



**ANODİZASYON İŞLEMİ UYGULANMIŞ Cp-Ti,
Ti6Al4V ve Ti45Nb ALAŞIMLARININ TRİBOLOJİK ve
ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Kubilay ŞENEL

Danışman: Doç. Dr. Halim KOVACI
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2022
(Her hakkı saklıdır.)

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

**ANODİZASYON İŞLEMİ UYGULANMIŞ Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb
ALAŞIMLARININ TRİBOLOJİK ve ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

(Investigation of The Tribological and Electrochemical Properties of Anodized Cp-Ti,
Ti6Al4V and Ti45Nb Alloys)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kubilay ŞENEL

Danışman: Doç. Dr. Halim KOVACI

Erzurum
Ağustos 2022

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Kubilay ŞENEL tarafından hazırlanan “ANODİZASYON İŞLEMİ UYGULANMIŞ Cp-Ti, Ti6Al4V VE Ti45Nb ALAŞIMLARININ TRİBOLOJİK VE ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı çalışması 26/08/2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Mekanik Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Ayhan ÇELİK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Halim KOVACI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Ali Fatih YETİM <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

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

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak **Doç. Dr. Halim KOVACI** danışmanlığında sunulan “**ANODİZASYON İŞLEMİ UYGULANMIŞ Cp-Ti, Ti6Al4V VE Ti45Nb ALAŞIMLARININ TRİBOLOJİK VE ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	3	30
Kuramsal Temeller	12	30
Materyal ve Yöntem	7	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	0	20
Sonuç ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	11	25

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

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

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Kubilay ŞENEL	Doç. Dr. Halim KOVACI
26.8.2022	26.8.2022
İmza:Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

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

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

TEŞEKKÜR

Tez çalışması süresince benden hiçbir zaman desteklerini ve bilgisini esirgemeyen, değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Halim KOVACI'ya çok teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca daima yol gösterici olan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Ayhan ÇELİK ve Sayın Prof. Dr. Ali Fatih YETİM'e

Ayrıca değerli vaktini ve deneyimlerini devamlı paylaşan Sayın Arş. Gör. M. Taha ACAR'a, Sayın Arş. Gör. Burak ATİK'e, Sayın Arş. Gör. Dr. Yusuf Burak BOZKURT'a, Sayın Metalürji ve Malzeme Mühendisi Savaş KILIÇ'a deneysel çalışmalarına ve analizlerime yardımcı olan Sayın Öğr. Gör. Hasan Feyzi BUDAK'a, Sayın Öğr. Gör. Ahmet Emre KASAPOĞLU'na, Sayın Öğr. Gör. Dr. Betül Ceviz ŞAKAR'a, Sayın Öğr. Gör. Dr. Mehmet Semih BİNGÖL'e, Sayın Öğr. Gör. Kerem TURALIOĞLU'na, Sayın Öğr. Gör. Dr. Mustafa YAZICI'ya, Sayın Arş. Gör. Hilmi TEKDIR'e ayrıca emeği geçen bütün hocalarım, ailem ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Kubilay ŞENEL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANODİZASYON İŞLEMİ UYGULANMIŞ Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb ALAŞIMLARININ TRIBOLOJİK ve ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Kubilay ŞENEL

Danışman: Doç. Dr. Halim KOVACI

Amaç: Bu çalışmada, Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb titanyum alaşımlarına aynı parametrelerde anodik oksidasyon (anodizasyon) işlemi uygulanarak, bu malzemelerin hem yüzey sertliğinin artırılarak tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi hem de elde edilen TiO₂ anodik filmler sayesinde elektrokimyasal korozyon dirençlerinin artırılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Bar halinde bulunan Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımları 20×20×4 mm boyutlarında kesilmiştir. Kesilen numunelerin yüzeyleri SiC aşındırıcı zımpara kâğıtları ile zımparalandıktan sonra Al₂O₃ tozları ile yüzeyleri parlatılmıştır. Daha sonra tüm numunelerin yüzeyleri etil alkol ile yıkanarak temizlenmiştir. Hazırlanan numuneler anodizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Anodizasyon işlemi sonrasında hem işlemsiz numunelerde hem de anodize numunelerde XRD, Raman, yüzey ve kesit SEM, sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise numunelerin aşınma ve korozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Çalışmalar sonucunda, anodizasyon işlemi sonrasında malzeme yüzeyinde anataz fazı içeren oksit tabakası oluştuğu ve artan potansiyelle birlikte anataz faz yoğunluğunun ve oksit kalınlığının arttığı görülmüştür. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb titanyum alaşımlarının elektrik dirençlerinin farklı olmasından dolayı yüzeyde oluşan TiO₂ anodik film kalınlıkları farklılık göstermiştir ve anodizasyon işlemi sonrasında yüzeylerde morfolojik yapıların değiştiği görülmüştür. Elektrik direnç farklılığından dolayı numunelerde farklı şekillerde poroz yapıların oluştuğu ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin değiştiği gözlemlenmiştir. En kalın film Ti45Nb numunelerinden elde edilirken en ince filmler Cp-Ti numunelerinden elde edilmiştir. Elde edilen anodik filmlerin kalınlıkları, yüzey sertlikleri ve XRD ve Raman analiz sonuçlarından belirlendiği gibi anataz fazının yoğunluğu tribolojik ve elektrokimyasal performanslarda belirleyici rol oynamıştır. En düşük aşınma oranı, en yüksek film kalınlığına sahip olan Ti45Nb numunesinden elde edilmiştir. Ayrıca, anodizasyon işlemleri sonrasında malzemelerin korozyon direnci artmıştır.

Sonuç: Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb numunelerine anodizasyon işleminde uygulanan sürenin artması ile birlikte anodik filmlerin yüzey sertliğinin/kalınlığının artması ve anataz faz yoğunluğunun artması neticesinde malzemelerin tribolojik ve elektrokimyasal özellikleri artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Anodizasyon, Cp-Ti, Ti6Al4V, Ti45Nb, TiO₂

Ağustos 2022, 77 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION of THE TRIBOLOGICAL and ELECTROCHEMICAL PROPERTIES of ANODIZED Cp-Ti, Ti6Al4V and Ti45Nb ALLOYS

Kubilay ŞENEL

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Halim KOVACI

Purpose: In this study, it was aimed to improve the tribological properties of Cp-Ti, Ti6Al4V and Ti45Nb titanium alloys by increasing the surface hardness of these materials and to increase their electrochemical corrosion resistance thanks to the obtained TiO₂ anodic films.

Method: Cp-Ti, Ti6Al4V and Ti45Nb alloys in bar form were cut in 20×20×4 mm dimensions. After the surfaces of the cut samples were grinded with SiC abrasive sandpapers, the surfaces were polished with Al₂O₃ powders. Afterwards, the surfaces of all samples were cleaned with ethyl alcohol. The prepared samples were subjected to anodization process. After the anodization process, XRD, Raman, surface and cross-section SEM, hardness, surface roughness and contact angle analyzes were performed on both untreated and anodized samples. Finally, wear and corrosion tests were carried out.

Findings: As a result of the examinations, it was observed that an oxide layer consisting of anatase phase was formed on the surface of the material after the anodization process, and the anatase phase density and oxide film thickness increased with increasing potential. Due to the different electrical resistances of Cp-Ti, Ti6Al4V and Ti45Nb titanium alloys, the TiO₂ anodic film thicknesses formed on the surface differed, and it was observed that the morphological structures on the surfaces changed after the anodization process. It was observed that different shapes of porous structures were formed in the samples and the surface roughness values changed due to the difference in electrical resistance. While the thickest film was obtained from Ti45Nb samples, the thinnest films were obtained from Cp-Ti samples. The thickness of the obtained anodic films, the surface hardness and the density of the anatase phase as determined from the results of XRD and Raman analysis played a decisive role in the tribological and electrochemical performances. The lowest wear rate was obtained from the Ti45Nb sample with the highest film thickness. Also, corrosion resistance of the samples increased after anodization processes.

Results: The tribological and electrochemical properties of the materials increased as a result of the increase in the surface hardness/thickness of the anodic films and the increase in the anatase phase density with the increase of the time applied in the anodization process of Cp-Ti, Ti6Al4V and Ti45Nb samples.

Keywords: Anodization, Cp-Ti, Ti6Al4V, Ti45Nb, TiO₂

August 2022, 77 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	7
Titanyumun Kristal Yapısı.....	7
Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	8
Alfa (α) Alaşımları	8
Alfa+Beta ($\alpha + \beta$) Alaşımları	9
Beta (β) Alaşımları	9
Titanyum Alaşımlarının Kimyasal, Mekanik, Yapısal ve Tribolojik Özellikleri	9
Titanyum Alaşımlarının Avantajları ve Dezavantajları	12
Titanyum ve Alaşımlarına Uygulanan Yüzey İşlemleri.....	12
Titanyum Oksit (TiO_2) Tabakası.....	15
Korozyon.....	17
Korozyon Hücresi	18
Elektrokimyasal Reaksiyonlar	18
Elektrokimyasal Polarizasyon.....	19
Aşınma	19
Aşınma Mekanizmaları	20
MATERYAL ve YÖNTEM	23
Numunelerin Hazırlanması	23
Anodik Oksidasyon İşlemi.....	23
Yapısal, Morfolojik ve Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	24
Tribolojik ve Elektrokimyasal İncelemeler.....	27
Aşınma Deneyleri.....	27
Korozyon Deneyleri	29
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	30

Yapısal, Morfolojik ve Mekanik Özellikler	30
XRD ve Raman Analizleri	30
SEM analizleri.....	34
Sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı analizleri.....	37
Tribolojik Analizler.....	39
Aşınma Analizleri	39
Sıvı Aşınma Analizleri.....	45
Korozyon Analizleri.....	50
Açık devre potansiyeli ve potansiyodinamik tarama	50
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	55
Öneriler	56
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	63

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. Cp-Ti Alaşımının Kimyasal Bileşimi	9
Tablo 2. Ti6Al4V Alaşımının Kimyasal Bileşimi	10
Tablo 3. Ti45Nb Alaşımının Kimyasal Bileşimi	10
Tablo 4. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb Alaşımlarının Mekanik Özellikleri.....	11
Tablo 5. α , $\alpha+\beta$, β Alaşımlarının Özellikleri.....	12
Tablo 6. TiO ₂ Tabakasının Kristal Yapısı ve Fiziksel Özellikleri.....	15
Tablo 7. Cp-Ti Alaşımının Kimyasal Bileşimi	23
Tablo 8. Ti6Al4V Alaşımının Kimyasal Bileşimi	23
Tablo 9. Ti45Nb Alaşımının Kimyasal Bileşimi	23
Tablo 10. Kuru Aşınma Deney Parametreleri	28
Tablo 11. Sıvı Aşınma Deney Parametreleri	28
Tablo 12. Ringer Çözeltisinin Kimyasal İçeriği (100 ml)	28
Tablo 13. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb Alaşımlarına Ait Sertlik, Tabaka Kalınlığı, Yüzey Pürüzlülüğü ve Temas Açısı Değerleri.....	37
Tablo 14. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb Alaşımlarının Kuru Sürtünme Katsayı ve Aşınma Oranları.....	40
Tablo 15. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb Alaşımlarının Sıvı Sürtünme Katsayı ve Aşınma Oranları.....	46
Tablo 16. Potansiyodinamik Polarizasyon Taraması ve Tafel Eğri Uydurma Analizine Ait Sonuçlar	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Titanyumun periyodik cetveldeki yeri	1
Şekil 2. Titanyumun Kristal Yapısı: a) Sıkı Paket Hegzagonal (HSP) α fazı ve b) Hacim Merkezli Kübik (HMK) β fazı.....	7
Şekil 3. Alaşım elementlerinin faz diyagramları üzerindeki etkileri.....	8
Şekil 4. Titanyum ve alaşımlarına uygulanan yüzey işlemleri.....	13
Şekil 5. Anodik oksidasyon işleminin şematik gösterimi	14
Şekil 6. Anataz ve rutil kafes yapıları	16
Şekil 7. Titanyumun oksit büyümesi esnasında meydana gelen iletim sürecinin şematik gösterimi	17
Şekil 8. Korozyon sürecinin genel gösterimi	17
Şekil 9. Korozyon hücresi	18
Şekil 10. Elektrokimyasal reaksiyonlar için korozyon hücresinin şematik gösterimi	19
Şekil 11. Aşınma olayının şematik gösterimi.....	20
Şekil 12. Adheziv aşınma.....	20
Şekil 13. Abrazif Aşınma türleri: a) İki gövdeli abrazif aşınma b) Üç gövdeli abrazif aşınma.....	21
Şekil 14. Yorulma aşınması	21
Şekil 15. Korozyon aşınma	22
Şekil 16. Anodizasyon işlem ünitesi	24
Şekil 17. XRD cihazı.....	24
Şekil 18. Raman spektrometresi.....	25
Şekil 19. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı.....	25
Şekil 20. Temas açılma ölçer cihazı.....	26
Şekil 21. Üç boyutlu (3D) profilometre	26
Şekil 22. Mikrosertlik cihazı	27
Şekil 23. Aşınma cihazı.....	28
Şekil 24. Bakalite alma cihazı	29
Şekil 25. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti numunelerin XRD grafiği	30
Şekil 26. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti6Al4V numunelerin XRD grafiği	31
Şekil 27. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti45Nb numunelerin XRD grafiği	32
Şekil 28. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb numunelerine ait Raman spektrumları.....	33

Şekil 29. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb numunelerine ait Raman spektrumları (devamı)	34
Şekil 30. a) 0.5sa Cp-Ti, b) 1sa Cp-Ti c) 0.5sa Ti6Al4V d) 1sa Ti6Al4V e) 0.5sa Ti45Nb f) 1sa Ti45Nb alaşımlarına ait yüzey SEM görüntüleri.....	35
Şekil 31. a) 0.5sa Cp-Ti, b) 1sa Cp-Ti, c) 0.5sa Ti6Al4V, d) 1sa Ti6Al4V, e) 0.5sa Ti45Nb ve f) 1sa Ti45Nb alaşımlarına ait SEM kesit görüntüleri.....	36
Şekil 32. Titanyum alaşımlarına ait temas açısı görüntüleri	38
Şekil 33. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait kuru aşınma sürtünme katsayıları grafikleri	41
Şekil 34. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait kuru aşınma SEM görüntüleri	43
Şekil 35. Titanyum numunelerin kuru aşınma sonrası profilometre görüntüleri	44
Şekil 36. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait sıvı aşınma sürtünme katsayıları grafikleri	46
Şekil 37. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait sıvı aşınma SEM görüntüleri.....	48
Şekil 38. Titanyum numunelerin sıvı aşınma sonrası profilometre görüntüleri.....	49
Şekil 39. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti numunelere ait açık devre potansiyeli ölçümleri	50
Şekil 40. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti6Al4V numunelere ait açık devre potansiyeli ölçümleri	51
Şekil 41. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti45Nb numunelere ait açık devre potansiyeli ölçümleri	51
Şekil 42. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti numunelere ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	52
Şekil 43. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti6Al4V numunelere ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	53
Şekil 44. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti45Nb numunelere ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	53

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Semboller

A	Anataz
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
CH ₃ COOH	Asetik Asit
E _{kor}	Korozyon Potansiyeli
HV	Vickers Sertlik Deneyi
H ₂ SO ₄	Sülfirik Asit
H ₃ PO ₄	Fosforik Asit
I _{kor}	Korozyon Akım Yoğunluğu
mm	Milimetre
mpy	Korozyon Hızı
Nb	Niyobyum
nm	Nanometre
R	Rutil
mbar	milibar
Ra	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)
SiC	Silisyum Karbür
Ti	Titanyum
TiO ₂	Titanyum Dioksit
Ti ₃ Al	Titanyum Alüminit
W	Aşınma Oranı (mm ³ /Nm)
μ	Sürtünme Katsayısı
μm	Mikrometre
λ	Dalga Boyu

Kısaltmalar

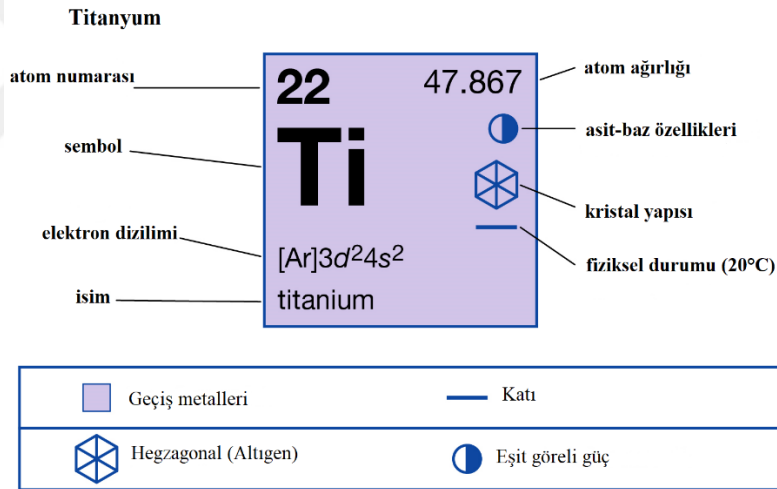
3D	3 Boyutlu
ÇE	Çalışma Elektrotu
DC	Doğru Akım
KE	Karşıt Elektrot
OCP	Açık Devre Potansiyeli
RE	Referans Elektrot
s	Saniye

sa	Saat
SBF	Yapay Vücut Sıvısı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
V	Volt
XRD	X-Işını Kırınım Ölçer
α	Sıkı Paket Hekzagonal Titanyum Faz Yapısı (HSP)
β	Hacim Merkezli Kübik Titanyum Faz Yapısı (HMK)



GİRİŞ

Titanyum; 1791 yılında rahip ve aynı zamanda mineralog William Gregor tarafından keşfedilmiştir fakat ismini 1793 yılında tüm dünyada kimya bilimine yaptığı katkılarla tanınan Martin Klaproth'dan almıştır. Klaproth bu ismi verirken Yunan mitolojisinde yer alan ve “Dünya” anlamına gelen Titanlardan esinlenmiştir (Leyens and Peters 2003). Titanyum, yeryüzünde en bol bulunan metallerden biridir. Bu metal; alüminyum, magnezyum ve demirden sonra en çok görülen dördüncü metalik malzemedir ve yerkabuğunun ise %0,6'sını oluşturur (Kaur and Singh 2019). Periyodik cetvelde 4-B grubunda yer alan; gümüş gri renkli, hafif fakat yüksek mukavemetli bir element olan titanyumun; atom numarası 22, atom ağırlığı 47.867, yoğunluğu 4.50 g/cm³, ergime noktası 1668 °C ve kaynama noktası 3260 °C 'dir (Liu *et al.* 2004). Şekil 1'de titanyumun periyodik cetveldeki yeri gösterilmiştir.



Şekil 1. Titanyumun periyodik cetveldeki yeri

Titanyum; düşük işlenebilirliği ve termal iletkenliğinden dolayı işlenmesi esnasında yüksek miktarda ısı üretir. Düşük elastisite modülü, yüksek işleme sıcaklığı ve iş parçasının ara yüzeyindeki kimyasal reaksiyonlardan dolayı işlenmesi zor bir malzemedir. Bununla birlikte titanyum, düşük sertliğinden dolayı da düşük aşınma direncine sahiptir (Sarma *et al.* 2020; Freese *et al.* 2001).

Titanyum alaşımları, 70 yılı aşkın süredir geniş çapta geliştirilmiş olup, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet-ağırlık oranlarına sahip malzemelerin gereksinimlerini karşılamaktadır. Bugün kullanımda olan 100'den fazla titanyum alaşımı vardır ve bunların 20 ila 30 'u endüstride kullanılmaktadır (Danail *et al.* 2016). Bunlardan Ti6Al4V alaşımı; toplam

kullanımının %50 'sinden fazlasını oluştururken, kullanımda olan titanyumun %20 ila %30 'u alaşımsız titanyumdur (Salihu *et al.* 2019).

Titanyum ve alaşımları; ylıksek korozyon direnci ve kriyojenik ozelliklerinden dolayı uzay/havacılık, kimya ve tıp alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır (Sarma *et al.* 2020). Titanyum ve alaşımları aynı zamanda ylıksek mukavemet ve dylşlıksek elastisite modllyl değerleri sayesinde ortopedik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Freese *et al.* 2001).

Titanyum ve alaşımlarının bir diğer kullanım alanı ise otomobil sanayidir. Isı eşanjorleri, şası parçaları ve egzoz gazı sistemleri gibi otomobilin onemli parçaları titanyum alaşımları kullanılarak utureilmektedir. Orta mukavemette titanyum alaşımları nakliye endlstriinde hareket iletim elemanları, ana gvde ve hidrolik pompaların parçalarının imalatı iwin kullanılır. Ylıksek kaliteli titanyum alaşımları ise denizaltılarda ince cidarlı kondansatör boruları, ince ısı eşanjorleri ve dizel motorların susturucularının uturetiminde kullanılır. Ylıksek kaliteli titanyum alaşımları 600⁰ C sıcaklığın utureinde bile uzun süre çalışma ozelliğine sahiptir. Bu tür alaşımların kullanım yeri ise genel olarak savaş uçakları ve jet motorlarının fan ve türbin disklerinin gvde parçalarıdır (Sarma *et al.* 2020).

Ti6Al4V alaşımının yoğunluğu ticari saf titanyumdan (Cp-Ti) daha dylşktür ve en yaygın kullanılan titanyum alaşımıdır. Mekanik ve fiziksel ozellikleri daha iyi olduğu iwin havacılık uygulamaları iwin uygundur (Almeida *et al.* 2018). Havacılıkta ise, sıcaklığın 300–350°C'yi geçmediği uçağın motor bileşenlerinin imalatında kullanılır (Sefer 2014).

Titanyum ve alaşımlarının aşınma, korozyon, sertlik ve yorulmaya karşı dayanımını artırmak iwin bazı yzzey işlemleri uygulanmaktadır. En çok uygulanmakta olan yzzey işlemleri; plazma destekli yzzey işlemleri, lazer kaplama, sol-jel, plazma sprey gibi işlemlerdir. Plazma destekli yzzey işlemleri genellikle kaplama kalınlıklarının fazla olmasına, delaminasyona ve işlem sonrasında yzzeyde birden fazla faz oluşmasına sebep olur. Elektrolitik proseslerin, faz kontrolly ve kalınlık gibi birçok avantajı olmasına rağmen yaygın değildir. Sol-jel işlemleri ise uzun süreli işlemlerdir ve istenilen daha fazla kaplama ozelliklerini elde etmek iwin son bir işleme gereksinim duyar (Rautray *et al.* 2010).

Anodizasyon (anodik oksidasyon) işlemi; işlem kontrollynün kolaylığı, dylşlık maliyeti ve dylşlık sıcaklıkta karmaşık geometrik parçalar utureinde homojen kaplamalar elde etme uygulanabilirliği sayesinde tercih edilmektedir (Jang *et al.* 2014). Fakat oksit tabakanın belirli bir kalınlığı aşamaması ve diflzyon blęesi oluşmaması bu yntemin dezavantajları arasında gvsterilir (Bayrak ve Asl 2020).

Titanyum ve alaşımlarının anodik oksidasyonu uzun zamandır bilinmektedir. Titanyum anotlamanın en büyük teknolojik avantajı, özellikle havacılık sanayisinde önemli olan yüksek adezyon sağlamasıdır (Liu *et al.* 2004). Anodizasyon işleminin amacı, herhangi bir metal yüzeyinin enerjisini artırarak yüzeyde oksit film oluşmasını sağlamak ya da mevcut oksit tabakasının kalınlığını artırmaktır. Anodizasyon yüzey işlemi çoğunlukla oksijen atomuna ilgisi yüksek olan metallere (Ti, Al, Mg, Cr vb.) uygulanan bir tekniktir. (Schmidt *et al.* 2013).

(Sibert 1963) anodik oksidasyonun; voltaj, akım yoğunluğu ve sıcaklık değerleri uygun bir şekilde ayarlandığı zaman titanyum yüzeyinde kalın, adezyonu yüksek bir titanyum oksit (TiO₂) tabakasının oluştuğunu bildirmiştir ve bir başka çalışmada anodizasyon işlemi ile titanyum metaller üzerinde gözenekli oksit film oluşturulduğunda, titanyum alaşımlarının tipine göre kristal yapılarının, yüzey morfolojilerinin ve kimyasal bileşimlerinin değişebileceği gösterilmiştir (Song *et al.* 2007).

(Narayanan and Seshadri 2007; Zwilling *et al.* 1999) yaptıkları çalışmalarda oksidasyon süresinin artmasıyla birlikte, TiO₂ tabakasının kalınlığının arttığını ve sonuç olarak yüksek oksit kalınlığının iyi bir korozyon direnci sağladığını bildirmiştir. Ancak oksit tabakasının kalınlığındaki artışın, çeşitli adezyon sorunlarına neden olabileceği ifade edilmiştir.

(Kuromoto *et al.* 2007); Cp-Ti alaşımına anodik oksidasyon işlemini sırasıyla; 50 V, 100 V, 150 V, 200 V ve 250 V değerlerinde, oda sıcaklığında, 1.4 M fosforik asit (H₃PO₄) çözelti içerisinde ve platin karşı elektrot (KE) kullanarak gerçekleştirmiştir. Tüm voltaj değerlerinde gözenekli titanyum tabakaların oluştuğunu fakat morfolojik farklılıklar gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Dielektrik bozulma sebebiyle gözenekli bölgelerin belirginleştiğini ve artan voltaj ile birlikte gözenek boyutunun ve film kalınlığının arttığını rapor etmişlerdir.

