

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ti6Al4V ALAŞIMININ SERT NİKEL ALAŞIM TOZLARI İLE**  
**KAPLANMASI VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN**  
**GELİŞTİRİLMESİ**

**OSMAN ÇAVUŞOĞLU**

**KOCAELİ 2020**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ti6Al4V ALAŞIMININ SERT NİKEL ALAŞIM TOZLARI İLE**  
**KAPLANMASI VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN**  
**GELİŞTİRİLMESİ**

**OSMAN ÇAVUŞOĞLU**

**Doç.Dr. Ridvan YAMANOĞLU**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**  
**Prof.Dr. Erol FEYZULLAHOĞLU**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**  
**Doç.Dr. Mustafa TÜRKMEN**  
**Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniversitesi**



**Tezin Savunulduğu Tarih: 28.01.2020**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması Ti6Al4V alaşımının aşınma özelliklerinin sert nikel alaşım tozları ile kaplanarak geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 2018/158.

Kendi araştırma projesi fikrinin bir bölümünü yüksek lisans tez konusu olarak çalışmama izin veren ve çalışmalarımda desteğini, tecrübelerini ve sabrını hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmalarımaya yön veren ve bana her zaman güvenen danışmanım Doç. Dr. Rıdvan Yamanoglu'na sonsuz teşekkürleri borç bilirim.

Tez çalışmalarının bir kısmı Kocaeli Üniversitesi Ford Otosan İhsaniye Otomotiv Meslek Yüksek Okulu Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, desteklerinden dolayı Doç. Dr. Egemen Avcu'ya ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmalarımda teknik anlamda desteklerinden dolayı Sayın Okan Yetik'e ve Sayın Can Duran'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım için gerekli desteği her zaman veren Güçsan Plastik'te bağlı olarak çalıştığım Planlama ve Lojistik Müdürü Serkan Çağlayan'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm öğrenim hayatım boyunca beni eğitimim için sürekli olarak destekleyen, her zaman arkamda durarak bana cesaret veren annem Gülseren Çavuşoğlu, babam Erdoğan Çavuşoğlu, kardeşim Ayşegül Çavuşoğlu ve tez çalışmalarım süresince desteğini hiç esirgemeyen eşim Duygu Çavuşoğlu'na teşekkür ederim.

Değerli arkadaşım İhsan Harun Önel'e desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Ocak - 2020

Osman ÇAVUŞOĞLU

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
GİRİŞ .....	1
1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ.....	2
1.1. Titanyumun Genel Yapısı .....	2
1.2. Titanyum Alaşımaları ve İşlenebilirlik Özellikleri .....	4
1.3. Titanyum Alaşımalarının Sınıflandırılması .....	6
1.3.1.Saf titanyum (CP-Ti).....	6
1.3.2.α Titanyum alaşımaları .....	7
1.3.3.α-Yakın titanyum alaşımaları .....	9
1.3.4.α+β Titanyum alaşımaları .....	11
1.3.5.β Titanyum alaşımaları .....	12
1.4. Titanyum ve Titanyum Alaşımalarının Kullanım Alanları .....	13
1.4.1.Havacılık uygulamaları .....	14
1.4.2.Biyomedikal uygulamaları.....	16
1.4.3.Otomotiv uygulamaları .....	17
1.5. Titanyum ve Alaşımalarının Yüzey Özellikleri .....	17
2. AŞINMA .....	21
2.1. Aşınma Mekanizmaları .....	21
2.1.1.Adhezif aşınma .....	21
2.1.2.Abrazif aşınma .....	23
2.1.3.Yorulma aşınması .....	24
2.1.4.Oksidasyon aşınması.....	25
2.1.5.Korozyon aşınması.....	26
2.1.6.Erozyon aşınması .....	26
2.2. Aşınmanın Azaltılması İçin Gerekli Önlemler.....	27
3. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN KAPLAMA İLE İYİLEŞTİRİLMESİ.....	29
3.1. Elektrokimyasal Yüzey İşlemleri .....	31
3.1.1.Anodizasyon .....	31
3.2. Difüzyonlu Yüzey İşlemleri .....	33
3.2.1.Termal oksidasyon yüzey işlemi.....	34
3.2.2.Nitrürleme ile yüzey işlemi.....	35
3.3. Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) Yüzey İşlemi .....	35
3.3.1.Buharlaştırma.....	36
3.3.2.Sıçratma .....	36
3.4. Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB) Yüzey İşlemi .....	37
3.5. Titanyum Nitrür Kaplama .....	37

3.6. Titanyum ve Alaşımlarının Nikel ile Kaplanması.....	38
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	40
4.1. Sıcak Pres ile Numunelerin Üretimi.....	42
4.2. Sıcak Pres ile Üretilen Numunelerin Hazırlanması.....	45
4.3. Numunelerin Yoğunluklarının Saptanması.....	46
4.4. Numunelerin Sertlik Testleri.....	47
4.5. Kuru sürtünme aşınma testleri.....	47
4.6. Mikroyapısal Karakterizasyon.....	48
4.7. Eroziyon Aşınma Testleri.....	49
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	52
5.1. Sıcak Pres ile Üretilen Numunelerin İncelemeleri.....	53
5.2. Sıcak Pres ile Üretilen Numunelerin Sertlik Değerlerinin İncelenmesi.....	61
5.3. Ti6Al4V Üzerine Sert Nikel Alaşım Kaplanmış Numunelerin Kuru Sürtünme Aşınma Test Sonuçları.....	63
5.4. Ti6Al4V Üzerine Sert Nikel Alaşım Kaplanmış Numunelerin Eroziyon Aşınma Test Sonuçları.....	69
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
KAYNAKLAR.....	92
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	99
ÖZGEÇMİŞ.....	100

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	(a) $\beta$ kararlaştırıcı elementi ile ikili alaşım faz diyagramı, (b) $\alpha+\beta$ kararlaştırıcı alaşımın üç boyutlu diyagramı, (c) Ti-V faz diyagramı ve (d) Ti-6Al-xV'un yapay faz diyagramı. ....	8
Şekil 1.2.	Ti6Al4V alaşımının a) 1050°C c) 800°C e) 650°C'den yavaş soğutma sonucunda, b) 1050°C d) 800°C f) 650°C'den hızlı soğutma sonucunda oluşan mikroyapı görüntüleri. ....	11
Şekil 1.3.	Titanyum alaşımlarının ticari uçaklardaki kullanım yüzdesinin yıllara göre değişimi. ....	15
Şekil 1.4.	Ti6Al4V alaşımının WC aşındırıcıya karşı gösterdiği sürtünme katsayısı ....	18
Şekil 1.5.	Sürtünme katsayısı ve d-band karakteri arasındaki ilişki. ....	19
Şekil 2.1.	Adhezif aşınmanın şematik olarak gösterimi. ....	22
Şekil 2.2.	İki ve üç elemanlı abrazif aşınmanın şematik gösterimi. ....	24
Şekil 2.3.	Yorulma aşınmasının şematik gösterimi. ....	25
Şekil 2.4.	Erozif aşınmanın şematik gösterimi. ....	27
Şekil 3.1.	Anodizasyon düzeneği ve elemanları. ....	32
Şekil 3.2.	a) Difüzyon ile yüzey işlemi uygulanmış birleşik tabakaların şematik gösterimi b) Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) yöntemiyle kaplanmış sert kaplama. ....	34
Şekil 3.3.	Buharın oluşturulma yöntemine göre FBB yüzey işlemleri ....	36
Şekil 4.1.	Tez kapsamında takip edilen sürecin şematik gösterimi ....	40
Şekil 4.2.	Tez kapsamında kullanılan Ti6Al4V alaşım tozlarının SEM görüntüleri, a) düşük büyütme (100X), b) yüksek büyütme (250X). ....	41
Şekil 4.3.	Tez kapsamında kullanılan nikel tozlarının SEM görüntüleri, a) düşük büyütme (100X), b) yüksek büyütme (250X). ....	42
Şekil 4.4.	Diex marka sıcak pres cihazı. ....	43
Şekil 4.5.	a) Sinterleme öncesi grafit kalıbın sıcak pres içindeki görüntüsü b) Sinterleme esnasında yüksek sıcaklıkta grafit kalıbın görüntüsü. ....	44
Şekil 4.6.	Ti6Al4V altık ve sert nikel alaşımının kalıp içinde gösterimi. ....	44
Şekil 4.7.	Sıcak presle üretim ve kaplama prosesi çevrimi. ....	45
Şekil 4.8.	Çalışmada kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı. ....	46
Şekil 4.9.	Çalışmada kullanılan AND marka GR-200 model hassas terazi ....	46
Şekil 4.10.	Çalışmada kullanılan vickers sertlik ölçüm cihazı. ....	47
Şekil 4.11.	Kuru sürtünme aşınma testinin şematik gösterimi. ....	48
Şekil 4.12.	JEOL JSM-6060 marka taramalı elektron mikroskobu. ....	48
Şekil 4.13.	Erozif aşınma test düzeneği. ....	50
Şekil 4.14.	60 mesh partikül boyutunda aşındırıcı beyaz alüminyum oksitlerin 50X büyütmede alınan SEM görüntüleri. ....	50

Şekil 4.15.	Çalışmada kullanılan Shimadzu ATX 224 Model 220 g kapasiteli hassas terazi. ....	51
Şekil 5.1.	Numunelere uygulanan testlerin incelenme basamakları. ....	52
Şekil 5.2.	Sıcak pres ile üretilen numunenin görüntüsü. ....	53
Şekil 5.3.	Sıcak pres ile üretilen numunenin kesiti alınarak incelenen SEM görüntüsü. ....	53
Şekil 5.4.	Ti6Al4V altlık ve nikel kaplama bölgesinde gözeneklerin SEM görüntüsü. ....	54
Şekil 5.5.	Arayüzeyin SEM görüntüleri, a) 50X ve b) 250X. ....	55
Şekil 5.6.	Ti6Al4V ile nikel alaşımı arasındaki arayüzeyin SEM görüntüsü ve arayüzeyde farklı noktalardan alınan EDX analizi sonuçları. ....	58
Şekil 5.7.	Sıcak pres ile üretim sonrası nikel tabakası (a) ve titanyum altlığın (b) SEM görüntüleri. ....	59
Şekil 5.8.	Nikel yüzeyinden alınan SEM görüntüsü ve seçilen farklı noktaların EDX analiz sonuçları. ....	60
Şekil 5.9.	Ti6Al4V alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu. ....	61
Şekil 5.10.	a) Kaplama sonrası, nikel yüzeyi, Ti6Al4V alaşımı ve arayüzeyin parlatılmış konumda optik mikroskop görüntüsü, b) Bu bölgelerden alınan sertlik değerleri. ....	62
Şekil 5.11.	(a) Ti6Al4V altlık ve (b) kaplama malzemesi Ni alaşımı için dönme hızı ile aşınma oranı arasındaki ilişki. ....	64
Şekil 5.12.	Karşılaştırma amaçlı Ti6Al4V alaşımı ile nikel kaplama malzemesinin aşınma oranlarının aynı diyagramda gösterimi. ....	64
Şekil 5.13.	a) Ti6Al4V yüzeyi b) Ni esaslı kaplama yüzeyinin aşınma izlerinin karşılaştırılması. ....	65
Şekil 5.14.	Ti6Al4V alaşımının farklı devir sayılarında aşınma yüzeyleri, a ve b) düşük ve yüksek büyütmede 150 rpm devir sayısı için, c ve d) düşük ve yüksek büyütmede 250 rpm devir sayısı için aşınma izlerinin SEM görüntüleri. ....	66
Şekil 5.15.	Sert nikel alaşımının farklı devir sayılarında aşınma yüzeyleri, a ve b) düşük ve yüksek büyütmede 150 rpm devir sayısı için, c ve d) düşük ve yüksek büyütmede 250 rpm devir sayısı için aşınma izlerinin SEM görüntüleri. ....	67
Şekil 5.16.	Nikel kaplama malzemesinin aşınma testi sonrasında yüzeyinin SEM görüntüsü ve farklı noktalardan alınan EDX analizi sonuçları. ....	68
Şekil 5.17.	Ti6Al4V ve Sert Nikel Alaşım yüzeylerin farklı açılardaki malzeme kayıpları. ....	69
Şekil 5.18.	Ti6Al4V ve Sert Nikel Alaşım yüzeylerin farklı açılardaki erozif aşınma oranları. ....	70
Şekil 5.19.	Sert Nikel Alaşım yüzeyinin farklı açılardaki erozif aşınma oranları. ....	70
Şekil 5.20.	Ti6Al4V yüzeyinin 30° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri. ....	72

Şekil 5.21.	Ti6Al4V yüzeyinin 30° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri. ....	73
Şekil 5.22.	Ti6Al4V yüzeyinin 30° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi. ....	73
Şekil 5.23.	Ti6Al4V yüzeyinin 45° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.....	74
Şekil 5.24.	Ti6Al4V yüzeyinin 45° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri. ....	74
Şekil 5.25.	Ti6Al4V yüzeyinin 45° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi. ....	75
Şekil 5.26.	Ti6Al4V yüzeyinin 60° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.....	75
Şekil 5.27.	Ti6Al4V yüzeyinin 60° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri. ....	76
Şekil 5.28.	Ti6Al4V yüzeyinin 60° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi. ....	77
Şekil 5.29.	Ti6Al4V yüzeyinin 60° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi. ....	77
Şekil 5.30.	Ti6Al4V yüzeyinin 75° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.....	78
Şekil 5.31.	Ti6Al4V yüzeyinin 75° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri. ....	78
Şekil 5.32.	Ti6Al4V yüzeyinin 75° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi. ....	79
Şekil 5.33.	Ti6Al4V yüzeyinin 90° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.....	79
Şekil 5.34.	Ti6Al4V yüzeyinin 90° açılı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri. ....	80



Şekil 5.35.	Ti6Al4V yüzeyinin 90° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi. ....	81
Şekil 5.36.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 30° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.....	81
Şekil 5.37.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 30° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri. ....	82
Şekil 5.38.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 30° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi. ....	82
Şekil 5.39.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 45° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.....	83
Şekil 5.40.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 45° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri. ....	83
Şekil 5.41.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 45° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi. ....	84
Şekil 5.42.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.....	84
Şekil 5.43.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri. ....	85
Şekil 5.44.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış SEM görüntüsü.....	85
Şekil 5.45.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi. ....	86
Şekil 5.46.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi. ....	86
Şekil 5.47.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 75° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.....	87
Şekil 5.48.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 75° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri. ....	87
Şekil 5.49.	Sert nikel alaşım yüzeyinin 90° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.....	88

Şekil 5.50. Sert nikel alaşım yüzeyinin 90° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri..... 88



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Titanyumun fiziksel özellikleri.....	2
Tablo 1.2.	Titanyumun bazı özelliklerinin diğer metallerle karşılaştırması. ....	3
Tablo 1.3.	Çeşitli malzemelerin işlenebilirlik oranları. ....	5
Tablo 1.4.	Ticari saflıkta olan titanyumların genel özellikleri.....	7
Tablo 1.5.	Bazı $\alpha$ -yakın titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri.....	10
Tablo 1.6.	Bazı $\beta$ titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri.....	13
Tablo 1.7.	Bazı savaş uçaklarının yapısında kullanılan malzemeler ve ağırlıkça yüzdeleri.....	16
Tablo 3.1.	Titanyum ve alaşımlarına uygulanabilen bazı yüzey işlemleri.....	30
Tablo 3.2.	Titanyum ve alaşımlarının yüzeylerine farklı işlemlerle oluşturulan anodizasyon filmleri ve bazı özellikleri.....	33
Tablo 3.3.	Kaplama işlemleri ve elde edilen sonuçlar. ....	39
Tablo 5.1.	Nikel plakanın partikül çarpma açlarına göre erozyon oranları. ....	71

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

cm	:Santimetre
dak	:Dakika
g	:Gram
HV	:Vickers Sertlik
J	:Joule
kg	:Kilogram
Kgf	:Kilogram Kuvvet
m	:Metre
ml	:Mililitre
nm	:Nanometre
MPa	:Megapascal
Pa	:Pascal
s	:Saniye
W	:Watt
°C	:Santigrat Derece
µm	:Mikrometre

### Kısaltmalar

CP	:Commercially Pure (Ticari Saflıkta)
EDS	:Enerji Dağılım Spektrometresi
HMK	:Hacim Merkez Kübik
SEM	:Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SPH	:Sıkı Paket Hegzagonal
YMK	:Yüzey Merkez Kübik

## **Ti6Al4V ALAŞIMININ SERT NİKEL ALAŞIM TOZLARI İLE KAPLANMASI VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

### **ÖZET**

Saf titanyum ve titanyum alaşımları düşük yoğunlukları, yüksek dayanımları, üstün korozyon direnci ve biyouyumluluk davranışları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda her geçen gün daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Bu kullanım alanları için en dikkat çekenleri havacılık, otomotiv, savunma, kimya ve biyomedikal sektörlerdir. Titanyum esaslı malzemelerin birçok avantajına rağmen daha fazla endüstriyel uygulamada kullanımını sınırlayan en zayıf özelliği aşınma davranışlarının yetersiz olmasıdır. Bu tez çalışması kapsamında da bu doğrultuda titanyum esaslı malzemelerin aşınma özelliklerini geliştirmeye yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonrasında aşınma özellikleri çok etkili bir şekilde geliştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında yüksek sertliğe sahip nikel alaşım tozları Ti6Al4V alaşımı üzerine vakum altında kaplanmıştır. Kaplama işlemi ile tozların yoğunlaştırma işlemi eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. İşlem sonrasında ilk olarak yoğunluklar ölçülmüş, ardından numuneler metalografik olarak hazırlanarak kaplama ile altlık arasındaki ara yüzey optik ve taramalı elektron mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen numunelerin özelliklerinin belirlenmesi için sertlik testi, oda sıcaklığında kuru sürtünme aşınma testleri ve erozif aşınma testi uygulanmıştır. Yapılan nikel kaplama ile üretilen malzemenin sertliği artmış ve aşınma özelliklerinde önemli bir gelişme elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Aşınma, Kaplama, Sert Nikel Alaşım Tozları, Ti6Al4V, Toz Metalurjisi.

## **COATING OF Ti6Al4V ALLOYS BY HARD NICKEL ALLOY POWDERS AND IMPROVING ITS WEAR PROPERTIES**

### **ABSTRACT**

Use of pure titanium and titanium alloys in industrial applications is gaining much popularity due to their low density, superior corrosion resistance and biocompatibility behaviors. The aviation, automotive, defense, chemistry and biomedical sectors are the most remarkable ones among these application areas. Regardless of the many advantages of titanium based materials, their use in other industrial fields is limited by their insufficient wear properties. This thesis responds to this issue by developing a way to improve the wear properties of titanium based materials. The experiments have shown that the wear properties can be significantly improved.

In this research, nickel alloy powders that have high hardness are coated on the Ti6Al4V alloy under vacuum atmosphere. The coating process and the sintering of the powders are conducted simultaneously. After the process, firstly, the initial densities are measured and then the samples are prepared metallographically. The interface between the coating and the substrate is measured using optical and scanning microscope. In order to determine the properties of the samples, hardness test, dry sliding friction wear tests and erosive wear test are conducted. It is found that the hardness of the material increased with the nickel alloy coating and a significant improvement on the wear properties was obtained.

**Keywords:** Wear, Coating, Hard Nickel-Based Alloy Powders, Ti6Al4V, Powder Metallurgy.

## GİRİŞ

Titanyum ve alaşımları ilk kez 1952 yılında ticari amaçlarla üretilmeye başlanmış ve geniş kullanım alanı bulmuştur. Titanyum esaslı malzemeler yüksek dayanım, yaklaşık 550°C'ye kadar yüksek sıcaklık özellikleri, düşük yoğunluk, biyouyumluluk, ve yüksek korozyon direnci nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmektedirler. Yüksek dayanım ve düşük yoğunluk sayesinde havacılık ve otomotiv sektöründe, mükemmel korozyon direnci nedeniyle, kimya ve gıda endüstrisinde, biyouyumluluk özellikleri nedeniyle de medikal malzemelerde kullanım alanı bulmaktadırlar.

Bahsedilen avantajlarına rağmen birçok uygulamada özellikle de havacılık ve savunma sektörlerinde zayıf tribolojik özellikleri nedeniyle kullanımları kısıtlı olmaktadır. Bu nedenle, özellikle son yıllarda, tribolojik (aşınma, yağlama, sürtünme) tasarım çalışmaları yoğunlaşmıştır. Titanyum esaslı malzemelerin aşınma özelliklerinin geliştirilmesine yönelik birçok teknik geliştirilmesine rağmen istenen performansa sahip bir süreç henüz ortaya konamamış ve bu alanda çabalar her geçen gün artış göstermiştir.

Titanyum ve alaşımlarının özelliklerinin geliştirilmesi üretim yöntemleri ile de oldukça ilişkilidir. Şekillendirme kabiliyetinin zor ve maliyetli olması da kullanım alanını kısıtlayan ana etkenlerdir. Bu nedenle gerek özelliklerin geliştirilmesi gerekse de bu özellik gelişimlerinin üretim yöntemi ile ilişkili olarak tasarlanması oldukça önemli ve birbirinden ayrı düşünülmeyecek kadar kritik önem taşımaktadır. Bu tez kapsamında, titanyum ve alaşımlarının yukarıda bahsedilen zayıf aşınma özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Aşınma özellikleri titanyum esaslı malzemelerin yüzeyinde sert bir nikel tabakası oluşturularak geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda üretim yöntemi olarak, yine yukarıda şekillendirebilirlik açısından zorlukları aşmak amacıyla toz metalurjik prosesler tercih edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde aşınma özelliklerinde önemli sonuçlar elde edilmiş ve tüm sonuçlar literatür ile destekli olarak tartışılmıştır.

## 1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

### 1.1. Titanyumun Genel Yapısı

Atom numarası 22, atomik ağırlığı ise 47,9 g/mol olan titanyum bir geçiş elementidir ve periyodik tablonun dördüncü grubunda yer alır. Oldukça hafif bir metal olan titanyumun 25°C'deki yoğunluğu 4,5 g/cm<sup>3</sup> 'tür [1].

Gezegelimiz haricinde Titanyum elementinin ay, yıldızlar ve meteorlarda da mevcut olduğu araştırmalar sonucunda bulunmuştur. Magnezyum, demir ve alüminyumdan sonra en yaygın bulunan element olan Titanyum %0,6 civarında bir oran ile yer kabuğunda yer almaktadır [2]. Titanyumun önemli fiziksel özellikleri Tablo 1.1'de verilmiştir [3].

Tablo 1.1. Titanyumun fiziksel özellikleri.

Element Adı	Sembol	Atom Numarası	Atom Ağırlığı (g/mol)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Ergime Noktası (°C)
Titanyum	Ti	22	47,9	4,5	1668

Endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanım alanı bulan hafif metaller (Al ve Mg) ile ağır metaller (Fe, Ni, Co, Cu) arasında bir yoğunluk değerine sahip olması, yüksek dayanım ile beraberinde üstün spesifik mukavemeti ortaya çıkarmaktadır.

Titanyumun atomik yapısı 1s<sup>2</sup>, 2s<sup>2</sup>, 2p<sup>6</sup>, 3s<sup>2</sup>,3p<sup>6</sup>, 3d<sup>2</sup>, 4s<sup>2</sup> şeklindedir. En dışta bulunan ve hafifçe tutunan 3d<sup>2</sup> ve 4s<sup>2</sup> elektronları, son derece reaktif ve hızlı şekilde kuvvetli oksit oluştururlar. Bu oksit tabaka, titanyumun biyoyumluluğunu sağlar. Kalan elektronlar ise oldukça stabil ve sıkı bağlanırlar. Oluşan oksit tabakaları oldukça karmaşıktır. Bu oksit formları TiO, Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> ve TiO<sub>2</sub> formatında olabilir. En dıştaki oksit tabakası her zaman oksijence zengin titanyum dioksittir. Titanyumun çevre direnci, ince, inatçı ve oldukça koruyucu bir yüzey oluşturan bu oksit tabakasına bağlıdır. Titanyum yüzeyinde oluşan oksit tabakası malzemeyi asit ataklarına, termal ve kimyasal etkilere karşı korumaktadır. Elektrokimyasal ataklara karşı malzemeyi



koruyan bu pasif oksit tabaka, üstün korozyon direnci sağlar. Titanyumun yüzeyindeki oksit tabakası, herhangi bir zarara karşı kendini yenileme özelliğine sahiptir [4].

Titanyumun başlıca özelliklerinin diğer metaller ile karşılaştırılması Tablo 1.2’de verilmiştir [5].

Tablo 1.2. Titanyumun bazı özelliklerinin diğer metallerle karşılaştırması.

Özellik	Ti	Fe	Ni	Al
Ergime Noktası (°C)	1668	1536	1455	660
Kristal Yapı	HMK, HSP	YMK, HMK	YMK	YMK
Elastisite Modülü (GPa)	115	215	200	72
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	4,5	7,9	8,9	2,7
Korozyon Direnci	Çok Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
Oksijene Reaktivlik	Çok Yüksek	Düşük	Düşük	Yüksek
Fiyat	Çok Yüksek	Düşük	Yüksek	Orta

The Titanium Metals Company of America (TMCA) 1950 yılında titanyum esaslı ilk ticari ürünü geliştirilmiştir. Bu tarih itibariyle titanyum ve alaşımları denizcilik, havacılık ve diğer endüstriyel uygulamalarda diğer malzemelerle kıyaslandıklarında uygun maliyetli ve üstün malzemeler olduklarını ispatlamışlardır [6].

Titanyumun mühendislik yönünden önem arz eden karakteristik özellikleri şu şekilde sıralanabilir [3]:

- Spesifik mukavemet: Yoğunluk değerleri 4,42-4,85 g/cm<sup>3</sup> arasında gösterilen mevcut ticari titanyum esaslı alaşımların, akma dayanımları ticari saflıktaki (CP Ti) birinci kalite titanyumda 172 MPa iken ısıt ve işlem görmüş beta ( $\beta$ ) alaşımları için 1380 MPa gibi değerlere çıkabilmektedir.
- Korozyon direnci: Titanyum asit, baz ve doğal sular ile kimyasalların birçoğuna karşı üstün bir direnç göstermekle beraber, deniz ve tuzlu su atmosferlerinin korozif özelliklerinden etkilenmemektedir.
- Erozyon direnci: Erozyon, akış korozyonu ve kavitasyona karşı titanyum ve alaşımları yüksek oranda direnç göstermektedir.

- Isı transfer verimi: Çalışma şartlarında bakır-nikel alaşımları ve gemici pirincine ve nikel-bakır alaşımlarına yaklaşan yüksek ısı transfer özelliklerine sahiptir.
- Oksidasyon direnci: Oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda yüzeyindeki ince film şeklindeki koruyucu oksit tabakası sayesinde titanyum ve alaşımları oldukça yüksek oksidasyon direncine sahiptir.

Fakat diğer metal türlerinde de olduğu gibi titanyum ve alaşımlarının da zayıf yönleri bulunmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının adhezif karakterde yüzey aşınması ve nispeten yüksek sürtünme katsayıları olması zayıf aşınma özellikleri sergilemelerine sebep olmaktadır. Bununla beraber titanyum ve alaşımlarının birçoğunda 500°C ve daha yüksek çalışma sıcaklıklarında oluşan oksitlenme sebebiyle mekanik özelliklerde düşüş gözlenmektedir. Zayıf aşınma özellikleri ve yüksek sıcaklıktaki oksidasyon dirençlerinin düşük olması titanyum ve alaşımlarının tribolojik bileşenlerin yer aldığı ve yüksek sıcaklıkta (>500°C) çalışması gereken mühendislik uygulamalarında kullanımına engel olmaktadır. Oksidasyon direnci ve aşınma dayanımını arttırmak amacıyla titanyum ve alaşımlarına çeşitli yüzey iyileştirme işlemleri uygulanmaktadır [2].

Titanyum farklı iki kristal yapıda bulunabilen allotropik dönüşüm gösteren bir malzemedir. Bu kristal yapıları; sıkı paket hegzagonal (SPH) yapıdaki alfa ( $\alpha$ ) ve hacim merkezli kübik (HMK) yapısındaki beta ( $\beta$ ) fazlarıdır. Alaşımlanmamış titanyumun 883°C'ye kadar  $\alpha$  fazı kararlı davranış sergiler. Sıcaklık 883°C'nin üstüne çıktığında  $\beta$  fazına dönüşmektedir. Saf titanyum için 883°C sıcaklığı  $\beta$  dönüşüm sıcaklığı olarak isimlendirilmektedir [3,5]. Titanyum alaşımlanarak  $\alpha$ - $\beta$  dönüşüm sıcaklığı değiştirilebilmekte ve oluşturulan titanyum alaşımında  $\alpha$ - $\beta$  fazlarından birinin kararlı hale gelmesi sağlanarak alaşımdaki  $\alpha$ - $\beta$  miktarları kontrol edilebilmektedir.  $\beta$ -dönüşüm sıcaklığını  $\alpha$ -kararlaştırıcı olarak bilinen elementler yükseltirken,  $\beta$ -kararlaştırıcı elementler bu sıcaklığı düşürmektedir. Titanyumun esaslı malzemelerin birçok özelliği bu dönüşümler üzerinden kontrol edilmektedir.

## 1.2. Titanyum Alaşımları ve İşlenebilirlik Özellikleri

Bir malzemenin işlenebilirliği, işlenebilme kolaylığı olarak tanımlanabilir. İşlenebilirlik, malzemenin fiziksel özelliklerine ve kesme koşullarına bağlıdır. İşlenebilirlik normalize edilmiş bir değer olarak veya yüzde olarak ifade edilebilir.

Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) 1112 karbon çeliğini %100 işlenebilirlik derecesine sahip olarak tanımlamıştır [7]. AISI B1112 karbon çeliğine göre karşılaştırılan bazı malzemelerin işlenebilirliği Tablo 1.3’de gösterilmiştir.

Tablo 1.3. Çeşitli malzemelerin işlenebilirlik oranları.

Malzeme	Tip	Durum	İşlenebilirlik %
B1112	Sülfürlenmiş Çelik	Sıcak Haddeli	100
1020	Karbon Çeliği	Soğuk Çekme	70
4340	Alaşım Çeliği	Tavlanmış	45
Titanyum	CP-Ti	Tavlanmış	30
302	Paslanmaz Çelik	Tavlanmış	40
Ti-5Al-2,5Sn	Titanyum Alaşımı	Tavlanmış	25
Ti-6Al-4V	Titanyum Alaşımı	Tavlanmış	22
Ti-8Al-1Mo-1V	Titanyum Alaşımı	Tavlanmış	22
Ti-6Al-6V-2Sn	Titanyum Alaşımı	Tavlanmış	20
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Titanyum Alaşımı	Isıl işlem ve Yaşlandırma	18
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	Titanyum Alaşımı	Isıl işlem ve Yaşlandırma	18
Ti-6Al-4V	Titanyum Alaşımı	Isıl işlem ve Yaşlandırma	18
Ti-6Al-6V-2Sn	Titanyum Alaşımı	Isıl işlem ve Yaşlandırma	16
Ti-10V-2Fe-3Al	Titanyum Alaşımı	Tavlanmış	12
Ti-13V-11Cr-3Al	Titanyum Alaşımı	Tavlanmış	16
Ti-13V-11Cr-3Al	Titanyum Alaşımı	Isıl işlem ve Yaşlandırma	12
HS25	Kobalt Bazlı	Tavlanmış	10
Inconel 718	Nikel Bazlı	Isıl işlem ve Yaşlandırma	6

İş malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri içinde; mikro yapı, tane büyüklüğü, ısıl işlem, kimyasal bileşim, üretim koşulları, sertlik, akma dayanımı ve çekme dayanımı işlenebilirliğe en fazla etki eden faktörlerdir [8].

### 1.3. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyumun alaşımları yapılarındaki faz farklılıklarına göre sınıflandırılmaktadırlar. Öncelikli olarak başlıca  $\alpha$ -kararlaştırıcı elementlerle birlikte  $\alpha$  fazından oluşan alaşımlar  $\alpha$  alaşımları olarak adlandırılırken az miktarlarda  $\beta$  kararlaştırıcı elementlerle birlikte  $\alpha$  fazı içerenler  $\alpha$ -yakın titanyum alaşımları olarak sınıflandırılırlar.  $\alpha$  ve  $\alpha$ -yakın alaşımları genellikle ısıl işlem uygulanamaz ve kaynaklanamaz alaşımlardır. Bu alaşımlar orta seviyede dayanım, iyi darbe tokluğu ve yüksek sıcaklıklarda iyi sürünme direncine sahiptirler.  $\alpha+\beta$  fazlarının karışımlarından oluşan alaşımlar  $\alpha+\beta$  alaşımları olarak sınıflandırılırlar. Çoğu  $\alpha+\beta$  alaşımlarına dayanımda orta derece bir artış sağlamak için ısıl işlem uygulanabilir. Bu alaşımlar iyi şekillendirme özelliklerine sahiptir ancak yüksek sıcaklıklarda sürünme dirençleri  $\alpha$  ve  $\alpha$ -yakın alaşımları gibi iyi değildir. Son olarak  $\beta$  kararlaştırıcı elementlerin bol miktarda bulunduğu  $\beta$  fazından oluşan alaşımlara  $\beta$  alaşımları denir.  $\beta$  alaşımlarına yüksek dayanım için ısıl işlem uygulanabilmekte ve kolaylıkla şekillendirilebilmektedirler. Fakat alaşımlar yüksek dayanım şartlarında düşük sünekliğe sahiptirler [9].

#### 1.3.1. Saf titanyum (CP-Ti)

Ticari saflıktaki titanyum (CP-Ti) yaklaşık %98,6-%99,5 oranlarında titanyum içerir [10]. CP-Ti oda koşullarında sıkı paket hegzagonal (SPH) yapıdadır ve  $\alpha$  fazında bulunmaktadır. 883°C'ye çıkıldığında hacim merkezli kübik yapıda olan  $\beta$  fazına dönüşür. Bu dönüşüm esnasında  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının aynı anda bulunduğu dar bir sıcaklık aralığı vardır. CP-Ti oda koşullarında %100 oranda  $\alpha$  fazında bulunmaktadır. Alaşım elementlerinin, bilhassa da demir miktarının artmasıyla mikroyapısında tane sınırlarında az ama artan oranlarda  $\beta$  fazına rastlanmaktadır [11].

Alaşımlanmamış titanyumun kullanılmasının nedeni yüksek korozyon direncine sahip olmasıdır. Ticari saflıktaki titanyum, titanyum alaşımlarına göre zayıftır ve yüksek sıcaklıklarda dayanımını kaybeder. Buna rağmen çok iyi korozyon direncine sahiptir. Bu sınıftaki alaşımlar çok düşük sıcaklık uygulamaları için gereklidir. Uygulamaları; ısı eşanjörleri, boru donanımları, reaktörler, pompalar ile kimya ve petrol endüstrilerinde kullanılan valfleri içerir. Ayrıca titanyum rafinerilerde de kullanılmaktadır; sülfidler, kloritler ve petrolü rafine etmede karşılaşılan birçok diğer

kimyasallara karşı dirençlidirler [12]. Tablo 1.4'te ticari saflıkta olan titanyumun sınıflarının genel özellikleri verilmiştir [13].

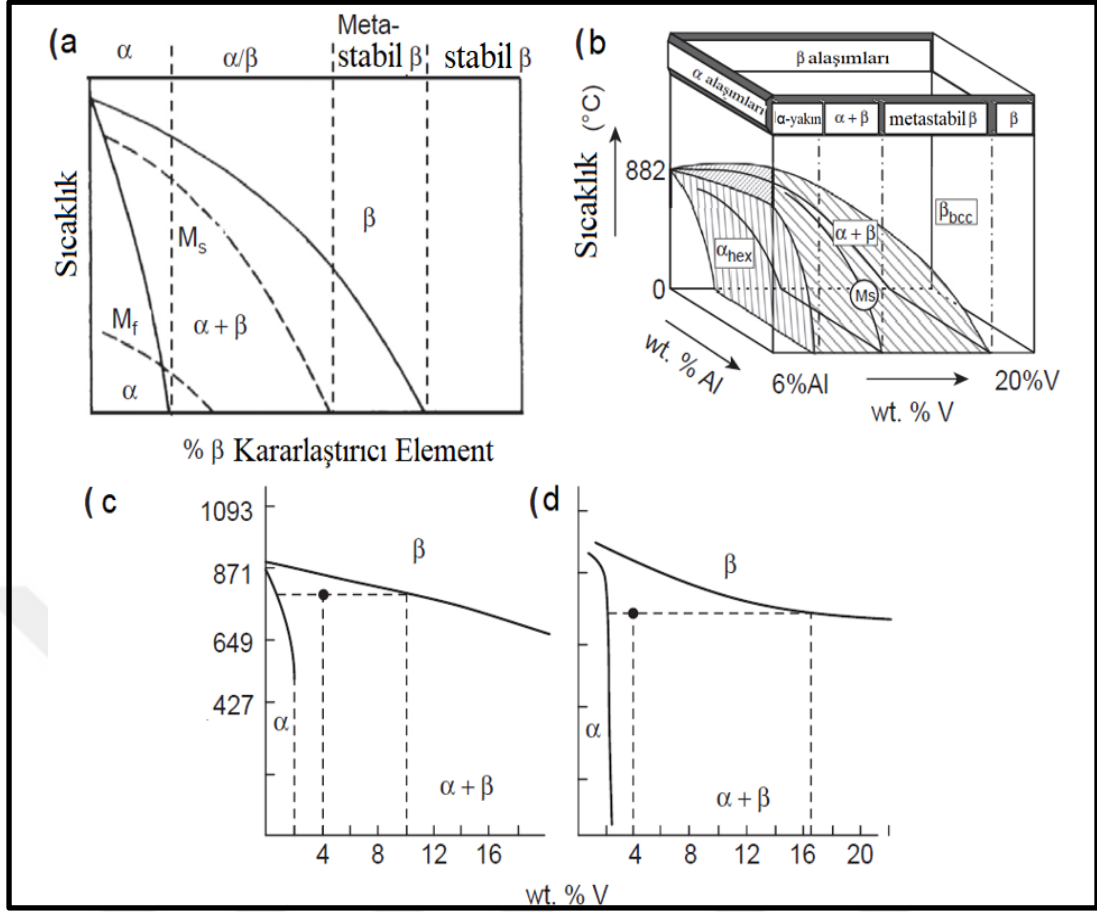
Tablo 1.4. Ticari saflıktaki titanyumun genel özellikleri.

ASTM Standardı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Alaşım Elementleri (Ağırlıkça maks, % )				
			$\alpha$	$\beta$	N	C	H	Fe	O
Grade-1	170	240	888	880	0,03	0,10	0,015	0,20	0,18
Grade-2	280	340	913	890	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25
Grade-3	380	450	920	900	0,05	0,10	0,015	0,30	0,35
Grade-4	480	550	950	905	0,05	0,10	0,015	0,50	0,40

İçeriğinde mevcut olan demir (Fe) ve oksijen (O) miktarına göre, ticari saflıktaki titanyum; 4 kaliteye sahiptir. Oksijen ve demir en değerli alaşım elementleri olmakla birlikte oksijen ve demir elementlerin oranı arttıkça ticari saflıktaki titanyumun akma ve çekme mukavemeti de yükselmektedir [14].

### 1.3.2.a Titanyum alaşımları

Yaygın olarak bilinen  $\alpha$  alaşımlarının tümü %2,5 kalay ve %5 alüminyum içerir. Bu iki element de  $\alpha$ 'ya katı ergiyik mukavemetlenmesi sağlar.  $\alpha$  titanyum alaşımları yüksek sıcaklıklarda dayanımlarını iyi koruyabilirken, oksidasyon ve korozyon dirençlerine ilave olarak kaynaklanabilirlikleri de iyidir. Bu alaşımlar çoğunlukla 400°C ve 500°C arasındaki işletme sıcaklıklarında kullanılırlar. Normal olarak iyi süneklik ve şekillendirilebilirliğe sahiptirler.  $\alpha$  alaşımları,  $\beta$  bölgesindeki yüksek sıcaklıklarda tavlınır ve sonrasında soğutulur. Hızlı soğutma çok ince iğnesel yapıda  $\alpha$  tane yapısı oluşturur. Fırında soğutma ile de çoğunlukla levha şeklinde yapılar oluşturulur [15]. Şekil 1.1'de Titanyum ve alaşımları için şematik faz diyagramları verilmiştir [16].



Şekil 1.1. (a)  $\beta$  kararlaştırıcı elementi ile ikili alaşım faz diyagramı, (b)  $\alpha + \beta$  kararlaştırıcı alaşımın üç boyutlu diyagramı, (c) Ti-V faz diyagramı ve (d) Ti-6Al-xV'un yapıy faz diyagramı.

Şekil 1.1.(a) da görüldüğü gibi titanyum alaşımı, belirli bir sıcaklık altında  $\beta$  kararlaştırıcısının  $\alpha$  fazındaki katı çözünlülük limitine ulaşana kadar tek  $\alpha$  fazı olarak kalır. Bunun devamında,  $\beta$  fazının göreceli hacimsel oranı alaşım tamamen bu fazdan oluşana kadar devamlı olarak artmaktadır. Dengede ve oda sıcaklığında tamamen  $\alpha$ ,  $\beta$  veya bu fazların karışımı olan alaşımlar bu sıralamayla  $\alpha$ ,  $\beta$  veya  $\alpha + \beta$  titanyum alaşımları olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma dövülebilir alaşımlar için farklıdır. Çünkü dövülebilir alaşımlar için sadece matris fazı mevcuttur. Şekil 1.1.(b) Alüminyum ve vanadyumun tekil ve bileşik ilavelerinin etkilerini gösteren üç boyutlu şematik faz diyagramıdır. Bu diyagramın iki boyutlu dikey kısımları, Ti-6Al-xV diyagramının ön yüzünde de görüldüğü gibi, sabit miktarda  $\alpha$  (veya  $\beta$ ) kararlaştırıcısı içeren bir alaşıma değişen miktarlarda ilave edilen  $\beta$  (veya  $\alpha$ ) kararlaştırıcısının etkilerini gösteren ikili diyagramlar olarak kullanılabilir. Şekil 1.1. (c) ve (d) de ikili (Ti-V) ve (Ti-6Al-V) faz diyagramları örnek olarak gösterilmiştir.

Zirkonyum, alüminyum veya kalay içeren  $\alpha$  titanyum alaşımları çok daha yüksek sıcaklık ya da çok daha soğuk ortamlarda tercih edilmektedir.  $\alpha$  fazınca zengin olan titanyum alaşımları,  $\beta$  titanyum alaşımlarına göre yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı çoğunlukla daha fazla dayanıklıdır. Çok düşük miktarlardada ara yer atomu içeren  $\alpha$  titanyum alaşımları, tokluk ve sünekliğini çok düşük sıcaklıklara kadar sürdürebilmektedir.

