyla tespit edilen bu açık devre potansiyelleri (OCP), aşınma izi içinde yer alan aşınmış ve aşınmamış yüzey arasındaki birleşme halini yansıtan karışık bir potansiyel değeri olarak karşımıza çıkmaktadır. Böylece aşınmış ve aşınmamış yüzey arasında bir galvanik çift olduğu rapor edilmiştir (Oltra1991; Garcia and Celis 2001; Benea et al. 2004). Aşınmış kısmın aşınmamış kısma oranı, aşınan ve aşınmayan kısımlardaki malzemelerin açık devre potansiyelleri ve aşınmış/aşınmamış kısımlardaki katodik ve anodik bölgelerde oluşan reaksiyonların mekanizması ve kinetiği gibi, OCP'yi etkileyen birçok kritik parametreler saptanmıştır (Benea et al. 2006).

Şekil 108–112’de gösterildiği gibi; OCP değerleri ilk olarak kararlı hale gelmesi için 600 saniye çözelti içerisinde bekletilmiştir. Aşınma yükü uygulandıktan sonra, sürtünme süresi arttıkça potansiyel değerleri yüzeyde oluşan oksit tabakalardan dolayı, Al₂O₃ pinin aşınma izi içinde hareketi sırasında OCP eğrilerinde bazı dağınık dalgalanmalara sebep olmuştur. Bu dağınık dalgalanmalar yüzeyde pasif oksit tabakasının devamlı kırılması ve tekrar meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Sürtünme katsayısındaki bu dağınık dalgalanmalar aşınma boyunca temas yüzeyleri arasında meydana gelen adezyon ile tanımlanmıştır. Uygulanan 2N yük kaldırıldıktan sonra tekrar 600 saniyelik süre içinde numuneler tekrar çözelti içerisinde bekletilmiştir ve bu sebeple numunelerin üzerindeki oksit tabakanın pasifleşmesi elde edilmiştir ve sonra numuneler kararlı hale gelmiştir (Azzi, et al. 2007; Barril, et al. 2002; Ebru Emine Sukuroglu et al., 2016; Manhabosco et al. 2009; Mindivan, 2020; Naghibi et al., 2014; Ponthiaux et al. 2004; Pougoum et al., 2019; Revathi et al., 2017; Ye et al., 2017).

R1, R2, R3 ve R4 numunelerinin tribokorozyon deneylerinin OCP değerleri (Tablo 32) ve potansiyeli-zaman eğrileri (Şekil 112) karşılaştırıldığında; açıkça görülmektedir ki AA2014 taban malzemenin OCP değerleri büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalara göre genel olarak daha düşük değerlere sahip olduğu gözlenmiştir. Bu düşük değerlerin sebebi; sürtünme şartları altında (600-1200 saniye aralığında) yüzeydeki bulunan pasif oksit tabakasının kolay kırılması ile birlikte korozyon çözeltisiyle ortaya çıkan bu durum taban malzemesine direk temas etmesinden dolayı düşük değerler oluşmaktadır (Azzi, et al. 2007; Barril, et al. 2002; Mindivan, 2020; Naghibi et al., 2014; Ponthiaux et al. 2004; Pougoum et al., 2019).

Ayrıca R3 şartlarında büyütülen kaplamaların yapılan tribokorozyon deneylerinin OCP değerleri diğer büyütülen kaplamalara ve AA2014 taban malzemesine göre daha iyi tribokorozyon davranış ve daha soy değer göstermiştir. R3 şartlarında büyütülen nanokompozit

kaplamaların potansiyel değerlerinin taban malzemesine göre daha soy değerler gösterilmesinin sebeplerinden biri yüzeyde büyütülen kaplama sayesinde katodik reaksiyonların hızının azalmasıdır. Buna ek olarak, aşınma sırasında sürtünme değerlerinde kaplamanın yüzey özelliğinden dolayı farklılık meydana getirdiği gözlenmiştir. Kaplama kalınlığı, homojen kaplamalar üzerinde biriken MoS₂ nanopartikül miktarı ve yüzey pürüzlülüğünün etkisi nedeniyle R3 numunesi en iyi sürtünme katsayısı belirlenmiştir. R3 şartlarında büyütülen kaplamaların sürtünme şartlarındaki OCP değeri yaklaşık olarak -0,35 V olarak tespit edilmiştir(Sundararajan and Krishna 2003; Xu *et al.* 2013). Elde edilen bu sonuçlar, kaplama parametre değerleri dikkate alınırken; R3 numunesi kaplama şartlarında en yüksek Ti ve MoS₂ hedeflere uygulanan akım(0.9A) ve en yüksek çalışma besinci (0.33Pa) değerlerde olduğu gözlenmiştir.

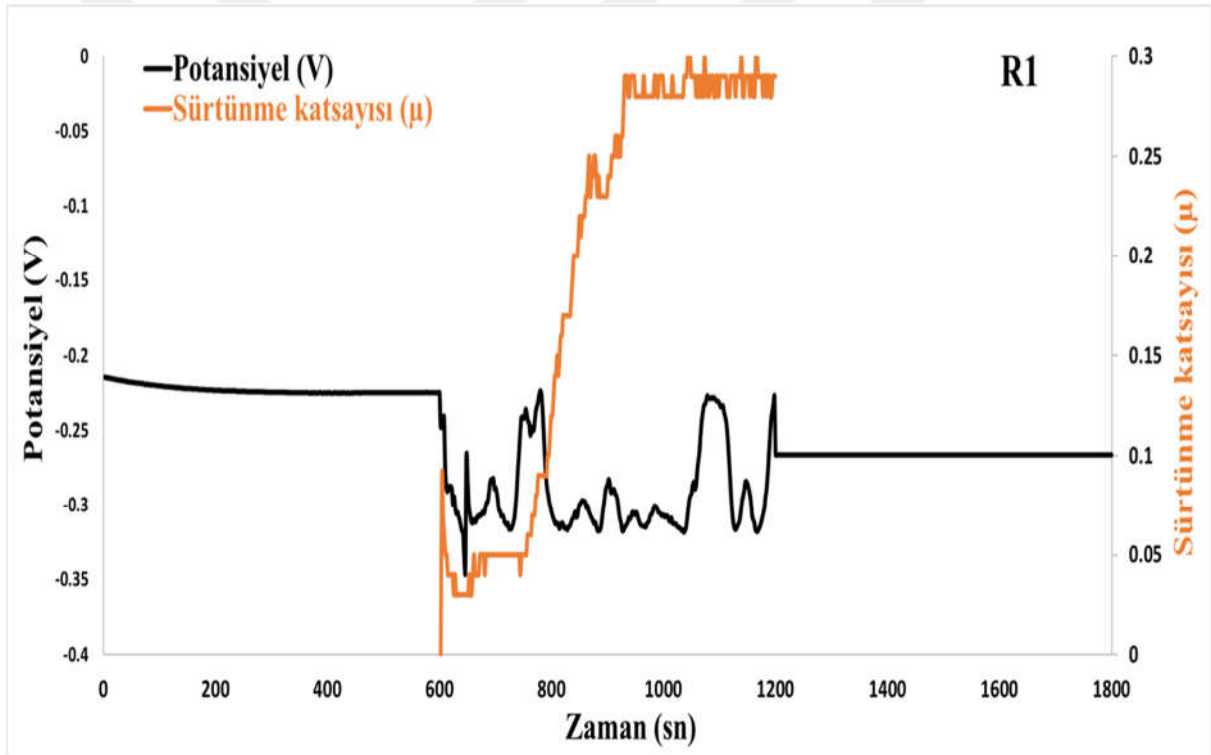
PVD yöntemi ile AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların OCP değerleri sürtünme başlamadan önce sabit olarak devam ettiği gözlenmiştir (R3 hariç). R3 numunesinde 600-850 saniye aralığında minimum bir artış gözlenmiş olup sonra azalmaktadır. Ayrıca OCP değerleri R1 ve R2 de çok yakın olmaları Şekil 106'da gösterilmiştir. Diğer taraftan sürtünme katsayısı, AA2014 üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamalarında ortalama $\mu=0,05$, $\mu=0,6$, $\mu=0,4$ ve $\mu=0,5$ olarak sırasıyla R1, R2, R3 ve R4 de tespit edilmiştir. Aşınma kaldırıldıktan sonra OCP değeri tekrar artmaktadır (R1 hariç) ve numuneler yüzeyinde yeni pasif tabakalar oluşmaya başlamıştır (Şekil112)(Alves *et al* 2013; Mindivan, 2020; Naghibi et al., 2014 ; Pougoum et al., 2019; Ye et al., 2017)

OCP potansiyeli-zaman eğrilerini incelendiğinde; farklı parametre ve seviyede AA2014 taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların, R1, R2, R3 ve R4 potansiyel değerleri aşınmasız durumda sırasıyla yaklaşık -0,53 V, -0,52 V, -0,35 V ve -0,40 V olarak, sürtünme başladıktan sonra bu değerler sırasıyla yaklaşık -0,48 V, -0,54 V, -0,43 V ve -0,70 V olarak elde edilmiştir. Uygulanan 2N yük kaldırıldıktan sonra, sırasıyla yaklaşık -0,53 V'dan -0,55 V'a, -0,44 V'dan -0,49 V'a, -0,34 V'dan -0,39 V'a ve -0,59 V'dan -0,64 V'a kadar pasif tabaka oluşmuştur ve sırasıyla yaklaşık -0,56 V, 0,52 V, 0,35 V ve -0,63 V'da potansiyel değerleri kararlı hale gelmiştir.