(Kumar *et al.* 2010) yaptıkları çalışmada Cp-Ti'nin anotlama ile yüzey işleminin, bu alaşımın aşınma ve korozyon direncini geliştirdiğini ve bunların arasında termal oksitlenmiş Cp-Ti'nin performansının anotlanmış olandan daha üstün olduğunu ortaya koymuştur.

(Yetim 2010); Cp-Ti üzerinde yaptığı anodizasyon çalışmasını; 1,5 M sülfirik asit (H₂SO₄) ve 0,3 M fosforik asit (H₃PO₄) çözeltisi içerisinde, 200 V uygulayarak, 3°C ve 40°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. İşlem sıcaklığının arttıkça gözenek boyutunun, oksit film sertliğinin, kalınlığının ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığını belirtmiştir. Sertlik sonuçlarına göre ise, düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen anodik oksidasyon işleminin daha yüksek sertlikte bir oksit filmi meydana getirdiğini göstermiştir. Aşınma testleri; atmosfer şartlarında, 10⁻³ mbar ve 10⁻⁶ mbar basınçlarda gerçekleştirilmiş olup; Cp-Ti'nin aşınma direncinin, oksit film katı bir

yağlayıcı gibi davrandığı için, tüm aşınma koşullarında anodizasyon işlemi ile önemli ölçüde arttığını belirlemiş ve en iyi aşınma direncine hem atmosfer ortamında hem de vakum şartlarında sert anodize edilmiş numunelerden elde etmiştir.

(Albayrak *et al.* 2013) çalışmalarında yapay vücut sıvısı (SBF) içerisinde Cp-Ti alaşımının tribokorozyon davranışı incelemelerinde anodik oksidasyonun ardından plazma nitrülemeyle dubleks işlem gerçekleştirmiştir. Dubleks yüzey işlemi sonrasında yüzeyde gözenekli TiO₂ katmanı gözlemlenmiştir. İç katman daha iyi korozyon direncine yol açmasına rağmen, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerlerinin nitrülenmiş numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda dubleks işlemli numunelerin; aşınmadan dolayı kaynaklanan malzeme kaybının işlemsiz numunelere göre daha az olduğunu belirtmişlerdir. Yüzeyde de en iyi tribokorozyon davranışına dubleks işlem görmüş numunelerden elde edilen sonuçlardan geldiği rapor edilmiştir.

(Lario *et al.* 2019) yaptıkları araştırmada Ti6Al4V alaşımının anodik oksidasyonunun, biyomedikal alaşımı üzerinde bir nanotüp elde etmek için başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) sonuçlarının, yüksek korozyon direncine sahip metal/nanotüp ara yüzü arasında kalın bir oksit tabakası oluştuğunu göstermişlerdir. Potansiyodinamik polarizasyon çalışmalarında, nanotüpün yüzey alanını arttırdığını ve korozyon potansiyelini azalttığını ifade etmişlerdir. Elektrokimyasal ölçümlerin, nanotübüler oksit oluşumundan sonra tavlama işleminin, elde edilen malzemenin korozyon direncini arttırdığını ileri sürmüşlerdir. Anataz pikine ise, tavlama işleminden sonra sadece nanotübüler numunelerin XRD sonuçlarında ulaşıldığını belirtmişlerdir.

(Bayrak ve Asl 2020); anodizasyon işlemini 1.5 M H₂SO₄ çözelti içerisinde, 100 V ve 600 s süre boyunca Ti6Al4V alaşımı üzerindeki etkilerini incelemiş ve işlemsiz numunelerle karşılaştırmıştır. Deneyler sonucunda sertlik değerinin, anodizasyon işlemine tabi tutulan numunelerin işlemsiz numunelere göre yaklaşık %36 arttığını, yüzey pürüzlülüğünün %33 azaldığını ve temas açısı değerinin 85.36° olduğunu ifade etmişlerdir.

(Zorn *et al.* 2006); Ti45Nb alaşımını 120-130 V değerinde anodize ettiklerinde, anataz yapısına sahip pürüzlü ve gözenekli bir yüzey oksit elde etmişlerdir. Anodik oksidasyonun, tabandaki Ti45Nb alaşımının mikro yapısını, bileşimini ve mikro sertliğini etkilemediğini tespit etmişler ve nanometre ölçeğinde anodik oksitin, termal oksitten çok daha pürüzsüz olduğunu göstermişlerdir. Uygulanan voltaj 110 V değerinin üzerine çıktıkça da oksit yapısının bozulduğunu ve yavaşça amorf yapıdan kristal yapıya dönüştüğünü bildirmişlerdir. Ayrıca anotlama işleminin Ti45Nb alaşımının oksit tabakası kalınlığını ve yüzey pürüzlülüğünü artırdığını ifade etmişlerdir.

(Tasdemir and Alsaran 2020) anodizasyon işleminden sonra Ti45Nb alaşımı üzerinde farklı oranlarda anataz ve rutil fazlarından oluşan titanyum dioksit (TiO_2) tabakası oluştuğunu ve TiO_2 tabakasındaki rutil faz oranının, artan anotlama potansiyeliyle birlikte arttığını belirtmişlerdir. Anodizasyon işleminin, Ti45Nb alaşımının korozyon direncini artırdığını, tribokorozyon sonrası aşınma hacminin hem mekanik hem de kimyasal etkiler sonucunda oluştuğu ve her iki koşulda toplam hacim üzerinde mekanik etkinin daha baskın olduğunu ifade etmişlerdir. En düşük toplam hacim ise rutil fazlı numunelerden elde edilmiştir. Anodize yapı Ti45Nb alaşımının korozyon ve aşınma direncini artırırken, anataz yapıdan kaynaklanan pullanmanın aşınma miktarını artırdığını, her koşulda ise rutil fazın anataz fazına kıyasla daha kararlı bir tribokorozyon davranışı gösterdiğini ifade etmişlerdir.

(Tasdemir vd 2020) ise yaptıkları çalışmada; Ti45Nb yüzeyinde anodizasyon potansiyelinin artmasıyla oksit film kalınlığının ve sertliğinin arttığı belirlemişlerdir. Buna bağlı olarak da anodize edilmiş Ti45Nb alaşımının aşınma dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca anodizasyon potansiyelinin artmasıyla malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve porozitesinin arttığını belirlemişlerdir. Düşük gerilim değerlerinde yapılan anodizasyon işleminde TiO_2 yapısında anataz fazının hâkimken, yüksek gerilim değerlerinde rutil faz yapısının hâkim olduğunu ifade etmişlerdir.

Titanyum ve alaşımlarının anodizasyonunun gerilim değerlerindeki değişimlere göre incelendiği birçok çalışma mevcuttur. 60 V uygulanan bir gerilime kadar 1 M H_2SO_4 elektrolit çözeltisi kullanılarak üretilen teknikte elde edilen filmlerin amorf olduğu bilinmektedir (Diamanti and Pedferri 2007, Velten *et al.* 2002). 150 ve 175 V'luk daha yüksek anotlama voltajlarında, numunelerin yaklaşık 2 μm kalınlığında TiO_2 oksit tabakası ile kaplandığı ifade edilmiştir (Cheraghali *et al.* 2020).

Literatür araştırmalarından görüleceği üzere, titanyum ve alaşımlarının anodizasyon davranışları farklı çalışmalarda ele alınmıştır. Ancak literatürde, α , β ve $\alpha+\beta$ fazlarına sahip olan titanyum ve alaşımlarının anodizasyon davranışı karşılaştırmalı olarak detaylı bir şekilde incelenmemiştir. Bu sebeple, bu çalışmada; anodizasyon işleminin farklı faz yapılarına sahip (α , β ve $\alpha+\beta$) Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarının yapısal, mekanik, tribolojik ve elektrokimyasal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu inceleme için malzemeler öncelikle farklı şartlarda anodizasyon işlemine tabii tutulmuştur. Anodizasyon işlemi sonrasında malzemelerin yüzeyinde oluşan oksit yapılarının yapısal, morfolojik ve mekanik özellikleri X-Işını Difraksiyonu (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Raman Spektroskopisi, üç boyutlu (3D) profilometre ve mikro sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Malzemelerin tribolojik ve elektrokimyasal özelliklerinin incelenmesi için ise pin-on-disk

aşınma ve korozyon deneyleri gerçekleştirmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak açıklanmıştır.

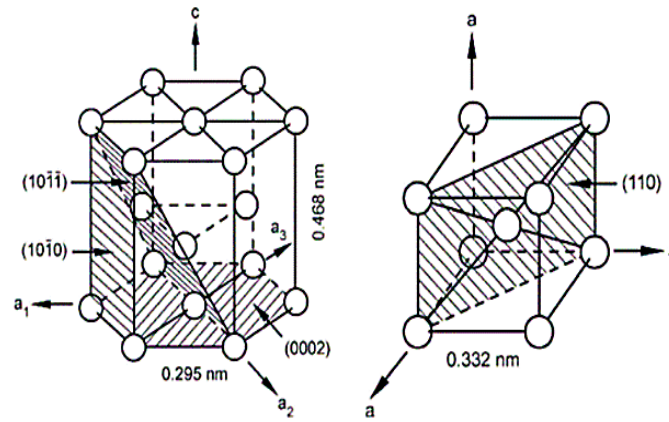


KURAMSAL TEMELLER

Titanyumun Kristal Yapısı

Titanyum diğer metaller gibi geniş sıcaklık aralığında çeşitli kristal yapılarda kristalleşebilir. Bir kristal yapıdan başka bir kristal yapıya dönüşürken tamamlanan dönüşüm ‘allotropik dönüşüm’ olarak adlandırılırken bu dönüşüm sıcaklığına ise ‘geçiş sıcaklığı’ denir (Ahmed *et al.* 2014).

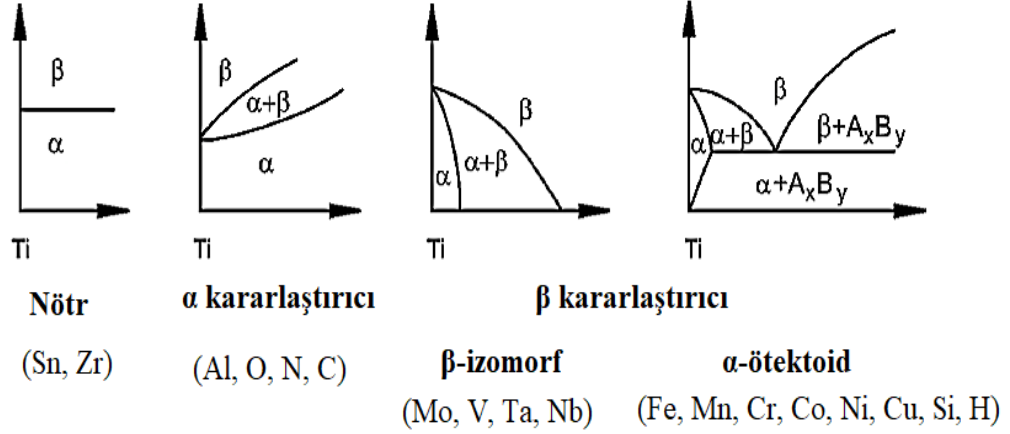
Titanyum normalde saf ve alaşım halinde mevcuttur. Saf titanyum allotropik bir elementtir ve sıkı paket hegzagonal (HSP) yapıya (alfa- α) sahiptir ancak 882°C’nin üzerine ısıtıldığında hacim merkezli kübik (HMK) yapıya (beta- β) dönüşür (Leyens and Peters 2003). HSP ve HMK yapılar Şekil 2’de gösterilmiştir. Alaşım elementlerinin titanyuma eklenmesi, bu dönüşüm sıcaklığını etkiler. Herhangi bir alaşımdaki alfa ve beta fazlarının miktarı; malzemenin çekme dayanımı, sertlik, süneklik, sürünme özellikleri, şekillendirme kolaylığı ve kaynaklanabilirlik gibi birçok özelliğini etkiler (Salihu 2019).



Şekil 2. Titanyumun Kristal Yapısı: **a)** Sıkı Paket Hegzagonal (HSP) α fazı ve **b)** Hacim Merkezli Kübik (HMK) β fazı (Lutjering and Williams 2007)

Alfa kararlaştırıcı elementler geçiş sıcaklığını artırırken, beta kararlaştırıcı elementler geçiş sıcaklığını düşürür. Alüminyum (Al) en yaygın kullanılan α kararlaştırıcı alaşım elementidir, çünkü hem α hem de β fazında büyük çözünürlüğe sahip olan tek elementtir. Bununla birlikte, çoğu titanyum alaşımındaki içeriği ağırlık olarak yaklaşık %6 ile sınırlıdır. Bunun sebebi α fazında titanyum alüminit (Ti_3Al) çökeltilerinin oluşumunu engellemek içindir. Diğer α kararlaştırıcı elementler ise oksijen, azot ve karbondur. Oksijen (O), titanyum alaşımlarının mukavemetini artıran önemli bir alaşım elementidir. Beta fazını kararlı hale getiren iki grup element türü vardır. Bunlar β -izomorf ve β -öktoid olarak isimlendirilirler.

İzomorf grup β fazı içerisinde tam olarak çözünebilen Mo, Ta, V ve Nb içerir. β ötektoid grup ise Fe, Mn, Cr ve Co gibi elementler içeren titanyum ile ötektoid alaşımlar yapan elementlerdir (Leyens and Peters 2003). Saf titanyum O, C ve N gibi geçiş sıcaklığını artıran alfa kararlaştırıcı elementler içerirken Ti6Al4V alaşımı içerisindeki ilave elementler titanyumun mukavemetini artırır. Azot, karbon ve oksijene göre titanyumun mukavemetini yaklaşık olarak iki kat artırmaktadır. Şekil 3'te bazı alaşım elementlerinin faz diyagramları üzerindeki etkileri gösterilmiştir.



Şekil 3. Alaşım elementlerinin faz diyagramları üzerindeki etkileri (Lutjering and Williams 2007)

Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımları, alaşım elementlerinin türlerine ve konsantrasyonlarına göre değişen denge yapılarına göre alfa (α), alfa+beta ($\alpha+\beta$) ve beta (β) alaşımları olarak üç farklı kategoride sınıflandırılır. Alfa alaşımının yapısında sadece alfa, beta alaşımının yapısında ise sadece beta fazı bulunur. Alfa+beta alaşımlarında ise her iki faz bir arada mevcuttur.

Alfa (α) Alaşımları

Alfa alaşımları (α) tek faz içeren alaşımlardır. En önemli α dengeleyicisi alüminyumdur. Alüminyum, oksijen gibi elementler alfa fazını kararlı duruma getirmektedirler. Alfa alaşımları yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı dayanıklıdır ve yüksek kararlılık gösterirler. Düşük miktarda ara yer atomu içerirler (Brown and Lemons 1996). Alfa alaşımlarının en yaygın kullanım alanı kimya endüstrisidir. Bunun sebebi, alfa alaşımlarının sahip olduğu yüksek korozyon direnci özelliğidir (Leyens and Peters 2003).

Alfa+Beta ($\alpha + \beta$) Alaşımları

Alfa+Beta alaşımları ($\alpha + \beta$) α ve β fazlarının karışımını destekleyen bir bileşime sahiptir. Termodinamik dengede birçok ikili β dengeleyici alaşım iki fazlı olmasına rağmen, pratikte genellikle $\alpha + \beta$ alaşımları hem α hem de β stabilizatörlerinin karışımlarını içerir. Bu alaşımların özellikleri, mevcut fazların miktarlarını ve türlerini ayarlamak için kullanılan ısıtılma işlemi yoluyla kontrol edilebilir. Alfa+Beta alaşımları genellikle iyi işlenebilirliklerinin yanı sıra yüksek mukavemet sergilerler (Zhecheva *et al.* 2005).

Bu sınıfın daha düşük mukavemet aralıklarındaki alaşımları genellikle tavlama işleminden sonra yüksek oranda homojenlik ve süneklikle beraber çok iyi mukavemet sağlanır. Alaşımları bu durumda kullanmanın faydası, maliyetin düşük olması ve ısıtılma işlemi sırasında istenilen minimum artık gerilmedir. Çünkü artık gerilmeler, parçaların işlenmesi esnasında önemli zorluklar ortaya çıkarır (Lutjering and Williams 2007).

Beta (β) Alaşımları

Beta (β) alaşımları kararsız alaşımlardır. Kırılma toklukları yüksektir. Ayrıca bu alaşımlar sünek-kırılgan dönüşüme eğilimlidir ve düşük sıcaklık uygulamaları için uygun değildir (Zhecheva *et al.* 2005).

Beta alaşımları, β fazı alanından oda sıcaklığına soğuduktan sonra martenzitik olarak dönüşmez. β alaşımları; β stabilize edici elementlerin miktarına bağlı olarak, oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra yarı kararlı bir formda tutulabilir ve fazda önemli bir çökme meydana gelmez. Bu durumda alaşımların düşük sıcaklıklarda deforme olması kolaydır (Lutjering and Williams 2007). Beta alaşımları; faz dönüşümü sıcaklığını azaltma eğiliminde olan V, Mo, Nb, Ta ve Cr gibi geçiş elementleri içerir. Bu β stabilizatör elementler normalde kararsız yapıda bulunan β alaşımlarını kararlı hale getirir (Ezugwu and Wang 1997).

Titanyum Alaşımlarının Kimyasal, Mekanik, Yapısal ve Tribolojik Özellikleri

Cp-Ti yapısında başta demir (Fe) ve oksijen (O) olmak üzere çeşitli birçok element içerir. Ti6Al4V yapısında ise, %6 alüminyum (Al), ve %4 vanadyum (V) elementi bulunur. Alfa fazını Al, beta fazını ise V kararlaştırıcısı oluşturur. Tablo 1’de Cp-Ti alaşımlarının kimyasal bileşimi, Tablo 2’de ise Ti6Al4V alaşımlarının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 1. Cp-Ti Alaşımlarının Kimyasal Bileşimi (Wong *et al.* 2011)

Element	N	H	Al	Ni	C	Cr	V	Si	Fe	O	Diğer	Ti
Ağırlık (%)	0.0042	0.0051	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.12	0.141	<0.1	Kalan

Tablo 2. Ti6Al4V Alaşımının Kimyasal Bileşimi (Nourbakhsha *et al.* 2013)

Element	C	Fe	Al	O	N	V	H	Ti
Ağırlık (%)	0.08	0.22	6.08	0.2	0.05	4.02	0.15	Kalan

Ti45Nb alaşımının yapısı ise neredeyse tamamı niyobyum (Nb) ve titanyum (Ti) elementlerinden oluşmaktadır. Tablo 3'te Ti45Nb alaşımının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 3. Ti45Nb Alaşımının Kimyasal Bileşimi (Tasdemir vd 2020)

Element	Nb	Ti	Diğer
Ağırlık (%)	45.11	54.69	0.20

Titanyum ve alaşımlarının mekanik özellikleri çeşitli bazı faktörlere bağlıdır. Bunlar; alaşımın bileşimi, işleme yöntemi, mikroyapı (kristal yapı ve tane boyutu) ve mukavemet artırma mekanizmasıdır. İstenilen mekanik özelliklere, malzemenin mikroyapısını çeşitli yöntemlerle (termo-mekanik işlem, sıcak ve soğuk işlem ve ısıtma işlem) değiştirilerek ulaşmak mümkündür (Yadav and Saxena 2020).

Alfa alaşımları yüksek sıcaklık alaşımlarıdır. Bu alaşımlar sertlik, sürünme dayanımı ve kaynaklanabilirlikleriyle ön plana çıkarken; Beta alaşımları, yüksek mukavemetleri ve sertliğiyle dikkat çeker. Alfa alaşımları zayıf şekillendirme özelliğine sahiptir. Çok düşük sıcaklıklarda bile sünekliklerini ve tokluklarını muhafaza ederler (Leyens and Peters 2003). Alfa alaşımları genellikle beta alaşımlarından daha üstün sürünme direncine sahiptir ve yüksek sıcaklık uygulamalarında (500 °C-550 °C) tercih edilirler. Alfa alaşımlarının sünek olmaması da kriyojenik uygulamalar için bu alaşımları uygun hale getirir. Beta alaşımlarının aksine ısıtma işlemle mukavemetleri artırılmaz çünkü alfa alaşımları kararlı fazlardır (Oshida 2010).

Alfa alaşımları yüksek mukavemet, tokluk ve kaynaklanabilirlik ile ön plana çıkarken, beta alaşımları zayıf dövülebilirlikte dirler. Dövme esnasında oluşan yüzey çatlakları ve kırılmalar bunu kanıtlar (Zhecheva *et al.* 2005). Ti6Al4V en popüler ve en çok kullanılan alfa+beta alaşımıdır. Bunun sebebi, yüksek plastik işlenebilirlik, ısıtma işlem kabiliyeti ve kaynaklanabilirlik gibi özelliklere sahip olmasıdır (Leyens and Peters 2003). Bu alaşım; mukavemet, korozyon direnci ve fabrikasyon kabiliyetleriyle dikkat çeker (Sefer 2014).

β titanyum alaşımları, titanyum alaşım elementleri içerisinde en yüksek alaşımlı ve çözünürlüğe sahip alaşımdır. Bu alaşımlar; kalın bölgelerde yüksek mukavemetle ısıtma işlem gördükleri için ağır kesitli işlemlere ve levha yapıların üretimine çok müsaittir. Diğer alaşımlara kıyasla daha geniş dövme sıcaklığı aralığındadır. Mükemmel dövülebilirlik ve ısıtma işlem kapasitesine (450 °C-650 °C) sahiptir. Beta alaşımları; yüksek mukavemetleriyle ve yorulma dirençleriyle ön plana çıkar. Ayrıca potansiyel uygulamaları bakımından titanyum alaşımları

içerisinde en dikkat çekici alaşımdır (Oshida 2010). ($\alpha + \beta$) alaşımlarına göre ısıtıl işlem uygulanabilirliği ve işlenebilirlik özelliği daha yüksektir. Dövülme, sertleşme ve soğuk şekillendirme özelliğiyle diğer titanyum alaşımlarından yüksektir (Ezugwu and Wang 1997). Tablo 4'te Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarının mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb Alaşımlarının Mekanik Özellikleri (Long and Rack 1998; Hacısalihoğlu *et al.* 2021)

Alaşım	Mikroyapı	Elastisite Modülü (GPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Cp-Ti	alfa	105	692	785
Ti6Al4V	alfa+beta	110	850-900	960-970
Ti45Nb	beta	65	460	480

Alfa fazına yakın alaşımlar üstün korozyon direncine sahipken, beta fazına yakın alaşımlar şekillenme özelliğiyle ön plana çıkarlar. Beta fazı, alaşıma sertleşme özelliği verir (Leyens and Peters 2003). Alfa (α) alaşımları yüksek dayanım gösteremez dolayısıyla mikro yapıları değiştirilemez. Alfa+Beta ($\alpha+\beta$) alaşımlarının boyutları ve fazların dağılımı belli oranda değiştirilebildiği için ısıtıl işlemlerle sertleştirilebilir. Beta (β) alaşımlarına ise gerilim giderme ve yaşlandırma işlemleri uygulanabilir (Donachie 2000).

Titanyum alaşımları oksijenle yüksek reaktivitesinden dolayı zayıf oksidasyon direnci gösterirler. Titanyum alaşımlarının kaynak edilmesi, titanyumun oksijen ve hidrojen ile yüksek reaktivite özelliği nedeniyle zordur. Genel olarak, α ve $\alpha+\beta$ alaşımlarının kaynaklanabilirliği β alaşımlarından daha kolaydır. Yapıda çözünen elementlerin, alaşımların ısıtıl kararlılığı üzerinde zararlı etkiye neden olduğu ve dolayısıyla süneklik, mukavemet, kırılma tokluğu ve yorulma ömrü gibi önemli mekanik özelliklerini azalttığı bilinmektedir. α ve $\alpha+\beta$ sınıfı alaşımlar; vanadyum (V) ve molibden (Mo) gibi bazı ağır elementlerle alaşım yaptıkları için β alaşımlarına göre daha yüksek yoğunluklara sahiptirler. Mukavemet yönünden karşılaştırıldıklarında $\alpha+\beta$ ve β alaşımları, α alaşımlarına göre daha yüksek mukavemet seviyelerine sertleştirilebilirler. Öte yandan β alaşımları yüksek mukavemetleri sebebiyle düşük süneklik özelliğiyle ön plana çıkarlar (Sefer 2014). Tablo 5'te α , $\alpha+\beta$ ve β alaşımlarının özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5. α , $\alpha+\beta$, β Alaşımlarının Özellikleri (Leyens and Peters 2003)

Özellikler	α	$\alpha+\beta$	β
Yoğunluk	+	+	-
Mukavemet	-	+	++
Süneklik	-/+	+	+/-
Kırılma Tokluğu	+	-/+	+/-
Sürünme Direnci	+	+/-	-
Korozyon Direnci	++	+	+/-
Oksidasyon Direnci	++	+/-	-
Kaynaklanabilirlik	+	+/-	-
Soğuk Şekillendirilebilirlik	--	-	+/-

Titanyum Alaşımlarının Avantajları ve Dezavantajları

Titanyum ve alaşımları birçok endüstride (havacılık, deniz, kimya ve tıp) kullanımını sağlayan çok önemli avantajlara sahiptir. Bunlardan bazıları şunlardır:

- Üstün korozyon ve erozyon direnci, yüksek ısı kapasite.
- Daha hafif ve daha güçlü yapılara izin veren yüksek özgül mukavemet ve ağırlık oranları.
- Düşük yoğunluk.