$\alpha$  titanyum alaşımları,  $\alpha+\beta$  titanyum alaşımları ve  $\beta$  titanyum alaşımlarının aksine kararlı  $\alpha$  fazına sahip olduklarından ısı işlem ile sertleştirilememektedirler. Ancak soğuk işlemden sonra oluşan kalıntı gerilmelerini gidermek için yeniden kristalleştirme tavlama veya sadece tavlama işlemi yapılabilmektedir. Dövülebilme kabiliyetleri çok düşüktür ve dövme sıcaklık aralığı  $\alpha+\beta$  alaşımları veya  $\beta$  alaşımlarından daha dardır. Dövme sırasında oluşan yüzey ve/veya yüzey çatlakları bunu açıkça göstermektedirler. Bu gibi bir oluşumu önlemek için de dövme işleminde deformasyon miktarının en düşük düzeyde seçilmesi ve malzemenin sık aralıklarla tavlama gerekmektedir. Tek faz yapısına sahip  $\alpha$  titanyum alaşımına Ti5Al2.5Sn alaşımı örnek gösterilebilir [17].

$\alpha$  titanyum alaşımları genellikle kimya endüstrisi ve proses mühendisliğince kullanılmaktadır. Bu sektörlerdeki uygulamalar için gerekli olan üstün korozyon direnci ve deformasyon kabiliyetine sahiptirler. Ticari saflıktaki titanyumun mukavemet gereksinimini karşılayamadığı yerlerde, en bilinen titanyum alaşımı olan ve uzun süre önce kabul görmüş Ti5Al2.5Sn alaşımı tercih edilmektedir. Düşük sıcaklık uygulamaları olan hidrojen depolama ve basınçlı araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [18].

### **1.3.3. $\alpha$ -Yakın titanyum alaşımları**

$\alpha$ -yakın titanyum alaşımları  $\alpha$  faz yapısında bir miktar  $\beta$  fazı dağılımını içeren alaşımlardır.  $\beta$  kararlaştırıcı elementler olan az miktarlardaki molibden ve vanadyum (yaklaşık %1-2) oda sıcaklığında bu alaşımların bir miktar  $\beta$  fazına sahip olmasına neden olur. Kalay ve zirkonyum bu alaşımların pek çoğuna ilave edilir. Böylece alüminyum içerikleri azaltılabilirken, dayanımları da korunmuş olur [14].

$\alpha$ -yakın titanyum alaşımlarının yapısındaki  $\alpha$  fazı yüksek kararlılığa sahiptir ve sınırlı miktarda  $\beta$  fazını kararlaştırılan elementler içerebilir. Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo gibi malzemeler  $\alpha$ -yakın Ti alaşımlarına örnek verilebilir. Bu alaşımlar;  $\alpha$  alaşımlarına benzer özellikler göstermek ile birlikte 400-520°C sıcaklık aralığında yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar [14].

Ti-8Al-1Mo-1V alaşımı jet motorlarının kompresör kısmında orta yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş ve uçak dış kaplama parçaları için kullanılmıştır. Bu alaşım iyi kaynaklanabilirlik, iyi sürünme direnci, tokluk, yüksek dayanım ve düşük süneklik gibi istenen özelliklere sahiptir. Bu alaşımın bir dezavantajı tuz ortamında gerilim korozyonuna karşı hassas olmasıdır. Bazı  $\alpha$ -yakın alaşımlarının mekanik özellikleri Tablo 1.5.'te verilmiştir [12].

Tablo 1.5. Bazı  $\alpha$ -yakın titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri.

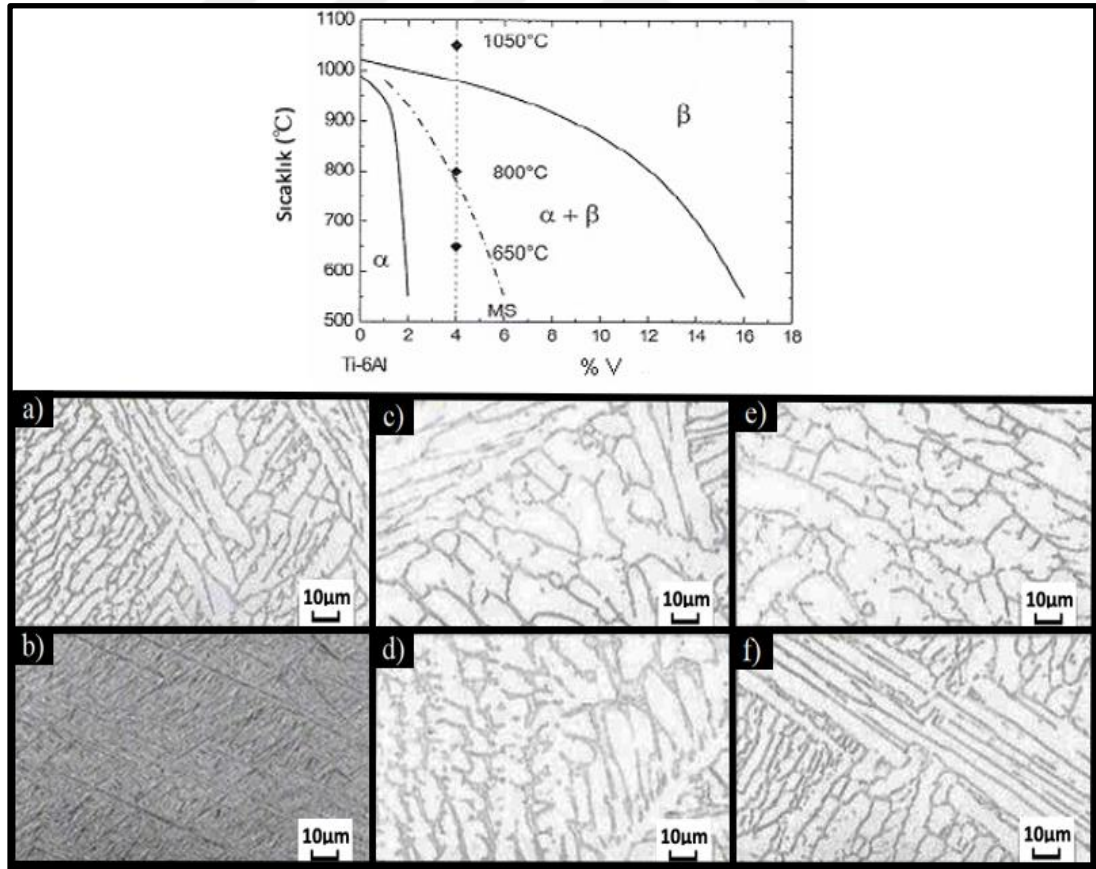
Oda Sıcaklığı						Yüksek Sıcaklıklar				
Alaşım (%)	Şartlar	Çekme Dayanımı(MPa)	Akma Dayanımı(MPa)	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)	Deney Sıcaklığı (°C)	Çekme Dayanımı(MPa)	Akma Dayanımı(MPa)	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)
Ti-8Al-1Mo-1V	Çift tavllanmış	999	951	15	28	315	793	620	20	38
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	-	979	896	15	35	315	772	586	16	42
						426	703	517	21	55
						537	648	490	26	60
Ti-5Al-5Sn	975°C 30dak. Havada soğutulmuş	1048	965	13	-	315	793	565	15	-
Ti-2Zr-2Mo-0,25Si	600°C 120dak. Havada soğutulmuş	-	-	-	-	426	779	530	17	-
Ti-6Al-1Mo-2Cb-1Ta	-	-	-	-	-	537	689	503	19	-



### 1.3.4. $\alpha+\beta$ Titanyum alaşımları

$\alpha$  ve  $\beta$  kararlaştırıcıların uygun dengesi ile oda sıcaklığında  $\alpha$  ve  $\beta$ 'nin bir karışımı elde edilebilir. Tavlama sayesinde yuşsek suneklik, uniforn ozellikler ve iyi dayanım kombinasyonu oluşur.  $\alpha$ -yakın titanyum alaşım grubuna gore daha yuşsek dayanım, iyi şekillendirilebilirlik gibi ozelliklere sahip olan bu gruba Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-2S alaşımları ornek gosterilebilir. Aluşminyum alaşımlarına ve duşuk alaşımlı celiklere gore yuşsek korozyon direncine sahip olan  $\alpha+\beta$  alaşım grubu havacılık ve uçak sanayinde genellikle celik ve aluşminyuma gore daha fazla tercih edilmektedir.

$\alpha+\beta$  titanyum alaşımlarına coşundurme ışıl işlemi uygulanabilir, su verilebilir ve dayanımı artırmak için yaşlandırma yapılabilirler. Bu alaşımların mikroyapıları oncelikle kimyasal kompozisyona, işlem geğmişine ve ışıl uygulamalara bağlıdır. şekil 1.2.'de Ti6Al4V alaşımının farklı sıcaklıklarda, yavaş soğutma ve suda soğutma sonucunda oluşan mikro yapıları gosterilmektedir [19].



şekil 1.2. Ti6Al4V alaşımının a) 1050°C c) 800°C e) 650°C'den yavaş soğutma sonucunda, b) 1050°C d) 800°C f) 650°C'den hızlı soğutma sonucunda oluşan mikroyapı gortuşleri.

$\alpha$ ,  $\beta$ , ( $\alpha+\beta$ ) olmak üzere üç formda bulunan titanyum alaşımlarından en önemlisi ve en sık kullanılanı, arzu edilen oran ve öngörülür üretilebilirliğinden dolayı  $\alpha+\beta$  formunda bulunan Ti6Al4V alaşımıdır. Bu alaşım, titanyumun mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla alüminyum ve vanadyum ile alaşımlanması ile oluşmaktadır. Kullanılan alüminyum  $\alpha$  stabilizasyonu sağlarken, vanadyum  $\beta$  stabilizasyonunda görev alır.  $\alpha$  fazının  $\beta$  fazına dönüştüğü sıcaklıkta alüminyum ve vanadyumun ilavesi ile bu dönüşüm baskılanmış olur. Böylece oda sıcaklığında hem  $\alpha$  hem de  $\beta$  formları oluşmuş olur.

$\alpha+\beta$  alaşımları genellikle; uçak sanayi, makine parçaları, petrokimyasal fabrikalar için malzemeler ve tıbbi implant endüstrisinde kullanılmaktadır. Ayrıca, uçak iskeleti, roketler, jet motorları ve iniş takım dişlileri için parçalar, ısıtıl işlem görmüş  $\alpha+\beta$  alaşımları için tipik uygulamalardır [20]. Ekstrüze edilmiş veya haddelenmiş işlem ürünleri geniş çapta uçak parçalarında kullanılırken; hassas döküm daha düşük maliyet ve yüksek hasar toleransı özelliğinden dolayı karmaşık parçaların üretimi için mükemmel bir teknolojidir. Bu alaşımdaki birçok döküm hataları sıcak izostatik presleme işlemi ile giderilmektedir [6].

### **1.3.5.β Titanyum alaşımları**

Bu alaşım çeşitlerinin bileşimlerinde önemli sayılabilecek ölçüde  $\beta$  fazını kararlaştırıcı alaşım elementlerini içerdiği bilinmektedir. Yüksek yoğunluk, dövülebilirlik, sertleştirilebilme ve soğuk şekillendirilebilme gibi sahip oldukları özellikler açısından diğer titanyum alaşım çeşitlerine göre farklılık göstermektedirler.  $\beta$  titanyum alaşımları oda sıcaklığında  $\alpha+\beta$  alaşımları ile aynı mukavemet değerlerini göstermesine rağmen daha yüksek sıcaklık miktarlarında bu değerlerin  $\alpha+\beta$  alaşımlarından sonra geldiği bilinmektedir [17].

$\beta$  alaşım çeşitleri kararsız olarak sayılabilecek alaşımlardır ve  $\alpha$  fazının  $\beta$  matrisi içinde çökeltmesi sonucunda olduklarından daha sert hale getirilirler.  $\beta$  alaşımları yüksek kırılma tokluğuna sahiptirler ve molibden içermeleri sonucunda bu alaşım çeşitlerinin korozyona karşı gösterdikleri direncin artmasına sebep vermektedir.  $\alpha+\beta$  alaşımlarıyla kıyaslandıklarında bu alaşım çeşitlerine göre daha iyi işlenebildikleri ve ısıtıl işleme daha yüksek oranda yatkınlık gösterdikleri bilinmektedir [21].

$\beta$  alaşımları kolay ısıl işlem, yüksek mukavemet, bazı alaşım çeşitlerinde soğuk Şekillendirilebilme, yüksek tokluk, bazı alaşım çeşitlerinde yüksek korozyon direnci gibi avantajlı sayılabilecek özelliklerine rağmen; bazı alaşım çeşitlerinde düşük korozyon direnci, segregasyon sorunları, zayıf düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık özellikleri, yüksek yoğunluk gibi dezavantaj sayılabilecek özellikler de göstermektedir [17].

$\beta$  alaşımları sahip oldukları kırılma tokluğu karakteristiğiyle uzay araçlarında kullanımı son yıllarda artış göstermiştir. Bununla beraber Mo içeriği bulunan bazı  $\beta$  alaşım çeşitlerinin diğerlerine göre daha iyi korozyon karakteristiğine sahip oldukları bilinmektedir.

Metastabil  $\beta$  alaşımları bununla beraber;

- Kalın kesitli parçalarda ısıl işleme  $\alpha+\beta$  alaşımlarına göre daha iyi sonuç vermesi,
- Oda sıcaklığında yine  $\alpha+\beta$  alaşımları ile karşılaştırıldıklarında daha iyi Őekillendirilebilirlik karakteristiği,
- Akma dayanımının kriter olarak belirlendiği sıcaklık ölçülerinde  $\alpha+\beta$  alaşımlarına göre daha yüksek dayanması gibi özellikler göstermektedirler.

Bazı  $\beta$  titanyum alaşımlarının mekanik zellikleri Tablo 1.6’da verilmiştir [22].

Tablo 1.6. Bazı  $\beta$  titanyum alaşımlarının mekanik zellikleri.

Alaşım Tipi	Akma Dayanımı (MPa)	ekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	% Kesit Daralması
Ti-15Mo-5Zr-3Al	870-1173	882-1177	15-20	43-80
Ti-12Mo-5Zr-5Sn	1002	1010	17,8	56
Ti-30Nb	500	700	20	60
Ti-30Ta	590	740	28	58

#### 1.4. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Titanyum yüksek spesifik dayanımı, mkemmek korozyon direnci ve biyoyumluluğu gibi üstün özellikleri sayesinde havacılık sektöründe jet motorları, füzeler ve uzay araçlarında, ulaşım sektöründe ve denizcilik sektöründe, otomobil, uçak ve denizaltı

çalışmalarında, endüstri işlemlerinde kimyasal ve petrokimyada, askeri alanda uçak ve füzelerde, spor malzemelerinde bisiklet, tenis raketi, olta ve kayak takımlarında, cep telefonu, takı ve aksesuarlarda ve sağlık alanında ortopedik eklem, implant, kalp kapakçığı ve protez yapımı gibi birçok tıbbi uygulamalarda kullanılmaktadır [23]. Dış hekimliğinde titanyum, implant yapımında, sabit ve hareketli protezlerde, ortodontik tel yapımında ve endodontik kanal aletlerinde kullanılmaktadır [4].

#### **1.4.1.Havacılık uygulamaları**

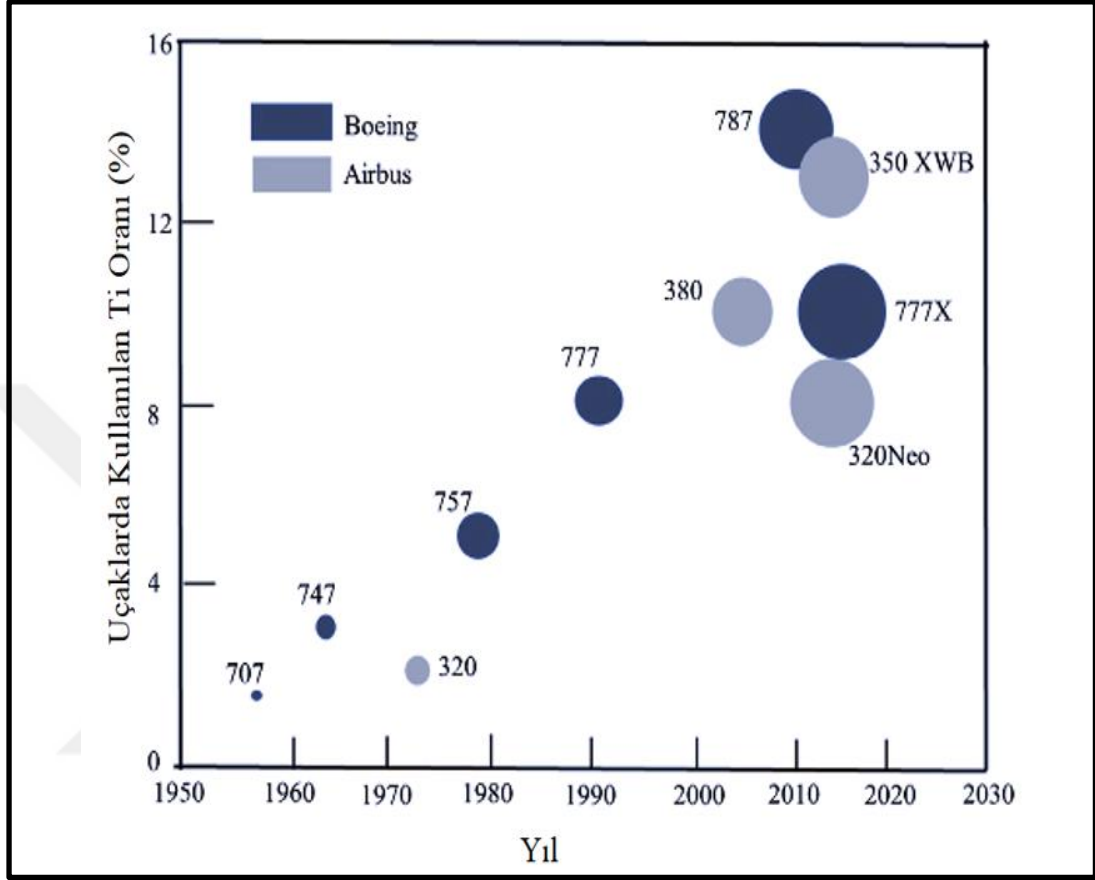
Titanyum ve alaşımlarının kullanımı ilk olarak havacılık ve uzay endüstrileriyle başlarken zamanla, söz konusu olan üstün özellikleri sebebiyle birçok alana yayılmaya başlamıştır. Yüksek mukavemeti ve hafifliğinden dolayı havacılık uygulamalarında geniş bir perspektifte kendine yer bulmuştur. Titanyum ve alaşımlarının havacılık sanayinde yaygın kullanımının sebepleri [22]:

- Düşük yoğunlukları,
- Yüksek çalışma sıcaklıkları,
- Korozyon dirençleri,
- Yüksek ömür/fiyat oranları,
- Polimer matrisli kompozitlerle galvanik uygunlukları.

Günümüzde ağırlıklardaki bir kilogramlık bir hafifletme için otomobil sanayi 10 € maliyeti tolere edebilirken, havacılık sektörü için bu değer hafifletilen her bir kilogram ağırlık için 1000 €'a kadar yükselebilmektedir. Bununla beraber üretimi daha yüksek ileri teknoloji içeren uzay çalışmaları ile alakalı ise bu rakam 10000 € gibi değerlere çıkabilmektedir. Bu maliyetlere bakıldığında titanyum esaslı malzemelerin önemli ve üstün özellikleri dışında sadece düşük yoğunluk özelliğiyle havacılık ve uzay sanayinde diğer malzemelere nazaran daha önemli bir pazar değerine sahip olduğu görülmektedir [24].

Ticari uçakların gövde yapılarındaki titanyum alaşımlarının miktarı düzenli olarak artmasına rağmen, toplam kullanımları Şekil 1.3'de gösterildiği gibi Boeing 787'nin piyasaya sürülmesine kadar oldukça sınırlıydı. Boeing 787'nin yüksek gerilimli ve yüklü kısımlarında büyük miktarlarda polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanılması metallerin tercih edildiği alanlar için Ti alaşımlarının seçilmesiyle sonuçlandı. Al alaşımları sıkıştırma yükü altında iyi performans göstermektedir, ancak

titanyum alaşımları daha iyi korozyon direncine ve karbon takviyeli polimer kompozitlerle galvanik ve sertlik uyumluluğuna sahip ve çekme dayanımı daha iyidir [16].



Şekil 1.3. Titanyum alaşımlarının ticari uçaklardaki kullanım yüzdesinin yıllara göre değişimi.

Titanyum ve alaşımların savaş uçaklarında yaygın olarak kullanımı 1960'ların başında SR-71 Blackbird keşif uçağı ile başlamıştır. Mach 3 uçuş hızına varılmasıyla birlikte yüksek sıcaklara çıkılmıştır bu da alüminyum ve alaşımlarının yetersiz kalmasına sebep olmuştur. Bu yüksek sıcaklıklarda çalışabilen çelikler ve süper alaşımlarda yüksek ağırlıklarından dolayı ihtiyaçları karşılayamamıştır. Titanyum ve alaşımları tüm bu ihtiyaçlara cevap vererek SR-71 uçağında kullanılan metal malzemelerin %93'ünü oluşturmuştur. İlk ticari  $\beta$  titanyum alaşımı olan Ti-13V-11Cr-3Al özel olarak bu ihtiyaç için üretilmiştir. Sonrasında da titanyum ve alaşımları Tablo 1.7'de gösterildi gibi askeri uçaklarda önemli miktarlarda kullanılmaya devam etmiştir [16].

Tablo 1.7. Bazı savaş uçaklarının yapısında kullanılan malzemeler ve ağırlıkça yüzdeleri.

Malzeme (Ağırlıkça %)	Askeri Uçak			
	F-15E	F/A-18C/D	F/A-18E/F	F-22
Alüminyum	49	49	31	16
Titanyum	32	13	21	39
Kompozitler	2	10	19	24
Diğerleri (Çelik dahil)	17	28	29	21

#### 1.4.2. Biyomedikal uygulamaları

Titanyum ve alaşımları oksijen ile çok hızlı reaksiyona girme özelliği göstererek yüzeylerinde koruyucu bir titanyum dioksit tabakası oluşturur. Oluşan titanyum dioksit tabakası sayesinde korozyona karşı yüksek direnç gösterir. Bu nedenle doku uyumu en yüksek olan metallere dendir. Bu özellikleri titanyum ve alaşımlarını insan vücudunda implant görevinde kullanılan en önemli metallere dendir biri olması konumuna getirmiştir. Metal alerjisinin korozyon kaynaklı olduğu kanıtlanmasıyla, titanyum ve alaşımları korozyona karşı dirençli olduğu için metal alerjisi olan hastalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca titanyum ve alaşımları mikro cerrahinin hassasiyetine de uygun metallere dendir. Otomotiv, havacılık ve uzay sanayisinin ihtiyaçları ile geliştirilen titanyum ve alaşımları, mikro cerrahi alanında vazgeçilmez duruma gelmiştir. Bir diğer önemli özellik olarak bazı titanyum alaşımları aşınmaya dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Çok yüksek korozyon dayanımı gösterirler. Titanyum ve alaşımlarının yorulma dayanımı da diğer metallere göre önemli sayılabilecek ölçüde üstündür. Titanyum ve alaşımlarına biyomedikal alanda kullanım avantajı sağlayan özellikleri şu şekilde sıralanabilir [25]:

- Biyomedikal uygulamalar için mekanik dayanımlarının yeterli olması,
- Havadaki oksijenden dolayı titanyum ve alaşımlarının yüzeyinde oluşan oksit tabakasının malzemeye fizyolojik olarak kararlılık sağlaması,
- Titanyum ve alaşımlarının oluşturduğu oksit tabakasının vücut içerisindeki malzemeyi korozyona karşı dirençli kılması,
- Titanyum ve alaşımlarının pasif olmayan diğer benzer metallere dendir kaplanabilmesi

- ve vücut içerisinde galvanik akıma neden olmaması,
- Diğer implant malzemelerine nazaran titanyum ve alaşımlarının elastisite modülünün kemiğe daha yakın değere sahip olması,
- Biyolojik olarak uyumlu olması.

Branemark ve arkadaşları çalışmalarında tavşana yerleştirilen saf titanyumun üzerinde 20 günün bitiminde kemik oluşumunun başladığını gözlemlemiştir. 50 yılı geçkin süredir, titanyumun biyouyumluluk özelliği üzerinde yapılan çalışmalarda, kemik dokusu ile titanyum arasındaki iyileşmeye ve doku oluşumuna ilişkin verilerle ortaya konulmuştur [26].

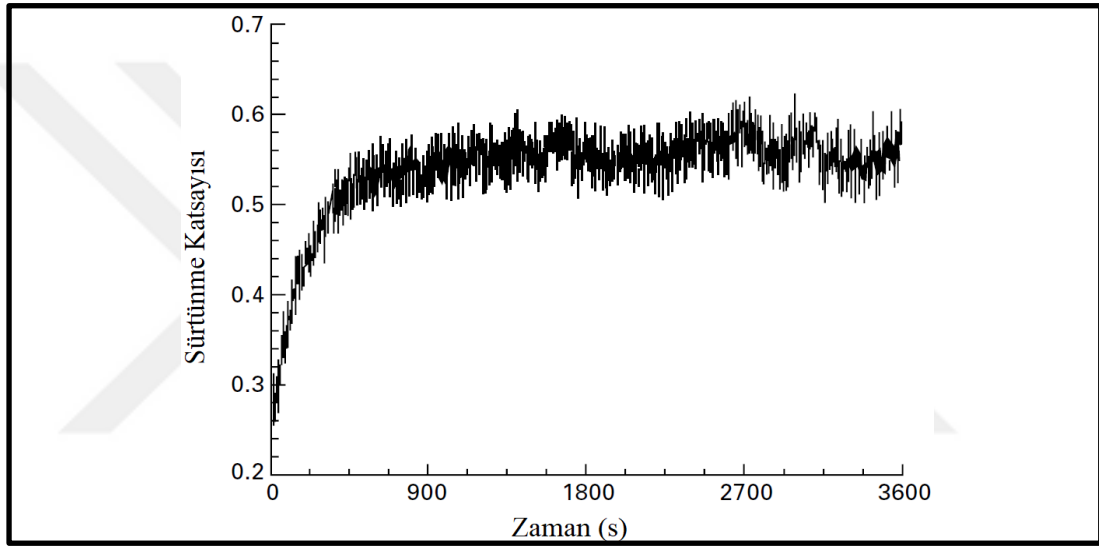
### **1.4.3. Otomotiv uygulamaları**

Çevre yükümlülüklerinin artması ile birlikte getirilen yasalar neticesinde otomobillerin korbondiyoksit emisyonlarına sınırlandırmalar getirmesi otomobil üreticilerini daha hafif ve daha az fosil yakıtı ihtiyacı duyan otomobiller üretmeye yönlendirmiştir. Elektrik motorlu otomobilleri fosil yakıtlı otomobiller kadar güçlü kılabilmek için yeni nesil otomobillerin ağırlıklarını azaltma çalışmaları yapılmaktadır. Bu hedefler doğrultusundaki ilk adım olarak otomobillerin ağırlığının hafifletilerek daha az enerji tüketmesini sağlamaktır. Bu noktada düşük yoğunluğu, üstün spesifik mukavemeti ve yüksek korozyon direnci vb. özelliklere sahip titanyum ve alaşımları başlıca tercih sebebi olmaktadır. Ancak titanyum ve alaşımlarının maliyetli olması, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanımına engel olmaktadır. Bu sebepten dolayı titanyum ve alaşımlarının kullanımını yarış otomobilleri, motorları ve Formula araçları gibi özel amaçla üretilen yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren araçlarla sınırlandırmaktadır [27].

### **1.5. Titanyum ve Alaşımlarının Yüzey Özellikleri**

Düşük ağırlık, iyi korozyon direnci ve yüksek mukavemet gibi çok iyi sayılabilecek fiziksel ve mekanik unsurları kendilerinde buldurmalarına rağmen, titanyum ve alaşımları, aşınma ve sürtünmenin olduğu durumlarda elektron konfigürasyonu, yağlayıcılarının yetersiz oluşu ve kristal yapısı sonucu zayıf tribolojik özellikler gösterdiği bilinmektedir.

Kayma esnasında titanyumun karşıt malzemeye çok yüksek ve güçlü yapışma özelliği bulunmasından ötürü, kayma anında sürtünme katsayısı sabit bir değerde kalmaz ve büyük değerlere ulaşır. Şekil 1.4'de Ti6Al4V alaşımının tungsten karbür (WC) aşındırıcı bilye ile gerçekleştirilen kurusu sürtünme aşınması testinde sergilediği sürtünme katsayısı değişimi verilmiştir. Ti6Al4V alaşımının kayma esnasında gösterdiği yapışma özelliği aşındırıcı ile temas alanını artırır, ardından uygulanan kuvvet yapışma mukavemetini aştığında birleşme yırtılmaları ve iki yüzeyin de hızlı kayması gerçekleşir. Bu döngü artarak tekrarlanır ve sürtünme izindeki geniş dalgalanmalara sebep olur [28].



Şekil 1.4. Ti6Al4V alaşımının WC aşındırıcıya karşı gösterdiği sürtünme katsayısı

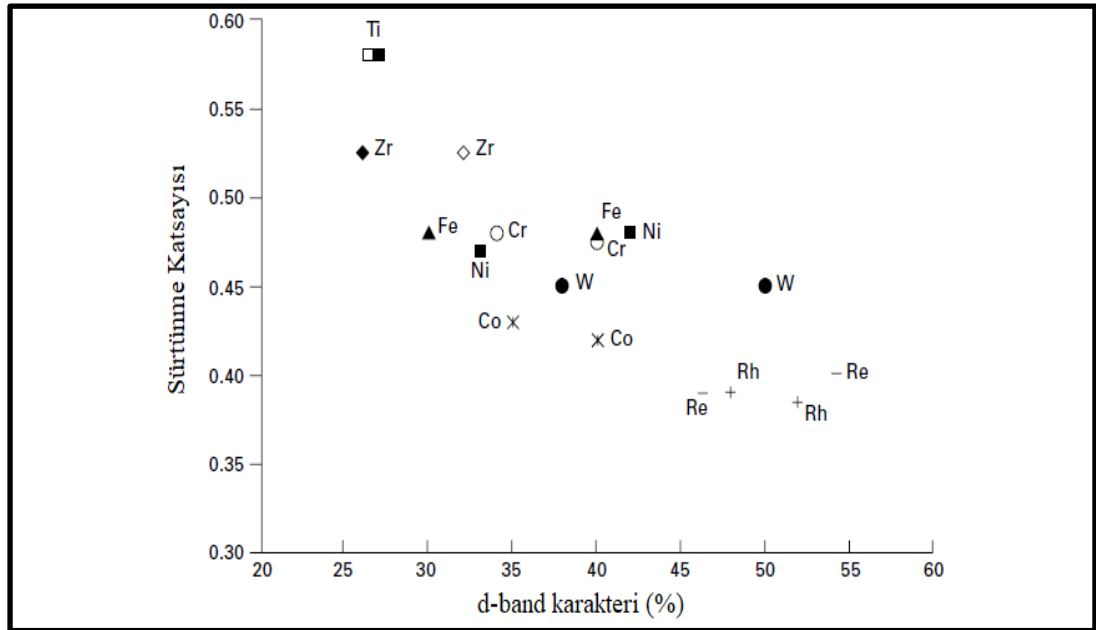
Titanyum ve alaşımlarının sürtünme katsayısının yüksek olması titanyumun reaktifliği ve kristal yapısı ile ilişkili olup bu problem termokimyasal yüzey işlemleri gibi mühendislik yüzey işlemleri ile parçanın boyutları değiştirilmeden yüzey serleştirilerek düzeltilebilmektedir.

Yüzeyinde bulunan ve hasar görmesi sonucu kendi kendini yenileme özelliğine sahip olan ince ve kararlı TiO<sub>2</sub> tabakası korozyon uygulamalarında kendini kanıtlamıştır. Ancak titanyum ve alaşımlarının sahip olduğu zayıf abrasif direnç, sürtünme davranışı ve yüksek sürtünme katsayısı gibi kötü tribolojik özellikler titanyumun uygulama alanlarında kayıp olarak karşımıza çıkmaktadır. Uygulama alanları göz önünde bulundurularak bu özellikler yüzey işlemleri ve kaplamalarla istenilen seviyelere getirilebilmektedir.



Yüksek dayanıklılık ve nispeten düşük yoğunluk, titanyumun özel elektron yapısı ile ilgilidir. Bu durum titanyum atomlarının arasında nispeten güçlü ve uzun bağların oluşumuna izin verir. Titanyumun oksijene afinitesi yüzeyde bir oksit tabakası oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda 800°C'nin üzerinde oksijenin titanyum içine difüzyonu ile oksit tabakasına göre daha kalın, sert ve kırılğan olan kontaminasyon tabakası oluşur. Oksijenle kontamine olmuş titanyum yüzeyinin soğuması esnasında  $\alpha$ -titanyum içine geçiş yapan  $\beta$ -titanyum, alttaki  $\alpha$  titanyumdan düşük oksijen içeriğini ayırarak  $\alpha$ -case adı verilen bu kontaminasyon tabakasını oluşturmaktadır. Bu tabaka malzemenin gerilme direnci ve şekil verilebilirliğini azalttığından dolayı oluşması istenmemektedir [29].

Malzemelerin birçok özelliği elektron yapıları ile ilişkilidir. Aşınma özellikleri de elektron yapıları ile ilişkilendirilebilmektedir. Kimyasal aktivite ve sürtünme katsayısı bu sebeple d-band karakteri ile ilişkilendirilmiştir. D-band karakterinin yüzdesi ne kadar büyük olursa, metalin o kadar az aktif olduğunu ve dolayısıyla Şekil 1.5'de gösterildiği gibi sürtünmenin o kadar düşük olduğunu bulmuştur. Titanyumun en düşük d-bağ karakteri (%27) değerine sahip olması nedeniyle, yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu açıkça görülebilir [28]. Düşük değerli bir d-band karakterine sahip olan titanyumun elektron konfigürasyonu sonucu, titanyumun yüzeyi çok fazla reaktif özellik taşır.



Şekil 1.5. Sürtünme katsayısı ve d-band karakteri arasındaki ilişki.

SPH yapısı bulunduran metallerin iyi sürtünme özelliğine sahip olmalarına rağmen bu durum titanyum için mevcut değildir. Bunun geçerli olmamasının sebebi ise metallerde en ideal sıkı paket oranı (c/a) 1,633 iken bu oranın titanyumda 1,588 olmasıdır. Bu oranın düşüklüğü, taban düzlemleri ile beraber piramidal ve prizmatik kayma düzlemlerini kaymaya teşvik eder. Kayma sistemlerinin fazlalaması, aşınmanın maruz kaldığı yüzeyde plastik deformasyonu ve srekliği fazlalatırır.

Yüksek ısıl etkenliğe sahip yüzeyler arasındaki sürtünmeden kaynaklı ısıyı önlemek amacıyla kullanılan yağlayıcılar, titanyumun zayıf tribolojik özellik göstermesinin önemli nedenleri arasındadır. Titanyum ve alaşımlarının ısıl iletkenlik özelliğinin düşük olması, yağlayıcının bu işlevi yerine getirmesini engellemektedir [2]. Kayma sırasında, üretilen ısı yavaa dağılır ve ara yüzey sıcaklığını yükseltir, bu da kaygan titanyumun tribolojik performansını bozar. Bu nedenle, kayma yüzeyinin sıcaklığının kontrol edilmesi gerekir.

Bununla birlikte titanyum ve alaşımlarının kendinden daha yumuşak malzemelere karşı kayma özelliği iyi olsa da genellikle zayıf aşınma direnci ve zayıf tribolojik özellikler gösterir. Titanyum ve alaşımlarının zayıf tribolojik özelliklerinin arkasındaki ana nedenlerden biri bu alaşımların düşük termal iletkenliğidir [6].

Tüm bu nedenler dolayısıyla titanyum alaşımlarının zayıf tribolojik özelliklerini geliştirmek için farklı araştırmacılar tarafından farklı yaklaşımlar önerilmiştir. Bunlar yüzey işleme, iyonla implante etme, kaplama ve oksijen difüzyonu gibi yöntemleri içermektedir [30].

## **2. AŞINMA**

Aşınma; sürtünmenin söz konusu olduğu sistemlerde bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi veya temas parçalarının aşınması neticesinde ortaya çıkan malzeme kaybıdır. Aşınma sistemin özelliğine göre çeşitli mekanizmalar ile ortaya çıkar. Genelde bu mekanizmalar sistemin aşınma davranışını tespit etmede temel çıkış noktası olmasına rağmen aynı anda oluşabilen aşınma mekanizmalarının birbirini etkilemeleri sonucu konu oldukça karmaşık bir durum arz eder [29]. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte “tribolojik sistem” adını alır. Bir aşınma sistemindeki önemli etkenlerden biride çevre şartlarıdır. Sistem elemanlarının nem veya korozif etkilere maruz kalması aşınmayı hızlandırır [26].

### **2.1. Aşınma Mekanizmaları**

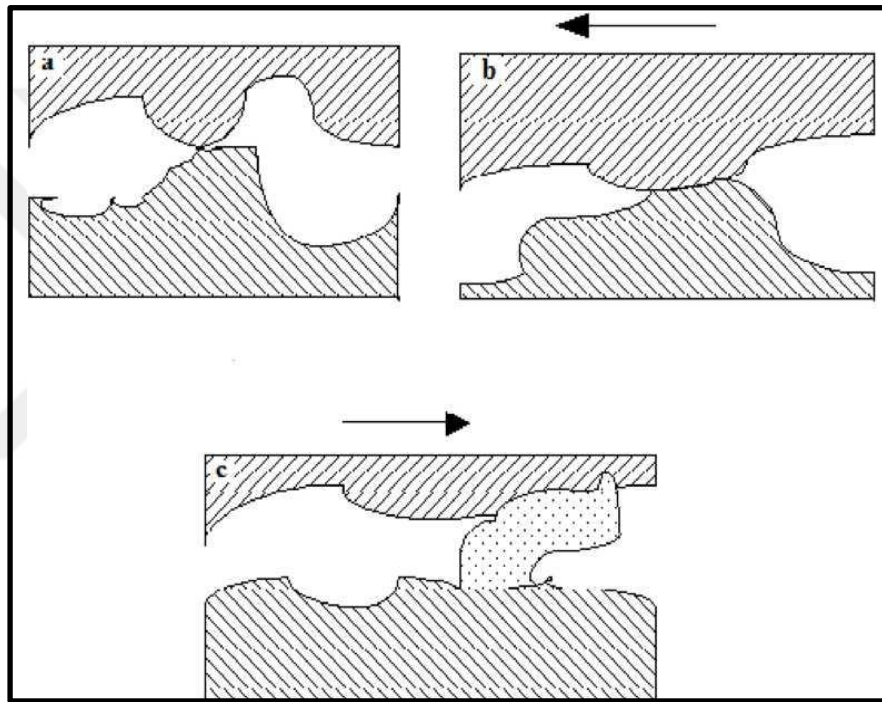
Genel olarak aşınma dış etkiler altında temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişimlerin bir sonucudur. Dış etkilerin fiziksel ve kimyasal değişikliklerinin çeşitliliği nedeniyle pratikte tek bir aşınma hali değil birçok aşınma hali söz konusu olmaktadır. Aşınma, tribolojik sistemin elemanları arasında karşılıklı zorlanmalar neticesinde meydana gelir. Aşınmanın tanımı çok geniş olup, çeşitli aşınma tipleri ve farklı sınıflandırmaları yapılmaktadır [11].

Aşağıda genel olarak kabul edilmiş olan aşınma türleri şu şekilde sıralanabilir: Adhezif aşınma, abrazif aşınma, yorulma aşınması, oksidasyon aşınması, korozyon aşınması, erozyon aşınması.

#### **2.1.1. Adhezif aşınma**

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhezif aşınma, en sık rastlanılan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle hasarları hızlandırıcı etkide bulunmaz. Adhezif aşınma genel olarak, karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre göreceli olarak hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye olan malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir [31]. İki ayrı metal yüzeyi basınç altında bir araya getirildiği zaman, bu iki ayrı yüzeyde bulunan

karşılıklı çıkıntılar gerek sürtünme neticesinde oluşan ısı, gerekse de soğuk kaynaklaşma etkisi nedeniyle birbiriyle bağ yaparlar. Meydana gelen bu bağ, birleşen çıkıntıların diğer bölgelerindeki bağ yapısından daha kuvvetli olabilir. Yüzeylerin birbirine karşı olarak yaptığı hareketin devam etmesiyle birleşen iki çıkıntı, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopacaktır. Bu kopma kaynak noktasında meydana gelmediği zaman, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi meydana gelir. Bu prosesin çalışma koşullarında birçok kere tekrarlanması ile adhezif aşınma kendisini hissettirecek boyutlara ulaşır. Şekil 2.1.'de Adhezif aşınmanın şematik olarak gösterimi verilmiştir [11].



Şekil 2.1. Adhezif aşınmanın şematik olarak gösterimi.

Adhezif aşınma sırasındaki oksitlenme olayını, korozif aşınma ile karıştırmamak gerekir. Yukarıda bahsedilen kopma malzeme moleküllerinin direk temasa geçmelerine imkân verir. Bunun neticesinde de bölgesel kaynak bağları oluşur (soğuk kaynaklanma). Bu sırada eğer izafi hareket de varsa yüzeydeki sıcaklık yükselir ve ergime noktasına kadar ulaşabilir. Böylece kaynaklanma yerinden veya metal yüzeyinden bir miktar parça kopar. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest parçacıklar halinde kalabilecekleri gibi metallere birine bağlı şekilde de bulunabilirler. Her iki durumda da malzeme kaybı (aşınma) meydana gelmekle beraber, ikinci durumda malzemelerin birinden diğerine malzeme transferi söz konusudur [32].

