

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**TI6Al4V ÜZERİNE ELEKTROKAPLAMA YÖNTEMİYLE ÇİNKO
VE ZrO₂ TAKVİYELİ ÇİNKO KOMPOZİT KAPLAMALARIN
ÖZELLİKLERİ**

HAZIRLAYAN

KAAN KUŞTEPE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA – 2022

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**TI6Al4V ÜZERİNE ELEKTROKAPLAMA YÖNTEMİYLE ÇİNKO
VE ZrO₂ TAKVİYELİ ÇİNKO KOMPOZİT KAPLAMALARIN
ÖZELLİKLERİ**

HAZIRLAYAN

KAAN KUŞTEPE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. EBRU SARALOĞLU GÜLER

ANKARA – 2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Kaan KUŞTEPE tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 25 / 07 / 2022

Tez Adı: TI6Al4V Üzerine Elektrokaplama Yöntemiyle Çinko ve ZrO₂ Takviyeli Çinko Kompozit Kaplamaların Özellikleri

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı- Soyadı, Kurumu)

İmza

Doç. Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER- Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Andaç Töre ŞAMİLOĞLU- Başkent Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Erkan KONCA- Atılım Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Faruk ELALDI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 29 / 07 / 2022

Öğrencinin Adı, Soyadı: Kaan KUŞTEPE

Öğrencinin Numarası: 21820086

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı: Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Doç. Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER

Tez Başlığı: Ti6Al4V Üzerine Elektrokaplama Yöntemiyle Çinko ve ZrO₂ Takviyeli Çinko Kompozit Kaplamaların Özellikleri

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 78 sayfalık kısmına ilişkin, 29 / 07 / 2022 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %5'tir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrenci Danışmanı: Doç. Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bilgisiyle ışık tutan ve bu çalışmanın gerçekleşmesinde desteğini esirgemeyen sevgili dayım Celallettin ÇETİNKAYA'ya katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bana her zaman yol gösteren, fikir veren, her şartta daima yanımda olan ve akademik yolda yürüme şevki kazandıran sevgili abim Dr. Metin DEMİRSOY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, hayatımın her alanında yanımda hissettiğim sevgili annem Müge Sacide KUŞTEPE'ye, sevgili teyzem Zeliha KAZANCI'ya, sevgili abim Toygun KAZANCI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, yaptığı maddi ve manevi yatırımlarla hayatıma yön veren, kendime rehber edindiğim, sevgi, minnet ve özlemle andığım, bu tezi ithaf ettiğim, ilk kahramanım, oğlu olmaktan her zaman gurur duyacağım rahmetli babam Cafer KUŞTEPE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Kaan KUŞTEPE

**TI6Al4V ÜZERİNE ELEKTROKAPLAMA YÖNTEMİYLE ÇİNKO VE ZrO₂
TAKVİYELİ ÇİNKO KOMPOZİT KAPLAMALARIN ÖZELLİKLERİ**

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2022

Günümüzde metal kaplamalar yaygın olarak kullanılmakta ve çeşitli yöntemler kullanılarak uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden en basit ve ekonomik açıdan en uygun olanı yaygın şekilde kullanılan elektrokaplamalardır. Bu çalışmada TI6Al4V alaşımlarının kaplama parametreleri değiştirilip çinko elektrokaplama yapılarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca çinko kaplamalara ZrO₂ partikül takviyesi ile kaplamaların mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda; TI6Al4V alaşımları kaplamalar sonrasında tribometre analizi, çizilme direnci ve yapışma mukavemeti analizi, pürüzlülük ve yüzey analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı incelemesi yapılmıştır. TI6Al4V alaşımlarının kaplama öncesi yüzey hazırlığının kaplamalar üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak hem çinko hem de ZrO₂ takviyeli çinko kaplamaların kaplama parametrelerinin her bir mekanik performans üzerinde farklı etkileri olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çinko Kaplama, Kompozit Elektrokaplama, Parçacık Takviyesi, Tribometre, Çizilme Dayanımı, Yüzey Pürüzlülüğü, SEM

ABSTRACT

Kaan KUŞTEPE

THE PROPERTIES OF ZINC AND ZrO₂ REINFORCED ZINC COMPOSITE COATING ON TI6Al4V BY ELECTRODEPOSITION METHOD

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

2022

Nowadays, metal coatings are widely used and applied using various methods. The simplest and most economically feasible of these methods is widely used electroplating. In this study, it is aimed to improve the mechanical properties of TI6Al4V alloys by changing the coating parameters and performing zinc electroplating. Moreover, the effects of ZrO₂ particle reinforcement on zinc coatings on the mechanical properties of the coatings were investigated. In this context; after coatings of TI6Al4V alloys, tribometer analysis, scratch resistance and adhesion strength analysis, roughness and surface analysis, microstructure analysis with scanning electron microscope (SEM) were performed. It has been determined that the surface preparation of TI6Al4V alloys before coating is effective on the coatings. In addition, it is concluded that the coating parameters of both zinc and ZrO₂ reinforced zinc coatings have different effects on each mechanical performance.

KEY WORDS: Zinc Plating, Composite Electroplating, Particle Reinforcement, Tribometer, Scratch Resistance, Surface Roughness, SEM

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	7
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	12
3.1. Numune ve Kaplama Düzenegi Hazırlama	12
3.1.1. Ti6Al4V Numunelerin Yüzey Analizi (AFM)	15
3.1.2. Zn Elektrokaplama	16
3.1.3. ZrO ₂ Takviyeli Zn Elektrokaplama	18
3.2. Deney Planı.....	18
3.3. Kaplamaların SEM Analizi	21
3.4. Aşınma Dayanımı (Pin-on-disk tribometre).....	22
3.5. Kaplamaların Yapışma ve Çizik Dayanımı.....	23
3.6. Kaplamaların Pürüzlülük ve Yüzey Analizi (AFM).....	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
4.1. Titanyum Alaşımlarının Yüzey Analizi	27
4.2. Zn Elektrokaplama.....	28
4.3. Zn-ZrO ₂ Takviyeli Elektrokaplama	31
4.4. Kaplamaların SEM Analizi	33
4.5. Kaplamaların Aşınma Dayanımı Analiz Sonuçları	43
4.6. Kaplamaların Çizik Dayanımı ve Yapışma Dayanımı Analiz Sonuçları....	51

4.7. Kaplamaların Pürüzlülük ve Yüzey Analizi (AFM).....	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
6. KAYNAKLAR.....	63

EKLER

EK 1: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 1 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 2: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 2 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 3: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 3 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 4: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 4 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 5: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 5 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 6: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 6 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 7: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 7 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 8: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 8 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 9: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 4 TOPOGRAFYASI VE KESİT 1 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 10: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 4 TOPOGRAFYASI VE KESİT 2 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 11: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 5 TOPOGRAFYASI VE KESİT 1 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 12: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 5 TOPOGRAFYASI VE KESİT 2 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

EK 13: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 6 TOPOGRAFYASI VE KESİT 1 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI

**EK 14: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 6 TOPOGRAFYASI VE KESİT 2
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI**

**EK 15: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 8 TOPOGRAFYASI VE KESİT 1
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI**

**EK 16: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 8 TOPOGRAFYASI VE KESİT 2
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI**

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Çinko Elementinin Genel Özellikleri 1[5]	1
Tablo 1.2. Çinko Elementinin Genel Özellikleri 2[5]	2
Tablo 3.1. Zn Kaplama Banyosu Bileşenleri ve Miktarları.....	16
Tablo 3.2. Zn-ZrO ₂ Takviyeli Kaplama Banyo Bileşenleri ve Miktarları.....	18
Tablo 3.3. SEM Analizi İçin Zn ve Zn-ZrO ₂ Kaplama Parametreleri	19
Tablo 3.4. Aşınma Dayanımı Analizi Zn ve Zn-ZrO ₂ Kaplama Parametreleri	19
Tablo 3.5. Çizik ve Yapışma Dayanımı Analizi Zn ve Zn-ZrO ₂ Kaplama Parametreleri ...	19
Tablo 3.6. Pürüzlülük ve Yüzey Analizi (AFM) Zn ve Zn-ZrO ₂ Kaplama Parametreleri ..	20
Tablo 4.1. Kaplanmamış Titanyum Numunelerinin Pürüzlülük Sonuçları	28
Tablo 4.2. Anot ve Katotta Zn Kaplama Öncesi ve Sonrası Ağırlık Değişimleri	29
Tablo 4.3. Zn Kaplamaların Kaplama Sonrası Faraday Ağırlık Hesapları	30
Tablo 4.4. Zn-ZrO ₂ Takviyeli Kaplamaların Kaplama Sonrası Ağırlık Değişimleri	32
Tablo 4.5. Numunelerin SEM Analizi Kaplama Kalınlıkları	39
Tablo 4.6. Numunelerin Sürtünme Katsayısı Sonuçları	43
Tablo 4.7. Numunelerin Aşınma Analizi Sonuçları	47
Tablo 4.8. Numunelerin Kritik Yük Değerleri	53
Tablo 4.9. Numunelerin Pürüzlülük Değerleri	60

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Elektrokaplama Mantiğı	3
Şekil 1.2. Çelikler Üzerinde Çinko Elektrokaplama Örnek İşlem Şeması [7]	3
Şekil 1.3. Parçacık Takviyeli Elektro Kaplama Mantiğı	4
Şekil 3.1. Silindirik Ti6Al4V Numuneler	12
Şekil 3.2. Kaplama Öncesi 30mm Çapındaki Ti6Al4V Numuneleri	13
Şekil 3.3. Zımpara Makinesi.....	13
Şekil 3.4. Elektro Kaplama Bantı ile Kaplanmış Numuneler.....	14
Şekil 3.5. Kaplama Test Düzeneği	15
Şekil 3.6. NanoMagnetics Instruments Marka hpAFM Model AFM.....	16
Şekil 3.7. Termometre	17
Şekil 3.8. Knmaster Marka Ph Ölçer	17
Şekil 3.9. Ti6Al4V Numunelerin Zn ve Zn-ZrO ₂ Kaplama Anı.....	20
Şekil 3.10. Tescan Marka GAIA+3OXFORD XMAX Model SEM Cihazı[32]	22
Şekil 3.11. CSM Instrument Tribometer (Aşınma Cihazı)[33]	22
Şekil 3.12. Tribometre Deneyinde Kullanılan Numuneler (a. Numune 5) (b. Numune 6) .	23
Şekil 3.13. ASTM F 1044- 99 Shear Çekme Numune Görüntüsü[35].....	24
Şekil 3.14. ASTM F 1044- 99 Shear Çekme Mantiğı[35].....	24
Şekil 3.15. ASTM F 1044- 99 Standardına Uygun Tasarlanmış Numune Tutucular	25
Şekil 3.16. Instron Marka Çekme Cihazı	25
Şekil 3.17. a. Çizik Test Şematik Gösterimi ve b. CSM Makro Çizik Test Cihazı.....	26
Şekil 4.1. Zn Kaplanmış Numune 4	29
Şekil 4.2. Kaplama Sonrası Katot Ağırlık Değişimi Grafiği.....	30
Şekil 4.3. Kaplamaların Faraday Ağırlık Hesabı Grafiği	30
Şekil 4.4. Zn-ZrO ₂ Kaplanmış Numune 6	32

Şekil 4.5. Zn-ZrO ₂ Takviyeli Kaplamaların Kaplama Sonrası Ağırlık Değişim Grafiği	33
Şekil 4.6. Analizi için Kaplanmış Ti6Al4V Numune 1, 2, 4, 5, 6, 7 ve kaplamada Kullanılmış Saf Zn Anotlar	35
Şekil 4.7. Numune 1 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek	35
Şekil 4.8. Numune 2 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 110X Ölçek	36
Şekil 4.9. Numune 3 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek	36
Şekil 4.10. Numune 4 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek	37
Şekil 4.11. Numune 5 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek	37
Şekil 4.12. Numune 6 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek	38
Şekil 4.13. Numune 7 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek	38
Şekil 4.14. Numune 8 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek	39
Şekil 4.15. Numunelerin SEM Analizi Kaplama Kalınlıkları Grafiği	40
Şekil 4.16. Numune 5 Kaplama Yüzey İncelemesi SEM Görüntüleri a. 500X Ölçek b. 2000X Ölçek	41
Şekil 4.17. Numune 6 Kaplama Yüzey İncelemesi SEM Görüntüleri a. 500X Ölçek b. 2000X Ölçek	42

Şekil 4.18. Numune 7 Kaplama Yüzey İncelemesi SEM Görüntüleri a. 500X Ölçek b. 2000X Ölçek	42
Şekil 4.19. Numune 8 Kaplama Yüzey İncelemesi SEM Görüntüleri a. 500X Ölçek b. 2000X Ölçek	43
Şekil 4.20. Numunelerin Sürtünme Katsayısı Sonuç Grafiği.....	44
Şekil 4.21. Numune 4'ün 1N Yük Altında Yola Bağlı Sürtünme Katsayılarındaki Değişimleri.....	44
Şekil 4.22. Numune 5'in 1N Yük Altında Yola Bağlı Sürtünme Katsayılarındaki Değişimleri.....	45
Şekil 4.23. Numune 6'nın Yük Altında Yola Bağlı Sürtünme Katsayılarındaki Değişimleri	45
Şekil 4.24. Numune 8'in 1N Yük Altında Yola Bağlı Sürtünme Katsayılarındaki Değişimler.....	46
Şekil 4.25. Aşınma Yolu İz Genişliği Grafiği	48
Şekil 4.26. Aşınma Miktarı Grafiği	48
Şekil 4.27. Numune 4'ün Aşınma Yolu İz Genişliği Ölçümü.....	49
Şekil 4.28. Numune 5'in Aşınma Yolu İz Genişliği Ölçümü.....	49
Şekil 4.29. Numune 6'nın Aşınma Yolu İz Genişliği Ölçümü.....	50
Şekil 4.30. Numune 8'in Aşınma Yolu İz Genişliği Ölçümü.....	50
Şekil 4.31. Numune 6'nın ASTM F 1044 – 99 Standardına Göre Yapışma Mukavemeti Analizi Sonucu	51
Şekil 4.32. Numune 6'nın ASTM F 1044 – 99 Standardına Göre Yapışma Mukavemeti Analizi Sonrası Test Numunesi (a. Kaplanmış Numune) (b. Kaplanmamış Numune).....	52
Şekil 4.33. Numunelerin Kritik Yük Değer Grafiği	54

Şekil 4.34. Numune 4'ün Çizik Testinde Uygulanan Yükler Altında Kuvvetler ve	54
Şekil 4.35. Numune 4'ün Çizik Testinde Uygulanan Yük Altında Oluşan Batma Derinlikleri	55
Şekil 4.36. Numune 5'in Çizik Testinde Uygulanan Yükler Altında Kuvvetler ve Sürtünme Katsayısının Değişimi	55
Şekil 4.37. Numune 5'in Çizik Testinde Uygulanan Yük Altında Oluşan Batma Derinliklerinin Değişimi	56
Şekil 4.38. Numune 6'nın Çizik Testinde Uygulanan Yükler Altında Kuvvetler ve Sürtünme Katsayısının Değişimi.....	56
Şekil 4.39. Numune 6'nın Çizik Testinde Uygulanan Yüklet Altında Oluşan Sürtünme Kuvveti ve Sürtünme Katsayılarının Değişimi	57
Şekil 4.40. Numune 8'in Çizik Testinde Uygulanan Yükler Altında Kuvvetler ve Sürtünme Katsayısının Değişimi	57
Şekil 4.41. Numune 8'in Çizik Testinde Uygulanan Yüklet Altında Oluşan Sürtünme Kuvveti ve Sürtünme Katsayılarının Değişimi	58
Şekil 4.42. Numune 4 Çizik Testi Sonrası Yüzey Görüntüsü	58
Şekil 4.43. Numune 5 Çizik Testi Sonrası Yüzey Görüntüsü	58
Şekil 4.44. Numune 6 Çizik Testi Sonrası Yüzey Görüntüsü	58
Şekil 4.45. Numune 8 Çizik Testi Sonrası Yüzey Görüntüsü	59
Şekil 4.46. Numunelerin Pürüzlülük Grafiği 1	60
Şekil 4.47. Numunelerin Pürüzlülük Grafiği 2	60

SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ

<i>W</i>	Kaplanan malzeme miktarı (g)
<i>I</i>	Devreden geçen akım miktarı (A)
<i>t</i>	Zaman (saniye)
<i>M</i>	Kaplanacak malzemenin molar kütlesi (g/mol)
<i>F</i>	Faraday sabiti (96500 A.s/mol)
<i>z</i>	Kaplanacak malzemenin 1 molünün indirgenmesi için gereken elektron miktarı
<i>SEM</i>	Taramalı Elektron Mikroskobu
<i>R</i>	İz Çapı
<i>d</i>	Aşınma Yolu İz Genişliği
<i>r</i>	Pin Çapı
<i>AFM</i>	Atomik Kuvvet Mikroskobu

1. GİRİŞ

Gelişen malzeme ve mekanik sektöründe, geçmişten bugüne hala çok elverişli ve tercih edilen kaplama yöntemleri, malzemelerin mekanik davranışlarını ve özelliklerini daha iyi seviyelere çıkartmak amacıyla çok yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Kaplama yapılacak malzemeden beklenen özelliklere göre ve malzemenin kullanım alanları ile ilişkili geçmişten günümüze birçok kaplama türü mevcuttur. Bu kaplama türlerine de örnek vermek gerekirse çinko kaplama, krom kaplama, kalay kaplama, nikel kaplama, soy metal kaplama, bakır kaplama vb. başlıca olanlarıdır. Bu kaplamalardan da en yaygın olanlarından birisi çinko kaplamadır. Çinko elementinin genel özellikleri Tablo 1.1 ve Tablo 1.2’de verilmiş olup, çinko elementi elektrokimyasal özelliği ve ekonomik elverişliliği sayesinde diğer kaplamalara göre daha çok tercih edilmektedir. Çinko kaplama yöntemlerinden başlıca olanları ise sıcak daldırma, sıcak püskürtme ve en yaygın olarak kullanılan elektrokaplama yöntemidir[1][2][3][4].

Tablo 1.1. Çinko Elementinin Genel Özellikleri 1[5]

Özellik	Açıklama
Adı	Çinko
Sembölü	Zn
Atom Numarası	30
Element Serisi	Geçiş Metalleri
Grup, periyot, blok	12, 4, d
Görünüş	Mavimsi açık gri
Kütle Numarası	65,409(4) g/mol
Elektron Dizilimi	[Ar]3d10 4s2
Elektron Seviyesi Başına Elektronlar	2, 8, 18, 2
CAS Kayıt Numarası	7440-66-6
Maddenin Hali	Katı
Yoğunluk	7,14 g/cm ³
Sıvı Haldeki Yoğunluğu	6,57 g/cm ³
Ergime Noktası	692,68°K, 419,53 °C
Kaynama Noktası	1180°K, 907 °C
Ergime Isısı	7,32 kJ/mol
Buharlaşma Isısı	123,6 kJ/mol
Isı Kapasitesi	25,390 J/(mol·K)
Kristal Yapısı	Hegzagonal
Yükseltgenme Seviyeleri	(2+) Amfoter Oksit
Elektronegatifliği	1,65 Pauling ölçeği
İyonlaşma enerjisi	906,4 kJ/mol

Tablo 1.2. Çinko Elementinin Genel Özellikleri 2[5]

Atom yarıçapı	135 pm
Atom yarıçapı (hes.)	142 pm
Kovalent yarıçapı	131 pm
Van der Waals yarıçapı	139 pm
Elektrik direnci	59,0 nΩ·m (20°C'de)
Isıl iletkenlik	116 W/(m·K)
Isıl genleşme	30,2 μm/(m·K) (25°C'de)
Ses hızı	3850 m/s (25 °C'de)
Mohs sertliği	2,5
Vickers sertliği	-
Brinell sertliği	412 MPa

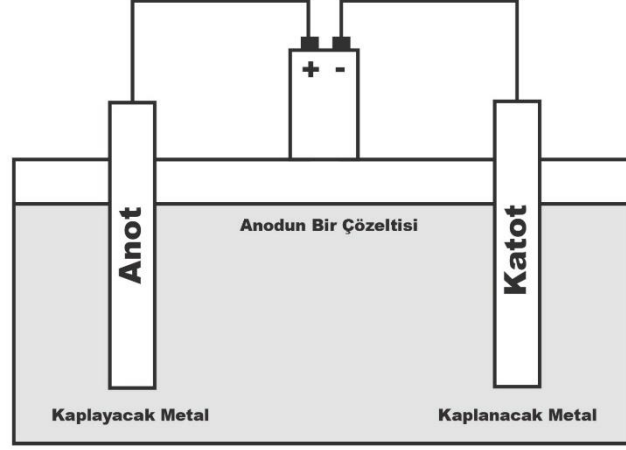
Buna ek olarak çinkonun elektrokaplama yöntemleriyle elde edilen yüzey özelliklerini başka yöntemlerle de kazanmak çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla günümüzde birçok endüstri kolu için gerekli bir prosestir. Ayrıca elektrokaplama yapılmasının başlıca sebepleri, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi olsa da ihtiyaçlar doğrultusunda başka sebepleri de mevcuttur[1][2][3].

Elektrokaplama ile metallerin geliştirilmek istenen başlıca özellikleri şu şekilde sıralanabilir. Bunlar[3]:

- Aşınma dayanımı
- Kaplama yapışma mukavemeti
- Kaplama yüzey pürüzlülüğü
- Korozyon davranışı
- Malzemelerin görüntülerini ihtiyaçlar doğrultusunda daha elverişli hale getirmek
- Malzemeler arası lehimleme, nitrütasyon ve ısıl işlem sürecinde kısa süreli duraklamayı etkilemek

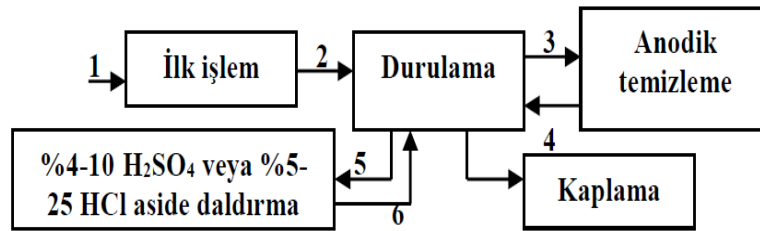
Çinko elektrokaplama yönteminin genel mantığı Şekil 1.1.'de belirtilmiş olup, elektro-kimyasal yöntemlerle bir malzemenin yüzeyine film oluşturulma işlemidir. Bu işlem esnasında kaplanacak malzeme elektrolitik devrenin katodu konumunda, kaplayacak malzeme olan referans elektrot çinko ise anot konumunda kullanılır. Ayrıca elektrokaplama işleminin gerçekleştirileceği uygun bir elektrolitik çözelti de hazırlanır. Bu elektrolitik çözeltide anot davranışı sergileyen kaplayacak maddenin bir çözeltisi olmalıdır. Buna ek

olarak kaplama işleminde çinkonun iletkenliğinin yüksek olması elektrolitik işlem açısından büyük önem arz etmektedir. Bu iletkenlik elektrolitik çözeltinin içeriğine bağlı olarak az da olsa değişkenlik göstermektedir[1][2][3].



Şekil 1.1. Elektrokaplama Mantığı

Çinko elektrokaplamalarda kaplama öncesi ön işlemlerin ve yüzey parlatmanın kaplama açısından önemi büyüktür[6]. Ön işlemler olarak yüzeylerin belirli zımpara kalınlıklarıyla yüzey pürüzlülüğünün ayarlanması ve ondan sonra da yüzey ön işlemleri ile dağlama işlemlerinin sırasıyla yapılması kaplama kalitesini etkilemektedir. Çelikler üzerindeki çinko elektro kaplama örnek işlem şeması da Şekil 1.2’de verilmiştir[1].



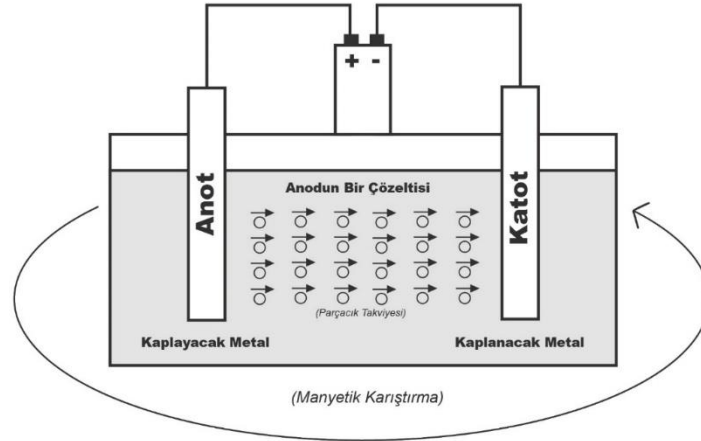
Şekil 1.2. Çelikler Üzerinde Çinko Elektrokaplama Örnek İşlem Şeması [7]

Çinko elektrokaplama, kaplanan malzemelerde kaplama miktarı devreden geçen akımla ilişkilendirilebilir. Bu ilişki de Faraday yasası ile açıklanabilir. Yapılacak reaksiyona göre kaplayacak numunenin elektronu, kapanacak metalin yüzeyi üzerinde toplanıyorsa,

akım ile kaplanan malzeme miktarı arasında bir ilişkinin varlığının göstergesidir. Bu ilişki de aşağıdaki gibidir[1]:

$$W = \frac{I \times t}{F \times n} \quad (1.1)$$

Çinko elektrokaplama, metaller ve alaşımlarla kullanımı daha da yaygınlaştığından metal ve alaşımların da mekanik ihtiyaçları gün geçtikçe artmaktadır[8]. Bu sebeple Çinko elektrokaplama ek olarak son dönemler de metallerin mekanik özelliklerini daha üst seviyelere çıkartmak amacıyla parçacık takviyeli kompozit kaplamalar yapılmakta ve parçacık takviyeli kompozit kaplamalar gün geçtikçe daha da yaygınlaşmaktadır[9]. Parçacık takviyeli kompozit kaplamalar Şekil 1.3.'te belirtildiği gibi aynı saf metal elektrokaplama gibi kaplayacak metal anot konumunda, kaplanacak metal ise katot durumundadır. Ayrıca kaplayacak metal olan anodun bir çözeltisinde parçacık takviyeleri bulunmaktadır. Bu parçacık takviyeleri ile anottaki metal malzeme elektrik akımıyla birlikte kendilerini feda ederek katotta bir kompozit film tabaka oluşturur[10]. Ayrıca kompozit kaplamalarda parçacık takviyelerinin, çözeltide homojen şekilde dağılması ve kaplama sürecine etkin bir şekilde dahil olabilmeleri için uzun süreli bir karıştırma işlemi gerekmektedir. Kaplama sırasında parçacık takviyelerinin de topaklanmaması için kaplama esnasında karıştırmanın devam ettirilmesi de büyük önem arz etmektedir[11].



Şekil 1.3. Parçacık Takviyeli Elektro Kaplama Mantığı

Son zamanlarda yapılan ve yapılmakta olan kompozit elektrokaplama çalışmalarının, malzemelerin temel ihtiyaçlarından olan mekanik özellikleri geliştirdiği tespit edilmiştir[12]. Kompozit kaplama yöntemlerinde kullanılan ve çokça tercih edilen çinko kaplamada TiO₂ ve silika nano-partikül ilavesinin kaplanan malzemenin korozyon direncini

iyileştirerek daha yüksek seviyelere çıkarttığı gözlemlenmektedir[8]. Buna ek olarak Zn-Mo kompozit elektrokaplama da çelikler üzerinde yüzey pürüzlülüklerini ve kaplamaların yapışma dayanımlarını geliştirdiği belirtilmektedir[13]. Böylece günümüz koşullarında birçok malzemenin mekanik özelliklerini geliştirme çalışmaları devam etmekte ve bu sebeple her malzemenin farklı parçacık takviyeleri ile kompozit kaplamaları yapılarak, malzemelerin birbirleri ile olan ilişkileri ve kaplama koşullarının etkileri araştırılmaktadır.

Çalışmada ilk bölüm olan giriş bölümünden sonra ikinci bölümde detaylı literatür araştırmasına yer verilmiştir. Literatür araştırmasında geçmişte saf metal kaplamalar ve kompozit kaplamalarla ilgili yapılmış çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, araştırmanın konusu, araştırmanın amacı ve önemi, araştırmanın yöntemini içeren deneysel çalışmalar hakkında bilgiler detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu bilgilerden bahsetmek gerekirse, günümüzde hem biyomedikal uygulamalar olsun hem savunma sanayisinde olsun çok kapsamlı kullanım alanı olan Ti6Al4V alaşımlarının, çinko kaplamalardaki davranışları ve bahsi geçen bu alaşımların ZrO₂ parçacık takviyeli kompozit çinko elektrokaplama yapılmıştır. Kaplama işlemleri yapılmadan önce Ti6Al4V alaşımlar ilk olarak ön yüzey işlemlerinden geçirilmiştir. Daha sonra kaplama işlemlerine geçilen Ti6Al4V alaşımları, saf çinko kaplamalarda kaplama parametreleri olarak farklı akım yoğunlukları ve farklı kaplama banyo sıcaklıkları kullanılarak kaplanmıştır. Daha sonra Ti6Al4V alaşımlarının ZrO₂ parçacık takviyeli çinko kaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu kaplamalarda kaplama parametreleri olarak aynı akım yoğunlukları kullanılmıştır. Fakat aynı akım yoğunluğunda olup farklı miktardaki parçacık takviyeli kaplamalarda gerçekleştirilmiştir. Bunlara ek olarak da parçacık takviyeli kaplamalarda kaplama banyo sıcaklıkları değiştirilerek geniş kapsamlı kaplama parametreleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra farklı kaplama parametrelerinde gerçekleştirilen çinko kaplamalar ile ZrO₂ parçacık takviyeli kompozit kaplamaların mekanik testlerine geçilmiştir. Bu testler de ilk olarak kaplamaların SEM cihazın da kaplamaları kalınlıkları ölçülmüş ve kompozit kaplamaların ayrıca yüzey görüntüleri incelenmiştir. Daha sonra aşınma dayanımı analizi gerçekleştirilip kaplamaların yapışma dayanımı ve çizik dayanımı ile analizlere devam edilmiştir. Son olarak da hem saf çinko kaplamaların hem de parçacık takviyeli kompozit kaplamaların pürüzlülük ve yüzey analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece hem saf çinko hem de ZrO₂ parçacık takviyeli çinko kaplanan Ti6Al4V alaşımlarının farklı kaplama parametrelerindeki mekanik davranışları incelenmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde ise üçüncü bölümde bahsedilen araştırma kapsamında yapılan deneysel çalışmaların bulguları ve irdelenmesi detaylı bir şekilde yer almıştır.

Çalışmanın beşinci ve son bölümünde, araştırma bulgularından yola çıkarak araştırma hakkında genel sonuçlara detaylı bir şekilde değinilmiştir. Ayrıca araştırmayla ilgili gelecekte yapılması tavsiye edilen yönlere ve araştırmada deneyimlenen eksikliklere yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Günümüzde metallerin, kullanım alanlarına göre ihtiyaçları gün geçtikçe artmaktadır. Böylece bu ihtiyaçları en ekonomik ve uygun şekilde karşılayabilmek adına metal kaplamalar yapılmaktadır. Bu kaplamalardan da günümüzde en sık tercih edilenlerden birisi de elektrokaplamalardır. Bahsi geçen bu kaplama yönteminde, metallerin kaplamalar ile etkileşimleri ve kaplamaların mekanik özelliklerinin incelenerek geliştirilmesi çalışmaları günümüzde yoğun bir şekilde devam etmektedir. Örneğin, Ramesh S. Bhat ve arkadaşları çalışmaların da Zn-Ni kompozit kaplamaları elektrokaplama yöntemiyle yumuşak çelik üzerinde gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalar sonucunda da yumuşak çeliğin kompozit kaplamalar sayesinde korozyon davranışlarında büyük bir iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca kaplamalardaki çinkonun yumuşak çelik üzerindeki iyileştirmelerdeki en büyük etken olduğunu belirtmişlerdir. Bunlara ek olarak farklı kaplama parametrelerinin kaplamalar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir[14]. C.K. Lee çalışmasında Ti6Al4V alaşımlarının üzerine elektrokaplama yöntemiyle nikel-karbonanotüpleri kompozit bir şekilde kaplamıştır. Kaplamalar sonucunda alaşımların başarılı bir şekilde, nikel-karbonanotüpler ile stabil ve yoğun bir şekilde kaplandığını belirtmiştir. Ayrıca kaplamalar sonucunda alaşımların sertliklerinin geliştiğini vurgulamıştır. Bunlara ek olarak kaplanmış alaşımların aşınma ve korozyon davranışının geliştiğini belirtmiştir[15]. Çalışmalar da anlaşıldığı üzere elektrokaplama yöntemi hem kaplanan malzeme çeşitliliği olsun hem de kompozit kaplamalar olsun günümüzde sıkça tercih edilen bir kaplama türüdür.