Buna karşın titanyum alaşımlarının uygulamalarda kullanımını kısıtlayan bazı dezavantajları arasında şunlar vardır:

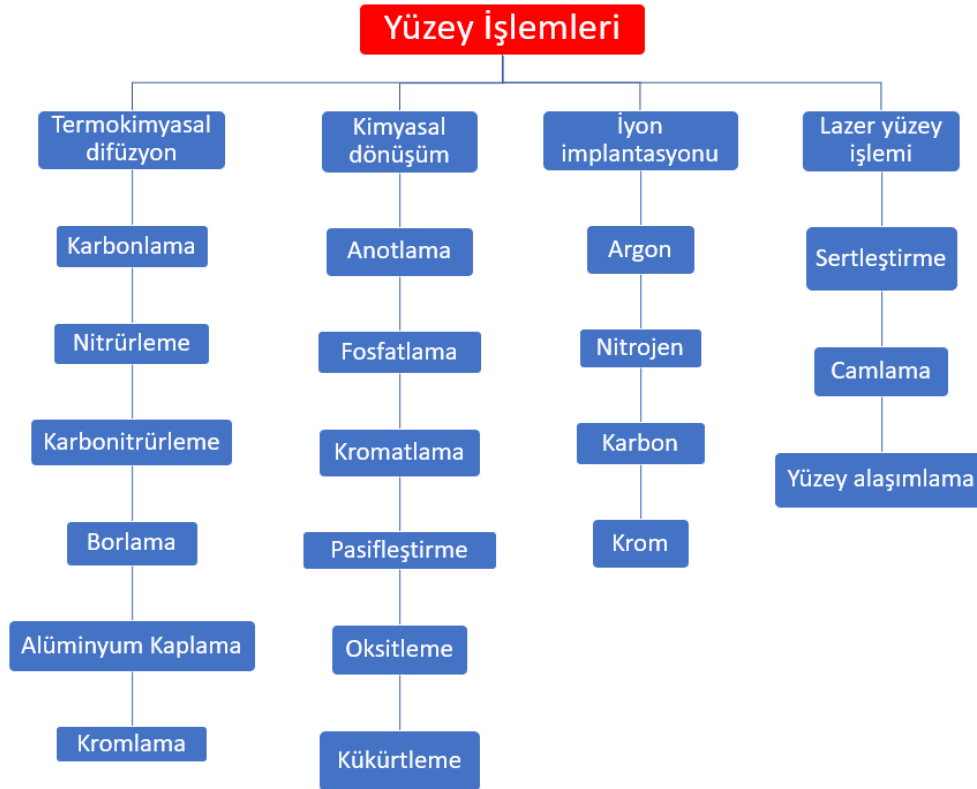
- Yüksek sürtünme katsayısı ve düşük aşınma dayanımı.
- Yüksek maliyet ve tesis yatırımı (Zhecheva *et al.* 2005).

Titanyum ve alaşımları aşınmanın kritik olduğu farklı pek çok uygulamada kullanılmaktadır ve aşınma sonucunda bu alaşımlar üzerindeki koruyucu oksit tabakası bozulmaktadır. Titanyumun bu aşınma özelliğini artırmak için, titanyum ve alaşımlarına çoğu zaman çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır (Boettcher *et al.* 2002).

Titanyum ve Alaşımlarına Uygulanan Yüzey İşlemleri

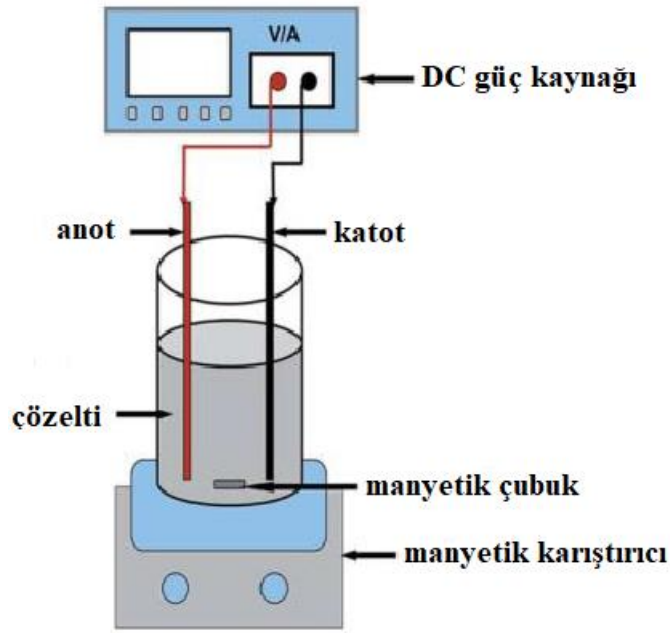
Titanyum ve titanyum alaşımlarından elde edilen parçaların imalatı genellikle, gerilmiş ve plastik olarak deforme olan, oldukça zayıf oksitlenmiş ve kontamine bir yüzey tabakasına

yol açar. Bu tür yüzeyler biyomedikal uygulamalar için uygun değildir ve bazı yüzey işlemleri gerektirir. Titanyum ve alaşımlarının tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilen yüzey işlemleri bu yüzden çok önemlidir. Uygun yüzey modifikasyon teknikleri; titanyum alaşımlarının düşük elastisite modülü, iyi yorulma mukavemeti, şekillendirilebilirlik ve işlenebilirlik gibi özelliklerini korumakla kalmaz, aynı zamanda daha iyi bir aşınma ve korozyon direnci için de gereklidir (Liu *et al.* 2004). Şekil 4'te titanyum ve alaşımlarına uygulanan temel yüzey işlemleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Titanyum ve alaşımlarına uygulanan yüzey işlemleri (Matthews *et al.* 2007)

Titanyum ve alaşımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan yöntemlerden biri anodik oksidasyondur. Anodik oksidasyon (anodizasyon) işlemi, oluşturulan elektrik alanla birlikte metal ve oksijen iyonlarının difüzyonu yoluyla kaplanmak istenen yüzeyde metalin anot (+) kısmına yerleşmesiyle yüzey kısmında oksit filminin oluştuğu elektroliz reaksiyonlarına denir. Anodik oksidasyon işleminin bileşenleri temel olarak; yüzeyi kaplanacak anot (+), katot (-), elektrolit, güç kaynağı ve manyetik karıştırıcıdan oluşmaktadır. Şekil 5'te anodik oksidasyon işleminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 5. Anodik oksidasyon işleminin şematik gösterimi (Kurt 2020)

Anodizasyon, metaller üzerinde farklı tipte koruyucu oksit filmleri üretmek için uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemde elektrolit olarak sülfirik asit (H_2SO_4), fosforik asit (H_3PO_4) ve asetik asit (CH_3COOH) kullanılabilir. Anodizasyon işlemi ayrıca korozyon korumasını ve oksit kalınlığını artırmak için kullanılabilir. Oksit kalınlığının artması; yüzey topoğrafyasında değişikliklere neden olur ve iyon salınımını, renklenmeyi ve gözenekli kaplamaları azaltır. Anodik oksitlerin yapısal ve kimyasal özellikleri, işlem parametreleri (potansiyel, elektrolit bileşimi, sıcaklık ve akım) değiştirilerek geniş bir aralıkta istenilen özelliklere getirilebilir (Liu *et al.* 2004). Anotlama, daha iyi biyoyumluluk ve biyoaktivite açısından titanyum alaşımlarının yüzey özelliklerini değiştirmek için basit ve etkili bir yöntemdir. Titanyumun anodik oksidasyonu sırasında, genellikle gaz çıkışı olarak oksijen (O_2) ve hidrojen (H_2) gözlenir, bu da mevcut verimliliğin artmasına katkıda bulunur (Sul *et al.* 2001).

Titanyumun anodik oksidasyon işleminde; yüzeyde oluşturulan oksit tabakası, malzemenin aşınma ve korozyon direncini, yüzey pürüzlülüğünü ve biyoyumluluğu artırıcı bir rol oynamaktadır. Elektrik akımının miktarı ve uygulanma süresi yüzeyde meydana gelen oksit filminin görünümünü, kalınlığını ve kimyasal özelliklerini değiştirmektedir. Termal oksidasyonun aksine, bu işlem, alaşımların yapısını ve mekanik özelliklerini değiştirmeden bir yüzey oksit tabakasının hızlı oluşumunu sağlar (Zorn *et al.* 2006). Titanyumun oda sıcaklığında anotlanması, yüzeyde ağırlıklı olarak anataz fazı olan titanyum dioksit (TiO_2) oluşturur (Gopal *et al.* 2007). Yüksek sıcaklık ve potansiyeller rutil faza yol açarken, düşük sıcaklık ve potansiyeller ağırlıklı olarak anataz fazını desteklemektedir (Hanaor and Sorrell 2011).

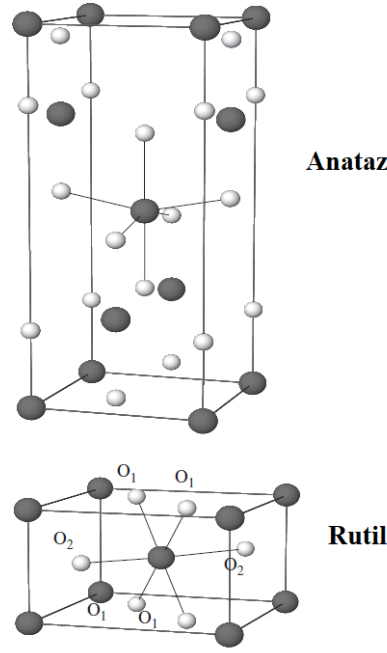
Titanyum Oksit (TiO₂) Tabakası

Titanyumun oksijene olan yüksek ilgisi, yüzeyinde çeşitli kristal yapılara sahip bazı oksit yapıların oluşmasına sebep olur. Bu oksit film tabakası titanyuma yüksek korozyon dayanımını sağlamaktadır. Bu oksit yapıları, doğal bir atmosferde termodinamik olarak kararlı olan anataz (tetragonal), rutil (tetragonal) ve brokit (ortorombik) olmak üzere üç farklı kristal yapıda bulunabilir. Anodize numuneler için TiO₂'nin yapısı, amorf ve anataz faz karışımıdır. (Velten *et al.* 2002). Genel olarak anataz yapısı anodik oksidasyon ile elde edilirken rutil yapı anodik oksidasyon ve ardından ısıtılma işlemi ile elde edilir (Yang *et al.* 2004). Sülfürik asit (H₂SO₄) ise anataz fazı elde etmek için kullanılan en uygun elektrolittir (Diamanti and Pedferri 2007). Tablo 6'da TiO₂ tabakasının kristal yapıları ve bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 6. TiO₂ Tabakasının Kristal Yapısı ve Fiziksel Özellikleri (Cox *et al.* 1989)

	Rutil	Brokit	Anataz
Kristal Yapısı	Tetragonal	Ortorombik	Tetragonal
Atom mesafesi [Å]	a = 4.5937 c = 2.9619	a = 9.185 b = 5.447 c = 5.143	a = 3.785 c = 9.514
Yoğunluk (g/cm³)	4.245	4.119	3.893
Molar Hacim (cm³/mol)	18.817	19.393	20.519
Oluşum ısısı (kJ/mol)	945	942	939
Dielektrik sabiti (ε)	110	78	48

Anodik filmin yapısı, amorf yapıdan kristal faza (anataz, brokit ve rutil) değiştirilir. Bu dönüşüm, elektrolit aktivitesi ve akım yoğunluğu gibi elektrokimyasal parametrelere bağlı olan bozulma ile ilgilidir (Sul *et al.* 2001). Titanyumun anodik oksidasyon sonucu oluşan rutil ve anataz fazlarına ait kafes yapıları Şekil 6'da gösterilmektedir.



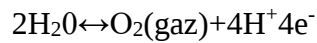
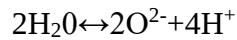
Şekil 6. Anataz ve rutil kafes yapıları (Weissmann and Errico 2007)

Titanyum ve alaşımlarının yüzeyinde oluşan oksit temel olarak TiO_2 'dir. Kristal yapı temel olarak amorf ve morfolojik olarak ise homojendir. Titanyum havaya maruz kaldığında ince bir (2-5 nm) yüzey tabakası oluşur ve bu tabaka yüzeyi korozyondan korur (Lausmaa 1996). Ayrıca anodik oksidasyon yoluyla üretilen oksidin renklenmesi, oksit filmin kalınlığının göstergesi olabilir. Bu ince yüzey tabakası, aşağıda verilmiş olan özelliklerinden dolayı korozyona karşı mükemmel bir direnç sağlar (Sul *et al.* 2001) :

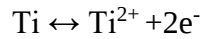
- Termodinamik olarak büyük kararlılık gösterir.
- Elektrokimyasal yönden düşük seviyede iletkenidir.
- Sulu ortamda düşük iyon oluşumu eğilimi vardır.

Aşağıda verilen reaksiyonlarda oluşan titanyum ve oksijen iyonları, uygulanan elektrik alanı tarafından oksitten geçirilir. Elektrik alanı, iyonları oksitten geçirecek kadar yüksek olduğu sürece, bir akım akacak ve oksit büyümeye devam edecektir.

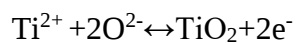
- Titanyum oksit /elektrolit ara yüzeyinde:



- Titanyum /Titanyum oksit ara yüzeyinde:



Her iki yüzeyde ise



Titanyumun oksit büyümesi esnasında meydana gelen iletim sürecinin şematik gösterimi Şekil 7’de gösterilmiştir.

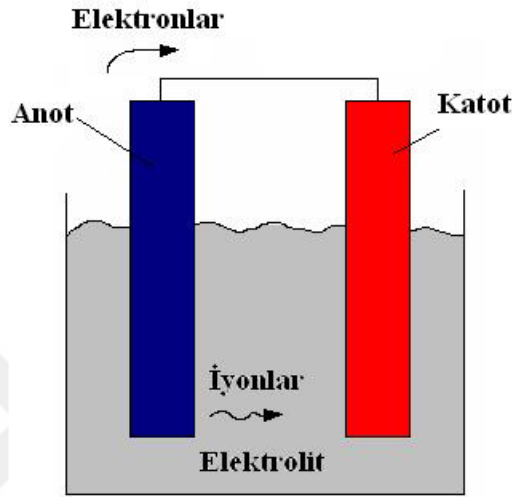


Korozyon, metal ve alaşımlarının içinde bulundukları ortamın etkisiyle; fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde istenmeyen değişikliklerin meydana gelmesi olayıdır. Doğadaki neredeyse tüm metaller korozyona uğrama potansiyeline sahiptirler. Metaller genel olarak yüksek enerji halinde ve mevcut enerjilerini serbest bırakarak kendi orijinal formlarına dönme eğilimindedir. Korozyon, aktif bir aşındırıcı ortamın bulunduğu her yerde meydana gelebilir. Titanyum ve alaşımlarının yüzeyinde aşırı reaktifliklerinden dolayı çok kısa bir süre içerisinde oksit tabaka oluşur. Bu titanyum oksit (TiO_2) tabakası kimyasal olarak aktif bir tabakadır. Titanyumun yüksek korozyon ve kimyasal dayanımın sebebi bu aktif tabakanın stabilitesidir (Brunette *et al.* 2001). Şekil 8’de genel korozyon süreci gösterilmiştir.



Korozyon Hücresi

Elektrokimyasal korozyon temel olarak anot görevindeki maddenin çözünmesi esasına dayanır. Bu durumu, korozyonunun makro ya da mikro ölçekte olması fark etmeksizin korozyon hücresiyle modellemek mümkündür. Korozyon hücresinin elemanları ve temel özellikleri aşağıdaki gibidir (Şekil 9). Bu elemanlardan birinin dahi olmaması durumunda korozyon gerçekleşmez.



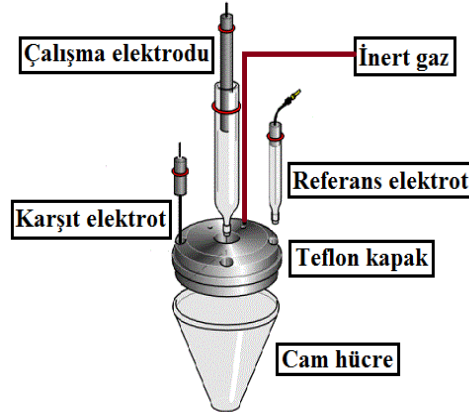
Şekil 9. Korozyon hücresi

- **Anot:** Sisteme elektron (e^-) veren, korozyona uğrayan elemandır.
- **Katot:** Sistemden elektron (e^-) alan ve elektronların ürün oluşturduğu elemandır.
- **Elektrolit:** İletken yapıdaki çözeltidir. Hem anot hem de katotla temas halinde bulunur ve iyonların anottan kopup katoda doğru hareketinin gerçekleşmesini sağlar.

Elektrokimyasal Reaksiyonlar

Katodik reaksiyon, serbest elektronların tüketildiği bir indirgeme reaksiyonuyken anodik reaksiyon ise bir oksidasyon reaksiyonudur. Korozyon sürecinde hem anodik hem de katodik reaksiyonlar birlikte yer aldığından, ortaya çıkan reaksiyon redoks tepkimesidir. Bir metal çözündüğünde, serbest elektronlar metal iyonları şeklinde elektrolite salınır. İyonlar daha sonra yüzeye hareket eder ve H^+ iyonu ile reaksiyona girerek H_2 oluşturur (Davis 2000).

Elektrokimyasal reaksiyonlar açık devre potansiyelde (OCP) veya korozyon potansiyelinde (E_{kor}) meydana gelir. Elektrokimyasal reaksiyonlar genellikle üç elektrotlu bir üniteden; bir çalışma elektrotu (ÇE), bir karşı elektrot (KE) ve bir referans elektrottan (RE) oluşur (Duanjie 2010). Şekil 10'da elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği korozyon hücresinin şematik gösterimi verilmiştir.



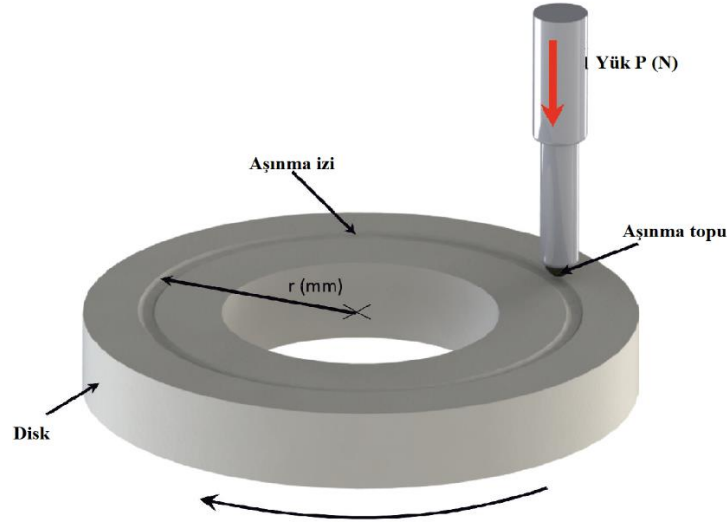
Şekil 10. Elektrokimyasal reaksiyonlar için korozyon hücresinin şematik gösterimi (Bilici 2012)

Elektrokimyasal Polarizasyon

Bir elektrotun potansiyeli, açık devredeki değerinden uzaklaşmaya zorlandığında, buna elektrotun "polarizasyonu" denir. Bir elektrot polarize olduğu zaman, elektrot yüzeyinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlardan dolayı akımın akmasına sebep olabilir. Bir elektrotun açık devrede korozyona uğradığı hücrelerde, açık devre potansiyeli (OCP) iki farklı elektrokimyasal reaksiyon arasındaki denge ile kontrol edilir. Reaksiyonlardan biri katodik akım, diğeri ise anodik akım üretir. Açık devre potansiyeli, katodik ve anodik akımların eşit olduğu potansiyelde son bulur ve bu durum karışık potansiyel olarak adlandırılır. Reaksiyonlardan herhangi biri için akımın değeri de korozyon akımı olarak bilinir (Gamry 2007).

Aşınma

Aşınma; bir cismin katı, sıvı veya gaz halindeki bir cisme teması ve hareketi nedeniyle artan malzeme kaybı olarak tanımlanır. Bu malzeme kaybı temas halindeki yüzeyden kademeli olarak gerçekleşir. Aşınma; iki şekilde (mekanik veya kimyasal) gerçekleşir. Aşınmayı hızlandırmak için sürtünme yoluyla malzemeleri ısıtmak gerekir. Şekil 11’de deneysel olarak modellenen aşınma olayının şematik gösterimi verilmiştir.

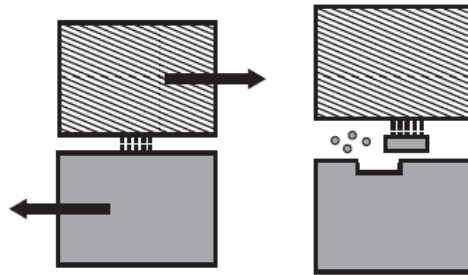


Şekil 11. Aşınma olayının şematik gösterimi (Miramontes *et al.* 2016)

Aşınma Mekanizmaları

Genel anlamda malzeme kaybı olarak tanımlanan aşınma birçok farklı mekanizma ile meydana gelmektedir. Temel aşınma mekanizmaları şu şekildedir:

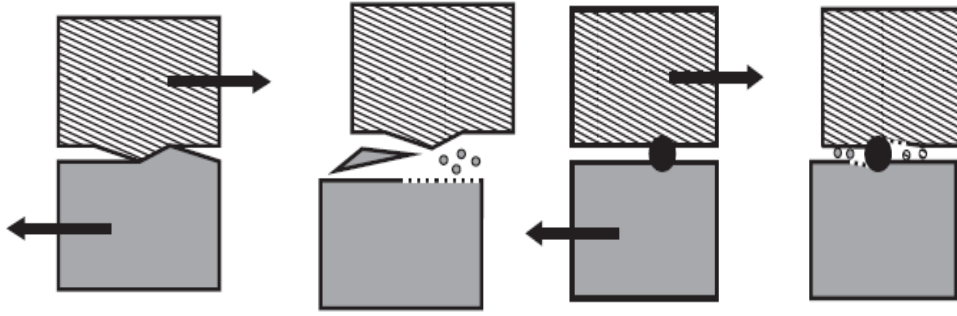
a- Adhezif Aşınma: Adhezif Aşınma (Adezyon aşınması) aşınması, genellikle güçlü bir yapışma kuvvetinin varlığında karşılaştırılabilir sertliğe sahip malzemeler arasındaki kayma temasında meydana gelir (Burwell 1957). Bu aşınma şekli, iki düz gövde birbiri üzerinde kaydığında meydana gelir. Kayma en zayıf malzemede başlar ve bir yüzeyin parçası gövdeden ayrılarak diğerine aktarılır. Hareket tek yönlü veya karşılıklı olabilir. İleri geri kayma koşulları altındaki yapıştırıcının, tek yönlü kaymaya göre daha yüksek aşınma oranına sebep olduğu bilinmektedir (Dwivedi 2010). Şekil 12’de adheziv aşınmasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 12. Adheziv aşınma (Yao *et al.* 2017)

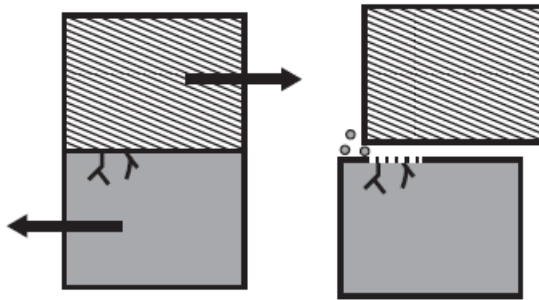
b- Abrazif Aşınma: Abrazif aşınma, sert bir yüzeyde veya sert parçacıkların yumuşak bir yüzeyin üzerinden geçerken sebep olduğu malzeme kaybında meydana gelir. Abrazif aşınma iki gövdeli ve üç gövdeli abrazif aşınma olarak iki gruba ayrılır. Üç gövdeli aşınmada, çalışma sırasında oluşan veya sistem dışından gelen partiküller abrazif aşınmaya neden olurken, iki gövdeli aşınmada ise malzemelerden biri abrazif rolünü oynar (Moore 1974). Aşındırıcı parçacığın şekli, sertliği, yükü ve temas arayüzündeki kesme mukavemeti, abrazif aşınmanın

durumunu belirler (Hokkirigawa and Kato 1988). Şekil 13'te abrazif aşınma türleri yer almaktadır.