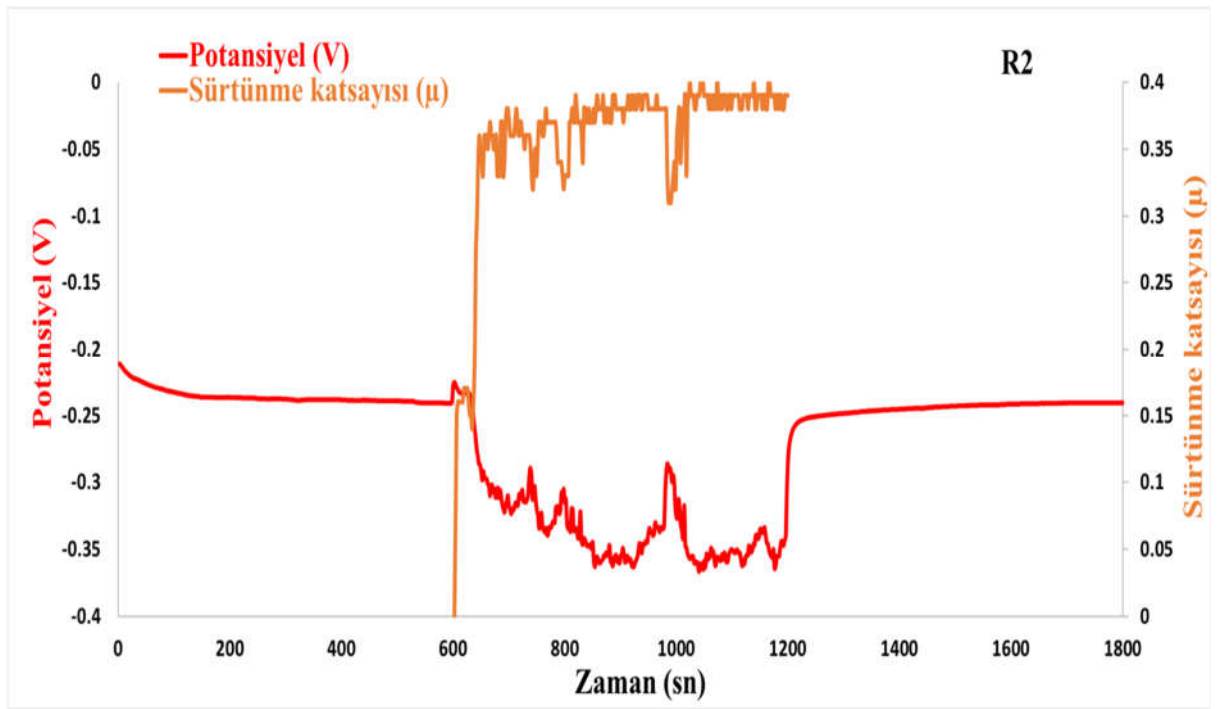
PVD yöntemi ile R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri (sürtünmeden önce ve sürtünme sırasında) Tablo 33'te, OCP potansiyeli-zaman ve sürtünme katsayısı eğrileri Şekil 114-118'de ve yüzeylere ait SEM görüntüleri Şekil 119'da görülmektedir.

Tablo 33. PVD ile Cp-Ti üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların tribo-korozyon deneyleri sonucunda elde edilen OCP değerleri

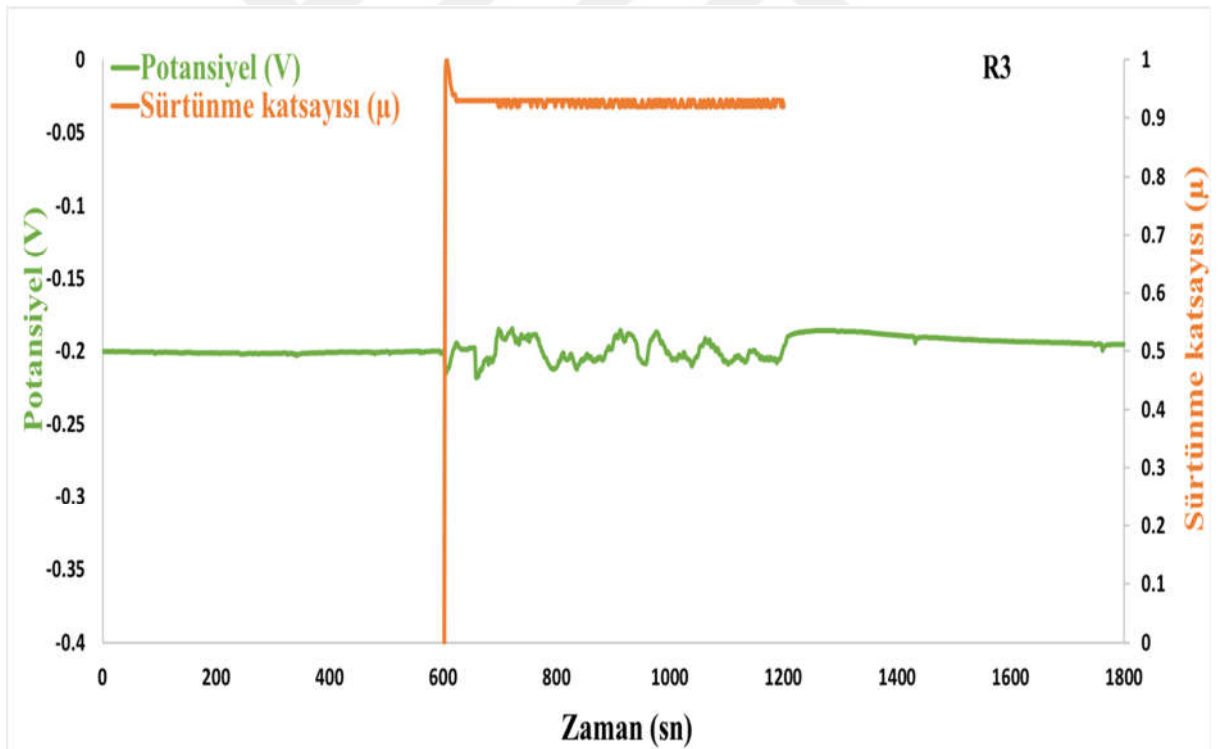
PVD	OCP'nin bitme potansiyeli (V)	Sürtünme Potansiyeli (V)
Cp-Ti	-0,27	-0,43
R1	-0,22	-0,32
R2	-0,24	-0,38
R3	-0,20	-0,22
R4	-0,19	-0,35



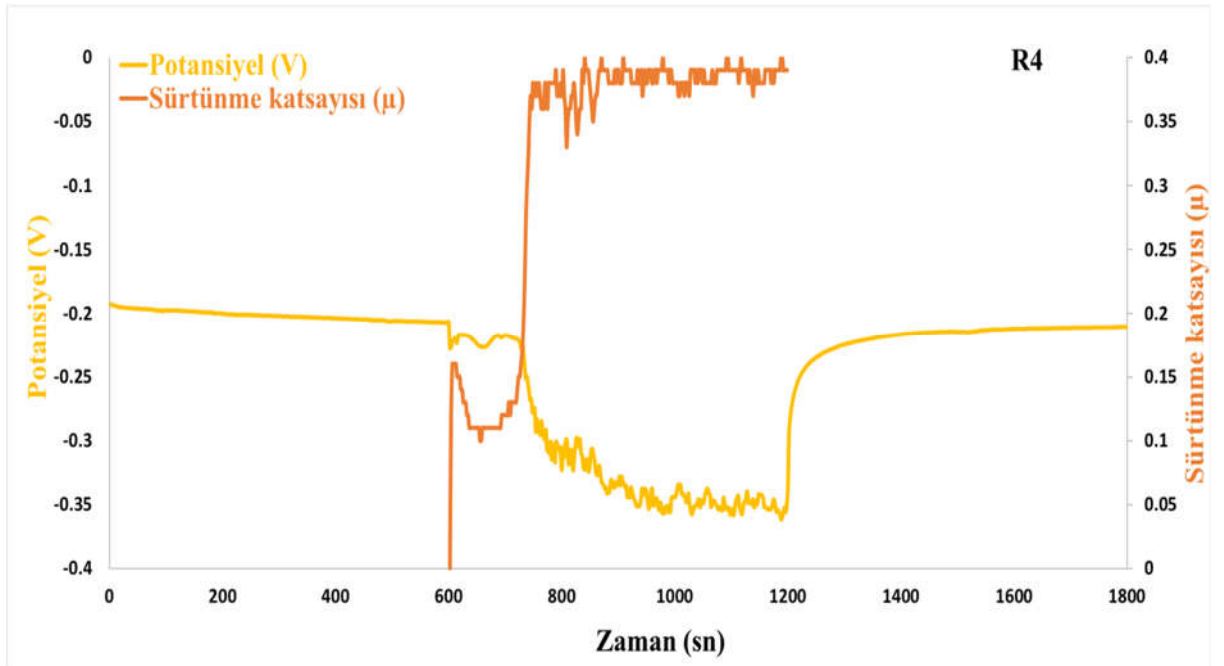
Şekil 114. R1 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.