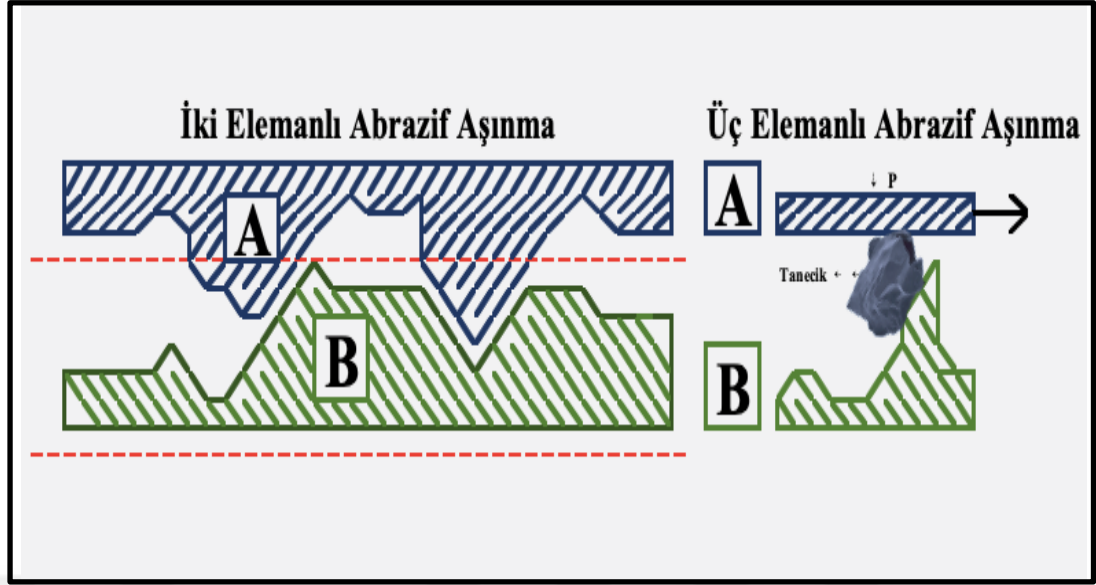
### 2.1.2. Abrazif aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrazif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrazif aşınma en genel olarak, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan parçacıklarla basınç altında etkileşmesi ile sert parçacıkların malzeme yüzeylerinden parçalar koparması şeklinde tanımlanabilir. Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma şekli verilebilir [32]. Bu tip aşınmada sert ve keskin parçacık, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Abrazif aşınma, iki elemanlı ve üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 2.2’de iki ve üç elemanlı abrazif aşınmanın şematik gösterimleri verilmiştir [33].

İki elemanlı abrazif aşınmada malzeme çiftlerinden daha sert olanının yüzeyindeki pürüzler yumuşak olan malzemenin yüzeyini çizerek tahrip eder.

Üç elemanlı abrazif aşınmada ise, aşınan ve aşındıran malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir. Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrazif veya adhezif olarak başlayıp, üç elemanlı abrazif olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro taşlar ve parçalanmış oksit parçaları üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturabilir. Serbest hale geçen mikro talaş parçaları, genellikle ana malzemedan daha sert olduklarından dolayı aşınmayı hızlandırır.

Abrazif aşınmayı etkileyen iki temel faktör, aşındırıcı parçacık ile metal yüzeyi arasındaki sertlik farklılığı ve teması meydana getiren basıncın büyüklüğüdür. Abrazif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden normal yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak kaldırılması açısından daha az iz bırakması sağlanır [34].

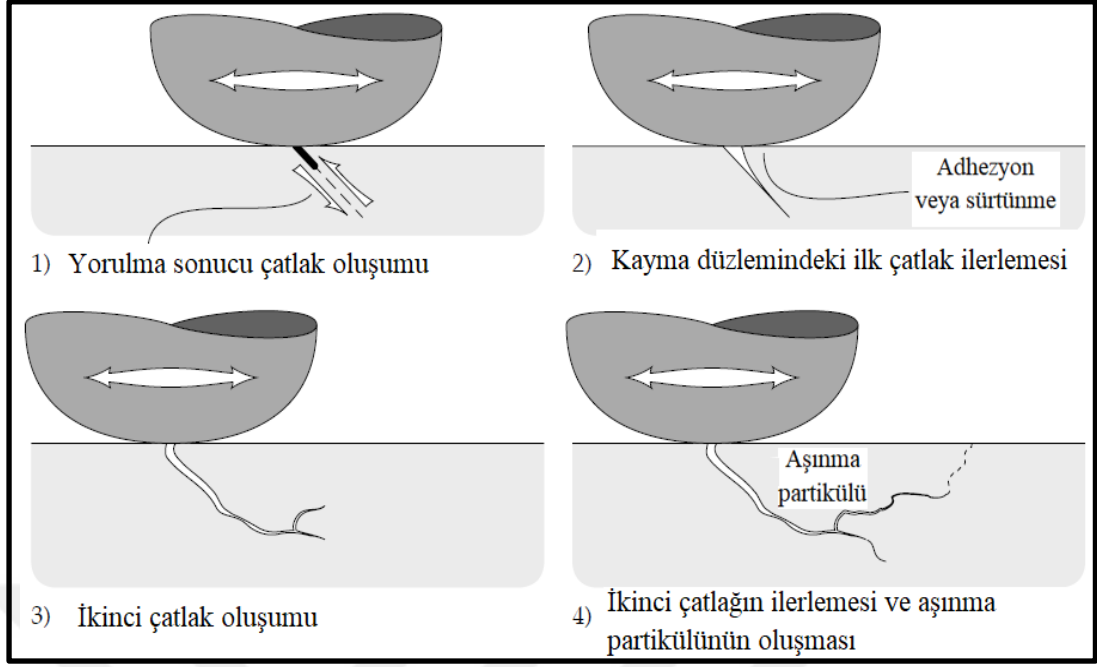


Şekil 2.2. İki ve üç elemanlı abrazif aşınmanın şematik gösterimi.

Abrazif aşınma, katı bir nesne eşit veya daha büyük sertliği sahip olan malzemeye karşı yüklenildiği durumlarda meydana gelir. Örneğin; bu problem yaygın olarak kazı makinelerinin küreklerinde görülür. Uygulanan yük ve hareketin etkisiyle, sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüzleri veya taneleri vasıtasıyla diğerini çizerek üzerinden mikro talaş kaldırması olayı da denilebilir. Bu tanım, katı-katı, katı-mineral, katı-sıvı gibi birçok sürtünme elemanlarında meydana gelen abrazif aşınmayı kapsar. Cisim aşınma altındayken önemli bir plastik deformasyon gerçekleşir [32].

### 2.1.3. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, sürtünme sırasında oluşan gerilmelerin kırılmaya neden olduğu aşınmadır. Sünek malzemelerde yüzeysel kırılma aşınması veya delaminasyon meydana gelir. Sürtünmenin olduğu bölgelerde plakalar oluşur. Gevrek malzemelerde kırılmalar, yüksek çekme gerilmelerinin olduğu bölgelerde meydana gelir. Tribolojik zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen büyüklüğü, zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür [34]. Malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur. Şekil 2.3'de yorulma aşınmasının şematik gösterimi verilmiştir [34].



Şekil 2.3. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi.

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde, plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak yorulma sonucu çok küçük çatlaklar meydana gelir. Bu çatlakların zamanla ilerleyerek büyümesi ve oluşan ikincil çatlakların yüzeye ilerlemesi aşınma partiküllerinin oluşmasına neden olur. Yüzeye ilerleyen ikincil çatlaklar da yüzeyde küçük çukurların oluşmasına neden olur. Bu tür aşınma daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür [35].

#### 2.1.4. Oksidasyon aşınması

En yaygın olarak karşılaşılan kimyasal aşınma prosesleri arasında oksidasyon aşınmasının da yer aldığı bilinmektedir. Metallerin yüzeyinde oldukça ince bir oksit tabakası sürekli olarak meydana gelebilmektedir. Bununla beraber bu oksit tabakası aşınma ve sürtünmeye karşı koruyucu bir tabaka özelliği de gösterebilir.

Kayan iki yüzey arasında meydana gelen sürtünme ısı, oksidasyon aşınma teorisine göre, metal yüzeyi üzerinde bulunan oksit filminin kalınlığını fazlalaştırmak için gereken enerjiyi gerçekleştirebilir. Oksit filmi kritik bir kalınlığa ulaştığında bu çıkıntılar (asperities), aşınma partikülleri oluşturup kırılırlar. Adhezif aşınmayla karşılaştırıldığında oksidasyon aşınmasının bir derece daha düşük olduğu düşünülmektedir. Bu yolla aşındırıcı partikül meydana getirebilme ihtimali kayma

hızı, çevre, sıcaklık ve temas basıncı gibi aşınma ortamı özellikleri ile beraber oksidasyon kinetiği, korozyon potansiyeli, mukavemet, sertlik ve metalin oksijene afinitesi gibi aşınan metalin özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir. Ortam şartları yapışkan, ince ve sert oksit filminin büyümesine izin verdiği durumda aşınma hızı, birbirleriyle temas halinde bulunan yüzeyler arasındaki adhezyonun azalmasına paralel olarak azalabilir [36].

### **2.1.5.Korozyon aşınması**

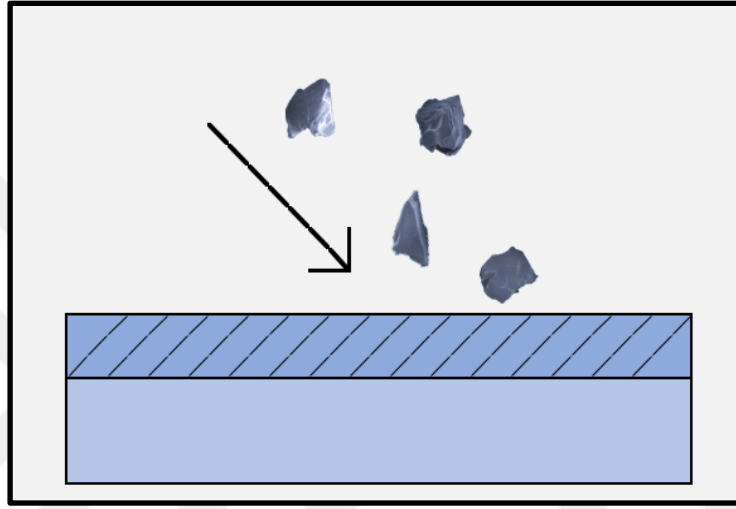
Kimyasal, elektrokimyasal ya da metalurjik etkileşimler kaynaklı, metal ya da metal alaşımlarının çevreleriyle (katı, sıvı ve gaz ortam) yüzeylerinde yapıları birbirlerinden değişik tabakaların meydana gelmesi ve sürtünme hareketi ile meydana gelen bu tabakaların parçalanıp taşınması neticesi oluşan hasar korozyon aşınması olarak adlandırılır. Korozyonun ve sürtünmenin olması korozif aşınma için gerekli bir şarttır. Gaz veya sıvı ile korozif tesir oluşturan bir ortamda sürtünmenin olması sonucu sürtünen yüzeylerde kimyasal reaksiyon neticesinde reaksiyon ürünleri meydana gelir. Bu reaksiyon ürünleri yüzeylere oldukça zayıf yapıştıklarından sürtünme sırasında tahrip olarak, yüzeyden taşınırlar. Bu durum sürekli olarak tekrarlanır. Reaksiyon ürünleri ortamın bileşimine bağlıdır. Oksit ve hidroksit meydana gelmesi normal havada bulunan  $O_2$  ve  $H_2O$  buharının yüzeylerle kimyasal reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Endüstriyel ortamlarda mevcut olan  $SO_2$ ,  $NH_3$ ,  $NO_2$ ,  $H_2S$  ve  $CO_2$  gazlarının havadaki nemle birleşmesi sonucu asitler, bu asitlerin de metal yüzeylerle reaksiyona girmesi sonucu ilgili bileşiklerinin meydana geldiği bilinmektedir. Nihayetinde böyle bir durumun mevcut olduğu ortamda korozif aşınma oldukça hızlı gerçekleşir. Bununla beraber içerisinde ergiyik durumda mevcut olan korozif elementler belli bir süre sonra çözünerek, yağların kalitesine etki gösterirler. Sonuç olarak korozif aşınmanın hızlanmasında rol oynarlar [25].

### **2.1.6.Erozyon aşınması**

Erozyon ortamı ile malzeme yüzeyi arasındaki hızın çok yüksek olması nedeniyle meydana gelen bozunma olayı olarak tarif edilebilir. Gaz veya sıvı ortamında taşınan abrazyon tanelerin yüzeye belirli bir açıda çarpması ile oluşan enerji, katı cismin basınç mukavemetini aştığı zaman, cismin yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelerek yüzeyde kırılmalara sebep olur. Bunun sonucunda yüzeyde aşınma meydana gelir. Bu



şekilde meydana gelen aşınmaya erozyon aşınması denir. Yumuşak malzemeler erozyon aşınmasına çok elverişlidir. Aşındırıcı parçaların büyüklüğü, hızı, şekli, sertliği ve çarpma açısının değeri erozyon aşınma mekanizmasını etkileyen önemli faktörlerdir [37]. Eroziyon aşınma uçaklar uçarken, toz bulutlarıyla karşılaştıklarında gaz türbin bıçaklarına zarar verir, sulu çimento işleme tabii tutma sistemlerinde pompa çarklarının aşınmasına neden olur. Şekil 2.4.'de eroziyon aşınmanın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. Eroziyon aşınmanın şematik gösterimi.

## 2.2. Aşınmanın Azaltılması İçin Gerekli Önlemler

- Çalışma ortamına uygun malzeme seçimi yapılmalı,
- Parçaların tasarımı aşınmanın en az düzeyde olacağı geometride tasarlanmalı,
- Aşınmadan korunmak için tüm malzemenin aşınmaya dayanıklı olması değil sadece aşınmaya maruz kalacak yüzeylere kaplama vb. yöntemlerle aşınma direnci kazandırılması maliyeti düşürerek ve yeterli olacaktır,
- Herhangi bir üretim hatası (gözenek, curuf, çatlak, kalıcı gerilme, istenmeyen mikro yapı, yüksek yüzey pürüzlülüğü) parçanın üretim aşamasına dahil edilmemelidir,
- Malzemeler kullanım sınırlarını (basınç, sıcaklık ve hız vb. gibi) aşacak şekilde kullanılmamalı,
- Viskozitesi yüksek ve basınca dayanıklı yağlayıcılarla malzeme yüzeyinin yağlama ile bozulmaması sağlanabilir,
- Soğutucular bileşenlerin çalışma ortamına uygun olarak seçilmelidir,

- Aşındırıcı parçacıkların, tozların vb. unsurların sisteme girmemesi için yağlayıcı ve soğutucular uygun bir filtreleme işlemine tabi tutulmalıdır,
- Yağlama kontrolleri düzenli olarak yapılmalı ve minimum kullanım limiti periyodik olarak belirlenmeli ve yenilenmeli,
- Çalışma koşullarında sürtünme elemanları malzeme cinsinden seçilmelidir [31].



### **3. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN KAPLAMA İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

Titanyum ve alaşımların benzersiz üstün özelliklerinden dolayı birçok alanda ikamesi olmayan bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Fakat titanyum ve alaşımlarının benzersiz özelliklerinin yanısıra uygulamalarda daha yaygın ve etkin olarak kullanılabilmesi için iyileştirilmesi gereken aşınma direnci gibi zayıf özellikleri de bulunmaktadır. Bu nedenle son yıllarda titanyum alaşımları üzerine yapılan çalışmaların önemli bir bölümü aşınmaya karşı dirençli alaşım dizaynına veya farklı kaplama tekniklerinin uygulanmasına yöneliktir. Aşınma özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla titanyum ve alaşımlarına uygulanabilen birçok fiziksel ve kimyasal kaplama yöntemi bulunmaktadır [38,39].

Malzeme yüzeyleri, çalıştıkları ortamlara verdikleri tepkiden dolayı hizmet koşullarında malzemelerin performansında çok önemli bir rol oynamaktadır. Titanyum ve alaşımları istenen amaçlar için kullanılırken gerilme altında plastik deformasyona tabi tutulur. Bununla birlikte yüzeylerinde zayıf ve üniform olmayan kirlenmiş oksit tabakası oluşmaktadır. Bu gibi yüzeyler kullanıma uygun olmadığından, bazı yüzey işlemlerinin titanyum ve alaşımlarına uygulanması gerekmektedir. Yüzey işlemlerinin uygulanmasının bir başka nedeni, yüzeyin istenen özelliklerinden bazılarının, malzemenin iç kısımlarından farklı olması gerektiğidir [30]. Örneğin havacılık alanında kullanılacak bir malzemenin hafif olmasının yanısıra aşınma direncinin de yüksek olması istenmektedir. Titanyum ve alaşımlarına uygulanan bazı yüzey geliştirme uygulamaları Tablo 3.1’de verilmiştir [40]. Titanyum ve alaşımlarının zayıf aşınma özellikleri nedeniyle, endüstride kullanımı sınırlıdır. Titanyum ve alaşımlarının aşınma direncini arttırmak için, yüzey sertliğini artıran, aşınma miktarını azaltan ve korozyon direncini artıran çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Tekstürler ve kimyasal işlemler olmak üzere bu yüzey işlemleri literatürde iki grupta toplanmaktadır. Titanyumun karbon, oksijen, bor ve azot gibi bazı elementlere yüksek afinitesine bağlı olarak, difüzyon mekanizmasına dayalı yüzey işlemi titanyum ve

alaşımına uygulanabilir. Ek olarak, titanyum ve alaşımlarının aşınma direnci, termal oksidasyon teknikleri kullanılarak artırılabilir [41].

Tablo 3.1. Titanyum ve alaşımlarına uygulanabilen bazı yüzey işlemleri.

Yüzey Modifikasyon Metotları	Değiştirilen Yüzey Tabakası	Amaç
Mekanik Metotlar İşleme Parlatma Öğütme Yakma	Pürüzlü veya düz yüzeyler elde etmek.	Bağlarda adhezyonu geliştirmek için pürüzlü temiz yüzeyler üretmek
Kimyasal Metotlar Asidik İşlem	<10 $\mu\text{m}$ yüzey oksit tabakası.	Oksit tabakasının ve kirliliğin yok edilmesi.
Alkali İşlem	~1 $\mu\text{m}$ sodyum titanat jel.	Biyouyumluluğu ve biyoaktiviteyi geliştirmek.
Hidrojen Peroksit İşlemi	~5 $\mu\text{m}$ yoğun ve poröz dış oksit tabakası.	Biyouyumluluğu ve biyoaktiviteyi geliştirmek.
Sol-Jel	~10 $\mu\text{m}$ kalınlığında $\text{TiO}_2$ , kalsiyum fosfat, silika gibi ince filmler.	Biyouyumluluğu ve biyoaktiviteyi geliştirmek.
Anodik Oksidasyon	~10 $\mu\text{m}$ ' dan 40 $\mu\text{m}$ kalınlığa kadar $\text{TiO}_2$ filmler.	Korozyon dayanımı ile beraber biyouyumluluğu ve biyoaktiviteyi geliştirmek.
Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB)	~1 $\mu\text{m}$ TiN, TiC, TiCN elmas ince filmler.	Aşınma dayanımı, korozyon dayanımı ve kan uyumluluğunu geliştirmek.
Fiziksel Metotlar Termal Sprey Alev Sprey Plazma Sprey HVOF DGUN	~30 $\mu\text{m}$ ' dan ~200 $\mu\text{m}$ ' na kadar Ti, $\text{TiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ZrO <sub>2</sub> benzeri kaplamalar.	Aşınma dayanımı, korozyon dayanımı ve biyolojik özellikleri geliştirmek.
Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) Buharlaştırma İyon İmplantasyonu Sıçratma	~1 $\mu\text{m}$ TiN, TiC, TiCN elmas ve karbon ince filmler.	Aşınma dayanımı, korozyon dayanımı ve kan uyumluluğunu geliştirmek.
Glow Deşarj Plazma	~1 $\mu\text{m}$ ' dan 100 nm' ye kadar değiştirilmiş yüzey.	Temiz, steril, oksit, nitrat yüzeyler oluşturmak.

Termal oksidasyon işleminden sonra, oksidasyon konsantrasyonuna bağlı olarak sertlik yüzeyden metalin daha iç kısımlarına doğru yavaş yavaş azalır. Bu yöntem, kolay olması nedeniyle titanyumun yüzey sertliğini artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Koruyucu ve aşınma özelliklerini artıran titanyum ve alaşımlarının yüzeylerinde bir oksit filminin oluşumu, genellikle termal oksidasyon veya elektrokimyasal yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir. Termal oksidasyon veya nitrasyon gibi işlemlerin bir sonucu olarak, titanyum yüzeyleri 1000 ila 3000 HV arasında değişen sert ve aşınmaya dayanıklı sertliklerle kaplanabilir [42].

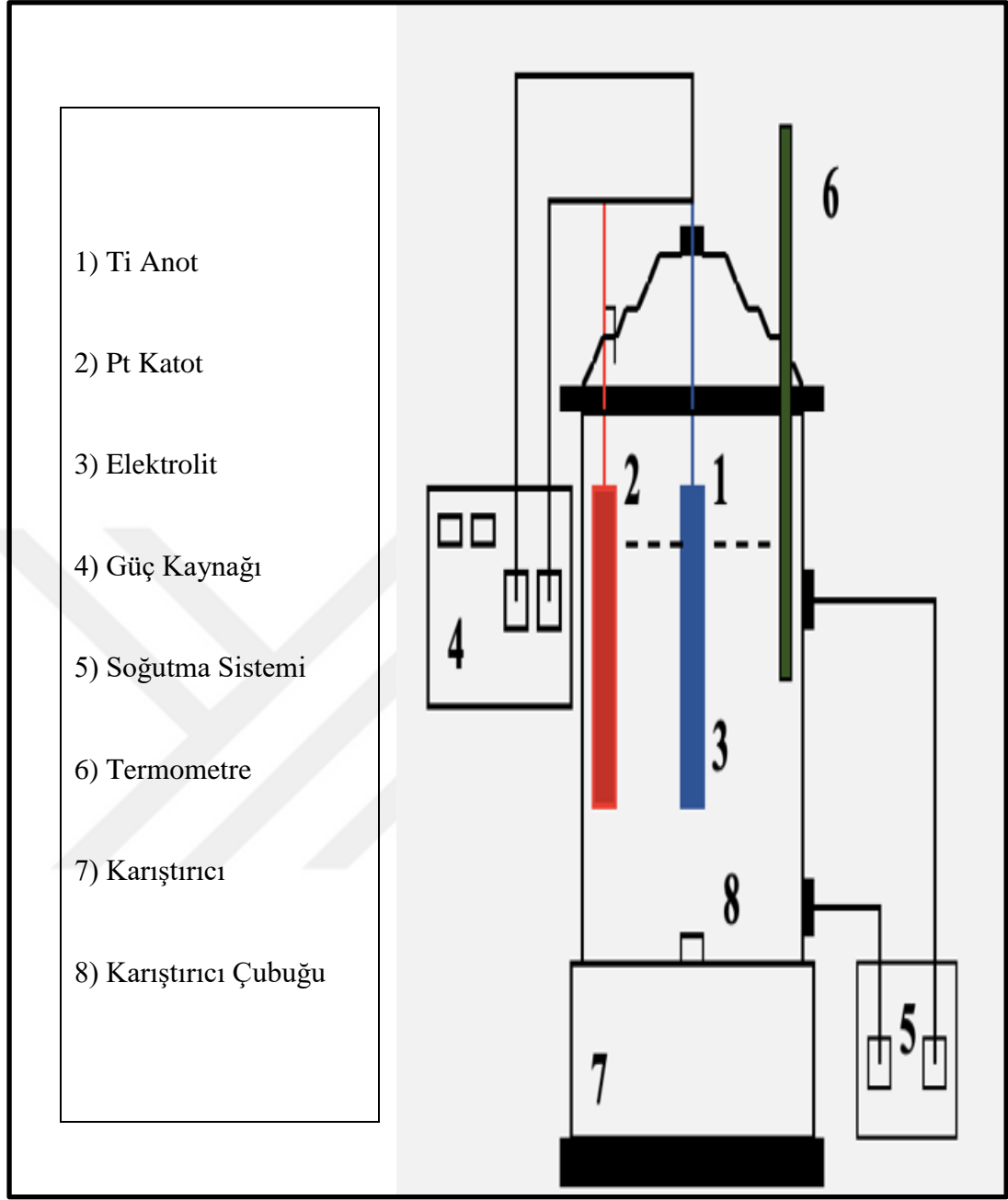
### **3.1. Elektrokimyasal Yüzey İşlemleri**

Elektrokimyasal yüzey işlemleri, elektrolit içine yerleştirilmiş elektrik yüklü elektrot yüzeylerinde farklı kimyasal reaksiyonların meydana gelmesine dayanmaktadır. Elektrolitik parlatma ve eloksal olarak da adlandırılan anodik oksidasyon, en yaygın kullanılan elektrokimyasal yüzey işleme teknikleridir.

Bu iki yöntemde de yüzey işlemi göreceğ olan numune elektrokimyasal devreye anot olarak bağlanır. Devreye enerji verildiğimizde akım ile birlikte elektrotlarda indirgenme, oksidasyon reaksiyonları ve elektrotlar arasında iyon iletimi oluşur. Belirlenen elektrolit ve elektrot potansiyeli, akım şiddeti, sıcaklık gibi proses parametrelerine bağlı olarak anotta yüzey işlemleri gerçekleştirilebilir [42,43].

#### **3.1.1. Anodizasyon**

Anodizasyonda oksijen geçişi ve metalin elektriksel alanının etkisiyle anot yüzeyince oksit filmi oluşur. Anodizasyon metallerin yüzeyinde farklı tipte koruyucu oksit filmler oluşturmak için sıkça kullanılan bir yöntemdir. Titanyuma yapılan anodizasyon uygulamalarıyla uzay ve havacılık endüstrisi için çok iyi yapışma özelliklerine sahip olan kaplamalar oluşturulmaktadır. Anodizasyon yöntemi ilave olarak renklendirme işlemlerinde, gözenekli kaplamaların oluşturulmasında ve korozyon dayanımı sağlamak için oksit tabakası oluşturulmasında da kullanılmaktadır. Titanyuma uygulanan anodizasyon işlemlerinde genelde  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{H}_3\text{PO}_4$  gibi seyreltik asitler kullanılmaktadır. Anodizasyon düzeneği Şekil 3.1'de gösterilmiştir [43].



Şekil 3.1. Anodizasyon düzeneği ve elemanları.

Titanyum ve alaşımlarına anodizasyon yüzey işlemi ile oluşturulan oksit filmler karmaşık bir mikroyapı ve morfoloji sergilerler. Oksit film kalınlığının artmasıyla doğru orantılı olarak yüzey pürüzlülüğü de artış göstermektedir [44].

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ortamında titanyum üzerinde farklı işlemler uygulanarak anodizasyon ile oluşturulan bazı filmler, mikroyapı ve özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir [43,44].

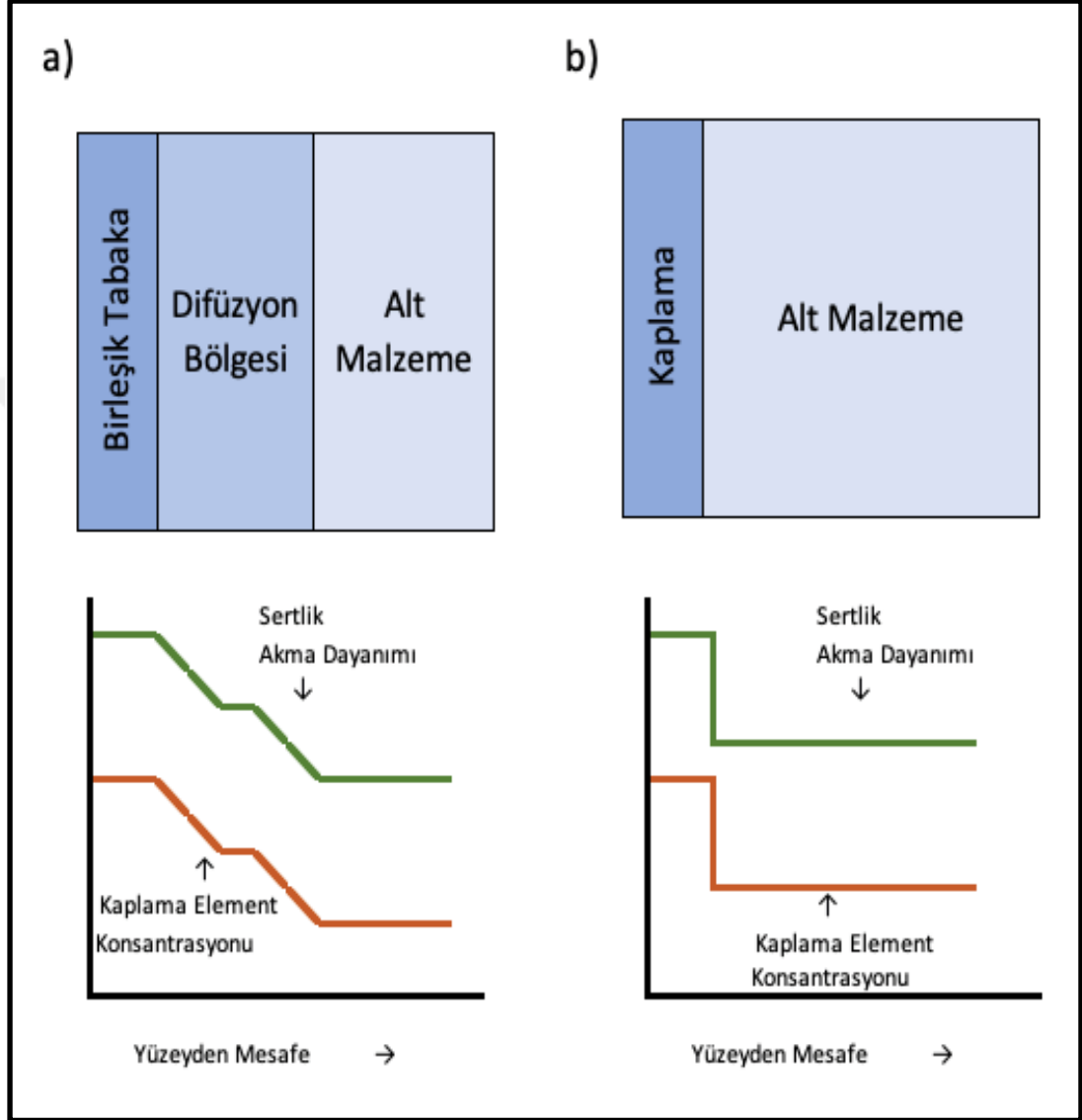
Tablo 3.2. Titanyum ve alaşımlarının yüzeylerine farklı işlemlerle oluşturulan anodizasyon filmleri ve bazı özellikleri.

İşlem	Ana Oksit Kompozisyon	Oksit Kalınlığı	Morfoloji ve Yapı
100 V altında H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> veya asetik asitte anodizasyon	TiO <sub>2</sub> ve alaşım elementleri oksitleri	~10-200 nm	Alt metal yapısına bağlı olarak kısmi kristalin (anataz ve/veya rutil)
Kromik asit anodizasyonu (10-40 V)	TiO <sub>2</sub> ve Cr izleri	<100 nm	Nanoporoz (~10-100 nm)
Plazma anodizasyon (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> veya karışımlarından)	TiO <sub>2</sub> ve alaşım elementleri oksitleri	<20 µm	Pürüzlü ve mikro poroz (~0,1-1µm) kısmi kristalin anataz veya rutil
Plazma anodizasyon (Ca ve P içeren elektrolitlerde)	TiO <sub>2</sub> ve belirgin miktarda P ve Ca (genellikle CaTiO <sub>3</sub> )	<20 µm	Pürüzlü ve mikro poroz (~0,1-1µm) amorf
Metanolik elektrolitte (alkol türevi kaplamalar) anodik oksidasyon	TiO <sub>2</sub> ve alaşımdan Al.	<40 µm	Yoğun ve uniform amorf

### 3.2. Difüzyonlu Yüzey İşlemleri

Difüzyonlu yüzey işlemlerinde metalin yüzey sertliğinin artırılarak aşınma direncinin, tokluk ve yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Difüzyonlu yüzey işleminde diğer yüzey işlemlerinden farklı olarak kaplanan malzemenin alt yüzeyinde de akma mukavemetinde ve sertlik değerlerinde artış gerçekleşmektedir. Bu artış Şekil 3.2a'da gösterilmiştir. Difüzyonlu yüzey işlemlerinde bu sayede alt yüzey kaplamaya mekanik destek olmakta ve hataları en aza indirmektedir. Fiziksel buhar biriktirme ve benzeri kaplama yöntemlerinde bu gibi alt yüzey optimizasyonu olmadığından metal ve kaplama ara yüzeyi arasında akma mukavemeti ve sertlik değerlerinde hızlı bir düşüş gerçekleşmektedir [45]. Titanyum ve alaşımlarının aşınma direncini tokluk ve yüzey özelliklerini iyileştirmek için Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) ve Kimyasal

Buhar Biriktirme (KBB) gibi kaplama işlemleri ile termal oksidasyon ve nitrasyon gibi difüzyonlu yüzey sertleştirme işlemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. İki farklı yöntemin şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir [45].



Şekil 3.2. a) Difüzyon ile yüzey işlemi uygulanmış birleşik tabakaların şematik gösterimi b) Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) yöntemiyle kaplanmış sert kaplama.

### 3.2.1. Termal oksidasyon yüzey işlemi

Reaktif bir metal olan titanyumun normal atmosferik şartlarda oda sıcaklığında yüzeyinde ince bir oksit filmi oluşur. Titanyum yüzeyinde oluşabilecek reaksiyonlara karşı titanyumu koruyan bu oksit film tabakası genellikle birkaç nanometre kalınlığındadır [46].



TiO, TiO<sub>2</sub>, Ti<sub>2</sub>O, Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti<sub>3</sub>O<sub>2</sub>, Ti<sub>3</sub>O, Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>, şeklinde farklı oksitleri bulunan titanyumun en kararlı oksiti TiO<sub>2</sub> dir [47].

### **3.2.2.Nitrürleme ile yüzey işlemleri**

Titanyum ve alaşımlarının nitrürleme işlemi azot gazı veya azot gazı bileşikleri bulunan ortamda difüzyon prensibine dayanarak yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Nitrürleme parametreleri değiştirilerek yapılacak yüzey işleminin nitelikleri değiştirilebilir [48].

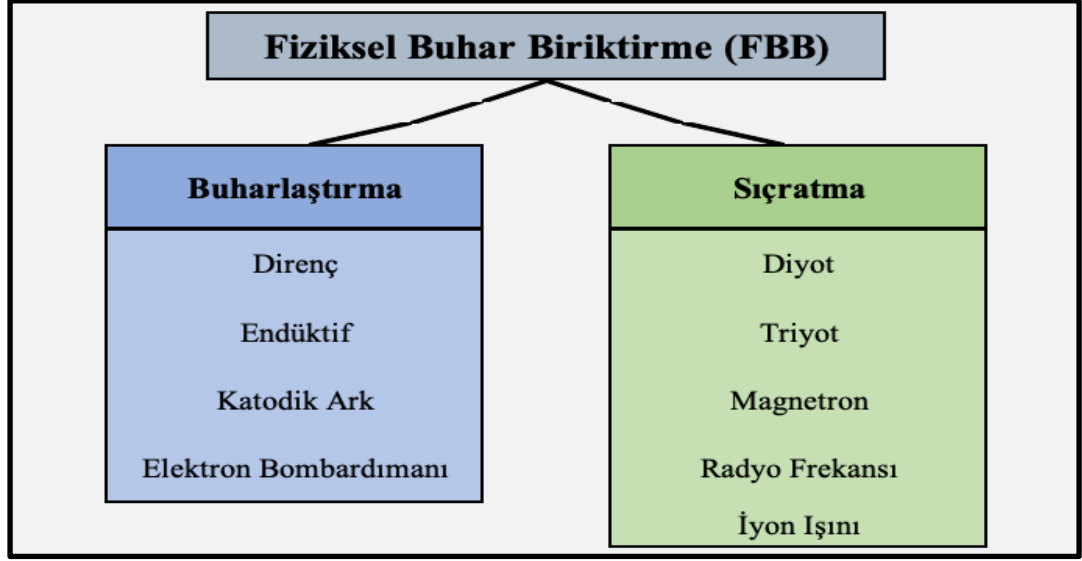
Titanyum ve alaşımlarının zayıf aşınma dayanımlarını arttırmak için yüzeylerinin nitrür tabakasıyla kaplanması bir diğer yüzey işlemidir. Titanyum nitrür kaplamalar yüksek sertlikleri, üstün aşınma ve korozyon dirençleri ve termal kararlılıkları ile ticari uygulamalarda da tercih sebebi olmaktadır [49].

### **3.3. Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) Yüzey İşlemi**

Titanyum ve alaşımlarına uygulanan kaplama yöntemlerinden bir diğeri de fiziksel buhar biriktirme (FBB) yüzey işlemidir. Fiziksel olarak buharlaştırılacak bir metalin vakum ortamında kaplanacak metal üzerine biriktirilmesi ile yapılmaktadır. Kaplanacak malzemenin buharlaştırılması iyon bombardımanı veya ısı verilerek yapılır.

FBB yüzey işleminde kaplanacak malzemenin katı veya sıvı halden buhar fazına geçmesi, oluşan buhar fazının kaplanacak malzemeye taşınması ve malzemenin yüzeyinde yoğunlaşması aşamaları bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. KBB ve elektrolitik yüzey işlemlerinde tüm bu aşamalar birbirine bağlıdır ve tekil olarak kontrol edilemez [50].

FBB yüzey işlemleri Şekil 3.3’de buharlaştırma ve sıçratma olmak üzere iki ana grupta toplanmıştır. Her iki grupta yer alan yüzey işlemlerinde de prosese reaktif gaz ilave edilmesi halinde yüzey işleminin adının başına “reaktif” tanımlaması; kaplanan malzemeye negatif potansiyel verilmesi ve atom iyonizasyonu yapılması durumunda ise yüzey işlemi adı “iyon kaplama” olarak değişmektedir [48].



Şekil 3.3. Buharın oluşturulma yöntemine göre FBB yüzey işlemleri.

### 3.3.1. Buharlaştırma

Arayüzey bağlantısı ve mikroyapı özelliklerinin kritik olmadığı dekoratif, kozmetik ve optik uygulamalarda buharlaştırma ile yapılan yüzey işlemi tercih edilmektedir. Reaktif gazlar kullanılan uygulanan yüzey işlemleri ise kompleks şekilli malzemelere uygulanacak yüzey işlemlerinde tercih edilmektedir [50]. Endüktif Buharlaştırma, Elektron Bombardımanı ile Buharlaştırma ve Katodik Ark Buharlaştırma gibi türleri bulunmaktadır.

Katodik Ark Buharlaştırmada TiN, MoN, ZrN ve CrN'den oluşan kaplamaların üretilmesinde kullanılmaktadır. İletken olmaları şartı ile çok bileşenli katod malzemeleri kullanılarak çok bileşenli kaplama işlemleri gerçekleştirilebilir. Katodik ark yüzey işleminin dezavantajı buharlaştırma esnasında bir kısım katod malzemesi sıvı faza geçerek alt malzemeye taşınmasıyla yüzey işlemi kalitesini bozmasıdır. Bu yöntem ile aşınmaya dayanıklı, yüksek sertlikte karbür, nitrür, karbonitrür vb. kaplamalar yapılarak yüksek aşınma dayanımı istenen otomotiv, havacılık ve endüstriyel kullanıma hitap eden malzeme ihtiyaçları karşılanmaktadır [51].

### 3.3.2. Sıçratma

Kaplama malzemesine enerji yüklü parçacıklarla yapılan bombardıman sonucu sıçrayan atomların kaplanacak malzeme üzerine biriktirilmesi presibiyle yapılan yüzey

işlemdir [52]. Diyot, triyot, magnetron, radyo frekansı, iyon ışını olarak yapılaş şekillerine göre tasnif edilmektedir.

### **3.4. Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB) Yüzey İşlemi**

KBB yüzey işlemi düşük maliyetle, vakum ortamı ihtiyacı olmadan çok düşük oranlarda empürite içeren, üniform titanyum ve alaşımlarının yanısıra hemen hemen tüm malzemelere uygulanabilen bir yüzey işlemidir.

Dezavantajı ise diğer yöntemlere nazaran yüksek çalışma sıcaklığı, yüzey işlemi esnasında oluşan zehirli, patlayıcı veya korozif kimyasallar oluşturmalarıdır [53].

KBB yöntemiyle oluşturulan ince filmlerin basamaklı yüzey örtüsü FBB ile üretilenlerden daha iyidir. Bu yüzden KBB işlemi kompleks parçaların kaplanmasında, mikro elektronik aygıtlarının kaplanmasında ve titanyum ve alaşımlarının mekanik ve biyolojik özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılırlar [54].

### **3.5. Titanyum Nitrür Kaplama**

Titanyum ve alaşımlarının zayıf tribolojik özelliklerini iyileştirmek için nitrürleme gibi yüzey işlemleri oldukça yaygın olarak uygulanmaktadır. Titanyum nitrürün (TiN) korozyon direncinin yüksek, kimyasal olarak kararlı, ısıl olarak yalıtkan, yüksek yük taşıma kapasiteli, düşük sürtünme ve aşınma davranışları sergileyen sert kaplama malzemesi olması tıp, havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak tercih edilmesine yol açmıştır.

Titanyum nitrür kaplamalar KBB yüzey işlemi yöntemiyle 650-1600°C arasında değişen sıcaklıklarda uygulanabilmektedirler. Kesici takımlar gibi malzemelerde bu uygulanmada herhangi bir sorun yaşanmazken titanyum gibi allotropik dönüşümlere uğrayan metallere bu yüzey işleminin yapılması zorluklar çıkarmaktadır [55].

FBB yüzey işleminde kullanılan düşük sıcaklıklar ile KBB yöntemiyle elde edilebilen üniform kaplama mekanizmaları ortaklaştırılarak plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PDKBB) yöntemi geliştirilmiş ve bu sayede TiN kaplamalar 250-600°C sıcaklık aralığında CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, TiCl<sub>4</sub> gaz karışımlarıyla titanyum ve alaşımlarına uygulanabilmektedirler [56].

TiN kaplamalar oluşturmak için kullanılan diğer bir yöntem olan termal spreyci işlemi; malzemelerden termal olarak ergitilen sıvı damlacıkların malzeme yüzeyine itilerek partiküllerin yüzeye yapışarak yüzeye bağlanması esasına dayanır. Fakat uzun süreli kullanımlarda bu kaplamaların yavaş yavaş yüzeyden ayrıldığı tespit edilmiştir. Bu olumsuzluğun önüne geçmek için daha gelişmiş termal püskürtme yöntemleri olan lazer püskürtme ve yüksek hızlı oksiyakıt püskürtme yöntemleri kullanılmaktadır [57].