Şekil 13. Abrazif Aşınma türleri: **a)** İki gövdeli abrazif aşınma **b)** Üç gövdeli abrazif aşınma (Yao *et al.* 2017)

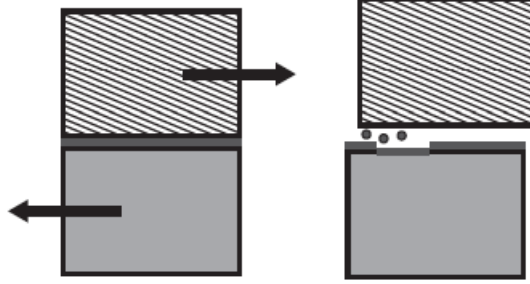
c- Yorulma aşınması: Yorulma aşınması, bir dizi döngünün gerekli olduğu bir aşınma türüdür. Metallerdeki yorulma süreci, yüzey çatlaklarının oluşumunu etkiler (Barrois 1979). Yorulma aşınması, yüksek ve düşük devirli (çevrim) yorulma olarak ikiye ayrılır. Yüksek devirli yorulmada, kusur öncesi devir sayısı yüksektir, bu nedenle bileşen ömrü uzundur (Padilla and Boyce 2010). Düşük devirli yorulmada ise, kusur öncesi devir sayısı düşüktür, bu nedenle malzeme hızla hasara uğrar (Sangid 2013). İlk çevrimlerde aşınma oluşmaz, sadece plastik deformasyon sebebiyle sığ oluklar oluşur. Kritik sayıda bir çevrimden sonra, plastik şekil değiştirme kritik bir değeri aşar ve kırılma meydana gelir. Malzemenin ömrünün çoğu, ilk çatlak boyutlarının 2-3 μm veya daha az olduğu ilk aşamadır (Mughrabi 2013). Şekil 14'te yorulma aşınması gösterilmiştir.



Şekil 14. Yorulma aşınması (Yao *et al.* 2017)

d- Korozi aşınma: Korozi aşınma, sulu bir çözeltiyle temas halindeki malzemeleri etkileyen bir hasar mekanizmasıdır. Bu aşınma şekli, korozi ortamda kayma meydana geldiğinde ortaya çıkar. Kayma olmadığında ise, yüzeyde korozyonu yavaşlatan ve hatta durduran bir film oluşur (Smith *et al.* 2020). Aşındırıcı ortam hava olduğunda, oksijen aşındırıcı bir madde görevi görür ve bu aşınmaya oksidatif aşınma denir. Ancak oksidatif aşınma, çözünmüş oksijenin varlığından dolayı yağlanmış ortamda da gerçekleşebilir (Hong 2002). Başlangıçta, yer değiştirme mekanizması nedeniyle oksidasyon hızlıdır ve yüzeydeki oksit filmi

hızla büyür. Film kalınlığı yaklaşık olarak 2-3 nm'ye ulaştığında ise oksidasyon hızı yavaşlar ve oksijenin metale difüzyonuyla oksit film oluşumu devam eder (Batchelor *et al.* 1986). Şekil 15'te korozif aşınma mekanizması yer almaktadır.



Şekil 15. Korozif aşınma (Yao *et al.* 2017)

MATERYAL ve YÖNTEM

Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada, Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb malzemeler kullanılmıştır ve bu malzemelerin kimyasal kompozisyonu sırası ile Tablo 7, Tablo 8 ve Tablo 9’da verilmiştir. Öncelikle; Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımları 20x20x4 mm³ boyutlarında olacak şekilde kesilmiştir. Kesilen numunelerin yüzeyleri sırasıyla 80-220-400-600-800-1000 ve 1200 mesh’lik silisyum karbür (SiC) aşındırıcı zımpara kâğıtları ile zımparalanmıştır. Daha sonra ise alümina (Al₂O₃) tozları ile numunelere yüzey parlatma işlemi uygulanmıştır. Son olarak ise tüm numunelerin yüzeyleri etil alkol ile yıkanarak temizlenmiştir.

Tablo 7. Cp-Ti Alaışımının Kimyasal Bileşimi (Wong *et al.* 2011)

Element	N	H	Al	Ni	C	Cr	V	Si	Fe	O	Diğer	Ti
Ağırlık (%)	0.0042	0.0051	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.12	0.141	<0.1	Kalan

Tablo 8. Ti6Al4V Alaışımının Kimyasal Bileşimi (Nourbakhsha *et al.* 2013)

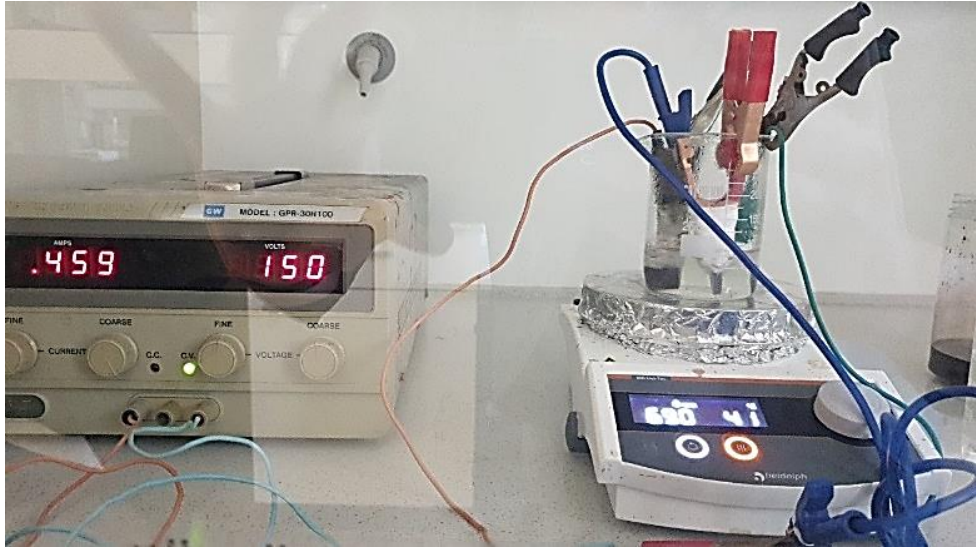
Element	C	Fe	Al	O	N	V	H	Ti
Ağırlık (%)	0.08	0.22	6.08	0.2	0.05	4.02	0.15	Kalan

Tablo 9. Ti45Nb Alaışımının Kimyasal Bileşimi (Tasdemir vd 2020)

Element	Nb	Ti	Diğer
Ağırlık (%)	45.11	54.69	0.20

Anodik Oksidasyon İşlemi

Anodik oksidasyon (anodizasyon) işlemi; Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde bulunan Kimya Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup düzenek için, GPR-30H10D model doğru akım güç kaynağı kullanılmıştır. 1.5 M sülfirik asit (H₂SO₄) ve 0.3 M fosforik asitten (H₃PO₄) oluşan çözelti 600 ml cam behere döküldükten sonra Heidolph model ısıtıcılı manyetik karıştırıcıyla aynı zamanda homojenliği sağlamak için mıknatıslı karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Kaplama yönteminde katot olarak grafit, anot olarak ise sırasıyla Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımları kullanılmıştır. Bu üç alaşım 2 farklı parametre (150 V-0.5 saat ve 150 V-1 saat) ile anodize edilmiştir. Anodizasyon işlem ünitesi Şekil 16’da gösterilmiştir.



Şekil 16. Anodizasyon işlem ünitesi

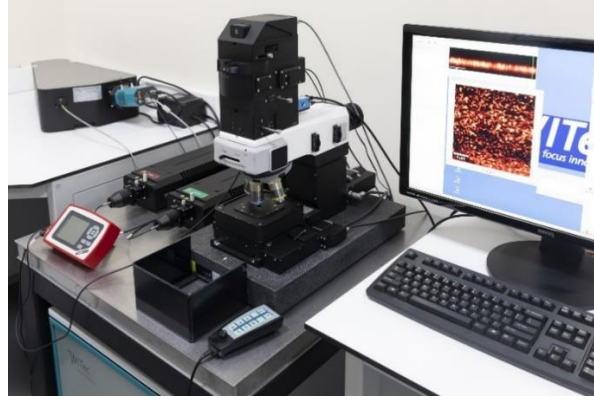
Yapısal, Morfolojik ve Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Numunelerin faz analizleri; DAYTAM bünyesinde bulunan Panalytical Empyrean marka X-Işını Kırınım Ölçer (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde Cu – K α (λ = 1.5406 Å) ışınımı kullanılmıştır. Şekil 17’de XRD cihazı gösterilmiştir.



Şekil 17. XRD cihazı

Numunelerin Raman analizleri DAYTAM bünyesinde bulunan WITech Alpha 300R model mikro Raman Spektrometresi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 18’de Raman Spektrometresi gösterilmiştir.



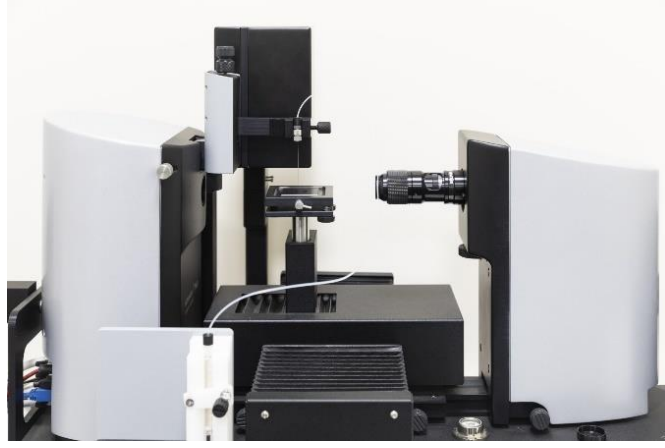
Şekil 18. Raman spektrometresi

Numunelerin kesitleri, yüzey morfolojileri, aşınma ve korozyon sonrası yüzey görünümleri DAYTAM bünyesinde bulunan ZEISS Sigma 300 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Şekil 19’da SEM sistemi gösterilmiştir.



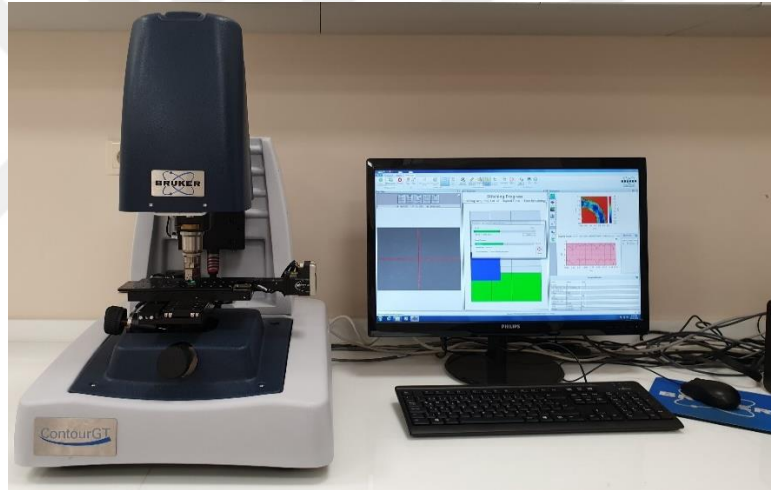
Şekil 19. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı

Numune yüzeylerinin temas açısı ölçümleri, DAYTAM’da bulunan Attention Theta Flex (ATM) markalı Temas Açılölçer cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 20). Ölçümlerde 5 ml distile su kullanılmıştır. Cihaz; yüzeydeki damla görüntülerini kaydederek zamana bağlı şekilde damlanın şeklini otomatik olarak analiz etmektedir.



Şekil 20. Temas açölçer cihazı

Aşınma hacminin hesaplanması ve aşınma görüntülerinin alınması için YÜTAM bünyesinde bulunan Bruker ContourGT marka üç boyutlu (3D) profilometre kullanılmıştır ve ilgili sistem Şekil 21’de gösterilmiştir.



Şekil 21. Üç boyutlu (3D) profilometre

Numunelerin sertlik değerleri Erzurum Teknik Üniversitesi (ETÜ) Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Yüzey İşlemleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, SHIMADZU HMV-G model mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Numunelere 100 g ($HV_{0.1}$) yük uygulanmış olup 10 sn boyunca ölçüm alınmıştır. Her bir numuneden 7 ölçüm alınmış olup minimum ve maksimum değerler elenerek geriye kalan 5 ölçüm değerinin ortalaması verilmiştir. Şekil 22’de mikrosertlik cihazı gösterilmiştir.



Şekil 22. Mikrosertlik cihazı

Tribolojik ve Elektrokimyasal İncelemeler

Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri, Atatürk Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Toz Metalürjisi Laboratuvarında bulunan Tribotechnic marka aşınma sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri pin-on-disc şeklinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler hem kuru hem de sıvı aşınma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma topu olarak 6 mm çapında alüminyum oksit (Al_2O_3) kullanılmıştır. Kuru aşınma deneyleri oda sıcaklığında ($\sim 21^\circ C$) ve yaklaşık %50 nemli ortam havasında gerçekleştirilmiştir. Kuru ve sıvı aşınma deney şartları sırasıyla Tablo 10 ve Tablo 11’de verilmiştir. Sıvı aşınma deneyleri için Ringer çözeltisi kullanılmış olup sıvı aşınmadan önce numuneler Metkon marka Ecopress 50 model hidrolik basınçlı otomatik dijital kalıplama presi ile sıcak bakalite alınmıştır. Tablo 12’de Ringer çözeltisinin kimyasal içeriği, Şekil 23 ve Şekil 24’te sırasıyla aşınma cihazı ve bakalite alma cihazı yer almaktadır.

Aşınma oranı (W) aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır:

$$W(mm^3/N.m) = V/PL$$

$$V = \text{Aşınma Hacmi (mm}^3\text{)}$$

$$P = \text{Uygulanan yük (N)}$$

$$L = \text{Kayma mesafesi (m)}$$



Şekil 23. Aşınma cihazı

Tablo 10. Kuru Aşınma Deney Parametreleri

Parametre	Değerler
Deney yükü (N)	1
İz yarıçapı (mm)	2
Kayma hızı (mm/s)	50
Deney süresi (dk)	47
Kayma mesafesi (m)	141

Tablo 11. Sıvı Aşınma Deney Parametreleri

Parametre	Değerler
Deney yükü (N)	1
İz yarıçapı (mm)	2
Kayma hızı (mm/s)	15
Deney süresi (dk)	33
Kayma uzunluğu (m)	30

Tablo 12. Ringer Çözeltilisinin Kimyasal İçeriği (100 ml)

Sodyum Laktat ($\text{NaC}_3\text{H}_5\text{O}_3$)	Potasyum Klorür (KCl)	Sodyum Klorür (NaCl)	Kalsiyum Klorür Dihidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
0.3 g	0.04 g	0.6 g	0.03 g



Şekil 24. Bakalite alma cihazı

Korozyon Deneyleri

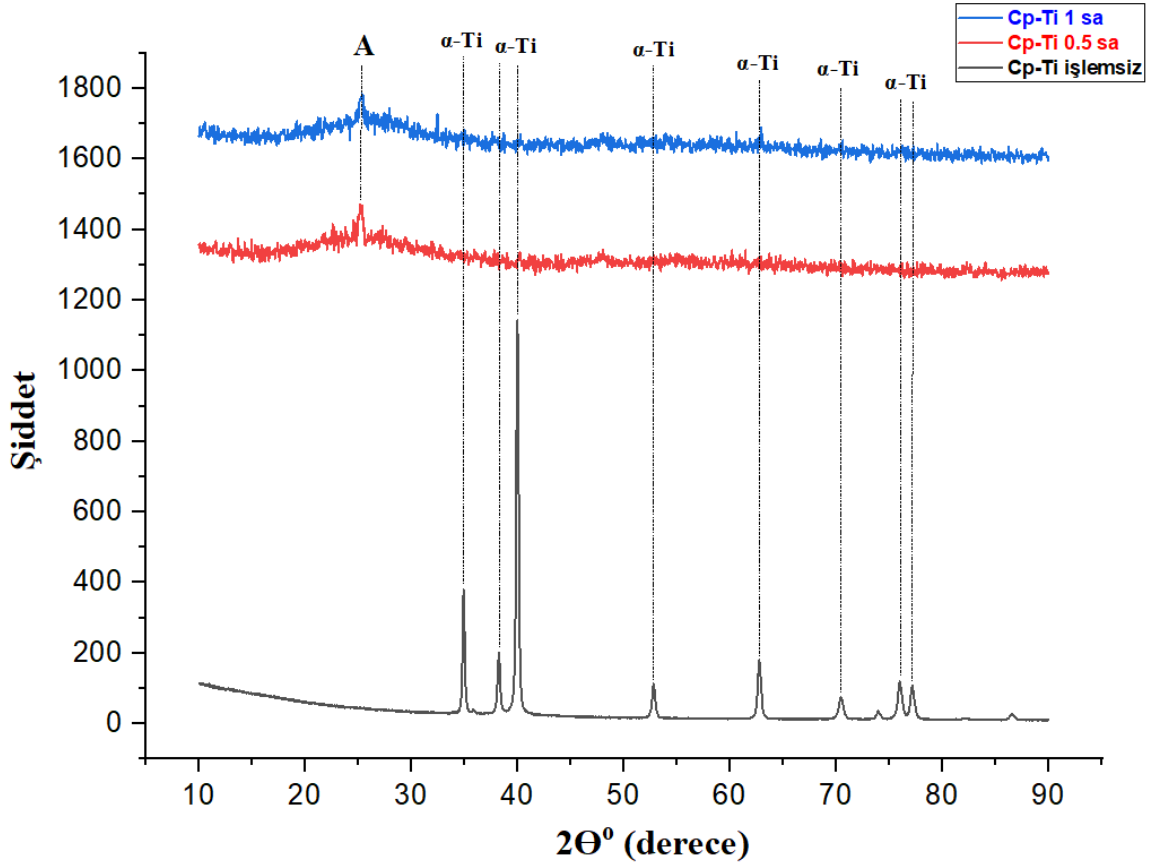
Korozyon deneyleri Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü bünyesine bulunan GAMRY marka ve G750TM model (Gamry Instruments, Warminster, USA) elektrokimyasal ölçüm ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal korozyon testleri kapsamında her deney numunesi için açık devre potansiyeli okuması yapılmış ardından potansiyodinamik polarizasyon taraması gerçekleştirilmiştir. Üçlü elektrot düzeninde referans elektrodu olarak Ag/AgCl karşıt elektrot olarak ise grafit kullanılmıştır. Deney ortamı olarak laktatlı ringer çözeltisidir. Korozi ortamına maruz numune yüzey alanı $1,5 \text{ cm}^2$ dir. Açık devre potansiyelleri 3600 saniye süresince alınmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon tarama aralığı $-0,5 \text{ V}$; 2 V olarak uygulanmıştır. Tarama hızı 1 mV/sn dir.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Yapısal, Morfolojik ve Mekanik Özellikler

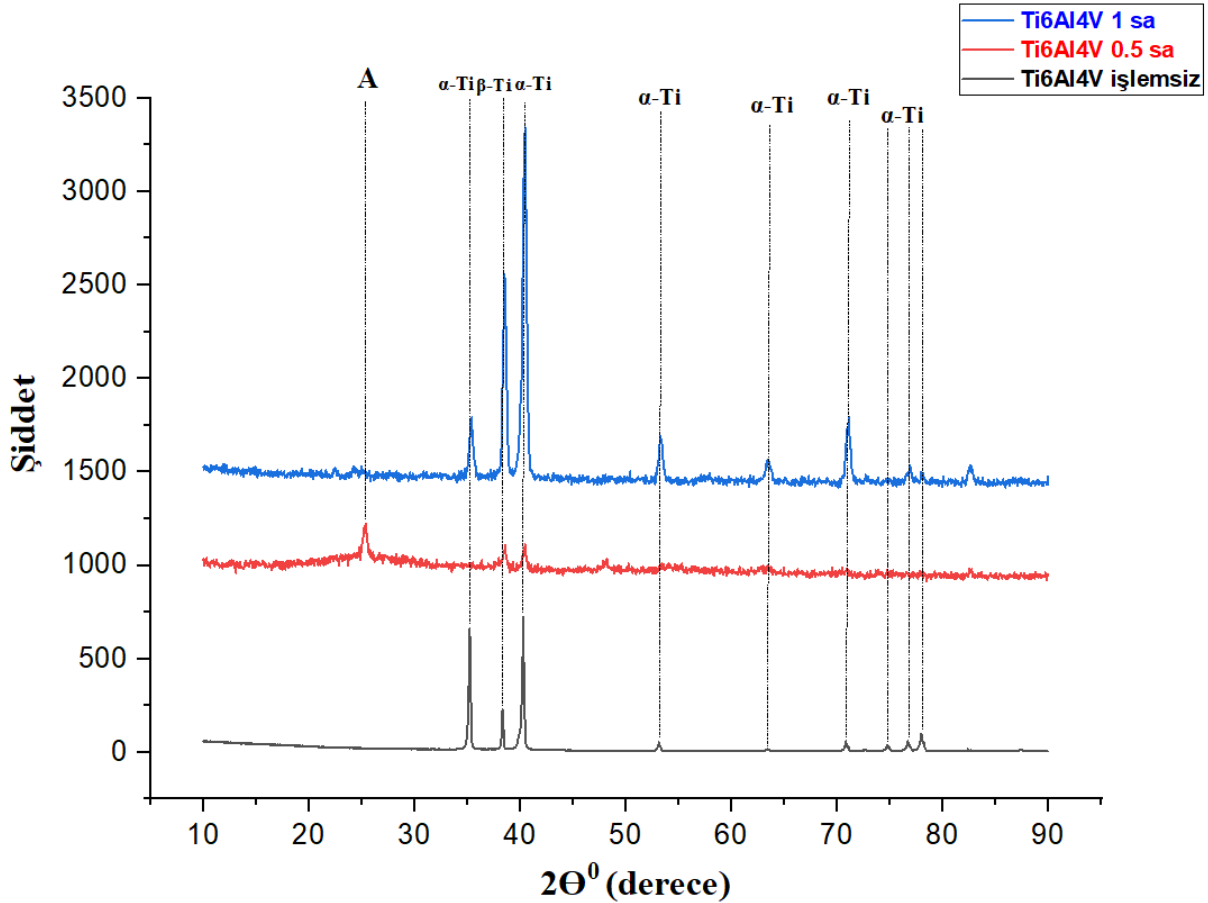
XRD ve Raman Analizleri

İşlemsiz ve anodize edilmiş Cp-Ti numunelerinin XRD grafikleri Şekil 25'te gösterilmiştir. İşlemsiz Cp-Ti yapısının beklendiği gibi yalnızca α -Ti fazından oluştuğu görülmektedir. En yoğun faz açısına 40° 'de rastlanmıştır. Anodizasyon işleminden sonra 25° 'de anataz (A) fazının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Anataz fazındaki (25°) daralma amorf yapıdan kristal yapıya dönüşüme işaret etmektedir (Albayrak 2008, Yetim 2010, Wu *et al.* 2019).



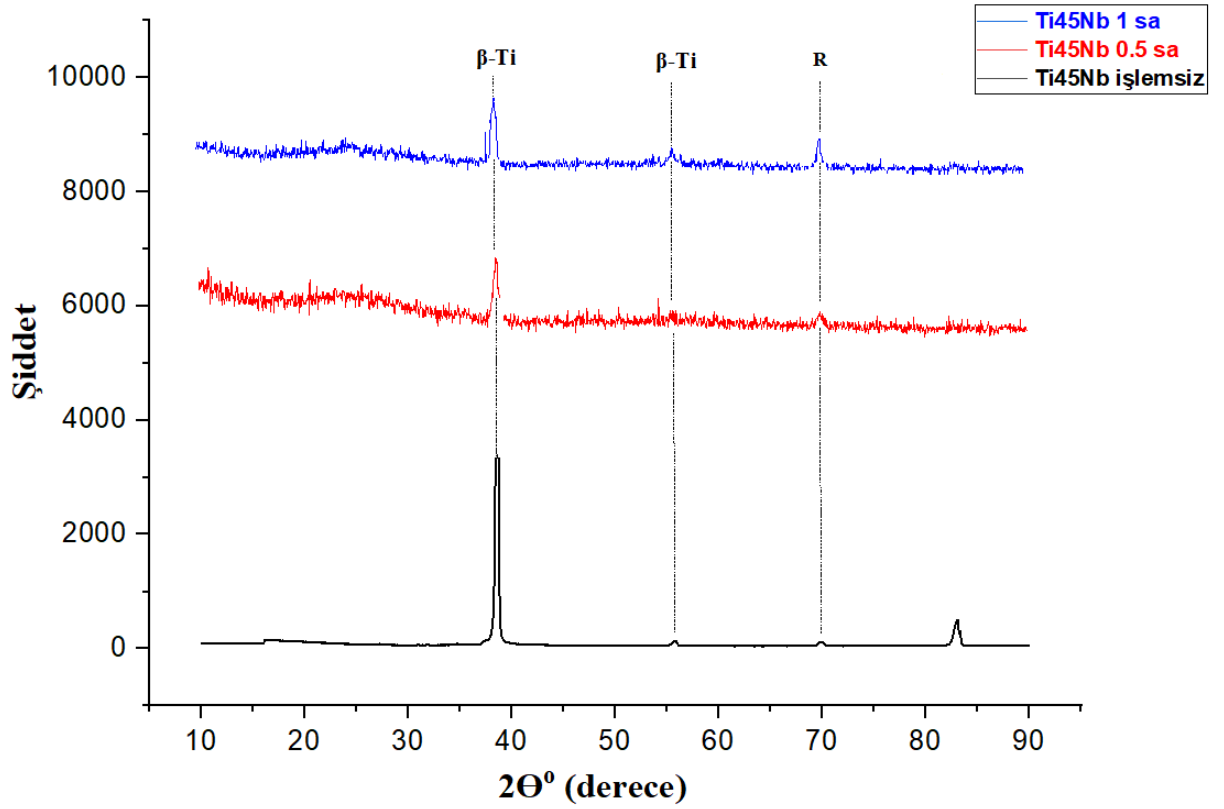
Şekil 25. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti numunelerin XRD grafiği

Ti6Al4V alaşımına ait numunelerin XRD grafikleri Şekil 26’da gösterilmiştir. İşlemsiz numuneler sadece hegzagonal (α) + kübik (β) titanyum piklerinden oluşmaktadır. 0.5 saat anodize edilmiş numunede 25°’de anataz (A) yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. (Narayanan and Seshadri 2007, Bayrak ve Asl 2020).