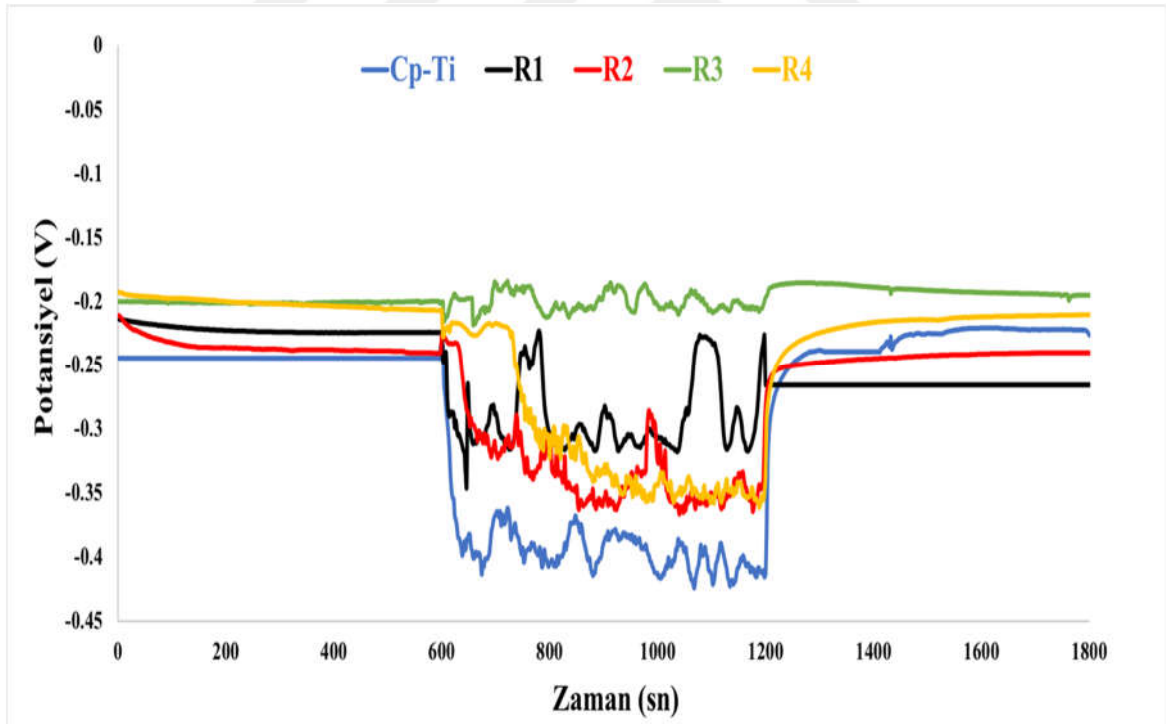
Şekil 115. R2 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.



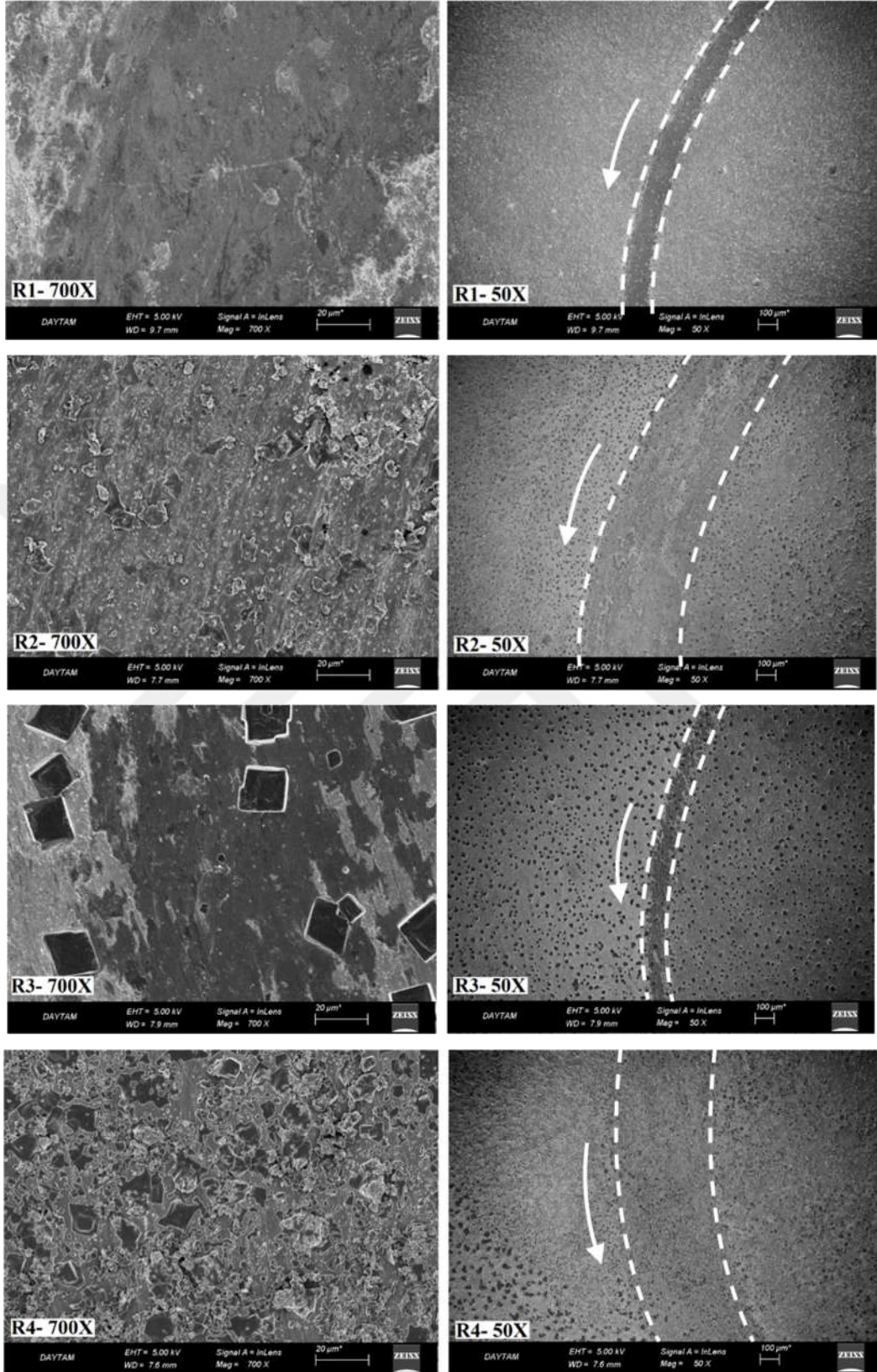
Şekil 116. R3 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.



Şekil 117. R4 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.



Şekil 118. R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine MoS_2 -Ti büyütülen kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinden elde edilen OCP ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman eğrileri.



Şekil 119. PVD yöntemi ile R1, R2, R3 ve R4 değerlerinde Cp-Ti üzerine büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların,%3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneyleri sonrası SEM görüntüleri.

R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD yöntemi ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinin OCP potansiyeli-zaman eğrileri (Şekil 114-118), Cp-Ti taban malzemeye göre daha iyi davranışlar göstermiştir. OCP potansiyeli-zaman eğrilerini incelendiğinde; farklı parametre ve seviyede Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların, R1, R2, R3 ve R4 potansiyel değerleri aşınmasız durumda sırasıyla yaklaşık -0,22 V, -0,24 V, -0,20 V ve -0,19 V olarak, sürtünme başladıktan sonra bu değerler sırasıyla yaklaşık -0,32 V, -0,38 V, -0,22 V ve -0,35 V olarak elde edilmiştir. Uygulanan 2N yük kaldırıldıktan sonra, sırasıyla yaklaşık -0,26 V'dan -0,24 V'a, -0,28 V'dan -0,26 V'a, -0,19 V'dan -0,17 V'a ve -0,29 V'dan -0,23 V'a kadar pasif tabaka oluşmuştur ve sırasıyla yaklaşık -0,27 V, -0,24 V, -0,19 V ve -0,21 V 'da potansiyel değerleri kararlı hale gelmiştir.