Elektrokaplama ile kaplanacak malzemelerin en çok geliştirilmek istenen mekanik özelliklerinden bir tanesi de aşınma dayanımıdır. Çünkü malzemelerin uzun süreli kullanımlarında zamanla deformasyonlar meydana gelmektedir. Böylece malzemelerin ömürlerinin daha uzun olması amacıyla kaplamalar gerçekleştirilir. Örneğin, M. Fazel ve arkadaşları çelik üzerine Ni-SiC kompozit kaplamalar yapmışlardır. Bu kaplamalar sonucunda çeliğin aşınma davranışlarını tribometre pin on disc cihazında analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda kompozit kaplanan çeliğin aşınma davranışının geliştiğini gözlemlenmişlerdir. Ancak kompozit kaplamaların oda sıcaklığındaki aşınma davranışlarındaki gelişmelerin çok kararlı ve stabil olduğunu belirtmişlerdir. Sırasıyla 100, 200 ve 300°C sıcaklıklardaki aşınma davranışları da analiz edilmiş olup, ideal oda sıcaklığına kıyasla sırasıyla %17, %80 ve %67 aşınma oranlarının arttığını

belirtmişlerdir[16]. Bir diğer çalışmada S. Pouladi ve arkadaşları çelikler üzerine Ni-Zn-P ve Ni-Zn-P/nano-SiC kompozit kaplamalar gerçekleştirmiştir. Bu kaplamalar sonucunda SiC parçacık takviyesi eklenmesiyle çeliğin hem aşınma direncinin hem sürtünme katsayısının hem de mikrosertliğinin yükseldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca fosfat eklenmesinin de kaplama çatlaklarını azalttığını ve bunun da aşınma direnci, sürtünme katsayısı ve mikrosertliğin üzerinde etkisi olduğunu belirtmişlerdir[17]. Bir diğer çalışmada Ion-Dragos Utu ve arkadaşları çelikler üzerine çinko bazlı alüminya ve elmas parçacık takviyeli kompozit elektrokaplama gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalar sonucunda çinko bazlı kaplamaların ve parçacık takviyeli kompozit kaplamaların çelik üzerine başarılı bir şekilde kaplandığını belirtmişlerdir. Kaplamalar ile hem çinko bazlı kaplamaların hem de kompozit kaplamaların çeliğin aşınma davranışlarını geliştirdiğini belirtmişlerdir. Ancak elmas parçacık takviyelerinin alüminya parçacık takviyelerine kıyasla daha elverişli olduğunu belirtmişlerdir. Parçacık takviyesinin de saf çinko kaplamalara kıyasla aşınma hızı 2,5 ile 3 kat arasında daha azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca parçacık takviyesinin korozyon davranışını biraz da olsa geliştirdiğini gözlemlemişlerdir[18]. Başka bir çalışmada S. Tian ve arkadaşları yumuşak çelikler üzerine Ni-W-GO kompozit kaplamalar gerçekleştirmişlerdir. Çelikleri farklı kaplama parametrelerinde yaptıkları kaplamalarda parçacık takviyesi eklenmesiyle aşınma dirençleri ve korozyon davranışları daha iyi seviyelere geldiğini gözlemlemişlerdir[19]. Bu konuyla ilgili bir başka araştırma da H. Fan tarafından yapılmıştır. Yapmış olduğu çalışmada çelikler üzerine nikel elektrokaplama banyosunda SiC nanopartikül takviyeli kompozit kaplamalar yapmıştır. Kaplama parametrelerini, kaplama banyo sıcaklığı, kaplama sırasında karıştırma hızı ve parçacık takviye miktarının kaplama üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Araştırmaları sonucunda saf nikel kaplamalar ile SiC parçacık takviyeli nikel kaplamalar yapmanın arasındaki en büyük farkın parçacık takviyesi miktarının artmasıyla doğru orantılı olacak şekilde aşınma direncinin de arttığını vurgulamıştır[20]. Literatürdeki bir başka çalışmada M. Juneghani ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada çelikler üzerine saf krom kaplama ve SiC parçacık takviyeli kompozit kaplamalar yapmışlardır. Kaplama parametreleri olarak 27-36 A/dm² arasında akım yoğunluğu ve 0-25g/L SiC arasında değişim göstererek partikül takviyesi ve kaplama karıştırma hızını da 130-250 rpm arasında değişim göstererek kullanmışlardır. Bu değişen kaplama parametrelerinin aşınma oranları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Aşınma testinde tribometre cihazı olan pin-on-disc kullanmışlardır. Test sonuçlarında ise akım yoğunluğunun aşınma hızı üzerinde büyük bir etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Akım yoğunluğu 27-31A/dm² arasında giderek arttığını ancak 31-

37A/dm² arasında ise giderek azaldığını belirtmişlerdir. Kaplama sırasındaki banyo karıştırma hızının aşınma hızına etkisinde ise 130-200rpm arasında aşınma hızının giderek arttığını ancak 200-250rpm arasında ise giderek azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca parçacık takviye miktarının 20g/L konsantrasyonunda en optimum davranışları sergilediğini belirtmişlerdir. Bu miktarın üstüne çıkıldığında nanopartiküllerin aglomerasyonu artarak kaplamayı olumsuz etkilediğini ve böylece de mekanik davranışların da verimin giderek azaldığını belirtmişlerdir. Cr-SiC kompozit kaplamaların da saf Cr kaplamalara göre her türlü sürtünme katsayısının daha düşük olduğu ve daha yüksek aşınma direnci gösterdiğini belirtmişlerdir. Kaplamaların aşınmış yüzeylerini incelediklerin de ise Cr-SiC kompozit kaplamaların saf Cr kaplamalara nazaran aşınma iz genişliklerinin ve aşınma iz derinliklerinin daha düşük olduğunu belirtmişlerdir[21]. Böylece literatürden anlaşıldığı üzere metallere üzerine yapılan kompozit kaplamaların aşınma davranışları üzerindeki olumlu etkileri günümüzde hala önemle incelenmeye devam ediyor. İhtiyaçlar doğrultusunda en optimum kaplama parametrelerine ulaşmaya çalışılıyor.

Elektrokaplamalarda araştırma konusu olan bir diğer mekanik özellik ise kaplamaların yapışma dayanımıdır. Kaplamaların yüzeye iyi nüfuz etmesi ve kaplama yapışma dayanımının yüksek olması istenmektedir. Çünkü kaplamaların yüzeyden kolay sökülmesi, metallere kullanım alanlarındaki ihtiyaçlar doğrultusunda kaplamaların çok elverişli olmadığı bir göstergesidir. Örneğin, T. Dikici ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada çelikler üzerine Zn-Ni, Zn-Co ve Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamaları gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları kaplamalar doğrultusunda Zn-Ni-Co kaplamaların Zn-Ni ile Zn-Co kaplamalara göre AFM ile yüzey analizleri doğrultusunda da alaşımlı kaplamalarda daha elverişli olduğunu belirtmişlerdir. Bu çıkarımı da kaplamaların yüzeye yapışma analizinde desteklemişlerdir. Analiz sonucunda elde ettikleri sonuç ise Zn-Ni-Co kaplamaların Zn-Ni ile Zn-Co kaplamalara göre kaplamaların yüzeye yapışma mukavemetinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir[22]. Bir diğer çalışmada ise H. Kazimierczak ve arkadaşları elektrokaplama yöntemiyle çelikler üzerine hem saf Zn hem Zn-Mo kaplama yapmışlardır. Kaplamaları da Zn-Mo miktarını %0,5-%6 arasında değiştirerek farklı kaplama parametrelerinde gerçekleştirmişlerdir. Parçacık takviye miktarının kaplama yapışma mukavemeti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kaplama yapışma mukavemeti incelemek için de yaygın şekilde kullanılan çizik testi kullanmışlardır. Çizik testinde ise 0-30N yük aralığı, 5mm çizik uzunluğu ve 5m/dakika çizik hızı parametrelerini kullanmışlardır. Çizik testi sonucunda ise saf Zn kaplamaların

parçacık takviyeli Zn-Mo kaplamalara göre daha iyi yapışma mukavemeti gösterdiğini belirtmişlerdir. Ancak parçacık takviye miktarı artmasıyla Zn-Mo kaplamaların da yapışma mukavemetinin düşük miktar parçacık takviyesi olan Zn-Mo kaplamalara göre daha yüksek olduğunu da belirtmişlerdir[13]. Bir başka çalışmada ise, G. He ve arkadaşları titanyum alaşımlarının üzerine elektro kaplama yöntemiyle Zn-ZnO ve TiO₂ kaplamalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu kaplamaların titanyum alaşımlarının yüzeyine yaklaşık olarak 9.4N'luk yapışma mukavemeti gösterdiğini ve bu mukavemetin de mekanik özellikler açısından elverişli olduğunu belirtmişlerdir[23]. Bir diğer kaplama mukavemetinin ölçümleri için kullanılan test ise ASTM F 1044-99 standardına göre hazırlanan bir çekme testidir. Kaplanmış ve kaplanmamış bir metal paralel olarak standarda uygun yapıştırıcı ile birbirlerine bağlanırlar. Bu işlemden sonra da metaller yine standarda uygun şekilde belirli bir hızda çekme işlemi tabi tutulurlar. Devamında kaplanan metalin yüzeyinden kaplamanın söküldüğü kuvvet, kaplamanın yapışma mukavemeti hakkında bilgi vermiş olur. Böylece bu standarda göre yapılan çalışmalara örnek vermek gerekirse, O. Albayrak ve arkadaşları titanyum alaşımları üzerine saf hidroksiapatit ve TiO₂ parçacık takviyeli kaplamaları elektroferotik biriktirme yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Farklı kaplama parametrelerdeki gerçekleştirdikleri kaplamaların yapışma mukavemetlerini ASTM F 1044-99 standardına göre gerçekleştirmişlerdir. Böylece saf hidroksiapatit kaplamaların TiO₂ kaplamalara göre kaplanma voltajı miktarına göre bazı durumlarda daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ancak çoğu durumda özellikle kaplanma voltaj miktarının azaltılmasıyla parçacık takviyeli hidroksiapatit kaplamaların yapışma mukavemetini olumlu yönde etkilediği belirtmişlerdir[24]. Bir diğer çalışmada ise M. Wei ve arkadaşları hem çeliklerin üzerine hem de titanyum alaşımlarının üzerine hidroksiapatit kaplamaları elektroferotik biriktirme yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Kaplamaların yapışma mukavemetlerini incelemek için yine ASTM F 1044-99 standardını kullanmışlardır. Kaplanmamış bir çelik numune ve hidroksiapatit kaplanmış bir çeliği birbirlerine epoksi ile yapıştırmışlardır. Daha sonra standarda uygun şekilde çekme testi gerçekleştirmişlerdir. Standarda uygun şekilde gerçekleştirdikleri testler sonucunda çeliğin üzerine yapılmış kaplamaların titanyum üzerine yapılmış kaplamalara göre daha yüksek yapışma mukavemeti sergilediğini belirtmişlerdir[25]. Bir diğer çalışmada ise A. Rodichev ve arkadaşları ince TA kaplamaların yapışma mukavemetleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. ASTM F 1044-99 standardına benzer şekilde, kaplanmış ve kaplanmamış numunelerden yapmış oldukları çekme işlemine göre kaplamaların yapışma mukavemetlerini araştırmışlardır. ASTM F 1044-99 standardında belirtilen yapıştırıcılardan ziyade birbirinden farklı yapıştırıcılar

kullanmışlardır. Bu yapıştırıcıların kaplamalar ile olan ilişkisi doğrultusunda kaplamaların yapışma mukavemetleri hakkında incelemeleri gerçekleştirmişlerdir[26]. Böylece literatürdeki araştırmalardan anlaşıldığı üzere günümüzde kaplamaların yüzeye olan yapışma mukavemetleri hakkında araştırmalar devam etmektedir. Bu araştırmalardan da anlaşıldığı üzere en yaygın şekilde kullanılan çizik testi ile ASTM F 1044-99 standardına göre yapılan çekme testleriyle kaplamaların yapışma mukavemetleri hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir.

Elektrokaplamalarda bir diğer araştırma konusu da kaplamaların yüzey pürüzlülüğüdür. Kaplamalardaki yüzey pürüzlülüğü yükseldikçe sürtünme katsayıları daha fazla olabilmektedir. Böylelikle kaplamaların aşınma oranları da artmaktadır. Böylece kaplamaların yüzey pürüzlülükleri, mekanik geliştirmelerden başlıca olanı sürtünme katsayıları ve aşınma hızıyla bağlantılı olduğundan geçmişten günümüze yoğun bir şekilde araştırılmaya devam edilmektedir. Örneğin, A. Shamsolhodaie ve arkadaşları çelik üzerine çinko bazlı TiO_2 parçacık takviyeli elektrokaplamalar gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları kaplamalarda saf çinko kaplı çeliklerin vadi zirve değerlerinin standart sapmasının 236nm değerine sahipken TiO_2 parçacık takviyesi eklendiğinde vadi zirve değerlerinin standart sapmasının 170nm değerine gerilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca parçacık takviye miktarının arttıkça pürüzlülük değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Düşük pürüzlülük değerinin de daha uniform bir yüzey oluşturduğunu belirtmişlerdir[27]. Bir diğer çalışmada, Lidia Benea ve arkadaşları yaptıkları çalışmalar da çelikler üzerine kobalt bazlı ZrO_2 parçacık takviyeli kaplamalar gerçekleştirmişlerdir. Kobalt bazlı kaplamaların parçacık takviyeli kaplamalara göre daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca parçacık takviyesi miktarı arttıkça da yüzey pürüzlülüğünün arttığını da belirtmişlerdir. Bunlara ek olarak akım yoğunluğunun artmasıyla hem saf kobalt kaplamalarda hem de ZrO_2 parçacık takviyeli kaplamalarda yüzey pürüzlülüğünü arttığını belirtmişlerdir[28]. Bir başka çalışmada C. R. Raghavendra ve arkadaşları çelikler üzerine nikel bazlı Al_2O_3 parçacık takviyeli kaplamalar yapmışlardır. Yaptıkları kaplamalar sonucunda parçacık takviyeli kaplamaların nikel bazlı kaplamalara göre daha yüksek pürüzlülük değerleri gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün aşınma hızını arttırdığını belirtmişlerdir. Fakat nikel bazlı kaplamaların yüzey pürüzlülüğünün parçacık takviyeli kaplamalara göre daha düşük olmasına rağmen G99 standardına göre aşınma hızının daha yüksek olduğunu deneyimlemişlerdir[29].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Numune ve Kaplama Düzenegi Hazırlama

Kaplama öncesinde TI6Al4V numuneler yapılacak olan test düzeneklerine uygun olacak geometride Şekil 3.1'de belirtilen 60mm ve 70mm çaplarında temin edilmiştir. Örneğin pin on disk tribometre, çizik testi ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) için silindirik numuneler uygun olduğu için silindirik numuneler kullanılmıştır. Diğer yandan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı görüntülerinden, parçaların kesitinden kalınlık ölçümü için 30x60mm ve 40x60mm ölçülerinde plaka şeklinde titanyum numuneler kullanılmıştır. TI6Al4V alaşımlarının test düzeneklerine uygun olacak numune boyutlarının düşürülmesi için tornada çok düşük devirde ve yüksek seviye bor yağı ile soğutulularak 30mm ve 40mm çap ve 5-6mm kalınlık olacak şekilde numuneler küçültülmüştür. Ancak torna işleminden sonra TI6Al4V numune yüzeyleri kaplama açısından çok uygun olmadığından ve kaplama düzeneğine yerleştirilebilmesi açısından numunelerin kalınlıkları gene 5-6mm olacak şekilde tel erezyon yöntemiyle dilimlenmiştir. Böylece tel erezyon yöntemiyle kesilen numunelerin yüzeyleri, torna işlemi sonrası numune yüzeylerine göre çok daha hassas bir şekilde kesilmiştir. Ancak tel erezyon yöntemi ile yapılan kesimler sonucu numunelerin yüzeylerin de bölgesel kararmalar meydana gelmiştir. Bu numunelerin kararmış yüzeylerinin giderilmesi ve numunelerin kaplama yapılmaya uygun hale gelmesi için de ön yüzey işlemlerinden geçirilmiştir.



Şekil 3.1. Silindirik TI6Al4V Numuneler



Şekil 3.2. Kaplama Öncesi 30mm Çapındaki TI6Al4V Numuneleri

Kaplamanın başarısında kaplanacak numunelerin ön yüzey işlemleri yani yüzey temizlikleri ve yüzey hazırlanması çok büyük önem arz etmektedir. Bundan dolayı titanyum malzemeler kaplamalardan önce yüzey temizliği ve yüzey hazırlanması işlemlerinden geçirilmiştir. TI6Al4V numuneleri önce Şekil 3.3'te belirtilen Başkent Üniversitesi Makine Mühendisliği Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan devir ayarı ile yön ayarı yapılabilen ve su soğutmalı zımpara makinasında sırasıyla 220kum, 400 kum zımparada 1'er dakika daha sonra 800 kum ve 1200 kum zımpara da 2'şer dakika zımparalanmıştır. Bu işlemlerden sonra yüzeyindeki tel erezyondan kaynaklanan kararma izleri giderilmiştir.



Şekil 3.3. Zımpara Makinesi

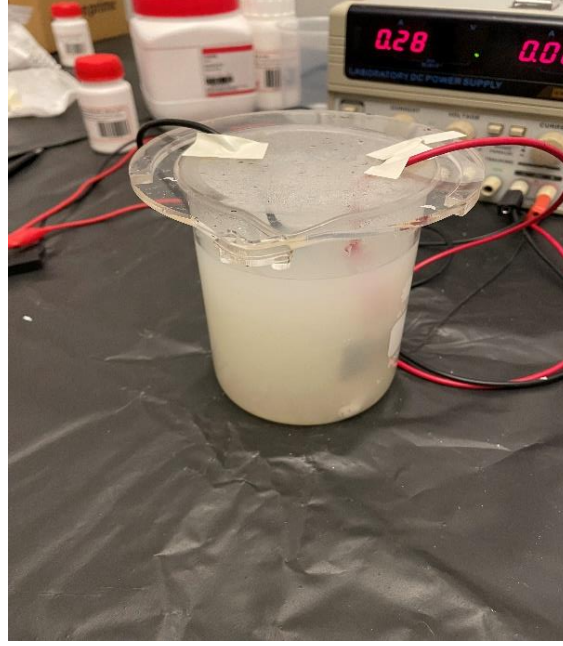
Kararma izlerinin giderilmesinden sonra TI6Al4V numuneler ön yüzey temizliği ve parlatma işlemine alınmıştır. TI6Al4V numuneler önce %50 seyreltilmiş sülfürik asitte 5 dakika süre ile bekletilmiştir. Sülfürik asitte bekletilen numuneler önce saf su ve alkol ile yıkatılıp kurutulduktan daha sonra yüzey parlatma işlemine alınmıştır. Yüzey parlatması için de sırasıyla 1200 kum ve 1500 kum, 2000 kum ve 3000 kum olacak şekilde 2'şer dakika parlatma işlemi yapılmıştır. Bu zımpara işlemlerinden sonra parlatılan numuneler daha sonra gene sırasıyla alkol ve saf suyla yıkanıp, sıcak hava ile kurutulmuştur. Kurutulan TI6Al4V numuneler daha sonra dağlama işlemine alınmıştır. Dağlama işlemi olarak 1/3 oranında seyreltilmiş sülfürik asitte numuneler 30 dakika bekletilmiştir. Bu dağlama işleminden sonra da numuneler tekrardan alkol ve saf su ile yıkanıp sıcak hava ile kurutulmuştur.

Bu işlemlerden sonra ise TI6Al4V numunelerinin kaplanacak yüzey alanları dışındaki bütün yüzeyleri Şekil 3.4'te belirtilen 3M marka elektrokaplama bantı ile kapatılmıştır. Böylece akım yoğunluğu, hesaplamalar üzerine kullanılan kaplama alanıyla kontrol edilmiştir. Elektro kaplama bantı ile yüzeyleri kapatıldıktan sonra da titanyum malzemeleri tekrardan saf su ve alkol ile yıkanıp sıcak hava ile kurutulduktan sonra hassas terazide tartılmıştır. Sadece çizik testi cihazında kaplanan numunelerin test düzeneğine montesi için elektrokaplama bantının sökülmesi gerektiğinden kaplama işlemlerinden sonra çizik testi için kaplanan numunelerin elektrokaplama bantları sökülmüştür. Böylece elektrokaplama bantları sökülen numunelerin kaplama işlemleri öncesi ağırlıkları bantsız şekilde alınmış ve kaplama işlemi yapıldıktan sonra elektrokaplama bantları sökülüp ağırlık farklı hesaplanmıştır.



Şekil 3.4. Elektro Kaplama Bantı ile Kaplanmış Numuneler

Bütün bu ön işlemlerden geçirilmiş olan TI6Al4V numunelerin kaplama işlemlerinin yapılacak olduğu beherler ise yüksek ısılara ve asidik ortamlara uygun olarak tercih edilmiş ve Şekil 3.5'te belirtilen pleksi kapaklı bir test düzeneği oluşturulmuştur. Bu test düzeneğinde kaplama işlemleri 220V değerine sahip ve 0-5A arasında akım değeri ayarlanabilen güç kaynağı ile yapılmıştır.



Şekil 3.5. Kaplama Test Düzeneği

3.1.1. TI6Al4V Numunelerin Yüzey Analizi (AFM)

Elektrokaplama yöntemiyle kaplanacak numunelerde yüzey morfolojisinin çok büyük bir önemi vardır. Kaplama öncesi belirli ön işlemlerden geçirilen TI6Al4V numuneler, zımpara vb. işlemlerden kaynaklı her bölgesinde aynı pürüzlülük değerlerini gösterememektedir. Bu yüzey pürüzlülüklerinden kaynaklı kaplama kalınlıklarında ve / veya kaplama yapışmalarında farklılıklar meydana gelebilmektedir. Bu yüzden numunelerin kaplama öncesinde Şekil 3.6'da belirtilen NanoMagnetics Instruments şirketinin bünyesinde bulunan hpAFM marka atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile yüzey analizleri yapılmıştır. Bu yüzey analiz testleri 20x20µm alanında, 10µm/saniye tarama hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. NanoMagnetics Instruments Marka hpAFM Model AFM

3.1.2. Zn Elektrokaplama

Kaplama banyolarının hazırlanmasında kaplama karıştırma süresi ve sıcaklık kontrolleri çok önemlidir. Kaplama banyosunun karışımı ve sıcaklık kontrollerinin sağlanması için Wisd Laboratory Instruments marka WiseStir model ısı ayarı yapılabilen manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Tablo 3.1’de listelenen bileşenlerden oluşan çinko kaplama banyosu topaklanma olmaması için de 120 rpm’de manyetik karıştırıcı ile oda sıcaklığında 4 saat karıştırılmıştır. Yüksek sıcaklıktaki kaplama deneylerinde ise meydana gelebilecek buharlaşma etkilerini azaltmak için sıcaklık ayarları Şekil 3.7’de belirtilen termometre ile hemen kaplama öncesinde yapılmıştır. Böylece kaplama banyosunun içeriği de sabit tutulmaya çalışılmıştır.

Tablo 3.1. Zn Kaplama Banyosu Bileşenleri ve Miktarları

Banyo Malzemeleri	Miktar (g/L)
ZnSO ₄	650
C ₆ H ₁₂ O ₆	5
H ₃ BO ₃	10



Şekil 3.7. Termometre

Ayrıca, kaplama öncesinde kaplama banyolarının pH değerleri de Şekil 3.8’da belirtilen Knmaster marka pH ölçer ile ölçülmüş ve bu değer 3- 3,5 arasında sabit tutulmuştur[30]. Banyo homojen hale geldikten ve pH’ı ölçüldükten sonra eğer pH’ı düşükse Na_2SO_4 , yüksekse H_2SO_4 eklenerek banyonun pH’ı ayarlanmıştır. Kaplama banyoları hazırlandıktan sonra anot malzemesi olarak saf Zn elektrot, katot malzemesi olarak da ön işlemlerden geçirilmiş olan Ti6Al4V numuneler kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Knmaster Marka Ph Ölçer

3.1.3. ZrO₂ Takviyeli Zn Elektrokaplama

Kaplama işleminde anot olarak Zn elektrot kullanılmış, Bölüm 3.1’de bahsedilen ön işlemlerden geçirilmiş TI6Al4V numuneler de katot olarak kullanılmıştır. Parçacık takviye malzemesi olarak Nanografi Nanotechnology firmasından alınan tane boyutu 30 nm olan %99,5 saflık oranındaki ZrO₂ kullanılmıştır. Kompozit kaplamalarda ise dikkat edilmesi gereken en büyük husus bu nano parçacıkların kaplama banyosunda homojen bir şekilde dağılmasıdır. Bu homojen dağılma, banyoların uzun süreli karıştırılmasıyla sağlanmaktadır. Çünkü kısa süreli karışırtmalarda topaklanma ve homojen dağılmama problemleri olabilmektedir. Bunları önlemek için Tablo 3.2’de listelenen bileşenler ile kaplama banyosu hazırlandıktan sonra manyetik karıştırıcıda 200 rpm’de 12 saat karıştırma işlemi yapılmış ve kaplama banyosunun pH’ı Şekil 3.8’da belirtilen ph ölçer ile 3.5 değerinde sabit tutularak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca parçacık takviyeli kaplama işlemi sırasında ZrO₂ nano parçacıklarının dibe çökmemesi için ve parçacık takviyelerinin kaplamaya dâhil olabilmesi için karıştırma işlemi kaplama süresince devam ettirilmiştir. Bu nedenle kaplama banyosu karıştırma işlemi durdurulmadan anot ve katotlar kaplama düzeneğine yerleştirilerek manyetik karışma devam ederken kaplama gerçekleştirilmiştir. Yine kaplama işlemi içinde güç kaynağı olarak 220V 0-5A arası akım ayarlaması yapılabilen güç kaynağı kullanılmıştır.

Tablo 3.2. Zn-ZrO₂ Takviyeli Kaplama Banyo Bileşenleri ve Miktarları

Banyo Bileşenleri	Miktar (g/L)
ZnSO ₄ .7H ₂ O	150
Na ₂ SO ₄	20
H ₃ BO ₃	20
SDS (yüzey aktifleştirici)	0,5
ZrO ₂	0,5-5

3.2. Deney Planı

Her bir farklı analiz için hazırlanan TI6Al4V numuneler, Tablo 3.1’de ve Tablo 3.2’de belirtilen bileşenlere göre hazırlanan kaplama banyolarında, Tablo 3.3, Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6’da her bir analiz için belirli akım yoğunluklarında, sıcaklıklarda ve varsa parçacık takviyesi ile kaplanmıştır. Her farklı analiz için olan numunelerin ölçülen kaplanan

alanları ve karşılık gelen akım değerleri de italik olarak Tablo 3.3, Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6’da verilmiştir. Tüm kaplamalarda süre 20 dakika olarak ayarlanmıştır.

Tablo 3.3. SEM Analizi İçin Zn ve Zn-ZrO₂ Kaplama Parametreleri

Numune No	Numune Alanı (dm ²)	Akım Yoğunluğu (A/dm ²)	Akım (A)	ZrO ₂ Miktarı (g/L)	Sıcaklık (°C)
1	<i>0,078</i>	4	<i>0,31</i>	0	25
2	<i>0,099</i>	4	<i>0,40</i>	0	50
3	<i>0,067</i>	6	<i>0,40</i>	0	25
4	<i>0,102</i>	6	<i>0,61</i>	0	50
5	<i>0,116</i>	4	<i>0,46</i>	0,5	50
6	<i>0,124</i>	4	<i>0,50</i>	2,5	25
7	<i>0,095</i>	4	<i>0,38</i>	2,5	50
8	<i>0,098</i>	4	<i>0,39</i>	0,5	25

Tablo 3.4. Aşınma Dayanımı Analizi Zn ve Zn-ZrO₂ Kaplama Parametreleri

Numune No	Numune Alanı (dm ²)	Akım Yoğunluğu (A/dm ²)	Akım (A)	ZrO ₂ Miktarı (g/L)	Sıcaklık (°C)
4	<i>0,1257</i>	6	<i>0,75</i>	0	50
5	<i>0,1257</i>	4	<i>0,50</i>	0,5	50
6	<i>0,1257</i>	4	<i>0,50</i>	2,5	25
8	<i>0,1257</i>	4	<i>0,50</i>	0,5	25

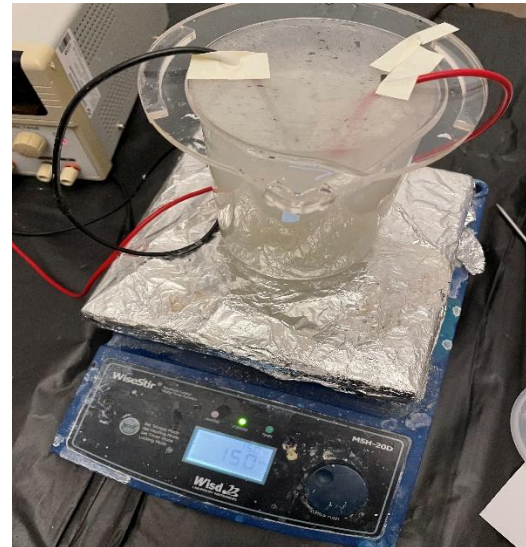
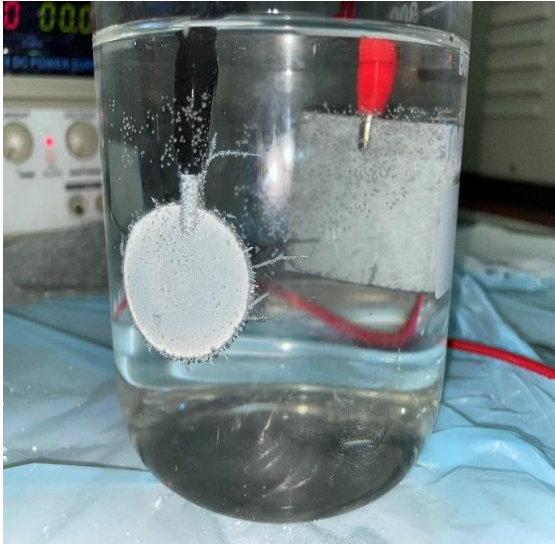
Tablo 3.5. Çizik ve Yapışma Dayanımı Analizi Zn ve Zn-ZrO₂ Kaplama Parametreleri

Numune No	Numune Alanı (dm ²)	Akım Yoğunluğu (A/dm ²)	Akım (A)	ZrO ₂ Miktarı (g/L)	Sıcaklık (°C)
4	<i>0,0707</i>	6	<i>0,42</i>	0	50
5	<i>0,0707</i>	4	<i>0,28</i>	0,5	50
6	<i>0,0707</i>	4	<i>0,28</i>	2,5	25
8	<i>0,0707</i>	4	<i>0,28</i>	0,5	25

Tablo 3.6. Pürüzlülük ve Yüzey Analizi (AFM) Zn ve Zn-ZrO₂ Kaplama Parametreleri

Numune No	Numune Alanı (dm ²)	Akım Yoğunluğu (A/dm ²)	Akım (A)	ZrO ₂ Miktarı (g/L)	Sıcaklık (°C)
4	0,1257	6	0,75	0	50
5	0,0354	4	0,14	0,5	50
6	0,0707	4	0,28	2,5	25
8	0,0707	4	0,28	0,5	25

Şekil 3.9’da belirtilen kaplanmış Ti6Al4V numuneleri kaplama banyosundan çıkartıldıktan sonra tekrardan saf su ile yıkanıp de-iyonize edilmiştir. Ağırlık farkı hesaplamalarının yapılabilmesi ve kaplama miktarının tespiti için saf su ile de-iyonize edilen kaplanmış numuneler sıcak hava ile kurutulup tekrardan hassas tartıda tartılmıştır.



Şekil 3.9. Ti6Al4V Numunelerin Zn ve Zn-ZrO₂ Kaplama Anı

Kaplama öncesi ve sonrasında tartılan katot ve anotlardaki kaplama anındaki yük geçişleri de Faraday’ın elektroliz kanunları ile açıklanabilir[31]. Faraday’ın elektroliz kanunlarındaki ortalama ağırlık hesabı[31]:

$$W = \frac{M \times I \times t}{z \times F} \quad (3.1)$$

$$M = 7,14 \frac{gr}{cm^3}$$

$$t = 1200 \text{ saniye}$$

$$z = 2$$

$$I = \text{Akım (Amper)}$$

$$\text{Faraday Sabiti} = 96485 \frac{\text{amper} \times \text{saniye}}{\text{mol}}$$

Numunelerin Faraday'ın elektroliz kanunları doğrultusundaki sonuçları ile çinko elektrokaplama yöntemiyle kaplanan numunelerin, kaplama öncesi ve sonrasındaki ağırlık farkları mukayese edilmiştir. Ayrıca anot ve katottaki ağırlık farkları Faraday'ın elektroliz kanunlarındaki ağırlık hesabı kıyaslanarak kaplamanın teori ile uyumluluğuna bakılmıştır.

3.3. Kaplamaların SEM Analizi

Kaplanan TI6Al4V numunelerin mikroyapı incelemesi için Şekil 3.10'da belirtilen 10nm tarama alanı ölçeklendirmesine kadar görüntü alabilen Tescan marka GAIA3+Oxford Xmax model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'deki belirtilen kaplama içeriklerine ve Tablo 3.3'teki kaplama parametrelerine göre kaplanmış 8 adet TI6Al4V numunelerinin kaplama yüzey incelemesi yapılmış, kaplamaların uniform dağılması araştırılmış ve kaplama kalınlıklarının ölçümleri yapılmıştır.

SEM'de incelenen numunelerin kesitlerinden kaplama kalınlıkları 200µm ve 500µm tarama alanı ölçeklendirilmesinde ölçülmüştür. Ayrıca kaplama yüzeyinin ve kaplamaların uniform dağılıma incelemesi için de yüzeye dik olacak şekilde 20µm tarama alanı ölçeklendirilmesine kadar yüzeyden görüntü alınmıştır. Bu yöntemlerle kaplama kalınlıkları belirlenmiş ve aynı sürede kaplanan numunelerin, kaplama kalınlıkları birbirlerine en yakın olan numunelerle mekanik testlere devam edilmiştir.



Şekil 3.10. Tescan Marka GAIA+30XFORD XMAX Model SEM Cihazı[32]

3.4. Aşınma Dayanımı (Pin-on-disk tribometre)

Kaplanan TI6Al4V numunelerin Şekil 3.11’de belirtilen Atılım Üniversitesi Boren Bor Kaplamaları Yetkinlik Merkezi bünyesinde bulunan CSM Instruments Tribometre cihazında aşınma dayanımı analizleri yapılmıştır. Yük uygulayan eleman (pin) olarak 6mm çaplı 100Cr6 bilya kullanılmıştır. Tribometre deney parametreleri olarakta 75mm/saniye hız, 150m ilerleme mesafesi, 9mm dönüş çapı ve 1N yük uygulanmıştır. Bu analizler sonucunda Şekil 3.12’te belirtilen kaplanmış tribometre numunelerinin aşınma miktarları, sürtünme katsayıları elde edilmiştir.



Şekil 3.11. CSM Instrument Tribometer (Aşınma Cihazı)[33]



Şekil 3.12. Tribometre Deneyinde Kullanılan Numuneler (a. Numune 5) (b. Numune 6)

Tribometre ile yapılan testler sonucunda numune yüzeylerinde oluşan aşınmaların iz genişliklerinin uzunluğu ile aşınma miktarı arasındaki bağıntıda ASTM G99 standardı ile verilmiştir[34]. Bu standarda göre Ti6Al4V numunelerin tribometre deneyleri sonrası aşınma miktarları hesaplanmıştır[34].

$$\text{Hacim Kaybı, } mm^3 = \frac{\pi \times R \times (d^3)}{6 \times r} \quad (3.2)$$

$$R = 4,5 \text{ mm}$$

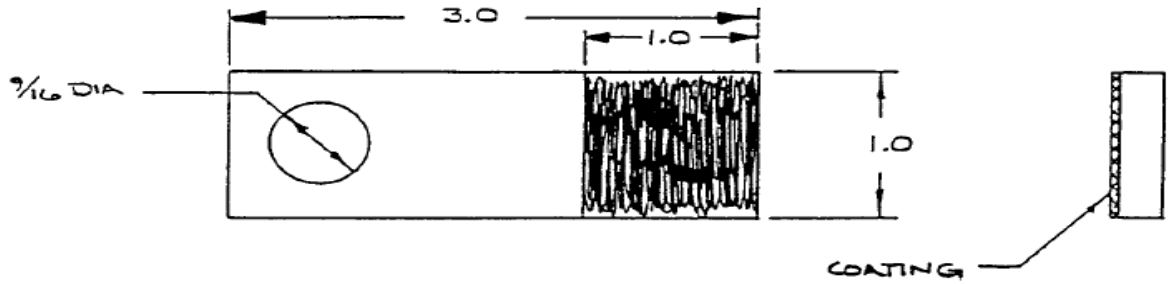
$$r = 6 \text{ mm}$$

Standarda göre iz genişliklerinin ölçümü için de Başkent Üniversitesi Makine Mühendisliği Malzeme Laboratuvarı bünyesinde bulunan CLEMEX marka optik mikroskop kullanılmıştır. Mikroskop kullanılırken ihtiyaç durumuna göre ışık miktarı, çözünürlük ayarları değiştirilmiştir. Optik mercek olarak da 5X0.10 ölçekli mercek kullanılmıştır.