### 3.6. Titanyum ve Alaşımlarının Nikel ile Kaplanması

Nikel atom numarası 28, atomik ağırlığı ise 58,7 g/mol olan nikel, katı haldeyken 8,9 g/cm<sup>3</sup>, kaplanmış haliyle 8,85 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğunda, gümüş renkli bir metaldir. Nikelin valansı (değerliği) 2'dir. Saf nikel, sünek ve sağlamdır çünkü erime noktasına kadar (1453°C) yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahiptir. Nikel korozyona karşı yüksek dirençli, oldukça sert ve oldukça dayanıklı bir metaldir. Nikelin elektriksel direnci kabaca bakırın beş katıdır.

Nikel ve alaşımları çinkodan sonra kaplaması en sık yapılan metaldir. Bunun nedeni nikelin aşınma direnci, sertliği ve korozyona yüksek direncidir. Bu sebeple kaplama malzeme olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Ni-Cr-B-Si-C ailesi gibi sert nikel alaşımları, aşınma direnci ve korozyon direncinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır [58].

Yamanoğlu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada saf demir tozları üzerine vakum atmosferi altında tek eksenli sıcak pres kullanarak sert nikel alaşımı tozları kaplamışlardır. Grafit kalıp içinde saf demir tozlarının üzerine sert nikel alaşım tozları yerleştirilerek 1000°C'de 40 MPa basınç ile 10 dakika sinterleme işleminin sonucunda güçlü bir arayüzey bağlantısı elde edilmiş, gerçekleştirilen Vickers sertlik testi ve kuru sürtünme testleri ile de nikel kaplamanın sertlik ve aşınma özelliklerinin geliştirildiği ortaya konmuştur [59].

Malzemenin aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi için daha sert bir malzeme ile kaplanması tercih edilen bir yöntemdir. Literatürdeki bazı kaplama işlemleri ve alınan sonuçlar Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3. Kaplama işlemleri ve elde edilen sonuçlar.

Yazar	Kaplama Malzemesi	Kaplanan Malzeme	Aşındırma Yöntemi	Bulgular ve Sonuçlar
Heer vd. [60]	Silisyum Dioksit	Saf Titanyum	Kuru sürtünme aşınma testi	Yapılan kaplama ile malzemenin kaplamasız haline göre aşınma miktarı azalmıştır.
Ghazanfari vd. [61]	Titanyum Karbür	Demir Alüminit	Kuru sürtünme aşınma testi	Yapılan kaplama ile malzemenin kaplamasız haline göre aşınma miktarı azalmıştır. Kaplama malzemesinin sertliği artırılarak da kaplanmış malzemeler arasında sertlik oranının artmasıyla aşınma miktarı daha da düşmüştür.
Wang vd. [62]	Niyobyum (Yüzey alaşımlama)	Saf Titanyum	Kuru sürtünme aşınma testi	Gerçekleştirilen testler sonucunda niyobyum alaşımlanmış numune yüzeyinde (Nb-Ti) saf titanyum yüzeyine göre aşınma miktarı azalmış, aşınma iz genişliği düşmüştür.
Singh vd. [63]	Silisyum Nitrür (Yüzey alaşımlama)	Titanyum	Kuru sürtünme aşınma testi	Alaşımlanan silisyum nitrür oranının artırılmasına paralel olarak aşınma miktarı düşmüştür.

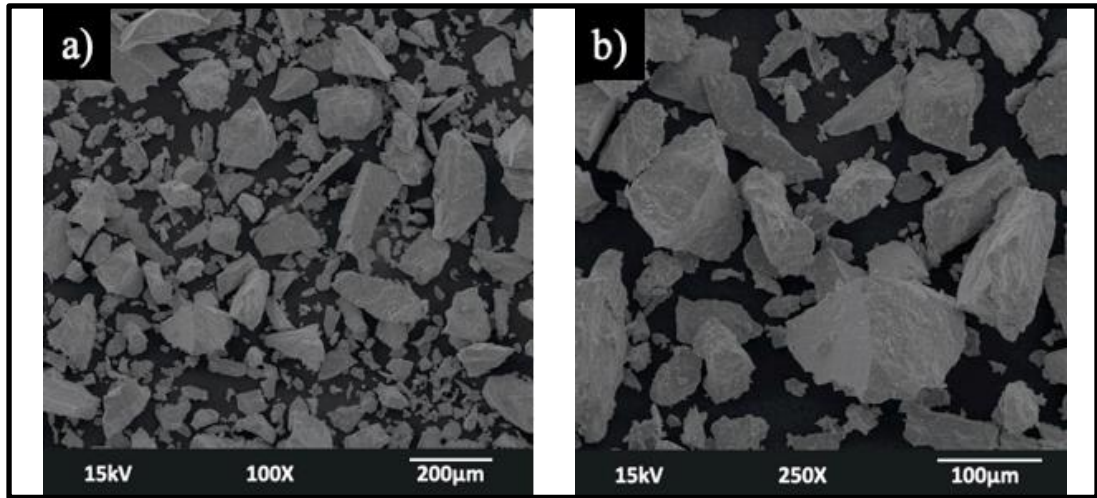
#### 4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada titanyumun aşınma özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla titanyum esaslı malzemeler arasında en fazla kullanım alanı bulan Ti6Al4V alaşımı üzerine nikel esaslı tozlar kaplanmıştır. Yüksek sertliğe sahip nikel tozları titanyum tozları üzerinde bir kaplama tabakası oluşturacak şekilde basınç destekli sinterleme yöntemi ile yoğunlaştırılmıştır. Dolayısıyla tez kapsamında titanyum esaslı malzemelerin kaplanması ve aynı zamanda sinterlenmeleri söz konusudur. Sonuç olarak eş zamanlı sinterlenmiş ve kaplanmış numuneler elde edilmiştir. Ti6Al4V üzerine nikel kaplanması ile üretim parametreleri belirlenmiş, farklı uygulama alanlarında Ti6Al4V kullanım alanı bulması nedeniyle kuru sürtünme şartlarında aşınma testleri uygulanmıştır. Yukarıda bahsedildiği gibi titanyum alaşımları arasında en fazla kullanım alanı bulan Ti6Al4V alaşımı özellikle havacılık sektöründe kullanıma potansiyeli olduğundan kuru sürtünme aşınma şartlarına ilave olarak ayrıca erozif aşınma testleri de gerçekleştirilmiştir [64]. Bu doğrultuda tez kapsamında takip edilen işleyişi gösteren şematik bir çizim Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Tez kapsamında takip edilen sürecin şematik gösterimi

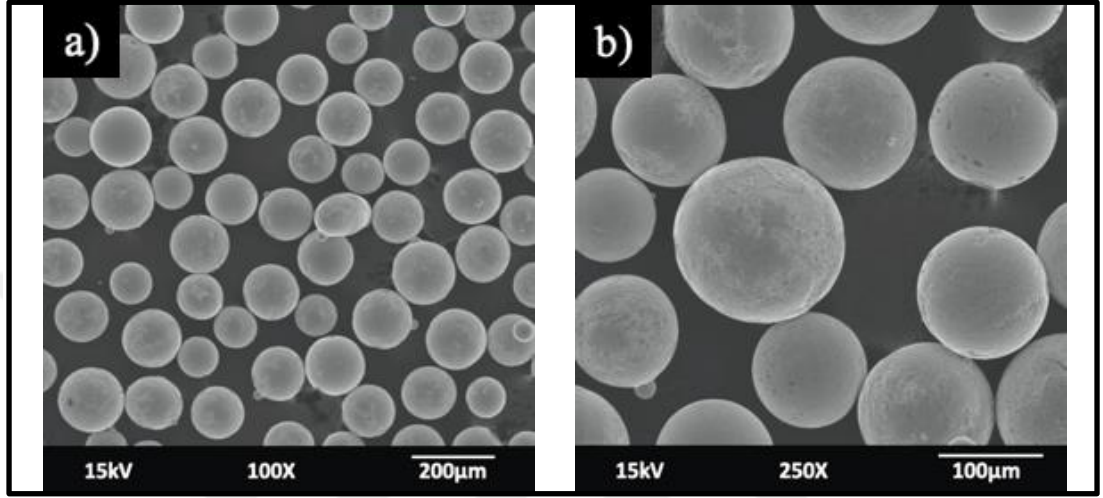
Tez çalışması kapsamında Ti6Al4V alaşımı ve nikel alaşımı tozları kullanılmıştır. Ti6Al4V alaşımı tozları Çin'de bulunan Baoji RuiHong Metal Materials Co. Ltd. Şirketinden temin edilmiştir. Ti6Al4V alaşımı tozunun SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.2'de verilmiştir. Ti6Al4V alaşımı tozların boyutları  $<200\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Ti6Al4V alaşım tozları kimyasal toz üretim yöntemlerinden birisi olan hidrid-dehidrid prosesi ile üretilmiştir. Bu kimyasal prosesin gerektirdiği şekilde tozların şekilleri düzensiz küreselden uzak bir formdadır. Aslında bu tarz kaba sayılabilecek bir boyut ve düzensiz şekle sahip partiküllerden oluşan tozlar, geleneksel toz metalurjik proseslerle malzeme üretimi süreçlerinde nihai malzemenin özelliklerine olumsuz etki edecek niteliktedirler. Kaba boyutlu partiküller düşük yüzey enerjileri nedeniyle sinterlemeye olumsuz etki ederler ve yoğunluk beklendiğinden daha düşük elde edilir. Karmaşık şekilli partiküllerde özellikle kalıbın doldurulup ham dayanım sağlanması sırasında hızlı hareket edemeyeceklerinden yani akış hızları düşük olacağından yine kaba boyuttan gelen olumsuz özellik gibi nihai malzemenin yoğunluğu düşük olacaktır. Fakat bu tez kapsamında geleneksel toz metalurjik proseslerin aksine basınç destekli bir sinterleme yöntemi seçildiğinden kaba boyutlu ve karmaşık şekilli tozların dezavantajı basınç ve sıcaklığın eş zamanlı kullanılması sayesinde elimine edilmiş olmaktadır. Basınç ve sıcaklığın aynı anda kullanılması ile tozlar kolaylıkla deforme olarak istenen yoğunluk değerine rahat bir şekilde ulaşılır.



Şekil 4.2. Tez kapsamında kullanılan Ti6Al4V alaşım tozlarının SEM görüntüleri, a) düşük büyütme (100X), b) yüksek büyütme (250X).

Ti6Al4V alaşım tozları sert nikel alaşımı tozlarıyla kaplanmıştır. Nikel alaşım tozlarına (15.5Cr-4.3Si-4.2Fe-2.9B-0.7C-kalan Ni) ait SEM görüntüleri ise Şekil

4.3'te gösterilmiştir. Nikel alaşım tozları SENTES-Bir firmasından (İzmir) temin edilmiştir. SEM görüntülerinden de görüleceği gibi bu tozlar tipik bir gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen tozlardır. Tozların boyutları  $<150\mu\text{m}$  olarak ölçülmüş ve gaz atomizasyonunun doğası gereği büyük ölçüde küresel şekle sahiptirler.



Şekil 4.3. Tez kapsamında kullanılan nikel tozlarının SEM görüntüleri, a) düşük büyütme (100X), b) yüksek büyütme (250X).

Alaşımlama ve kaplama işlemlerinin ortak amacı malzemelerin yüksek mekanik ve fiziksel özelliklerinden ödün vermeden ekonomik ve uzun ömürlü parça imal etmektir. Ancak ekonomik kısıtlamalar titanyum ve titanyum içerikli malzemelerin mümkün olduğunca düşük enerjili ve yüksek hızda üretimini zorunlu hale getirmiştir. Bu sebeple son yıllarda geleneksel üretim yöntemlerine nazaran titanyum ve titanyum alaşımlarının toz metalurjik yöntemlerle üretimi ilgi çekici hale gelmiştir. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların nihai ürün şeklinde elde edilmesi ve ikincil işleme ihtiyaç duyulmaması, bu yöntemi oldukça cazip hale getirmektedir [65,66].

#### 4.1. Sıcak Pres ile Numunelerin Üretimi

Partiküllerden yola çıkarak yoğunlaştırma işlemleri toz metalurjik proseslerden olan tek eksenli sıcak pres ile gerçekleştirilmiştir. Sıcak preslemede tozlara sıcaklık ve basınç eş zamanlı uygulanır. Bu sayede daha kısa sürede daha düşük sıcaklıklarda yüksek yoğunluklara ulaşılabilir [67].



Yamanoğlu çalışmasında saf magnezyumu sıcak pres kullanarak n alaşımlı Al-Cu-Mg alaşımı ile in-situ olarak kaplamıştır. Üretilen numunelerin sertlik testleri, mikroyapı karakterizasyonları ve kuru sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar neticesinde sıcak pres tekniği başarı ile uygulanmış, magnezyum ve alüminyum arasında uyumlu bir bağlanma elde edilerek saf magnezyumun sertlik değerinden yaklaşık %30 oranında yüksek değer elde edilmiştir. Al-Cu-Mg kaplama ile aşınma davranışının iyileştirildiği testlerde ortaya konulmuştur [68].

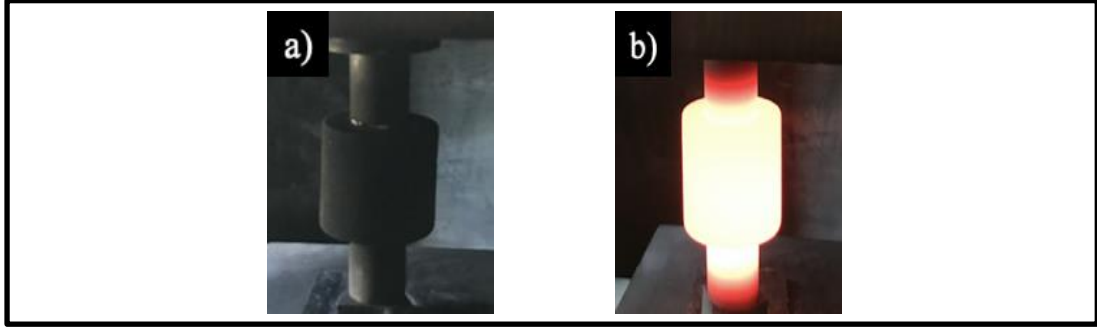
Tez alışmasında Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda bulunan DIEX marka sıcak pres cihazı kullanılmıştır. Cihazın görüntüsü Şekil 4.4'de verilmiştir. Bu yöntem hem enerji maliyeti açısından bir avantaj ortaya koymakta hem de üretilmesi planlanan malzemenin yüksek sıcaklıklara daha kısa süre maruz kalmasıyla içyapının kabalaşmadan yoğunlaşması mümkün olabilmekte ve mekanik zeliklerde düşüş önemli derecede azalmaktadır. Tez kapsamında kullanılan sıcak presin çalışma prensibi bir kalıp içinde konan tozların kalıptan geçen akıma karşı gösterdiği direnç üzerinden ısınmanın gerçekleştirilmesidir.



Şekil 4.4. Diex marka sıcak pres cihazı.

Sıcak pres yöntemiyle tozların sinterlenebilmesi için grafit kalıplar kullanılmıştır (Şekil 4.5. a). Grafit kalıp tercih edilmesinin sebebi yüksek ısıl ve elektrik iletkenliğine sahip olmasıdır. Ayrıca grafit yağlayıcı özelliklerinden dolayı bu gibi basınç destekli

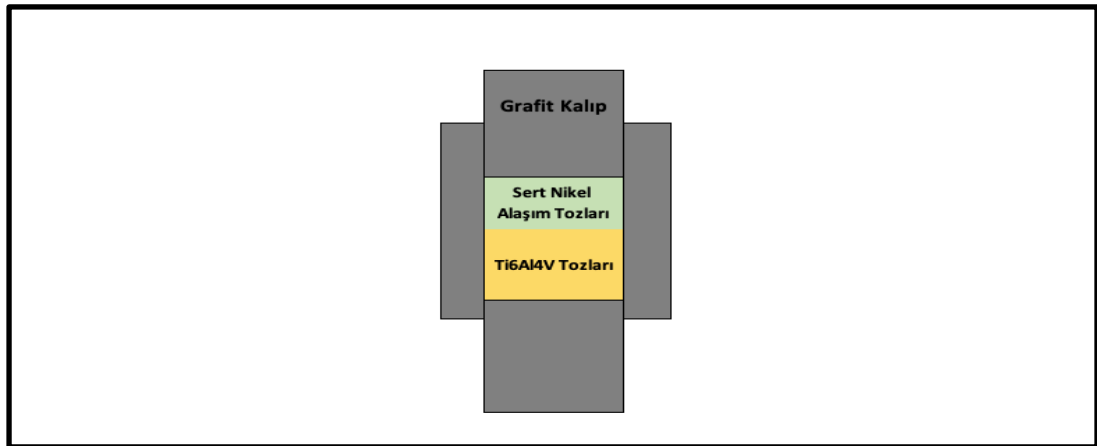
sinterleme yöntemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Kalıbın sinterleme sırasında yüksek sıcaklıktaki görüntüsü Şekil 4.5b’de verilmiştir.



Şekil 4.5. a) Sinterleme öncesi grafit kalıbın sıcak pres içindeki görüntüsü b) Sinterleme esnasında yüksek sıcaklıkta grafit kalıbın görüntüsü.

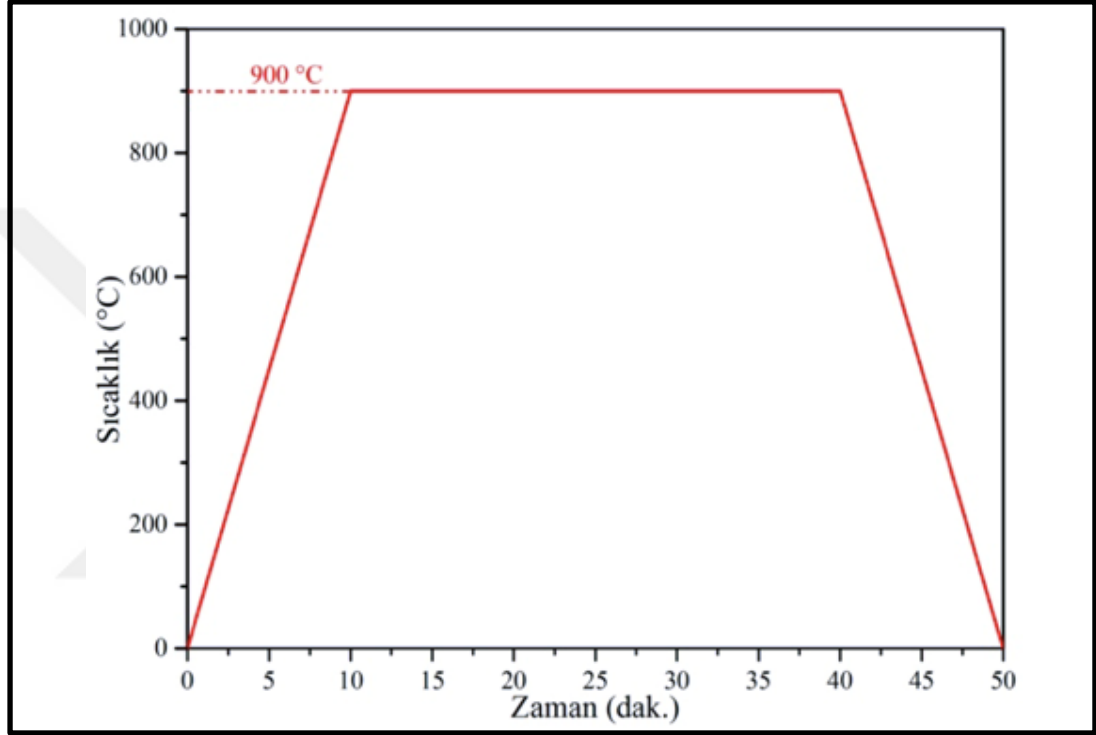
Çalışma esnasında grafit kalıp içinde tozların kalıp ile herhangi bir reaksiyona girmesinin önüne geçmek, numune ve kalıba zarar vermemek adına Hanze HeBoCoat® SL-E 200 bor nitrür sprej grafit kalıpların tozlar ile temas edecek yüzeylerine kaplanmıştır.

Çalışmanın bu bölümünde titanyum esaslı malzemeler arasında en fazla kullanım alanı bulan Ti6Al4V ile nikel esaslı malzemelerin beraber üretimi için sürecin anlaşılması, sıcak pres parametrelerinin tanımlanması yapılmıştır. Ti6Al4V tozları grafit kalıba 3mm kalınlık olacak şekilde serilmiş ardından üzerine nikel esaslı alaşım tozları 1mm kalınlık olacak şekilde serilerek sıcak preste hem sinterleme hem de kaplama işlemleri eş zamanlı gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V tozlarının üstüne sert nikel alaşım tozları konularak oluşturulan numunelerinin grafit kalıp içindeki görüntüsü Şekil 4.6.’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Ti6Al4V altık ve sert nikel alaşımının kalıp içinde gösterimi.

Ti6Al4V alaşımı tozları üstüne sert nikel alaşımı tozları 900°C de 30 dakika sürede sinterlenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Isıtma hızları 100°C/dak. olacak şekilde seşilmiştir. Sinterleme işlemleri oksitlenmenin önlenmesi için  $10^{-4}$  mbar vakum atmosferi aktında geręekleřtirilmiřtir. Numunelerin üretiminde 50 MPa basınç değeri sabit tutulmuştur. şekil 4.7’de Ti6Al4V alaşımı tozları üstüne sert nikel alaşımı tozları kaplanan numunelerin sıcak pres ile üretim çevrimi verilmiştir.



Şekil 4.7. Sıcak presle üretim ve kaplama prosesi çevrimi.

#### 4.2. Sıcak Pres ile Üretilen Numunelerin Hazırlanması

Metalografik işlemelerde sırasıyla zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri uygulanmıştır. Zımparalama işlemi için sırasıyla 320, 600, 1000 ve 2000 gridlik zımparalar kullanılmıştır. Zımparalama işleminin sonra parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatma işleminde sırasıyla 9, 6, 3 ve 1µm’lik elmas pasta kullanılarak numunelerde istenilen parlatma yüzeyleri elde edilmiştir. Mikroskopik incelemeler için numune yüzeyi, 1 saniye kadar pamuk yardımıyla Kroll solüsyonu (10 ml HF, 5 ml HNO<sub>3</sub>, 85 ml H<sub>2</sub>O) ile dağlama işlemi yapılmıştır. Şekil 4.8’de zımparalama ve parlatma işlemlerinin yapıldığı, zımparalama ve parlatma cihazlarının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.8. Çalışmada kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı.

### 4.3. Numunelerin Yoğunluklarının Saptanması

Üretilen tüm numunelerin yoğunlukları AND marka GR-200 model hassas terazi kullanılarak Arşimet Prensibine göre hesaplanmıştır. Şekil 4.9’da hassas teraziye ait fotoğraf gösterilmiştir.

Arşimet Prensibi Denklem (4.1)’de verilmiştir;

$$\text{Cismin Yoğunluğu} = \frac{\text{Cismin Havadaki Ağırlığı} \times \text{Sıvının Yoğunluğu}}{\text{Cismin Havadaki Ağırlığı} - \text{Cismin Sıvıdaki Ağırlığı}} \quad (4.1)$$

olarak hesaplanır.

Arşimet Prensibi sıvıların kaldırma kuvvetinden yararlanarak ve yoğunluğu bilinen bir sıvıdan yola çıkarak katı bir cismin yoğunluğu bulmamızı sağlamaktadır. Arşimet Prensibi’ne göre sıvılar tarafından yüzen veya batan cisimlere uygulanan kaldırma kuvveti, cisimlerin yerini değiştirdiği sıvının ağırlığına eşittir.



Şekil 4.9. Çalışmada kullanılan AND marka GR-200 model hassas terazi

#### 4.4. Numunelerin Sertlik Testleri

Tezin ana hedefi titanyum esaslı malzemelerin aşınma özelliklerinin geliştirilmesidir. Bu doğrultuda sert nikel tozları ile yüzey sertliğinin artırılması önem arz etmektedir. Bu nedenle üretilen numunelerin sertlik ölçülmüştür. Sertlik ölçüm işlemleri Future Tech marka vickers sertlik ölçüm cihazında, 0,5 kgf yük altında, 20 saniye sürede gerçekleştirilmiştir. Numune kesitinden 5 farklı yerden yapılan ölçüm sonucunda ortalama değerleri alınarak değerlendirme yapılmıştır. Şekil 4.10'da ölçüm yapılan vickers sertlik cihazına ait görüntü gösterilmiştir.

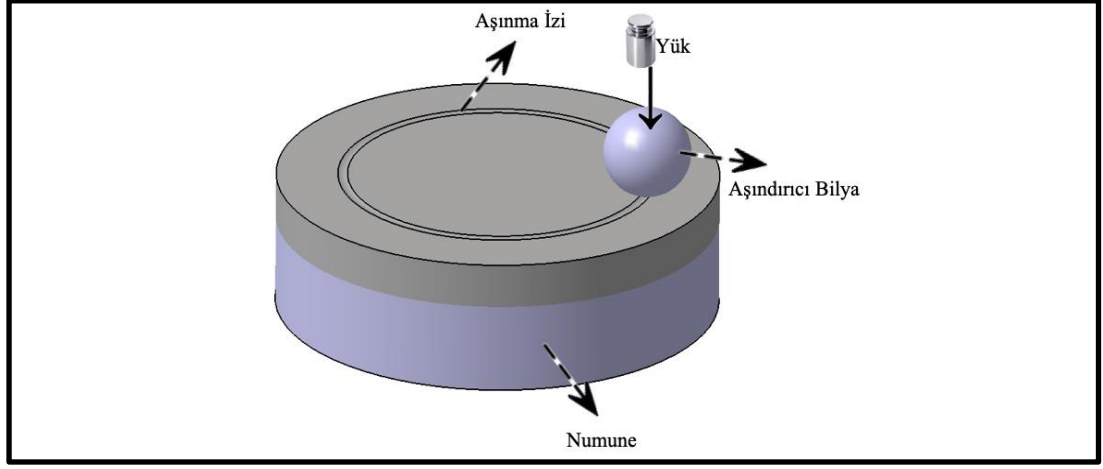


Şekil 4.10. Çalışmada kullanılan vickers sertlik ölçüm cihazı.

#### 4.5. Kuru Sürtünme Aşınma Testleri

Çalışmada Ti6Al4V alaşımı üzerine sert nikel alaşım tozları kaplanarak oluşturulan numunelerin her iki yüzeyine de aşınma karakteristikleri hakkında veri alabilmek için kuru sürtünme aşınma testi uygulanmıştır.

Kuru sürtünme aşınma testleri TURKYUS POD&HT&WT (Bursa/Türkiye) ball on disk tipi aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ASTM G99-17 standardına göre yapılan deneyin şematik gösterimi Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Kuru sürtünme aşınma testinin şematik gösterimi.

Kuru sürtünme aşınma testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Testler için ball on disk tipi test seçilmiş, 300 metre mesafe ve 40 N yük parametreleri sabit tutulmuş ve değişken olarak 150 ve 250 rpm devir sayıları kullanılmıştır. Aşınma testlerinde karşıt yüzey olarak 6mm  $\text{Si}_3\text{N}_4$  bilyalar kullanılmıştır.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  bilyaların tercih edilmesinin sebebi  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'ün yüksek sertlik, yüksek kırılma tokluğu, yüksek termal şok direnci, oksitli atmosferlerde yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi ve yüksek kimyasal direnci olmasından kaynaklanmaktadır.

#### 4.6. Mikroyapısal Karakterizasyon

Numunelerin SEM görüntülerinin alınması ve EDX analizleri JEOL JSM-6060 marka elektron mikroskopunda yapılmıştır (Şekil 4.12).

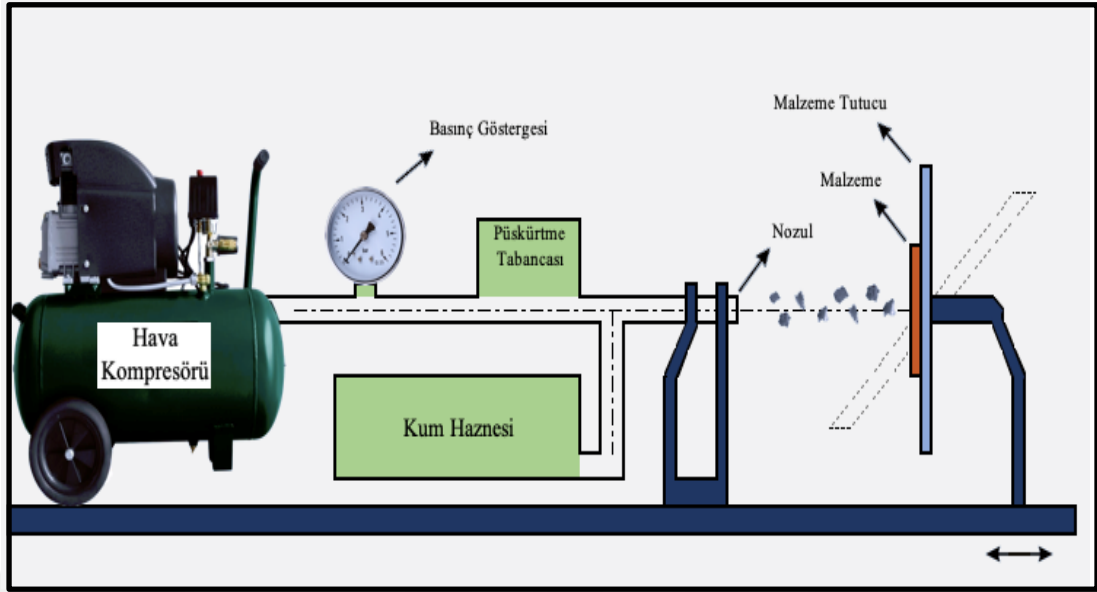


Şekil 4.12. JEOL JSM-6060 marka taramalı elektron mikroskobu.

#### 4.7. Eroziyon Aşınma Testleri

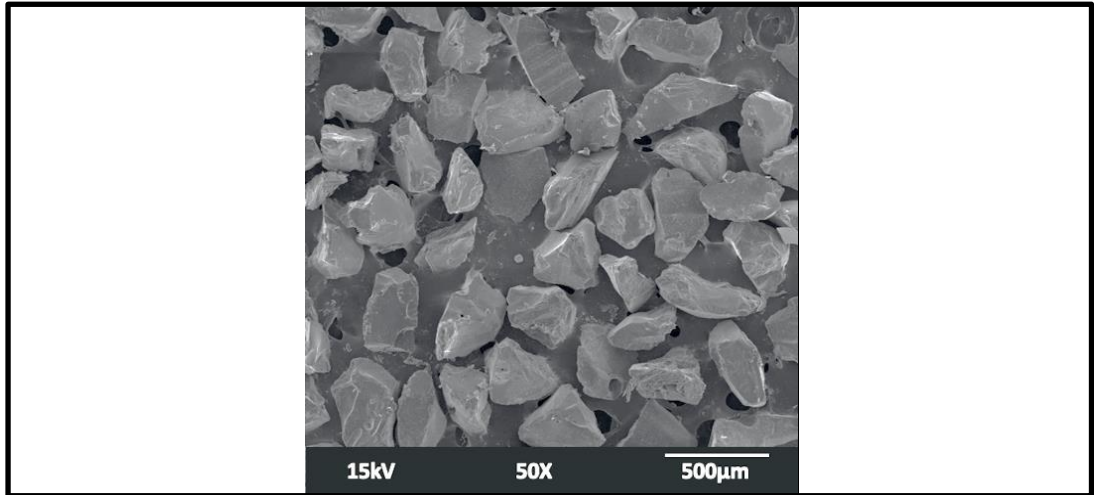
Titanyum ve alaşımlarına en fazla talebin olduğu endüstriyel alanlardan birisi de havacılık ve uzay sektörüdür. Havacılık ve uzay sektöründe titanyum ve alaşımlarının kullanıldığı parçaları incelendiğinde özellikle eroziyon aşınma şartlarının ağırlıkta olduğu görülmektedir. Çalışmada gerçekleştirilen eroziyon aşınma testleri Kocaeli Üniversitesi Ford Otosan İhsaniye Otomotiv Meslek Yüksek Okulu Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Eroziyon aşınma testleri özel olarak tasarlanıp oluşturulan eroziyon aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bu test düzeneği; basınçlı hava tankı, eroziyon aşındırma kabini, numune boyutlarına uygun olarak tasarlanmış ve üretilmiş numune fikstürü, basınçlı hava kompresörü ve eroziyon aşındırma tabancası ekipmanlarından meydana gelmektedir. Kabin içerisine sabitlenen eroziyon aşındırma tabancası dış bölümde yer alan bir ayak pedalı ile kontrol edilebilmektedir. Eroziyon aşındırma basıncı ise kabin gövdesinde bulunan basınç regülatörü ile ayarlanmaktadır. Eroziyon kabininin içine numuneyi sabitlemek ve numune yüzeyine istenilen açılarda beyaz alüminyum oksit aşındırıcı partiküllerin püskürtülmesini sağlayan numune boyutlarına uygun özel numune fikstürü yerleştirilmiştir. Bu düzenekle birlikte eroziyon aşınma kabini içerisine 90° (dik olarak) sabitlenen eroziyon aşınma tabancası, numunenin 360° dönebilen fikstürün hareketi ile numune yüzeyine istenilen açılarda beyaz alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri püskürtülebilmektedir. Fikstür düzeneğinde istenilen açı ayarı, bir açı terazisi ile deney başlamadan önce ayarlanabilmektedir. Eroziyon aşınma işlemleri esnasında numuneler, bu fikstür kullanılarak 10mm'lik hazırlanmış bir mastar yardımıyla, eroziyon aşınma tabancası ucu ile numune yüzeyi arasındaki mesafe 10mm olarak yerleştirilmiştir. Şekil 4.13'de eroziyon aşınma test düzeneği gösterilmiştir.

Şekil 4.13'de gösterilen test düzeneğinde katı partikül erozyon testi 60 mesh boyutundaki alümina aşındırıcı partiküller kullanılarak, 10mm mesafeden 20s boyunca 1,5 bar püskürtme basıncı ile numunelerin hem Ti6Al4V alaşımı yüzeylerine hem de sert nikel alaşımı yüzeylerine 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°lik açılar ile uygulanmıştır.



Şekil 4.13. Erozif aşınma test düzeneği.

Çalışmada aşındırıcı partikül olarak kullanılan beyaz alüminyum oksit 60 mesh partikül boyutuna sahiptir. Alüminyum oksit aşındırıcı partiküller Fetaş Metalürji A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Şekil 4.14’de deneysel çalışmalarda kullanılan 60 mesh partikül boyutuna sahip beyaz alüminyum oksit aşındırıcı partiküllerin SEM görüntüleri gösterilmiştir. Alüminyum oksit aşındırıcıların keskin köşeli şekillerde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.14. 60 mesh partikül boyutunda aşındırıcı beyaz alüminyum oksitlerin 50X büyütmede alınan SEM görüntüleri.

Erozyon oranı; katı partikül erozyonu sonrasında aşınan numunede kütle kaybının meydana gelmesini sağlayan toplam aşındırıcı partikül kütesine oranı olarak tanımlanabilmektedir. Farklı basınçlarda aşındırılan numunelerde aynı aşınma



süresinde yüzeye çarpan partikül miktarının (kütle) değişim göstereceği kesindir. Malzemelerin erozyon miktarları, erozyona sebep veren aşındırıcı partikül kütlelerinden bağımsız şekilde hesaplanması gerekmektedir. Malzemelerin erozyon davranışları değerlendirilirken birim aşındırıcının meydana getirdiği erozyon miktarı hesaplanmalıdır. Böylelikle parametrelerden bağımsız şekilde malzemelerin erozyon davranışları karşılaştırılarak değerlendirilebilmektedir. Deneylerin sonuçları erozyon oranına göre hesaplanmıştır. Erozyon oranı denklemi Denklem (4.2)'de verilmiştir.

$$E = \Delta m_s / m_e$$

E = Erozyon Oranı (g),

$\Delta m_s$  = Örnek numune kütle kaybı (g),

$m_e$  = Aşındırıcı kütlesi (g)' dir. (4.2)

Çalışmada bir yüzeyi sert nikel alaşımı diğer yüzeyi Ti6Al4V alaşımı olan numunelerimizin 5 adet sert nikel alaşımı yüzeyi ve 5 adet Ti6Al4V alaşımı yüzeyi olmak üzere toplam 10 numune yüzeyi erozif aşınmaya uygulanmıştır. Her bir sert nikel alaşımı yüzeyi ve Ti6Al4V yüzeyine farklı parametre olarak farklı açılarda aşındırıcı partikül püskürtülmüştür. Aşınma testine başlamadan önce, numunenin hassas terazide tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. Aşınma testinin ardından numune yüzeyine basınçlı hava uygulanarak tartım işleminin hassasiyetini arttırmak amaçlanmıştır. Yüzeye uygulanan basınçlı hava işleminin ardından numune tekrar hassas terazide tartılarak kütle kaybı verileri elde edilmiştir. Şekil 4.15'de deneylerde kullanılan Shimadzu Atx 224 Model 220 g kapasiteli hassas terazi gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Çalışmada kullanılan Shimadzu ATX 224 Model 220 g kapasiteli hassas terazi.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

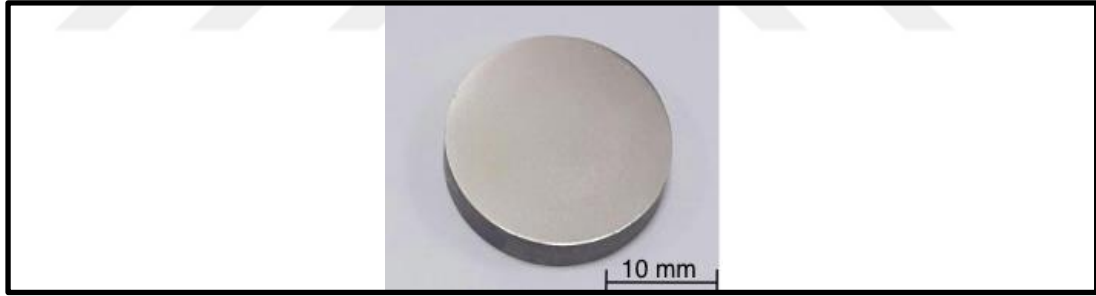
Bu tez çalışması kapsamında titanyum esaslı malzemelerin aşınması özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Titanyum esaslı malzemeler içinde endüstriyel uygulamalarda en fazla kullanılan kullanım alanı bulan Ti6Al4V alaşımı seçilmiştir. Ti6Al4V alaşımının aşınma özelliklerinin geliştirilmesi için yüzeyine sert nikel alaşım tozları kaplanmıştır. Yüzeyde elde edilen bu sert bir katman sayesinde aşınma direncinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Kaplama işlemi için toz metalurjisi seçilmiştir. Titanyum ve nikel alaşım tozları grafit kalıplar içerisine yerleştirilerek kaplama ve yoğunlaştırma işlemleri eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemlerinin ardından numunelerin mikroyapısal incelemeleri ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri için kuru sürtünme aşınma testleri ve erozif aşınma testleri uygulanmıştır. Gerek numunelerin üretim süreçleri gerekse elde edilen sonuçlar hakkındaki detaylar aşağıdaki bölümlerde verilmiştir. Şekil 5.1’de yukarıda belirtilen üretim ve analiz süreçlerini özetleyen şematik gösterim verilmiştir.



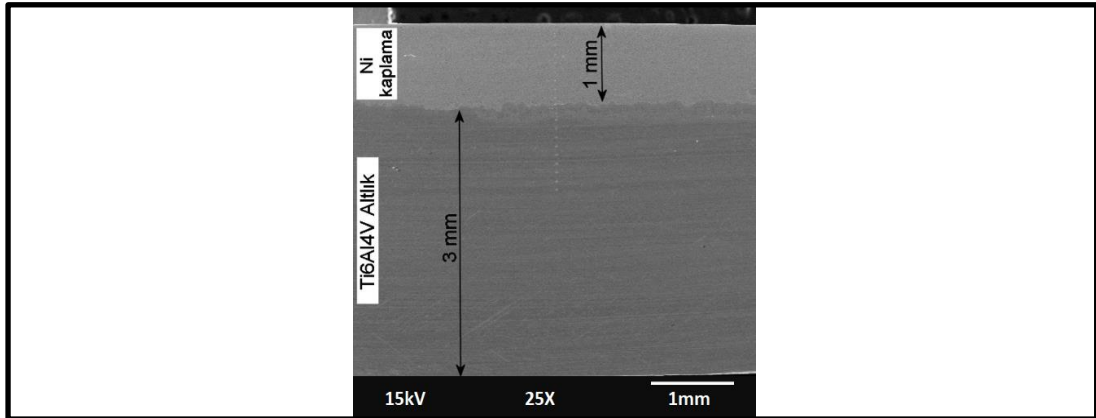
Şekil 5.1. Numunelere uygulanan testlerin incelenme basamakları.

## 5.1. Sıcak Pres ile Üretilen Numunelerin İncelemeleri

Yöntem kısmında açıklandığı gibi tozlar sıcak pres ile yoğunlaştırılmıştır. Numunelerin boyutları 20mm çap ve yaklaşık 4mm kalınlık olacak şekilde ayarlanarak toz miktarları hesaplanmıştır. Altlık olarak seçilen Ti6Al4V alaşımından oluşan tabakanın kalınlığı 3mm, nikel alaşımında oluşan kaplama tabakasının kalınlığı ise 1mm olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 5.2’de sıcak preste Ti6Al4V alaşımı üzerine nikel alaşımı kaplanmış numunenin bir makro görüntüsü verilmiştir. Altlık ve kaplama kalınlığının net bir şekilde daha kolay anlaşılabilmesi için bu numunede kesit alınarak incelen bir SEM görüntüsünde Şekil 5.3’de verilmiştir. SEM görüntüsünden de görüldüğü gibi sıcak pres ile bu tarz yapılacak kaplamalar ile hem altlık hem de kaplama malzemelerinin kalınlıkları hesaplanan toz miktarları üzerinden büyük bir doğrulukla elde edilebilmektedirler. Dolayısıyla daha ince ve daha kalın kalınlıklarda kaplamaların yapılabilmesine imkân kılan bir üretim süreci dizayn edilmiştir. Tozların boyutu üzerinden daha ince kaplama kalınlıkları, çalışma ortamında yüklenme koşullarına bağlı olarak da daha kalın kaplamalar yapılması bu yöntemle özellikler basit şekilli parçalar için mümkün gözükmemektedir.