R1, R2, R3 ve R4 şartlarında PVD ile Cp-Ti taban malzemesi üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamaların, elde edilen OCP değerleri karşılaştırıldığında, açıkça görülmektedir ki; Cp-Ti taban malzemenin OCP değerleri büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalara göre düşük değerlere sahip olduğu gözlenmiştir. MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların OCP değerleri sürtünme başlamadan önce sabit olarak devam etmesi gözlenmiştir (R2 hariç). R4 numunesinde 600-750 saniye aralığında minimum bir düşüş gözlenip ve sonra aniden azalmaktadır.

Sürtünme süresi (600-1200 saniye aralığında uygulanan 2N aşınma yükü) artıkcça potansiyel değerleri yüzeydeki kaplamaların kalınlığından dolayı, çok etkilenmemiştir ve yüzeydeki oksit tabakalardan dolayı OCP eğrilerinde dağınık dalgalanmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durum Al₂O₃ pinin aşınma izi içinde hareketi sırasında potansiyel değerlerinde bazı dalgalanmalara neden olur. Bu dalgalanmalar yüzeyde pasif oksit tabakasının devamlı kırılması ve yeniden oluşmasından kaynaklanmaktadır.

PVD ile Cp-Ti üzerine büyütülen MoS₂-Ti kaplamalar sürtünme süresinde kohezif bir şekilde koparak pin ile numune arasında sürtünme yönünde uzamıştır. Aşınma kaldırıldıktan sonra OCP değeri tekrar artmaktadır (R1 hariç) ve numuneler yüzeyinde yeni pasif tabakalar oluşmaya başlamıştır (şekil 118)(Ghafariipoor et al., 2018; Ponthiaux et al. 2004;)

Cp-Ti taban malzemesi üzerine R3 şartlarında PVD yöntemi ile büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların, %3.5 NaCl çözeltisi içinde yapılan tribokorozyon deneylerinin OCP değerinin diğer büyütülen kaplamalara göre daha iyi tribokorozyon davranış göstermiştir. R3 şartlarında büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların sürtünme şartlarındaki OCP değeri yaklaşık olarak -0,22 V olarak tespit edilmiştir.

Şekil 119'da verilen aşınma izlerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde; R3-MoS₂-Ti

numunesi diğer numunelere göre dar aşınma izine sahip olduğu ve daha iyi tribokorozyon davranış sergilediği gözlenmiştir. Bu durum MoS₂ nanopartiküllerin katı yağlayıcı özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yani kaplama süresinde numuneler üzerinde biriken MoS₂ nanopartikül miktarının diğer kaplamalara göre daha çok miktarlarda bulunması, kaplama kalınlığının büyük olması, homojen ve yoğun yapıya sahip olmasıdır. Ayrıca elde edilen sonuçlar, kaplama parametre değerleri dikkate alınırken; R3 numunesi kaplama şartlarında en yüksek Ti ve MoS₂ hedeflere uygulanan akım(0.9A) ve en yüksek çalışma besinci (0.33Pa) değerlerde olduğu gözlenmiştir.

Verilen bütün Şekillerde OCP değerleri ile sürtünme katsayısının karşılaştırmalı olarak değişimleri tespit edildiği gibi; kaplama yapılmayan taban malzemeler (Şekil 94) üzerinde yapılan tribokorozyon deneylerinde, sürtünmenin ilk başlangıçlarında OCP değerlerinin azalmış, sürtünme katsayısı değerlerinin ise minimum miktarda da olsa arttığı tespit edilmiştir. Bu durum deney sonuna kadar oldukça kararlı bir şekilde ilerlemiştir. Deneylerin ilk başlangıçlarında numunelere üzerine sürtünme katsayısı değerleri hemen yükselmiş olup daha sonra genel olarak azalmaya başlamıştır. Ardından sürtünme katsayısı değerleri nispeten kararlı olarak devam etmiştir. Bunlara ek olarak yapılan tribokorozyon deneylerinin sonuçları dikkate alınırken OCP eğrileri ve sürtünme katsayısı arasındaki değişimlerin eş zamanlı gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca sürtünme katsayısının kararlı olduğu kısımlarda OCP grafikleri de oldukça kararlı davranış göstermiştir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Sonuç

Bu tez çalışmasında; Cp-Ti ve AA2014 alaşımları üzerine PEO ve PVD yöntemleri kullanılarak parametrelerin farklı seviyelerinde büyütülen Al_2O_3/MoS_2 , TiO_2/MoS_2 ve MoS_2 -Ti nanokompozit kaplamaların yapısal, mekanik, aşınma, korozyon ve tribokorozyon davranışları incelenmiş olup, elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- PEO ile büyütülen Al_2O_3/MoS_2 nanokompozit kaplamaların en yüksek kaplama kalınlık değeri $P3=5,114\mu m$ (15dk, 500V, 250Hz), en düşük kalınlık değeri $P1=2,099\mu m$ (5dk, 500V, 50Hz) ve TiO_2/MoS_2 nanokompozit kaplamaların en yüksek kaplama kalınlık değeri $P4=9,546\mu m$ (15dk, 550V, 50Hz), en düşük kalınlık değeri $P1=3,238\mu m$ (5dk, 500V, 50Hz) şartlarında büyütülen nanokompozit kaplamalarda elde edilmiştir.
- PVD ile büyütülen MoS_2 -Ti nanokompozit kaplamaların, en yüksek kaplama kalınlık değeri $R3=491,3nm$ (0,9A, -50V, 0,33Pa) ve en düşük kaplama kalınlık değeri $R1=299,2nm$ (0,6A, -50V, 0,26Pa) şartlarında büyütülen nanokompozit kaplamalarda elde edilmiştir.
- Al_2O_3/MoS_2 ve TiO_2/MoS_2 nanokompozit kaplamaların XRD analizleri sonucunda PEO yöntemiyle farklı seviyelerde büyütülen kaplamalara ait $P4-Al_2O_3/MoS_2$ ve $P3-TiO_2/MoS_2$ $2\theta=14^\circ$ 'de ve PVD ile büyütülen MoS_2 -Ti kaplamalara ait AA2014 üzerine büyütülen R4 ve Cp-Ti üzerine büyütülen R3 $2\theta=37^\circ$ 'de fazları tespit edilmiştir.
- PEO ile büyütülen Al_2O_3/MoS_2 nanokompozit kaplamaların, en yüksek kritik yük (L_c) değeri $P4=14N$, en düşük kritik yük değeri ise $P1=5N$ ve TiO_2/MoS_2 nanokompozit kaplamaların, en yüksek kritik yük (L_c) değeri $P4=32N$, en düşük kritik yük değeri ise $P1=6N$ olarak elde edilmiştir.
- PVD ile AA2014 üzerine büyütülen MoS_2 -Ti nanokompozit kaplamaların, en yüksek kritik yük (L_c) değeri $R1=9N$, en düşük kritik yük değeri ise $R4=5N$ ve Cp-Ti üzerine büyütülen MoS_2 -Ti nanokompozit kaplamaların, en yüksek kritik yük (L_c) değeri $R1=27$, en düşük kritik yük değeri ise $R2=15N$ olarak elde edilmiştir.
- PEO ile büyütülen Al_2O_3/MoS_2 nanokompozit kaplamaların sürtünme katsayıları incelendiğinde; en düşük sürtünme katsayısı en yüksek kaplama kalınlıklarına sahip $P3-Al_2O_3/MoS_2$ ($\mu=0,117$) ve en yüksek sürtünme katsayısı $P2-Al_2O_3/MoS_2$ ($\mu=0,144$) ve TiO_2/MoS_2 nanokompozit kaplamaların, en düşük sürtünme katsayısı $P4-TiO_2/MoS_2$ ($\mu=0,312$) ve en yüksek sürtünme katsayısı $P2-TiO_2/MoS_2$ ($\mu=0,453$) olarak elde edilmiştir.