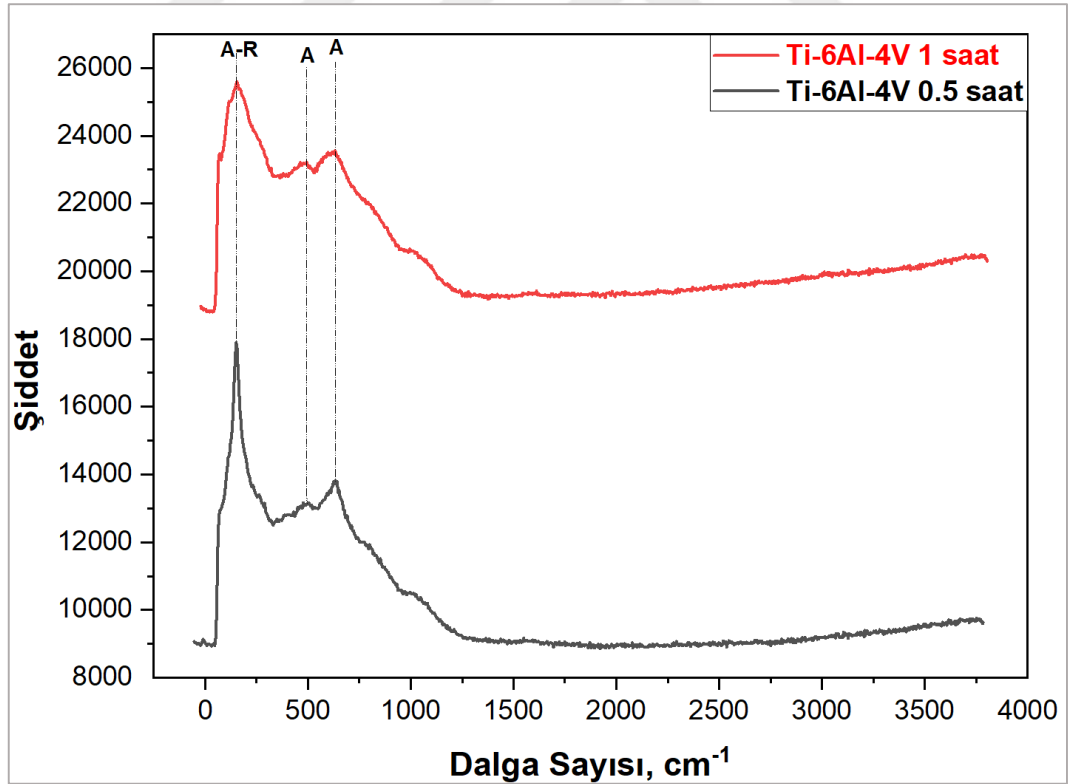
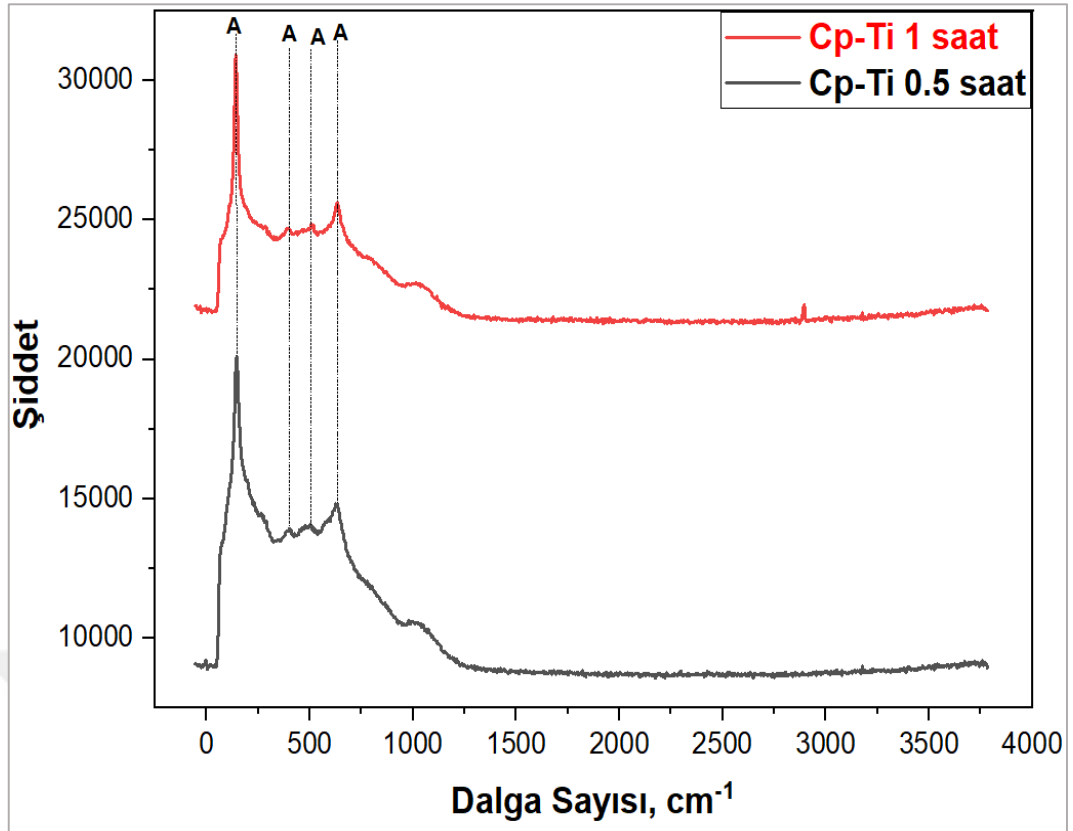
Şekil 26. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti6Al4V numunelerin XRD grafiği

Ti45Nb alaşımına ait XRD grafikleri (Şekil 27) incelendiğinde ise 25°’de anataz (A) ve 70°’de rutil (R) fazları gözlemlenmiştir. En yoğun β -Ti faz yansıma açısına ise 38°’de ulaşılmıştır. Hem 0.5 saat hem de 1 saat süreyle anodize edilmiş numunelerde taban malzemeden alınan β -Ti pikleri tespit edilmiştir. İşlemler sonucu elde edilen piklerin sonuçları literatür ile uyumludur (Zorn *et al.* 2006, Tasdemir and Alsaran 2020).

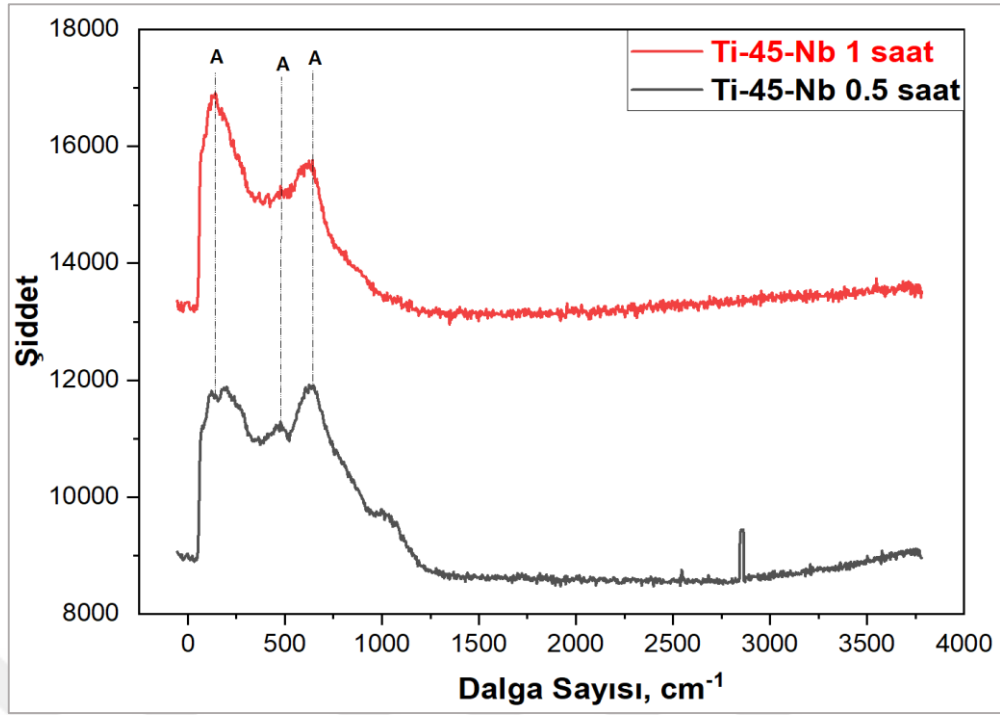


Şekil 27. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti45Nb numunelerin XRD grafiği

Anodize edilmiş Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb numunelere ait Raman grafikleri Şekil 28’de verilmiştir. Raman grafikleri incelendiği zaman TiO_2 yapısının; Ti6Al4V, Cp-Ti ve Ti45Nb alaşımlarının hepsinde olduğu gözlemlenmiştir. Cp-Ti Raman grafiğinde 146, 400, 504, 633 cm^{-1} anataz (A) pikleri elde edilmiştir ve en yoğun pike 146 cm^{-1} ’de rastlanmıştır (Song *et al.* 2007, Liu and Thompson 2015). Ti6Al4V Raman grafiğinde 154, 504, 632 cm^{-1} pikleri elde edilmiştir. 154 cm^{-1} ’deki çok yoğun ve keskin olan bant hem rutil (R) hem de anataz (A) fazlarına atfedilir. 504 ve 632 cm^{-1} olan yüksek frekans bölgelerindeki dar pikler ise anataz fazıyla ilişkilendirilmiştir (Matykina *et al.* 2011, Atmani *et al.* 2018, Jordanovova *et al.* 2020). Ti45Nb alaşımında ise 141, 477, 642 cm^{-1} anataz pikleri elde edilmiştir. (Aldabergenova *et al.* 2008). TiO_2 Raman piklerinin Cp-Ti alaşımında dar, Ti45Nb alaşımında ise oldukça geniş olduğu görülmektedir. Bu ise Cp-Ti alaşımının kristal yapıya, Ti45Nb alaşımının ise amorf yapıya daha yakın karakteristik sergilediğini göstermektedir. Raman ölçümleri sonucunda elde edilen pikler XRD analizlerini desteklemektedir.



Şekil 28. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb numunelerine ait Raman spektrumları



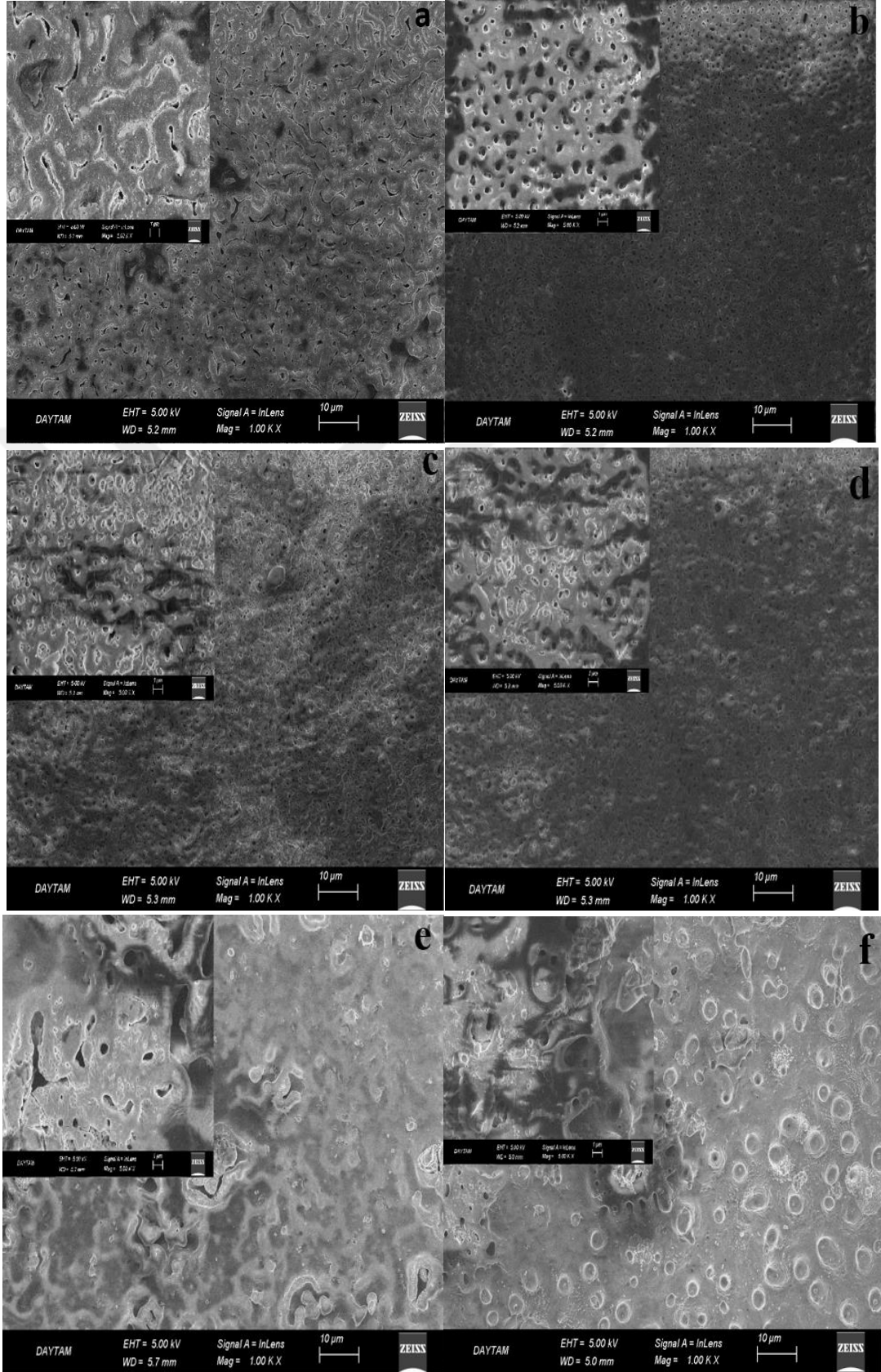
Şekil 29. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb numunelerine ait Raman spektrumları (devamı)

SEM analizleri

Şekil 29’da işlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb numunelerde farklı boyutlarda ve yapılarda poroz yapılar oluştuğu görülmektedir. Tüm numunelerde aynı anodizasyon çözeltisi kullanılması ve aynı parametrelerde (süre-voltaj) anodizasyona tabi tutulmasına rağmen 0.5 saat anodize olmuş Ti6Al4V numunede açık gözenek oluşumu diğer numunelere göre (Cp-Ti ve Ti45Nb) birim alanda daha fazla gözlemlenmiştir. Cp-Ti alaşımında, Ti6Al4V alaşımına göre açık gözenek çapı büyürken, birim alana yayılım oranı daha azdır. Ti45Nb alaşımında ise açık gözenekler diğer numunelere kıyasla daha az oluşum göstermiş fakat var olan açık gözeneklerin çapı Cp-Ti ve Ti6Al4V alaşımına göre daha büyüktür.

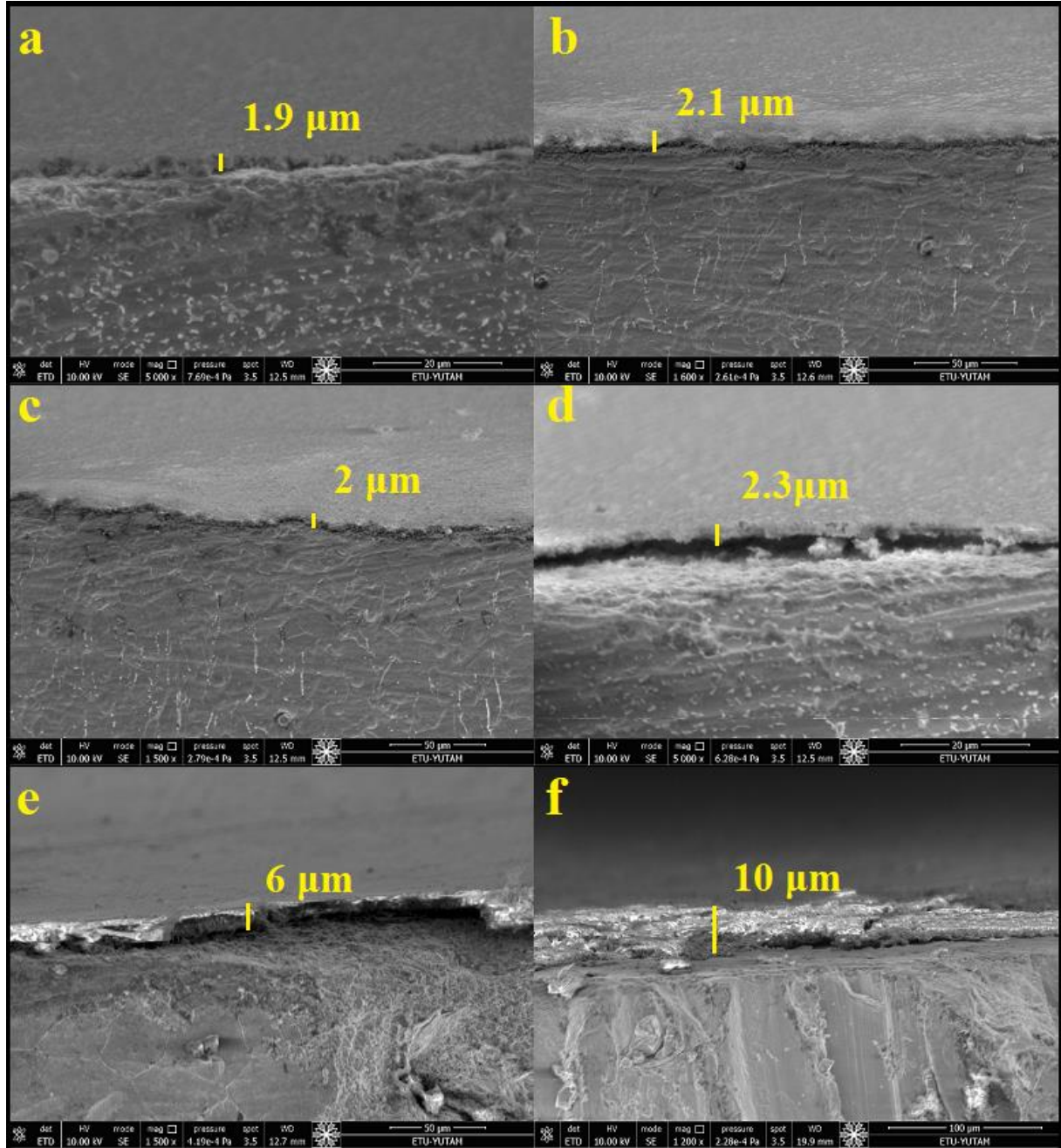
1 saat süre ile anodizasyon işlemine tabi tutulmuş numunelerin SEM görüntülerinde ise tüm titanyum numunelerde açık gözenek oluşumu söz konusudur. Ancak Ti6Al4V alaşımında 0.5 saat anodize edilmiş numuneye göre açık gözeneklerdeki yapıların daha belirgin şekilde oluştuğu gözlemlenmiş ve poroz yapıların kalınlığı artmıştır. Cp-Ti alaşımında açık gözenekler 0.5 saat anodize SEM görüntülerine göre daha belirgin hale gelmiş ve birim alandaki açık gözeneklerin dağılım oranı artmıştır. Ti45Nb alaşımında ise 0.5 saatlik numunede çok fazla poroz yapı oluşmamasına rağmen 1 saat anodize edilmiş numunede açık gözeneklerin oluştuğu

görülmektedir. Ti45Nb alaşımında var olan gözeneklerin birim alandaki sayısı Ti6Al4V ve Cp-Ti alaşımlarına göre daha az iken oluşan gözeneklerin çapı daha büyüktür.



Şekil 30. a) 0.5sa Cp-Ti, b) 1sa Cp-Ti c) 0.5sa Ti6Al4V d) 1sa Ti6Al4V e) 0.5sa Ti45Nb f) 1sa Ti45Nb alaşımlarına ait yüzey SEM görüntüleri

Şekil 30’da Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait kesit SEM görüntüleri gösterilmiş ve Tablo 13’te burada gösterilen değerler verilmiştir. Kesit SEM görüntüleri incelendiği zaman TiO₂ film kalınlığı en az olan malzemenin 0.5 sa anodize edilmiş Cp-Ti olduğu belirlenmiştir ve artan işlem süresi ile TiO₂ film kalınlığı artış göstermiştir. Ti6Al4V alaşımı için elde edilen film kalınlıkları Cp-Ti ile elde edilen film kalınlıklarına yakındır. Ancak, en kalın TiO₂ film kalınlıklarına hem 0.5 sa hem de 1 sa için Ti45Nb alaşımında ulaşılmıştır.



Şekil 31. a) 0.5sa Cp-Ti, b) 1sa Cp-Ti, c) 0.5sa Ti6Al4V, d) 1sa Ti6Al4V, e) 0.5sa Ti45Nb ve f) 1sa Ti45Nb alaşımlarına ait SEM kesit görüntüleri

Sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı analizleri

Tablo 13'te Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı değerleri gösterilmiştir. Numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde, her bir malzeme grubu için uygulanan yüzey işlemleri sonrasında elde edilen sertlik değerlerinin işlemsiz malzemelerden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Beklendiği üzere malzemelerin yüzeyinde oluşan TiO₂ yapıları taban malzemelere göre daha yüksek sertlikte olduğundan anodizasyon işlemleri sonrasında sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, anodizasyon işlemi sonrasında, Şekil 31'de gösterilen gözenek oluşumundan dolayı yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermiştir.