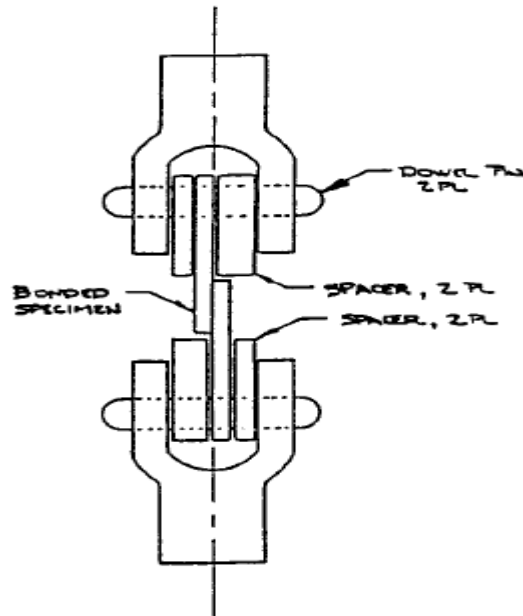
3.5. Kaplamaların Yapışma ve Çizik Dayanımı

Kaplamaların yapışma dayanım tespiti için birçok yöntem mevcuttur. Bunlardan biri ASTM F 1044 – 99 standardına uygun hazırlanan Şekil 3.13'te belirtilen numunelerin, Şekil 3.14'te belirtildiği gibi birbirlerine paralel olacak şekilde yapıştırıldıktan sonra çekme

cihazında, numunelere belirli hızlarda çekme işlemi yapılarak kaplamaların yüzeyden kaldırılması hedeflenen bir testtir[35]. Bu testte standarda uygun olacak şekilde hazırlanmış olan 6 numaralı numunenin kaplama yüzeyi ile bir adet kaplanmamış numunenin yüzeyi 3M VHB akrilik çift taraflı bant ile yapıştırılmıştır. Bantın kaplamaya ve kaplanmamış numuneye iyi nüfuz etmesi için de kürlenme süresi olarak da 7 gün belirlenmiştir. Kürlenme sonrası standarda göre tasarlanmış ve Şekil 3.15'te belirtilen numune tutuculara yerleştirilen 6 numaralı numune ve kaplanmamış numune Şekil 3.16'da belirtilen Başkent Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan INSTRON marka çekme cihazında 0,3 mm/dakika hızda test uygulanmıştır. Ancak burada yapıştırıcı bantların yeterli yüksek mukavemeti sağlayamaması sebebiyle başarılı sonuçlar alınamamıştır.



Şekil 3.13. ASTM F 1044- 99 Shear Çekme Numune Görüntüsü[35]



Şekil 3.14. ASTM F 1044- 99 Shear Çekme Mantiğı[35]



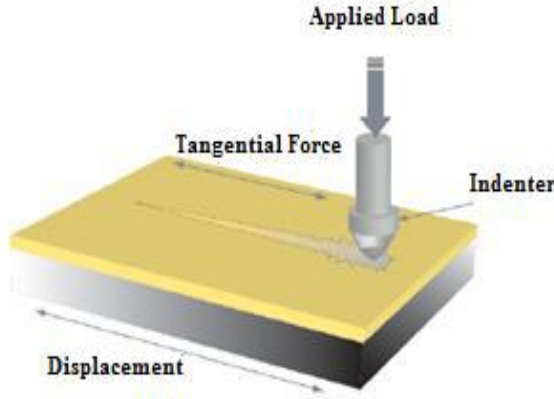
Şekil 3.15. ASTM F 1044- 99 Standardına Uygun Tasarlanmış Numune Tutucular



Şekil 3.16. Instron Marka Çekme Cihazı

Daha sonra kaplamaların yapışma dayanımı tespiti için, dayanım ölçme yöntemlerinden başka biri olan çizik testine gidilmiştir. Kaplanmış Ti6Al4V numunelerinin çizik dayanımları yani kaplamaların yüzeye bağlanma kuvvetlerini ölçmek için numunelere sabit bir hızda ve derinlikte belirli bir mesafe boyunca giderek artan bir yük uygulanır. Numunelerde bu yükler altında oluşan çiziklerin (Şekil 3.17 a.) incelenmesiyle kaplamaların yapışma mukavemetleri hakkında sonuçlar elde edilir. Kaplamaların bu testinde Atılım Üniversitesi Boren Bor Kaplamaları Yetkinlik Merkezi bünyesinde bulunan 0-100N yük aralığı, maksimum 10mm çizik mesafesi, 500mm/dakika maksimum çizik hızına sahip olan

CSM Instruments Makro scratch cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.17.b.). Deneylerde makro scratch cihazında deney parametreleri olarak da 0-30N yük aralığı, 5mm çizik mesafesi, 5mm/dakika çizik hızı kullanılmıştır.



Şekil 3.17. a. Çizik Test Şematik Gösterimi ve b. CSM Makro Çizik Test Cihazı

3.6. Kaplamaların Pürüzlülük ve Yüzey Analizi (AFM)

Kompozit kaplamalarda yüzey mikro topografisinin kullanım alanına göre önemli bir yeri vardır. Özellikle pürüzlülüğün kaplama yapılacak yüzeylerde kaplanma etkinliğinde etkisi büyüktür. Diğer yandan pürüzlülük arttığı zaman sürtünme katsayısı artar ve yüzeylerde aşınma daha fazla olabilir. Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü arttıkça kaplamaların yüzeye uniform dağılamadığı görülebilir. Bu kapsamda AFM (Şekil 3.6) ile kaplama öncesi ve deney planına göre kaplanan Ti6Al4V numunelerin kaplamalar sonrası yüzey pürüzlülükleri ve yüzey topografyaları incelenmiştir. Analiz parametreleri olarak 20x20µm alan, 10µm/saniye tarama hızı seçilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Titanyum Alaşımının Yüzey Analizi

Kaplamalar öncesi yüzey ön işlemlerinden geçirilmiş numunelerin sırasıyla yüzey pürüzlülük analizi sonuçları verilmiştir (Tablo 4.1). Her bir numunede farklı pürüzlülük değerleri elde edilmiş olup bahsi geçen numunelerin analiz sonucunda yüzeylerinin pürüzlülük ortalamaları, standart sapmaları ve vadi zirve yükseklik sonuçlarının birbirinden farklı çıkmaları, numunelerin yüzey ön işlemlerinden kaynaklanabilir. Her ne kadar bütün numunelere aynı sürelerde aynı zımparalama ve dağlama işlemleri yapılırsa da farklılıklar meydana gelebilmektedir.

Ayrıca kaplamalar öncesi yüzey ön işlemlerinin de kaplamalar üzerinde büyük bir etkisi olduğu bilinmektedir[6]. Aynı şekilde A Kong ve arkadaşları bakırlar üzerinde Ni-Co-Fe alaşımlarının elektrokaplamaları hakkında çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yapmış oldukları çalışmada 0.1-1.1 μm pürüzlülük değerine sahip bakırların kaplamalar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarla en elverişli kaplama bağlanmalarının, 0.4 μm pürüzlülük değerinde olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca pürüzlülük değeri arttığında kaplanma bağlanmasının olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir[36]. Bir diğer çalışmada pürüzlülüklerinin 5.1 μm seviyesinden 6.2 μm seviyesine çıkmasıyla ve kaplama zirve yükseklik değerinin 41.9 μm 'dan 52.7 μm 'ye çıkmasıyla kaplamaların olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir[37]. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü arttıkça meydana gelen standart sapma değerleri de 6.5 μm 'den 8.18 μm 'ye çıkmasının yine aynı şekilde kaplamaların yüzeye daha zor nüfuz ettiğini belirtmişlerdir[37].

Böylelikle tüm numunelerin pürüzlülük değerlerinin birbirlerine nano boyutlarda yakın olmasının diğer testlerdeki analiz sonuçlarının daha gerçekçi değerlendirilmesinde de etkili olduğu söylenebilir.

Tablo 4.1. Kaplanmamış Titanyum Numunelerinin Pürüzlülük Sonuçları

Numune No	Pürüzlülük (nm)	Standart Sapma(nm)	Vadi Zirve Yükseklik (nm)
1	26,6	42,1	657,3
2	38,1	51,8	489,6
3	50,5	63,2	535,1
4	56,2	84,1	886,3
5	100,0	130	1230
6	120,00	180	2010
7	121,3	153,7	852
8	81,6	133	958,8

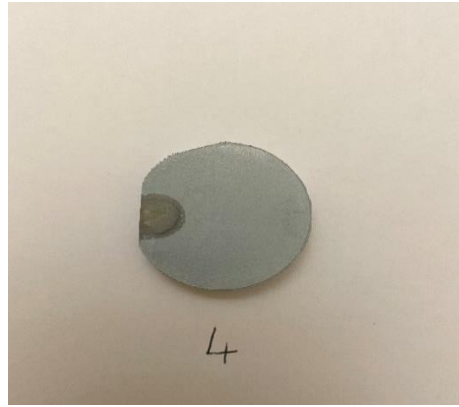
4.2. Zn Elektrokaplama

Tablo 3.1.'de belirtilmiş olan kaplama içeriklerine ve Tablo 3.3, Tablo 3.4, Tablo 3.5, Tablo 3.6'da belirtilen kaplama parametrelerine göre gerçekleştirilen kaplamalardan numune 4 Şekil 4.1.'de verilmiştir. Kaplamalar sonrası anot ve katot ağırlık farklarının hesaplarının sonuçları ise Tablo 4.2.'de listelenmiş olup grafiksel gösterimi de Şekil 4.2'de verilmiştir. Ayrıca yapılan kaplamaların Faraday'ın elektroliz kanununa göre teorik olarak katot ağırlık hesaplamaları Tablo 4.3.'de listelenmiş olup grafiksek gösterimi de Şekil 4.3'te verilmiştir. Bunlara ek olarak numunelerin akım yoğunlukları korunsu da hepsinde farklı kaplama alanları olduğundan kaplamalardaki akım miktarları farklılık göstermektedir (Tablo 3.3, Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6). Böylelikle her numune de farklı kaplama miktarları meydana gelmektedir. Ancak her ne kadar akım miktarları farklı olsa da numunelerin ağırlık değişimleri Faraday'ın elektroliz kanunlarına göre kıyaslanabilir.

Aynı akım yoğunluklarında ($4A/dm^2$) kaplanan ancak farklı kaplama banyo sıcaklıklarına sahip numune 1 ile numune 2'den kaplama banyo sıcaklığı yüksek olan numune 2'nin kaplama miktarının numune 1'e göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan aynı akım yoğunluğuna sahip ($6A/dm^2$) numune 3 ile numune 4'ten kaplama banyo sıcaklığı yüksek olan numune 4'ün kaplama miktarının numune 3'ten daha yüksek olduğu elde edilmiştir (Tablo 4.2 ve Tablo 4.3).

Böylece bütün analizlerdeki kullanılan numunelerin kaplamalar sonrası ağırlık değişimleri yani kaplama miktarları Faraday'ın ağırlık hesap teorisiyle mukayese edilerek kaplama verimliliğine bakılırsa SEM analizlerinde kullanılan numune 1'in kaplama verimliliği %89'iken kaplama banyo sıcaklığının artmasıyla numune 2'de kaplama

verimliliği %91 olarak tespit edilmiştir. Aynı şekilde SEM analizlerinde kullanılan aynı akım yoğunluğuna sahip numune 3'ün kaplama verimliliği %91'iken kaplama banyo sıcaklığının artmasıyla kaplama verimliliğinin %95'e yükseldiği tespit edilmiştir. Tribometre, çizik dayanımı ve pürüzlülük analizlerinde kullanılan numune 4'te ise kaplama verimliliği %94 olarak tespit edilmiştir. Böylece kaplama banyo sıcaklığının artmasıyla kaplama verimliliği artarak kaplama miktarının da arttığı söylenebilir. Ayrıca kaplama banyo sıcaklığının artması, yüksek akım yoğunlukların da iyon hareketliliği ve kaplama verimliliğini daha fazla etkilediği de söylenebilir. Aynı şekilde A. Hasçalık ve arkadaşının yapmış olduğu çalışmada saf Zn kaplamalarda hem akım yoğunluğu hem de kaplama banyo sıcaklığı arttıkça iyon geçişinin yani kaplama miktarının arttığını belirtmişlerdir[30].



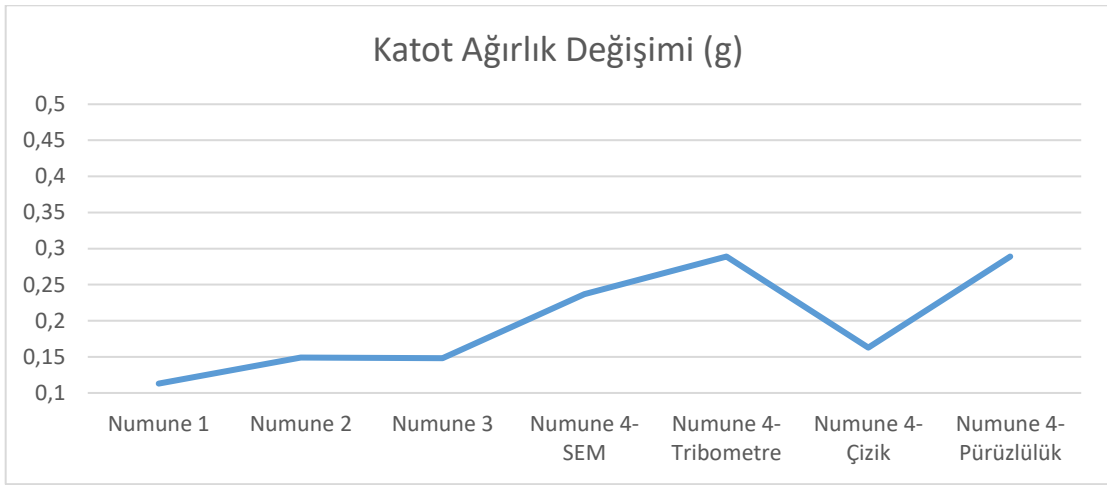
Şekil 4.1. Zn Kaplanmış Numune 4

Tablo 4.2. Anot ve Katotta Zn Kaplama Öncesi ve Sonrası Ağırlık Değişimleri

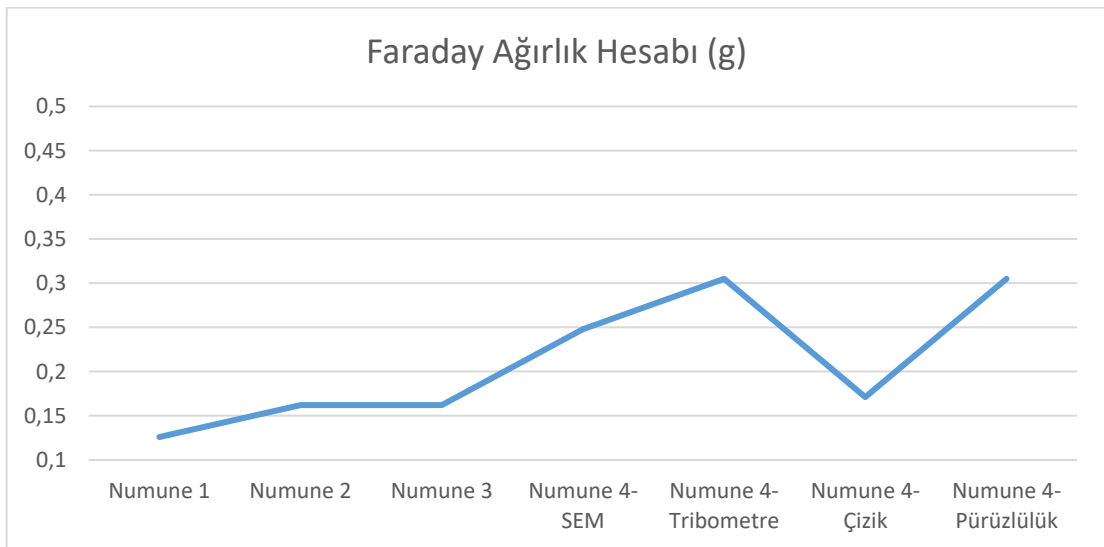
Numune No	Yapılacak Analiz	Anot İlk Ağırlık (g)	Anot Son Ağırlık (g)	Anot Ağırlık Değişimi (Δm_{anot})	Katot İlk Ağırlık (g)	Katot Son Ağırlık (g)	Katot Ağırlık Değişimi (Δm_{katot})
1	SEM	10,825	10,680	-0,145	26,663	26,776	0,113
2		10,619	10,386	-0,233	44,035	44,217	0,149
3		13,273	13,084	-0,189	26,999	27,147	0,148
4		11,050	10,721	-0,329	40,147	40,432	0,237
4	Tribometre	12,133	11,739	-0,394	33,316	33,672	0,289
4	Çizilme Dayanımı	11,003	10,775	-0,228	15,500	15,692	0,163
4	Pürüzlülük	12,133	11,739	-0,394	33,316	33,672	0,289

Tablo 4.3. Zn Kaplamaların Kaplama Sonrası Faraday Ağırlık Hesapları

Numune No	Analiz	Faraday Ağırlık Hesabı (g)
1	SEM	0,126
2		0,162
3		0,162
4		0,248
4	Tribometre	0,305
4	Çizilme Dayanımı	0,171
4	Yüzey ve Pürüzlülük Analizi	0,305



Şekil 4.2. Kaplama Sonrası Katot Ağırlık Değişimi Grafiği



Şekil 4.3. Kaplamaların Faraday Ağırlık Hesabı Grafiği

4.3. Zn-ZrO₂ Takviyeli Elektrokaplama

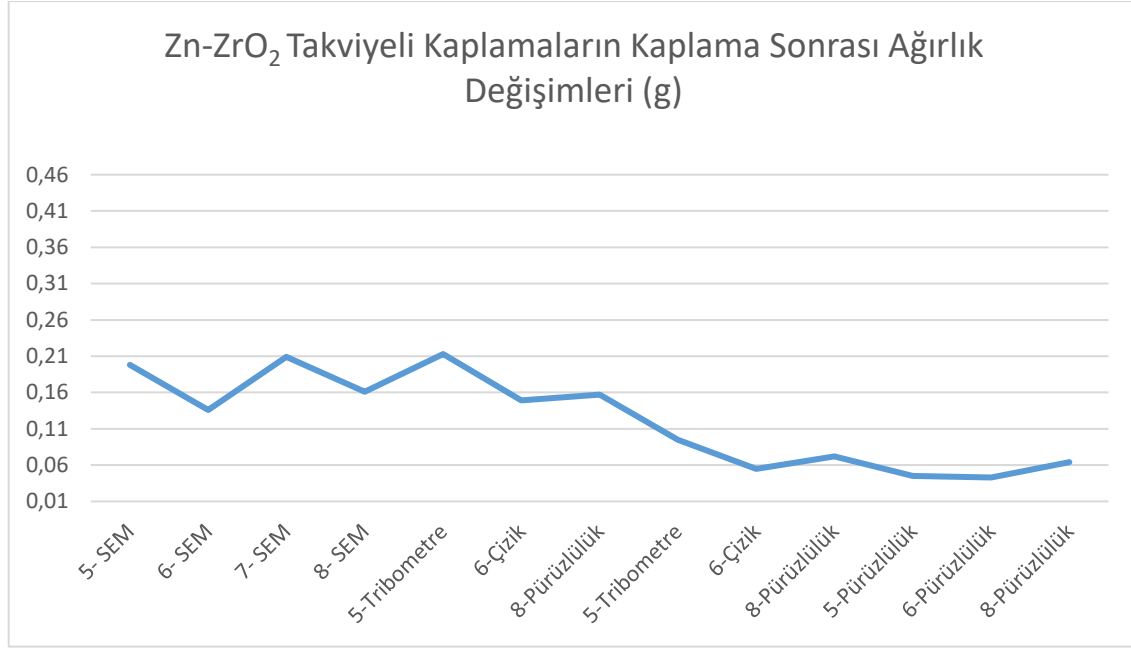
Tablo 3.3'teki 5,6,7,8 numaralı numuneler çinko içine ZrO₂ ilavesi ile gerçekleşmiş ve numune 6'nın kaplanmış hali Şekil 4.4'te belirtilmiştir. Bu numunelerde uygulanan akım yoğunluğu sabit tutulmuş (4A/dm²) kaplama parametrelerinden parçacık takviyesi miktarı ve banyo kaplama sıcaklıkları değiştirilmiştir. Kaplamalar sonucunda numunelerin kaplama öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri ve bu iki ölçüm arasındaki farklar Tablo 4.4.'de listelenmiş olup grafiksel gösterimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Buradaki SEM analizi, tribometre analizi ve çizilme dayanımı analizindeki numunelerin ağırlık değişimlerine bakıldığında aynı miktar parçacık içeren ama daha yüksek kaplama banyo sıcaklığında kaplanan numune 5'te numune 8'e göre daha fazla kaplama biriktirildiği elde edilmiştir (Tablo 4.4.). Ancak yüzey ve pürüzlülük analizindeki sonuçlarda numune 5'in numune 8'den daha az kaplama biriktirildiği elde edilmiştir (Tablo 4.4.). Bunun da sebebi numunenin kaplanacak alanının küçük olmasından kaynaklı ve akım yoğunluğunun sabit tutulmasıyla kaplama akım miktarının düşük olmasıdır (Tablo 3.6). Bunlara ek olarak, M. Zhou ve arkadaşları nikel bazlı TiO₂ parçacık takviyeli kaplamalarda, banyo sıcaklıklarının artmasıyla kaplama banyosunda iyon hareketliliğinin arttığını ancak kaplama banyo sıcaklığının artmasıyla da nikel iyonlarının hareketliliğinin TiO₂ parçacık hareketini bastırdığını ve böylece parçacık takviyelerinin iyon hareketliliğini olumsuz etkileyerek daha çok nikel iyonlarının katoda indirgenmesini belirtmişlerdir[38]. Ayrıca saf çinko kaplamalarda, akım yoğunluğu ve kaplama banyo sıcaklığı arttıkça da kaplama miktarı arttığı bilinmektedir[30]. Böylece düşük parçacık takviye miktarına sahip numune 5 ile numune 8'den kaplama banyo sıcaklığı yüksek olan numune 5'te, çinko iyon hareketliliği artıp ZrO₂ parçacık takviyesi iyon hareketliliğini bastırarak daha çok çinko kaplandığından ve kaplama banyo sıcaklığının da kaplama miktarını arttırdığından daha fazla kaplama miktarı olduğu söylenebilir. Diğer yandan, SEM analizlerindeki yüksek parçacık miktarına sahip fakat farklı kaplama banyo sıcaklıklarına sahip numune 6 ile numune 7'den kaplama banyo sıcaklığı yüksek olan numune 7'nin de kaplama miktarı daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Tablo 4.4.). Buna ek olarak numune 7'nin kaplama parametrelerinde (Tablo 3.3) parçacık takviye miktarı numune 5'e göre daha yüksek olduğundan, her ne kadar yüksek kaplama banyo sıcaklığının parçacık takviyelerinin iyon hareketliliğini bastırdığı bilinse de yüksek parçacık takviye miktarı olan banyolar da parçacık takviyesi iyonlarının, düşük parçacık takviyesi miktarı olan banyolara göre kaplamalara daha çok dahil olduğu kaplama miktarı arasındaki farktan görülerek söylenebilir (Tablo 4.4.).



Şekil 4.4. Zn-ZrO₂ Kaplanmış Numune 6

Tablo 4.4. Zn-ZrO₂ Takviyeli Kaplamaların Kaplama Sonrası Ağırlık Değişimleri

Numune No	Analiz	Anot İlk Ağırlık (g)	Anot Son Ağırlık (g)	Anot Ağırlık Değişimi (Δm_{anot})	Katot İlk Ağırlık (g)	Katot Son Ağırlık (g)	Katot Ağırlık Değişimi (Δm_{katot})
5	SEM	10,786	10,541	-0,245	41,642	41,840	0,198
6		10,662	10,502	-0,160	43,879	44,015	0,136
7		13,788	13,497	-0,291	35,743	35,952	0,209
8		12,858	12,663	-0,195	36,471	36,632	0,161
5	Tribometre	11,897	11,614	-0,283	33,360	33,573	0,213
6		11,924	11,743	-0,181	33,337	33,486	0,149
8		12,086	11,890	-0,196	33,294	33,451	0,157
5	Çizilme Dayanımı	11,630	11,486	-0,144	15,464	15,559	0,095
6		13,330	13,234	-0,096	16,238	16,293	0,055
8		11,321	11,198	-0,123	16,346	16,418	0,072
5	Yüzey ve Pürüzlülük Analizi	11,719	11,667	-0,052	9,303	9,348	0,045
6		13,373	13,297	-0,076	16,238	16,281	0,043
8		11,321	11,218	-0,103	16,346	16,410	0,064



Şekil 4.5. Zn-ZrO₂ Takviyeli Kaplamaların Kaplama Sonrası Ağırlık Değişim Grafiği

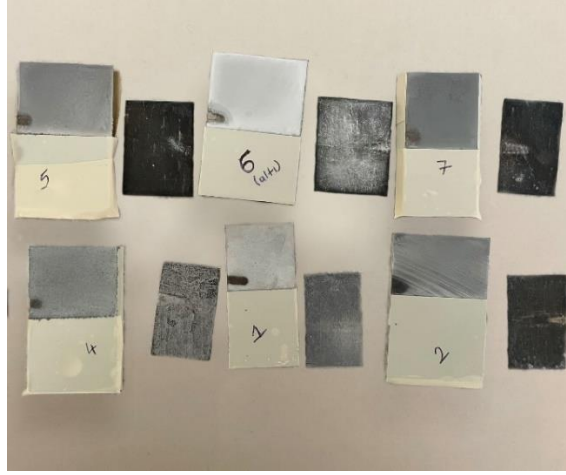
4.4. Kaplamaların SEM Analizi

Saf Zn ve Zn-ZrO₂ kaplanmış numunelerin SEM’de yapılan kesit mikro yapı incelemelerinden kaplama kalınlıkları ölçülmüştür (Şekil 4.6). 8 numunenin mikroyapıları sırasıyla tüm numuneler için Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te verilmiştir. Mikroyapılardan ölçülen kaplama kalınlıkları Tablo 4.5’te listelenmiş olup grafiksel gösterimi Şekil 4.15’te verilmiştir. Saf Zn kaplamalarda aynı akım yoğunluğunda kaplanan numune 1 ile numune 2’den kaplama banyo sıcaklığı daha yüksek numune 2’nin kaplama kalınlığının daha yüksek olduğu elde edilmiştir (Şekil 4.7. ile Şekil 4.8.). Aynı şekilde aynı akım yoğunluğunda kaplanan numune 3 ile numune 4’ten kaplama banyo sıcaklıkları daha yüksek olan numune 4’ün kaplama kalınlığı daha yüksektir (Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.). Ayrıca yine saf Zn kaplamalarda aynı banyo sıcaklığında olan numune 1 ile numune 3’ten akım yoğunluğunun daha fazla olduğu numune 3’ün kaplama kalınlığının daha yüksek olduğu elde edilmiştir (Şekil 4.7. ile Şekil 4.9). Benzer bir çalışmada A. Hasçalık ve arkadaşı elektrokaplama yöntemiyle çinko kaplamalar üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalar kapsamında akım yoğunluğu sabitken kaplama banyo sıcaklığının artmasıyla kaplama kalınlıklarının arttığını ve aynı kaplama banyo

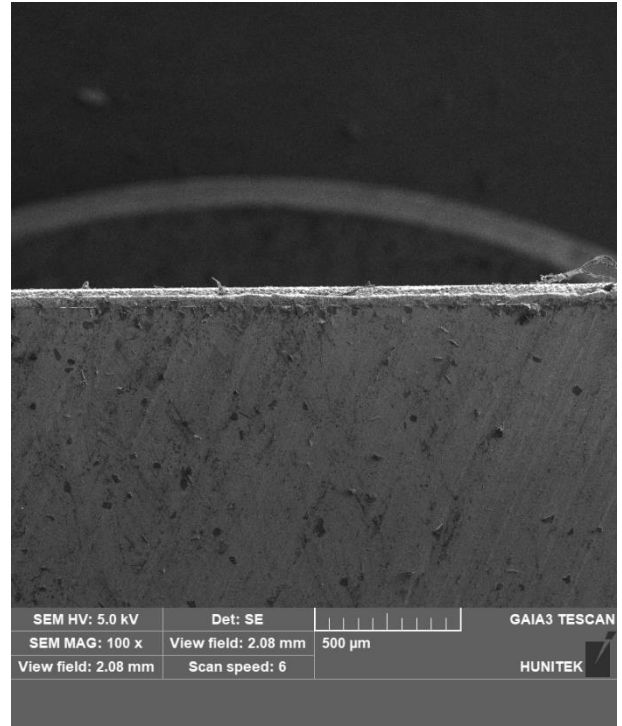
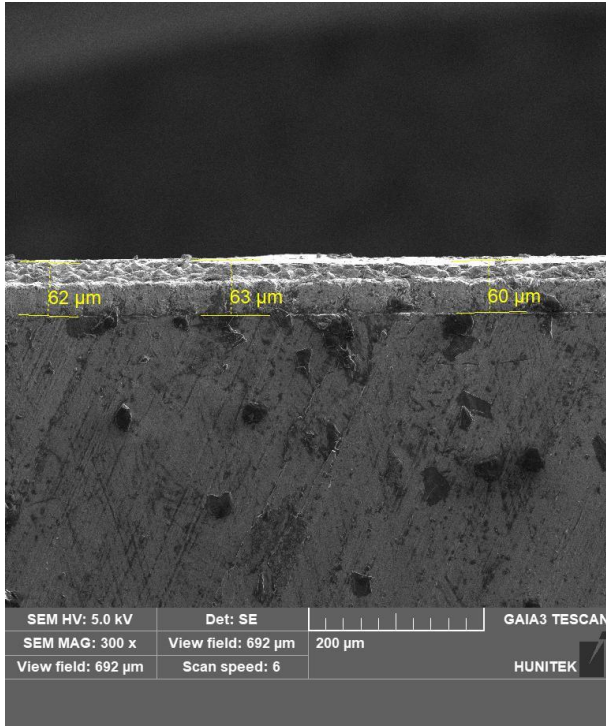
sıcaklığına sahip fakat akım yoğunluğu yüksek olan kaplamaların, kaplama kalınlığının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir[30].

Bunlara ek olarak, kaplamalardaki kaplama banyo sıcaklığının ve akım yoğunluğunun artmasıyla beraber kaplamaların ve kaplama da kullanılan anotların kaplama sonrasında daha koyu olması beklenmektedir. Bunun en başlıca sebepleri de elektrokaplama sırasında kaplama banyo sıcaklığının ve akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte oksitlenme meydana gelmesi, mekanik veya kimyasal pasiflik oluşması ve kolloidal maddelerin varlığından kaynaklanmaktadır[30][39]. Bunlara ek olarak K. Çelik yaptığı çalışmada, Zn kaplamalarda, aynı akım yoğunluğunda kaplanan fakat birbirlerinden farklı kaplama banyo sıcaklığında gerçekleşen kaplamalarda, kaplama banyo sıcaklığı yüksek olan numunelerin daha koyu şekilde kaplandığını belirtmiştir[39]. Böylece aynı akım yoğunluğuna sahip fakat farklı kaplama banyo sıcaklıklarına sahip numune 1 ve numune 2'den yüksek banyo sıcaklığında kaplanan numune 2'nin, numune 1'den kaplama sonrası numune görüntülerinde yüzey kaplamalarının daha koyu olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.6.). Aynı şekilde numune 1 ile numune 2'nin SEM analizi görüntülerinde numune 2'nin numune 1'e göre kaplamasının daha koyu olduğu elde edilmiştir (Şekil 4.7. ile Şekil 4.8.). Aynı şekilde aynı akım yoğunluğuna sahip ancak kaplama banyo sıcaklıkları farklı olan numune 3 ile numune 4'ten kaplama banyo sıcaklığı yüksek olan numune 4'ün SEM analizi görüntülerinde kaplamasının daha koyu olduğu elde edilmiştir (Şekil 4.9. ile Şekil 4.10.). Ayrıca kaplama sonrası görüntüleri verilen katotlar (numuneler) ve anotlardan (saf Zn), aynı akım yoğunluğunda fakat farklı kaplama banyo sıcaklıklarında kaplanan numunelerden numune 2'nin kaplamasında kullanılan anodun numune 1'in kaplamasında kullanılan anoduna göre kaplama sonrasında daha koyu olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.6.).

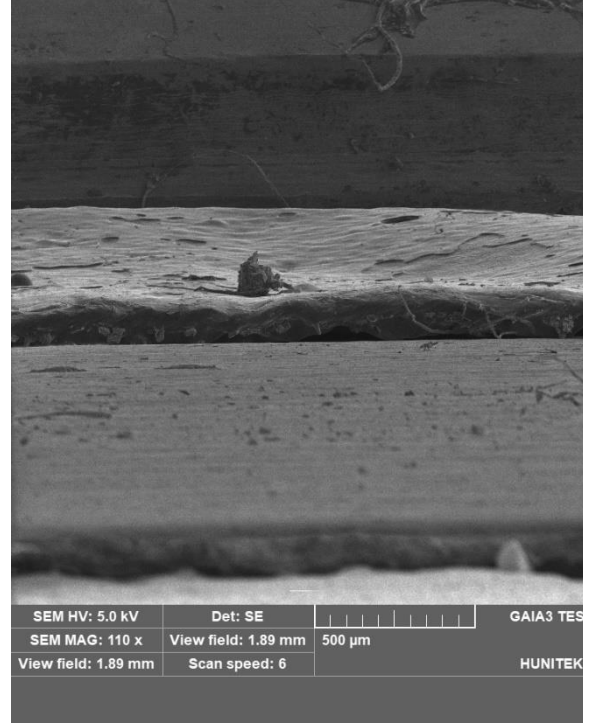
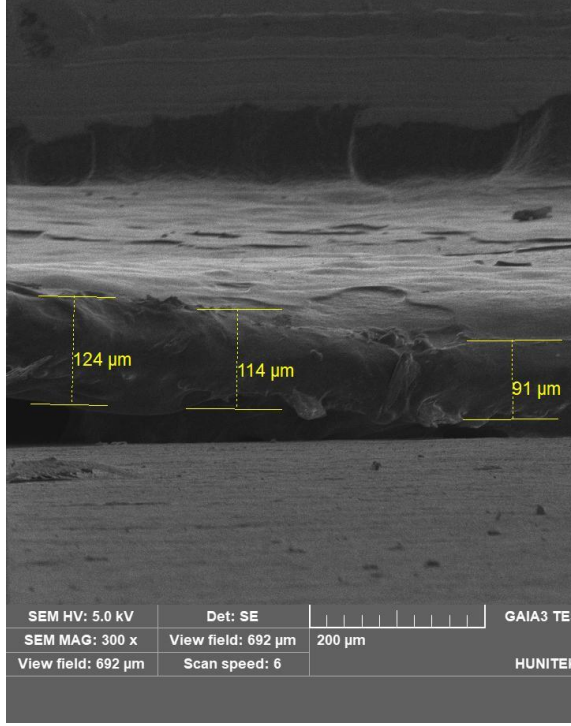
Parçacık takviyeli kaplamaların kesit görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14) parçacık takviyeli kaplamaların da aynı saf Zn kaplamalar gibi aynı akım yoğunluğunda ve aynı parçacık takviye miktarları olan numune 6 ile numune 7'den yüksek banyo sıcaklığında kaplanan numune 7'nin daha düşük kaplama banyo sıcaklığında kaplanan numune 6'ya göre kaplama kalınlığının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.12 ile Şekil 4.13.). Aynı şekilde aynı parçacık takviye miktarına sahip olup numune 6 ile numune 7'ye göre daha düşük parçacık takviye miktarına sahip olan numune 5 ile numune 8'den kaplama banyo sıcaklığı yüksek olan numune 5'in de kaplama kalınlığının numune 8'den daha yüksek olduğu elde edilmiştir (Şekil 4.11 ile Şekil 4.14.).