- PVD ile AA2014 üzerine büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların, sürtünme katsayıları incelendiğinde; en düşük sürtünme katsayısı R3 ($\mu=0,086$) ve en yüksek sürtünme katsayısı R2 ($\mu=0,147$) ve Cp-Ti üzerine büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamaların, en düşük sürtünme katsayısı R1 ($\mu=0,075$) ve en yüksek sürtünme katsayısı R4 ($\mu=0,091$) olarak belirlenmiştir.
- PEO ile büyütülen Al₂O₃/MoS₂ ve TiO₂/MoS₂ nanokompozit kaplamalar için en düşük aşınma oranı sırasıyla P3-Al₂O₃/MoS₂(21,40 E-3 mm³/Nm) ve P4-TiO₂/MoS₂(2,49 E-3 mm³/Nm) olarak elde edilmiştir.
- PVD ile AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeler üzerine büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalar için en düşük aşınma oranı R3 şartlarında sırasıyla 7,92 E-2 mm³/Nm ve 1,85 E-2 mm³/Nm olarak tespit edilmiştir.
- PEO ve PVD yöntemleriyle AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeleri üzerine büyütülen kaplamalardan elde edilen polarizasyon tafel eğrileri sonuçlarına dayanarak, tüm yapılan nanokompozit kaplamaların, taban malzemelere göre korozyon davranışları önemli ölçüde iyileştiği görülmüştür.
- AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeleri için elde edilen korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}) sırasıyla 78.10⁻⁴ A/cm² ve 20.10⁻⁶ A/cm² iken en düşük pasifleşme eğilimi -0,737 V ve -0,476 V olarak tespit edilmiştir. PEO ile büyütülen Al₂O₃/MoS₂ ve TiO₂/MoS₂ nanokompozit kaplamalar için en düşük korozyon akım yoğunluğu sırasıyla P3-Al₂O₃/MoS₂ 25.10⁻⁹ A/cm²), P4-TiO₂/MoS₂ (55.10⁻⁹ A/cm²) ve en yüksek akım yoğunluğu ise P1-Al₂O₃/MoS₂ 67.10⁻⁷ A/cm²), P3-TiO₂/MoS₂ (89.10⁻⁸ A/cm²) olarak elde edilmiştir.
- PVD ile büyütülen MoS₂-Ti nanokompozit kaplamalar için en düşük korozyon akım yoğunluğu sırasıyla AA2014/R3 (119.10⁻⁵ A/cm²), Cp-Ti/R3 (102.10⁻⁸ A/cm²) ve en yüksek akım yoğunluğu ise AA2014/R1 (185.10⁻⁵ A/cm²), Cp-Ti/R2 (164.10⁻⁸ A/cm²) olarak belirlenmiştir.
- PEO ve PVD yöntemleri ile büyütülen nanokompozit kaplamaların, AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerin potansiyel değerleri ve OCP potansiyeli-zaman eğrilerine göre daha iyi davranışlar sergilediği gözlenmiştir.
- AA2014 ve Cp-Ti taban malzemelerin OCP potansiyel değerleri, sürtünme başladıktan sonra sırasıyla yaklaşık -0,9 V ve -0,43 V olarak elde edilmiştir. AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeleri üzerine P4 şartlarında PEO yöntemi ile büyütülen Al₂O₃/MoS₂ ve TiO₂/MoS₂ nanokompozit kaplamaların, sürtünme başladıktan sonra OCP değerleri yaklaşık olarak -0,29 V ve -0,34 V olarak tespit edilmiştir. AA2014 ve Cp-Ti taban malzemeleri üzerine P4 şartlarında PVD yöntemi ile büyütülen Al₂O₃/MoS₂ ve

TiO₂/MoS₂ nanokompozit kaplamaların, sürtünme başladıktan sonra OCP değerleri yaklaşık olarak -0,43 V ve -0,22 V olarak saptanmıştır.

- PEO ile büyütülen kaplamaların verilen SEM görüntüleri ve OCP eğrileri incelendiğinde; P4-Al₂O₃/MoS₂ ve P4-TiO₂/MoS₂ numuneleri diğer kaplamalara göre daha iyi tribokorozyon davranış gösterdiği belirlenmiştir.
- R3 şartlarında PVD ile büyütülen nanokompozit kaplamaların, OCP değerinin diğer büyütülen kaplamalara göre daha iyi tribokorozyon davranış gösterdiği görülmüştür.
- Sonuç olarak; uygulanan kaplama işlemlerinin Cp-Ti ve AA2014 alaşımlarının yüzey özelliklerini önemli derecede iyileştirdiği, mekanik, korozyon, tribolojik ve tribokorozyon davranışlarını geliştirerek kullanım ömürlerine önemli katkı sağladıkları tespit edilmiştir.

Öneriler

PEO ve PVD yöntemleri kullanılarak parametrelerin farklı seviyelerinde büyütülen Al₂O₃/MoS₂ ve TiO₂/MoS₂ nanokompozit kaplamaların kalınlıkları, yapısal özellikleri, kristal yapıları, adezyonu, yüzey topografisi, aşınma, tribolojik özellikleri, korozyon ve tribokorozyon davranışları, çeşitli yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Literatür incelemesi sonucu başka hafif metal ve alaşımları (Mg, Li, v.b) taban malzeme olarak veya farklı katı yağlayıcı özelliğe sahip (Grafit, h-BN v.b) nanopartiküller içeren standart elektrolitler kullanılarak ileride bununla ilgili çalışmalar yürütülebilir. Ayrıca PVD yönteminde sert yağlayıcı kaplama özelliğine sahip Ti-MoS₂ filmleri oluşturabilmek için Ti ve MoS₂ hedefleri kullanılmıştır. PVD yönteminde sert katı yağlayıcılar oluşturabilmek için MoS₂ hedefi ile birlikte alternatif geçiş metalleri (V, Cr, Nb, v.b) hedef olarak kullanılabilir. CFUBMS tekniğinde, Cr ara tabaka kaplanan filmlerin Ti ara tabaka kaplanan filmlere göre daha iyi adezyon özelliğine sahip olduğu vurgulanmaktadır. Bu yüzden Cr ara tabakası Ti ara tabakasına göre taban malzeme ile yapısal olarak daha iyi uyum sağlamaktadır. Bu sebeple, gelecekteki çalışmalarda Ti ara tabaka yerine Cr ara tabaka kullanılabilir. Büyütülen Al₂O₃/MoS₂ ve TiO₂/MoS₂ kaplamaların farklı ortamlardaki korozyon ve tribokorozyon testleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abbasi, S., Golestani-Fard, F., Rezaie, H. R., Mirhosseini, S. M. M., & Ziaee, A., 2012. MAO-derived hydroxyapatite-TiO₂ nanostructured bio-ceramic films on titanium. *Materials Research Bulletin*, 47(11), 3407–3412.
- Akbari, E., Di Franco, F., Ceraolo, P., Raeissi, K., Santamaria, M., & Hakimzad, A., 2018. Electrochemically-induced TiO₂ incorporation for enhancing korosion and tribokorosion resistance of PEO coating on 7075 Al alloy. *Korosion Science*, 143, 314–328.
- Almaguer-Flores, A., Olivares-Navarrete, R., Lechuga-Bernal, A., Ximénez-Fyvie, L.A., Rodil, S.E., 2009. Oral bacterial adhesion on amorphous carbon films. *Diamond and Related Materials*, 18, (9), 1179-1185.
- Almond, E.A., 1984. Aspects of various processes for coating and surface hardening. *Vacuum*, 34, (10-1), 835-842.
- An, S., In, J., Chang, H., 2009. Characteristics of the Deposition Rate per Unit Power on Pulsed-DC Magnetron Sputtering Source. *Plasma Processes and Polymers*, 6, (12), 855-859.
- Anders, A., 2017. Tutorial: Reactive high power impulse magnetron sputtering (R-HiPIMS). *Journal of Applied Physics*, 121, (17), 34.
- Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview., 2001. Understanding the Basics J.R. Davis, p351-416
- Amanov, A., 2021. Effect of post-additive manufacturing surface modification temperature on the tribological and tribokorosion properties of Co-Cr-Mo alloy for biomedical applications. *Surface and Coatings Technology*, 421, 127378.
- Archard, J.F., 1980. *Wear Theory and Mechanisms*. New York, NY, ASME. New York, NY.
- Arnell, R.D., Efeoglu, I., 1993. The effect of the condition of the scratch diamond on measured critical loads. *Vacuum*, 44, 805-807.
- Arnell, R.D., Kelly, P.J., 1999. Recent advances in magnetron sputtering. *Surface & Coatings Technology*, 112, (1-3), 170-176.
- Arslan, E., Totik, Y., Demirci, E., & Alsaran, A., 2010. Influence of surface roughness on korosion and tribological behavior of CP-Ti after thermal oxidation treatment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(3), 428–433.
- Arslan, Ersin, Baran, Ö., Efeoglu, I., & Totik, Y., 2008. Evaluation of adhesion and fatigue of MoS₂-Nb solid-lubricant films deposited by pulsed-dc magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 202(11), 2344–2348.
- Arslan, Ersin, Totik, Y., Demirci, E. E., & Efeoglu, I., 2013a. Wear and adhesion resistance of duplex coatings deposited on Ti6Al4V alloy using MAO and CFUBMS. *Surface and Coatings Technology*, 214, 1–7.
- Arslan, Ersin, Totik, Y., Demirci, E. E., & Efeoglu, I., 2013b. Wear and adhesion resistance of duplex coatings deposited on Ti6Al4V alloy using MAO and CFUBMS. *Surface and Coatings Technology*, 214, 1–7.
- Audronis, M., Valiulis, A.V., Silickas, P., 2004. Recent Developments in the Deposition of c-BN Coatings. *ISSN 1392–1320 Materials Science (Medžiagotyra)*, 10, (2), 152-156.
- Bao, Y., Wang, W., Cui, W., & Qin, G., 2021. Korosion resistance and antibacterial activity of Ti-N-O coatings deposited on dental titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 419(March), 127296.