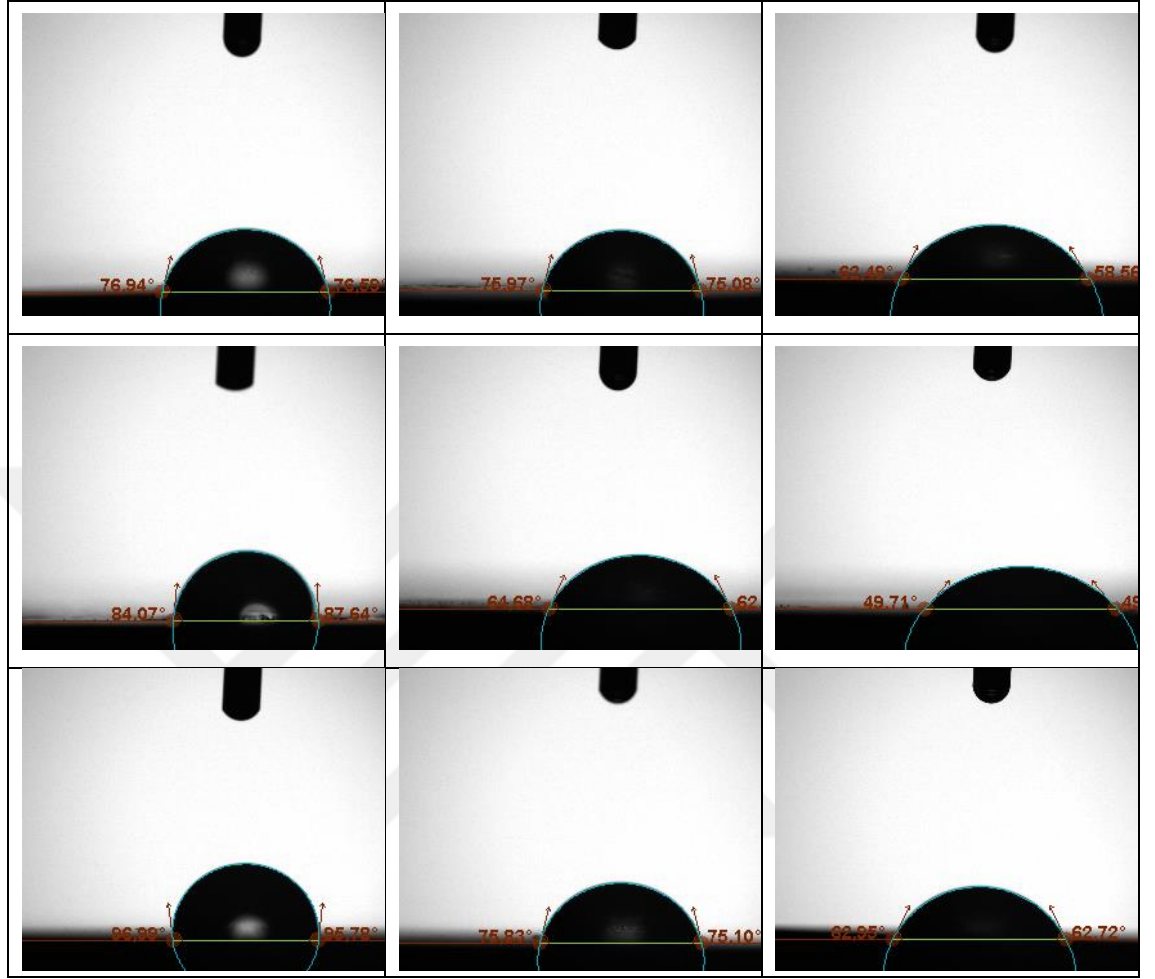
Tablo 13. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb Alaşımlarına Ait Sertlik, Tabaka Kalınlığı, Yüzey Pürüzlülüğü ve Temas Açısı Değerleri

Numune	Sertlik HV _{0.1}	TiO ₂ Tabaka Kalınlığı (µm)	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)	Temas Açısı (°)
Cp-Ti	225	-	0.11-0.14	76.94
Anodizasyon (0.5 saat)	432	1.90	0.27-0.32	75.97
Anodizasyon (1 saat)	526	2.10	0.37-0.42	62.49
Ti6Al4V	365	-	0.12-0.15	84.07
Anodizasyon (0.5 saat)	663	2.00	0.31-0.36	64.68
Anodizasyon (1 saat)	755	2.30	0.39-0.44	49.71
Ti45Nb	232	-	0.10-0.15	96.99
Anodizasyon (0.5 saat)	486	6.00	0.32-0.37	75.83
Anodizasyon (1 saat)	677	10.00	0.43-0.47	62.95

Şekil 31'de titanyum alaşımlarına ait numunelerin temas açısı görüntüleri verilmiştir. Temas açıları incelendiği zaman işlemsiz Cp-Ti alaşımının temas açısı 76.94° olarak belirlenmiş 0.5 saat anodize edildikten sonra 75.97°'ye düşmüş 1 saat anodize edildikten sonra ise 62.49° olarak tespit edilmiştir. İşlemsiz Ti6Al4V alaşımının temas açısı 84.07° iken, 0.5 saat anodize edildikten sonra 64.68°, 1 saat anodize edildikten sonra ise 49.71° olarak tespit edilmiştir. İşlemsiz Ti45Nb alaşımının ise temas açısı değeri 97° iken, 0.5 saat anodize edildikten sonra azalarak 75.83° ve 1 saat anodize edildikten sonra ise 62.95° olarak tespit edilmiştir.

Temas açısının azalması malzemenin hidrofiliklik özelliğinin artması anlamına gelmektedir. Deney sonuçlarından da görüldüğü üzere tüm numunelerde anodizasyon süresinin artmasıyla temas açılarının düştüğü görülmüş ve daha hidrofilik karakter sergilediği anlaşılmıştır. Temas açılarındaki bu değişme yüzey pürüzlülüğünün değişmesine ve anodizasyon sonrası yüzeyde oluşan hidroksil grupları ile ilişkilendirilmiştir. Yüzey

pürüzlülüğünün artması ile suyun temas edebileceği alan oranının artması yüzey ıslanabilirliğini artırırken anodizasyon sonrasında yüzeyde oluşan hidroksil gruplarının da ıslanabilirliği artırdığı bilinmektedir.



Şekil 32. Titanyum alaşımlarına ait temas açısı görüntüleri

a) İşlemsiz Cp-Ti b) 0.5 sa Cp-Ti c) 1 sa Cp-Ti d) İşlemsiz Ti6Al4V e) 0.5 sa Ti6Al4V f) 1 sa Ti6Al4V g) İşlemsiz Ti45Nb h) 0.5 sa Ti45Nb i) 1 sa Ti45Nb

Tribolojik Analizler

Aşınma Analizleri

Kuru aşınma analizleri

Tablo 14'te Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait kuru sürtünme katsayısı ve aşınma oranları ve Şekil 32'de ise; bu alaşımların kuru aşınma sürtünme katsayıları grafikleri verilmiştir. Cp-Ti alaşımının işlemsiz kuru aşınma sürtünme katsayısı değeri 0.67, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti alaşımlarının ise 0.71 olarak elde edilmiştir. Anodizasyon işleminin Cp-Ti alaşımının kuru aşınma oranları üzerinde az bir iyileşme yaptığı gözlemlenmiştir. İşlemsiz Cp-Ti alaşımının kuru aşınma oranı $8.93 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ iken 0.5 saat anodize edildikten sonra %2.8 iyileşme göstererek $8.68 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$, 1 saat anodize edildikten sonra ise %16.58 iyileşme göstererek $7.24 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ olarak hesaplanmıştır.

Ti6Al4V alaşımının kuru aşınma sürtünme katsayı değerleri işlemsiz, 0.5 sa ve 1 sa anodize edilmiş numuneler için yaklaşık olarak aynı değerlere (0.62) sahiptir. İşlemsiz Ti6Al4V alaşımının aşınma oranı $8.48 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ iken 0.5 saat anodize edildikten sonra %38 iyileşme göstererek $5.23 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ bulunmuştur. 1 saat anodize edildikten sonra ise %97 iyileşme daha göstererek $0.12 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ bulunmuştur. SEM analizlerinde yapıda mikro çatlaklara rastlanmamıştır. Ti6Al4V alaşımının kuru aşınma analizlerinde düşük çizilme hızlarında aşınma izlerinde mikro çatlaklara sebep olduğu fakat yüksek çizilme hızlarında mikro çatlakların oluşmayacağı literatürle uyumaktadır (Liu *et al.* 2006).

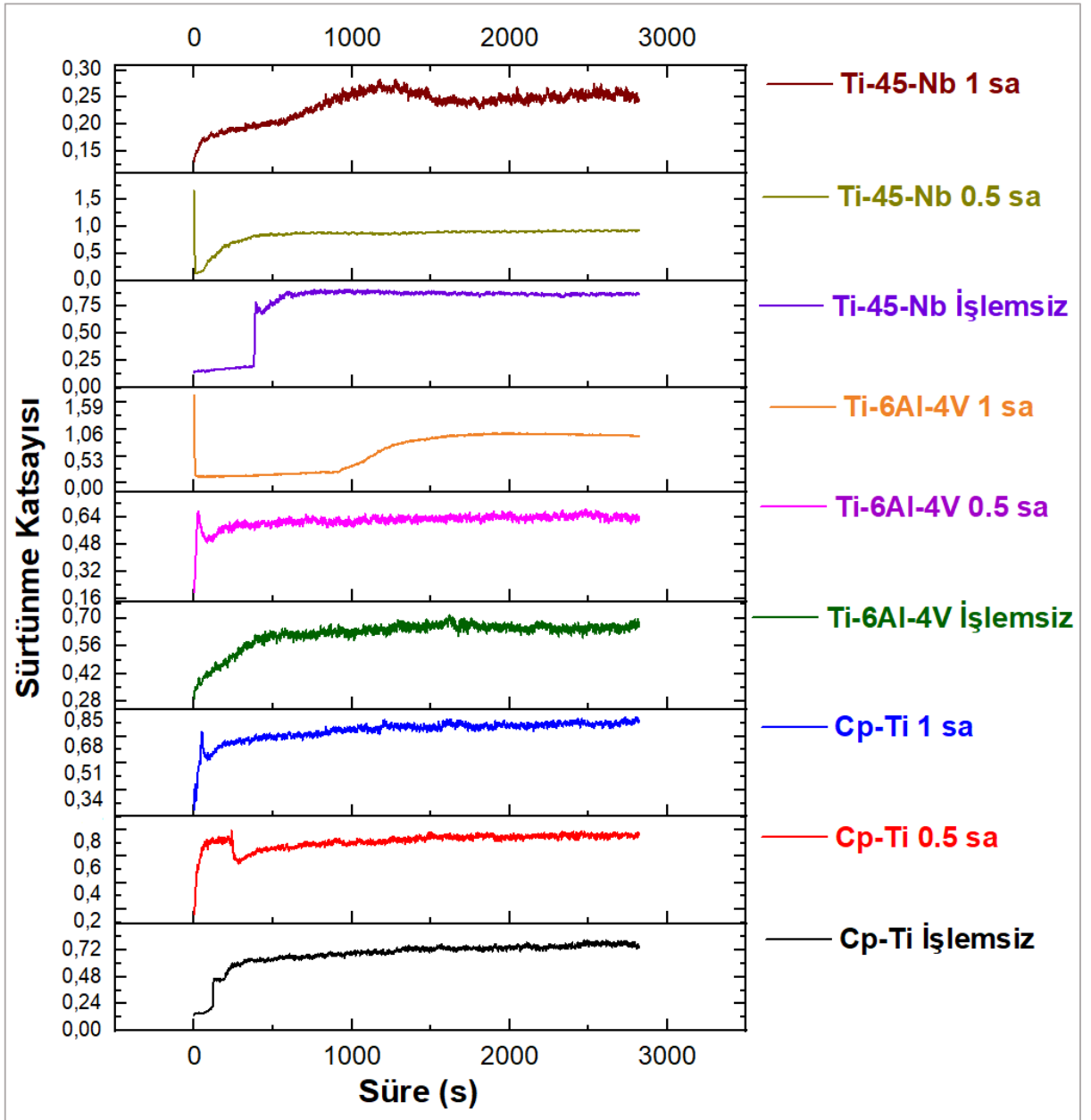
Ti45Nb alaşımının kuru aşınma sürtünme katsayı değerleri işlemsiz, 0.5 sa ve 1 sa anodize edilmiş numuneler için sırasıyla 0.7674, 0.8439 ve 0.2363 olarak hesaplanmıştır. Kuru aşınma oranları incelendiğinde Ti45Nb alaşımının diğer alaşımlara göre en iyi iyileşme sağlayan alaşım olduğu gözlemlenmiştir. İşlemsiz Ti45Nb alaşımının kuru aşınma oranı $10.11 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ iken 0.5 saat anodize edildikten sonra %99 iyileşme göstererek $0.066 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$, 1 saat anodize edildikten sonra ise %83 daha iyileşme göstererek $0.011 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ değerine indiği belirlenmiştir. Tüm numunelerde yüzey sertliği ve TiO_2 tabakasından dolayı aşınma direncinin arttığı ve aşınma izinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Daha düşük aşınma oranlarına sahip numuneler, kaplamanın koruyucu etkisini göstermektedir. Ayrıca; uygulanan yük, kritik değer altında olduğu zaman koruyucu filmin alt tabakayı aşınmaya karşı iyi bir şekilde koruduğunu ve aşınma direncinin film kalınlığı ve kristallik derecesi ile ilişkili olduğunu gösterir. Yüzey işlemi uygulanmış numunelerin aşınma direnci taban malzemeden daha yüksektir ve numunelerin aşınma direnci kalınlık ve kristal

yapının etkisi ile artar. Kristal yapıda olan bir kaplama, amorfthan daha büyük bir aşınma direncine sahiptir; bu durum kristal yapının yüksek sertliği ile ilişkilidir (Vera *et al.* 2015).

Tablo 14. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb Alaşımlarının Kuru Sürtünme Katsayı ve Aşınma Oranları

Parametreler	Sürtünme Katsayısı	Aşınma Oranı ($10^{-5}\text{mm}^3/\text{N.m}$)
İşlemsiz Cp-Ti	0.67871	8.93
Anodize 0.5 sa Cp-Ti	0.71612	8.68
Anodize 1 sa Cp-Ti	0.716094	7.24
İşlemsiz Ti6Al4V	0.6204	8.48
Anodize 0.5 sa Ti6Al4V	0.6196	5.23
Anodize 1 sa Ti6Al4V	0.6275	0.12
İşlemsiz Ti45Nb	0.7674	10.11
Anodize 0.5 sa Ti45Nb	0.8439	0.066
Anodize 1 sa Ti45Nb	0.2363	0.011

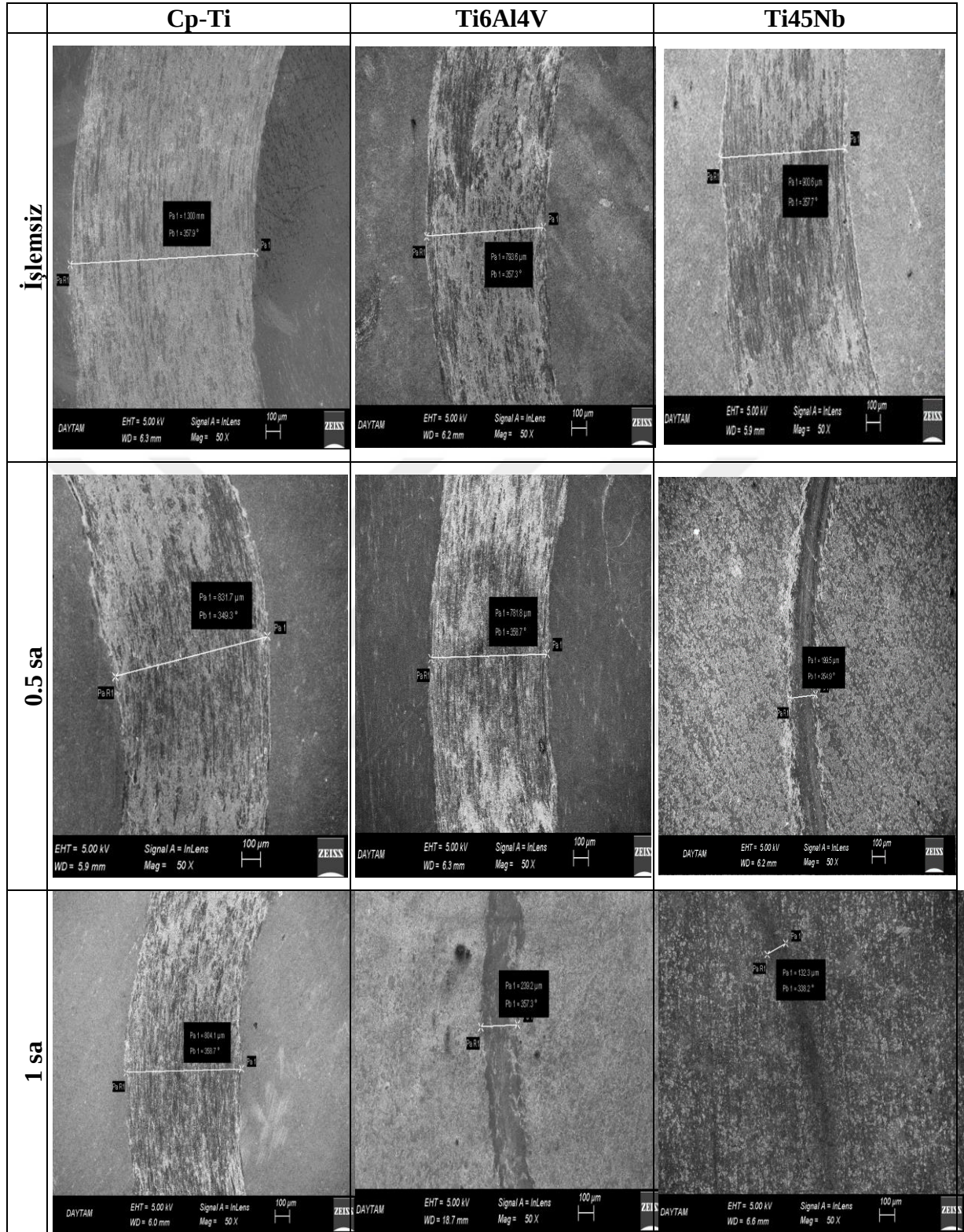


Şekil 33. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait kuru aşınma sürtünme katsayıları grafikleri

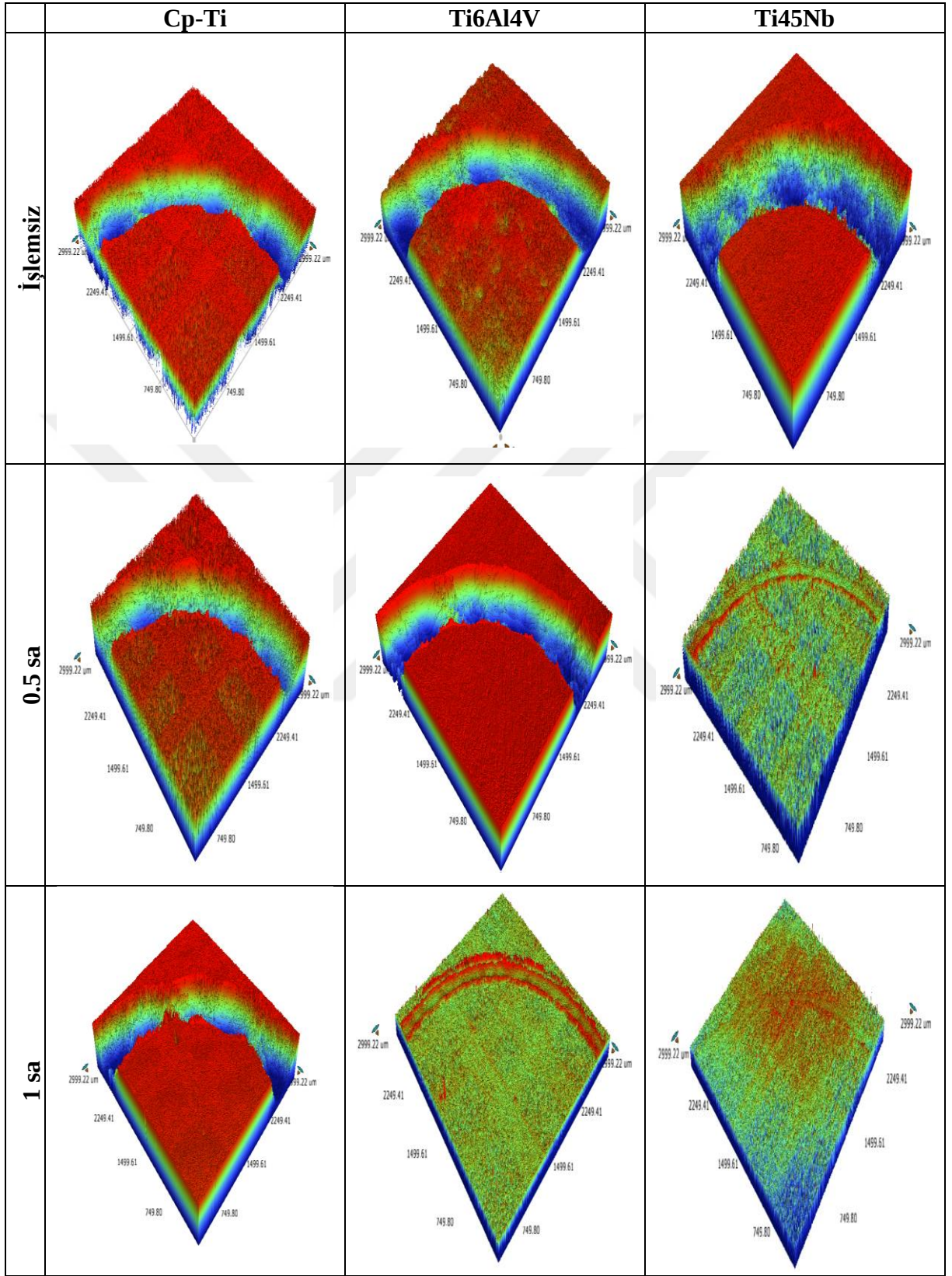
Şekil 33'te Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait kuru aşınma SEM görüntüleri, Şekil 34'te titanyum numunelere ait kuru aşınma sonrası profilometre görüntüleri verilmiştir. Kuru aşınma SEM görüntüleri incelendiği zaman tüm işlemsiz numunelerde adeziv aşınma, numuneler 0.5 saat ve 1 saat anodizasyon işlemlerine tabi tutulduktan sonra ise numunelerde abrazif aşınma türü tespit edilmiştir. İşlemsiz numunelerde pin'in yüzeyde oluşturduğu plastik deformasyon etkisi ile ezilmeler meydana gelmiştir. Ayrıca, aşınma izlerinin kenarında bu plastik deformasyon etkisi ile sıvanmalar görülmüştür. Bu durum işlemsiz numunelerde adeziv aşınma olduğunu kanıtlar niteliktedir. Bunlarla birlikte, işlemsiz malzemelerin sertliğine bağlı olarak en dar aşınma iz genişliği en sert malzeme olan Ti6Al4V'den elde edilmiş olup sertlikleri nispeten birbirine yakın olan Cp-Ti ve Ti45Nb'de Ti6Al4V'den daha geniş iz genişlikleri elde

edilmiştir. Anodizasyon işlemleri sonrasında numunelerde temel aşınma mekanizması olarak abrazif aşınmanın olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, yüzeyde oluşan sert TiO_2 tabakasının aşınma yükü neticesinde kırılarak aşınma olayına katılmasıdır. Anodize edilmiş numunelerde aşınma izleri içerisinde oluşan çizikler bunu destekler niteliktedir. Bunlarla birlikte, aşınma iz genişlikleri incelendiğinde, en yüksek TiO_2 tabaka kalınlığına sahip olan Ti45Nb numunede en dar iz genişliği elde edilmiştir. Ayrıca, artan anodizasyon süresi ile de her bir malzeme grubu için aşınma iz genişliğinin azaldığı görülmüştür.





Şekil 34. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait kuru aşınma SEM görüntüleri



Şekil 35. Titanyum numunelerin kuru aşınma sonrası profilometre görüntüleri

Sıvı Aşınma Analizleri

Tablo 15'te Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait sıvı sürtünme katsayısı ve aşınma oranları ve Şekil 35'te ise; bu alaşımlarının sıvı aşınma sürtünme katsayıları grafikleri verilmiştir. Cp-Ti alaşımının sıvı aşınma sürtünme katsayı değerleri işlemsiz, 0.5 sa ve 1 sa anodize edilmiş numuneler için sırasıyla 0.28, 0.25 ve 0.32 olarak hesaplanmıştır. Sıvı aşınma oranları incelendiğinde işlemsiz Cp-Ti alaşımı $5.23 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ değere sahipken 0.5 saat anodize edildikten sonra %92 iyileşme göstererek $0.41 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$, 1 saat anodize edildikten sonra ise %78 daha iyileşme gösterip $0.09 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ değerine ulaşmıştır.

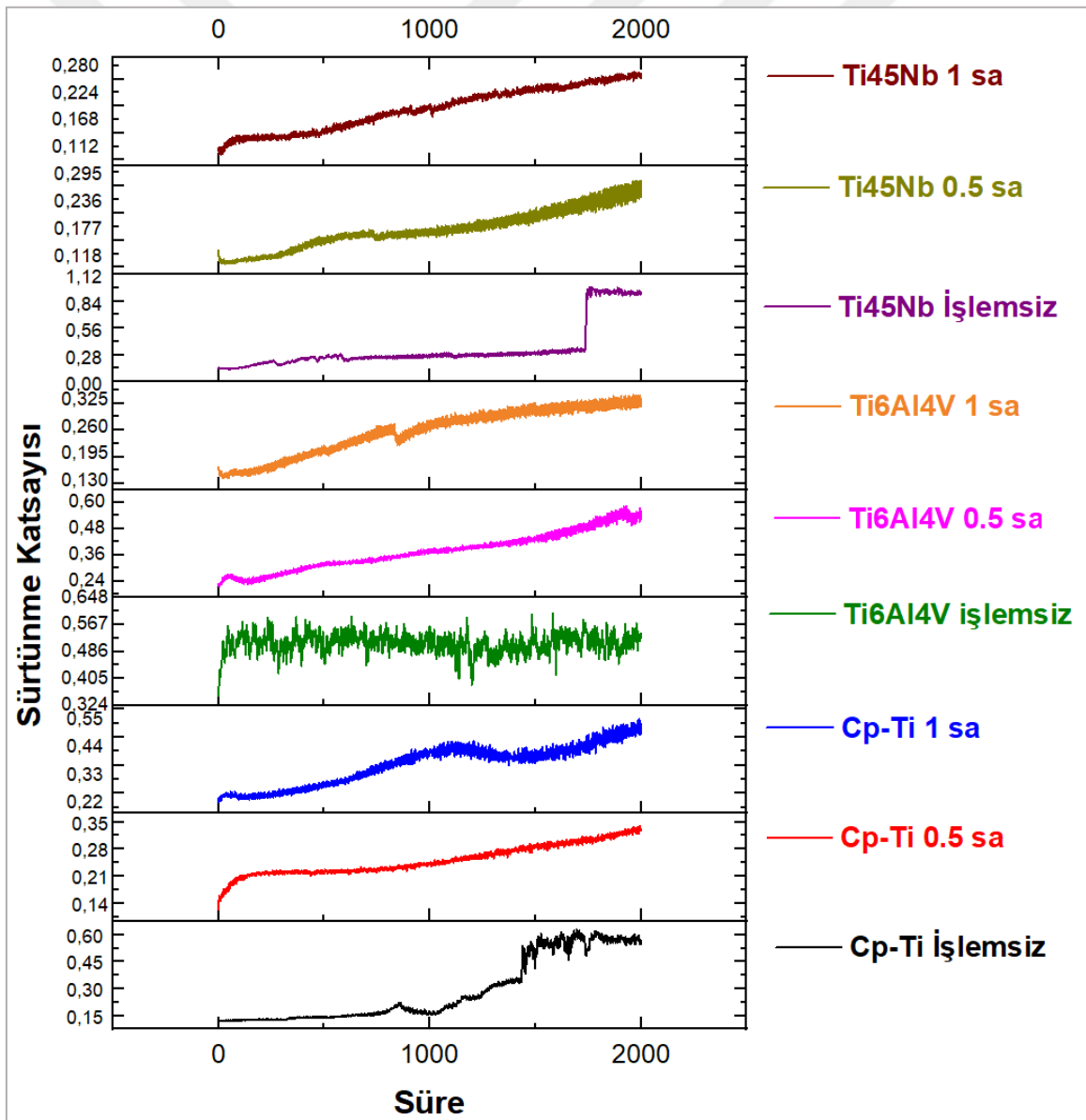
Ti6Al4V alaşımının sıvı aşınma sürtünme katsayı değerleri işlemsiz, 0.5 sa ve 1 sa anodize edilmiş numuneler için sırasıyla 0.51, 0.37 ve 0.25 bulunmuştur. Sıvı aşınma oranları incelendiği zaman işlemsiz Ti6Al4V alaşımı $3.23 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ değere 0.5 saat anodize edildikten sonra %76 iyileşerek $0.77 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$, 1 saat anodize edildikten sonra ise %56 daha iyileşme göstererek $0.34 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ değerlerini elde etmiştir.