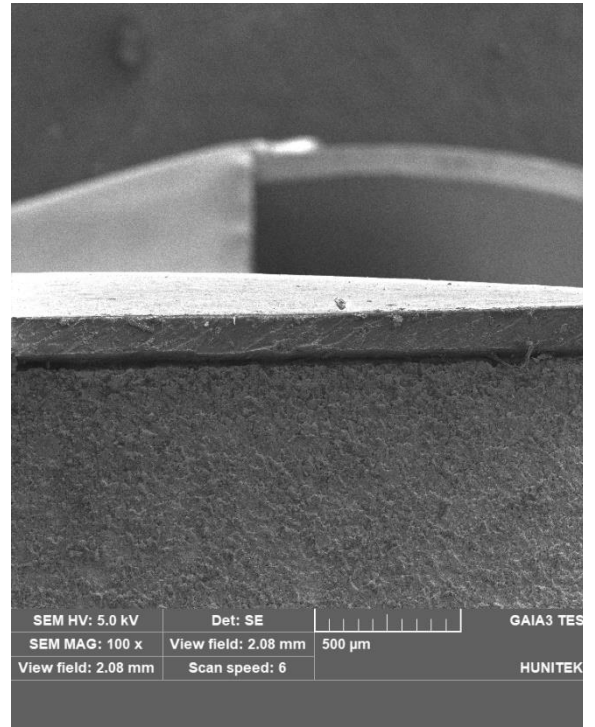
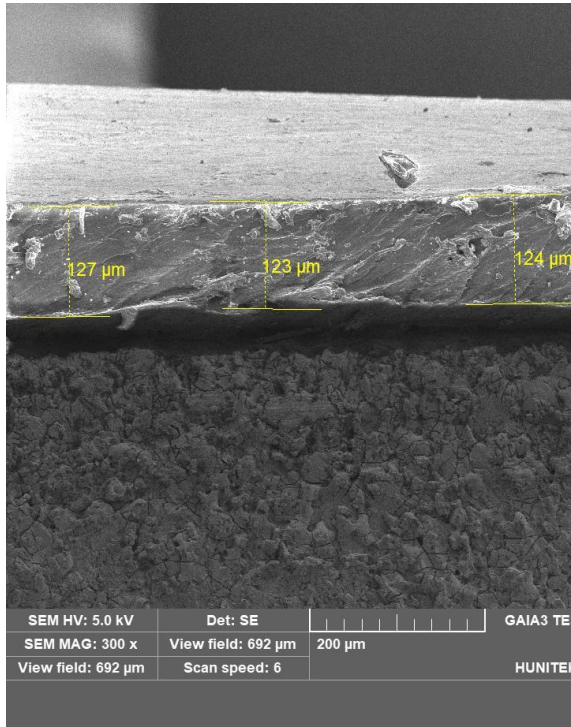
Şekil 4.6. Analizi için Kaplanmış Ti6Al4V Numune 1, 2, 4, 5, 6, 7 ve kaplamada Kullanılmış Saf Zn Anotlar



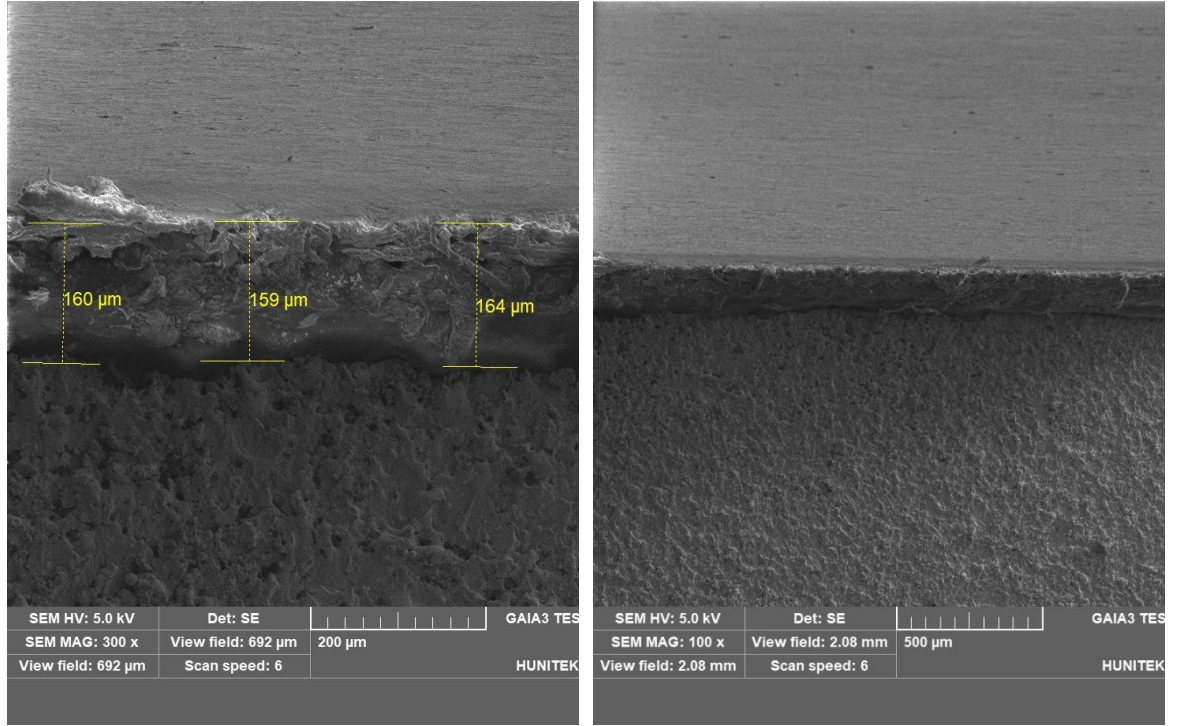
Şekil 4.7. Numune 1 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek



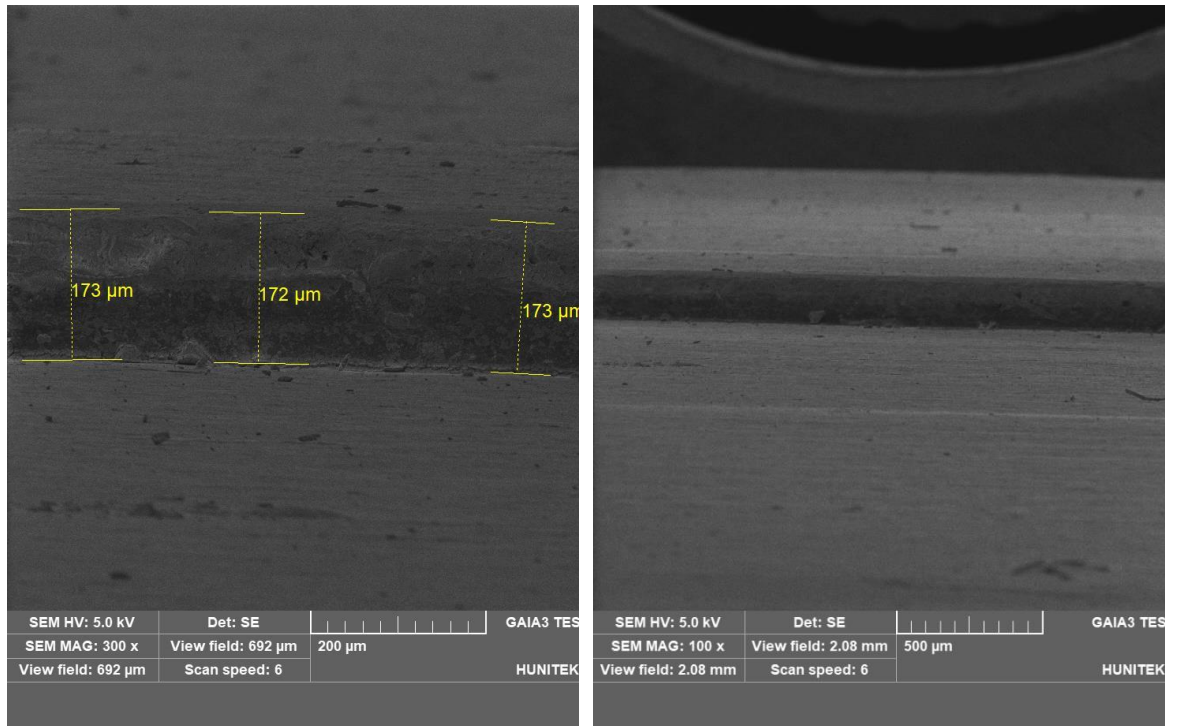
Şekil 4.8. Numune 2 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 110X Ölçek



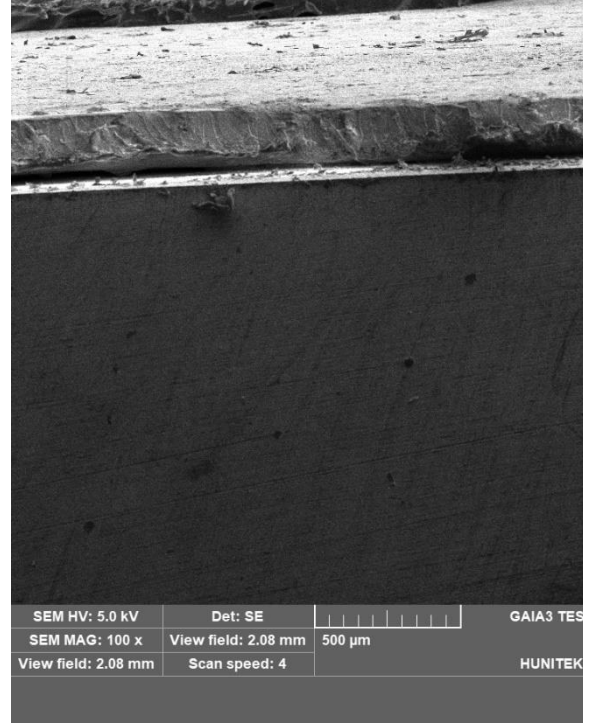
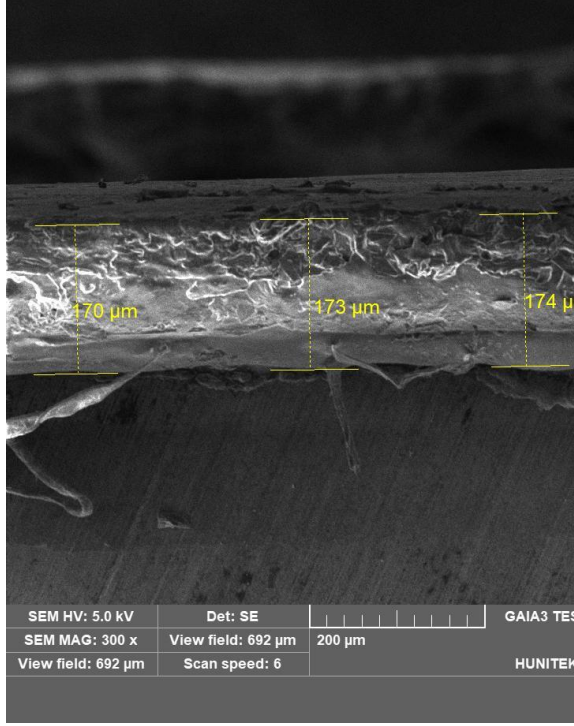
Şekil 4.9. Numune 3 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek



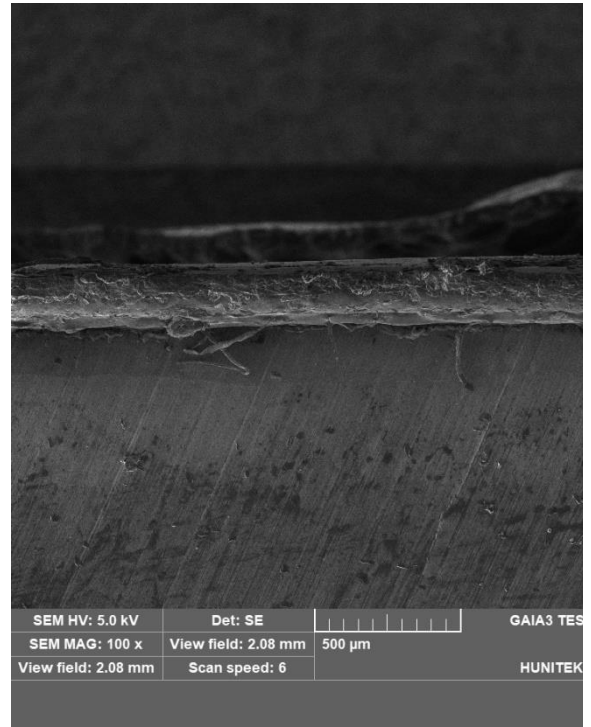
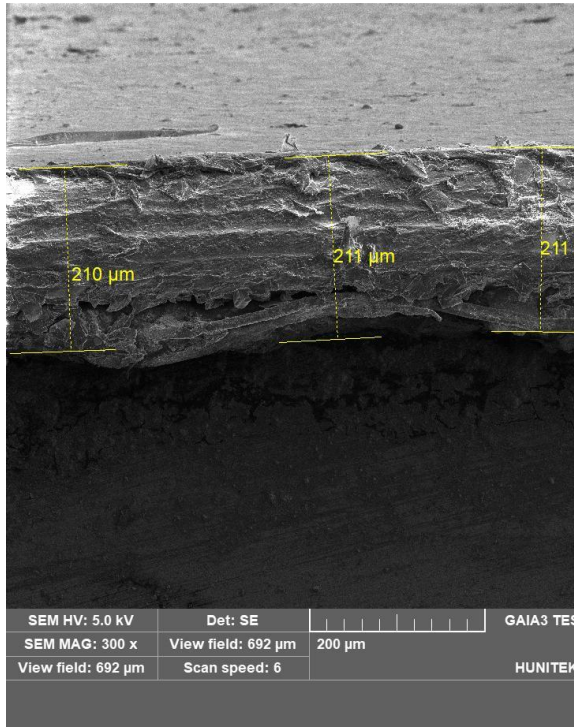
Şekil 4.10. Numune 4 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek



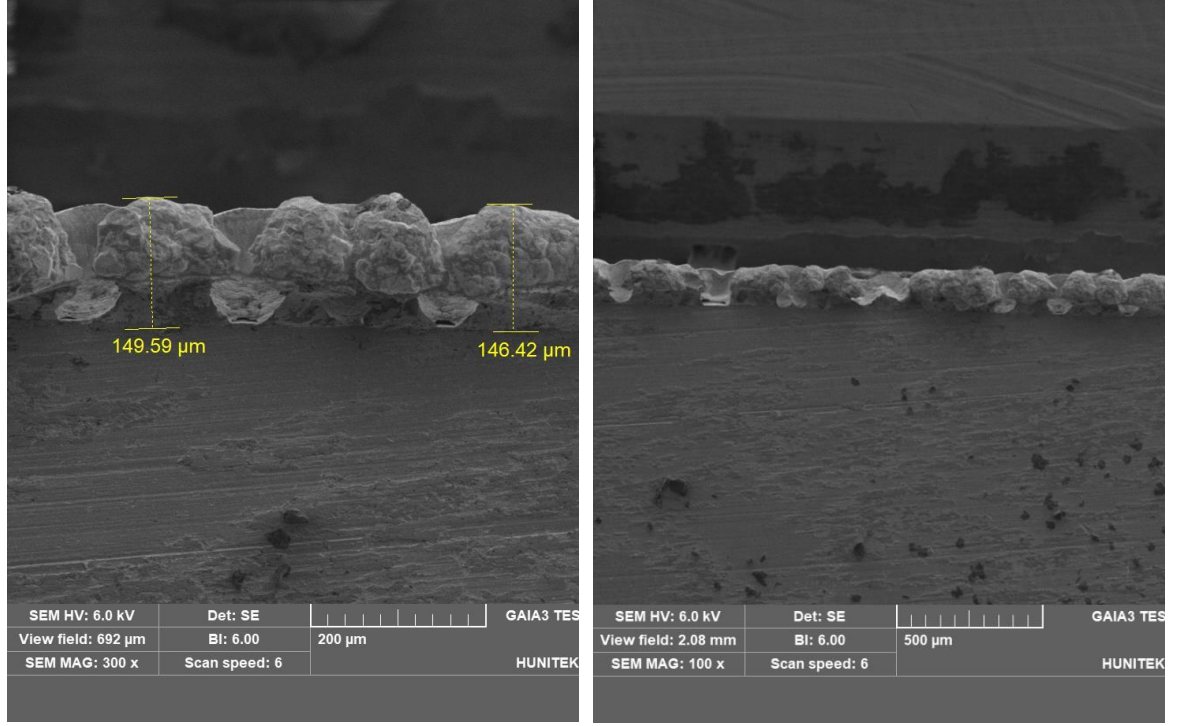
Şekil 4.11. Numune 5 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek



Şekil 4.12. Numune 6 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek



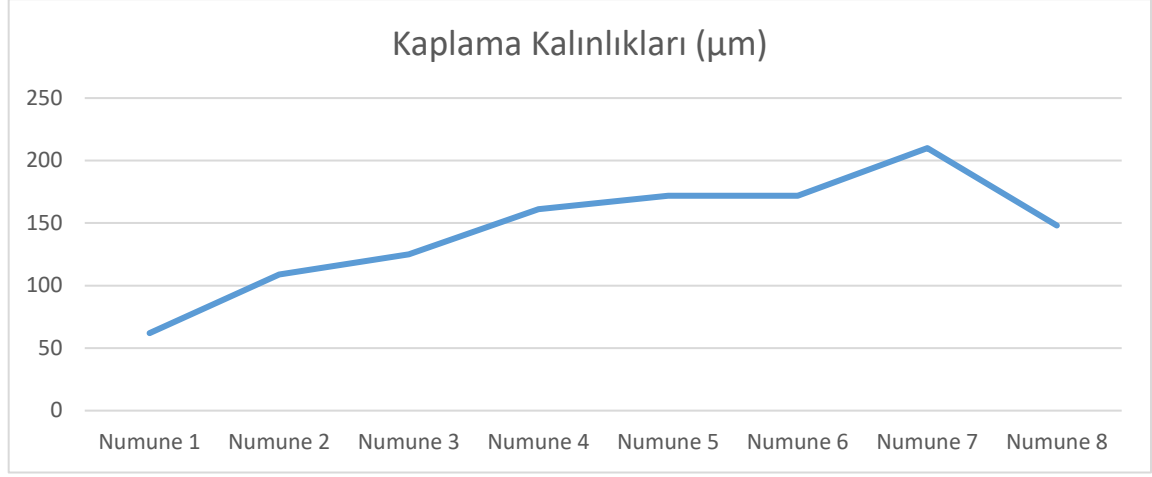
Şekil 4.13. Numune 7 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek



Şekil 4.14. Numune 8 Kaplama Kalınlığı Ölçümü SEM Görüntüleri a. 300X Ölçek b. 100X Ölçek

Tablo 4.5. Numunelerin SEM Analizi Kaplama Kalınlıkları

Numune No	Kaplama Kalınlıkları (μm)
1	62
2	109
3	125
4	161
5	172
6	172
7	210
8	148



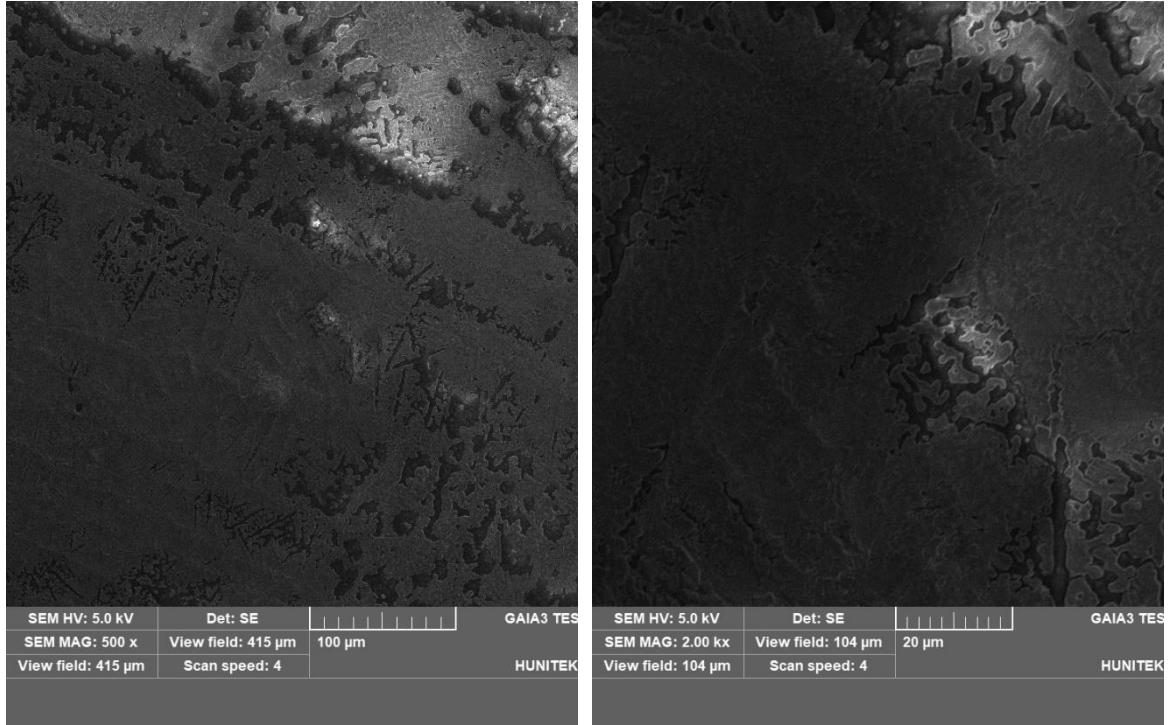
Şekil 4.15. Numunelerin SEM Analizi Kaplama Kalınlıkları Grafiği

Zn-ZrO₂ kaplanmış numunelerin yüzey mikro yapıları da numune 5,6,7 ve 8 için sırasıyla da Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'te verilmiştir. Parçacık takviyeli kaplamaların mikro yapılarına bakıldığında; aynı parçacık takviye miktarına sahip (2.5g ZrO₂) numune 6 ile numune 7'den, kaplama banyo sıcaklığının düşük olan numune 6'nın kaplama banyo sıcaklığı yüksek olan numune 7'ye göre kaplamaların yüzeye uniform şekilde dağıldığı elde edilmiştir (Şekil 4.17 ve Şekil 4.18). Buna ek olarak aynı miktarda fakat numune 6 ile numune 7'ye göre parçacık takviye miktarına daha düşük olan (0.5g ZrO₂) numune 5 ile numune 8 kıyaslandığında daha düşük banyo kaplama sıcaklığına sahip olan numune 8'in de daha yüksek banyo kaplama sıcaklığına sahip numune 5'e göre kaplamalarının yüzeye daha uniform dağıldığı elde edilmiştir (Şekil 4.16 ile 4.19). Bunlara ek olarak, kaplama banyo sıcaklıklarının artmasıyla kaplama banyosundaki iyon hareketliliğinin arttığı ancak anotta kullanılan malzemenin iyon hareketliliği parçacık takviyelerinin iyon hareketliliğini bastırdığı bilinmektedir[38]. Bir diğer çalışmada K. Çelik, Zn kaplamalarda, aynı akım yoğunluğunda kaplanan fakat birbirlerinden farklı kaplama banyo sıcaklığında gerçekleşen kaplamaların, 25°C üzerindeki kaplamalarda, sıcaklığın artmasıyla kaplama yüzeylerinin bozulmaya başladığını belirtmiştir[39]. Bir başka çalışmada H. Natter ve arkadaşları çelikler üzerine çinko bazlı TiO₂ parçacık takviyeli kaplamalar yapmıştır. Yaptıkları kaplamaları ise ideal oda sıcaklığında gerçekleştirmişlerdir[8].

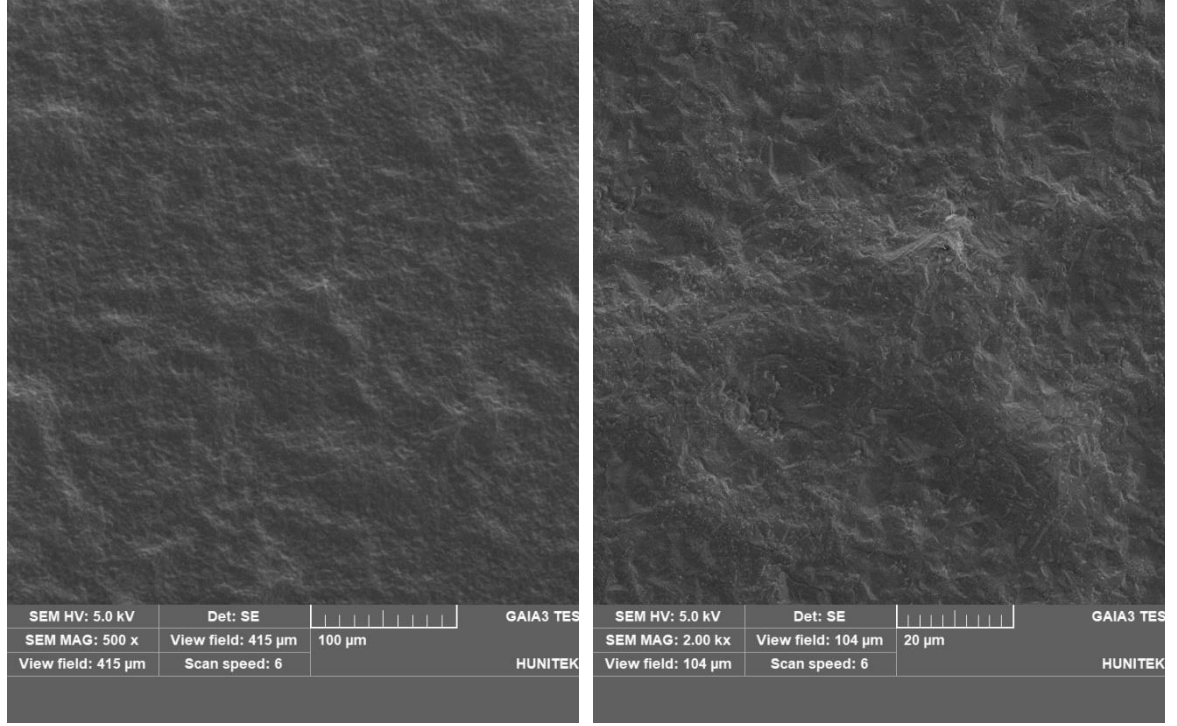
Böylece kaplama banyo sıcaklığının artmasıyla saf çinko iyonlarının ve parçacık takviyelerinin iyon hareketliliği artmış olabilir. Bundan dolayı saf çinko iyon hareketliliği parçacık takviyelerinin iyon hareketliliğini bastırmış da olabilir. Böylece numune 5 ile

numune 7'nin, kaplama banyo sıcaklığının yüksek olmasıyla, saf çinko iyonları kaplamaya daha çok dahil olabilir. Ancak saf Zn kaplamalarının da yüksek banyo sıcaklığında yüzeyleri bozulduğundan, kaplamalar yüzeye uniform dağılamamış olabilir (Şekil 4.16. ve Şekil 4.18.).

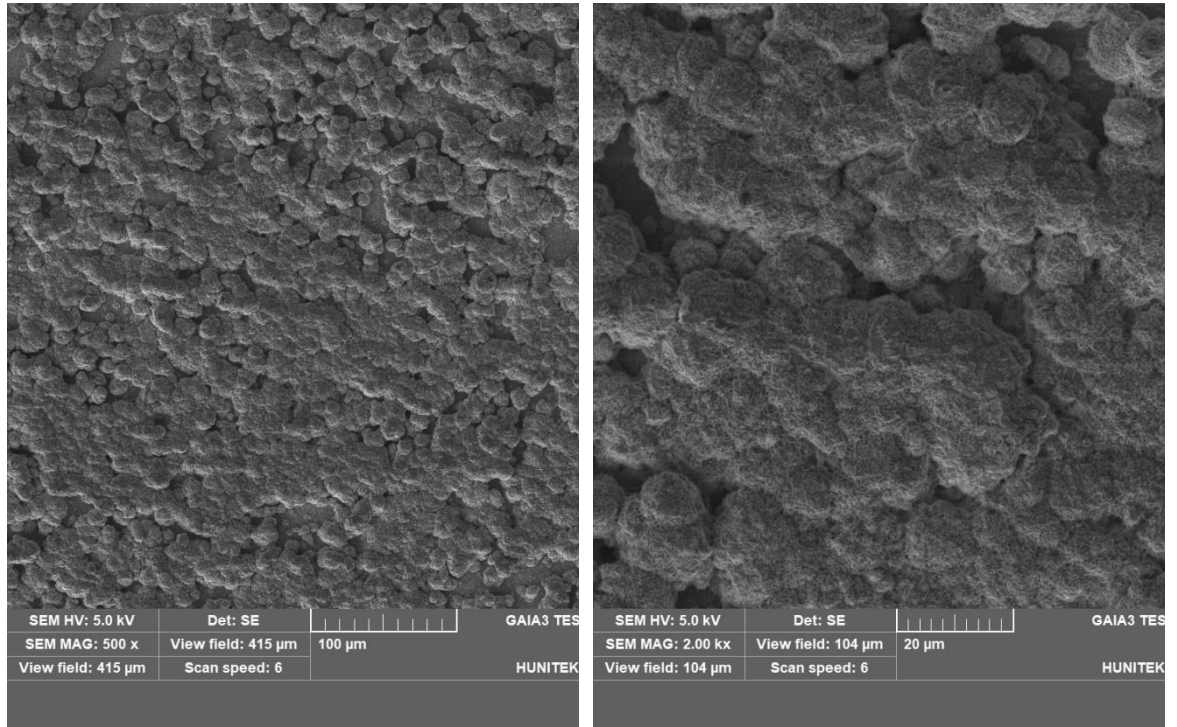
Ayrıca parçacık takviye miktarı aynı olan (0.5g ZrO₂) numune 5 ile numune 8'den yüksek banyo sıcaklığında kaplanan numune 5'in numune 8'e göre yüzeyinde daha fazla kararma olduğu gözlemlenmektedir (4.16. ve Şekil 4.19.). Buna ek olarak aynı parçacık takviye miktarına sahip olan (2.5g ZrO₂) numune 6 ile numune 7'den kaplama banyo sıcaklıklarından düşük olan numune 6'nın numune 7'ye göre kaplama yüzeyinin parçacık takviyesi rengi olan beyaza daha yakın olduğu elde edilmiştir (Şekil 4.6.).



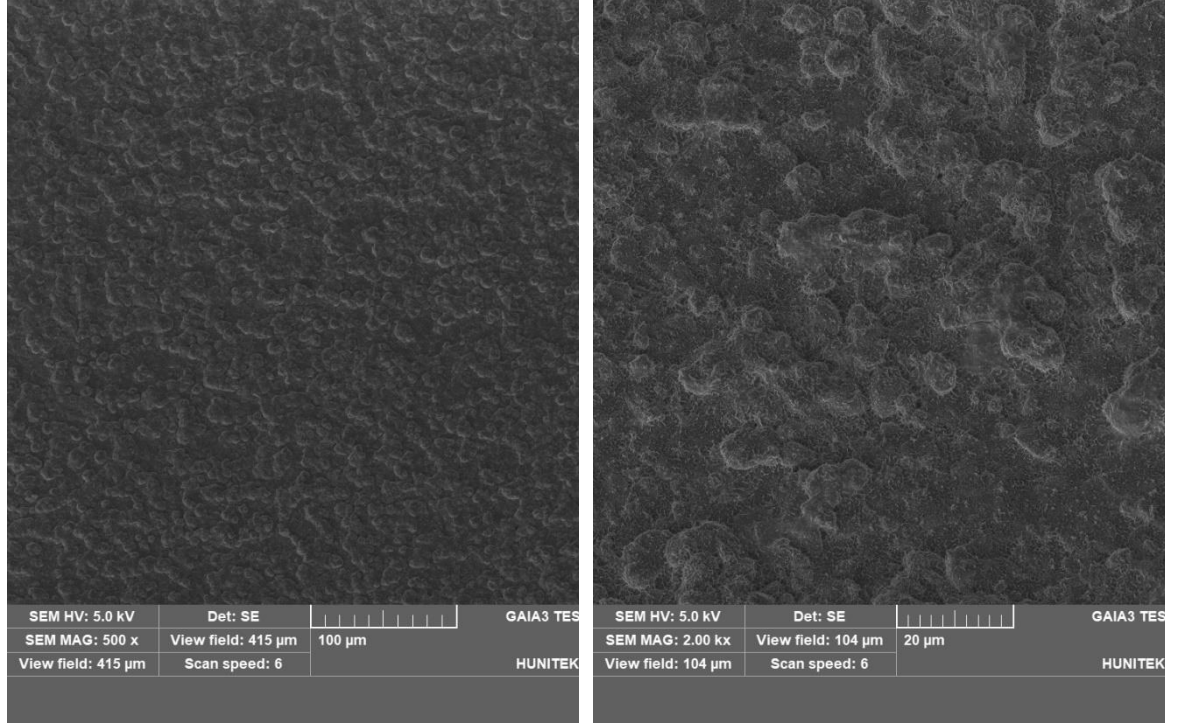
Şekil 4.16. Numune 5 Kaplama Yüzey İncelemesi SEM Görüntüleri a. 500X Ölçek b. 2000X Ölçek



Şekil 4.17. Numune 6 Kaplama Yüzey İncelemesi SEM Görüntüleri a. 500X Ölçek b. 2000X Ölçek



Şekil 4.18. Numune 7 Kaplama Yüzey İncelemesi SEM Görüntüleri a. 500X Ölçek b. 2000X Ölçek



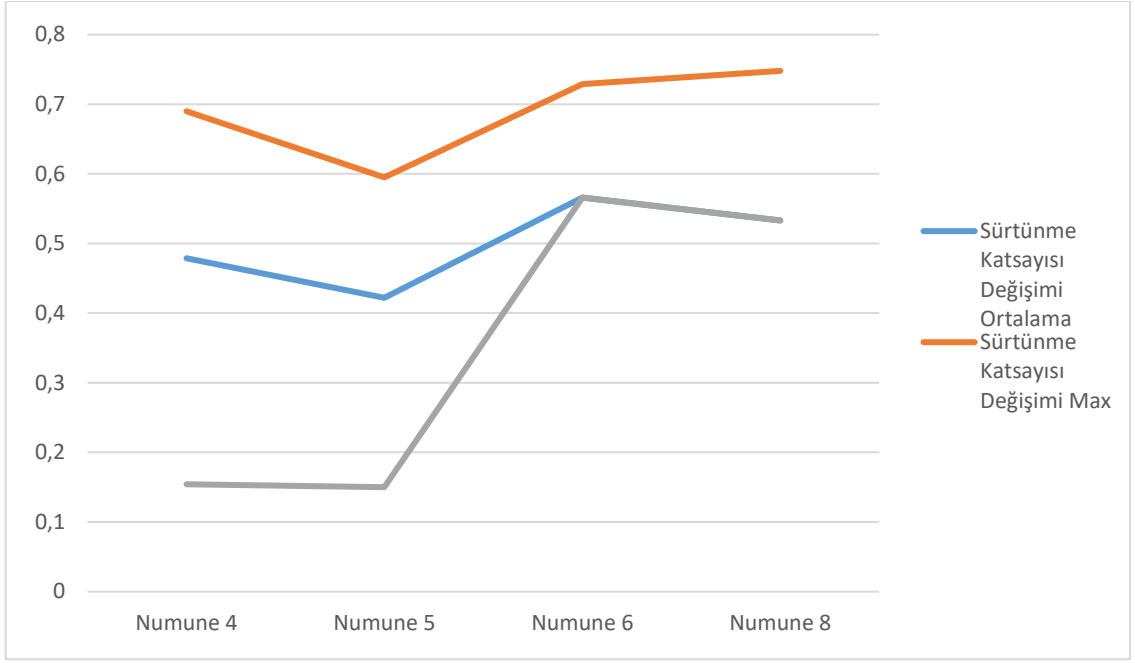
Şekil 4.19. Numune 8 Kaplama Yüzey İncelemesi SEM Görüntüleri a. 500X Ölçek b. 2000X Ölçek

4.5. Kaplamaların Aşınma Dayanımı Analiz Sonuçları

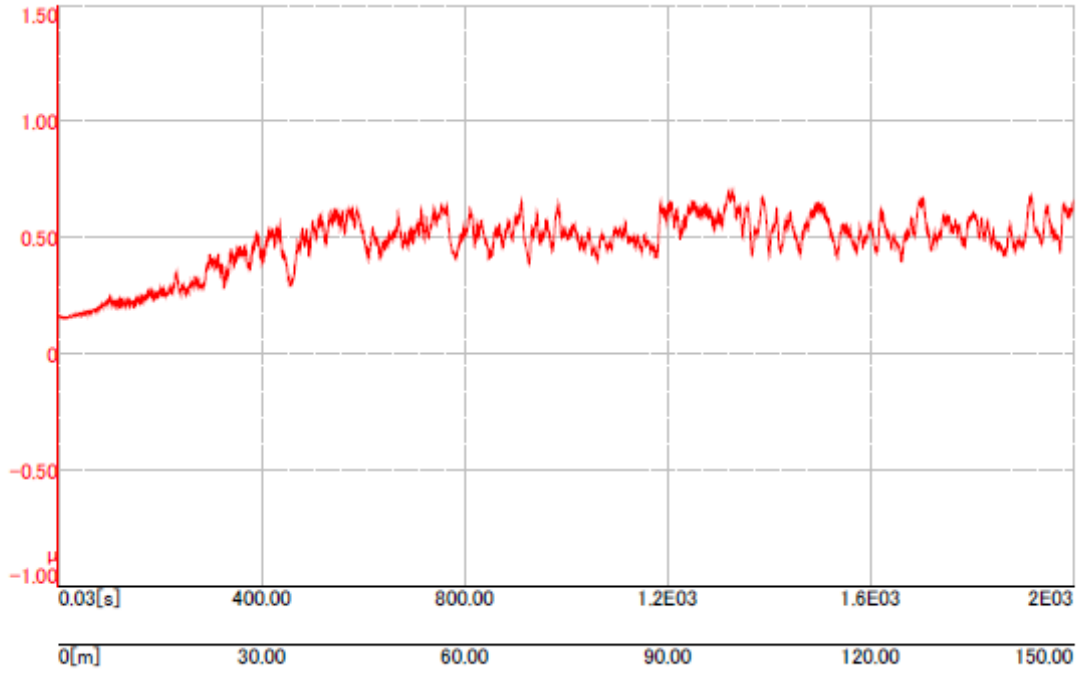
Tablo 3.4'teki numune 4, 5, 6 ve 8 için pin on disk tirbometre ile aşınma testleri yapılmıştır. Test sonuçları sürtünme katsayılarının ortalama, maksimum ve minimum olacak şekilde Tablo 4.6'da verilmiş olup Şekil 4.20'de grafiksel gösterimi verilmiştir. Bahsi geçen bu numunelerin aynı şekilde analiz boyunca sürtünme katsayılarındaki değişim grafiği sonuçları Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te verilmiştir.