- Baradaran, S., Basirun, W. J., Zalnezhad, E., Hamdi, M., Sarhan, A. A. D., & Alias, Y., 2013. Fabrication and deformation behaviour of multilayer Al₂O₃/Ti/TiO₂ nanotube arrays. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 20, 272–282.
- Baran, Ö., Sukuroglu, E. E., Efeoglu, İ., & Totik, Y., 2016. The investigation of adhesion and fatigue properties of TiN/TaN multilayer coatings The investigation of adhesion and fatigue properties of TiN/ TaN multilayer coatings. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(20), 2188–2200.
- Baran, Özlem, Bidev, F., Çiçek, H., Kara, L., Efeoglu, I., & Küçükömeroğlu, T., 2014. Investigation of the friction and wear properties of Ti/TiB₂/MoS₂ graded-composite coatings deposited by CFUBMS under air and vacuum conditions. *Surface and Coatings Technology*, 260, 310–315.
- Baran, O., Efeoglu, I., Hardell, J., Prakash, B., 2015. Adhesion and tribological properties of TiTaBN coatings with a graded interlayer deposited by pulsed DC biased and continuous dc biased magnetron sputtering. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29, (18), 2006-2019.
- Baran, Ö., Keleş, A., Çiçek, H., Totik, Y., Efeoglu, İ., 2017. The mechanical and tribological properties of Ti [Nb, V] N films on the Al-2024 alloy. *Surface & Coatings Technology*, 332, 312-318.
- Barnett, R. S., 1970. Review of recent U.S.A. publications on lubricating grease. 16, 1–2, pp. 87–142.
- Becerikli, M., Kopp, A., Kröger, N., Bodrova, M., Wallner, C., Wagner, J. M., Dadras, M., Jettkant, B., Pöhl, F., Lehnhardt, M., Jung, O., & Behr, B., 2021. A novel titanium implant surface modification by plasma electrolytic oxidation (PEO) preventing tendon adhesion. *Materials Science and Engineering: C*, 123, 112030.
- Bidev, F., Baran, Ö., Arslan, E., Totik, Y., & Efeoglu, I., 2013. Adhesion and fatigue properties of Ti/TiB₂/MoS₂ graded-composite coatings deposited by closed-field unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 215, 266–271.
- Cicek, H., Akar, O. C., & Efeoglu, I., 2021. Tribological Properties of TiNi/MoS₂ Functional Coatings. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2021 30:5, 30(5), 3632–3641.
- Cicek, H., Baran, O., Keles, A., Totik, Y., & Efeoglu, I., 2017. A comparative study of fatigue properties of TiVN and TiNbN thin films deposited on different substrates. *Surface and Coatings Technology*, 332, 296–303.
- Cicek, H., Efeoglu, I., Totik, Y., Ezirmik, K. V., & Arslan, E., 2015. A low temperature in-situ crystalline TiNi shape memory thin film deposited by magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 284, 90–93.
- Cicek, H., Keles, A., Totik, Y., & Efeoglu, I., 2018. Adhesion and multipass scratch characterization of Ti:Ta-DLC composite coatings. *Diamond and Related Materials*, 83, 80–86.
- Composites, E. N. O., 2020. Effect of MoS₂ Concentration on Microstructure and Tribological Behavior of 2 . *Experimental Details*. 23(5), 1–9.
- Cui, W., Cheng, J., & Liu, Z., 2019. Bio-tribokorrosion behavior of a nanocrystalline TiZrN coating on biomedical titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 369, 79–86.
- CUI, W. fang, NIU, F. juan, TAN, Y. ling, & QIN, G. wu., 2019. Microstructure and tribokorrosion performance of nanocrystalline TiN graded coating on biomedical titanium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(5), 1026–1035.

- Curry, J. F., Argibay, N., Babuska, T., Nation, B., Martini, A., Strandwitz, N. C., Dugger, M. T., & Krick, B. A., 2016. Highly Oriented MoS₂ Coatings: Tribology and Environmental Stability. *Tribology Letters*, 64(1).
- D'Avico, L., Beltrami, R., Lecis, N., & Trasatti, S. P., 2019. Korosion behavior and surface properties of PVD coatings for mold technology applications. *Coatings*, 9(1), 1–12.
- De Araujo, P., Steyer, P., Millet, J. P., Damond, E., Stauder, B., & Jacquot, P., 2003. PVD aluminium alloy coatings: Environmentally friendly alternative to protect steel parts against korosion. *Surface Engineering*, 19(4), 304–309.
- Dehnavi, V., Binns, W. J., Noël, J. J., Shoesmith, D. W., & Luan, B. L., 2018. Growth behaviour of low-energy plasma electrolytic oxidation coatings on a magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 6(3), 229–237.
- Dejun, K., Hao, L., & Jinchun, W., 2015. Effects of micro arc oxidation on fatigue limits and fracture morphologies of 7475 high strength aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 650, 393–398.
- Demirci, E. E., Arslan, E., Ezirmik, K. V., Baran, Ö., Totik, Y., & Efeoglu, I., 2013. Investigation of wear, korosion and tribokorosion properties of AZ91 Mg alloy coated by micro arc oxidation process in the different electrolyte solutions. *Thin Solid Films*, 528, 116–122.
- Dhatarwal, P., & Sengwa, R. J., 2021. Investigation on the optical properties of (PVP/PVA)/Al₂O₃ nanocomposite films for green disposable optoelectronics. *Physica B: Condensed Matter*, 613, 412989.
- do Amaral, G. M., da Costa Tonon, I., Peña Román, R. J., de Oliveira Plath, H., Taniguchi, T. M., de Lima, L. H., Zagonel, L. F., Landers, R., & de Siervo, A., 2021. Epitaxial growth, electronic hybridization and stability under oxidation of monolayer MoS₂ on Ag(1 1 1). *Applied Surface Science*, 538, 148138.
- Dobrzański, L. A., Lukaszewicz, K., Mikula, J., & Pakula, D., 2006. Structure and korosion resistance of gradient and multilayer coatings. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18(1–2), 75–78.
- Dong, H., 2010. *Surface engineering of light alloys : aluminium, magnesium and titanium alloys*. CRC Press.
- Dzhurinskiy, D. V., Dautov, S. S., Shornikov, P. G., & Akhatov, I. S., 2021. Surface modification of aluminum 6061-O Alloy by plasma electrolytic oxidation to improve korosion resistance properties. *Coatings*, 11(1), 1–13.
- Efeoglu, İ., Keleş, A., Totik, Y., Cicek, H., & Süküroğlu, E. E., 2018. Tribological Behaviour of Ti-Ta-DLC Films under Different Tribo-Test Conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 295(1).
- Efeoglu, İ., Totik, Y., Keleş, A., Gülten, G., Ersoy, K., & Durkaya, G., 2019. The adhesion and tribological properties of c-BN films deposited by high power impulse magnetron sputtering. *Ceramics International*, 45(3), 3000–3006.
- Erdemir, A., 1995. Lubrication from mixture of boric acid with oils and greases: Google Patents.
- Farnoush, H., Muhaffel, F., & Cimenoglu, H., 2015. Fabrication and characterization of nano-HA-45S5 bioglass composite coatings on calcium-phosphate containing micro-arc oxidized CP-Ti substrates. *Applied Surface Science*, 324, 765–774.
- Fattah-alhosseini, A., Chaharmahali, R., & Babaei, K., 2020. Effect of particles addition to solution of plasma electrolytic oxidation (PEO) on the properties of PEO coatings formed on magnesium and its alloys: A review. In *Journal of Magnesium and Alloys* (Vol. 8, Issue 3, pp. 799–818). National Engg. Reaserch Center for Magnesium Alloys.