Ti45Nb alaşımının ise sıvı aşınma sürtünme katsayı değerleri işlemsiz, 0.5 sa ve 1 sa anodize edilmiş numuneler için sırasıyla 0.33, 0.19 ve 0.21 bulunmuştur. Sıvı aşınma oranları incelendiği zaman; kuru aşınma oranlarında olduğu gibi, Ti45Nb alaşımının diğer alaşımlara göre en iyi iyileşme sağlayan alaşım olduğu gözlemlenmiştir. İşlemsiz Ti45Nb alaşımı $4.80 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ değere 0.5 saat anodize edildikten sonra %98 iyileşerek $0.06 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$, 1 saat anodize edildikten sonra ise %66 daha iyileşme göstererek $0.02 (10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm})$ değerleri bulunmuştur.

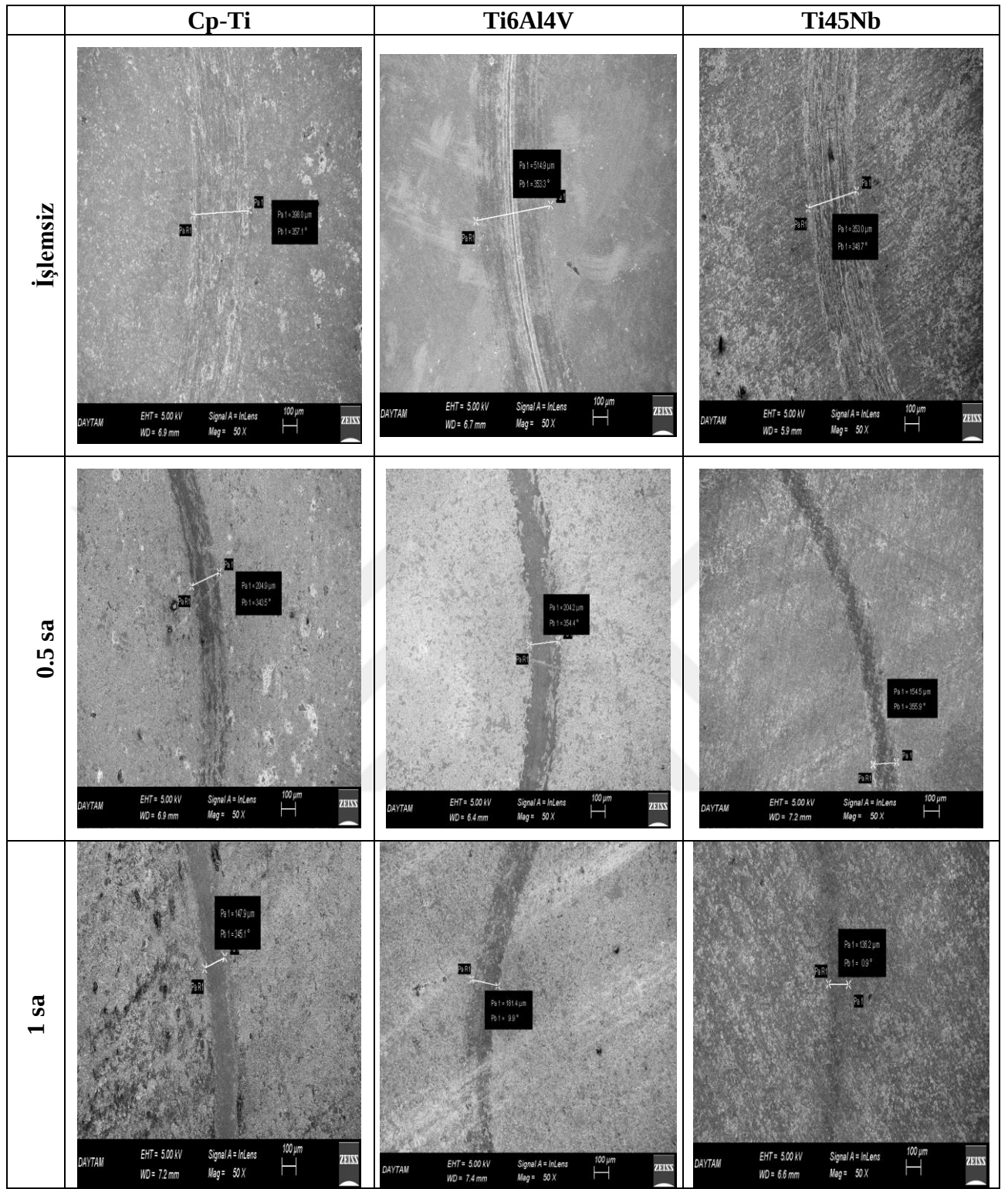
Sıvı aşınma koşulları altında, kuru aşınmada gözlemlenenden çok daha yüksek bir direnç beklenecektir. Bunun sebebi temas durumunda, ısıнын dağıtılması ve aşınma sonucu oluşan kalıntıların aşınma bölgesinden uzaklaştırılması sonucunda aşınma bölgesindeki gerilmeler ve sıcaklıklarda önemli bir azalma meydana gelmesidir (Sharma 1992). Sıvı aşınma koşullarında, sürtünme katsayısı kuru koşullara göre daha düşüktür (Li *et al.* 2019).

Tablo 15. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb Alaşımlarının Sıvı Sürtünme Katsayı ve Aşınma Oranları

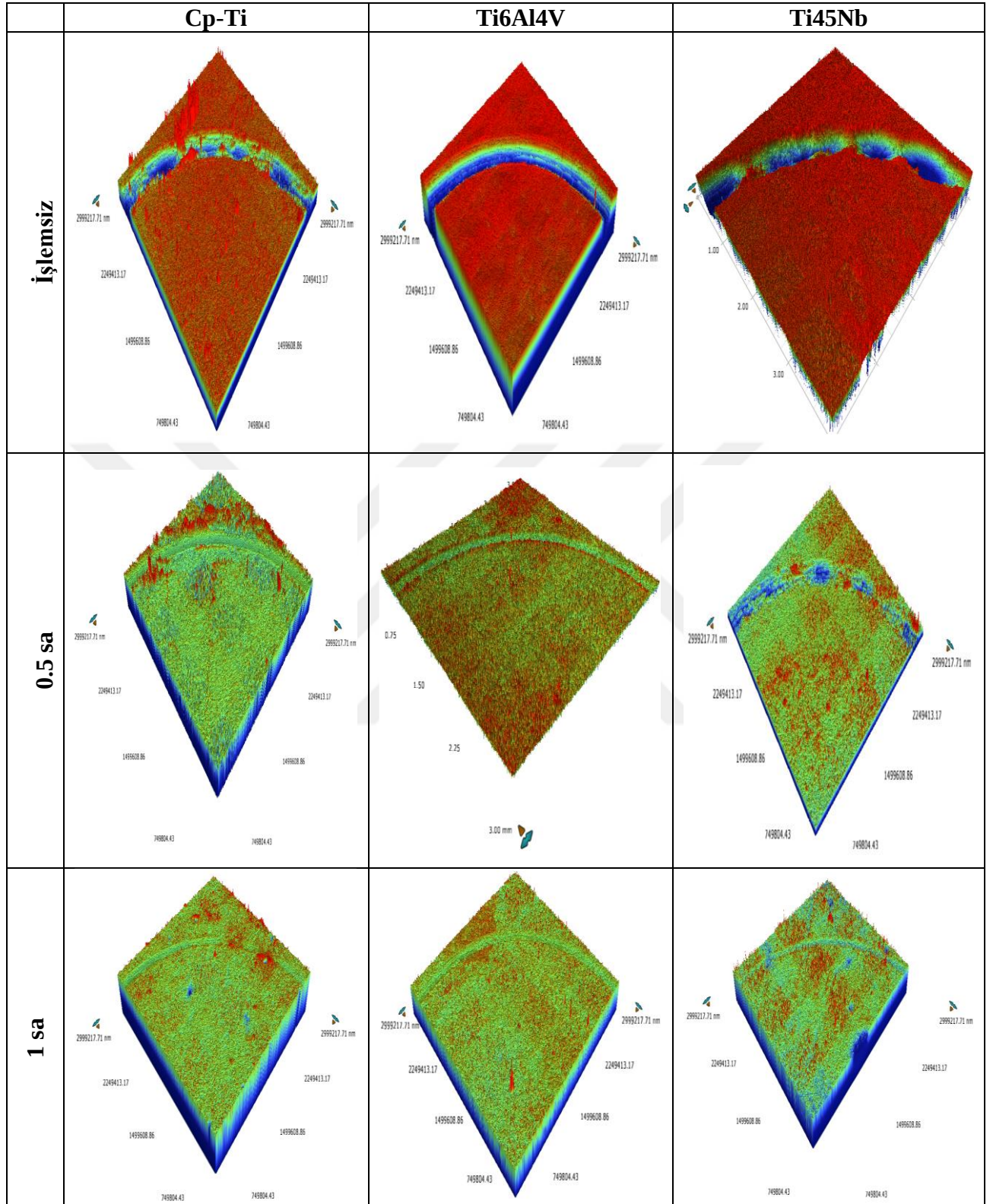
Parametreler	Sürtünme Katsayısı	Aşınma Oranı ($10^{-5}\text{mm}^3/\text{N.m}$)
İşlemsiz Cp-Ti	0.2854	5.23
Anodize 0.5 sa Cp-Ti	0.2513	0.41
Anodize 1 sa Cp-Ti	0.3292	0.09
İşlemsiz Ti6Al4V	0.5103	3.23
Anodize 0.5 sa Ti6Al4V	0.3742	0.77
Anodize 1 sa Ti6Al4V	0.2557	0.34
İşlemsiz Ti45Nb	0.3322	4.80
Anodize 0.5 sa Ti45Nb	0.1988	0.06
Anodize 1 sa Ti45Nb	0.2166	0.02

**Şekil 36.** Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait sıvı aşınma sürtünme katsayıları grafikleri

Şekil 36’da Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait sıvı aşınma SEM görüntüleri, Şekil 37’de titanyum numunelere ait sıvı aşınma sonrası profilometre görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde; işlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodizasyon işlemli numunelerde adezif aşınmanın etkin olduğu görülmüştür. İşlemsiz numunelerde pin’in yüzeyde oluşturduğu plastik deformasyon etkisi ile ezilmeler ve aşınma izlerinin kenarında sıvanmalar meydana gelmiştir ancak bu ezilmeler ve sıvanmalar kuru aşınmaya göre çok düşük seviyede gerçekleşmiştir. Bunun sebebi, pin ile yüzeyler arasında sıvı ortamın olmasıdır. Bununla birlikte, anodize edilmiş numunelerin kuru aşınmasında elde edilen sonuçların aksine, burada anodize edilmiş numunelerde abrazif aşınma çok düşük seviyede gerçekleşmiştir. Bunun sebebi, aşınma esnasında oluşan partiküllerin sıvı tarafından aşınma bölgesinden uzaklaştırılmasıdır. İşlemsiz malzemelerin sertliğine bağlı olarak, kuru aşınma sonuçlarına benzer şekilde, en dar aşınma iz genişliği en sert malzeme olan Ti6Al4V’den elde edilmiş olup sertlikleri nispeten birbirine yakın olan Cp-Ti ve Ti45Nb’de Ti6Al4V’den daha dar iz genişlikleri elde edilmiştir. Ayrıca, en yüksek TiO₂ tabaka kalınlığına sahip olan Ti45Nb numunede en dar iz genişliği elde edilmiştir ve artan anodizasyon süresi ile de her bir malzeme grubu için aşınma iz genişliğinin azaldığı görülmüştür. Her bir numune grubu için sıvı ortamında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve aşınma iz genişlikleri kuru aşınma sonuçlarından daha düşük seviyededir.



Şekil 37. Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb alaşımlarına ait sıvı aşınma SEM görüntüleri

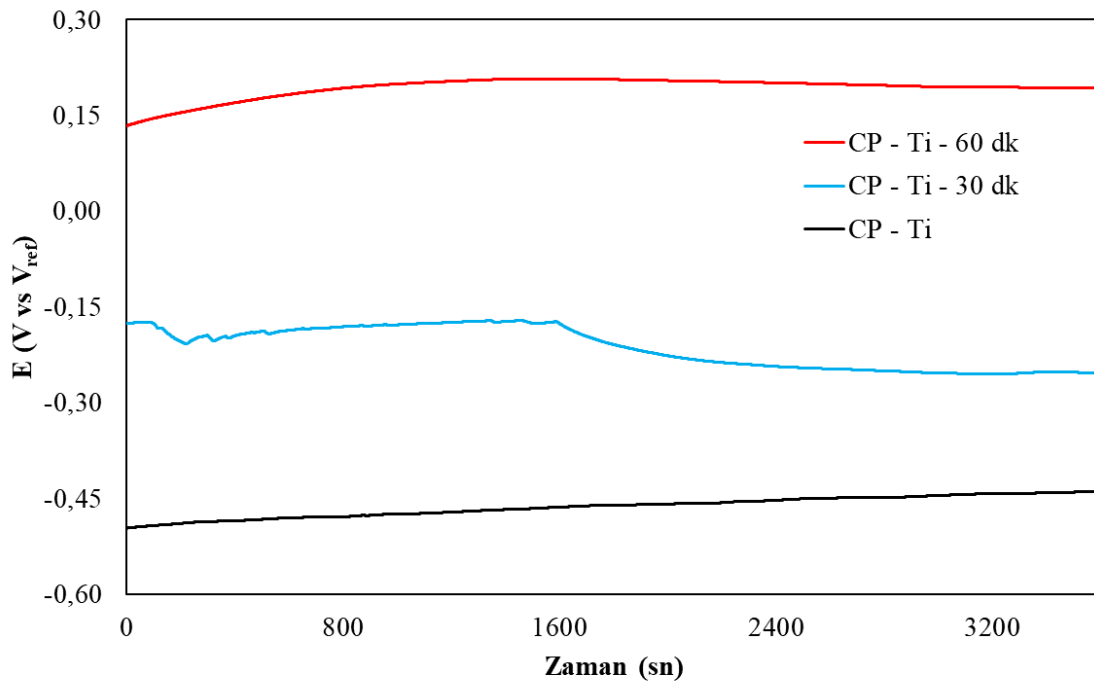


Şekil 38. Titanyum numunelerin sıvı aşınma sonrası profilometre görüntüleri

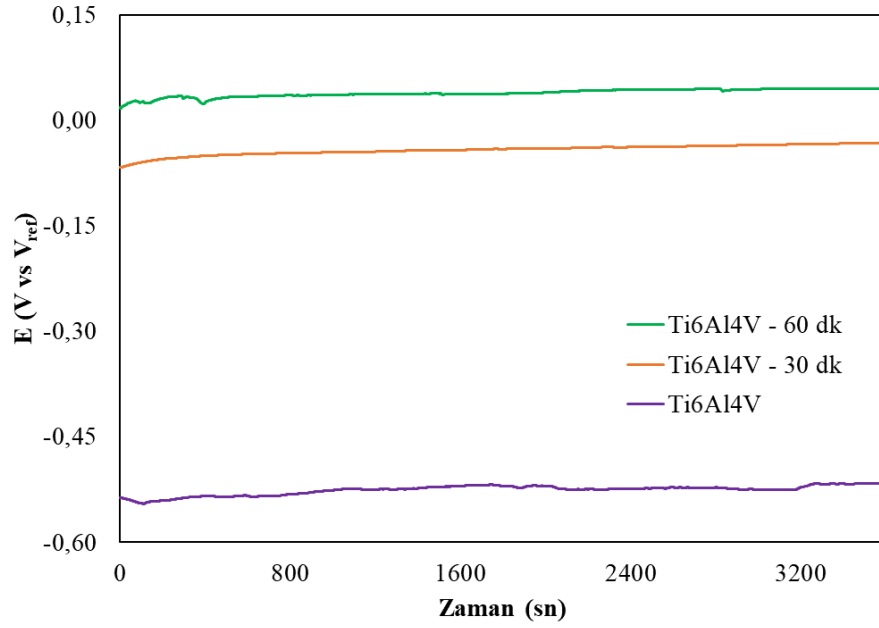
Korozyon Analizleri

Açık devre potansiyeli ve potansiyodinamik tarama

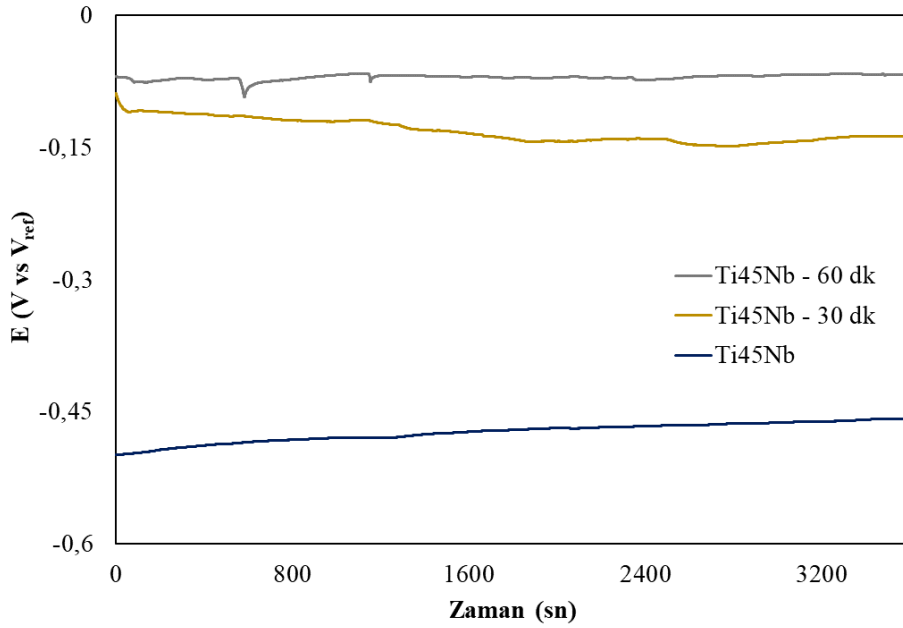
Açık devre potansiyellerine ait grafikler sırasıyla Şekil 38, Şekil 39 ve Şekil 40'ta verilmiştir. Bu ölçüm sonuçlarına göre anodize edilmiş numunelerde pozitif potansiyele doğru değer artışı görülmektedir. İşlemsiz numunelerin soyluluk derecesi kaplanmış numunelere göre daha düşük mertebelerde kalmıştır. 1 saat kaplanmış Cp-Ti numune kendi grubu içinde maksimum potansiyel değerine ulaşmıştır (-0,22 mV). Benzer durum Ti6Al4V ve Ti45Nb grupları için de geçerlidir. 1 saat kaplanmış Ti6Al4V için kararlı potansiyel değeri -6,58 mV iken bu değer Ti45Nb için 1 saat işlem görmüş yüzeyde -7,52 mV dir.



Şekil 39. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti numunelere ait açık devre potansiyeli ölçümleri



Şekil 40. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti6Al4V numunelere ait açık devre potansiyeli ölçümleri



Şekil 41. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti45Nb numunelere ait açık devre potansiyeli ölçümleri

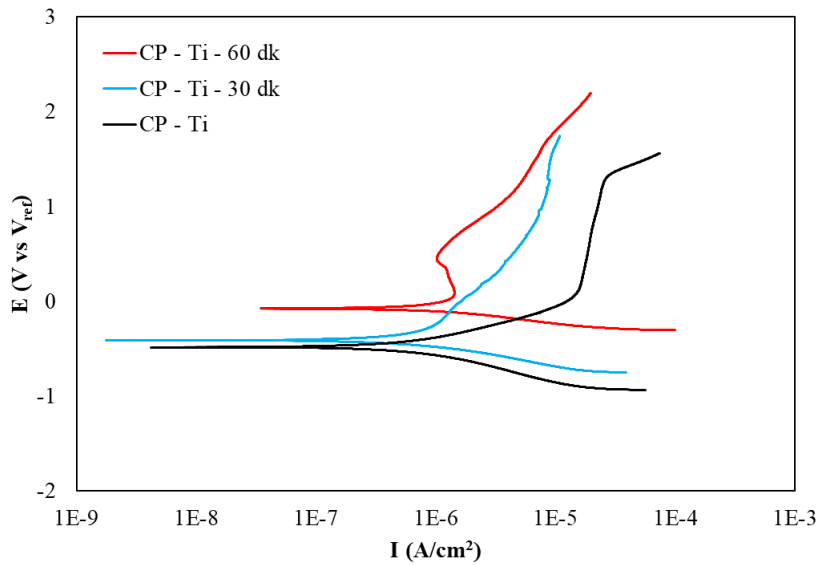
Potansiyodinamik polarizasyon sonuçlarına ait grafikler sırasıyla Şekil 41, Şekil 42 ve Şekil 43'te verilmiştir. Şekil 41 incelendiğinde açık devre potansiyeli ölçümlerine paralel bir sıralamanın bu sonuçlarda da varlığını sürdürdüğü görülmektedir. Korozyona ilk uğrayan işlemsiz Cp-Ti numunenin olduğu -487 mV potansiyel değeri ile kanıtlanmıştır. Bu değerler 30 dakika kaplanmış numune için incelendiğinde -415 mV iken 1 saat işlem görmüş Cp-Ti numune için -79,6 mV dir. Toplam korozyona uğrama miktarları için benzer sıralamadan bahsedilebilir. Film kalınlıkları önemli ölçüde bariyer etkisi gösterebildiğinden toplam korozyon kaybı ile film

kalınlığı arasında bir ilişki kurulabilir. 1 saatlik kaplama sonrası maksimum film kalınlığı ile birlikte minimum korozyon hızı elde edilmiştir ($18,39 \times 10^{-3}$ mpy). Ancak yüzey morfolojilerindeki bölgesel süreksizlikler nedeniyle numuneler arasında ters orantıya bağlı olarak bir sıralama gerçekleştirilememiştir. Korozyon akımı değerlerine bağlı olarak Cp-Ti için toplam malzeme kaybına ilişkin dalgalanmalar yorumlanabilmektedir (Tablo 16).

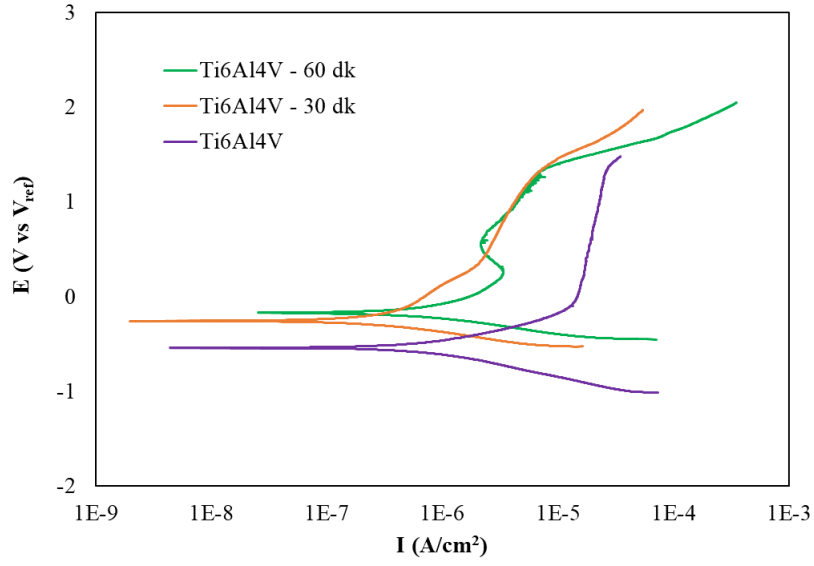
Ti6Al4V taban malzeme için korozyon potansiyeli değerleri incelendiğinde (Şekil 42) 1 saat işlem görmüş yüzeyin en geç korozyona uğradığı görülmektedir. Bununla birlikte Cp-Ti taban malzemenin aksine 1 saat kaplanmış yüzeyde minimum korozyon hızı ve dolayısıyla minimum malzeme kaybının mevcut olduğu söylenebilir (Tablo 16).