Tablo 4.6. Numunelerin Sürtünme Katsayısı Sonuçları

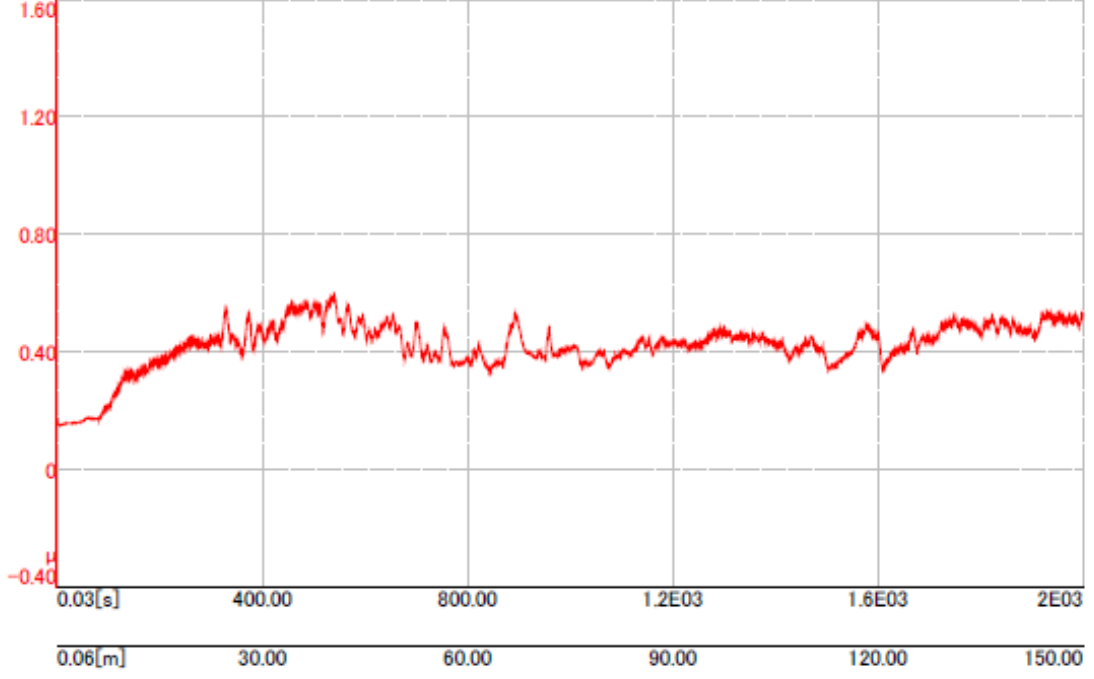
Numune No	Sürtünme Katsayısı Ortalama	Sürtünme Katsayısı Max	Sürtünme Katsayısı Min
4	0,479	0,690	0,154
5	0,422	0,595	0,150
6	0,566	0,729	0,566
8	0,533	0,748	0,533



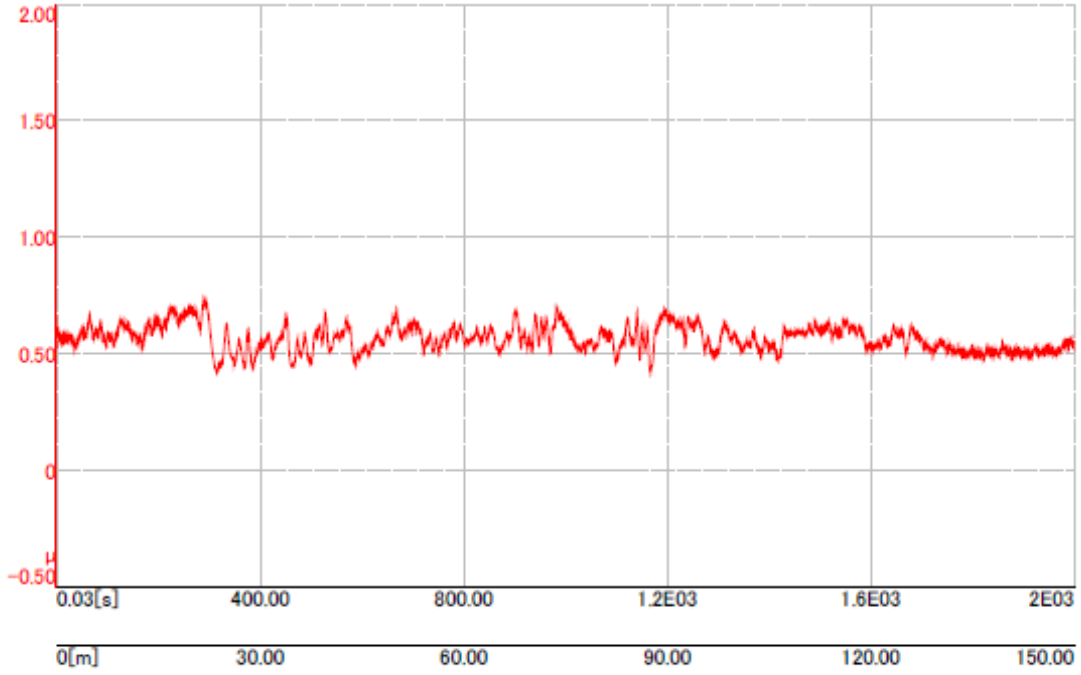
Şekil 4.20. Numunelerin Sürtünme Katsayısı Sonuç Grafiği



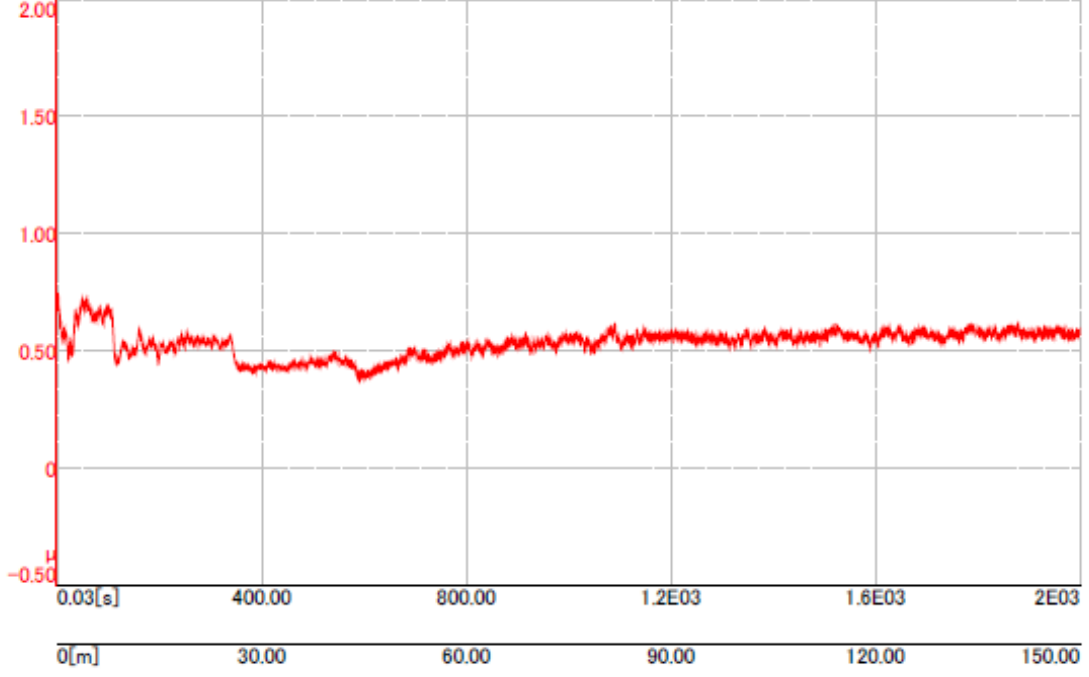
Şekil 4.21. Numune 4'ün 1N Yük Altında Yola Bağlı Sürtünme Katsayılarındaki Değişimleri



Şekil 4.22. Numune 5'in 1N Yük Altında Yola Bağlı Sürtünme Katsayılarındaki Değişimleri



Şekil 4.23. Numune 6'nın Yük Altında Yola Bağlı Sürtünme Katsayılarındaki Değişimleri



Şekil 4.24. Numune 8'in 1N Yük Altında Yola Bağlı Sürtünme Katsayılarındaki Değişimler

Parçacık takviye miktarı yüksek olan numune 6'nın parçacık takviyesi miktarı düşük olan numune 5 ile numune 8'den ve saf Zn kaplanan numune 4'ten sürtünme katsayısının daha yüksek olduğu elde edilmiştir. Ancak saf Zn kaplanan numune 4'ün parçacık takviyesi az olan ve yüksek banyo sıcaklığında kaplanan numune 5'ten sürtünme katsayısı daha yüksektir (Tablo 4.6.). Bunlara ek olarak aynı parçacık takviye miktarına sahip olan numune 8 ile numune 5'ten kaplama banyo sıcaklığı ideal oda sıcaklığı olan numune 8'in numune 5'e göre sürtünme katsayısı daha yüksektir. Ayrıca S. Pouladi ve arkadaşları nikel bazlı alaşımlar üzerine SiC parçacık takviyeli kaplamalar üzerine yaptıkları çalışmada, SiC parçacık takviyeli kompozit kaplamaların, alaşım bazlı nikellere göre daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğunu belirtmişlerdir[17]. Diğer bir çalışmada ise Ion-Dragos Utu ve arkadaşları saf Zn kaplamalarla, alüminyum oksit parçacık takviyeli Zn kaplamaların aşınma dayanımları üzerindeki çalışmalarında, saf Zn kaplamaların alüminyum oksit parçacık takviyeli kompozit kaplamalara göre sürtünme katsayılarının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [18]. Ayrıca kaplama banyo sıcaklığının artmasıyla saf Zn iyon hareketliliğinin ZrO₂ iyon hareketliliğini bastırarak kaplamalara daha çok saf çinkoların dahil

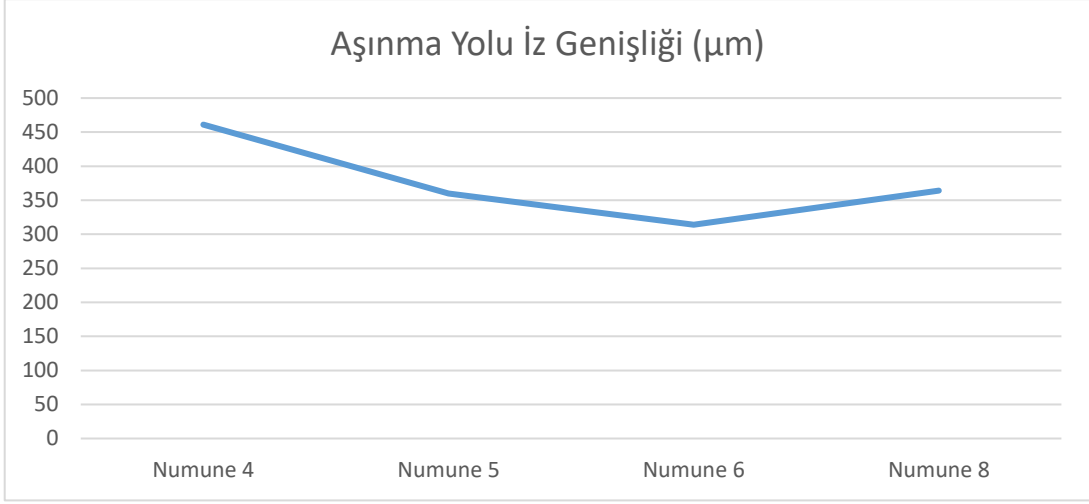
olduğunu ve saf çinko kaplamalarda yüksek banyo sıcaklıklarında kaplama yüzeyinin de bozulduğu bilinmektedir[30][39][38].

Böylece ideal oda sıcaklığına sahip kaplama banyolarında parçacık takviyeli kaplamalar yapmanın, saf çinko kaplamalar yapmaya göre sürtünme katsayısını arttırdığı söylenebilir. Ancak yüksek kaplama banyo sıcaklıklarında parçacık takviyeli kaplamalar yapmanın, çinko iyon hareketliliğinin parçacık takviyesi iyon hareketliliğini bastırıp kaplamalara daha çok dahil olmasından sürtünme katsayısını düşürdüğü söylenebilir.

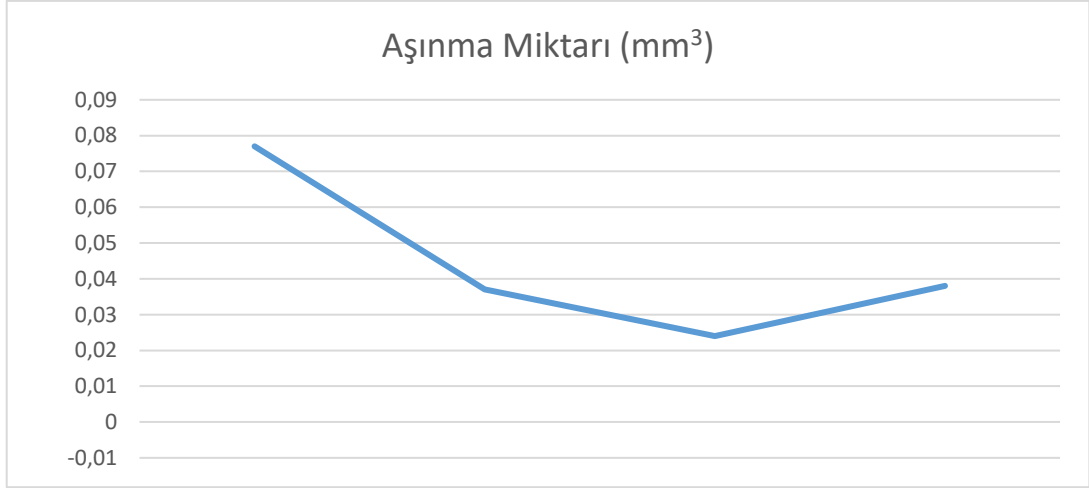
Bunlara ek olarak, ASTM G99 standardına göre numunelerin analiz sonrasında aşınma yolu iz genişlikleri belirlenmiştir[34]. Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'te ölçüm sonrası mikroskop görüntüleri verilmiştir. Aşınma yolu iz genişliklerinin belirlenmesinden sonra aşınma miktarları ve aşınma oranları hesaplanmış ve aşınma miktarları Tablo 4.7'de listelenmiş olup grafiksel gösterimleri ise Şekil 4.25. ve Şekil 4.26'da verilmiştir.

Tablo 4.7. Numunelerin Aşınma Analizi Sonuçları

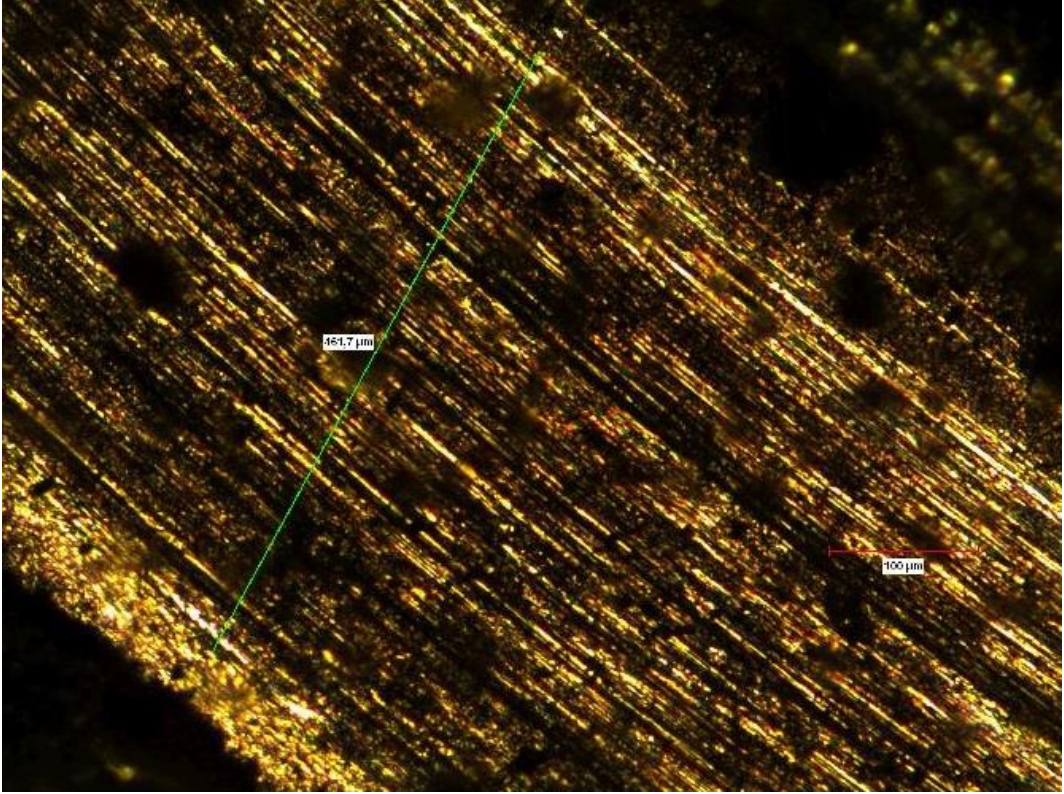
Numune No	Aşınma Yolu İz Genişliği (μm)	Aşınma Miktarı (mm^3)	Aşınma Hızı ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)
4	461	0,077	0,00051
5	360	0,037	0,00024
6	314	0,024	0,00016
8	364	0,038	0,00025



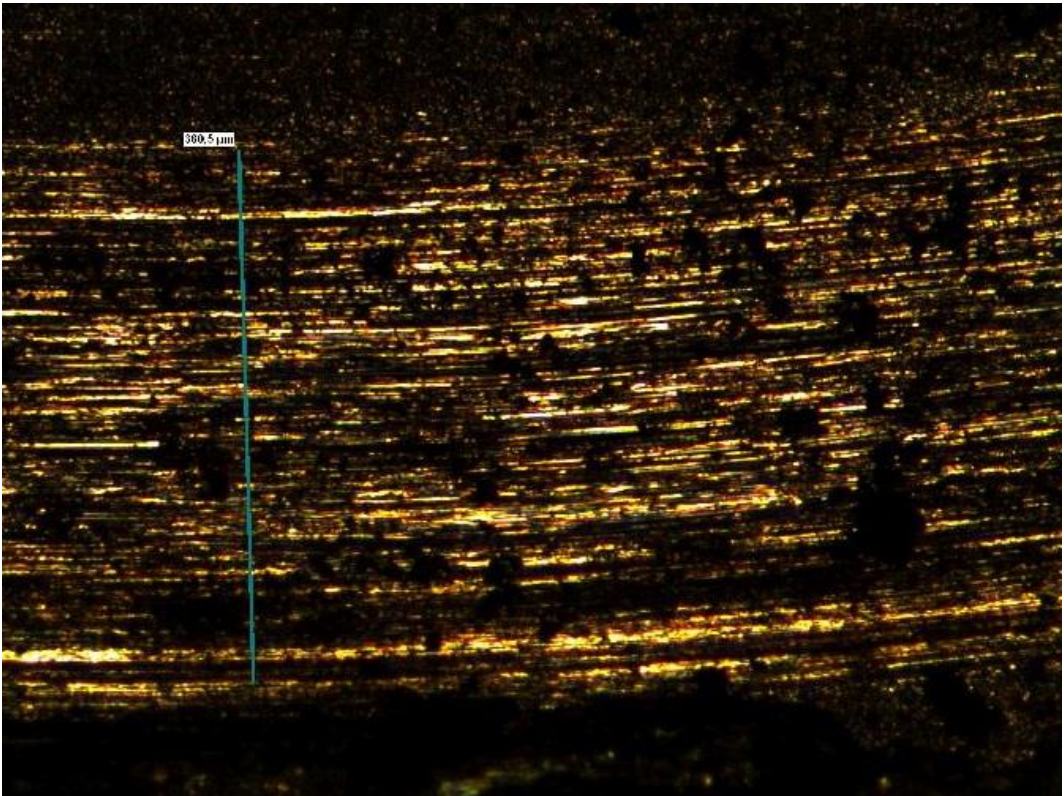
Şekil 4.25. Aşınma Yolu İz Genişliği Grafiği



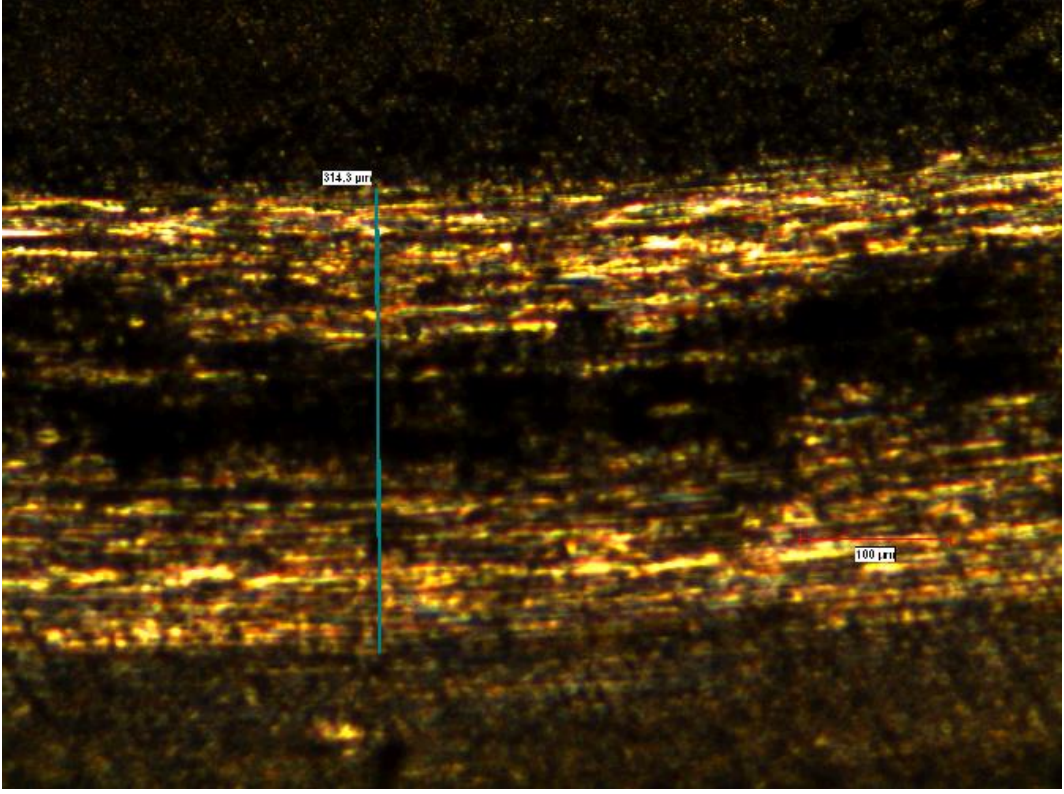
Şekil 4.26. Aşınma Miktarı Grafiği



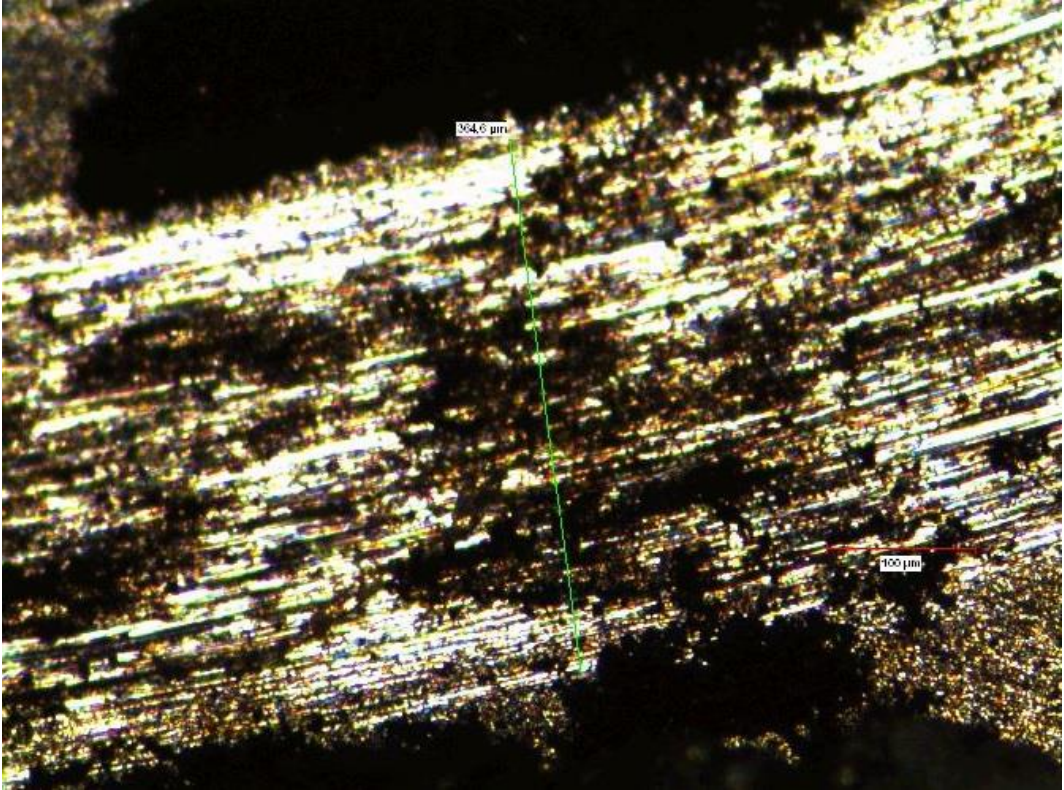
Şekil 4.27. Numune 4'ün Aşınma Yolu İz Genişliği Ölçümü



Şekil 4.28. Numune 5'in Aşınma Yolu İz Genişliği Ölçümü



Şekil 4.29. Numune 6'nın Aşınma Yolu İz Genişliği Ölçümü

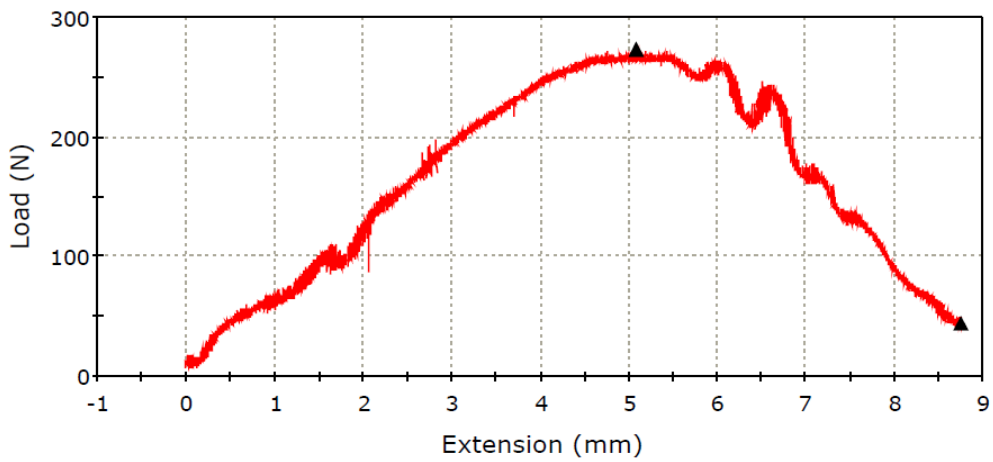


Şekil 4.30. Numune 8'in Aşınma Yolu İz Genişliği Ölçümü

Numunelerin aşınma miktarları irdelenirse, yüksek miktar parçacık takviyeli numune 6'nın diğer numunelere göre aşınma miktarının en az olduğu tespit edilmiştir (Tablo 4.7.). Ayrıca saf çinko kaplı numune 4'ün yüksek banyo sıcaklığında kaplanan parçacık takviyeli numune 5'ten sürtünme katsayısının daha yüksek olduğu elde edilmesine rağmen aşınma miktarının daha yüksek olduğu elde edilmiştir (Tablo 4.7.). Aynı şekilde Ion-Dragos Utu ve arkadaşları saf Zn kaplamaların alüminyum oksit parçacık takviyeli kaplamalara göre sürtünme katsayısının yüksek olmasına rağmen alüminyum oksit parçacık takviyeli kaplamaların saf Zn kaplamalara göre aşınma miktarlarının daha az olduğunu belirtmişlerdir[18].

4.6. Kaplamaların Çizik Dayanımı ve Yapışma Dayanımı Analiz Sonuçları

Parçacık takviyeli numunelerden parçacık takviyesi en yüksek olan numune 6'nın ASTM F 1044- 99 standardına göre yapılan yapışma mukavemeti test sonucu Şekil 4.31'de ve numune 6'nın analiz sonrası görüntüsü de Şekil 4.32'de verilmiştir[35]. Ancak Şekil 4.32'de de belirtildiği üzere kaplama Ti6Al4V alaşımının yüzeyinden sökülememiş olup böylelikle testte kaplama yapışma mukavemetinin tam sonucu elde edilememiştir. Bunun sebebi standarda göre tam uygun yapıştırıcının bulamamasından dolayı olup ancak mevcut olan en güçlü yapıştırıcının kullanılmasıdır. Yapıştırıcının dayanımının, kaplama yapışma mukavemetinin altında olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.31. Numune 6'nın ASTM F 1044 – 99 Standardına Göre Yapışma Mukavemeti Analizi Sonucu



Şekil 4.32. Numune 6'ın ASTM F 1044 – 99 Standardına Göre Yapışma Mukavemeti Analizi Sonrası Test Numunesi (a. Kaplanmış Numune) (b. Kaplanmamış Numune)

ASTM F 1044 – 99 standardına göre yapılan yapışma mukavemeti analizi sonrası istenilen sonuçlar elde edilemediğinden 4,5,6 ve 7 numaralı numunelerin çizik dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen bu numunelerin sırasıyla kritik yükleri, analiz boyunca uygulanan yükler altında oluşan kuvvetler ve sürtünme katsayısının değişim grafikleri ve analiz boyunca uygulanan yükler altında oluşan batma derinliklerinin sonuç fotoğrafları sırasıyla numune 4,5,6,8 için “Şekil 4.34. ve Şekil 4.35.”, “Şekil 4.36. ve Şekil 4.37.” “Şekil 4.38. ve Şekil 4.39.”, “Şekil 4.40. ve Şekil 4.41” verilmiştir. Bu grafiklerdeki numunelerin çizik dayanım analizi sonucunda elde edilen kritik yükler Tablo 4.8’de listelenmiş olup grafiksel gösterimi Şekil 4.33’te verilmiştir. Ayrıca numunelerin yüzeylerinden yapılan çizik testleri sonrasında görüntüleri de Şekil 4.42, Şekil 4.43, Şekil 4.44 ve Şekil 4.45 verilmiştir.

H. Kazimierczak ve arkadaşları saf Zn ve Zn-Mo kaplamaların çelikler üzerindeki yapışma dayanımlarını incelemiştir[13]. Yapılan çalışmada çizik test sonuçlarında kritik yük değeri 2 (Lc2) üzerinden yorum yapmışlardır[13]. Sonuçlar doğrultusunda saf Zn kaplamaların kritik yük değerinin 12N civarı olduğunu belirtmişlerdir[13]. Ayrıca saf Zn kaplamaların parçacık takviyeli kaplamalara göre daha yüksek yapışma mukavemeti gösterdiğini belirtmişlerdir[13]. Bunlara ek olarak kaplamalardaki molibden parçacık

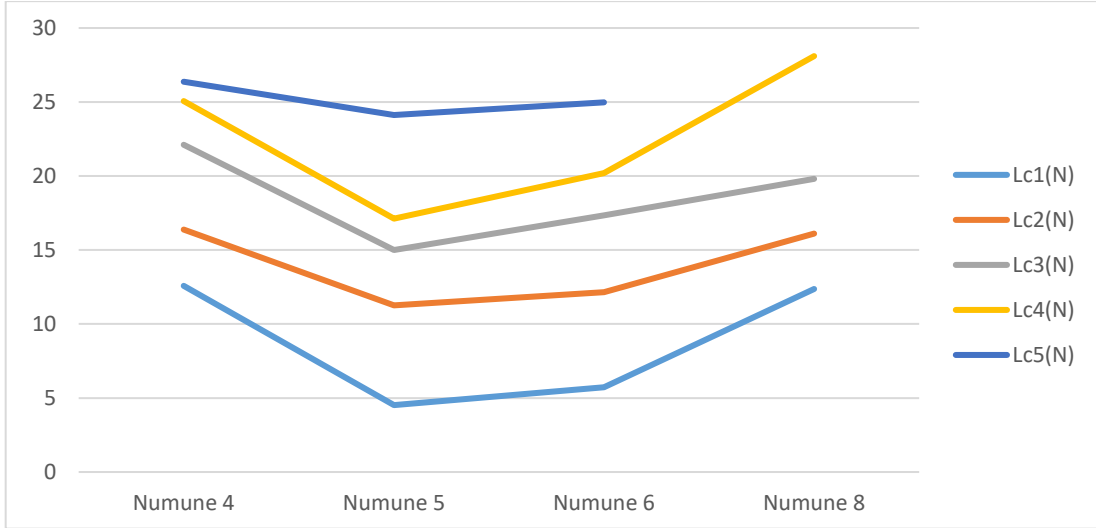
takviye miktarının artmasıyla kritik yük 2 (Lc2) değerinin 7N ile 10,5N arasında artıp ve azaldığını belirtmişlerdir[13]. Böylece saf çinko kaplama ile parçacık takviyeli kaplamaların analiz sonuçları kıyaslanırsa, saf çinko kaplama olan numune 4'ün kritik yük 2 (Lc2) değerinin 16,38N çıktığı ve parçacık takviyeli kaplamalardan sırasıyla numune 5,6 ve 8'in kritik yük 2 (Lc2) değerleri 11,26N 12,16N ve 16,1N olduğu elde edilmiştir (Tablo 4.8). Böylece saf Zn kaplamaların yapışma mukavemetinin parçacık takviyeli kaplamalara göre daha yüksek olduğu deneyimlenmiştir.