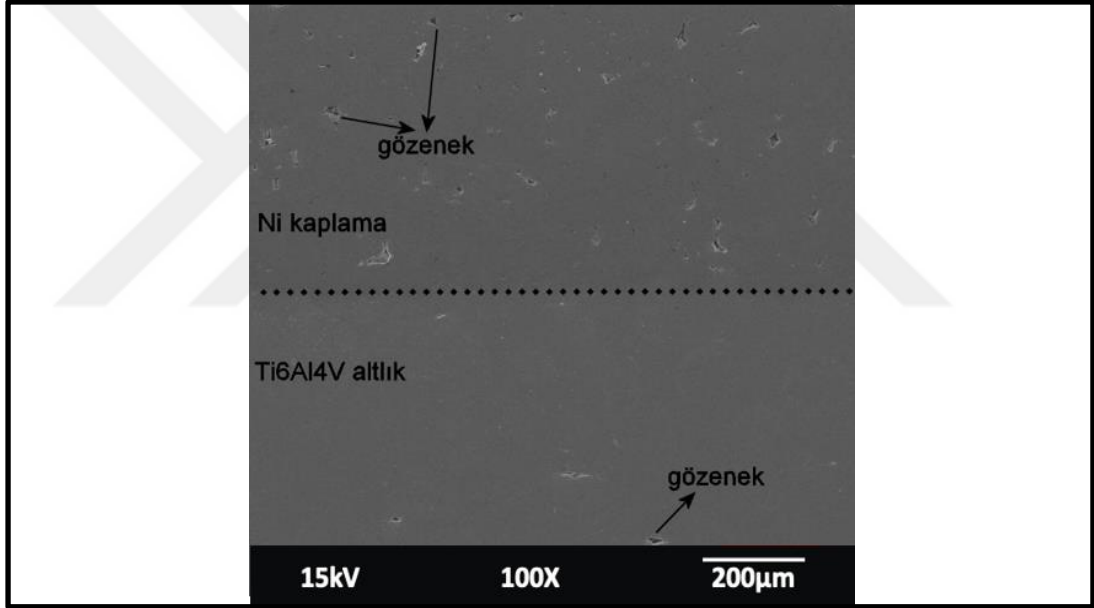


Şekil 5.2. Sıcak pres ile üretilen numunenin görüntüsü.



Şekil 5.3. Sıcak pres ile üretilen numunenin kesiti alınarak incelenen SEM görüntüsü.

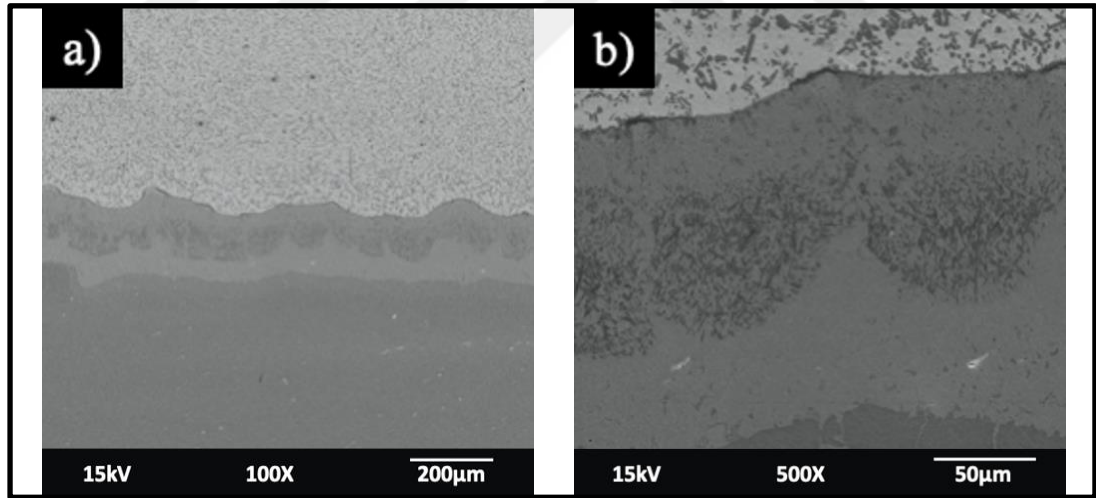
Yukarıda makro görüntüsü verilen sert nikel alaşım kaplı Ti6Al4V alaşımlarından elde edilen numunelerin yoğunlukları ölçülmüştür. 15 adet numune üretilerek yoğunluklar Arşimet Prensibi ile ölçülmüş ve  $5,20 \pm 0.08$  değeri elde edilmiştir. Şekil 5.4'te verilen SEM görüntüsü incelendiğinde de kaba boyutlu gözeneklere rastlanmamıştır. Fakat özellikle nikel esaslı kaplama tabakasında yer yer küçük boyutlu gözenekler olduğu tespit edilmiştir. Nikel esaslı tozların yüksek sertlikleri nedeniyle basınç altında sinterlenmeleri sürecinde dahi deformasyona direnç göstermekte ve daha düşük sertliğe sahip Ti6Al4V altlığa göre nispeten daha düşük yoğunluk değerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Altlık ve kaplama bölgesinde yer alan küçük boyutlu gözeneklerin gösterildiği bir parlatılmış konumda SEM görüntüsü Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Ti6Al4V altlık ve nikel kaplama bölgesinde gözeneklerin SEM görüntüsü.

Farklı metallerin birleştirilmesi veya kaplanmasının söz konusu olduğu durumlarda birleştirme veya kaplama kalitesini belirleyen en önemli unsurlardan birisi de iki farklı katman arasındaki ara yüzey bölgesi üzerinden karakterize edilir. Çözünürlüğün sınırlı olduğu durumlarda arayüzeyde meydana gelen sınırlı bir difüzyon bölgesi özellikle bir yüklenme koşulunda gerilme farklılıkları nedeniyle ayrıca arayüzeyde oluşabilecek sert karakterli intermetalikler nedeniyle hata başlangıcı olarak davranabilmekte ve kaplama malzemesi altlıktan ayrılarak malzeme hasara uğramaktadır. Sıcak pres ile ürettiğimiz kaplamalarda da ara yüzey incelenmiş ve SEM ile görüntüsü alınarak Şekil 5.5'te sunulmuştur. SEM görüntüsü incelendiğinde Ti6Al4V alaşımından oluşan altlık

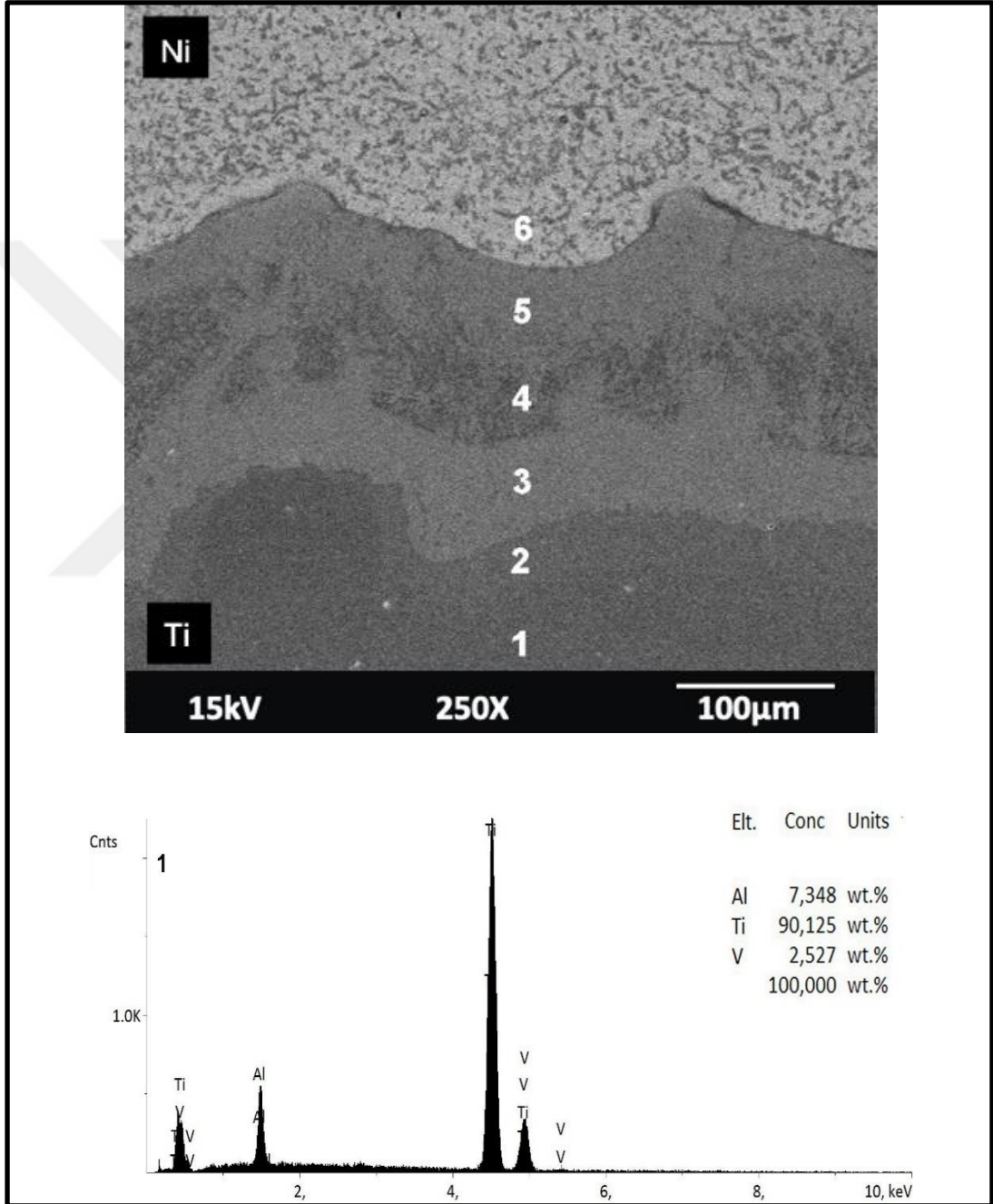
ile nikel alaşımından oluşan kaplama arasında 200µm boyutunda geniş bir difüzyon arayüzey bölgesi oluşmuştur. Yine Şekil 5.5b’de yüksek büyütmeli SEM görüntüsünde bahsedilen bu arayüzey bölgesinde bir çatlak, bir ayrılma bölgesi ve başka hasar görülmemiştir. Ayrıca düşük ve yüksek büyütmeli SEM görüntülerinden arayüzeydeki düşgün olmayan dalgalı denebilecek geçiş bölgesi dikkati çekmektedir. Bu tarz dalgalı arayüzey oluşumunun altında yatan basit bir sebep vardır. Yine yukarıda yöntem bölümünde bahsedildiği gibi kaplama yapılırken proses öncesi öncelikle Ti6Al4V alaşım tozları kalıba serilmekte, ardından serilen bu toz üzerinde nikel alaşım tozları dökülerek kaplama tabakası oluşturulmaktadır. Dolayısıyla altlık ve kaplama malzemesini oluşturan alaşım tozlarının partiküllerinin boyutlarının bir fonksiyonu olarak yüzyde girintili çıkıntılı bir arayüzey oluşmaktadır. Aslında nikel alaşım tozlarını Ti6Al4V alaşımı tozlarının üzerinde sermeden önce Ti6Al4V alaşımı tozlarına yapılacak bir ön presleme ile yüzey düz hale getirilebilecek olsa da arayüzeyde bu tarz bir dalgalanmanın geçiş bölgesinin dayanımını arttıracakı yaklaşımıyla kasıtlı olarak oluşumu gerçekleştirilmiştir.



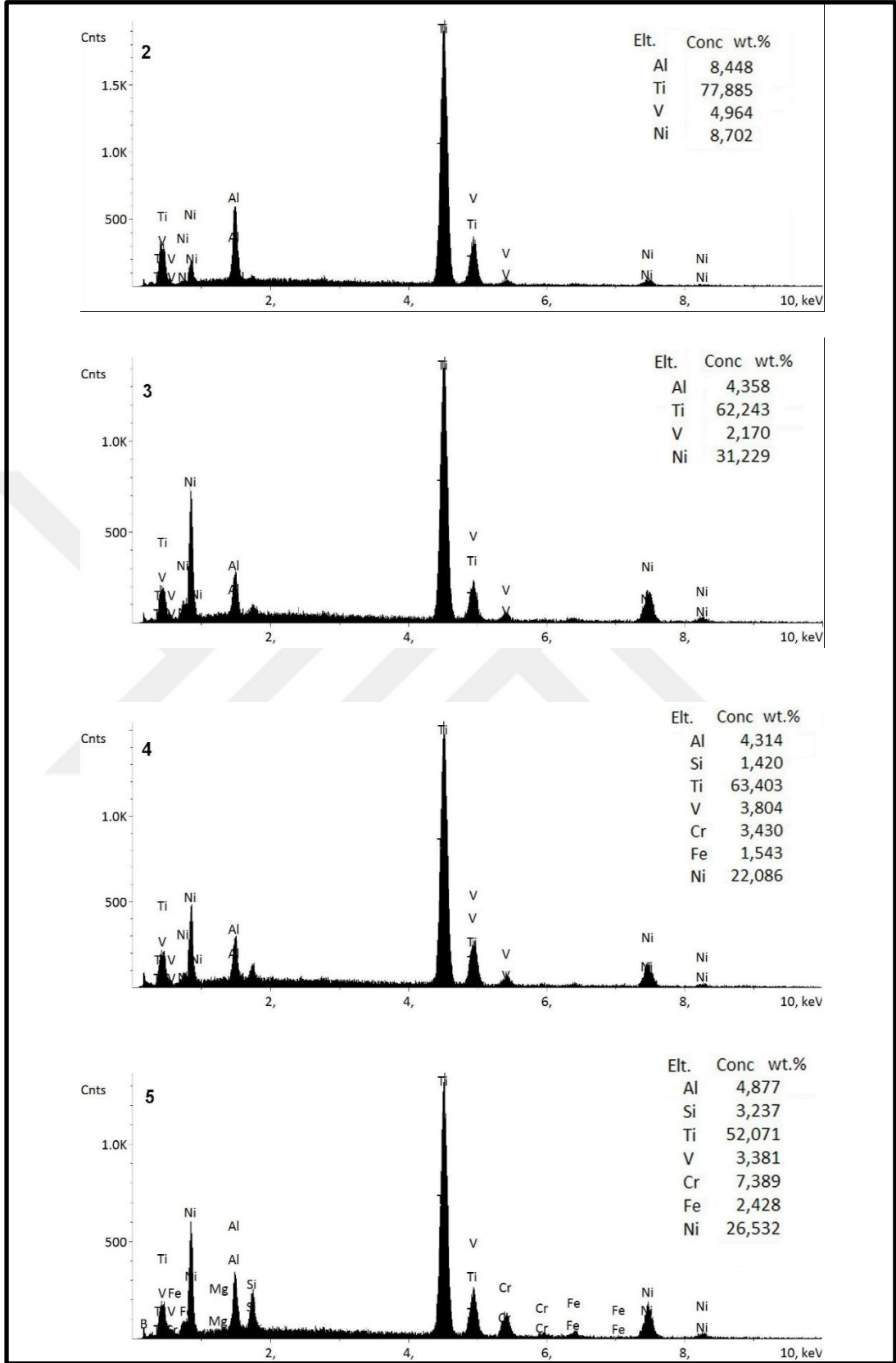
Şekil 5.5. Arayüzeyin SEM görüntüleri, a) 50X ve b) 250X

Sak ve diğerleri çalışmalarında saf alüminyum ve alümina tozlarına farklı miktarlarda saf nikel tozları ilave ederek vakum altında sıcak pres ile 20, 30 ve 40 dakika süreyle 600°C’de sinterlemişlerdir. Farklı sinterleme parametreleri ile üretilen numunelerde en yüksek sertliğe 40 dakika sinterleme süresinde ve %10Ni-%40Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-%50Al’da ulaşılmıştır [69]. Tez kapsamında yapılan çalışmada sinterleme süresi değiştirilerek aşınma özelliklerine etkileri gözlemlenebilir.

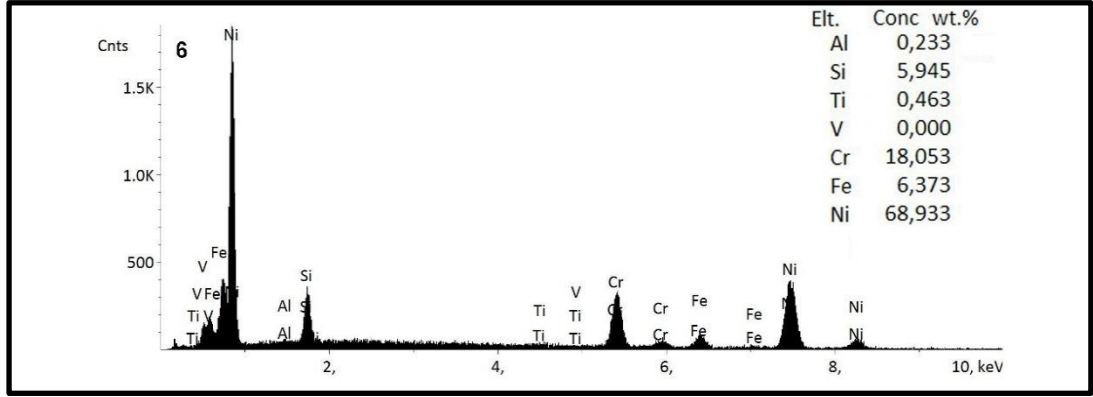
Ti6Al4V ve nikel alaşımı arasında oluşan arayüzeyde Şekil 5.5'ten de görüldüğü gibi yaklaşık 200  $\mu\text{m}$  kalınlığında bir difüzyon arayüzey bölgesi oluşmuştur. SEM ile incelenen arayüzeyin EDX analizi yapılarak elementel dağılımlar belirlenmiştir. Şekil 5.6'da arayüzey üzerinde EDX analizi yapılan noktaları gösteren SEM görüntüsü ve her bir noktanın kimyasal bileşimini gösteren EDX analizleri verilmiştir.



Şekil 5.6. Ti6Al4V ile nikel alaşımı arasındaki arayüzeyin SEM görüntüsü ve arayüzeyde farklı noktalardan alınan EDX analizi sonuçları.



Şekil 5.6. Ti6Al4V ile nikel alaşımı arasındaki arayüzeyin SEM görüntüsü ve arayüzeyde farklı noktalardan alınan EDX analizi sonuçları (Devam).



Şekil 5.6. Ti6Al4V ile nikel alaşımı arasındaki arayüzeyin SEM görüntüsü ve arayüzeyde farklı noktalardan alınan EDX analizi sonuçları (Devam).

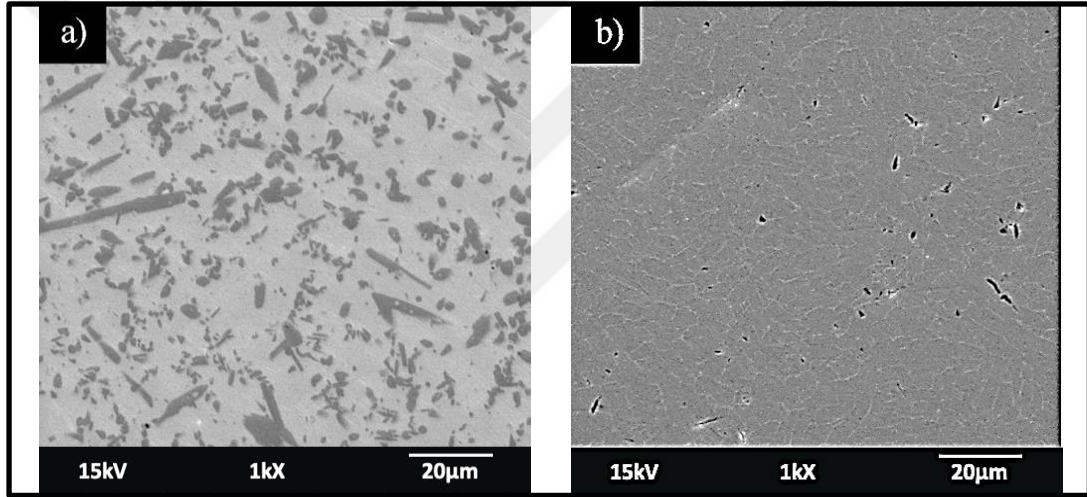
Şekil 5.6’da Ti6Al4V altlık ve sert nikel alaşım kaplamanın arayüzeyinde 6 farklı nokta gösterilmiştir. Bu 6 farklı noktadan elementel dağılımın belirlenmesi amacıyla noktasal EDX analizi yapılmıştır. Ölçüm altlıktan başlayarak yapılmış ve Ti6Al4V alaşımına ait arayüzeyden uzak olarak 1 noktasından ilk ölçüm alınmıştır. 1 nolu noktaya ait EDX analizi piklerinden ve kantitatif analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi altlık tipik bir Ti6Al4V alaşımına ait sonuçlar içermektedir. Ti6Al4V altlıktan nikel kaplama yüzeyine doğru gidildikçe arayüzeyde özellikle 4 farklı kontrast dikkati çekmektedir. Analiz için her bir kontrasta sahip alandan noktasal analiz yapılmıştır. Altlıktan arayüze yaklaşıkça açık gri kontrast ile altlık arayüzeyde 2 noktasi üzerinden bir analiz alınmıştır. Analiz sonucundan görüldüğü gibi nikel bu noktada nikel oranı %9’a yaklaşmıştır. Titanyum oranında beklendiği gibi azalmış, 1 nolu noktada %90 iken 2 nolu noktada %77,8’e düşmüştür. Biraz daha arayüzeyin merkezine ilerledikçe en açık gri bölge olan 3 nolu noktadan noktasal analiz alındığında titanyum oranı azalmaya devam ederken nikel oranı %31 olarak belirlenmiştir. Arayüzeyin tam merkezi sayılabilecek 4 nolu noktada ise hem altlık hem de kaplama malzemesinin tüm elementlerine rastlanmıştır. Fe, Cr ve Si bu noktada artış göstermiştir. Nikel kaplamaya yaklaşılan 5 nolu noktada ise Ni, Cr, Fe ve Si miktarında artış gözlenmiş, titanyum oranı %52 oranına kadar azalmıştır. 6 nolu noktada artık keskin bir geçiş meydana gelmiş ve kompozisyon Ni, Cr, Si ve Fe bileşiminden oluşarak altlık elementlerine rastlanmamıştır.

Ti6Al4V alaşımından oluşan altlık ve nikel esaslı alaşımından oluşan kaplama arasındaki arayüzey incelemesinin sonucunda geniş bir difüzyon bölgesi olduğu ve herhangi bir çatlak ve gerilme farklılıklarından oluşan bir hasar oluşmadığı



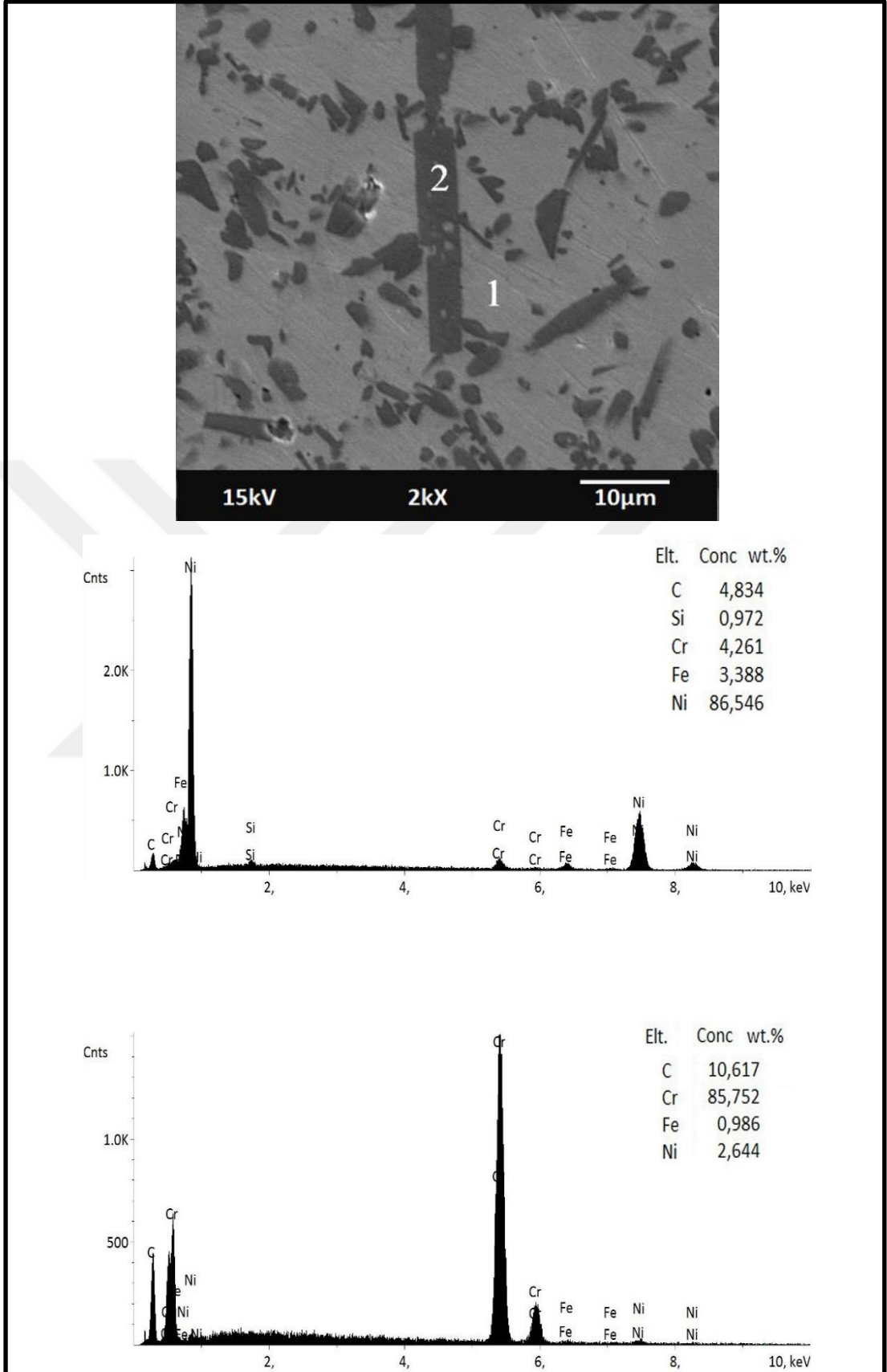
görülmüştür. Dolayısıyla bir kaplama veya farklı malzemelerin birleştirilmesi açısından kuvvetli bir arayüzey bağlantısı elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Şekil 5.7’de altlık ve kaplama yüzeyinin ayrı ayrı dağlanmış konumda elektron mikroskobu ile çekilen görüntüleri verilmiştir. Nikel esaslı kaplama malzemesine ait SEM görüntüsünden gri bir matris ve matris içinde ince veya kaba boyutlu dağılım gösteren karbür ve borürlerden oluşmaktadır. Bileşimin içeriği göz önüne alındığında matrisin nikel içinde çözünen silisyum ve bordan, karbürlerin ise  $Cr_{23}C_6$  veya  $Cr_7C_3$  tipinde, borürlerin ise  $Ni_3B$  bileşiminde olması beklenmektedir. Ti6Al4V alaşımının mikroyapısı ise bu alaşımın tipik  $\alpha+\beta$  yapısını içermektedir.  $\alpha$  taneleri etrafında ince bir çizgi şeklinde  $\beta$  fazı bu alaşımın genel bir mikroyapısal karakteristiğidir.

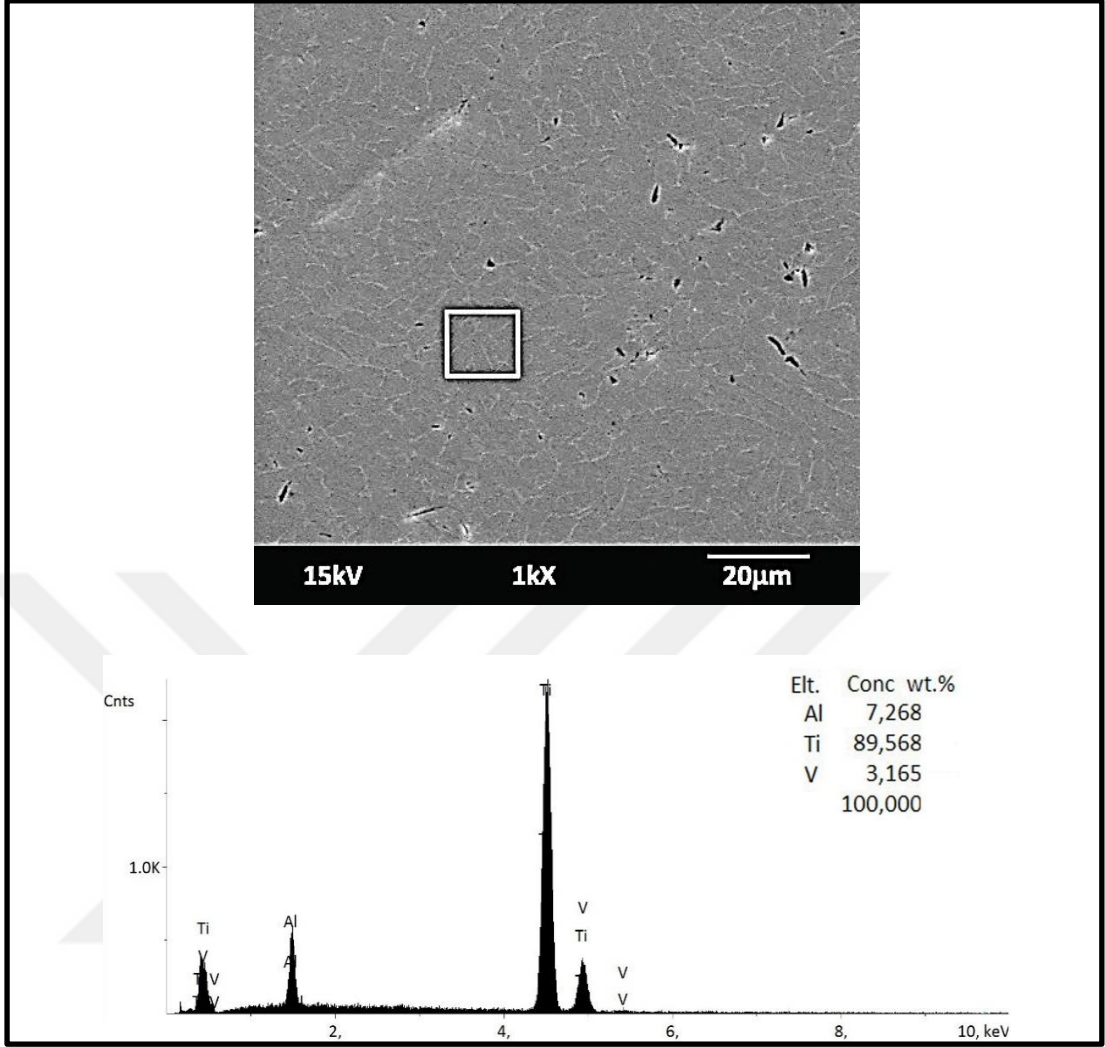


Şekil 5.7. Sıcak pres ile üretim sonrası nikel tabakası (a) ve titanyum altlığın (b) SEM görüntüleri.

Şekil 5.8 ve 5.9’da yukarıda SEM görüntüleri verilen nikel kaplama ve titanyum altık bölgelerinden alınan EDX analizi sonuçları verilmiştir. Matris nikel içinde çözünmüş elementlerden oluşurken koyu gri kontrastla görülen bölgelerin ise krom esaslı karbürler olduğu anlaşılmıştır. Nikel esaslı bu tip alaşımların yüksek sertlik özellikleride yapıda bu tarz dağılım gösteren karbür ve borürlerden kaynaklanmaktadır. Literatürde benzer etkiler farklı araştırmacılar tarafından da ortaya konmuştur [57]. Ti6Al4V alaşımı için EDX analizi ve analizin yapıldığı bölgeyi gösteren SEM görüntüsü Şekil 5.10’da verilmiştir. SEM görüntüsü mikroyapının  $\alpha+\beta$  faz yapısını gösterirken EDX analizi de  $\alpha+\beta$  fazının elementel dağılımını desteklemektedir.



Şekil 5.8. Nikel yüzeyinden alınan SEM görüntüsü ve seçilen farklı noktaların EDX analiz sonuçları.



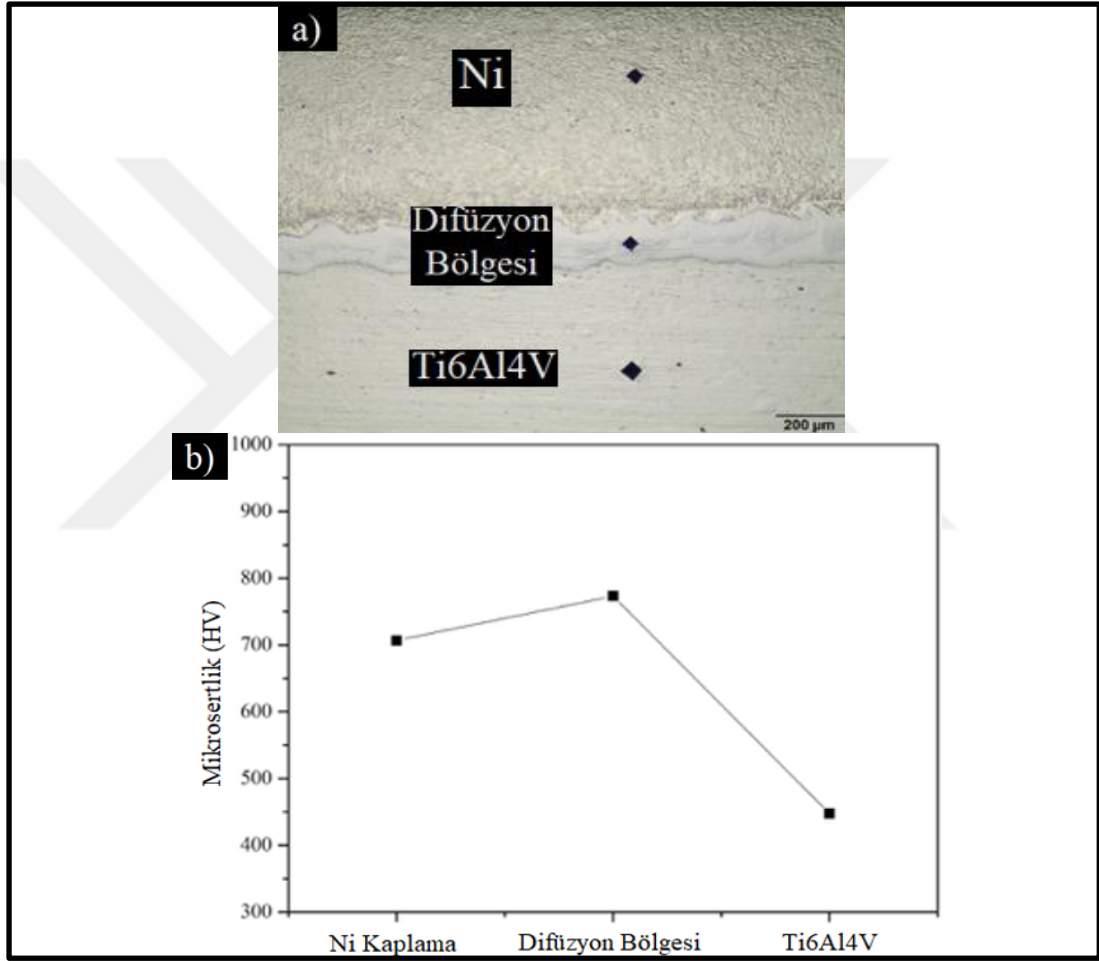
Şekil 5.9. Ti6Al4V alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu

Yamanoğlu ve Efendi çalışmalarında saf alüminyum üzerine sıcak pres tekniğini kullanarak nikel tozlarını 0,5mm ve 1mm olarak iki farklı kalınlıkta kaplamışlardır. Alüminyumun sertliğini ve aşınma özelliklerini yükseltmek için  $10^{-3}$ mbar vakum ortamında gerçekleştirilen sıcak pres ile sinterleme işleminde nikel kaplama tabakası ile saf alüminyum altlık arasında güçlü bir arayüzey bağlantısı oluşturulduğu ve sertlik artışı ile birlikte aşınma direncinin arttırıldığı yapılan testler ile ortaya konmuştur [70]. Tez çalışmasında kaplama kalınlıkları değiştirilerek aşınma davranışları incelenebilir.

## 5.2. Sıcak Pres ile Üretilen Numunelerin Sertlik Değerlerinin İncelenmesi

Nikel alaşımı Ti6Al4V alaşımının özellikle aşınma özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla yüzeye kaplanmıştır. Bunun altında yatan temel mekanizma da nikel alaşımının sahip olduğu yüksek sertlik değeridir. Arayüzey incelemesinin ardından

kaplama, altlık ve arayüzeyden sertlik ölçümleri alınmıştır. Sertlik ölçümlerinden altlık ve kaplama malzemesi arasındaki yüksek sertlik farkı dikkati çekmektedir. Şekil 5.10a sertlik ölçümünün yapıldığı parlatılmış konumdaki optik mikroskop görüntüsünü, Şekil 5.10b ise ölçülen sertlik değerlerini göstermektedir. Kaplama malzemesinin sertliği 706 HV iken, altlık malzemesinin 447 HV olarak ölçülmüştür. Arayüzeyde ise sertlik değeri 773 HV olarak ölçülmüştür. Bu yüksek sertlik değerlerinin sebebi arayüzeyde oluşan farklı bileşimlere sahip intermetaliklerdir.

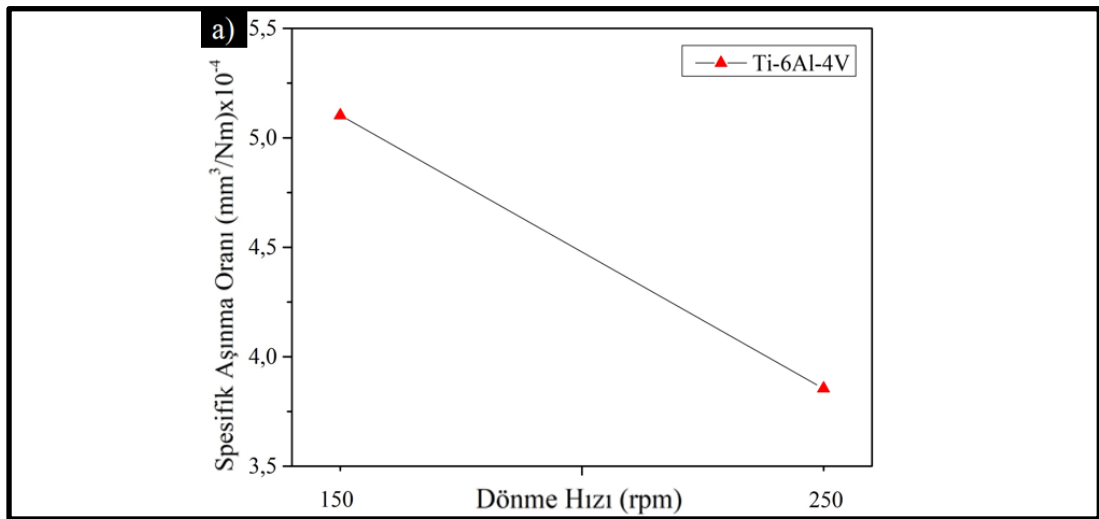


Şekil 5.10. a) Kaplama sonrası, nikel yüzeyi, Ti6Al4V alaşımı ve arayüzeyin parlatılmış konumda optik mikroskop görüntüsü, b) Bu bölgelerden alınan sertlik değerleri.

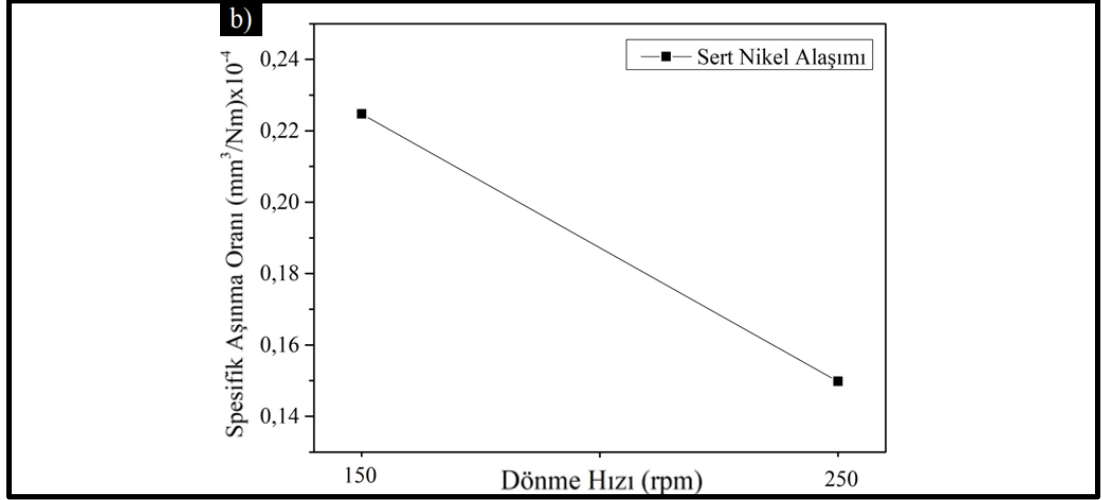
Cao ve arkadaşları Ti6Al4V alaşımına MGL-TiN/Ti ve ML-TiN/Ti malzemeleri ile kaplama yaparak katı partikül erozyon davranışlarını iyileştirmek için yaptıkları çalışmada, sertliği daha yüksek olan MGL-TiN/Ti kaplamasının daha iyi katı partikül erozyon davranışı sergilediğini tespit etmişlerdir [71].