- Ghafariipoor, M., Raeissi, K., Santamaria, M., & Hakimizad, A., 2018. The korosion and tribokorosion resistance of PEO composite coatings containing α -Al₂O₃ particles on 7075 Al alloy. *Surface and Coatings Technology*, 349, 470–479.
- Ghorbanian, B., Tajally, M., Mousavi Khoie, S. M., & Tavakoli, H., 2020. Formation mechanism of Al₂O₃/MoS₂ nanocomposite coating by plasma electrolytic oxidation (PEO). *Plasma Science and Technology*, 22(6).
- Han, C., Li, G., Ma, G., Shi, J., Liu, Y., Li, Z., & Wang, H., 2021. Preparation and tribological properties of Mo/MoS₂-Pb-PbS composite films. *Surface and Coatings Technology*, 405, 126625.
- Hanjun, H., Zhen, C., Xingguang, L., Xingguo, F., Yugang, Z., Kaifeng, Z., & Hui, Z., 2018. Effects of substrate roughness on the vacuum tribological properties of duplex PEO/bonded-MoS₂ coatings on Ti6Al4V. *Surface and Coatings Technology*, 349, 593–601.
- Hoseini, A., Yarmand, B., & Kolahi, A., 2021. Inhibitory effects of hematite nanoparticles on korosion protection function of TiO₂ coating prepared by plasma electrolytic oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 409, 126938.
- Huang, J., Zhu, J., Fan, X., Xiong, D., & Li, J., 2018a. Preparation of MoS₂-Ti(C, N)-TiO₂ coating by cathodic plasma electrolytic deposition and its tribological properties. *Surface and Coatings Technology*, 347(April), 76–83.
- Huang, J., Zhu, J., Fan, X., Xiong, D., & Li, J., 2018b. Preparation of MoS₂-Ti(C, N)-TiO₂ coating by cathodic plasma electrolytic deposition and its tribological properties. *Surface and Coatings Technology*, 347, 76–83.
- Hudec, T., Roch, T., Gregor, M., Orovčík, Ľ., Mikula, M., & Polcar, T., 2021. Tribological behaviour of Mo-S-N solid lubricant coatings in vacuum, nitrogen gas and elevated temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 405, 126722.
- İmece, Y., Erdem, O., & Tuç, B., 2018. Investigation of tribological properties of MoS₂ and graphite coatings under different environmental conditions. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(3), 995–1012.
- Irfan Ul Haq, M., Raina, A., Vohra, K., Kumar, R., & Anand, A., 2018. An Assessment of Tribological Characteristics of Different Materials under Sea Water Environment. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3602–3609.
- Jiang, B. L., & Wang, Y. M., 2010. Plasma electrolytic oxidation treatment of aluminium and titanium alloys. In *Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys* (pp. 110–154). Elsevier Inc.
- Karabudak, F., Ye, R., Emine, E., Zamanlou, H., Dikba, N., Bayındır, F., & Totik, sar., 2017. An Investigation of Korosion Resistance and Antibacterial Sensitivity Properties of Nano-Ag-Doped TiO₂ Coating and TiO₂ Coating Grown on NiTi Alloy with the Micro-Arc Oxidation Process. *Arab J Sci Eng*, 42, 2329–2339.
- Kimura, Y., Wakabayashi, T., Okada, K., Wada, T., & Nishikawa, H., 1999. Boron nitride as a lubricant additive. *Wear*, 232(2), 199–206.
- Kouicem, M. M., Tomasella, E., Bousquet, A., Batisse, N., Monier, G., Robert-Goumet, C., & Dubost, L., 2021. An investigation of adhesion mechanisms between plasma-treated PMMA support and aluminum thin films deposited by PVD. *Applied Surface Science*, 564, 150322.
- Krug, P., Kennedy, M., & Foss, J., 2006. New aluminum alloys for cylinder liner applications. *SAE Technical Papers*.

- Kucukosman, R., Sukuroglu, E. E., Totik, Y., & Sukuroglu, S., 2021. Effects of graphene oxide addition on wear behaviour of composite coatings fabricated by plasma electrolytic oxidation (PEO) on AZ91 magnesium alloy. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(3), 242–255.
- Lee, C. K., 2012. Fabrication, characterization and wear korosion testing of bioactive hydroxyapatite/nano-TiO₂ composite coatings on anodic Ti-6Al-4V substrate for biomedical applications. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 177(11), 810–818.
- Li, L., Lu, Z., Pu, J., & Hou, B., 2021. Investigating the tribological and korosive properties of MoS₂/Zr coatings with the continuous evolution of structure for high-humidity application. *Applied Surface Science*, 541.
- Li, W., Qian, Z., Liu, X., Zhu, L., & Liu, H., 2015. Investigation of micro-arc oxidation coating growth patterns of aluminum alloy by two-step oxidation method. *Applied Surface Science*, 356, 581–586.
- Lin, M., Nemcova, A., Voevodin, A. A., Korenyi-Both, A., Liskiewicz, T. W., Laugel, N., Matthews, A., & Yerokhin, A., 2021. Surface characteristics underpinning fretting wear performance of heavily loaded duplex chameleon/PEO coatings on Al. *Tribology International*, 154(October 2020), 106723.
- Liu, F., Han, Y., Guo, X., Wang, C., & Zhang, K., 2021. Adhesion and machining performance of PVD AlCrN coatings with an ion beam/laser textured substrate. *Surface and Coatings Technology*, 423, 127607.
- Liu, R., Yuan, S., Lin, N., Zeng, Q., Wang, Z., & Wu, Y., 2021. Application of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) technique for surface strengthening of titanium and titanium alloys: a mini review. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 351–377.
- Ma, K. J., Al Bosta, M. M. S., & Wu, W. Te., 2014. Preparation of self-lubricating composite coatings through a micro-arc plasma oxidation with graphite in electrolyte solution. *Surface and Coatings Technology*, 259(PB), 318–324.
- Martin, P. M., 2009. *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings : Science, Applications and Technology*. Elsevier Science.
- Matin, R., Totik, Y., Sukuroglu, E. E., Efeoglu, I., & Santos, T. G., 2020. Effects of voltage on the components of surface integrity of Al₂O₃ ceramic coatings on AA2024 by plasma electrolytic oxidation. *Journal of Adhesion Science and Technology* 34(18), 1971–1981.
- MATYKINA, E., ARRABAL, R., MOHEDANO, M., MINGO, B., GONZALEZ, J., PARDO, A., & MERINO, M. C., 2017. Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 27(7), 1439–1454.
- Mazzi, A., Bazzanella, N., Orlandi, M., Edla, R., Patel, N., Fernandes, R., & Miotello, A., 2016. Physical vapor deposition of mixed-metal oxides based on Fe, Co and Ni as water oxidation catalysts. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 42, 155–158.
- Mcmurtrey, E. L., 1985. NASA Technical Memorandum NASA TM-86556 LUBRICATION HANDBOOK Part A: Solid Lubrieants Part B: Liquid Lubricants FOR THE.
- Meng, X., Zhang, K., Guo, X., Wang, C., & Sun, L., 2021. Preparation of micro-textures on cemented carbide substrate surface by plasma-assisted laser machining to enhance the PVD tool coatings adhesion. *Journal of Materials Processing Technology*, 288, 116870.
- Mousavi, S. E., Naghshehkish, N., Amirnejad, M., Shammakhi, H., & Sonboli, A., 2021.

- Korosion performance and tribological behavior of diamond-like carbon based coating applied on Ni–Al–bronze alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(2), 499–511.
- Nikolova, M. P., Yankov, E., Hikov, T., Dechev, D., Ivanov, N., Parshorov, S., Zaharieva, V., & Petrov, P., 2018. Comparison of the Korosion Behaviour of Differently Deposited PVD TiN/TiO₂ Coatings on Electron Beam Modified Ti5Al4V Alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 416(1).
- Nonckreman, C. J., Fleith, S., Rouxhet, P. G., & Dupont-Gillain, C. C., 2010. Competitive adsorption of fibrinogen and albumin and blood platelet adhesion on surfaces modified with nanoparticles and/or PEO. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 77(2), 139–149.
- Ordoñez, M. F. C., Farias, M. C. M., Descartes, S., Machado, I. F., & Souza, R. M., 2021. Tribofilm formation during dry sliding of graphite- and MoS₂- based composites obtained by spark plasma sintering. *Tribology International*, 160, 107035.
- Öz, M., İzzet, A., Üniversitesi, B., Yüksekokulu, G. M., Ve, K., İşleme, K., & Bölümü, T., 2016. Hegzagonal bor nitrürün açık atmosferde termal davranışları. *Cumhuriyet University Faculty of Science Science Journal (CSJ)*, 37(1).
- Panchal, J. N., 2014. Fabrication and applications of indium tin oxide ITO thin film vapour sensors. Ph.D thesis. Department of Electronics, Sardar Patel University.
- Qin, W., Chen, M., Wang, Y., & Jiang, Y., 2020. Structures and adhesion of hcp thin film coating interfaces on a single-crystal bcc substrate by PVD: Ti/Mo and Zr/Mo. *Computational Materials Science*, 174, 109504.
- QIN, Y., WU, G. hua, ATRENS, A., ZHANG, X. long, ZHANG, L., & DING, W. jiang., 2021. Effect of NaOH concentration on microstructure and korosion resistance of MAO coating on cast Al–Li alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 31(4), 913–924.
- Qin, Y., Xiong, D., & Li, J., 2015a. Tribological properties of laser surface textured and plasma electrolytic oxidation duplex-treated Ti6Al4V alloy deposited with MoS₂ film. *Surface and Coatings Technology*, 269(1), 266–272.
- Qin, Y., Xiong, D., & Li, J., 2015b. Tribological properties of laser surface textured and plasma electrolytic oxidation duplex-treated Ti6Al4V alloy deposited with MoS₂ film. *Surface and Coatings Technology*, 269(1), 266–272.
- Qin, Y., Xiong, D., & Li, J., 2015c. Characterization and friction behavior of LST/PEO duplex-treated Ti6Al4V alloy with burnished MoS₂ film. *Applied Surface Science*, 347, 475–484.
- Rahimi, S., Khiabani, A. B., Yarmand, B., & Kolahi, A., 2018. Comparison of korosion and antibacterial properties of Al alloy treated by plasma electrolytic oxidation and anodizing methods. *Materials Today: Proceedings*, 5(7), 15667–15676.
- Rama Krishna, L., Somaraju, K. R. C., & Sundararajan, G., 2003. The tribological performance of ultra-hard ceramic composite coatings obtained through microarc oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 163–164, 484–490.
- Revathi, A., Borrás, A. D., Muñoz, A. I., Richard, C., & Manivasagam, G., 2017. Degradation mechanisms and future challenges of titanium and its alloys for dental implant applications in oral environment. In *Materials Science and Engineering*, 76, 1354–1368.
- Sethulekshmi, A. S., Jayan, J. S., Appukuttan, S., & Joseph, K., 2021. MoS₂: Advanced nanofiller for reinforcing polymer matrix. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 132, 114716.