Ayrıca ideal oda sıcaklığına sahip kaplama banyosunda kaplanan numune 6 ile numune 8'den parçacık takviye miktarı fazla olan numune 6'nın numune 8'e göre kritik yük 2 (Lc2) değeri daha düşük olduğu belirtilmiştir (Tablo 4.8). Ayrıca numune 6 ile numune 8'in çizik testi sonrası yüzey görüntüleri de incelendiğinde (Şekil 4.44 ile 4.45), numune 6'nın numune 8'e göre çizik testi boyunca kaplamadaki bozulmaların daha çok olduğu deneyimlenmiştir.

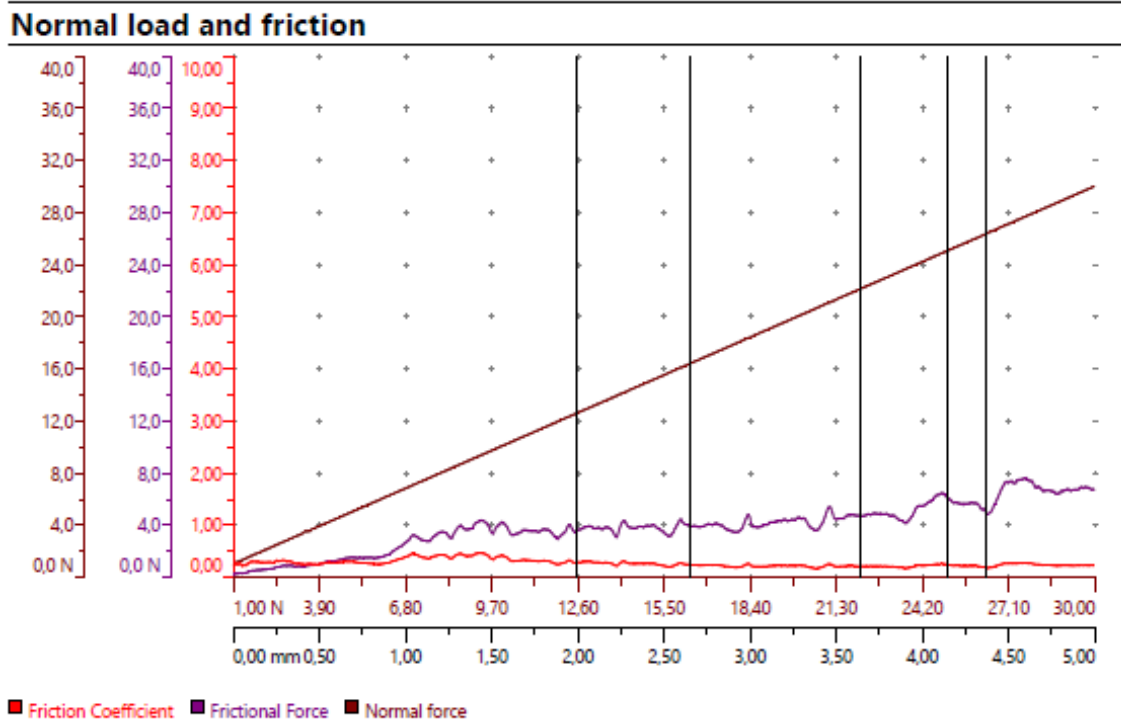
Bunlara ek olarak aynı miktar parçacık takviye miktarına sahip olup farklı kaplama banyo sıcaklıklarında kaplanan numune 5 ile numune 8'den yüksek kaplama banyo sıcaklığında kaplanan numune 5'in kritik yük 2 (Lc2) değerinin düşük çıktığı belirtilmiştir (Tablo 4.8). Ayrıca numune 5 ile numune 8'in çizik testi sonrası yüzey görüntüleri de incelendiğinde (Şekil 4.43 ile 4.45), numune 8'in numune 5'e göre çizik boyunca kaplamadaki bozulmaların daha az olduğu belirtilmiştir.

Tablo 4.8. Numunelerin Kritik Yük Değerleri

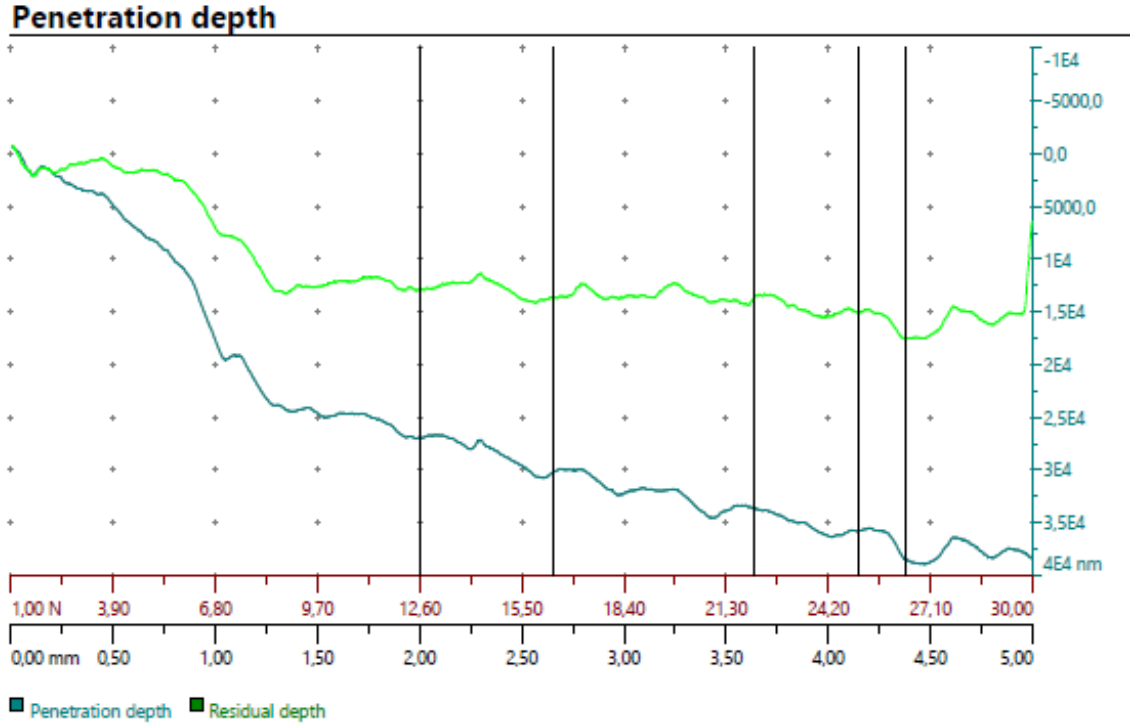
Numune No	Lc1(N)	Lc2(N)	Lc3(N)	Lc4(N)	Lc5(N)
4	12,58	16,38	22,11	25,06	26,37
5	4,52	11,26	15	17,12	24,12
6	5,73	12,16	17,35	20,2	24,98
8	12,36	16,1	19,81	28,1	-



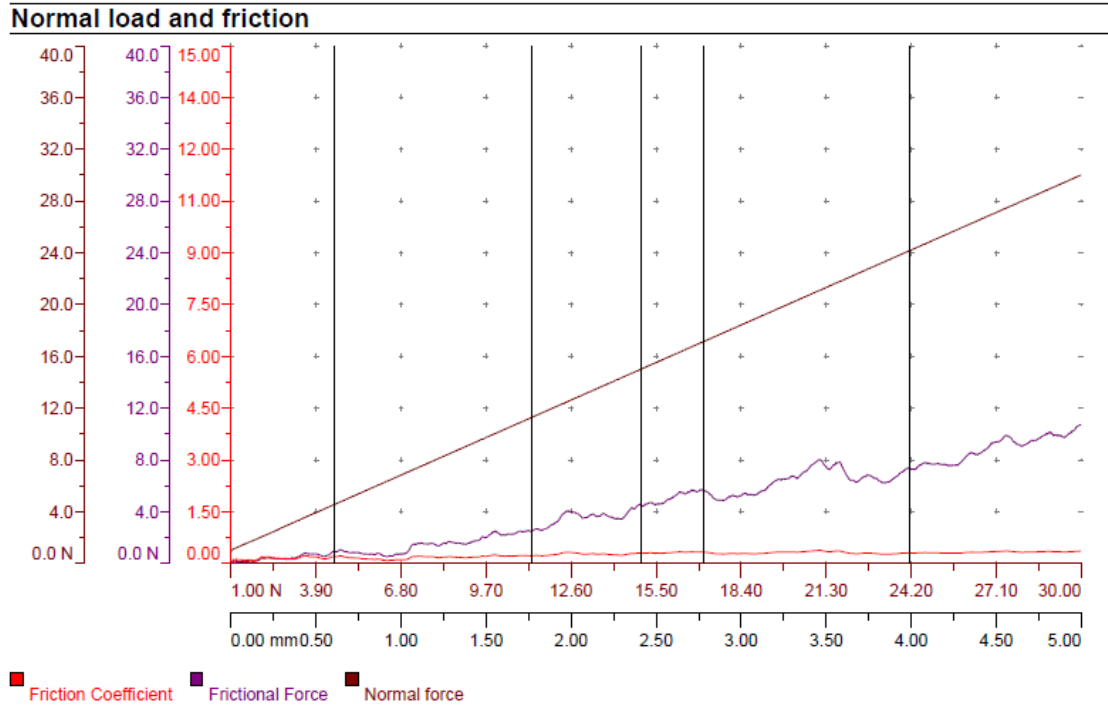
Şekil 4.33. Numunelerin Kritik Yük Değer Grafiği



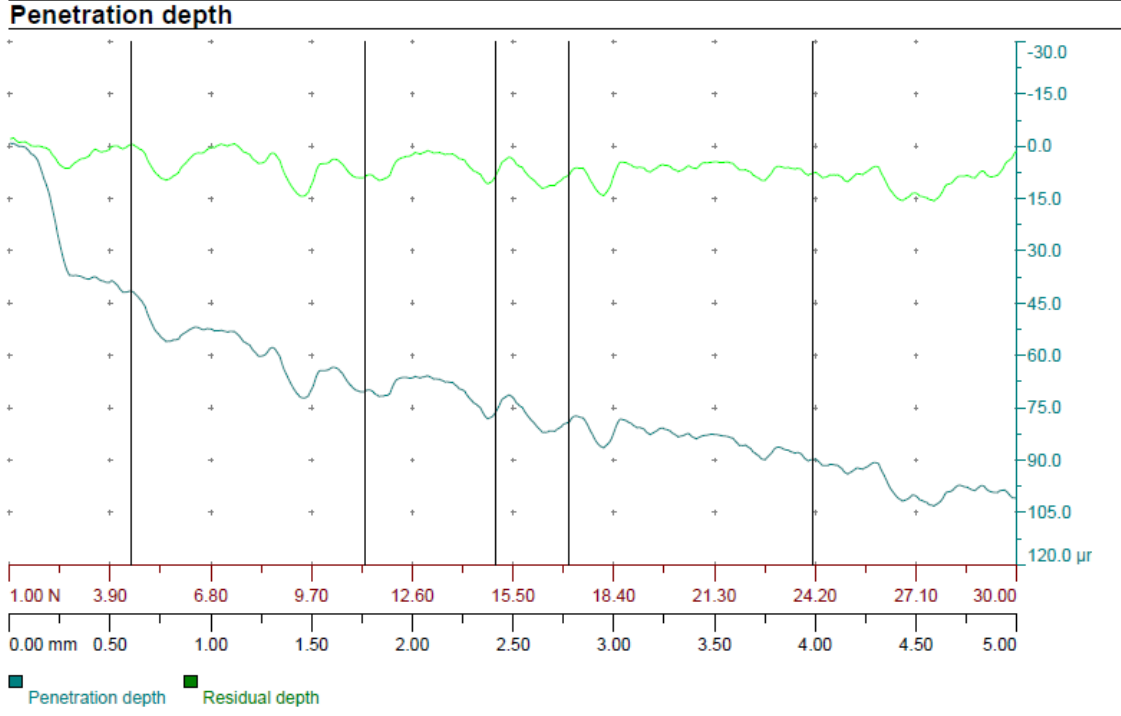
Şekil 4.34. Numune 4'ün Çizik Testinde Uygulanan Yükler Altında Kuvvetler ve Sürtünme Katsayısının Değişimi



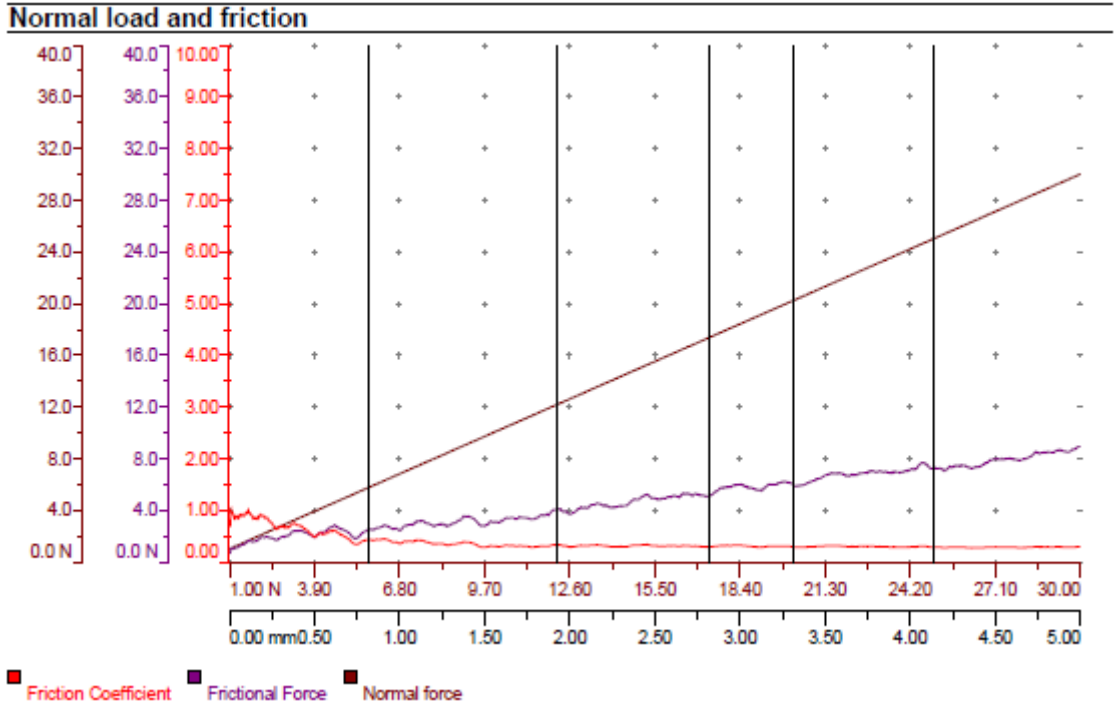
Şekil 4.35. Numune 4'ün Çizik Testinde Uygulanan Yük Altında Oluşan Batma Derinlikleri



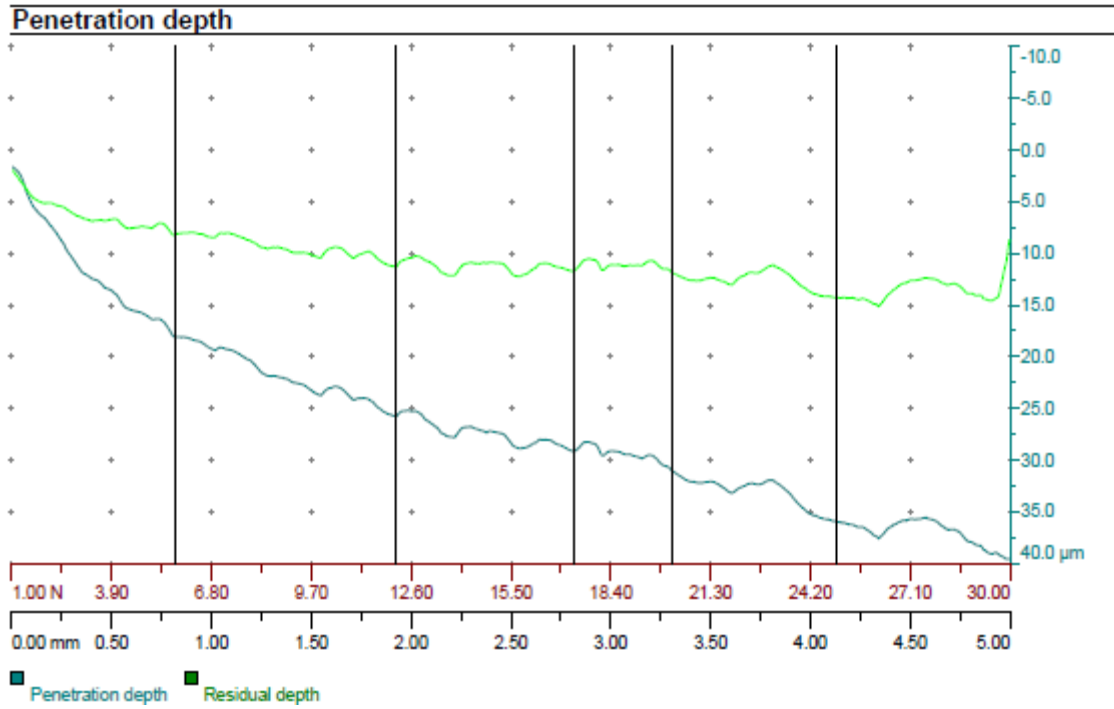
Şekil 4.36. Numune 5'in Çizik Testinde Uygulanan Yükler Altında Kuvvetler ve Sürtünme Katsayısının Değişimi



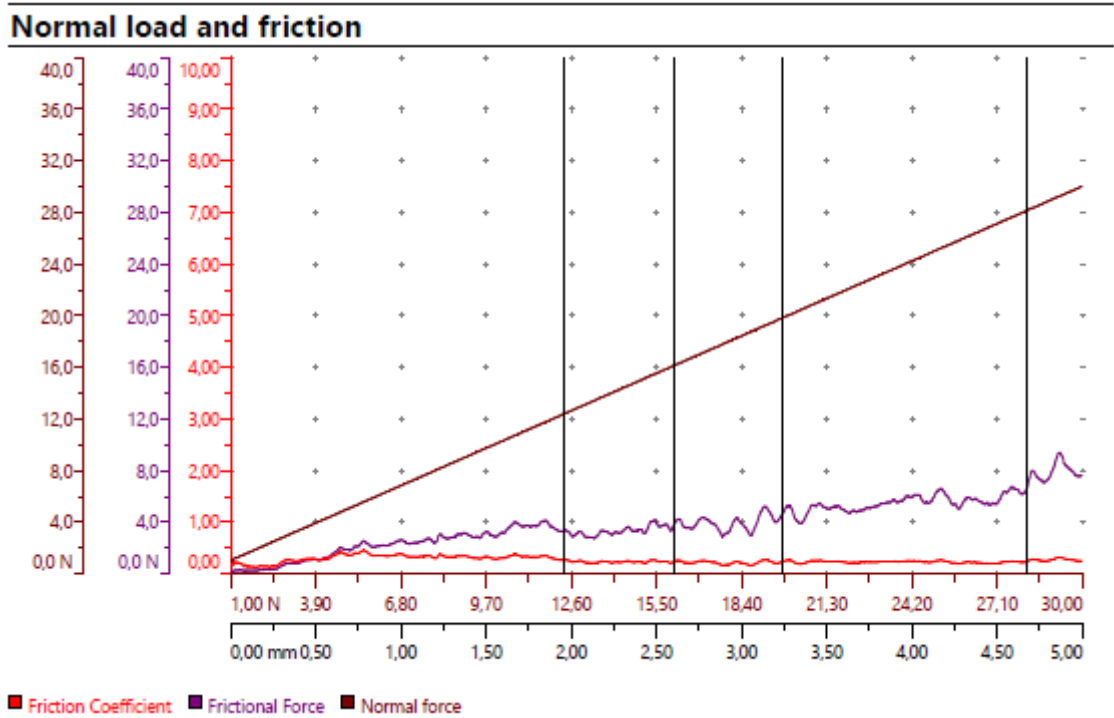
Şekil 4.37. Numune 5'in Çizik Testinde Uygulanan Yük Altında Oluşan Batma Derinliklerinin Değişimi



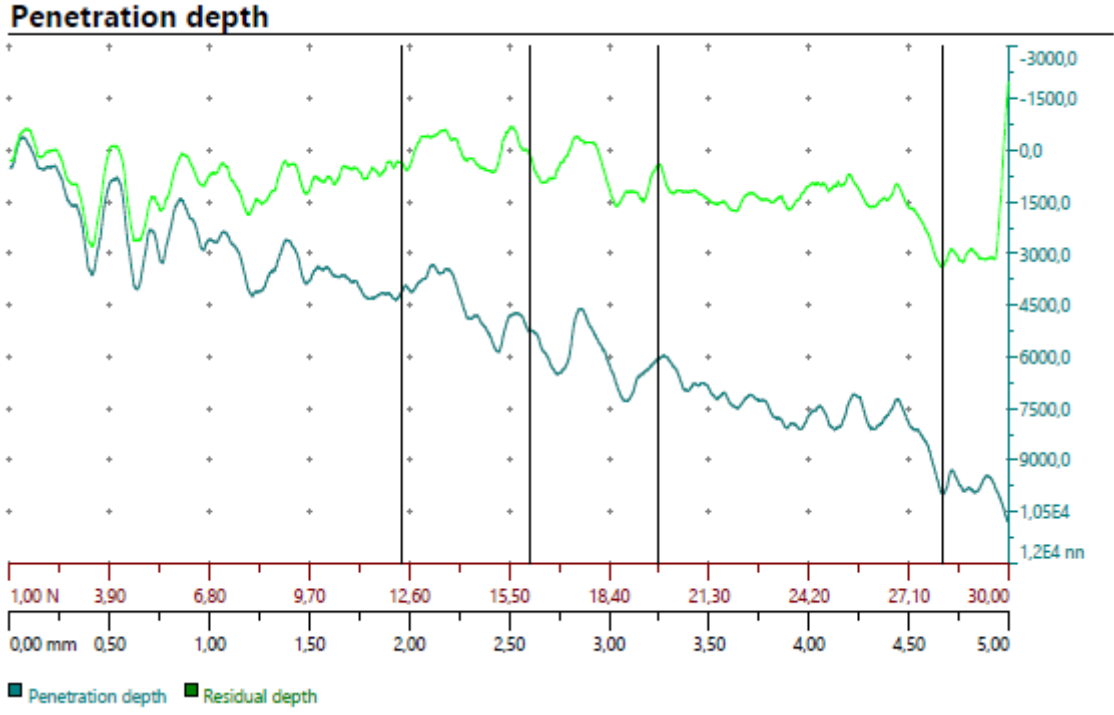
Şekil 4.38. Numune 6'nın Çizik Testinde Uygulanan Yükler Altında Kuvvetler ve Sürtünme Katsayısının Değişimi



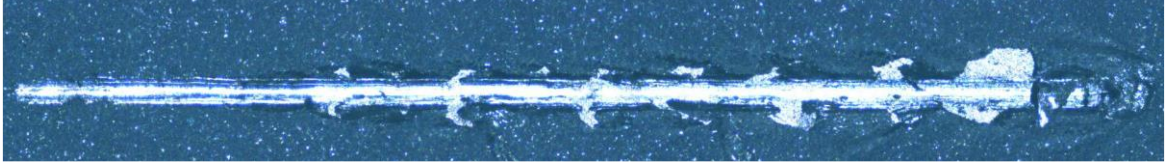
Şekil 4.39. Numune 6'nın Çizik Testinde Uygulanan Yüklet Altında Oluşan Sürtünme Kuvveti ve Sürtünme Katsayılarının Değişimi



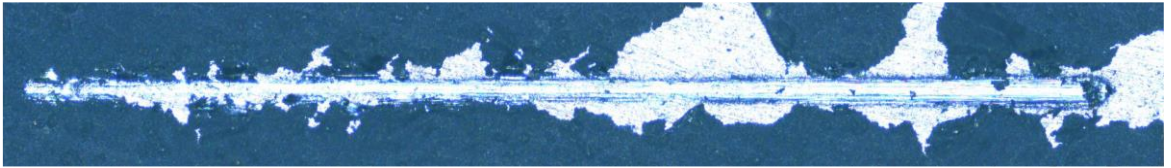
Şekil 4.40. Numune 8'in Çizik Testinde Uygulanan Yükler Altında Kuvvetler ve Sürtünme Katsayısının Değişimi



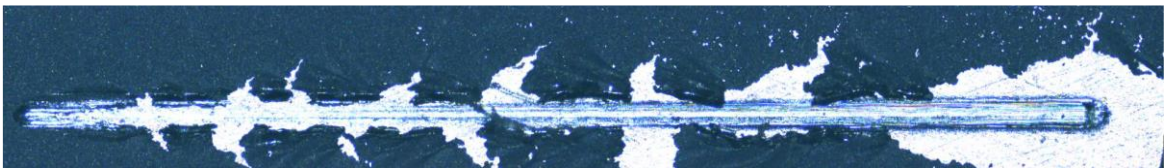
Şekil 4.41. Numune 8'in Çizik Testinde Uygulanan Yüklet Altında Oluşan Sürtünme Kuvveti ve Sürtünme Katsayılarının Değişimi



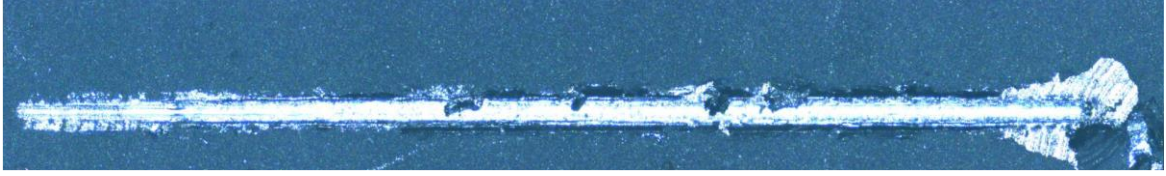
Şekil 4.42. Numune 4 Çizik Testi Sonrası Yüzey Görüntüsü



Şekil 4.43. Numune 5 Çizik Testi Sonrası Yüzey Görüntüsü



Şekil 4.44. Numune 6 Çizik Testi Sonrası Yüzey Görüntüsü



Şekil 4.45. Numune 8 Çizik Testi Sonrası Yüzey Görüntüsü

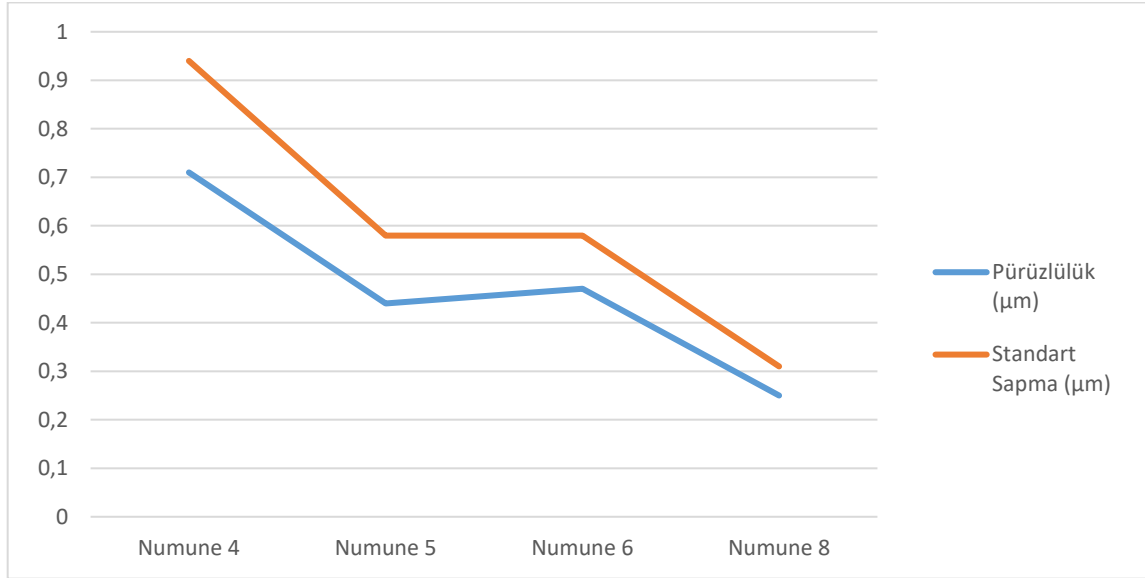
4.7. Kaplamaların Pürüzlülük ve Yüzey Analizi (AFM)

Çinko ve parçacık takviyeli çinko kaplanmış numunelerden sırasıyla numune 4, 5, 6 ve 8'in ortalama pürüzlülük değerleri, pürüzlülük standart sapmaları ve vadi zirve değerleri Tablo 4.9'da listelenmiş olup Şekil 4.46. ve Şekil 4.47'de grafiksel gösterimi verilmiştir. Buna göre saf Zn kaplama yapılan numune 4'ün parçacık takviyeli kaplamalar olan numune 5, numune 6 ve numune 8'e göre ortalama yüzey pürüzlülük, standart sapma değeri ve vadi zirve yükseklik değerlerinin daha yüksek olduğu deneyimlenmiştir. Aynı şekilde A. Shamsolhodaei ve arkadaşları, Zn-TiO₂ kaplamalar ile ilgili yapmış oldukları çalışmada parçacık takviyesinin yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğü sonucunu elde etmişlerdir[27]. Başka bir çalışmada saf Co kaplamaların Co-ZrO₂ parçacık takviyeli kaplamalara göre de daha az pürüzlülük değeri gösterdiği ileri sürülmüştür [28]. Bunlara ek olarak aynı kaplama banyo sıcaklığında ve farklı miktarda parçacık takviyeli kaplamalardan numune 6 ve 8'in yüzey pürüzlülükleri kıyaslandığında takviye miktarı yüksek olan numune 6'nın parçacık takviye miktarı düşük olan numune 8'e göre daha yüksek yüzey pürüzlülüğü, standart sapmaya ve vadi zirve değerine sahip olduğu belirtilmiştir (Tablo 4.8). Benzer şekilde Lidia Benea ve arkadaşları da yapmış olduğu çalışmada Co-ZrO₂ parçacık takviyeli kaplamalarda parçacık takviyesi miktarı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin arttığını belirtmişlerdir [28].

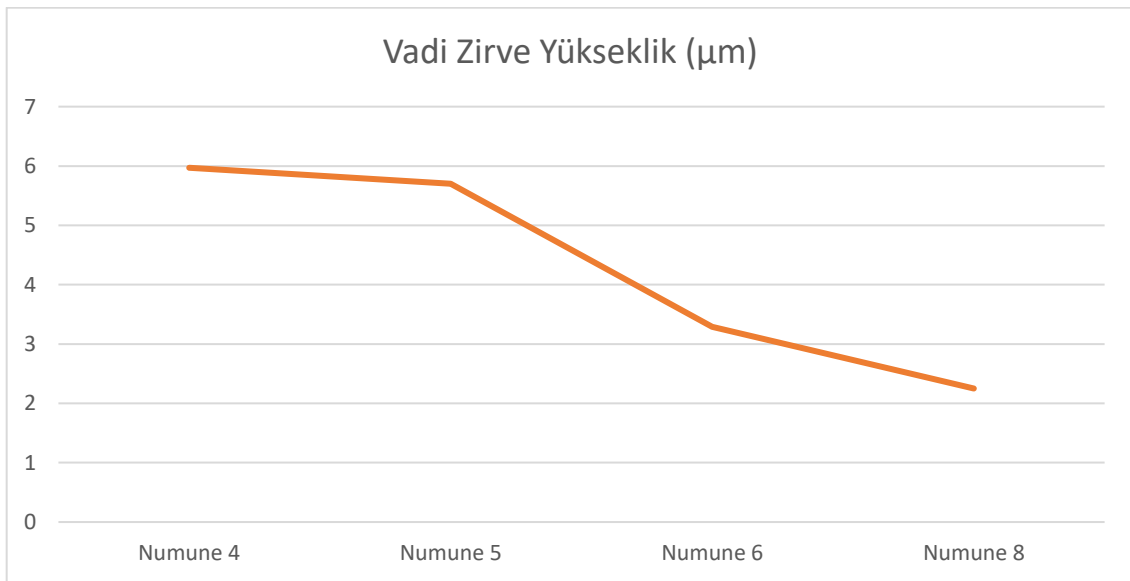
Diğer bir parametre olan banyo sıcaklığının etkisi incelendiğinde aynı parçacık takviye miktarına sahip olup birbirinden farklı kaplama banyo sıcaklığında kaplanan numune 5 ile numune 8 mukayese edilebilir. Oda sıcaklığında kaplanmış yani kaplama banyo sıcaklığı düşük olan numune 8'in yüksek kaplama banyo sıcaklığına sahip numune 5'e göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü gösterdiği belirtilmiştir (Tablo 4.8). Böylelikle kaplama banyo sıcaklığı arttıkça çinko iyon hareketliliğinin artışı parçacık takviyesi iyon hareketliliğini bastırmaktadır[38]. Bu sebeple daha çok çinko kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı söylenebilir.