### 5.3. Ti6Al4V Üzerine Sert Nikel Alaşım Kaplanmış Numunelerin Kuru Sürtünme Aşınma Test Sonuçları

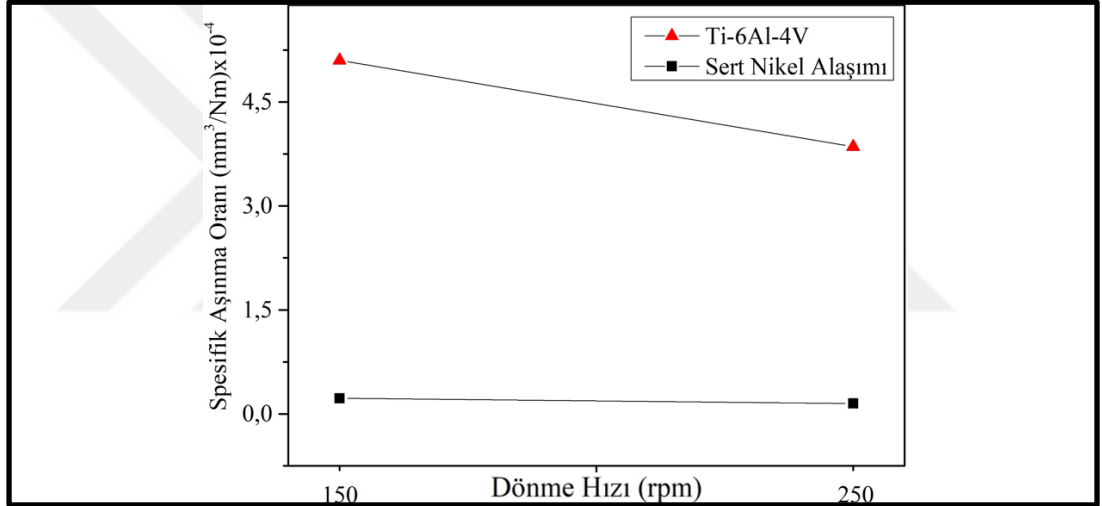
Ti6Al4V alaşımının sert nikel alaşımı tozları ile kaplanmasının ardından elde edilen yüksek sertlik değerleri ile iki farklı aşınma testi uygulanmıştır. Bu bölümde ürettiğimiz malzemelerin kuru sürtünme koşullarında oda sıcaklığında aşınma testleri incelenmiştir. Kuru sürtünme aşınma testleri için ball on disk tipi test seçilmiş, 300 metre mesafe ve 40 N yük parametreleri sabit tutulmuş ve değişken olarak 150 ve 250 rpm devir sayıları kullanılmıştır. Aşınma testlerinde karşıt yüzey olarak 6mm çapında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> bilyalar kullanılmıştır. Ti6Al4V alaşımı üzerine sert nikel alaşımı kaplanmasıyla aşınma oranlarında önemli gelişme elde edilmiştir. Aşınma testinde kullanılan 2 farklı devir sayısında (150 ve 250 rpm) hem altlık hem de kaplama malzemesi için artan dönme hızı ile aşınma oranlarında azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.11). Titanyum altlık için 150 rpm dönme hızında spesifik aşınma oranı 5,10 iken 250 rpm dönme hızında aşınma oranı 4,15 mm<sup>3</sup>/Nm $\times$ 10<sup>-4</sup> değerine azalmıştır. Nikel alaşımı içinde benzer sonuç elde edilmiş, 150 rpm dönme hızında 0,22 ve 0,23 arasında, 250 rpm dönme hızında 0,15 mm<sup>3</sup>/Nm $\times$ 10<sup>-4</sup> aşınma oranı elde edilmiştir. Şekil 5.12’de hem altlık hem de kaplama arasındaki aşınma oran farklılıklarının daha net anlaşılması açısından elde edilen aşınma oranı eğrileri aynı diyagramda sunulmuştur. Görüldüğü gibi nikel kaplama sayesinde titanyum esaslı altlığın aşınma direnci önemli oranda geliştirilmiştir.



Şekil 5.11. (a) Ti6Al4V altlık ve (b) kaplama malzemesi Ni alaşımı için dönme hızı ile aşınma oranı arasındaki ilişki.



Şekil 5.11. (a) Ti6Al4V altlık ve (b) kaplama malzemesi Ni alaşımı için dönme hızı ile aşınma oranı arasındaki ilişki (Devam).

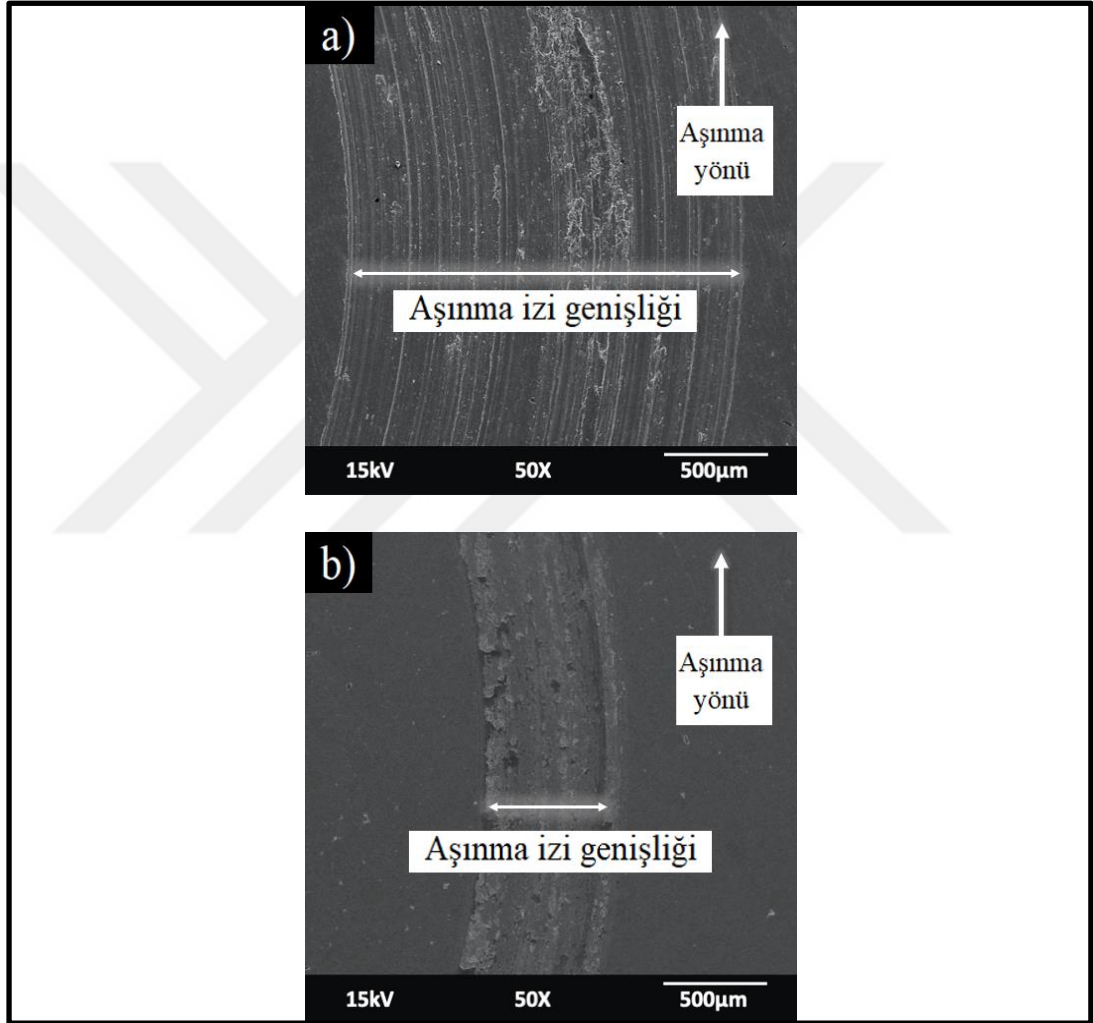


Şekil 5.12. Karşılaştırma amaçlı Ti6Al4V alaşımı ile nikel kaplama malzemesinin aşınma oranlarının aynı diyagramda gösterimi.

Esther ve diğerleri Ti6Al4V altlık üzerine AA2124/4wt.%B<sub>4</sub>C kaplayarak aşınma özelliklerini iyileştirmeyi başarmışlardır. Aynı çalışmada uygulanan kuru sürtünme testlerinde dönme hızı arttırıldığında aşınma oranının azaldığı gözlemlenmiştir [72].

Huang ve arkadaşları MoO<sub>3</sub> içeren Ni<sub>3</sub>Al matrisli kompozitlerin tribolojik performanslarını incelemek için Si<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub> aşındırıcı bilya kullanarak 10N sabit yük ile malzemelere farklı hızlarda kuru sürtünme aşınma testleri uygulamışlardır. 0,1 m/s ve 0,7 m/s arasında yapılan kuru sürtünme aşınma testleri neticesinde artan sürtünme hızına paralel olarak aşınmanın azaltığı tespit edilmiştir [73].

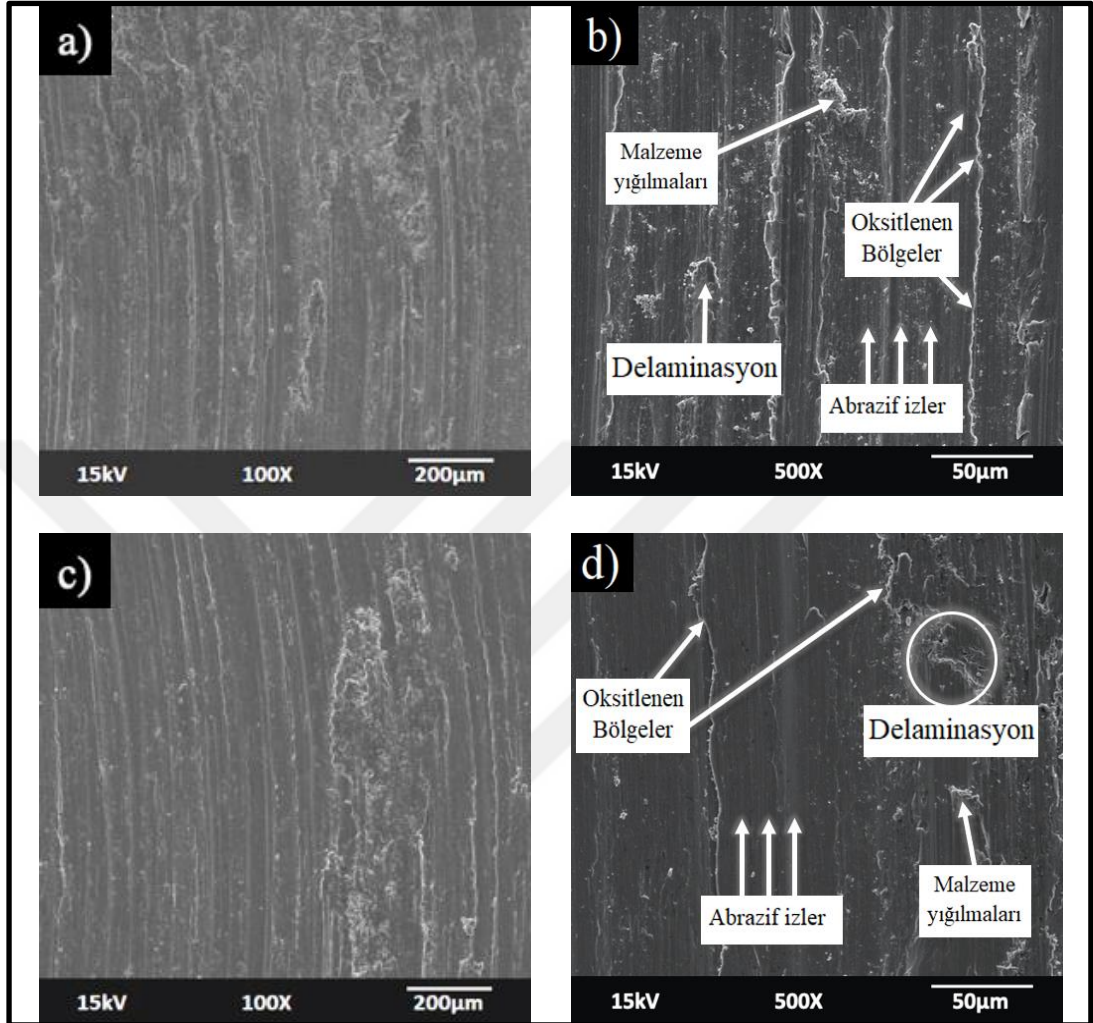
Tez çalışmamızda da literatüre paralel sonuçlar elde edilmiştir. Aşınma oranlarının ardından testler sonrasında aşınma yüzeyleri hem altlık hem de kaplama malzemesi için ayrı ayrı incelenmiştir. Aşınma oranları arasındaki önemli farklılık aşınma izlerine de yansımıştır. Şekil 5.13’de Ti6Al4V alaşımı ve Nikel sert kaplama malzemesine ait aşınma izlerinin düşük büyütme SEM görüntüleri verilmiştir. Aşınma iz genişliklerindeki farktan da görüleceği gibi nikel esaslı malzeme sayesinde aşınma direncinin arttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.13. a) Ti6Al4V yüzeyi b) Ni esaslı kaplama yüzeyinin aşınma izlerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.14’de Ti6Al4V alaşımının farklı devir sayılarında aşınma yüzeyleri, a ve b) düşük ve yüksek büyütmede 150 rpm devir sayısı için, c ve d) düşük ve yüksek büyütmede 250 rpm devir sayısı için aşınma izlerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Yüksek büyütmede verilen görüntüler incelendiğinde 150 rpm devir sayısı ile gerçekleştirilen kuru sürtünme aşınma testinde (Şekil 5.14b) malzeme yüzeyinin 250

rpm devir sayısı ile gerçekleştirilen kuru sürtünme aşınma testine (Şekil 5.14d) göre daha fazla deforme olduğu gözlemlenmektedir.

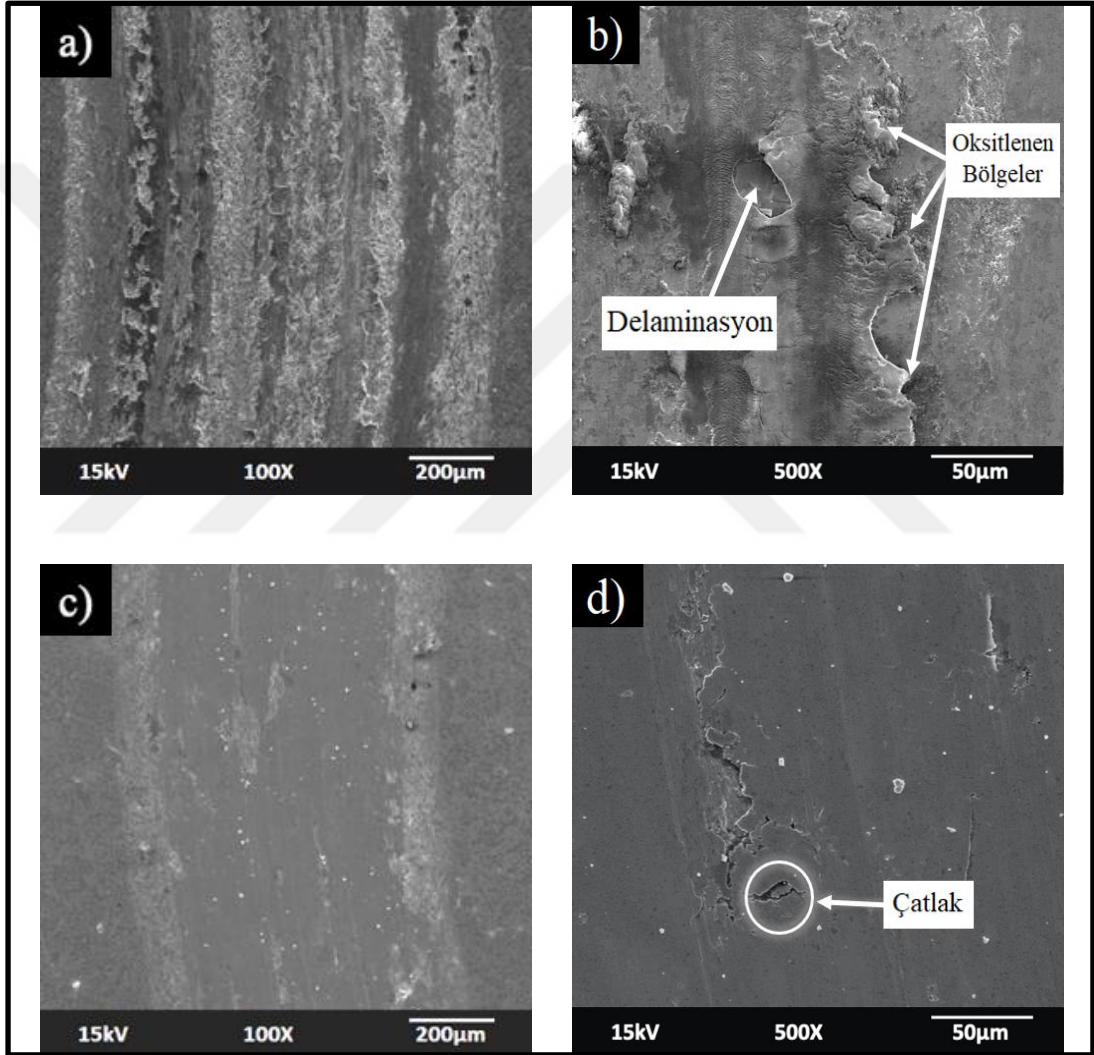


Şekil 5.14. Ti6Al4V alaşımının farklı devir sayılarında aşınma yüzeyleri, a ve b) düşük ve yüksek büyütmede 150 rpm devir sayısı için, c ve d) düşük ve yüksek büyütmede 250 rpm devir sayısı için aşınma izlerinin SEM görüntüleri.

Ti6Al4V yüzey görüntüleri incelendiğinde yoğun plastik deformasyon izleri görülmektedir. Ti6Al4V yüzey kuru sürtünme testlerinde sünek bir karakter sergilemiştir. Abrasif izler yoğun olarak gözlemlenmektedir. Ayrıca malzeme yüzeyinde açık kontrastlı bölgede oksitlenmiş bölgelerdir, daha önce bahsettiğimiz üzere malzeme kaybının hızlı olmasına sebep olan bir mekanizma oluşturmuşlardır. Yoğun deformasyona bağlı olarak malzeme yığılmaları da gözlemlenmektedir. Bu yığılmalar oksidasyona uğrayarak malzeme kaybına sebep olmuşlardır. Aşınan malzeme yüzeyinde delaminasyon yöreleri de gözlemlenmektedir.



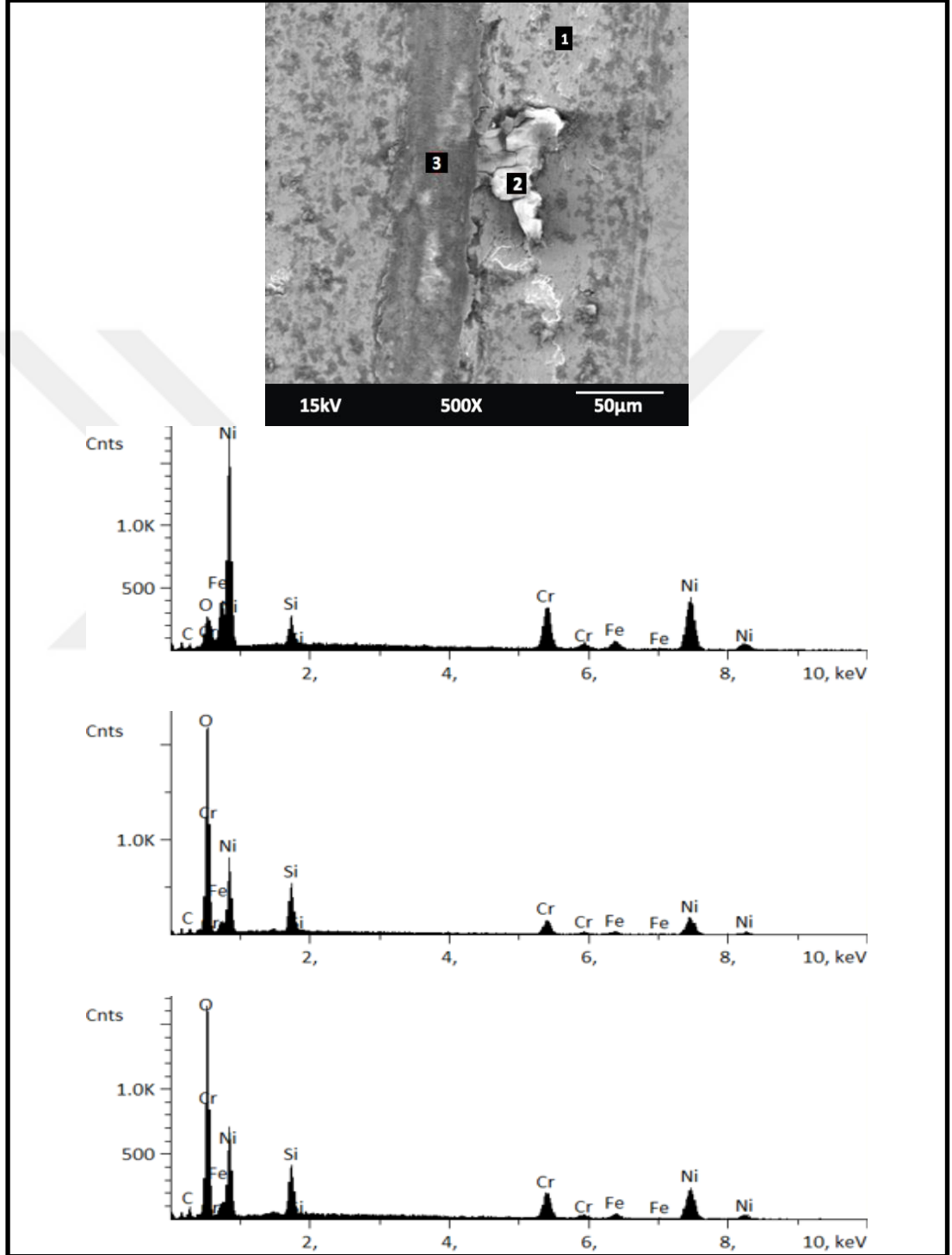
Şekil 5.15’de Sert nikel alaşımının farklı devir sayılarında aşınma yüzeyleri, a ve b) düşük ve yüksek büyütmede 150 rpm devir sayısı için, c ve d) düşük ve yüksek büyütmede 250 rpm devir sayısı için aşınma izlerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Yüksek büyütmede verilen görüntüler incelendiğinde 150 rpm devir sayısı ile gerçekleştirilen kuru sürtünme aşınma testinde (Şekil 5.15b) malzeme yüzeyinin 250 rpm devir sayısı ile gerçekleştirilen kuru sürtünme aşınma testine (Şekil 5.15d) göre daha fazla deforme olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 5.15. Sert nikel alaşımının farklı devir sayılarında aşınma yüzeyleri, a ve b) düşük ve yüksek büyütmede 150 rpm devir sayısı için, c ve d) düşük ve yüksek büyütmede 250 rpm devir sayısı için aşınma izlerinin SEM görüntüleri.

Sert nikel alaşım kuru sürtünme aşınma testi sonucunda çekilen SEM görüntülerinde ise aşınma iz çapının belirgin şekilde azaldığı ve malzemenin sünek karakterden gevrek karaktere geçiş yaptığı gözlemlenmektedir. Özellikle nikel alaşımında oluşan

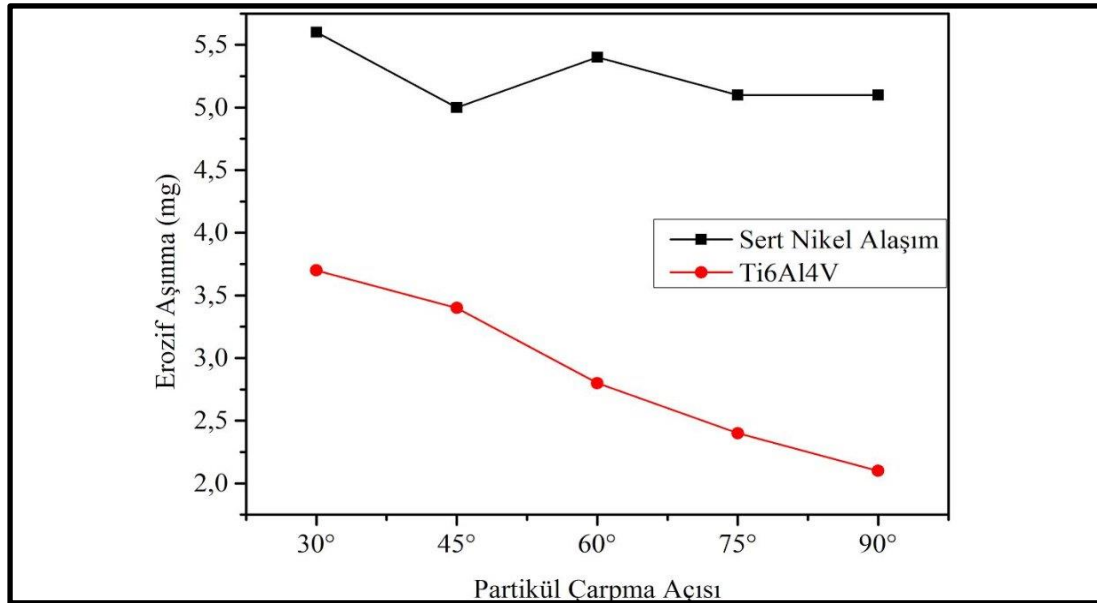
kaplamanın aşınma yüzeylerinin SEM incelemelerinde yüzeyde yoğun bir oksitlenme etkisi görülmektedir. Bu nedenle nikel yüzeyinin aşınma yüzeylerinde SEM görüntüleri üzerinden EDX analizleri yapılmış ve Şekil 5.16’da verilmiştir.



Şekil 5.16. Nikel kaplama malzemesinin aşınma testi sonrasında yüzeyinin SEM görüntüsü ve farklı noktalardan alınan EDX analizi sonuçları.

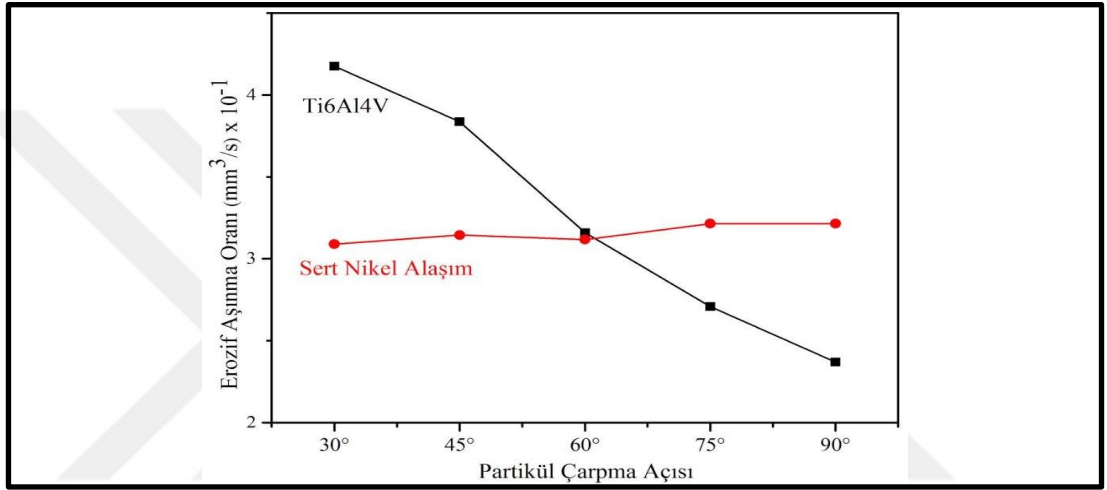
#### 5.4. Ti6Al4V Üzerine Sert Nikel Alaşım Kaplanmış Numunelerin Eroziv Aşınma Test Sonuçları

Sıcak pres yöntemi ile sert nikel kaplanan titanyum alaşımının kuru sürtünme koşullarında ball on disk yöntemi ile aşınma özellikleri incelendikten sonra bu bölümde eroziv aşınma testleri irdelenmiştir. Katı partikül erozyon testi 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak, 10mm mesafeden 20 s boyunca 1,5 bar püskürtme basıncı ile numunelerin hem Ti6Al4V yüzeylerine hem de sert nikel alaşım yüzeylerine 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°lik açılar ile uygulanmıştır. Dolayısıyla tez kapsamında partikül çarpma açısının katı partikül erozyonuna etkisi üzerinden eroziv aşınma testleri dizayn edilmiştir ve sonuçlar bu doğrultuda irdelenmiştir. Alümina katı partiküllerinin Ti6Al4V ve nikel alaşım yüzeyine çarpma açılarına bağlı olarak elde edilen erozyon oranları Şekil 5.17’de verilmiştir. Titanyum alaşımının üzerinde yapılan sert nikel kaplama ile eroziv aşınma oranlarında oldukça farklılıklar görülmüştür. Eroziv aşınma koşullarında malzemelerin özellikle sertlikleri üzerinden sünek veya gevrek davranış sergilemelerine göre aşınma oranları değişim göstermektedir. Her ne kadar iki malzeme arasındaki sertlik farklı yüksek olsa da görüldüğü gibi en yüksek eroziv aşınma oranları 30°’lik püskürtme açısında meydana gelmiştir.

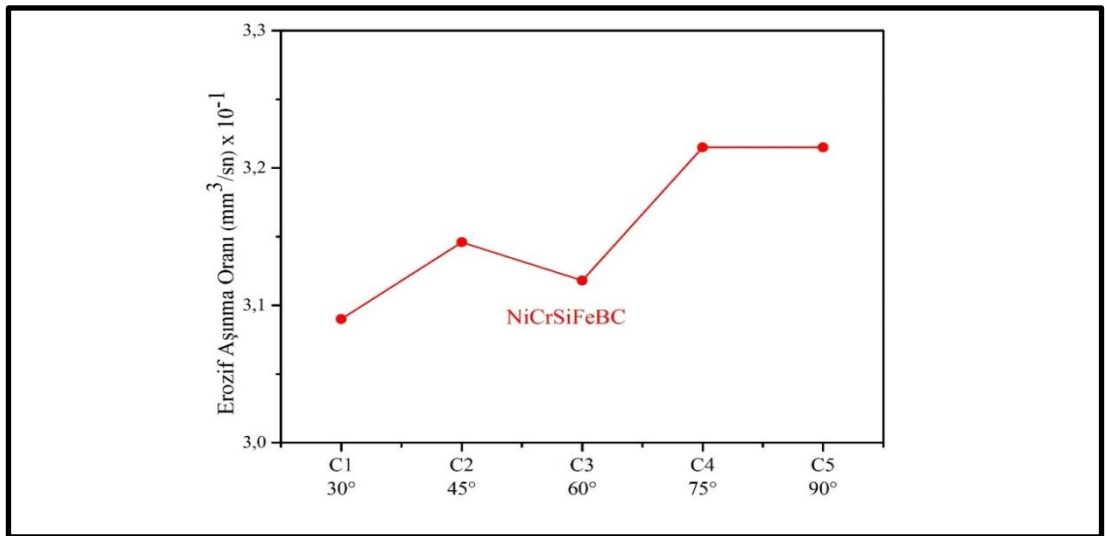


Şekil 5.17. Ti6Al4V ve Sert Nikel Alaşım yüzeylerin farklı açılardaki malzeme kayıpları.

Şahin ve arkadaşları çalışmalarında Ti6Al4V alaşımına uyguladıkları erozif aşınma testlerinde maksimum erozif aşınma miktarının 30° açı ile aşındırıcı partiküllerin yüzeye püskürtüldüğünde oluştuğunu belirtmişlerdir. Çalışmada bu sonuca paralel değerlere ulaşılmıştır. Titanyum ve alaşımlarında 30° partikül çarpma açısında erozif aşınma uygulanması, sünek karakterdeki bu malzemelerin düşük partikül çarpma açılarında maksimum malzeme kaybını mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları ile oluşturduğunu göstermektedir [74]. Şekil 5.18’de Ti6Al4V alaşımı ve sert nikel alaşım yüzeyin farklı açılardaki erozif aşınma oranları verilmiştir.



Şekil 5.18. Ti6Al4V ve Sert Nikel Alaşım yüzeylerin farklı açılardaki erozif aşınma oranları.



Şekil 5.19. Sert Nikel Alaşım yüzeyinin farklı açılardaki erozif aşınma oranları.

Katı partikül erozyon testi uygulanan malzemeler, katı partiküllerin çarpma açısına bağlı olarak malzeme kayıplarına göre sünek, yarı-sünek ve gevrek olarak sınıflandırılırlar. Sünek malzemelerde maksimum erozyon aşınması düşük çarpma açılarında ( $15^{\circ}$ - $30^{\circ}$ ), gevrek malzemelerde maksimum erozyon aşınması dik çarpma açısında ( $90^{\circ}$ ) ve yarı-sünek malzemelerde maksimum erozyon aşınması  $45^{\circ}$ - $60^{\circ}$  çarpma açılarında görülür [75,76]. Şekil 5.19'da sert nikel alaşım yüzeyinin farklı açılardaki erozif aşınma oranları verilmiştir.

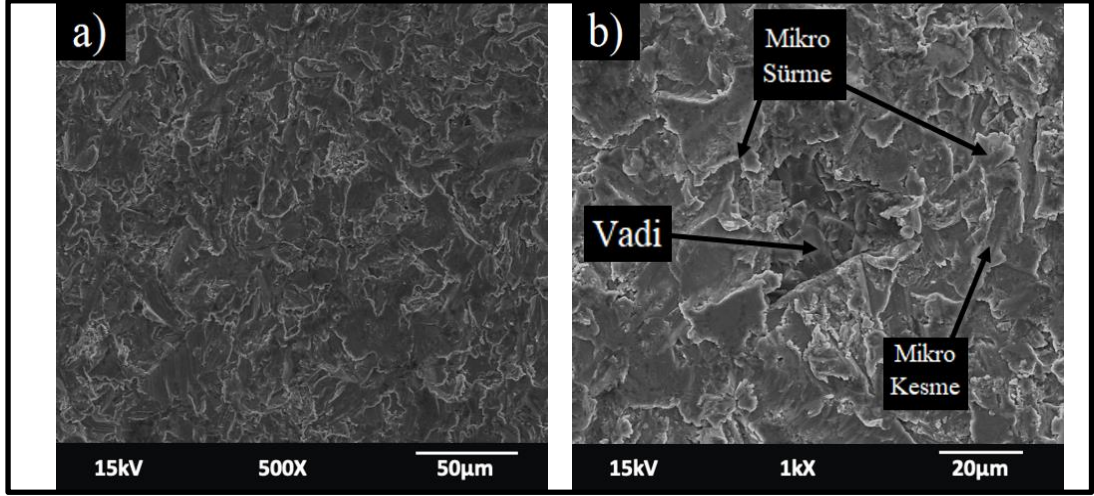
Akbarzadeh vd. 12 farklı metalin katı partikül erozyon davranışlarını iki farklı partikül püskürtme hızı ve 6 farklı partikül çarpma hızı için gerçekleştirmişlerdir. 12 farklı metal arasında yer alan nikel plakanın açılara göre malzeme kaybı Tablo 5.1'de verilmiştir [77].

Tablo 5.1. Nikel plakanın partikül çarpma açılara göre erozyon oranları.

Partikül Çarpma Açısı	$15^{\circ}$	$30^{\circ}$	$45^{\circ}$	$60^{\circ}$	$75^{\circ}$	$90^{\circ}$
Erozyon Oranı	0,6	0,85	1,9	1,5	1,29	1,55

Çalışmada nikel plaka için elde edilen erozyon oranları tez çalışmasında ortaya konan sert nikel alaşımın katı partikül erozyon testi sonuçları ile paralellik göstermektedir. Tez çalışmasında da sert nikel alaşım yüzeyinin en çok malzeme kaybını  $90^{\circ}$  açı ile uygulanan erozif aşınma testinde gerçekleştiği saptanmış ve Şekil 5.19'da ortaya konmuştur.

$30^{\circ}$  açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan tutulan Ti6Al4V yüzeyinin SEM mikroskobunda elde edilmiş 500x ve 1000x büyütmede görüntüleri Şekil 5.20'de verilmiştir. Görüntüleri incelediğimizde  $30^{\circ}$  açı ile numune yüzeyine çarpan aşındırıcı partiküllerin mikro kesme ve mikro sürme mekanizmalarıyla yüzeyi yoğun bir biçimde aşındırdıkları gözlemlenmektedir. Tüm malzeme yüzeyinin plastik deformasyona uğradığı ve aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyini sürerek aşınma izleri oluşturduğu gözlemlenmektedir. Şekil 5.20 b)'de derin vadiler ve yarıklar gözlemlenmektedir.

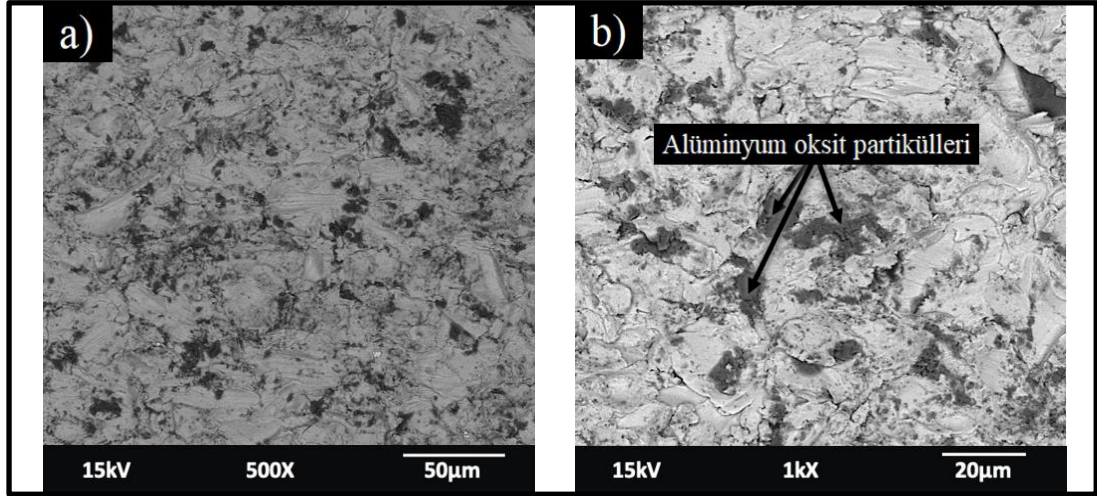


Şekil 5.20. Ti6Al4V yüzeyinin 30° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.

Görüntüler incelendiğinde 30° çarpma açısında aşındırıcı partiküllerin numune yüzeyini mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları ile yoğun bir şekilde aşındırdıkları ve bölgesel aşınma izleri görülmektedir. Yüzeyin tamamının plastik deformasyona uğradığı ve partiküllerin malzeme yüzeyini sürerek aşınma izleri oluşturduğu görülmektedir. Sünek malzemelerde aşınma olayı, aşındırıcı partiküllerin yer değiştirmesine veya kesme hareketine bağlı malzeme kaybıyla ortaya çıkan bir plastik deformasyon sürecidir.

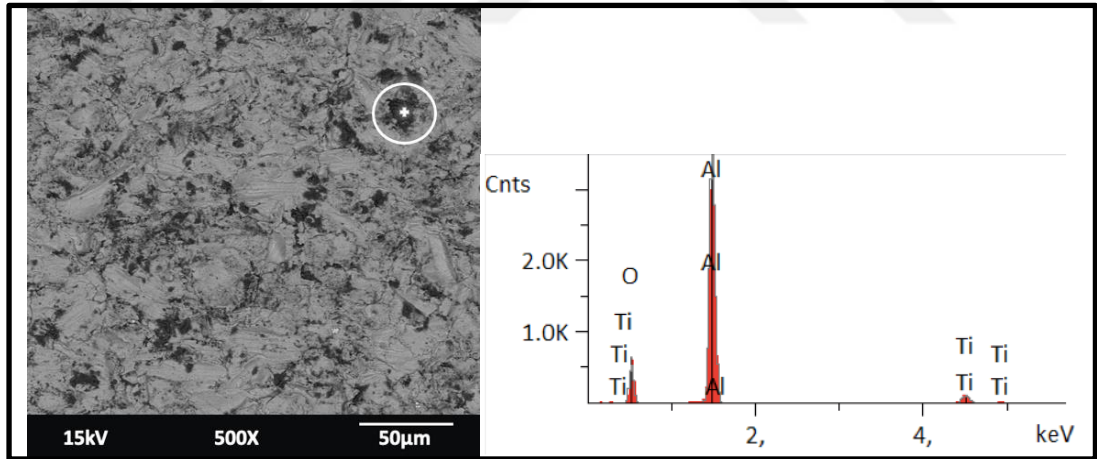
Bonu ve diğerleri Ti6Al4V alaşımına Ti/TiN çok katmanlı nano kaplama yaparak farklı kaplama kalınlıkları ile Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyon davranışlarını geliştirmeyi hedefledikleri çalışmalarında ürettikleri kaplama yapılan numuneleri ve kaplamasız Ti6Al4V alaşımını 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°'lik açılar ile katı partikül erozyon testi uygulamışlardır. Gerçekleştirdikleri testler sonucunda kaplamasız Ti6Al4V alaşımının en yüksek malzeme kaybını 30° ile uygulanan katı partikül erozyon testinde gerçekleştirmiştir [78].

30° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan Ti6Al4V yüzeyinin aşınma izlerinin daha net görülebilmesi için Şekil 5.21'de Ti6Al4V yüzeyinin BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir. BSE ile alınan görüntülerde siyah kontrast ile görünen bölgelerin yüzeye saplanmış alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri olduğu gözlemlenmektedir.



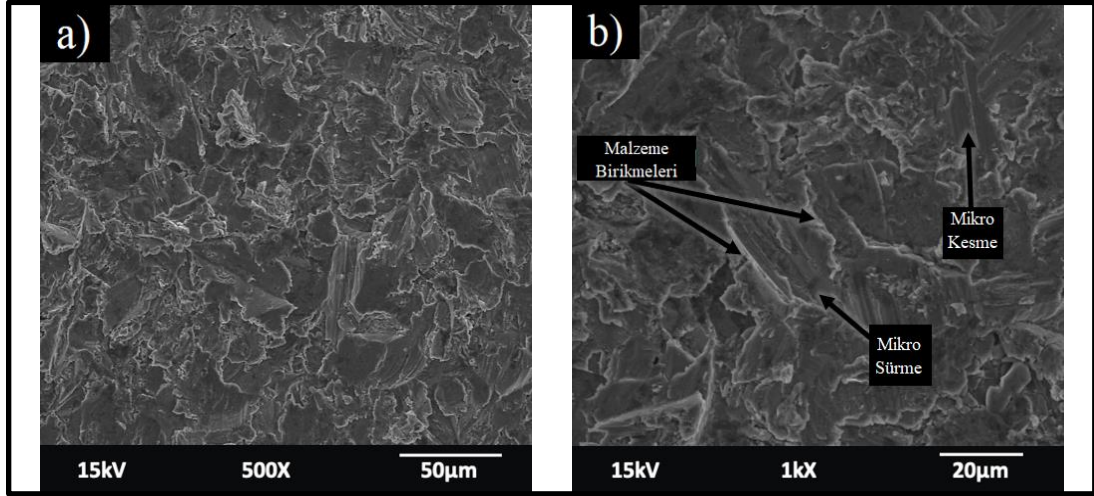
Şekil 5.21. Ti6Al4V yüzeyinin 30° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.

30° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin Ti6Al4V yüzeyinin koyu kontrastlı bölgesinden alınan EDX analizi Şekil 5.22’de verilmiştir. Yapılan bu analiz koyu renkteki bölgenin numune yüzeyine gömülen alüminyum oksit partikülü olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.22. Ti6Al4V yüzeyinin 30° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi.

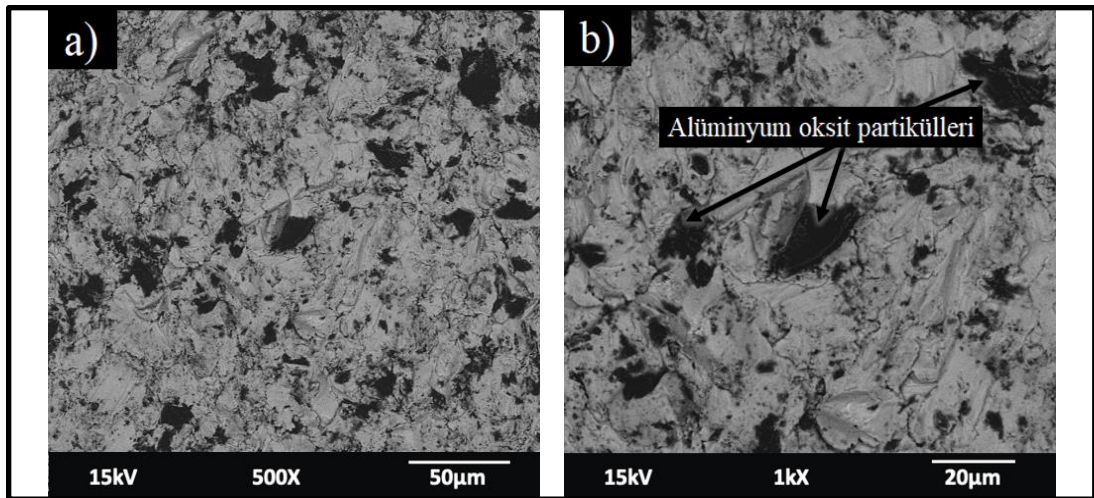
45° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan Ti6Al4V yüzeyinin SEM mikroskobunda elde edilmiş 500x ve 1000x büyütmede görüntüleri Şekil 5.23’de verilmiştir. Yüzey görüntüleri incelendiğinde mikro sürme, mikro kesme aşınma mekanizmaları ile birlikte malzeme birikmeleri ile bölgesel aşınmalar gözlemlenmektedir.



Şekil 5.23. Ti6Al4V yüzeyinin 45° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.

Şekil 5.23’de verilen görüntülerde 30° püskürtme açısı ile eroziv aşınma testi uygulanan numuneden farkı olarak sürme ve kesme izleri daha kısadır, fakat yine sünek deformasyon gerçekleşmiştir.

45° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan Ti6Al4V yüzeyinin aşınma izlerinin daha net görülebilmesi için Şekil 5.24’de Ti6Al4V yüzeyinin BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir. BSE ile alınan görüntülerde siyah kontrast ile görünen bölgelerin yüzeye saplanmış alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri gözlemlenmektedir.

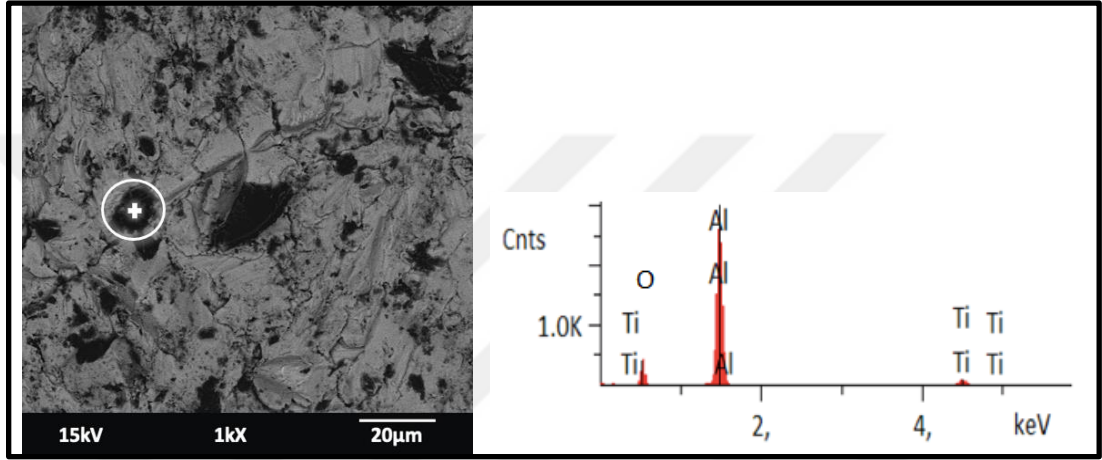


Şekil 5.24. Ti6Al4V yüzeyinin 45° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.



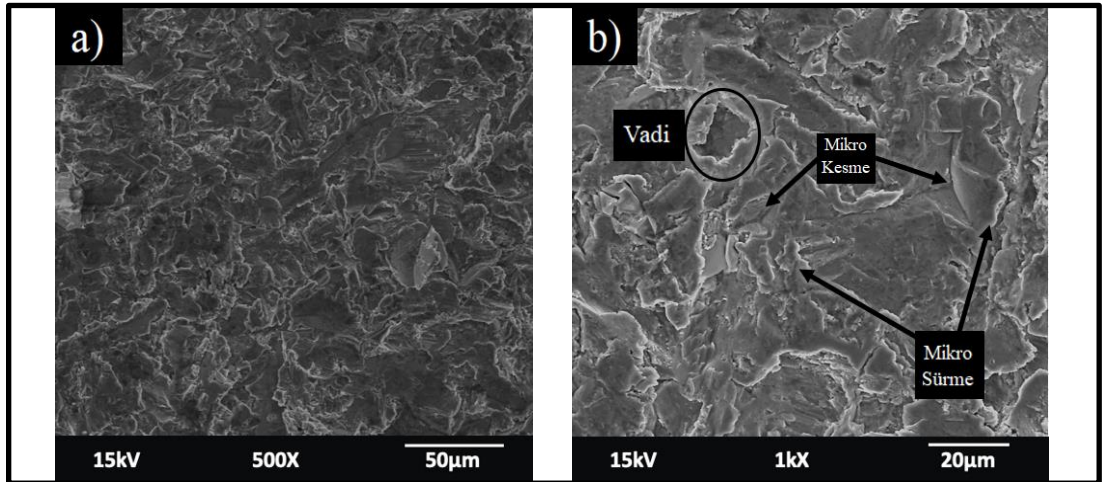
BSE modunda SE modundan farklı olarak görüntü üzerindeki siyah kontrastlar daha net seçilmektedir. Siyah kontrastlar yüzeye gömülmüş alüminyum oksit partikülleridir. 30° açı ile erozif aşınma testi uygulanan numuneye nazaran yüzeyde daha çok alüminyum oksit partikülü gözlemlenmektedir.

45° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin Ti6Al4V yüzeyinin koyu kontrastlı bölgesinden alınan EDX analizi Şekil 5.25’de verilmiştir. Yapılan bu analiz doğrultusunda koyu renkteki bölgenin numune yüzeyine gömülen alüminyum oksit olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 5.25. Ti6Al4V yüzeyinin 45° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi.

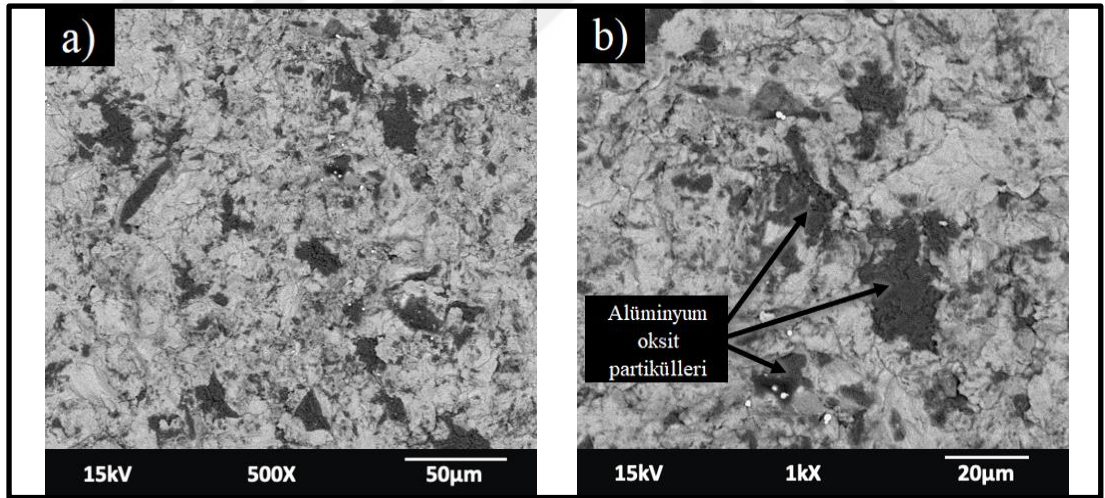
60° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan Ti6Al4V yüzeyinin SEM mikroskobunda elde edilmiş 500x ve 1000x büyütmede görüntüleri Şekil 5.26’da verilmiştir.



Şekil 5.26. Ti6Al4V yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.

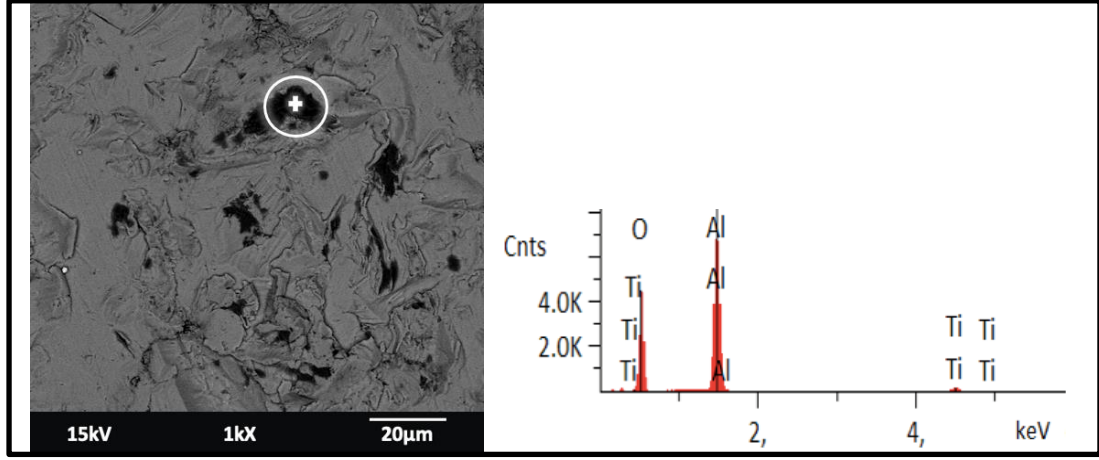
60° açı ile erozif aşınma uygulanan numunemizde mikro kesme ve sürme mekanizmalarının boyunun 30° ve 45° dereceye göre kayda değer ölçüde azaldığı gözlemlenmektedir. Alüminyum oksit partikülleri daha çok yüzeye gömülmeye başlamışlardır. Aşınma krateri oluşumu da gözlemlenmektedir. Yüzeye gömülen alüminyum oksit partiküllerinin üzerine gelen tekrarlı alüminyum oksit partiküllerinin çarpmasının etkisi ile her yöne doğru çok sayıda çatlak ilerlemesi başlangıcı gözlemlenmektedir. Numunenin BSE modunda alınan görüntüleri incelendiğinde yüzeydeki alüminyum oksit partiküllerinin 30° ve 45° açılara göre daha çok olduğu net bir şekilde gözlenmiştir.

60° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan Ti6Al4V yüzeyinin aşınma izlerinin daha net görülebilmesi için Şekil 5.27'de Ti6Al4V yüzeyinin BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir. BSE ile alınan görüntülerde siyah kontrast ile görünen bölgenin yüzeye saplanmış alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri 30° ve 45° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunelere göre alüminyum oksit partiküllerinin boyutların daha kaba olduğu gözlemlenmektedir.



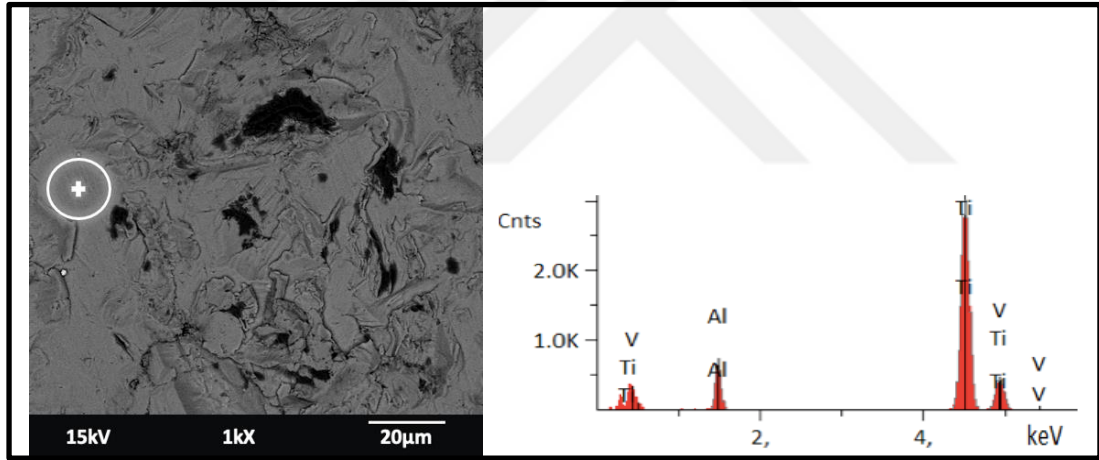
Şekil 5.27. Ti6Al4V yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.

60° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin Ti6Al4V yüzeyinin koyu kontrastlı noktasından alınan EDX analizi Şekil 5.28'de verilmiştir. Yapılan bu analiz doğrultusunda koyu renkteki bölgenin numune yüzeyine gömülen alüminyum oksit olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 5.28. Ti6Al4V yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi.

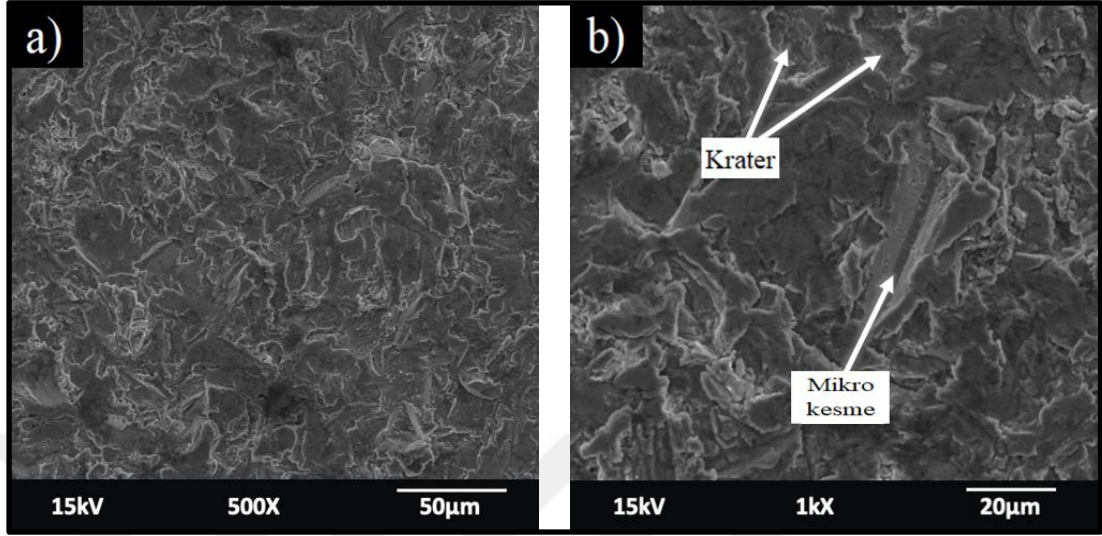
60° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin Ti6Al4V yüzeyinin açık gri kontrastlı bölgesinden alınan EDX analizi Şekil 5.29’da verilmiştir. Yapılan bu analiz doğrultusunda açık gri renkteki bölgenin Ti6A4V olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 5.29. Ti6Al4V yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi.

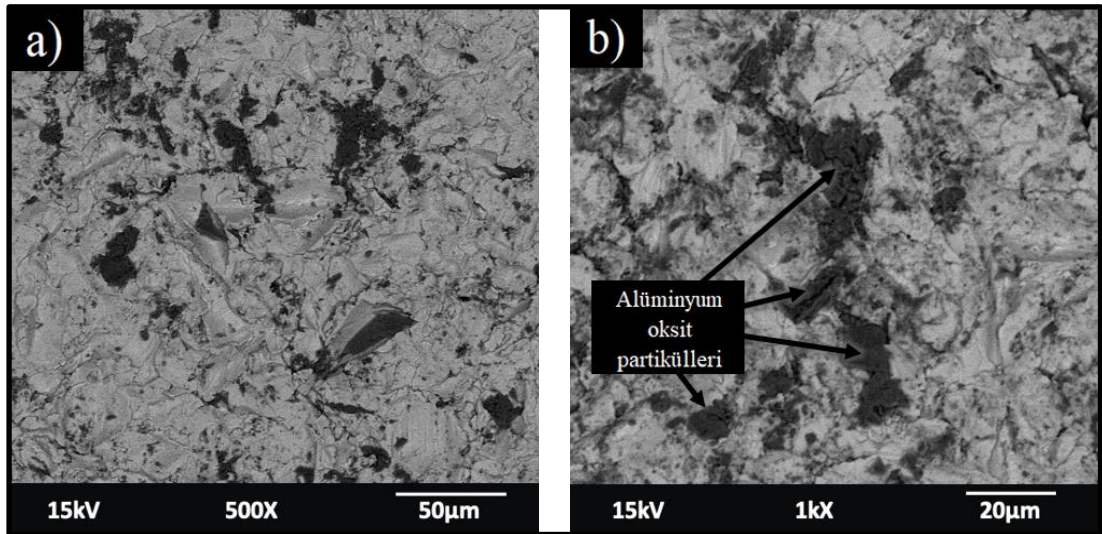
75° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan Ti6Al4V yüzeyinin SEM mikroskobunda elde edilmiş 500x ve 1000x büyütmede görüntüleri Şekil 5.30’da verilmiştir. 75° püskürtme açısı ile erozif aşınma testi uygulanan Ti6Al4V yüzeyinde mikro kesme ve sürme mekanizmalarının boyları 30°, 45° ve 60° göre son derece kısalmıştır. Krater oluşumları iyice belirgin hal almıştır. Malzeme kaldırma yerini alüminyum oksitin yüzeye gömülmesine bırakmış ve Ti6Al4V yüzeydeki malzeme kaybı 30°, 45° ve 60° erozif aşınma parametrelerine göre azalmıştır. Alüminyum oksit

partikülleri yüzeyde gömülmüş olarak rahatlıkla seçilebilmektedir ve tekrarlı çarpmaları sonucunda çatlak ilerlemeleri gözlemlenmektedir.



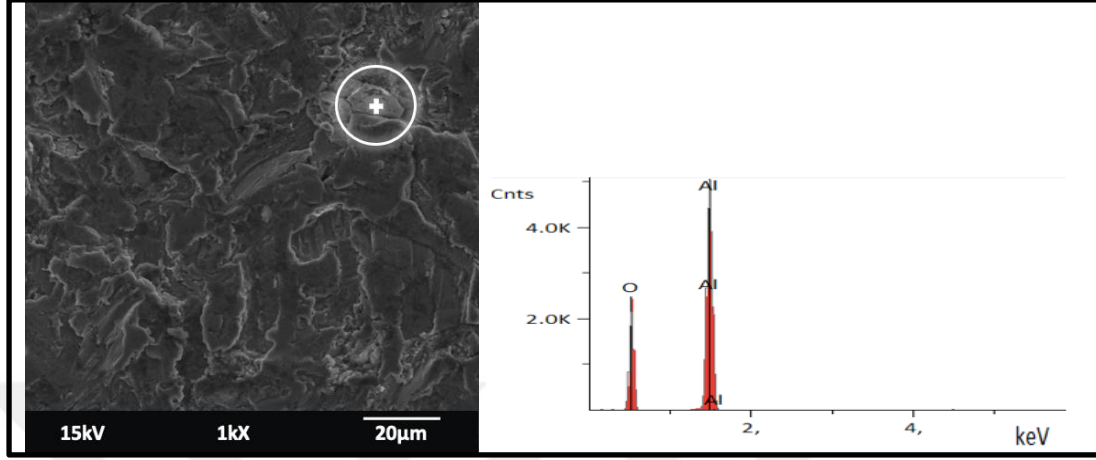
Şekil 5.30. Ti6Al4V yüzeyinin 75° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.

Alüminyum oksit partikülleri yüzeye gömülmüş olarak BSE görüntülerinde daha iyi anlaşılmaktadır. 75° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan Ti6Al4V yüzeyinin BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri Şekil 5.31’de a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme olarak verilmiştir.



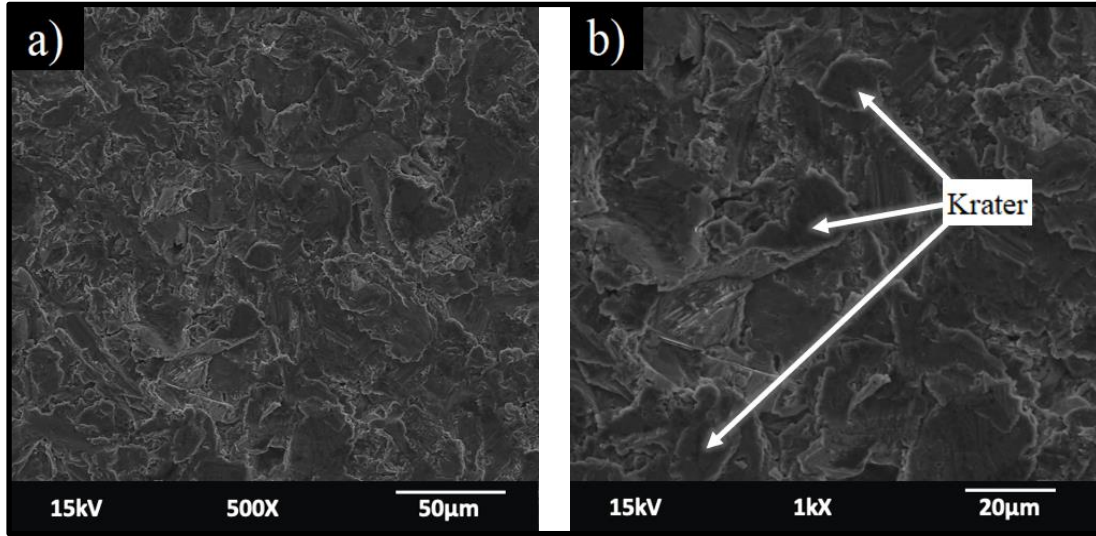
Şekil 5.31. Ti6Al4V yüzeyinin 75° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.

BSE ile alınan görüntülerde siyah kontrast ile görünen bölgelerin yüzeye saplanmış alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri gözlemlenmektedir. Şekil 5.32’de yapılan EDX analizi ile malzeme yüzeyindeki alüminyum oksit partikülleri doğrulanmıştır.



Şekil 5.32. Ti6Al4V yüzeyinin 75° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi.

90° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan Ti6Al4V yüzeyinin SEM mikroskopunda elde edilmiş 500x ve 1000x büyütmede görüntüleri Şekil 5.33’de verilmiştir.



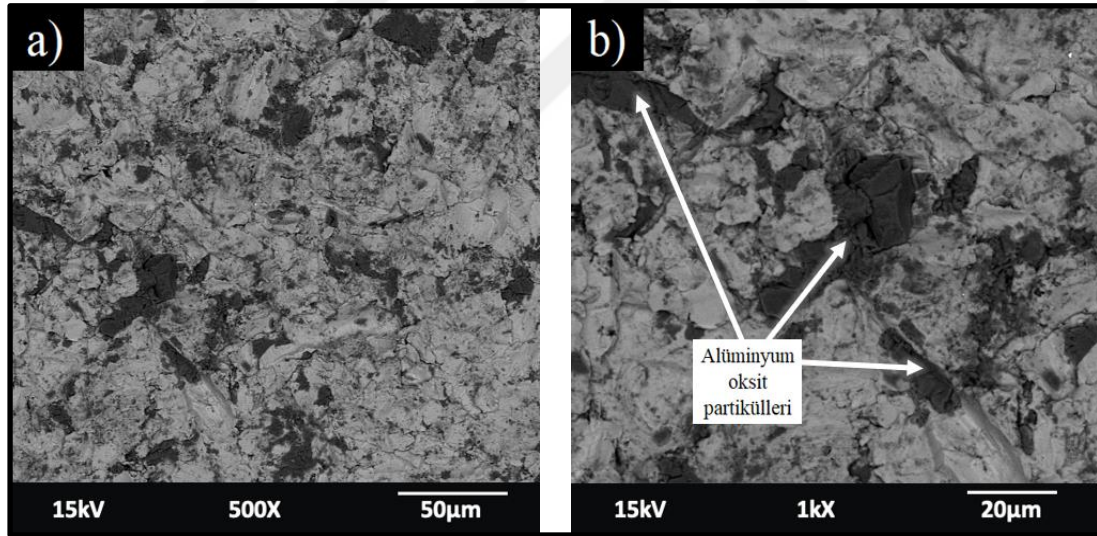
Şekil 5.33. Ti6Al4V yüzeyinin 90° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.

90° lik püskürtme açısı ile erozif aşınma uygulanan Ti6Al4V numune yüzeyinde mikro kesme ve sürme mekanizmaları yerini alüminyum oksit partiküllerinin çarpmasından oluşan birçok küçük krater ve yüzeyde diğer tüm püskürtme açılarından daha fazla

gözlemlenen alüminyum oksit partikülüne bırakmıştır. Mikro kesme ve mikro kesme mekanizmaları yerini mikro çatlak mekanizmasına bıraktığını söyleyebiliriz. Plastik deformasyon mikro çatlak mekanizmaları üzerinden gerçekleşmiştir.

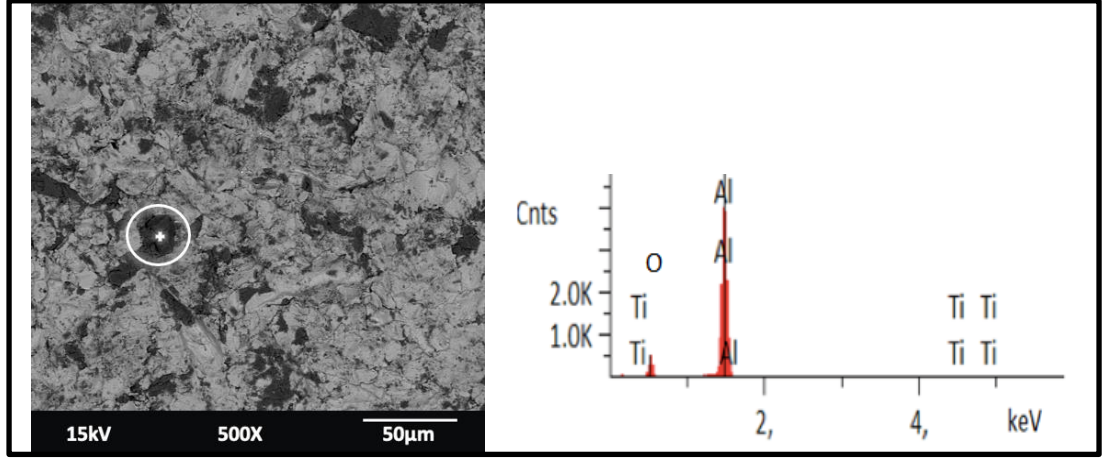
Aşınmanın maksimum olduğu 30° püskürtme açısı ile erozif aşınma uygulanan numune ile kıyaslandığında daha az erozyon aşınmasına sebep olan sınırlı oranda aşınma izine ve plastik deformasyona rastlanmıştır. 90° püskürtme açısı ile erozif aşınma uygulanan Ti6Al4V numune yüzeyinde diğer uygulanan açılara göre daha çok alüminyum oksit partikülü yüzeye gömülmüş olarak gözlemlenmiştir.

90° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan Ti6Al4V yüzeyinin aşınma izlerinin daha net görülebilmesi için Şekil 5.34'de Ti6Al4V yüzeyinin BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir. BSE ile alınan görüntülerde siyah kontrast ile görünen bölgelerin yüzeye saplanmış alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri olduğu gözlemlenmektedir.



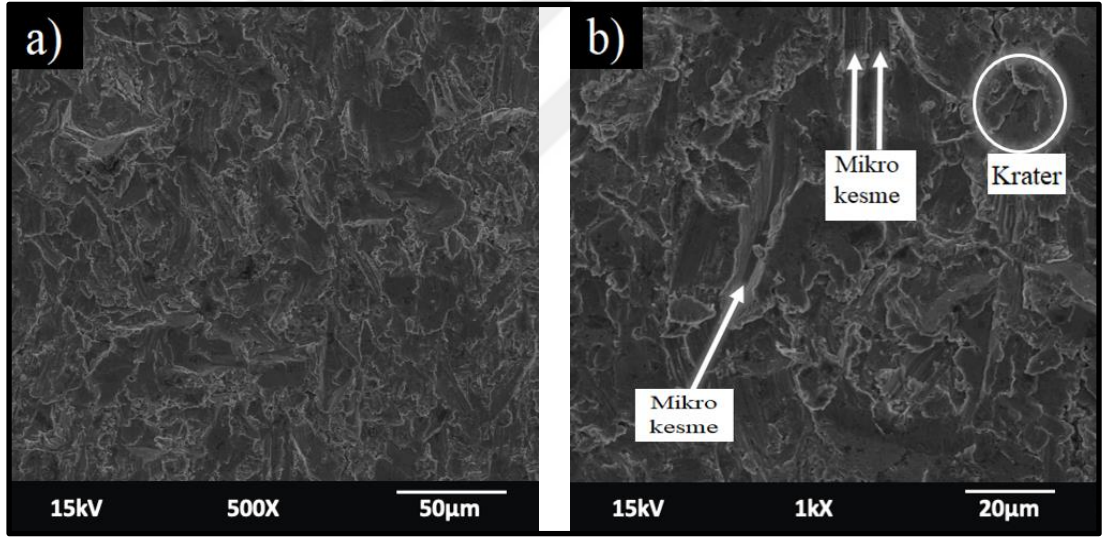
Şekil 5.34. Ti6Al4V yüzeyinin 90° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.

90° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin Ti6Al4V yüzeyinin koyu kontrastlı noktasından alınan EDX analizi Şekil 5.35'de verilmiştir. Yapılan bu analiz doğrultusunda koyu kontrasttaki bölgenin numune yüzeyine gömülen alüminyum oksit olduğu doğrulanmıştır.



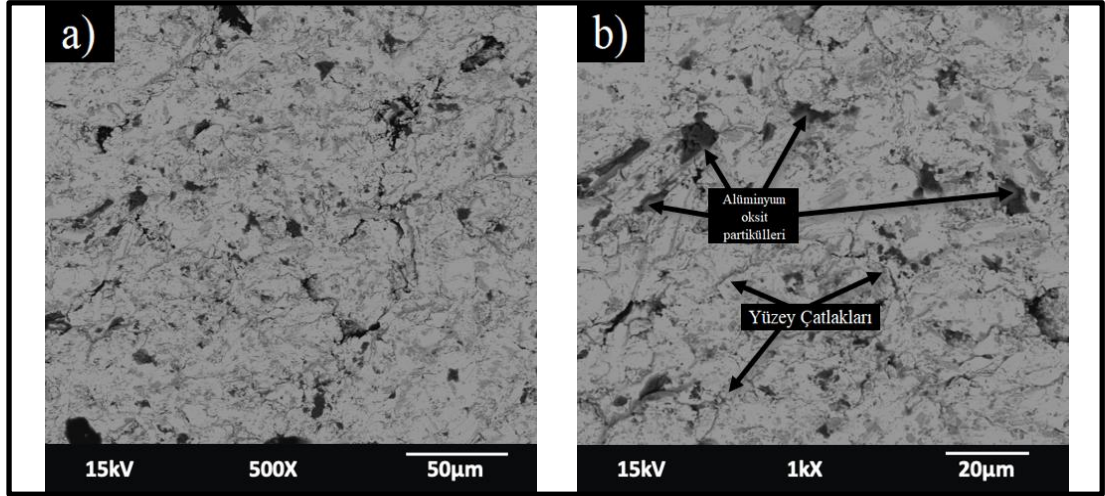
Şekil 5.35. Ti6Al4V yüzeyinin 90° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi.

30° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin SEM mikroskobunda elde edilmiş 500x ve 1000x büyütmede görüntüleri Şekil 5.36’de verilmiştir.



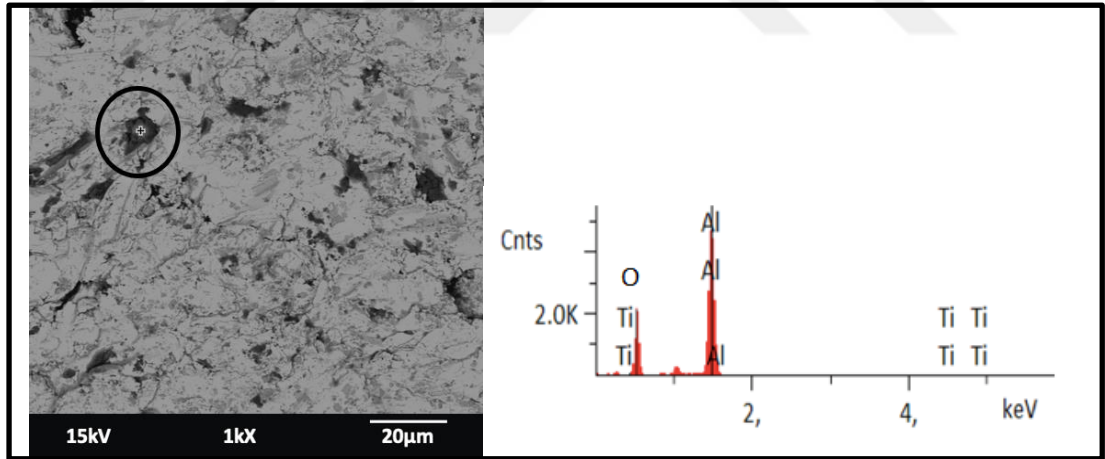
Şekil 5.36. Sert nikel alaşım yüzeyinin 30° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.

30° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin aşınma izlerinin daha net görülebilmesi için Şekil 5.37’de sert nikel alaşım yüzeyinin BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir. BSE ile alınan görüntülerde koyu renk kontrast ile görünen bölgelerin yüzeye saplanmış alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri gözlemlenmektedir.



Şekil 5.37. Sert nikel alaşım yüzeyinin 30° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütme SEM görüntüleri.

30° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin koyu kontrastlı bölgesinden alınan EDX analizi Şekil 5.38’de verilmiştir. Yapılan bu analiz doğrultusunda koyu renkteki bölgenin numune yüzeyine gömülen alüminyum oksit olduğu doğrulanmıştır.



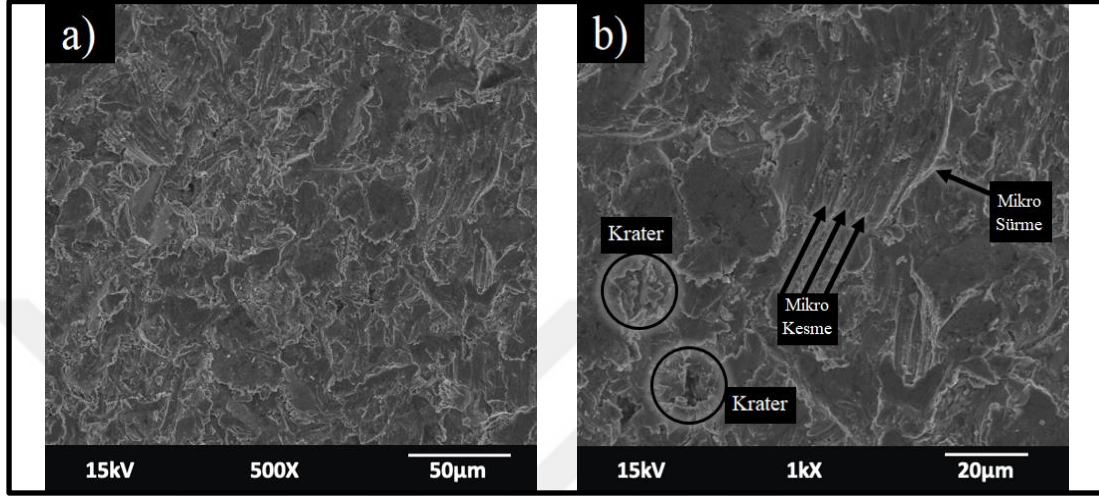
Şekil 5.38. Sert nikel alaşım yüzeyinin 30° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi.

Yamaoğlu vd. yaptıkları çalışmada molibden ve bakır ilaveli toz metalurjik çeliğin mekanik ve aşınma özelliklerine nikel ilavesinin etkilerini araştırmışlardır. Üç farklı nikel oranına sahip numuneler 40 MPa basınç altında, 1120°C’de 30 dakika sinterlendikten sonra mikroyapıları ve mekanik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Artan nikel içeriği ile sertliğin de arttığı saptanmıştır. Bununla birlikte artan nikel oranı ile aşınma türünün abrazif aşınmadan adhezif aşınmaya değiştiği gözlemlenmiştir [79].



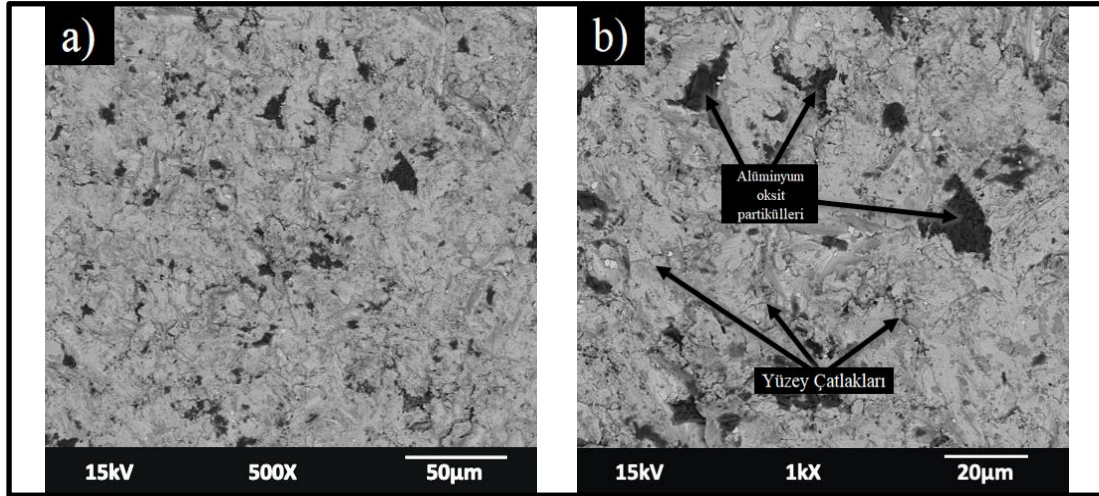
Tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan sert nikel alaşım tozunun nikel içeriği değiştirilerek aşınma davranışları incelenebilir.

45° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin SEM mikroskobunda elde edilmiş 500x ve 1000x büyütmede görüntüleri Şekil 5.39'da verilmiştir.



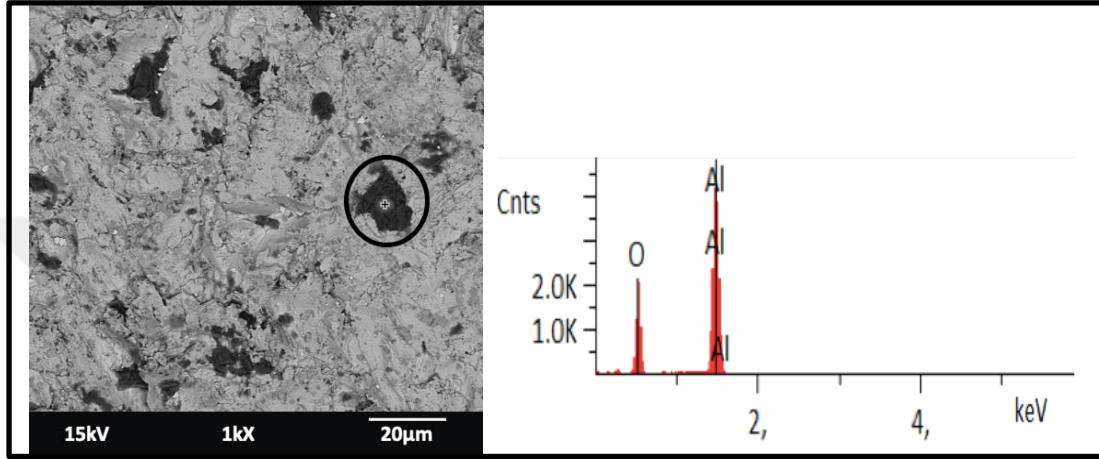
Şekil 5.39. Sert nikel alaşım yüzeyinin 45° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.

45° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin aşınma izlerinin daha net görülebilmesi için Şekil 5.40'da sert nikel alaşım yüzeyinin BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir.