- Shi, Y., Fan, Z., Ding, B., Li, Z., Lin, Q., Chen, S., Dou, H., & Zhang, X., 2021. Atomic-scale Al₂O₃ modified PEO-based composite polymer electrolyte for durable solid-state Li – S batteries. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 881, 114916.
- Simchen, F., Sieber, M., & Lampke, T., 2017. Electrolyte influence on ignition of plasma electrolytic oxidation processes on light metals. *Surface and Coatings Technology*, 315, 205–213.
- Songur, F., Dikici, B., Niinomi, M., & Arslan, E., 2019. The plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings to enhance in-vitro korosion resistance of Ti–29Nb–13Ta–4.6Zr alloys: The combined effect of duty cycle and the deposition frequency. *Surface and Coatings Technology*, 374, 345–354.
- Spencer, K., Fabijanic, D. M., & Zhang, M. X., 2009. The use of Al–Al₂O₃ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 204(3), 336–344.
- Stachowiak, G.W. , Batchelor, A. W., 2001. *Solid Lubrication and Surface Treatments*, Engineering Tribology, Buterworth-Heinemann, USA.
- Şüküroğlu, E. E., 2016. Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Yöntemi ile Al₂O₃ Alaşımı Üzerine Büyütülmüş Oksit Kaplamanın Adezyon Özelliklerinin İncelenmesi. 2, 232–242.
- Sukuroglu, E E, Baran, O., Totik, Y., & Efeoglu, & I., 2018. Investigation of high temperature wear resistance of TiCrAlCN/TiAlN multilayer coatings over M2 steel. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32(13), 1428–1436.
- Sukuroglu, Ebru Emine, Farzi, H., Sukuroglu, S., Totik, Y., Arslan, E., & Efeoglu, I., 2016. The effect of plasma electrolytic oxidation process parameters on the tribokorosion properties of TiO₂ coatings, 31(12), 1361–1373.
- Sukuroglu, Ebru Emine, Totik, Y., Arslan, Ersin, & Efeoglu, I., 2015. Analysis of Tribo-korosion Properties of MAO/DLC Coatings Using a Duplex Process on Ti 6 Al 4 V Alloys. *Journal of Bio- and Tribo-Korosion*. 1, 22.
- Sukuroglu, Ebru Emine, Totik, Y., Arslan, E., & Efeoglu, I., 2015a. Analysis of Tribo-korosion Properties of MAO/DLC Coatings Using a Duplex Process on Ti6Al4V Alloys. *Journal of Bio- and Tribo-Korosion*, 1(3), 1–13.
- Sukuroglu, Ebru Emine, Totik, Y., Arslan, E., & Efeoglu, I., 2015b. Analysis of Tribo-korosion Properties of MAO/DLC Coatings Using a Duplex Process on Ti6Al4V Alloys. *Journal of Bio- and Tribo-Korosion*, 1(3), 22.
- Sun, J., Deng, J., Li, X., Meng, Y., Zhang, Y., Zhang, L., & Lu, Y., 2020. Preparation and tribological properties of MoS₂-based multiple-layer structured films fabricated by electrohydrodynamic jet deposition. *Surface and Coatings Technology*, 384, 125334.
- Sundararajan, G., Krishna, L. R., 2003. Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology. *Surface and Coatings Technology*, 167(2), 269-277.
- Tran, Q. P., Kuo, Y. C., Sun, J. K., He, J. L., & Chin, T. S., 2016. High quality oxide-layers on Al-alloy by micro-arc oxidation using hybrid voltages. *Surface and Coatings Technology*, 303(2015), 61–67.
- Wang, X., Xing, Y., Ma, S., Zhang, X., Xu, K., & Teer, D. G., 2007. Microstructure and mechanical properties of MoS₂/titanium composite coatings with different titanium content. *Surface and Coatings Technology*, 201(9-11 SPEC. ISS.), 5290–5293.
- Wasa, K., Kitabatake, M., Adachi, H., 2004. *Thin film materials technology: Sputtering of compound materials*. Norwich, NY, USA, Springer-Verlag GmbH. Norwich.

- Window, B. and Savvides, N., 1986. Unbalanced dc magnetrons as sources of high ion fluxes. *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 4, 453-456.
- Window, B., 1995. Recent advances in magnetron sputtering, *Surface and Coatings Technology*, 71, 93-17.
- XIANG, N., SONG, R. guo, ZHUANG, J. jie, SONG, R. xi, LU, X. ya, & SU, X. ping., 2016. Effects of current density on microstructure and properties of plasma electrolytic oxidation ceramic coatings formed on 6063 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(3), 806–813.
- Xie, Z., Chen, T., Chen, Q., Yang, Q., Tan, S., Wang, Y., Luo, Y., Luo, Z., & Hua, M., 2015. Tribokorrosion behaviors of AlN/MoS₂-phenolic resin duplex coatings on nitrogen implanted magnesium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 266, 64–69.
- Yan, Y., Han, Y., Li, D., Huang, J., & Lian, Q., 2010. Effect of NaAlO₂ concentrations on microstructure and korosion resistance of Al₂O₃/ZrO₂ coatings formed on zirconium by micro-arc oxidation. *Applied Surface Science*, 256(21), 6359–6366.
- Yang, W., Gao, Y., Guo, P., Xu, D., Hu, L., & Wang, A., 2020. Adhesion, biological korosion resistance and biotribological properties of carbon films deposited on MAO coated Ti substrates. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 101, 103448.
- Yang, X., Chen, L., Jin, X., Du, J., & Xue, W., 2019. Influence of temperature on tribological properties of microarc oxidation coating on 7075 aluminium alloy at 25 °C –300 °C. *Ceramics International*, 45(9), 12312–12318.
- Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A., Dowey, S. J., 1999. Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, 122(2– 3), 73-93.
- Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., & Matthews, A., 2000. Characterisation of oxide films produced by plasma electrolytic oxidation of a Ti-6Al-4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 130(2–3), 195–206.
- Yilbas, B. S., Yilbas, Z., & Akcakoyun, N., 1996. Investigation into absorption of the incident laser beam during Nd:YAG laser processing of metals. *Optics and Laser Technology*, 28(7), 503–511.
- Zarka, M., Dikici, B., Niinomi, M., Ezirmik, K. V., Nakai, M., & Yilmazer, H., 2021. A systematic study of β -type Ti-based PVD coatings on magnesium for biomedical application. *Vacuum*, 183(September 2020), 109850.
- Zhang, J., & Alpas, A. T., 1993. Wear regimes and transitions in Al₂O₃ particulate-reinforced aluminum alloys. *Materials Science and Engineering A*, 161(2), 273–284.
- Zhang, Jingwen, Wang, Y., Zhou, S., Wang, Y., Wang, C., Guo, W., Lu, X., & Wang, L., 2020. Tailoring self-lubricating, wear-resistance, antikorrosion and antifouling properties of Ti/(Cu, MoS₂)-DLC coating in marine environment by controlling the content of Cu dopant. *Tribology International*, 143(July 2019), 106029.
- Zhao, L., Cui, C., Wang, X., Liu, S., Bu, S., Wang, Q., & Qi, Y., 2015. Korosion resistance and calcium-phosphorus precipitation of micro-arc oxidized magnesium for biomedical applications. *Applied Surface Science*, 330, 431–438.
- Zhao, Z., Chen, M., You, C., Li, W., Tie, D., & Liu, H., 2020. Effect of α -Al₂O₃ additive on the microstructure and properties of MAO coatings prepared on low carbon steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3875–3884.
- Zhang, W.J., Chong, Y.M., Bello, I., Lee, S.T., 2007. Nucleation, growth and characterization of cubic boron nitride (cBN) films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40, 6159-6174.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Reza MATIN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Valfajr
Lisans:	İslamic Azad Üniversitesi
Yüksek lisans:	İslamic Azad Üniversitesi
Doktora:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Azari :	Çok İyi
Farsça :	Çok İyi
Türkçe:	İyi
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Journal of Adhesion Science and Technology , Effects of Voltage on The Components of Surface İntegrity of Al ₂ O ₃ Ceramic Coatings on AA2024 by Plasma Electrolytic Oxidation,Yıl 2020, Cilt 34, Sayı 18, Sayfalar, 1971-1981.	