Tablo 4.9. Numunelerin Pürüzlülük Değerleri

Numune No	Pürüzlülük (μm)	Standart Sapma (μm)	Vadi Zirve Yükseklik (μm)
4	0,71	0,94	5,97
5	0,44	0,58	5,70
6	0,47	0,58	3,29
8	0,25	0,31	2,25



Şekil 4.46. Numunelerin Pürüzlülük Grafiği 1



Şekil 4.47. Numunelerin Pürüzlülük Grafiği 2

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında, elde edilen test sonuçlarına göre kaplama öncesi numunelerin yüzeylerinin hazırlanmasının kaplamalar için öneminin büyük olduğu deneyimlenmiştir. Ayrıca yüzey hazırlanması işlemleri sonucunda numunelerin yüzey pürüzlülüğünün nano boyutlarda birbirlerine yakın olması analiz sonuçlarının daha gerçekçi irdelenmesine olanak sağlamıştır. Saf çinko kaplama sonucunda, ilk olarak yüksek kaplama banyo sıcaklığına sahip kaplamalarda kaplama miktarlarının ideal oda sıcaklığında kaplanan numunelerden daha yüksek olduğu elde edilmiştir. Ayrıca yüksek kaplama banyo sıcaklığında kaplanan numunelerin kaplama öncesi ve sonrası ağırlık değişimlerinin yani kaplama miktarlarının Faraday'ın elektroliz kanunlarındaki ağırlık değişimi teorisine göre kıyaslandığında kaplama verimliliğinin ve kaplama miktarının ideal oda sıcaklığında kaplanan numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Diğer yandan SEM analizleri kısmındaki kaplama kalınlığı ölçümlerinde de aynı akım yoğunluğuna sahip fakat kaplama banyo sıcaklığı yüksek olan numunelerin kaplama kalınlıklarının daha yüksek olduğu da elde edilmiştir. Aynı şekilde ZrO_2 parçacık takviyeli kaplamalarda kaplama banyo sıcaklığının artmasıyla gene kaplama miktarının ve kaplama kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir. Ancak SEM analizleri kısmında parçacık takviyeli kaplamaların, kaplama banyo sıcaklığının yüksek olmasıyla yüzeye uniform dağılamadığı görülmüştür. İkinci olarak, kaplamaların aşınma dayanım analizlerinde de parçacık takviyeli kaplamaların saf çinko kaplamalara göre daha yüksek sürtünme katsayısı sergilediği görülmüştür. Ancak düşük miktar parçacık miktarına sahip ve yüksek kaplama banyo sıcaklığına sahip kaplamaların, çinko kaplamalara göre daha düşük sürtünme katsayısı sergilediği görülmüştür. Fakat sürtünme katsayısı düşük olsa da saf çinko kaplamalara göre tüm parçacık takviyeli kaplamaların daha düşük aşınma hızına sahip olduğu görülmüştür. Daha sonra, kaplamaların çizik dayanımı analizinde de saf çinko kaplamaların parçacık takviyeli kaplamalara göre daha yüksek yapışma mukavemeti gösterdiği saptanmıştır. Ancak parçacık takviyesi miktarının veya kaplama banyo sıcaklığının artmasıyla kaplamaların yapışma mukavemetinin düştüğü deneyimlenmiştir. Son olarak, kaplamaların yüzey pürüzlülük analizlerinde ise parçacık takviyeli kaplamaların saf çinko kaplamalara göre yüzey pürüzlülüğünün daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Ancak yüksek parçacık takviyesi miktarına sahip kaplamaların düşük parçacık takviyesi miktarına sahip kaplamalara göre daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca parçacık takviyeli

kaplamalarda kaplama banyo sıcaklığının artmasıyla da yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasıyla kaplamalarda sıkça tercih edilen ZrO_2 parçacık takviyelerinin çinko kaplamalar üzerindeki etkileri incelenmiş, Ti6Al4V alaşımlarının da kaplamalar ile etkileşimi irdelenerek literatüre katkıda bulunulmuştur.

Tez çalışmasında yapılan çalışmalara ek olarak gelecekte; saf çinko kaplamalarda kaplama parametreleri genişletilerek daha çeşitli kaplama banyo sıcaklığı ve akım yoğunluğunda çalışılabilir. Parçacık takviyeli kaplamalarda aynı şekilde daha çeşitli kaplama banyo sıcaklığı, akım yoğunluğu ve bunlara ek olarak parçacık takviye miktarının çeşitliliği arttırılabilir. Böylece daha çeşitli kaplama parametrelerinin hem saf çinko hem de parçacık takviyeli kaplamalar üzerindeki etkileri araştırılabilir. Bunlara ek olarak, SEM analizleri kısmındaki yüzey mikro yapı incelemeleri ile numunelere EDS analiz yapılarak farklı kaplama parametrelerindeki numunelerin kimyasal bileşen oranları karşılaştırılabilir. Diğer yandan, numunelerin çizik dayanımı analizinde ASTM F-1044 99 standardına uygun bir yapıştırıcı bulunarak kaplamaların yapışma dayanımı standart çerçevesinde araştırılabilir. Ayrıca günümüzde biyomedikal uygulamalarda sıkça tercih edilen Ti6Al4V alaşımlarına, yapılan kaplamalarının simüle edilmiş bir vücut sıvısındaki etkileşimleri incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] A. Alp, “Elektrolitik Metal Kaplama,” Sakarya: Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 2012, p. 22.
- [2] S. B. A. Sarı, “ELEKTROLİZ YÖNTEMİ İLE METAL SAFLAŞTIRMA VE GERİ KAZANIMI, LABORATUVAR FÖYÜ,” 2022.
https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/metalurji_e3a88.pdf (accessed Jun. 30, 2022).
- [3] E. Baydır, “Elektro kaplama (electro-coating).”
[https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/kimyamuh/Dosyalar/ELEKTRO KAPLAMA \(ELECTRO-COATING\).pdf](https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/kimyamuh/Dosyalar/ELEKTRO KAPLAMA (ELECTRO-COATING).pdf) (accessed Jun. 30, 2022).
- [4] A. G. ÇELİK, “ELEKTROLİTİK ÇİNKO KAPLAMALI PLAKALARDA HIZLANDIRILMIŞ KOROZYON TESTİ UYGULAMASI, YÜKSEK LİSANS TEZİ,” İstanbul Teknik Üniversitesi, 2019. [Online]. Available:
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- [5] “Çinko Elementinin Temel Özellikleri.” <https://tr.wikipedia.org/wiki/Çinko> (accessed Jun. 30, 2022).
- [6] M. Ye, J. L. Delplancke, G. Berton, L. Segers, and R. Winand, “Characterization and adhesion strength study of Zn coatings electrodeposited on steel substrates,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 105, no. 1–2, pp. 184–188, 1998, doi: 10.1016/S0257-8972(98)00490-3.
- [7] J. Snyder, D.L. and Long, *Typical processing and operating sequences*, *Electroplating Engineering Handbook*, Lawrence J.
- [8] A. Vlasa, S. Varvara, A. Pop, C. Bulea, and L. M. Muresan, “Electrodeposited Zn-TiO₂ nanocomposite coatings and their corrosion behavior,” *J. Appl. Electrochem.*, vol. 40, no. 8, pp. 1519–1527, 2010, doi: 10.1007/s10800-010-0130-x.
- [9] P. Shojaee and A. Afshar, “Effects of zirconia content on characteristics and corrosion behavior of hydroxyapatite/ZrO₂ biocomposite coatings codeposited by electrodeposition,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 262, no. 3, pp. 166–172, 2015, doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.12.044.
- [10] Liana Maria Muresan, “Electrodeposited Zn-Nanoparticles Composite Coatings for

- Corrosion Protection of Steel,” in *Handbook of Nanoelectrochemistry*, 2015, pp. 333–353. [Online]. Available: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-15266-0_34
- [11] K. Vathsala and T. V. Venkatesha, “Zn-ZrO₂ nanocomposite coatings: Electrodeposition and evaluation of corrosion resistance,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 257, no. 21, pp. 8929–8936, 2011, doi: 10.1016/j.apsusc.2011.05.067.
- [12] M. Mirak, M. Alizadeh, and M. N. Ashtiani, “Characterization, mechanical properties and corrosion resistance of biocompatible Zn-HA/TiO₂ nanocomposite coatings,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 62, pp. 282–290, 2016, doi: 10.1016/j.jmbbm.2016.05.016.
- [13] H. Kazimierczak, P. Ozga, K. Berent, and M. Kot, “Microstructure and micromechanical properties of electrodeposited Zn-Mo coatings on steel,” *J. Alloys Compd.*, vol. 636, pp. 156–164, 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.02.165.
- [14] R. S. Bhat, S. M. Shetty, and N. A. Kumar, “Electroplating of Zn-Ni Alloy Coating on Mild Steel and Its Electrochemical Studies,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, no. 11, pp. 8188–8195, 2021, doi: 10.1007/s11665-021-06051-1.
- [15] C. K. Lee, “Wear and corrosion behavior of electrodeposited nickel-carbon nanotube composite coatings on Ti-6Al-4V alloy in Hanks' solution,” *Tribol. Int.*, vol. 55, pp. 7–14, 2012, doi: 10.1016/j.triboint.2012.05.024.
- [16] M. Fazel, S. Bahramzadeh, M. R. Garsivaz jazi, M. Ramazani, and S. R. Bakhshi, “The influence of temperature on tribological behaviour of Ni-SiC Electrodeposited coating,” *Mater. High Temp.*, vol. 33, no. 3, pp. 219–224, 2016, doi: 10.1080/09603409.2016.1154125.
- [17] S. Pouladi, M. H. Shariat, and M. E. Bahrololoom, “Electrodeposition and characterization of Ni-Zn-P and Ni-Zn-P/nano-SiC coatings,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 213, pp. 33–40, 2012, doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.10.011.
- [18] I. D. Utu, R. Muntean, and I. Mitelea, “Corrosion and Wear Properties of Zn-Based Composite Coatings,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 29, no. 8, pp. 5360–5365, 2020, doi: 10.1007/s11665-020-04995-4.
- [19] S. Tian, K. Gao, H. Zhang, H. Cui, and G. Zhang, “Corrosion Resistance and Anti-

- wear Properties: Ni–W–GO Nanocomposite Coating with Lamellar Structure,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 73, no. 3, pp. 713–724, 2020, doi: 10.1007/s12666-020-01864-5.
- [20] H. Fan, “Electroplating of compound Ni-SiC coatings and improvement of wear resistance,” *Key Eng. Mater.*, vol. 426–427, pp. 399–402, 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.426-427.399.
- [21] M. A. Juneghani, M. Farzam, and H. Zohdirad, “Wear and corrosion resistance and electroplating characteristics of electrodeposited Cr-SiC nano-composite coatings,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 23, no. 7, pp. 1993–2001, 2013, doi: 10.1016/S1003-6326(13)62688-6.
- [22] T. Dikici, O. Culha, and M. Toparli, “Study of the mechanical and structural properties of Zn-Ni-Co ternary alloy electroplating,” *J. Coatings Technol. Res.*, vol. 7, no. 6, pp. 787–792, 2010, doi: 10.1007/s11998-010-9250-9.
- [23] G. He, S. Lu, W. Xu, T. Yu, J. Li, and T. Dai, “Durable superhydrophobic Zn/ZnO/TiO₂ surfaces on Ti6Al4V substrate with self-cleaning property and switchable wettability,” *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 1, pp. 638–647, 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.09.223.
- [24] O. Albayrak, O. El-Atwani, and S. Altintas, “Hydroxyapatite coating on titanium substrate by electrophoretic deposition method: Effects of titanium dioxide inner layer on adhesion strength and hydroxyapatite decomposition,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 202, no. 11, pp. 2482–2487, 2008, doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.09.031.
- [25] M. Wei, A. J. Ruys, M. V. Swain, S. H. Kim, B. K. Milthorpe, and C. C. Sorrell, “Interfacial bond strength of electrophoretically deposited hydroxyapatite coatings on metals,” *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 10, no. 7, pp. 401–409, 1999, doi: 10.1023/A:1008923029945.
- [26] A. Rodichev, A. Gorin, and M. Tokmakova, “Adhesive strength research of film antifriction coatings,” *Mater. Today Proc.*, vol. 19, pp. 2329–2332, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.681.
- [27] A. Shamsolhodaie, H. Rahmani, and S. Rastegari, “Effects of electrodeposition parameters on morphology and properties of Zn-TiO₂ composite coating,” *Surf.*

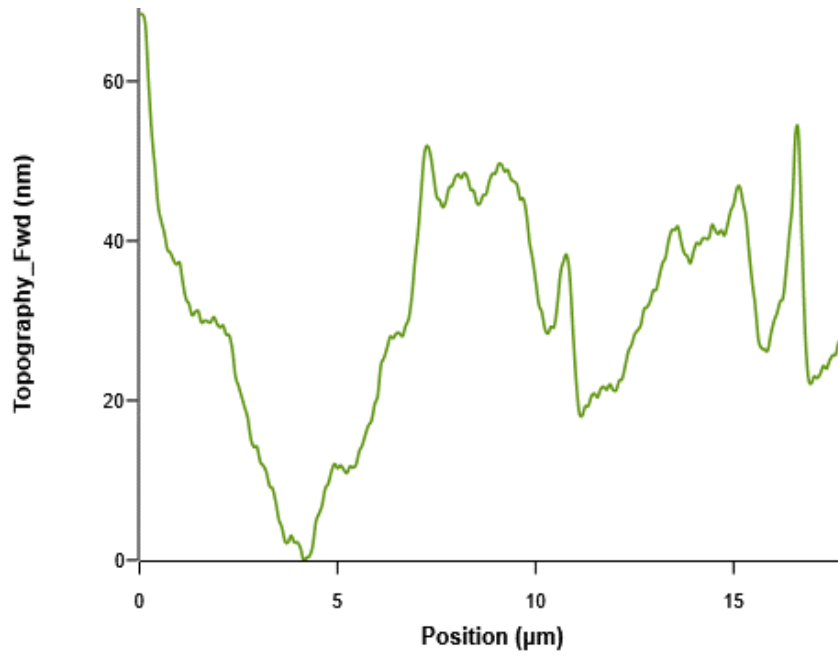
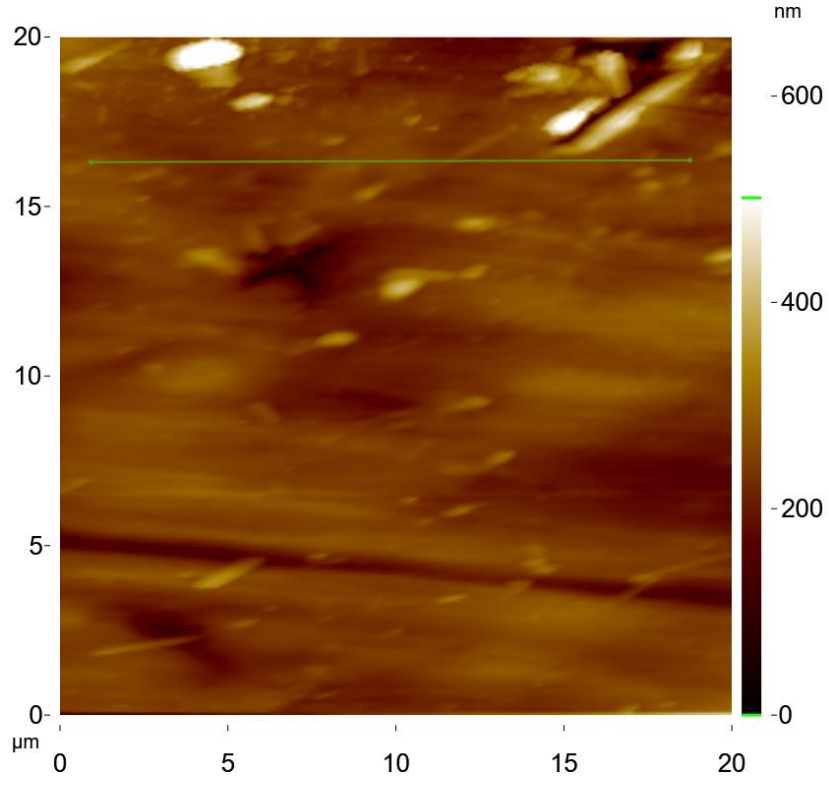
- Eng.*, vol. 29, no. 9, pp. 695–699, 2013, doi: 10.1179/1743294413Y.0000000197.
- [28] L. Benea, P. Ponthiaux, and F. Wenger, “Co-ZrO₂ electrodeposited composite coatings exhibiting improved micro hardness and corrosion behavior in simulating body fluid solution,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 205, no. 23–24, pp. 5379–5386, 2011, doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.05.050.
- [29] C. R. Raghavendra, S. Basavarajappa, I. Sogalad, and V. Kallappa Saunshi, “Study on surface roughness parameters of nano composite coatings prepared by electrodeposition process,” *Mater. Today Proc.*, vol. 38, no. xxxx, pp. 3110–3115, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.493.
- [30] C. Ö. A. HASÇALIK, “Elektroliz Yöntemiyle Çinko Kaplama Parametrelerinin İncelenmesi,” *JESTECH (Engineering Sci. Technol.*, vol. 1–2, pp. 1–7, 2002.
- [31] J. R. Davis, *Nickel Coatings. ASM Specialty Handbbok: Nickel, Cobalt and Their Alloys*.
- [32] “FIB-SEM | Hacettepe Üniversitesi İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi.” <https://hunitek.hacettepe.edu.tr/fib-sem> (accessed Jul. 04, 2022).
- [33] W. Wodo and A. Sulich, “Proceedings of 16th Students’ Science Conference “Science is Our Universe” Boguszów-Gorce, 19-22 September 2018,” vol. nr 24, no. December 2018, 2018, [Online]. Available: <http://www.dbc.wroc.pl/dlibra/docmetadata?id=56504>
- [34] ASTM International, “ASTM G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 05, no. 2016, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1520/G0099-17.Copyright.
- [35] I. Astm F1147 and ASTM International, “Standard Test Method for Tension Testing of Calcium Phosphate and Metallic Coatings,” *ASTM Stand.*, vol. 05, no. Reapproved 2011, pp. 1–6, 2013.
- [36] A. Kong, B. K. Gong, G. Wang, and H. W. Cui, “Influence of surface roughness of substrate on the properties of Ni-Co-Fe electrodeposition coating on copper,” *Surf. Rev. Lett.*, vol. 25, no. 8, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1142/S0218625X18501202.
- [37] S. G. Croll, “Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: A review,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 148, no. June, 2020, doi:

10.1016/j.porgcoat.2020.105847.

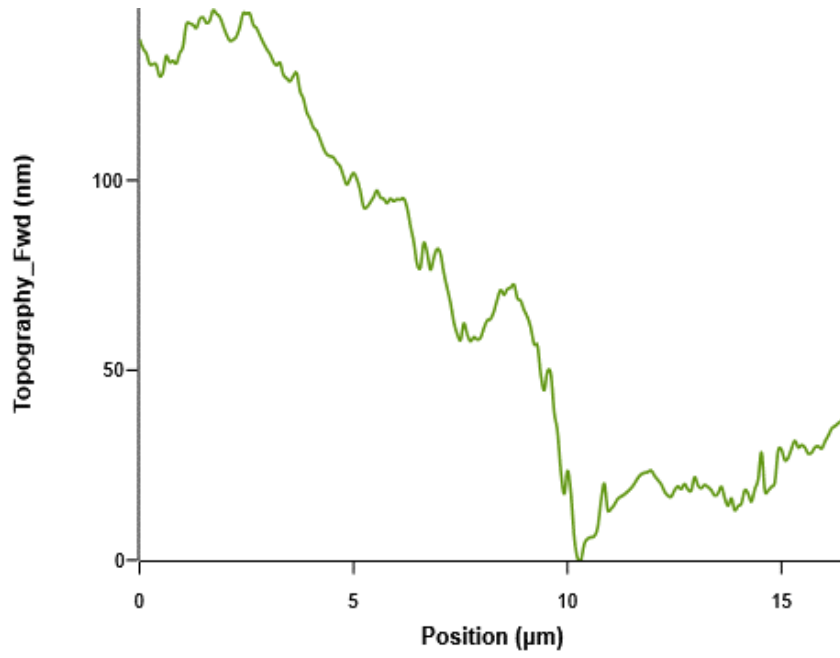
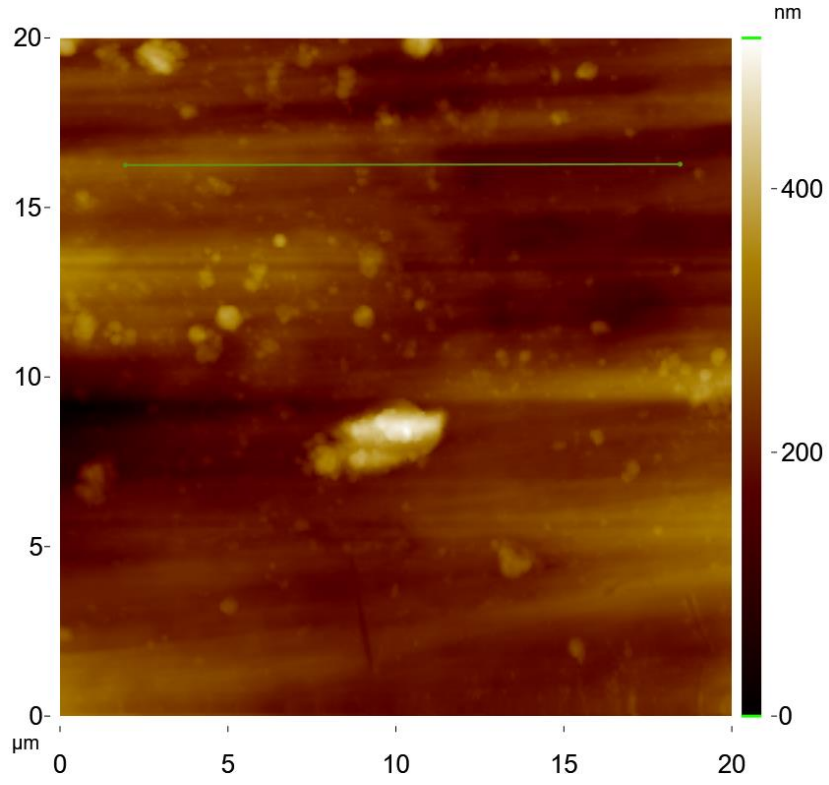
- [38] M. Zhou, N. R. De Tacconi, and K. Rajeshwar, "Preparation and characterization of nanocrystalline composite (nanocomposite) films of titanium dioxide and nickel by occlusion electrodeposition," *J. Electroanal. Chem.*, vol. 421, no. 1–2, pp. 111–120, 1997, doi: 10.1016/S0022-0728(96)04825-5.
- [39] K. Çelik, "Elektrolitik Çinko Kaplama ve İşletme Parametrelerinin Kaplama Kalitesine Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Anadolu Üniversitesi, 2006.

EKLER

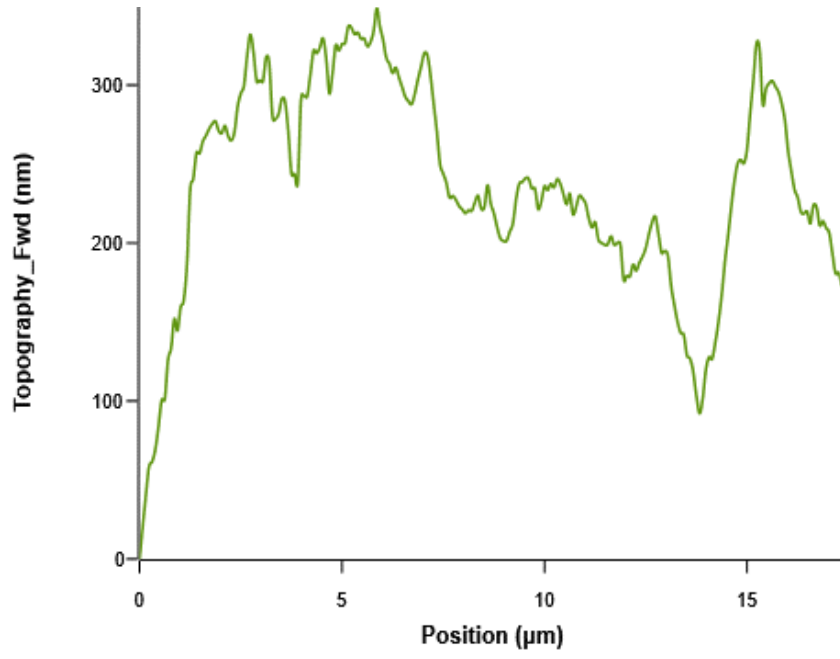
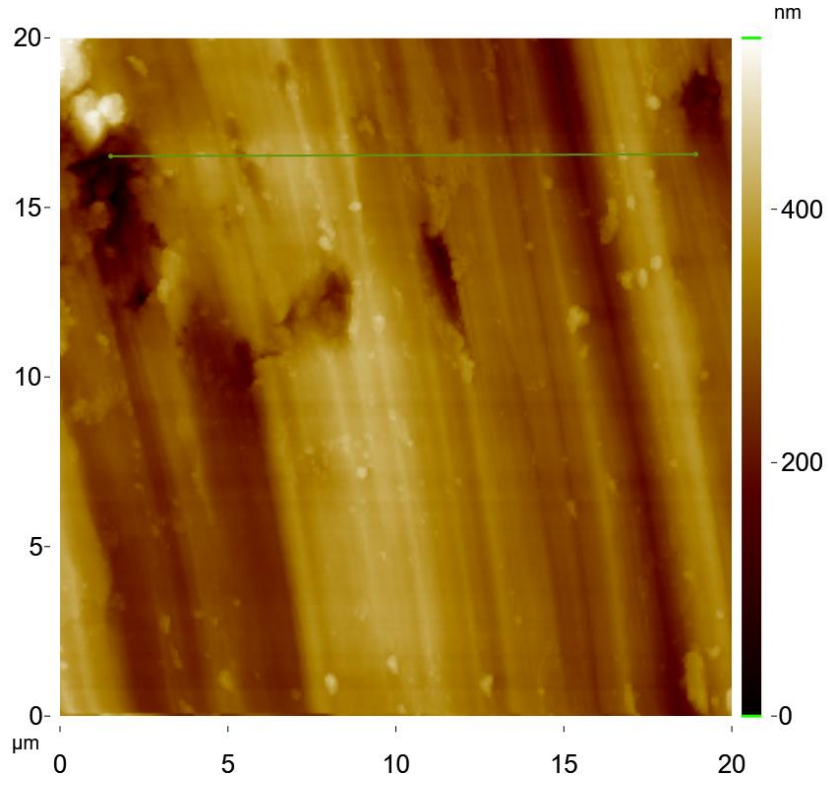
EK 1: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 1 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI



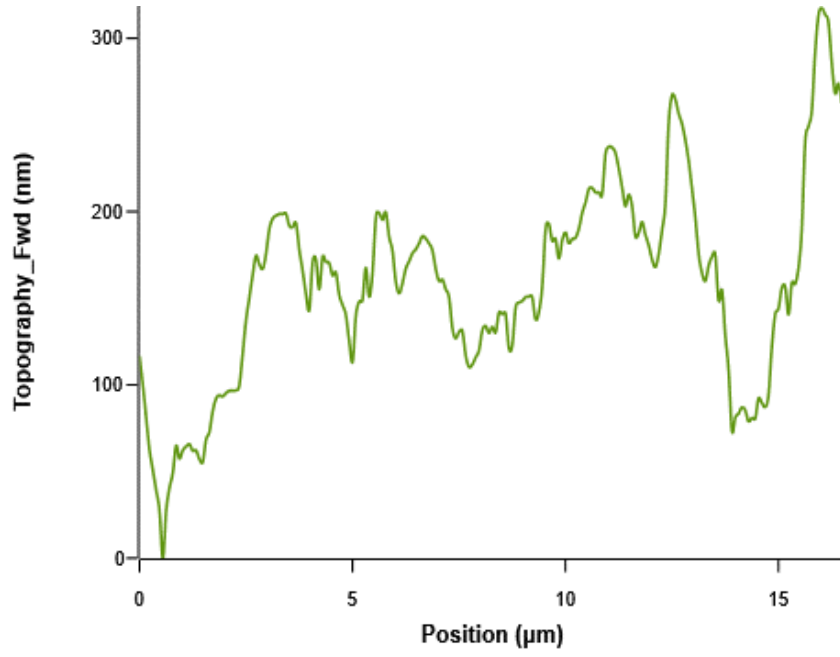
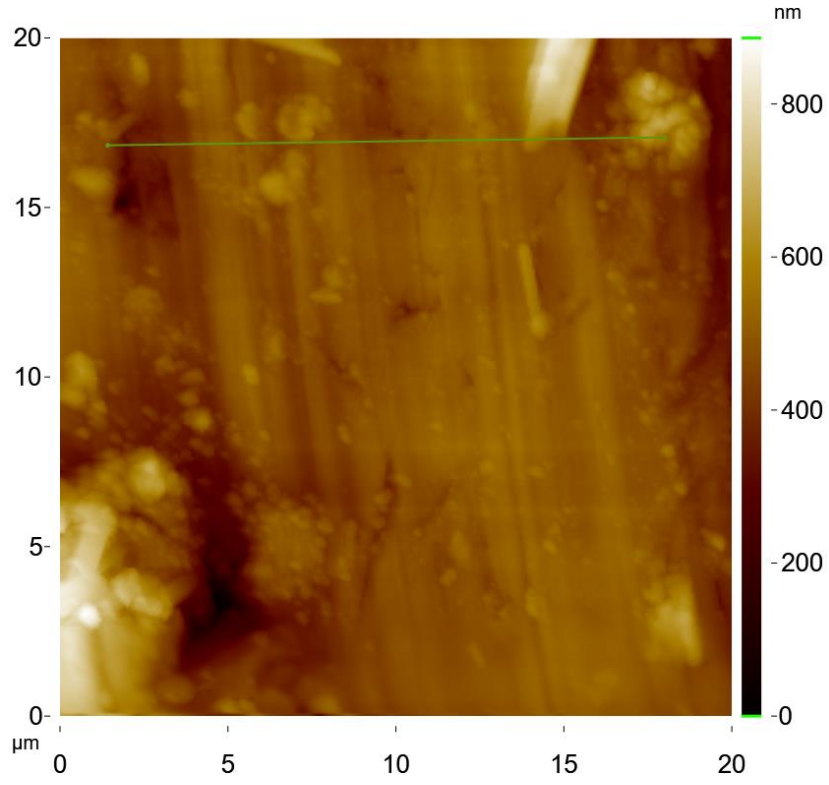
EK 2: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 2 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI



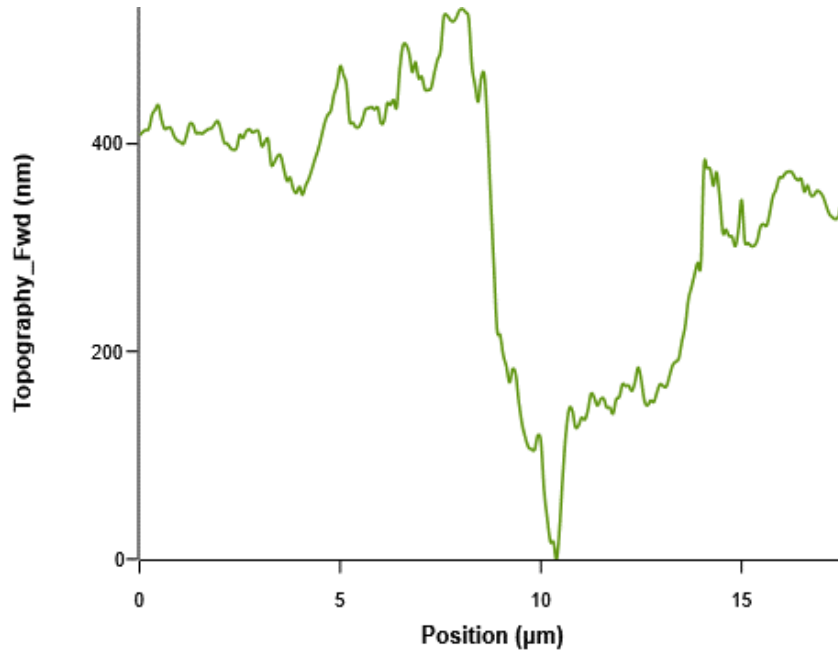
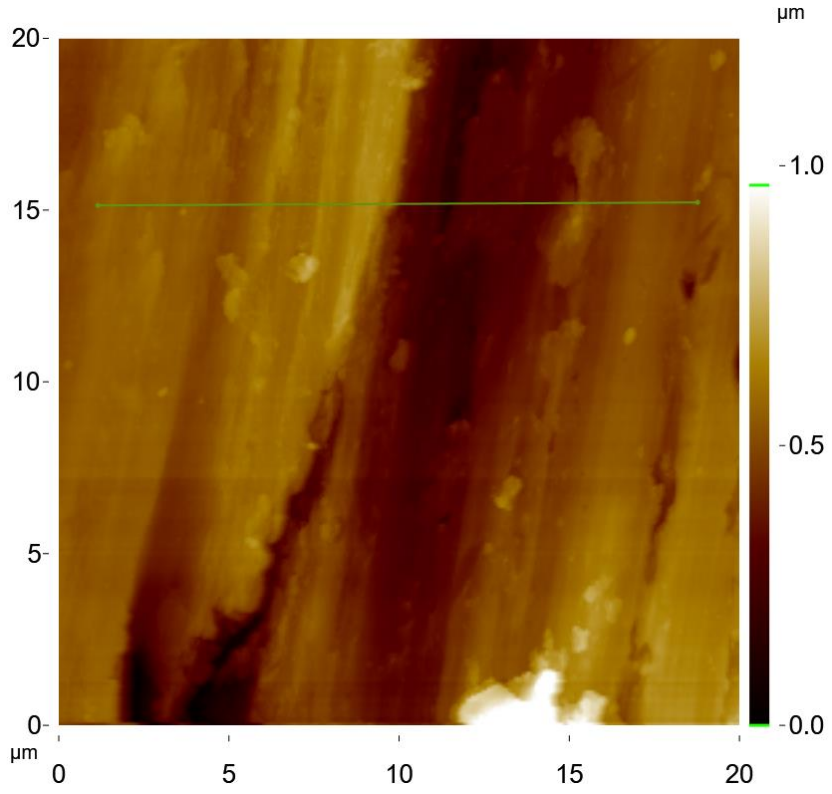
EK 3: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 3 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI



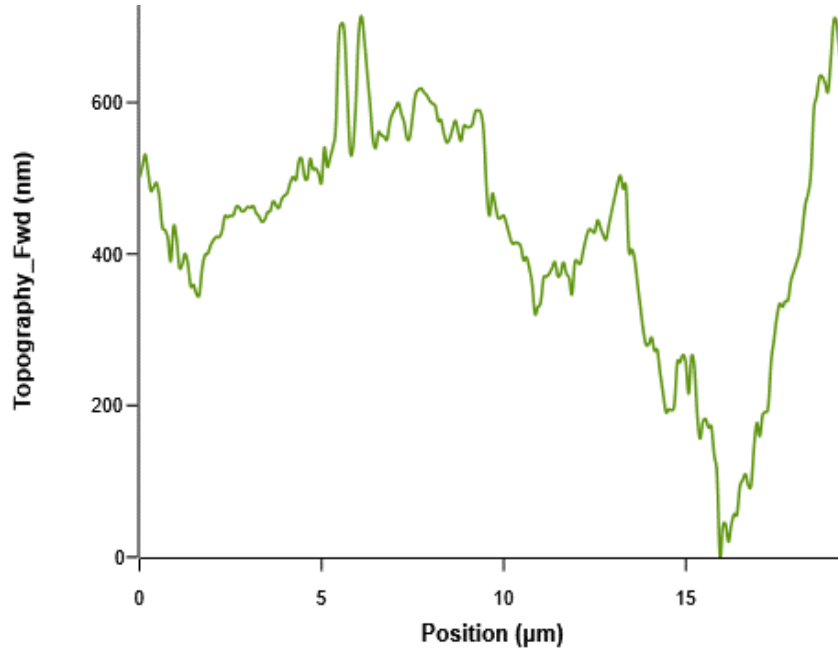
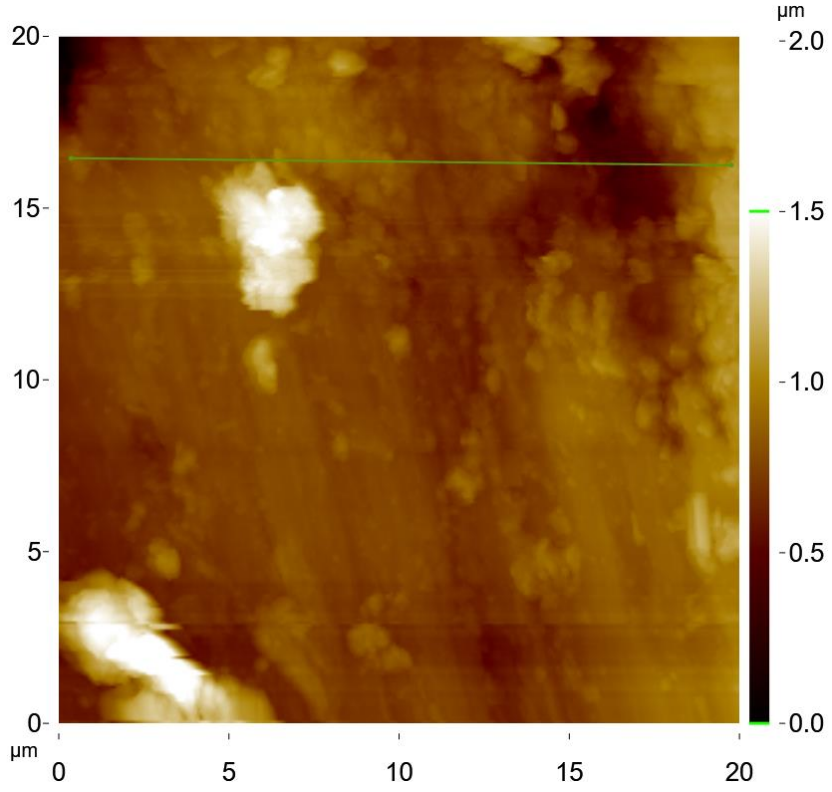
EK 4: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 4 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI



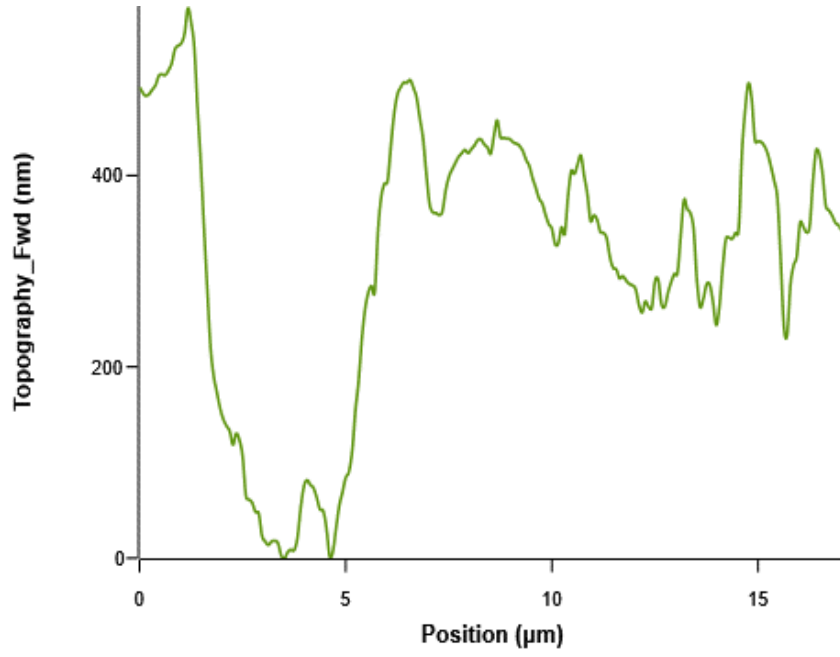
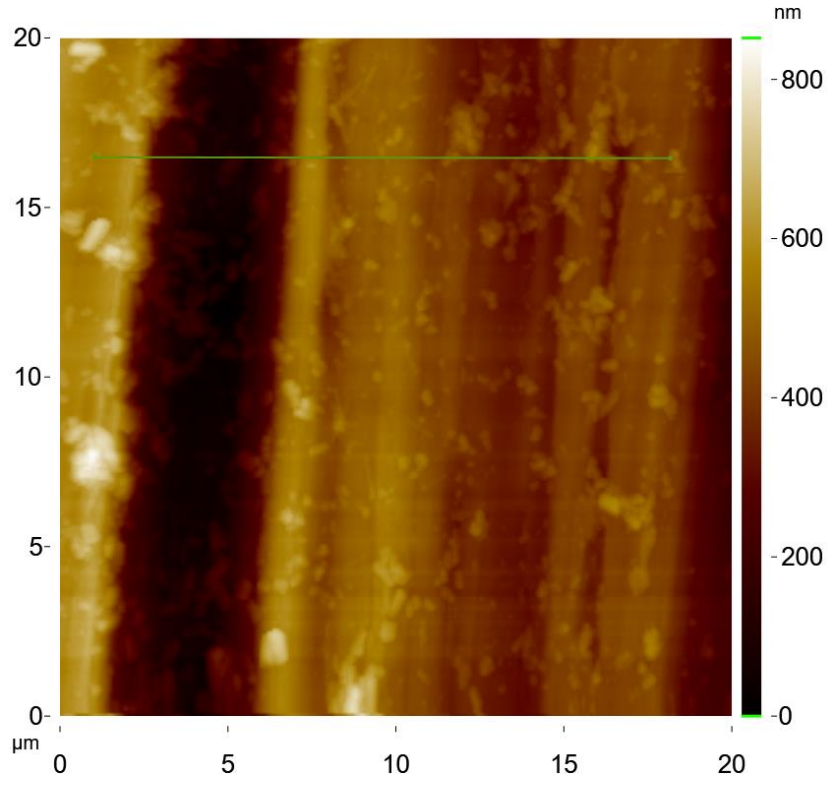
EK 5: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 5 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI



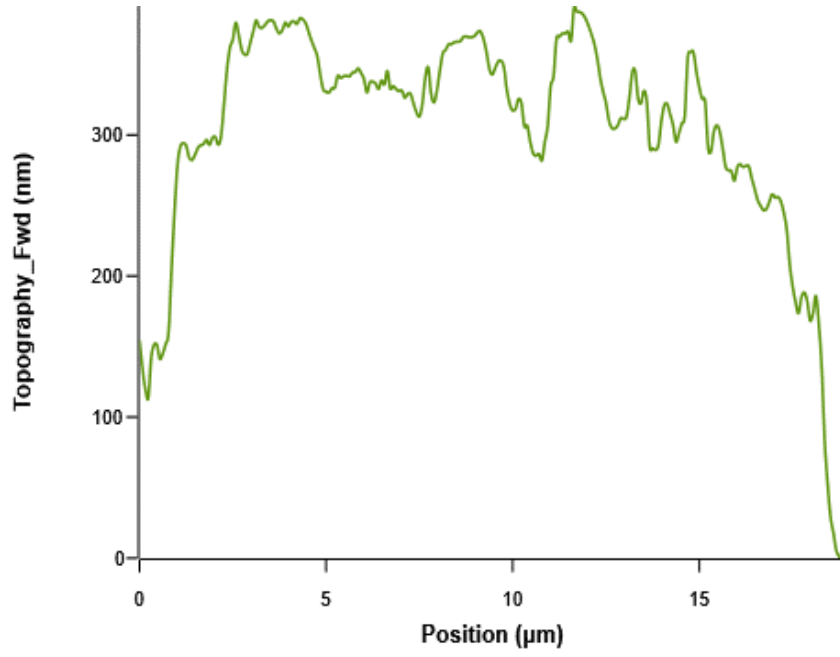
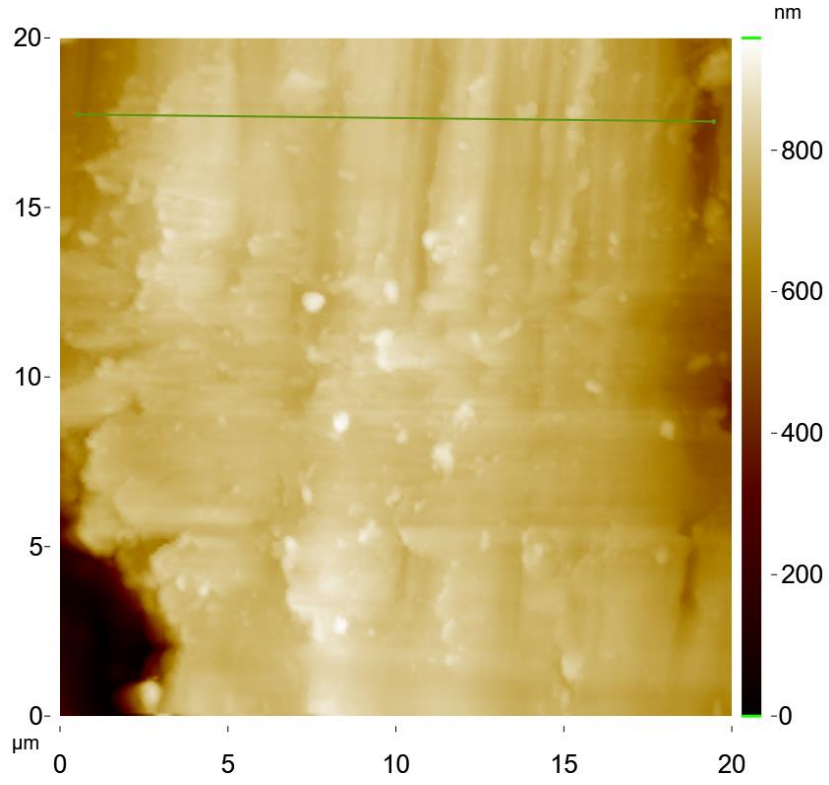
EK 6: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 6 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI



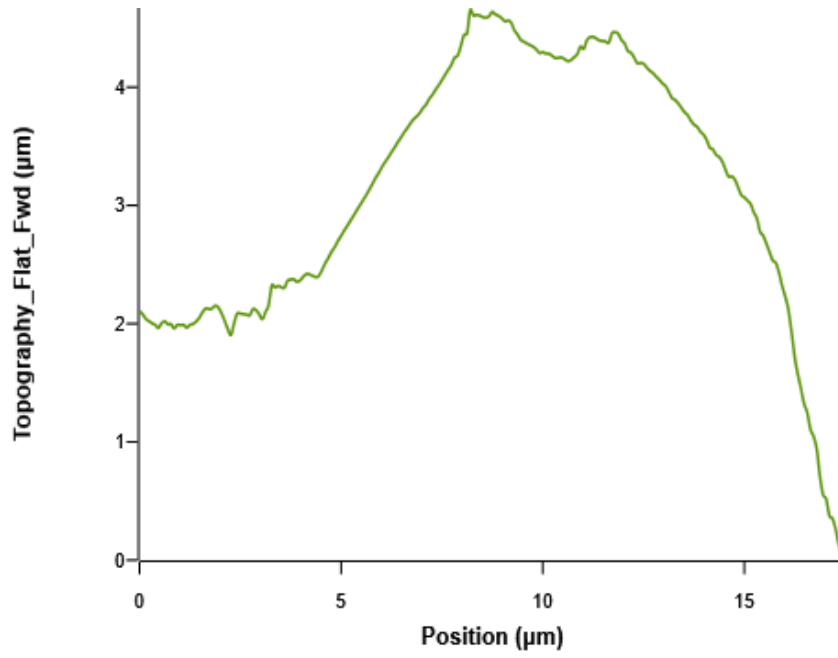
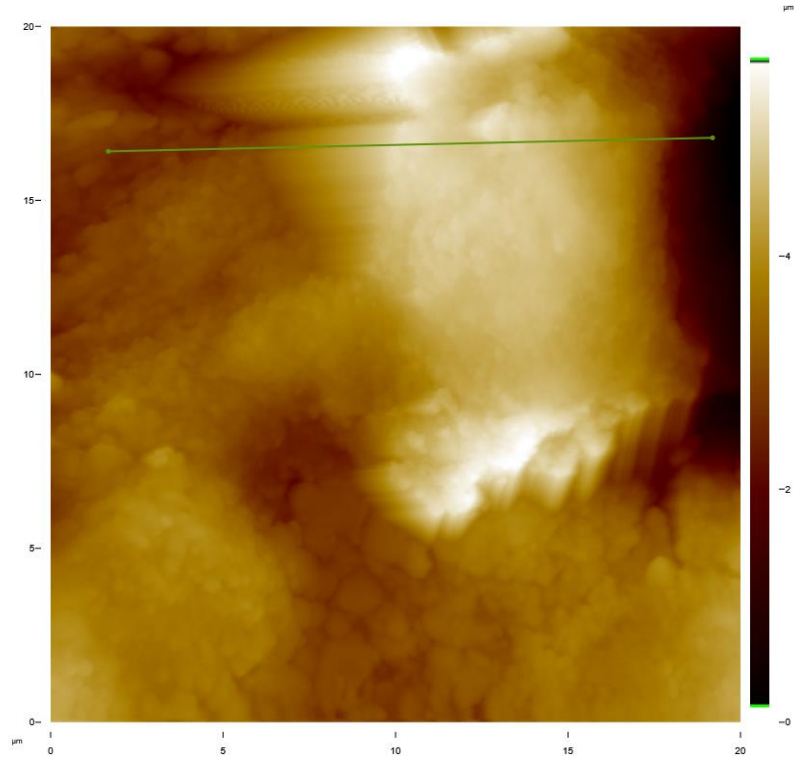
EK 7: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 7 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI



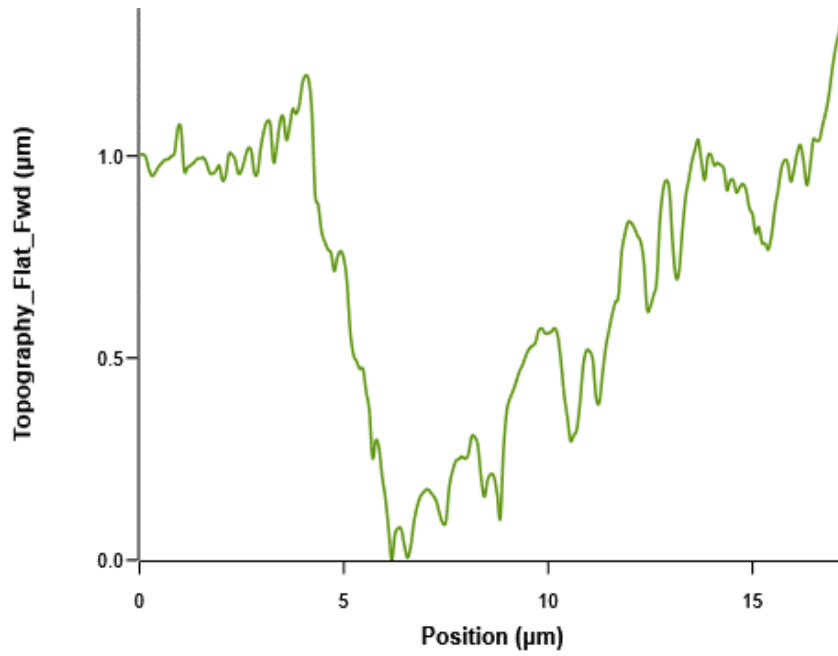
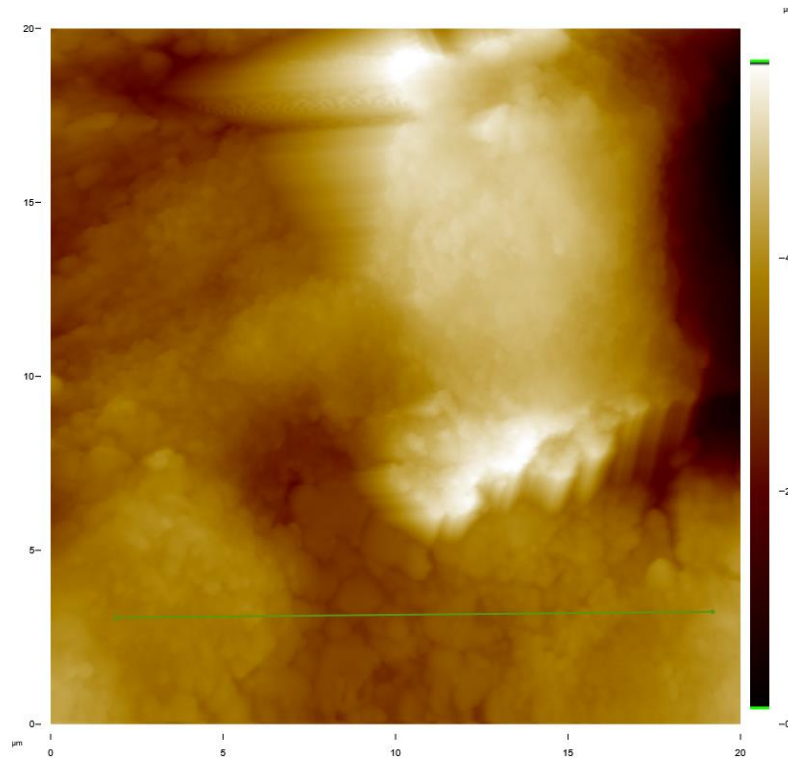
EK 8: KAPLAMA ÖNCESİ NUMUNE 8 TOPOGRAFYASI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI



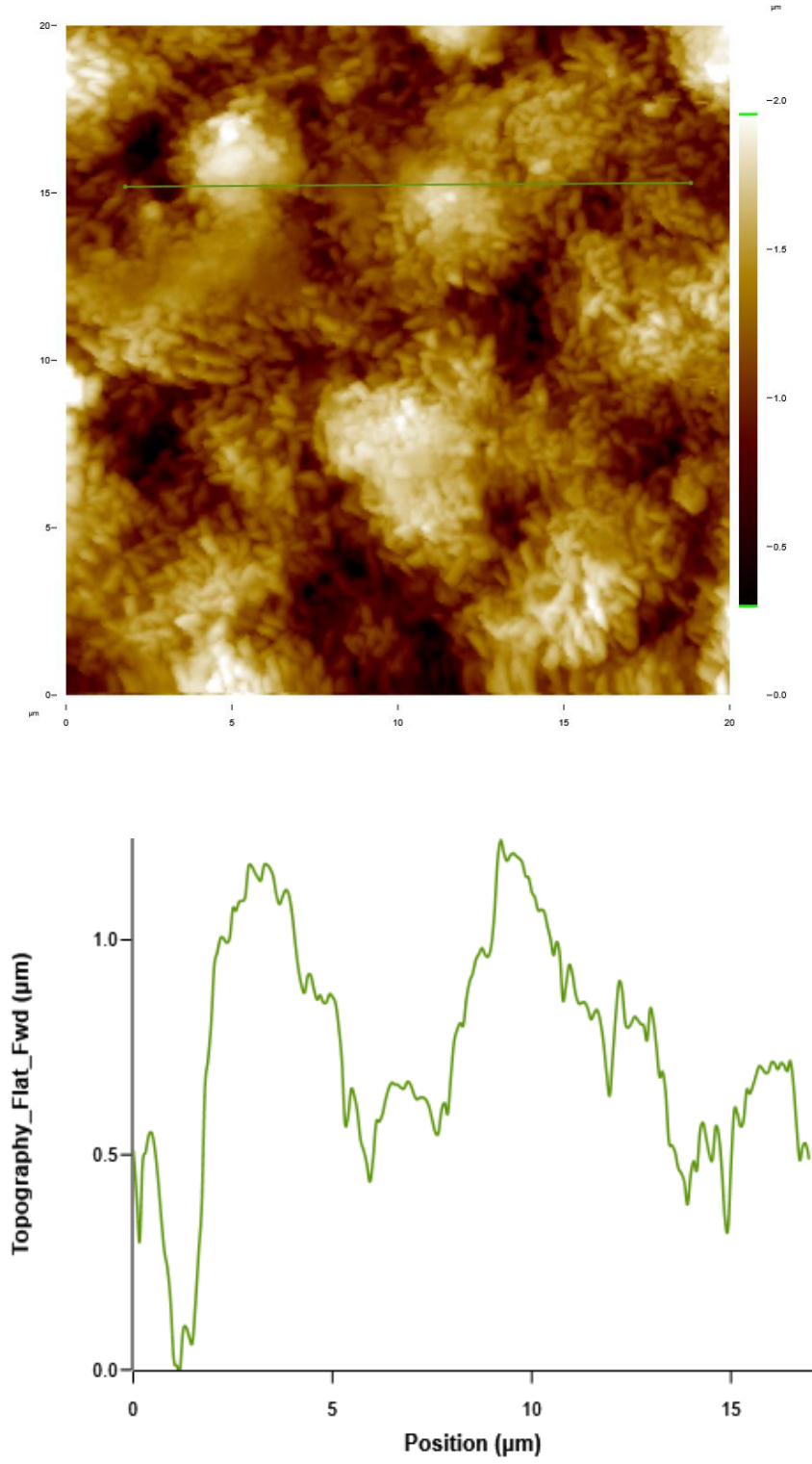
**EK 9: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 4 TOPOGRAFYASI VE KESİT 1
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI**



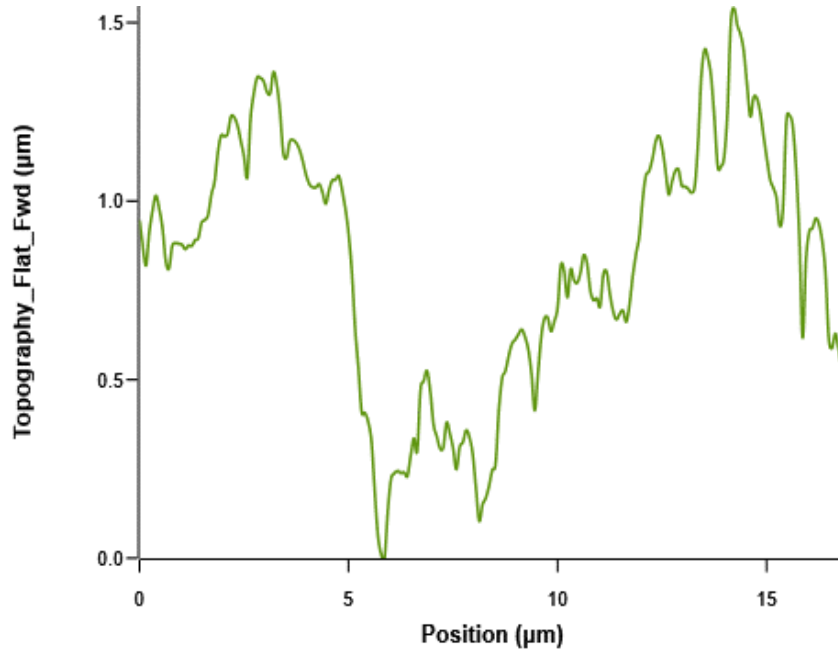
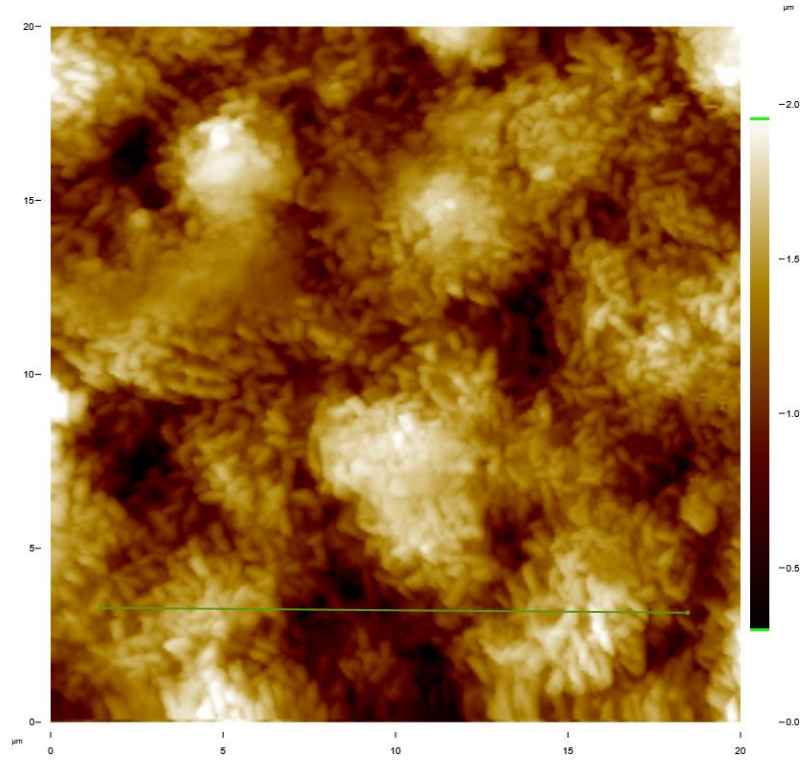
**EK 10: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 4 TOPOGRAFYASI VE KESİT 2
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI**



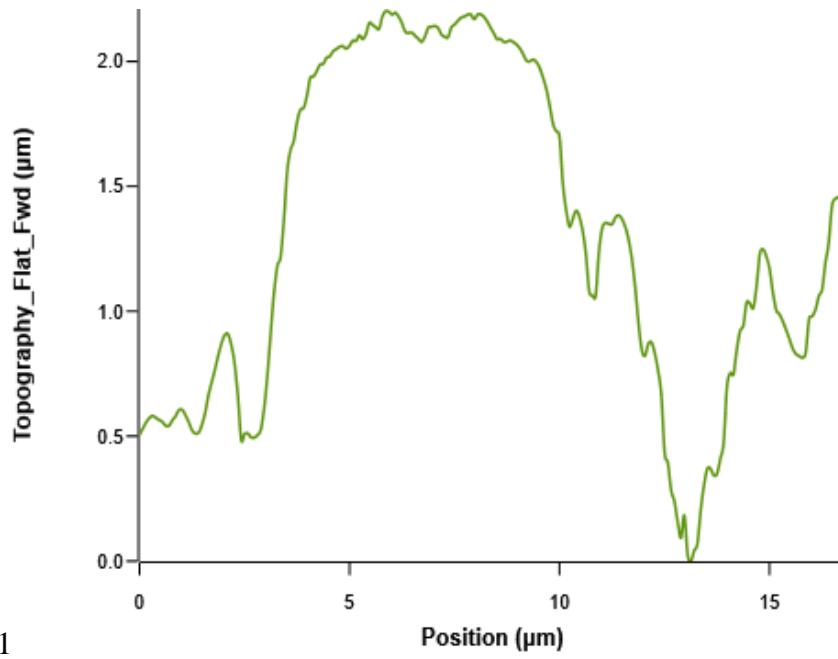
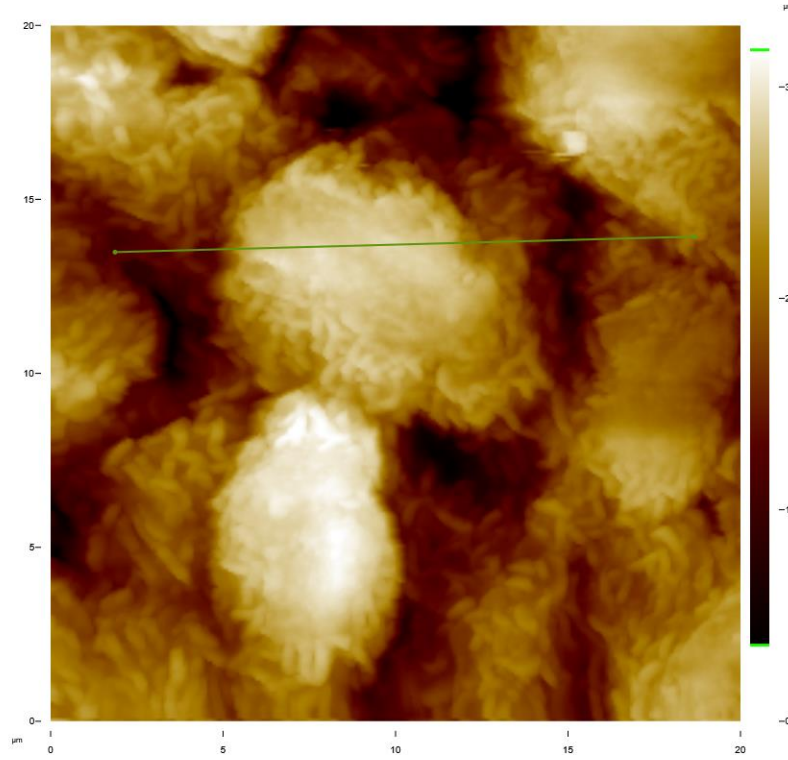
**EK 11: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 5 TOPOGRAFYASI VE KESİT 1
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI**



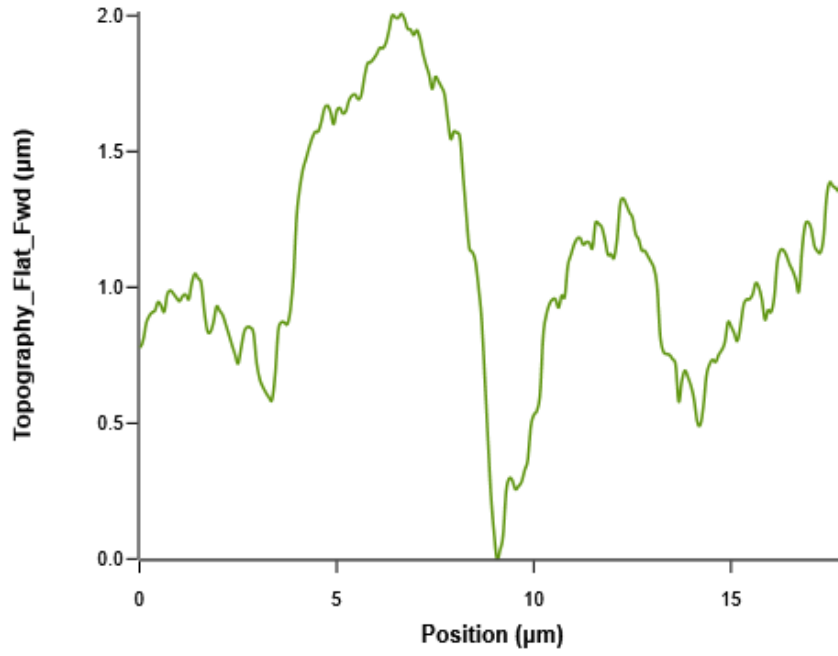
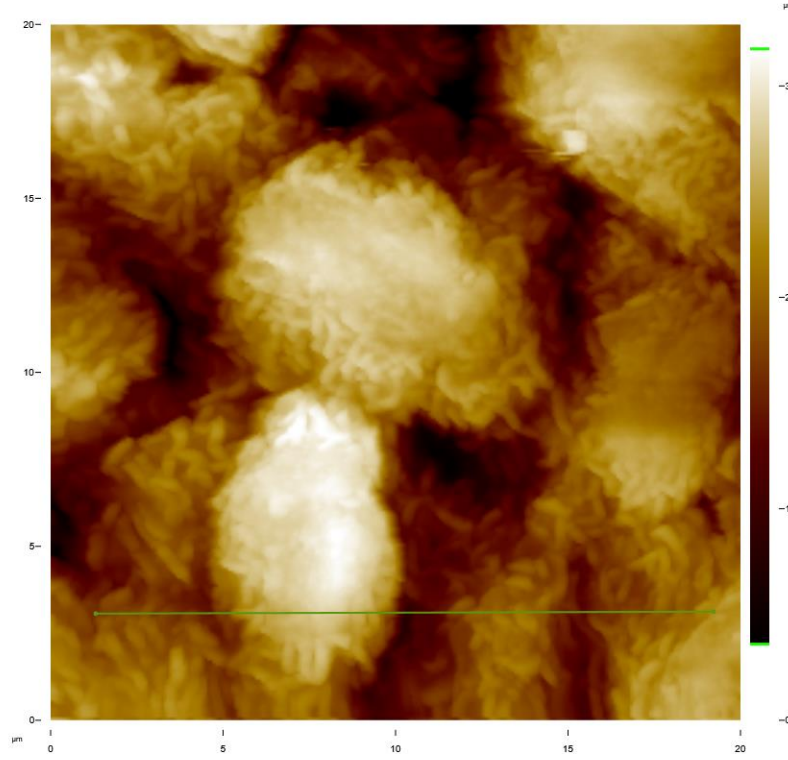
**EK 12: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 5 TOPOGRAFYASI VE KESİT 2
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI**



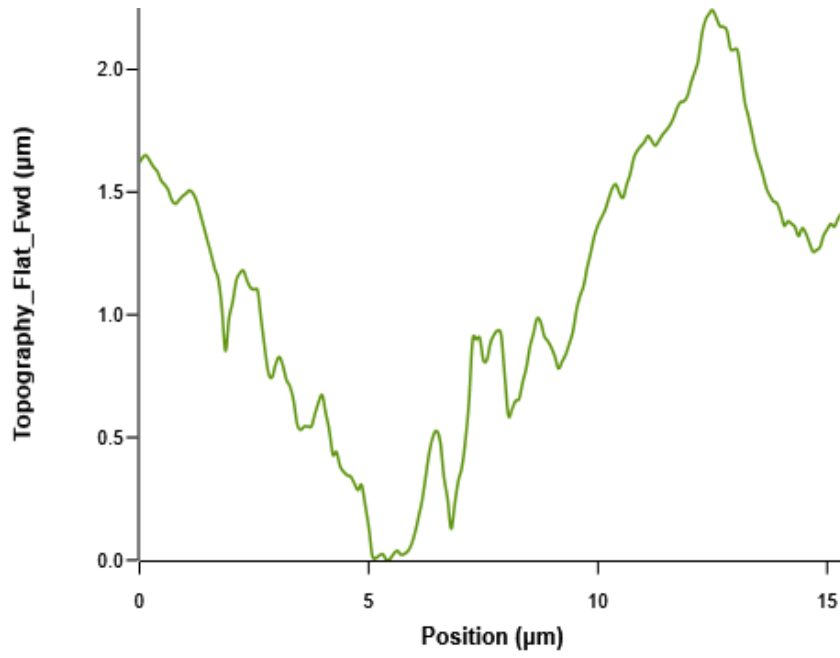
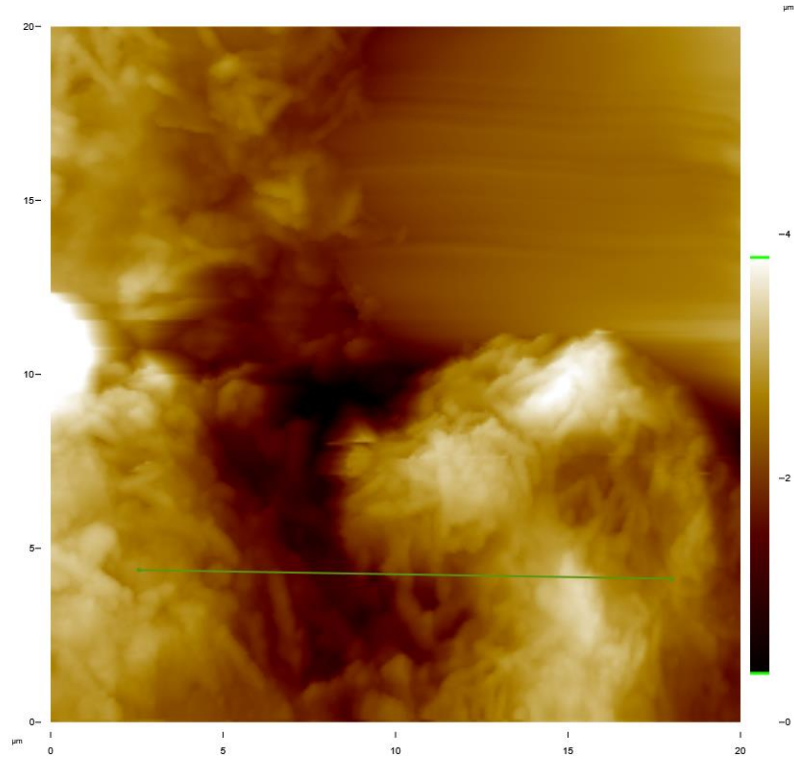
**EK 13: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 6 TOPOGRAFYASI VE KESİT 1
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI**



**EK 14: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 6 TOPOGRAFYASI VE KESİT 2
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI**



**EK 15: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 8 TOPOGRAFYASI VE KESİT 1
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI**



**EK 16: KAPLAMA SONRASI NUMUNE 8 TOPOGRAFYASI VE KESİT 2
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK HİSTORAMI**