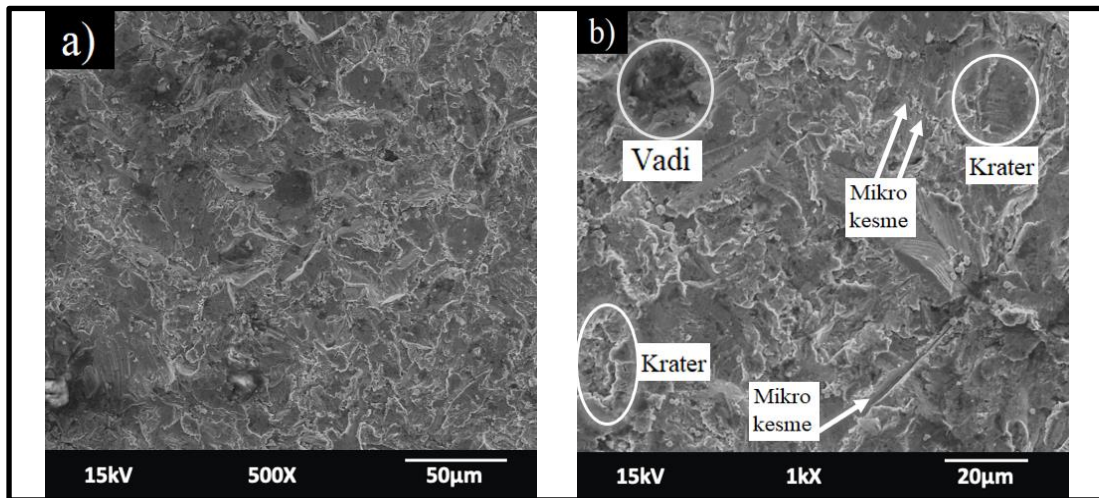
Şekil 5.40. Sert nikel alaşım yüzeyinin 45° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.

Şekil 5.40’da BSE ile alınan görüntülerde siyah kontrast ile görünen bölgelerin yüzeye saplanmış alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri olarak yorumlanmıştır. 45° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin koyu kontrastlı bölgesinden alınan EDX analizi Şekil 5.41’de verilmiştir. Yapılan bu analiz doğrultusunda koyu kontrasttaki bölgenin numune yüzeyine gömülen alüminyum oksit olduğu doğrulanmıştır.



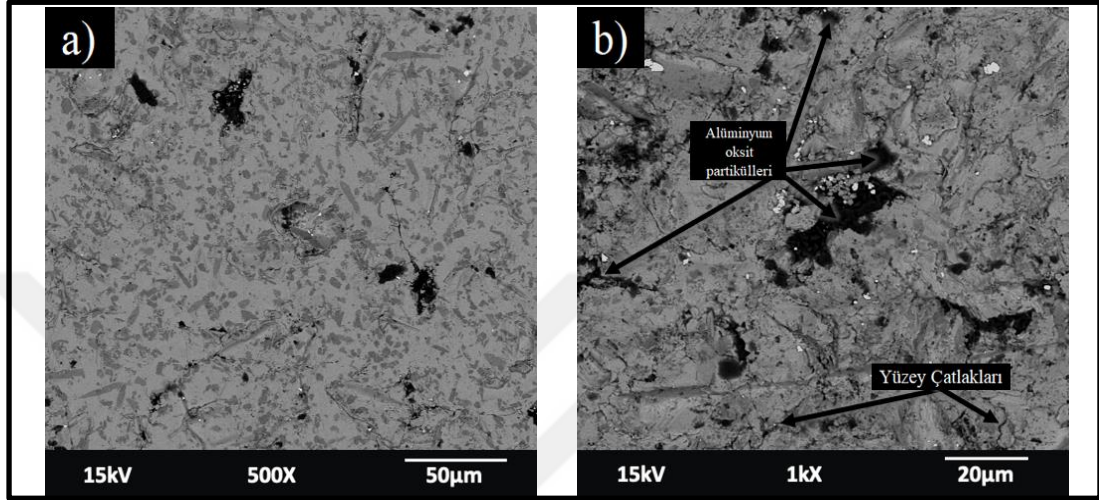
Şekil 5.41. Sert nikel alaşım yüzeyinin 45° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi.

60° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin SEM mikroskobunda elde edilmiş 500x ve 1000x büyütmede görüntüleri Şekil 5.42’de verilmiştir.

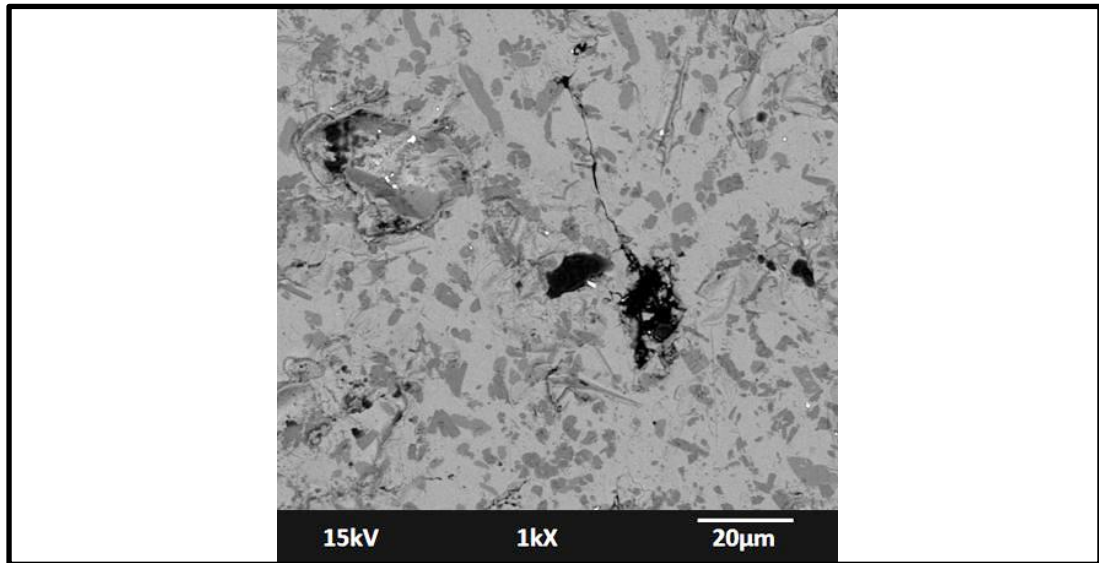


Şekil 5.42. Sert nikel alaşım yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.

60° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin aşınma izlerinin daha net görülebilmesi için Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'de sert nikel alaşım yüzeyinin BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir. BSE ile alınan görüntülerde siyah kontrast ile görünen bölgelerin yüzeye saplanmış alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri olduğu gözlemlenmektedir.



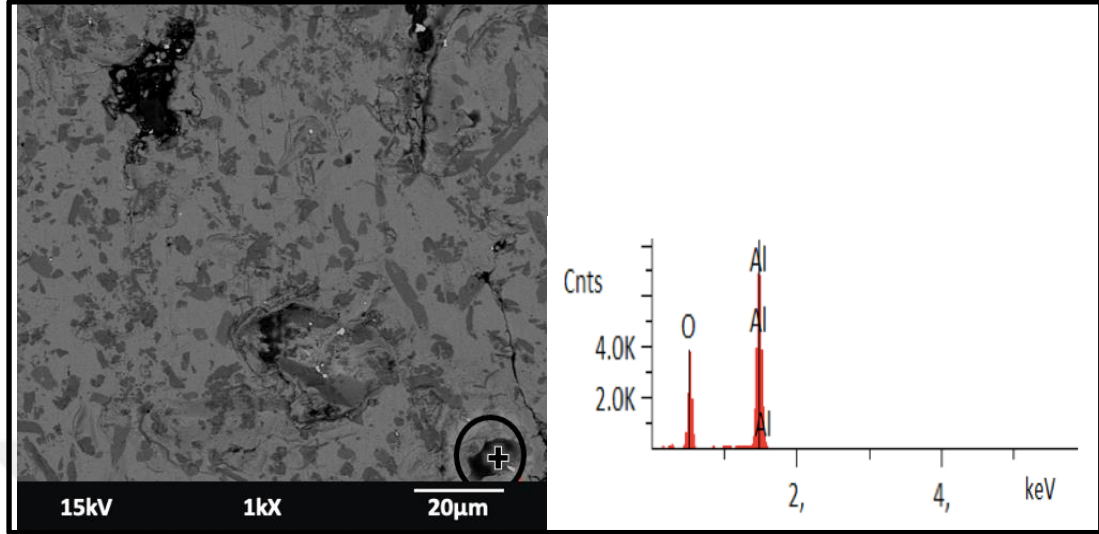
Şekil 5.43. Sert nikel alaşım yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.



Şekil 5.44. Sert nikel alaşım yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış SEM görüntüsü.

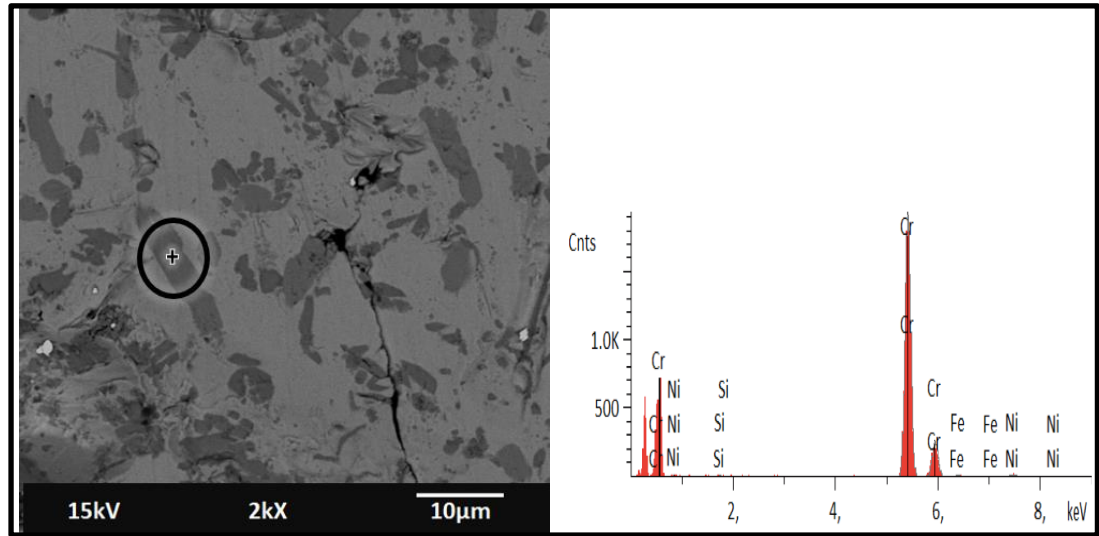
60° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin koyu kontrastlı bölgesinden alınan EDX analizi Şekil 5.45'de verilmiştir. Yapılan bu

analiz doğrultusunda koyu kontrasttaki bölgenin numune yüzeyine gömülen alüminyum oksit olduğu tespit edilmiştir.



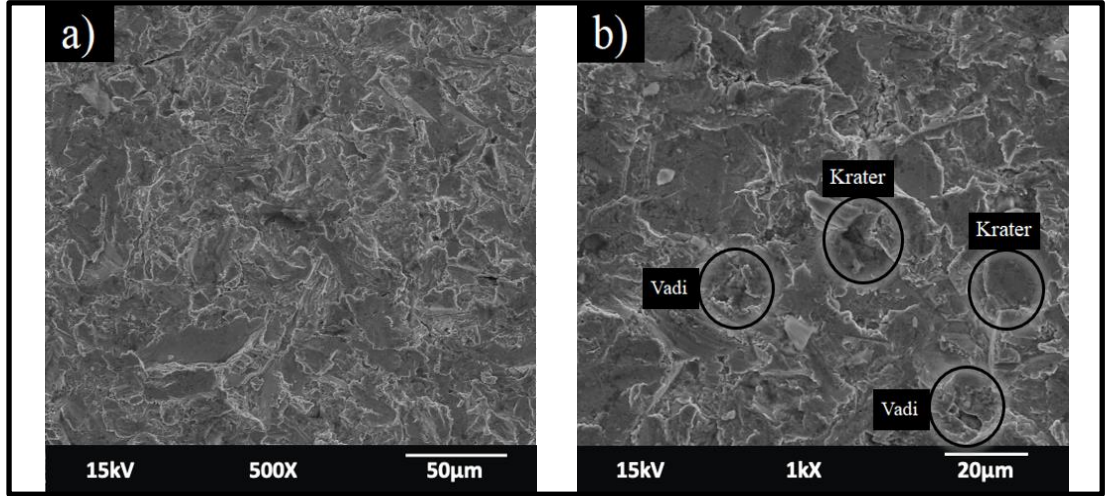
Şekil 5.45. Sert nikel alaşım yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi.

60° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin koyu kontrastlı noktasından alınan EDX analizi Şekil 5.46’da verilmiştir. Yapılan bu analiz doğrultusunda gri kontrasttaki bölgenin CrC bileşiminde olduğu saptanmıştır.



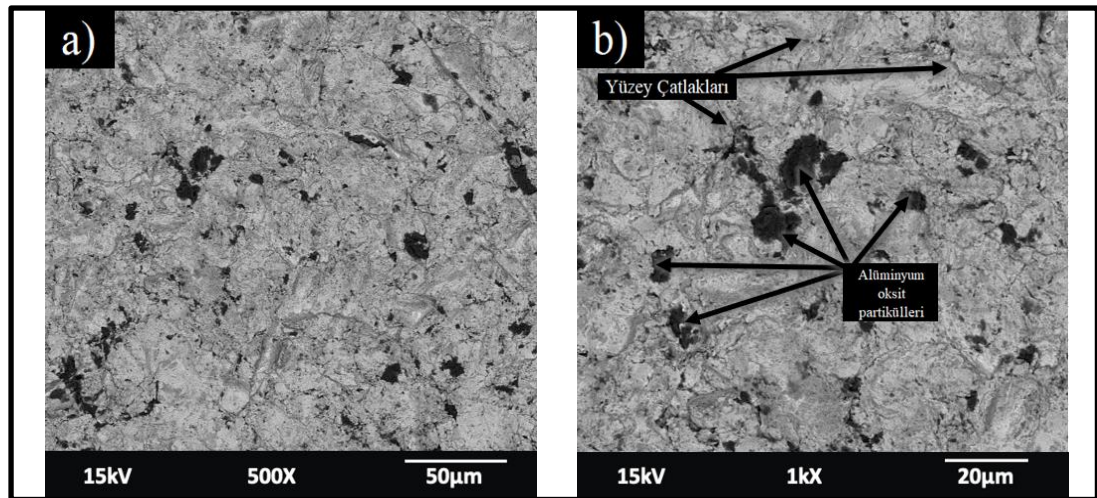
Şekil 5.46. Sert nikel alaşım yüzeyinin 60° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonrasında alınan SEM görüntüsü ve görüntü üzerinde belirtilen noktanın EDX analizi.

75° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin SEM mikroskobunda elde edilmiş 500x ve 1000x büyütmede görüntüleri Şekil 5.47’de verilmiştir.



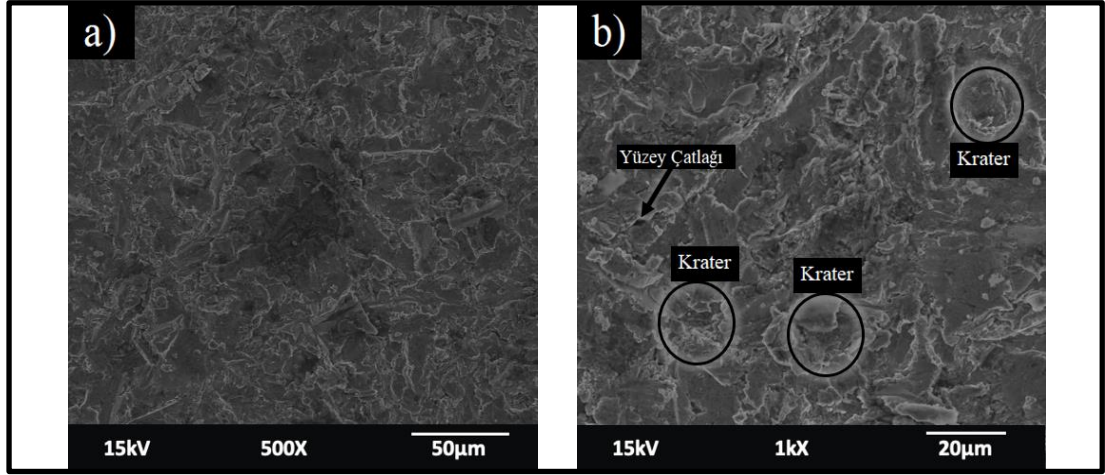
Şekil 5.47. Sert nikel alaşım yüzeyinin 75° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.

75° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin aşınma izlerinin daha net görülebilmesi için Şekil 5.48’de sert nikel alaşım yüzeyinin BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir. BSE ile alınan görüntülerde siyah kontrast ile görünen bölgelerin yüzeye saplanmış alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri gözlemlenmektedir.



Şekil 5.48. Sert nikel alaşım yüzeyinin 75° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.

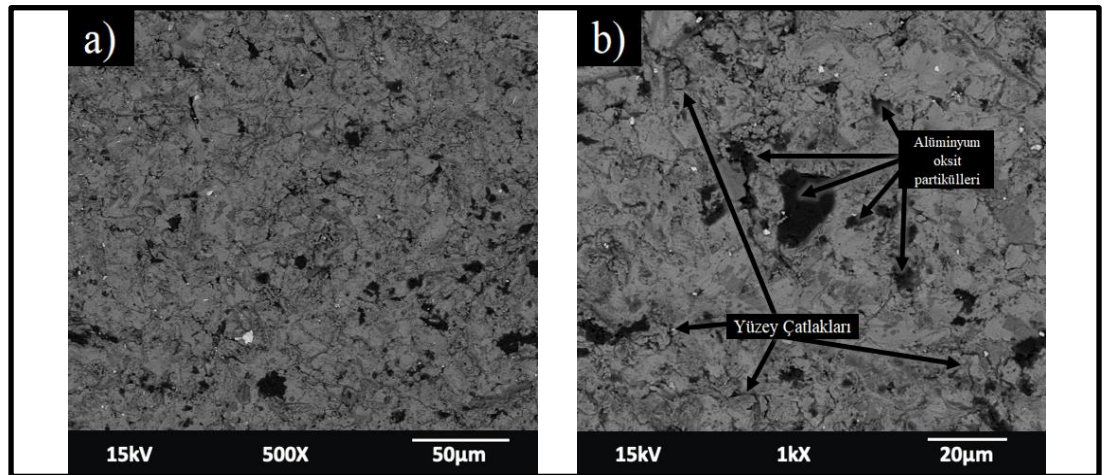
90° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin SEM mikroskobunda elde edilmiş 500x ve 1000x büyütmede görüntüleri Şekil 5.49’da verilmiştir.



Şekil 5.49. Sert nikel alaşım yüzeyinin 90° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.

Curkovic ve arkadaşları çalışmalarında yüksek saflıktaki alümina seramiğine farklı açılarda katı partikül erozyon uygulamışlardır. Gevrek karakteristikte olan alümina erozif aşınma testlerinde en yüksek malzeme kaybının 90° ile katı partikül erozyonu uygulanan testte gerçekleştiğini saptamışlardır [80].

90° açı ile katı partikül erozyon testi uygulanan numunenin sert nikel alaşım yüzeyinin aşınma izlerinin daha net görülebilmesi için Şekil 5.50’de sert nikel alaşım yüzeyinin BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir. BSE ile alınan görüntülerde siyah kontrast ile görünen bölgelerin yüzeye saplanmış alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri gözlemlenmektedir.



Şekil 5.50. Sert nikel alaşım yüzeyinin 90° açı ile katı partikül erozyonuna uğraması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin BSE modunda alınmış a) düşük (500X) ve b) yüksek (1000X) büyütmeli SEM görüntüleri.

90° püskürtme açısında sert nikel alaşım yüzeyinin katı partikül aşınma yüzeyi görüntüleri incelendiğinde Ti6Al4V yüzeyinde görüldüğü şekilde belirgin kayma ve sürme aşınmalarına rastlanmamaktadır. Aşınma yüzeyi pürüzlendirme işlemine benzer şekilde aşınmış olduğu görünmektedir. Alüminyum oksit partiküllerinin malzeme yüzeyinde oluşturduğu tekil kraterler ve bu kraterlere saplanan alüminyum oksit partikülleri gözlemlenmektedir.

Laguna-Camacho ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı sertliklerdeki AISI 304, AISI 306 ve AISI 420 paslanmaz çeliklerini katı partikül erozyon testine tabi tutmuşlardır. Yapılan testlerin sonucunda 3 farklı paslanmaz çelikten sertlik değeri en yüksek olan AISI 420 paslanmaz çeliğinde katı partikül erozyonu sonucunda en az malzeme kaybı yaşanmıştır [81]. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda da kaplama ile sertlik artışı sağlanarak malzeme kaybının aza indirilmesi hedeflenmiş ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında titanyum esaslı malzemeler içinde en fazla kullanım alanı bulan Ti6Al4V alaşımının aşınma özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda Ti6Al4V alaşımının yüzeyi sertliği yüksek nikel alaşımı tozları ile toz metalürjik proseslerle kaplanmış, kaplanan ve kaplanmamış yüzeylere kuru sürtünme ve erozif aşınma testleri uygulanmıştır. Genel bir yaklaşım ile verilen bu süreç içerisinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Ti6Al4V alaşımının sert nikel tozları ile kaplanması için tek eksenli sıcak pres kullanılmıştır. Sıcaklık ile basıncın eş zamanlı uygulanmasının sonucu olarak yüksek yoğunluk değerleri elde edilmiş ayrıca hem altlık hem de kaplama arasında kuvvetli bir bağlantı elde edilmiştir. SEM görüntüleri ile ortaya konulan mikro gözenekler haricinde makro gözenek, porozite vb. bir yapıya rastlanmamıştır. Kaplama ve altlık arasında keskin bir geçişin olmaması iki malzemenin birbirine difüze olarak bağlanması SEM görüntüleri ve EDX analizleri ile ortaya konmuş ve kaplama yönteminin başarısını göstermiştir.

Nikel kaplama ile yüzeyin sertliği 706 HV, altlık malzemesinin 447 HV ve arayüzeyin ise sertlik değeri 773 HV olarak ölçülmüştür. Bu yüksek sertlik değerlerinin sebebi arayüzeyde oluşan farklı bileşimlere sahip intermetaliklerdir.

Ön görüldüğü gibi kuru sürtünme aşınma testi sonuçları ele alındığında yapılan kaplama ile malzeme kaybının önemli ölçüde azaltıldığı gözlemlenmiştir. Ti6Al4V yüzeyinde yoğun deformasyon izleri saptanırken, sert nikel alaşım yüzeyde deformasyon izlerinin sertlikteki artış sebebi ile azaldığı ve aşındırıcı izinin küçüldüğü net olarak ortaya konmuştur. Kuru sürtünme aşınma testlerinde sert nikel alaşım kaplamanın Ti6Al4V altlığa göre daha az aşınmasının yanı sıra her iki malzemenin de yüksek sürtünme hızında daha az malzeme kaybına uğradığı gözlemlenmiştir.



Katı partikül erozyonu testlerinde Ti6Al4V yüzeyinde düşük çarpma açılarında (30°) malzeme yüzeyinde mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları belirlenmiştir. Malzeme yüzeyinde bu mekanizmalar ile oluşan aşınma yüzeyine paralel aşınma izleri gözlenmiştir. Diğer yandan yüksek çarpma açısında (90°) yüzeyde düşük oranda mikro çatlak ve yüksek oranda plastik deformasyon hasar mekanizmaları belirlenmiştir. Bu açı değerinde malzemede aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine dik bir açıda çarpması sonucunda bu hasar mekanizmaları ile oluşan vadi ve tepecikler dikkat çekmektedir. SEM görüntüleri ile Ti6Al4V alaşımının sünek bir erozif aşınma davranışı gösterdiği sonucuna varılmış ve SEM görüntüleri ile erozyon oranı değerlerinin uyum gösterdiği sonucuna varılmıştır. SEM incelemeleri sırasında özellikle BSE görüntüleme modunda alınan görüntülerde Ti6Al4V alaşımının yüzeyinde siyah ve siyaha yakın kontrastlarda farklı bölgeler tespit edilmiştir. EDX çalışmaları sonucunda bu bölgelerin yüzeye saplanan alüminyum oksit partikülleri olduğu sonucuna varılmıştır.

Sert nikel alaşım yüzeyine uygulanan tüm katı partikül erozif aşınma testi açılarında Ti6Al4V yüzeyinde yüksek açılarda meydana gelen mekanizmaları gözlemlenmiştir. Sert nikel alaşım yüzeyin gevrek davranış sergilediği katı partikül erozyonu testlerinde literatür ile desteklendiği gibi en çok malzeme kaybı yüksek püskürtme açılarında gerçekleşmiştir. SEM görüntüleri ile ortaya konan deformasyonlarda aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyine çarpmakta ve plastik deformasyona yol açarak yüzeyde kraterler meydana getirmiştir.

Ti6Al4V yüzeyinin katı partikül erozyonu püskürtme açısının artması ile malzeme kaybının azalma eğilimi göstermesi, sünek davranış sergileyen malzemenin dik açılarda aşındırıcı partikülleri yüzeyde tutması veya aşındırıcı partiküllerin yüzeye gömülmesi olarak yorumlanabilir. Ti6Al4V yüzeyine artan püskürtme açısı ile daha fazla gömülen aşındırıcı partiküller yapılan EDX analizleri ile ortaya konmuştur.

Sonuç olarak tez kapsamında Ti6Al4V alaşımı üzerine yapılan nikel alaşım tozları ile kaplamanın aşınma özelliklerini hem kuru sürtünme hem de erozif aşınma açısından önemli derecede geliştirdiği görülmüştür. Elde edilen verilerin bu alanda çalışma yapanlara faydalı olmasını dileriz. Ayrıca bu tez Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2018/158) Kurumumuza desteği için teşekkürü borç biliriz.

## KAYNAKLAR

- [1] Donachie M.J., *Titanium: A Technical Guide*, 2nd ed., ASM International, Ohio, 2000.
- [2] Zhecheva A., Sha W., Malinov S., Long A., Enhancing the Microstructure and Properties of Titanium Alloys Through Nitriding and Other Surface Engineering Methods, *Surface and Coatings Technology*, 2005, **200**(7), 2192-2207.
- [3] Majumdar J.D., Manna I., Laser Surface Engineering of Titanium and Its Alloys for Improved Wear, Corrosion and High-Temperature Oxidation Resistance, Editors: Lawrence J., Waugh D.G., *Laser Surface Engineering*, 1st ed., Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Cambridge, 483-521, 2014.
- [4] Uzun İ.H., Bayındır F., Dental Uygulamalarda Titanyum ve Özellikleri, Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi, 2010, **20**(2), 213-220.
- [5] Lutjering G., Williams J. C., *Engineering Materials and Processes Titanium*, 2nd ed., Springer, Berlin, 2007.
- [6] Wicinski P., Garbacz H., Ossowski M., Wierzchon T., Kurzydowski K.J., Ti-Al Intermetallic Layers Produced on Titanium Alloy by Duplex Method, *Key Engineering Materials*, 2007, **333**, 258-288.
- [7] Herman W.E., Olofson C.T., Machining and Chemical Shaping of Titanium, Editors: Froes F.H., *Titanium Physical Metallurgy Processing and Applications*, 1st ed., ASM International, Ohio, 293-328, 2015.
- [8] Hosseini A., Kishawy H.A., Titanium as a Hard to Cut Material, Editor: Davim J.P., *Machining of Titanium Alloys*, 1st ed., Springer, Berlin, 31-56, 2014
- [9] Yıldız, T., Ti6Al4V Alaşımının Tornalanmasında İşleme Parametrelerinin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvveti Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2015, 405857.
- [10] Akagündüz E., Isıl İşlem Görmüş Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin Mikroyapı ve Yüzey Çizilme Dayanımları Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 179147.
- [11] Avcu E., Farklı Büyüklüklere Sahip Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Ti6Al4V Alaşımının Erozyon Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 283038.

- [12] Kaya Y., Titanyum Sacların Nokta Direnç Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2010, 266023.
- [13] Yılmaz H., Titanyum ve Titanyum Alaşımının Yüzey Özelliklerinin Plazma (İyon) Nitrüleme İle Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 246796.
- [14] Massaro C., Rotolo P., Riccardis F.De., Milella E., Comparative Investigation of the Surface Properties of Commercial Titanium Dental Implants. Part I: Chemical Composition, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2002, **13**, 535-548.
- [15] Askeland D.R., *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri Cilt 1*, 3. Basım, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 1998.
- [16] Sankaran K.K., Mishra R.S., Titanium Alloys, *Metallurgy and Design of Alloys with Hierarchical Microstructures*, 1st ed., Elsevier, Amsterdam, 177-288, 2017.
- [17] İçdem C., Saf Titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb Alaşımının Akışkan Yatak Ortamında Termal Oksidasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 252003.
- [18] Tian Y. S., Chen C. Z., Chen L. B., Chen L. X., Study on the Microstructure and Wear Resistance of the Composite Coatings Fabricated on Ti-6Al-4V Under Different Processing Conditions, *Applied Surface Science*, 2006, **253**(3), 1494-1499.
- [19] Avcu E., Titanyum Alaşımının Partikül Erozyonu ile Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 348736.
- [20] Leyens C., and Peters M., *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
- [21] Ezugwu E.O., Wang Z.M., Titanium Alloys and Their Machinability–A Review, *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, **68**(3), 262-274.
- [22] Phillips D. H., Selection and Weldability of Advanced Titanium-Base Alloys, Editors: Olson D.L., Siewert T.A., Liu S., Edwards G.R., *ASM Handbook Welding, Brazing, Soldering*, 6th ed., ASM International, Ohio, 524-527, 1993.
- [23] Oosthuizen S., Titanium: The Innovators Metal-Historical Case Studies Tracing Titanium Process and Product Innovation, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2011, **111**(11), 781-786.
- [24] Yücel Z., Lazer ve Kumlama Yöntemleri ile Ti6Al4V alaşımında fonksiyonel yüzeylerin oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 232710.

- [25] Anselme K., Bigerelle M., Topography Effects of Pure Titanium Substrates on Human Osteoblast Long-Term Adhesion, *Acta Biomaterialia*, 2005, **1**(2), 211-222.
- [26] Esposito M., Lausmaa J., Hirsch J. M., and Thomsen P., Surface Analysis of Failed Oral Titanium Implants, *Journal of Biomedical Materials Research*, 1999, **48**(4), 559-568.
- [27] Fujii H., Yamashita Y., Takahashi K., Application of Titanium and Its Alloys for Automobile Parts, *Nippon Steel Technical Report*, 2003, **88**(88), 70-75.
- [28] Dong H., Tribological Properties of Titanium-based Alloys, Editor: Dong H., *Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys*, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Cambridge, 58-80, 2010.
- [29] Ulusoy M., Aydın K., *Diş Hekimliğinde Hareketli Bölümlü Protezler Cilt 1-2*, 3. Baskı, Ankara Üniversitesi Diş Hekimliği Yayınları, Ankara, 2010.
- [30] Bloyce A., Qi P.Y., Dong H., Bell T., Surface Modification of Titanium Alloys for Combined Improvements in Corrosion and Wear Resistance, *Surface and Coating Technology*, 1998, **107**(2-3), 125-132.
- [31] Günyüz M., Titanyum Alaşımlarının Mikroark Oksidasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [32] Gavgali M., Totik Y., Sadeler R., The Effect of Artificial Aging on Wear Properties of AA6063 Alloy, *Materials Letters*, 2003, **57**(24), 3713-4114.
- [33] Hutchings I., Shipway P., Wear by Hard Particles, *Tribology*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 165-236, 2017.
- [34] Stachowiak G.W., Batchelor A.W., Fatigue Wear, *Engineering Tribology*, 4th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 621-645, 2014.
- [35] Özdin K., Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006, 196717.
- [36] Chandel R.S., Hardfacing Consumables and Their Characteristics for Mining and Mineral Processing Industry, *Indian Welding Journal*, 2001, **34**(1), 26-34.
- [37] Gültaş M., Aşınma Deney Aparatının Tasarımı Üretimi ve Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1998, 76118.
- [38] Kustas, F.M., Misra, M.S., Friction and Wear of Titanium Alloys, Editors: Totten G.E., *Materials Properties Handbook: Titanium*, 18, ASM International, Ohio, 502-508, 2017.

- [39] Kustas F.M., Misra M.S., Wei R., Wilbur, High Temperature Nitrogen Implantation of Ti-6Al-4V II: Tribological Properties, *Surface and Coatings Technology*, 1992, **51**(1-3), 106-111.
- [40] Liu X., Chu P. K., Ding C., Surface Modification of Titanium, Titanium Alloys and Related Materials for Biomedical Applications, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2004, **47**(3-4), 49-121.
- [41] Güleriyüz H., Çimenoglu H., Surface Modification of a Ti-6Al-4V Alloy by Thermal Oxidation, *Surface & Coatings Technology*, 2005, **192**(2-3), 164-170.
- [42] Borgioli F., Galvanetto E., Iozzelli F., Pradeli G., Improvement of Wear Resistance of Ti-6Al-4V Alloy by Means of Thermal Oxidation, *Materials Letters*, 2005, **59**(17), 2159-2162.
- [43] Young L., *Anodic Oxide Films*, Academic Pres, New York, 1961.
- [44] Brunette D.M., Tengwall B., Terxtor M., Thomsen, P., *Titanium in Medicine*, Springer Verlag, Hidelberg, 2001.
- [45] Dearnley P.A. A Brief Review of Test Methodologies for Surface Engineered Biomedical Implant Alloys, *Surface & Coatings Technology*, 2005, **198**(1-3), 483-490.
- [46] Massaro C., Protoło P., De Riccardis F., Miella E., Napoli A., Wieland M., Textor M., Spencer N.D., Comparative Investigation of The Surface Properties of Commercial Titanium Dental Implants Part I: Chemical Composition, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2002, **13**, 535-548.
- [47] Boyer R., Welsch G., Collings E.W., *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, ASM International, Ohio, 1994.
- [48] Shenhar A., Gotman I., Radin S., Ducheyne P., Gutmanas E.Y., Titanium Nitride Coatings on Surgical Titanium Alloys Produced by a Powder Immersion Reaction Assisted Coating Method: Residual Stresses and Fretting Behavior, *Surface & Coatings Technology*, 2000, **126**(2-3), 210-218.
- [49] Chou W.J., Yu G.P., Huang H.J., Effect of Heat Treatment on The Structure and Properties of Ion-Plated TiN Films, *Surface & Coatings Technology*, 2003, **168**, 43-50.
- [50] Bhusun B., Gupt B.K., *Handbook of Tribology: Materials, Coatings, and Surface Treatments*, Krieger Publishing Company, Melbourne, 1997.
- [51] Vyskocil J., Musil J., Catodic Arc Evaporation in Thin Film Technology, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1992, **10**(4), 1740-1748.
- [52] Piskan B., Fiziksel Buhar Biriktirme Yönteminde Hedef Malzemeyi Sıçratma ve Buharlaştırma Yöntemleri, Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2003.

- [53] Morosanu C.E., Thin Films by Chemical Vapour Deposition, Editor: Siddall G., *Thin Films Science and Technology*, 1st ed., Elsevier Science, Amsterdam, 215-221, 1990.
- [54] Kurtz S.R., Gordon R.G., Chemical Vapor Deposition Titanium Nitride at Low Temperatures, *Thin Solid Films*, 1986, **140**(2), 277-290.
- [55] Aydıngülü M., Ti-N ve Cr-N Esaslı Kaplamaların Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998, 75562.
- [56] Ohring M., *The Materials Science of Thin Films*, 2nd ed., Academic Press, New Jersey, 2002.
- [57] Minato M., Functional Decorative Film by Ion Plating, *Materials Science Forum*, 1992, **246**, 207-224.
- [58] Hemmati I., Huizenga R.M., Ocelik V., De Hosson J.Th.M., Microstructural Design of Hardfacing Ni–Cr–B–Si–C Alloys, *Acta Materialia*, 2013, **61**(16), 6061-6070.
- [59] Yamaoğlu R., Efendi E., Enhanced Surface Properties of Iron by In Situ Hard Nickel Coating, *Materials Testing*, 2016, **58**(2), 151-154.
- [60] Heer B., Bandyopadhyay A., Silica Coated Titanium Using Laser Engineered Net Shaping for Enhanced Wear Resistance, *Additive Manufacturing*, 2018, **23**, 303-311.
- [61] Ghazanfari H., Blais C., Alamdari H., Gariépy M., Savoie S., Schulz R., Characterization of Dry-Sliding Wear of HVOF Coatings Made of Fe<sub>3</sub>Al Powders Reinforced with Sub-Micrometer TiC Particles Produced by Combustion Synthesis, *Surface and Coating*, 2019, **360**, 29-38.
- [62] Wang Q., Zhang P., Wei D., Chen X., Wang R., Wang H., Feng K., Microstructure and Sliding Wear Behavior of Pure Titanium Surface Modified by Double-Glow Plasma Surface Alloying With Nb, *Materials & Design*, 2013, **52**, 265-273.
- [63] Singh H., Hayat M., Zhang H., Cao P., The Decomposition of Si<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub> in Titanium and Its Effect on Wear Properties, *Wear*, 2019, **420-421**, 87-95.
- [64] Yamaoğlu R., German R. M., Karagoz Ş., Bradbury W. L., Zeren M., Li W., Olevsky E. A., Microstructural Investigation of as Cast and PREP Atomised Ti–6Al–4V Alloy, *Powder Metallurgy*, 2011, **54**(5), 604-607.
- [65] Polmear I., StJohn D., Nie J.F., Qian, M. *Titanium Alloys: Light Alloys (Fifth Edition) Metallurgy of the Light Metals*, 5th ed., Butterworth Heinemann, Oxford, 2017.

- [66] Yamaoğlu R., Atomizasyon Teknikleri ile Toz Üretimi, Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 290440.
- [67] Yamaoğlu R., Production and Characterization of Al-xNi In Situ Composites Using Hot Pressing, *Journal of Mining and Metallurgy Section B: Metallurgy*, 2014, **50**, 45-52.
- [68] Yamaoğlu R., In Situ Aluminum Alloy Coating on Magnesium by Hot Pressing, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2015, **28**(8), 1059-1064.
- [69] Sak N., Zeren M., Yamaoğlu R., Alümina Katkılı ve Nikel ile Alaşımlandırılmış Alüminyum Esaslı Kompozitlerde Özelliklerin Karakterizasyonu, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2018, **1**(1), 1-7.
- [70] Yamaoğlu R., Efendi E., Nickel Coating on Aluminum by Hot Pressing, *World PM2016 Congress & Exhibition Event*, Hamburg Almanya, 9-13 Ekim 2016.
- [71] Cao X., He W., Liao B, Zhou H., Zhang H., Tan C., Yang Z., Sand Particle Erosion Resistance of The Multilayer Gradient TiN/Ti Coatings on Ti6Al4V Alloy, *Surface and Coatings Technology*, 2019, **365**, 214-221.
- [72] Esther I., Dinaharan I., Murugan N., Microstructure and Wear Characterization of AA2124/4wt.%B<sub>4</sub>C Nano-Composite Coating on Ti-6Al-4V Alloy Using Friction Surfacing, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, **29**(6), 1263-1274.
- [73] Huang Y., Shi X., Yang K., Liu X., Yan Z., Deng X., Wang Y., Tribological Performance of Ni<sub>3</sub>Al Matrix Composites with MoO<sub>3</sub> Tabular Crystal Under Different Sliding Speed, *Materials Chemistry and Physics*, 2017, **200**, 85-92.
- [74] Şahin A.E., Yıldırım Y., Fidan S., Avcu E., Sınmazçelik T., Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Ti6Al4V Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışına Etkileri, *IV. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, İstanbul, 12-14 Eylül 2012.
- [75] Hager A., Friedrich K., Dzenis Y.A., Paipetis S.A., Study of Erosion Wear of Advanced Polymer Composites, Editors: Street K., Whistler B.C., *ICCM-10 Conference Proceedings*, Canada Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, 155-162, 1995.
- [76] Stachowiak G.W., Batchelor A.W., Abrasive, Erosive and Cavitation Wear, Editors: Stachowiak G.W., Batchelor A.W., *Engineering Tribology*, **24**, Butterworth-Heinemann, Oxford, 577-586, 1993.
- [77] Akbarzadeh E., Elsaadawy E., Sherik A.M., Spelt J.K., Papini M., The Solid Particle Erosion of 12 Metals Using Magnetite Erodent, *Wear*, 2012, **282-283**, 40-51.

- [78] Bonu V., Jeevitha M., Kumar P.V., Barshilia H.C., Nanolayered Multilayer Ti/TiN Coatings: Role of Bi-layer Thickness and Annealing on Solid Particle Erosion Behaviour at Elevated Temperature, *Surface and Coatings Technology*, 2019, **357**, 204-211.
- [79] Yamanoglu R., Karakulak E., Zeren M., Mechanical and Wear Properties of Pre-Alloyed Molybdenum P/M Steels with Nickel Addition, *Journal of Mining and Metallurgy*, 2012, **48**(2), 251-258.
- [80] Curkovic L., Kumic I., Grilec K., Solid Particle Erosion Behaviour of High Purity Alumina Ceramics, *Ceramics International*, 2011, **37**(1), 29-35.
- [81] Laguna-Camacho J.K., Marquina-Chávez A., Méndez-Méndez J.V., Vite-Torres M., Gallardo-Hernández E.A., Solid Particle Erosion of AISI 304, 316 and 420 Stainless Steels, *Wear*, 2013, **301**(1-2), 398-405.





## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Çavuşoğlu O.**, Ymanoğlu R., Sıcak Pres Tekniği ile Saf Titanyumun Sert Nikel Alaşım Tozları ile Kaplanması, *1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC' 18)*, Karabük, Turkey, 22-24 March 2018

Muratal O., Duran C., Khoshnaw F., Ymanoğlu R., **Çavuşoğlu O.**, Coating of Ni-Cr-Si-Fe-B-C Powders on Ti6Al4V Alloy by Powder Metallurgy, *International Marmara Sciences Congress (IMASCON' 19)*, Kocaeli, Turkey, 01-03 November 2019



## **ÖZGEÇMİŞ**

Osman Çavuşoğlu 1989 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Gebze Eşrefbey İköğretim Okulunda, lise öğrenimini Gebze Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2009 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başladı. Yüksek lisans eğitimi de titanyum ve alaşımlarının kaplanarak aşınma özelliklerinin geliştirilmesi üzerine çalışmaları bulunmaktadır. Ayrıca 2014 yılında Güçsan Plastik'te başladığı Planlama ve Lojistik Mühendisi görevini halen sürdürmektedir.