Ti45Nb grubunda (Şekil 43) 30 dakika süre ile kaplanmış numunede minimum malzeme kaybının varlığı söz konusu iken, 1 saat kaplanmış yüzey en geç korozyona uğramıştır (Tablo 16). Taban malzemede hem toplam malzeme kaybının maksimum oluşu hem de en ilk korozyona uğrayan yüzey olması sebebi ile kendi gurubu içinde en düşük performansı gösterdiği söylenebilir. Tüm numuneler içerisinde -79,6 mV lik potansiyele değeri ile 1 saat kaplanmış CP-Ti yüzey en geç korozyona uğrayan morfoloji olmuştur.

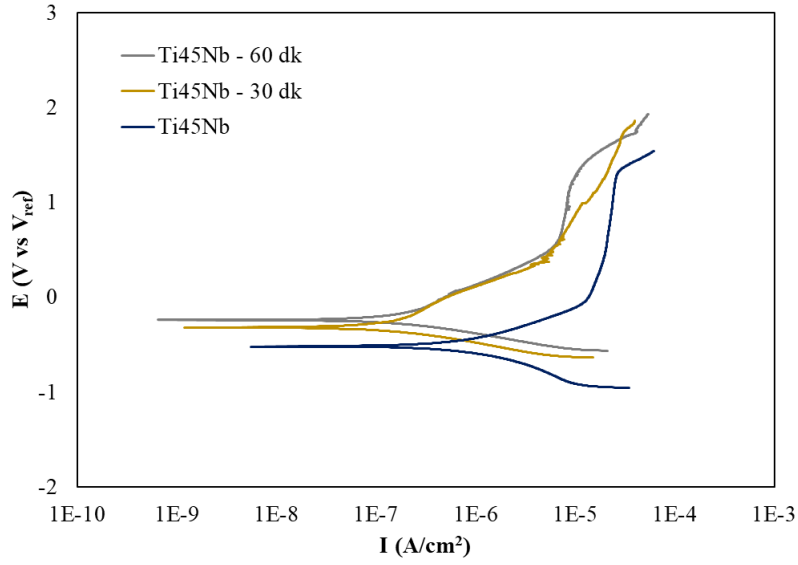
Genel olarak korozyon hasarı açısından tüm şartlar bir veri havuzu içinde değerlendirildiğinde kaplama kalınlıklarındanki süreksizlikler neticesinde korozyon kaynaklı toplam malzeme kaybının korozyon hasarının ilerleme hızı ile doğru orantılı olmadığı söylenebilir. Lokal bölgelerdeki farklı korozyon hasarları özellikle kaplamanın zayıf olduğu bölgelerde taban malzeme hasarına daha kolay bir biçimde sebebiyet vermiştir.



Şekil 42. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Cp-Ti numunelere ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 43. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti6Al4V numunelere ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 44. İşlemsiz, 0.5 saat ve 1 saat anodize edilmiş Ti45Nb numunelere ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Tablo 16. Potansiyodinamik Polarizasyon Taraması ve Tafel Eğri Uydurma Analizine Ait Sonuçlar

Numune	E_{kor} (mV)	i_{kor} (A/cm ²)	β_a (V/decade)	β_c (V/decade)	Korozyon Hızı (mpy)
Cp-Ti	-487	$53,80 \times 10^{-9}$	1×10^{-15}	$32,2 \times 10^{-3}$	$18,39 \times 10^{-3}$
Cp -Ti - 30 dk	-415	$48,60 \times 10^{-9}$	$213,3 \times 10^{-3}$	$35,90 \times 10^{-3}$	$16,61 \times 10^{-3}$
Cp -Ti - 60 dk	-79,60	197×10^{-9}	7,16	$49,7 \times 10^{-3}$	$67,43 \times 10^{-3}$
TiAl4V	-545	$89,20 \times 10^{-9}$	254×10^{-3}	$57,6 \times 10^{-3}$	$30,09 \times 10^{-3}$
TiAl4V - 30 dk	-260	$32,50 \times 10^{-9}$	$186,4 \times 10^{-3}$	$84,50 \times 10^{-3}$	$10,97 \times 10^{-3}$
TiAl4V - 60 dk	-177	$53,50 \times 10^{-9}$	$224,50 \times 10^{-3}$	$41,90 \times 10^{-3}$	$18,04 \times 10^{-3}$
Ti45Nb	-523	$83,60 \times 10^{-9}$	$299,2 \times 10^{-3}$	$38,80 \times 10^{-3}$	$26,32 \times 10^{-3}$
Ti45Nb - 30 dk	-321	30×10^{-9}	$173,4 \times 10^{-3}$	$86,10 \times 10^{-3}$	$9,452 \times 10^{-3}$
Ti45Nb - 60 dk	-242	$73,20 \times 10^{-9}$	$438,5 \times 10^{-3}$	$150,5 \times 10^{-3}$	$23,04 \times 10^{-3}$

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada; Cp-Ti, Ti6Al4V ve Ti45Nb titanyum alaşımlarına aynı parametrelerde anodik oksidasyon (anodizasyon) işlemi uygulanmış, tribolojik ve elektrokimyasal davranışları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- XRD ve Raman analiz sonuçlarına göre uygulanan anodizasyon işlemi süresinin artırılması anataz pik yoğunluğunu tüm numunelerde artırmıştır. Bu sonuçlara göre uygulanan anodizasyon süresinin artmasıyla birlikte kristallik oranı artmıştır.
- SEM ve kesit SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre titanyum numunelerinin elektrik direnç farklılıkları yüzeyde farklı poroz yapıların oluşmasına sebebiyet vermiştir. Yine aynı şekilde elektrik dirençlerin titanyum numunelerde farklılık göstermesi farklı kalınlıklarda anodik filmlerin elde edilmesini sağlamıştır. En kalın filmler Ti45Nb numunelerinden elde edilirken, en ince filmler Cp-Ti numunelerinden elde edilmiştir.
- Anodizasyon işlemi sonrasında SEM görüntülerinden görüldüğü gibi tüm numunelerde yüzey morfolojisinin değişmesi yüzey pürüzlülüğünün değişmesine neden olmuştur. Titanyum numunelerinin elektrik direnç farklılığı ve anodizasyon süresi yüzey pürüzlülüğünde etkili olmuştur. Artan anodizasyon süresiyle birlikte tüm numunelerde yüzey pürüzlülüğü artış göstermiştir.
- Anodizasyon süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün de artması neticesinde tüm numunelerde temas açısı ölçümlerinde de görüldüğü gibi yüzey ıslanabilirliği artmıştır.
- Anodizasyon işlemi sonrasında tüm numunelerde yüzey sertliği artmıştır. Uygulanan anodizasyon süresinin artması anataz pik yoğunluğunu artırırken yüzey sertliğinin de artmasını sağlamıştır.
- Aşınma oranları anodizasyon işlemi sonrasında artan yüzey sertliği ve anodik film kalınlığı sayesinde tüm numunelerde azalmıştır. Yüksek sertlik ve en kalın anodik filmlere sahip olan Ti45Nb numunesinden en düşük aşınma oranları elde edilmiştir.
- Anodik film kalınlığı ve anataz fazı pik yoğunluğu elektrokimyasal deneylerde belirleyici rol oynamıştır. Artan anodizasyon süresi ile film kalınlığının artması ve anataz pik yoğunluğunun artması tüm numunelerde korozyon direncinin artmasını sağlamıştır. TiO₂ filmlerdeki süreksizlikler neticesinde korozyon kaynaklı toplam

malzeme kaybının korozyon hasarının ilerleme hızı ile doğru orantılı olmadığı belirlenmiştir.

Öneriler

Bu tez çalışmasında ele alınamayan ancak farklı çalışmalarda incelenebilecek temel öneriler şu şekildedir:

- Tez çalışmasında: 1.5 M sülfirik asit (H_2SO_4) ve 0.3 M fosforik asitten (H_3PO_4) oluşan tek bir çözelti ve tek bir gerilim değeri (150 V) ile anodizasyon işlemleri gerçekleştirilmiş. Farklı çözelti içerikleri ve gerilim değerlerinin etkisi incelenebilir.
- Farklı parametrelerden elde edilen anodik filmlerin yüzey pürüzlüğü, sertliği, yüzey ıslanabilirliği çeşitlendirilerek özellikle biyomedikal uygulamalarda ticari ürünler üzerinde denenebilir.

KAYNAKLAR

- Acar, M. T., Kovacı, H., & Çelik, A. (2022). Improving the wettability and corrosion behavior of Cp-Ti by applying anodization surface treatment with the addition of boric acid, graphene oxide and hydroxyapatite. *Materials Today Communications*, 103683.
- Ahmed, Y. M., Sahari, K. S. M., Ishak, M., & Khidhir, B. A. (2014). Titanium and its Alloy. *International Journal of Science and Research*, 3(10), 1351-1361.
- Albayrak, Ç. (2008). CP-Titanyumun Anodizasyonu. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi*.
- Albayrak, Ç., Hacısalihoğlu, İ., & Alsaran, A. (2013). Tribocorrosion behavior of duplex treated pure titanium in simulated body fluid. *Wear*, 302(1-2), 1642-1648.
- Aldabergenova, S. B., Ghicov, A., Albu, S., Macak, J. M., & Schmuki, P. (2008). Smooth titania nanotubes: Self-organization and stabilization of anatase phase. *Journal of non-crystalline solids*, 354(19-25), 2190-2194.
- Almeida, G. F., Couto, A. A., Reis, D. A., Massi, M., da Silva Sobrinho, A. S., & De Lima, N. B. (2018). Effect of plasma nitriding on the creep and tensile properties of the Ti6Al4V alloy. *Metals*, 8(8), 618.
- Atmani, D., Saoula, N., Abdi, A., Azzaz, M., Wang, Y., & Mohamedi, M. (2018). Structural, morphological, and electrochemical corrosion properties of TiO₂ formed on Ti6Al4V alloys by anodization. *Crystal Research and Technology*, 53(12), 1800138.
- Barrois, W. (1979). Repeated plastic deformation as a cause of mechanical surface damage in fatigue, wear, fretting-fatigue, and rolling fatigue: A review. *International Journal of Fatigue*, 1(4), 167-189.
- Batchelor, A. W., Stachowiak, G. W., & Cameron, A. (1986). The relationship between oxide films and the wear of steels. *Wear*, 113(2), 203-223.
- Bayrak, Ö., & Asl, H. G. Anodizasyon ve Elektriksel Boşalma Plazma Oksidasyon Yüzey İşlemlerinin Ti6Al4V Alaşımının Aşınma Direncine Etkisi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(1), 189-201.
- Bilici, E. (2012). 1-Aminoindanın camsı karbon (GC) elektrot yüzeyinde elektrokimyasal yükseltgenmesiyle bir yeni elektrodun hazırlanması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Bloyce, A., Morton, PH ve Bell, T. (1994). Titanyum ve titanyum alaşımlarının yüzey mühendisliği. *ASM el kitabı*, 5, 2232-2233.
- Boettcher, C., Bell, T., & Dong, H. (2002). Surface engineering of timet 550 with oxygen to form a rutile-based, wear-resistant coating. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(4), 1201-1211.
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "titanium". *Encyclopedia Britannica*, 22 Oct. 2021
- Brown, S.A., and Lemons, J.E.,1996. Medical applications of Titanium and Its Alloys
- Brunette, D. M., Tengvall, P., Textor, M., & Thomsen, P. (2001). Titanium in medicine: material science, surface science, engineering, biological responses and medical applications. Berlin: Springer.
- Burwell Jr, J. T. (1957). Survey of possible wear mechanisms. *Wear*, 1(2), 119-141.

- Cabral Miramontes, J., Gaona Tiburcio, C., Velasco Tellez, A., Poblano Salas, C., & Almeraya Calderón, F. (2016). Wear resistance of thermal spray WC-Co-VC nanostructured coatings.
- Campbell Jr, F. C. (2011). Manufacturing technology for aerospace structural materials. Elsevier.
- Cheraghali, B., Ghasemi, H. M., Abedini, M., & Yazdi, R. (2020). A functionalized duplex coating on CP-titanium for biomedical applications. *Surface and Coatings Technology*, 399, 126117.
- Classification, Properties and Applications of titanium and its alloys used in aerospace, automotive, biomedical and marine industry- A Review Sani A. Salihu, Y.I. Suleiman, A. I. Eyinavi, Abdullahi Usman Volume 4, Issue 3 (May-June) 2019), PP. 23-36
- Cox, J. D., Wagman, D. D., Medvedev, V. A., & Wagman, D. P. (Eds.). (1989). CODATA key values for thermodynamics. Hemisphere Pub.
- Davis, J. R. (Ed.). (2000). Corrosion: Understanding the basics. Asm International.
- Diamanti, M. V., & Pedferri, M. P. (2007). Effect of anodic oxidation parameters on the titanium oxides formation. *Corrosion Science*, 49(2), 939-948.
- Donachie, M. J. (2000). Titanium: a technical guide. ASM international.
- Duanjie, L., 2010. Microstructure and corrosion and tribocorrosion behaviors of sibase and tibase aerospace coatings produced by pecvd. PDuanjie Li,hd Thesis. McGill University.
- Dwivedi, D. K. (2010). Adhesive wear behaviour of cast aluminium–silicon alloys: Overview. *Materials & Design* (1980-2015), 31(5), 2517-2531.
- Ezugwu, E. O., & Wang, Z. M. (1997). Titanium alloys and their machinability—a review. *Journal of materials processing technology*, 68(3), 262-274.
- Freese, H. L., Volas, M. G., & Wood, J. R. (2001). Metallurgy and technological properties of titanium and titanium alloys. In *Titanium in Medicine* (pp. 25-51). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gopal, J., George, R. P., Muraleedharan, P., Kalavathi, S., Mangamma, G., & Khatak, H. S. (2007). Heat treated anodised titanium surfaces showing enhanced photocatalytic inhibition of microbial fouling. *Surface engineering*, 23(3), 194-200.
- Hacısalıhoğlu, İ., Kaya, G., Ergüder, TO, Mandev, E., Manay, E. ve Yıldız, F. (2021). Plazma nitrülenmiş Ti45Nb alaşımının tribolojik ve termal özellikleri. *Yüzeyler ve Arayüzler*, 22, 100893.
- Hanaor, D. A., & Sorrell, C. C. (2011). Review of the anatase to rutile phase transformation. *Journal of Materials science*, 46(4), 855-874.
- Hokkirigawa, K., & Kato, K. (1988). An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. *Tribology international*, 21(1), 51-57.
- Hong, H. S. (2002). The role of atmospheres and lubricants in the oxidative wear of metals. *Tribology International*, 35(11), 725-729.
- Instruments, G. (2007). Basics of electrochemical impedance spectroscopy. G. Instruments, Complex impedance in Corrosion, 1-30.

- Jang, N. S., Kim, M. S., Kim, S. H., Lee, S. K., & Kim, J. M. (2014). Direct growth of titania nanotubes on plastic substrates and their application to flexible gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 199, 361-368.
- Jordanovová, V., Losertová, M., Štencek, M., Lukášová, T., Simha Martynková, G., & Peikertová, P. (2020). Microstructure and properties of nanostructured coating on Ti6Al4V. *Materials*, 13(3), 708.
- Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and the Australian Society for Biomaterials*, 40(2), 324-335.
- Kaur, M., & Singh, K. (2019). Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications. *Materials Science and Engineering: C*, 102, 844-862.
- Kováříková, I., Szewczyková, B., Blaškoviš, P., Hodúlová, E., & Lechovič, E. (2009). Study and characteristic of abrasive wear mechanisms. *Materials Science and Technology*, 1, 1-8.
- Kumar, S., Narayanan, T. S., Raman, S. G. S., & Seshadri, S. K. (2010). Surface modification of CP-Ti to improve the fretting-corrosion resistance: Thermal oxidation vs. anodizing. *Materials Science and Engineering: C*, 30(6), 921-927.
- Kuromoto, N. K., Simão, R. A., & Soares, G. A. (2007). Titanium oxide films produced on commercially pure titanium by anodic oxidation with different voltages. *Materials Characterization*, 58(2), 114-121.
- Kurt, A. (2020). Anodic oxidation of cefaclor antibiotic in aqueous solution containing potassium chloride. *Global NEST Journal*, 22, 438-445.
- Lario, J., Viera, M., Vicente, A., Igual, A., & Amigo, V. (2019). Corrosion behaviour of Ti6Al4V ELI nanotubes for biomedical applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 5548-5556.
- Lausmaa, J. (1996). Surface spectroscopic characterization of titanium implant materials. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 81(3), 343-361.
- Leyens, C. ve Peters, M. (Eds.). (2003). *Titanyum ve titanyum alaşımları: temeller ve uygulamalar*. John Wiley & Sons.
- LIU, Y., YANG, D., HE, S., & YE, Z. (2006). DRY SLIDING WEAR OF Ti6Al4V ALLOY AT LOW TEMPERATURE IN VACUUM. In *Protection of Materials and Structures from the Space Environment* (pp. 309-316). Springer, Dordrecht.
- Li, Y., Wang, X., Yang, S., Hou, L., Wei, Y., Zhang, Z., & Yang, X. (2019). Investigation on Wear Behavior of Cryogenically Treated Ti6Al4V Titanium Alloy under Dry and Wet Conditions. *Materials*, 12(18), 2850.
- Liu, X., Chu, P. K., & Ding, C. (2004). Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 47(3-4), 49-121.
- Liu, Z., & Thompson, G. E. (2015). Formation of porous anodic oxide film on titanium in phosphoric acid electrolyte. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(1), 59-66.
- Long, M., & Rack, H. J. (1998). Titanium alloys in total joint replacement—a materials science perspective. *Biomaterials*, 19(18), 1621-1639.
- Lütjering, G. ve Williams, JC (2007). *Titanyum*. Springer Science & Business Media.

- Matthews, A., Franklin, S., & Holmberg, K. (2007). Tribological coatings: contact mechanisms and selection. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(18), 5463.
- Matykina, E., Hernandez-López, J. M., Conde, A., Domingo, C., De Damborenea, J. J., & Arenas, M. A. (2011). Morphologies of nanostructured TiO₂ doped with F on Ti-6Al-4V alloy. *Electrochimica Acta*, 56(5), 2221-2229.
- Mazzarolo, A., Curioni, M., Vicenzo, A., Skeldon, P., & Thompson, G. E. (2012). Anodic growth of titanium oxide: electrochemical behaviour and morphological evolution. *Electrochimica Acta*, 75, 288-295.
- Moore, M. A. (1974). A review of two-body abrasive wear. *Wear*, 27(1), 1-17.
- Mughrabi, H. (2013). Microstructural fatigue mechanisms: Cyclic slip irreversibility, crack initiation, non-linear elastic damage analysis. *International Journal of Fatigue*, 57, 2-8.
- Narayanan, R., & Seshadri, S. K. (2007). Phosphoric acid anodization of Ti-6Al-4V-Structural and corrosion aspects. *Corrosion Science*, 49(2), 542-558.
- Nourbakhsh, F., Rajurkar, K. P., Malshe, A. P., & Cao, J. (2013). Wire electro-discharge machining of titanium alloy. *Procedia CirP*, 5, 13-18.
- Oshida, Y. (2010). *Bioscience and bioengineering of titanium materials*. Elsevier.
- Padilla, H. A., & Boyce, B. L. (2010). A review of fatigue behavior in nanocrystalline metals. *Experimental mechanics*, 50(1), 5-23.
- Park, J. B., Bronzino, J. D. 2002. *Biomaterials: Principle and applications*.
- Rautray, T. R., Narayanan, R., Kwon, T. Y., & Kim, K. H. (2010). Surface modification of titanium and titanium alloys by ion implantation. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 93(2), 581-591.
- Safiuddin, M. (2006). Occurrences of corrosion: causes and prevention.
- Sangid, M. D. (2013). The physics of fatigue crack initiation. *International journal of fatigue*, 57, 58-72.
- Sani A. Salihu" Classification, Properties and Applications of titanium and its alloys used in automotive industry- A Review" *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 8, no. 8, 2019, pp. 92-98
- Sarma, J., Kumar, R., Sahoo, AK ve Panda, A. (2020). Titanyum alaşımlarının malzeme özelliklerinin ısıtılma işlemi yoluyla iyileştirilmesi: Kısa bir inceleme. *Günümüz Malzemeleri: Bildiriler*, 23, 561-564.
- Schmidt, M., Schneider, R., & Wagner, H. E. (2013). Nonthermal plasma chemistry and physics (p. 346). J. Meichsner (Ed.). Boca Raton, FL: CRC press.
- Sefer, B. (2014). Oxidation and alpha-case phenomena in titanium alloys used in aerospace industry: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo and Ti-6Al-4V (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).
- Sharma, A. K. (1992). Anodizing titanium for space applications. *Thin solid films*, 208(1), 48-54.
- Sibert, M. E. (1963). Electrochemical oxidation of titanium surfaces. *Journal of the Electrochemical society*, 110(1), 65.
- Smith, F., Brownlie, F., Hodgkiess, T., Toumpis, A., Pearson, A., & Galloway, A. M. (2020). Effect of salinity on the corrosive wear behaviour of engineering steels in aqueous solutions. *Wear*, 462, 203515.

- Song, H. J., Kim, M. K., Jung, G. C., Vang, M. S., & Park, Y. J. (2007). The effects of spark anodizing treatment of pure titanium metals and titanium alloys on corrosion characteristics. *Surface and Coatings Technology*, 201(21), 8738-8745.
- Sul, Y. T., Johansson, C. B., Jeong, Y., & Albrektsson, T. (2001). The electrochemical oxide growth behaviour on titanium in acid and alkaline electrolytes. *Medical engineering & physics*, 23(5), 329-346.
- Tasdemir, M., & Alsaran, A. (2020). Tribocorrosion behaviour of porous anatase and rutile phases formed on surface of anodised Ti45Nb alloy. *Lubrication Science*, 32(4), 192-201.
- Tasdemir, M., Senaslan, F., & Celik, A. Ti45Nb Alaşımının Aşınma Davranışına Anodizasyon Potansiyelinin Etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 395-403.
- Velten, D., Biehl, V., Aubertin, F., Valeske, B., Possart, W., & Breme, J. (2002). Preparation of TiO₂ layers on cp-Ti and Ti6Al4V by thermal and anodic oxidation and by sol-gel coating techniques and their characterization. *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials and The Japanese Society for Biomaterials*, 59(1), 18-28.
- Vera, M. L., Rosenberger, M. R., Schvezov, C. E., & Ares, A. E. (2015). Wear resistance of anodic titanium dioxide films produced on Ti6Al4V Alloy. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 5, 6.
- Weissmann, M., & Errico, L. A. (2007). The role of vacancies, impurities and crystal structure in the magnetic properties of TiO₂. *Physica B: Condensed Matter*, 398(2), 179-183.
- Wong, W., Irissou, E., Ryabinin, A. N., Legoux, J. G., & Yue, S. (2011). Influence of helium and nitrogen gases on the properties of cold gas dynamic sprayed pure titanium coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 20(1), 213-226.
- Wu, S. X., Wang, S. R., Liu, W. T., Yu, X. C., & Chang, Z. Q. (2019, April). Preparation and characterization of TiO₂ nanotubes antimicrobial coating of iodine-supported titanium implants. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 504, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- Yadav, P., & Saxena, K. K. (2020). Effect of heat-treatment on microstructure and mechanical properties of Ti alloys: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2546-2557.
- Yang, B., Uchida, M., Kim, H. M., Zhang, X., & Kokubo, T. (2004). Preparation of bioactive titanium metal via anodic oxidation treatment. *Biomaterials*, 25(6), 1003-1010.
- Yao, J. J., Lewallen, E. A., Trousdale, W. H., Xu, W., Thaler, R., Salib, C. G., ... & Van Wijnen, A. J. (2017). Local cellular responses to titanium dioxide from orthopedic implants. *BioResearch open access*, 6(1), 94-103.
- Yetim, A. F. (2010). Investigation of wear behavior of titanium oxide films, produced by anodic oxidation, on commercially pure titanium in vacuum conditions. *Surface and Coatings Technology*, 205(6), 1757-1763.
- Zhecheva, A., Sha, W., Malinov, S. ve Long, A. (2005). Nitrüleme ve diğ er yüzey mühendisliğı yöntemleriyle titanyum alaşımlarının mikroyapısını ve özelliklerini geliştirmek. *Yüzey ve Kaplama teknolojisi*, 200 (7), 2192-2207.
- Zorn, G., Lesman, A., & Gotman, I. (2006). Oxide formation on low modulus Ti45Nb alloy by anodic versus thermal oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 201(3-4), 612-618.

Zwilling, V., Aucouturier, M., & Darque-Ceretti, E. (1999). Anodic oxidation of titanium and TA6V alloy in chromic media. An electrochemical approach. *Electrochimica Acta*, 45(6), 921-929.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Kubilay ŞENEL
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Mecidiye Anadolu Lisesi (2007-2011)
Lisans:	Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği (2014-2018)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi Mekanik Ana Bilim Dalı (2019)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Erzurum Makine Mühendisleri Odası	