

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

ORCID : - - -

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Mekanik Öğütme Yöntemiyle Hazırlanan Geri Dönüştürülmüş Ti-6Al-4V Tozlarının Morfoloji, Parçacık Boyutu ve Oksidasyon Direnci Üzerine İşlem Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 122M371 No’lu proje kapsamında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Bu ilgili proje çalışması sırasında sağlanan desteklerinden ötürü TÜBİTAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimleriyle yol gösteren, değerli katkılarını esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Temel VAROL hocam başta olmak üzere laboratuvar çalışmaları ve deneylerin gerçekleştirilmesi aşamalarında tecrübesini ve yardımını esirgemeyen değerli hocam Arş. Gör. Serhatcan Berk AKÇAY’a ve deneysel çalışmaların değerlendirilmesi ve yorumlanması noktasında desteklerini ve bilgi birikimlerini esirgemeyen arkadaşlarım ve meslektaşlarım Yüksek Metalurji ve Malzeme Mühendisi Furkan ALPTEKİN, Uğur Temel YILDIZ ve Metalurji ve Malzeme Mühendisi Burak Berk DAY’a teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her döneminde desteklerini ve sevgilerini hissettiğim annem Zuhâl ÖMÜR’e babam Metin ÖMÜR’e tüm kalbim ve içtenliğimle teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımı beraber paylaştığım desteğini hep hissettiğim sevgili eşim Merve ÖMÜR’e teşekkür ederim.

Fethi Doğukan ÖMÜR

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Mekanik Öğütme Yöntemiyle Hazırlanan Geri Dönüştürülmüş Ti-6Al-4V Tozlarının Morfoloji, Parçacık Boyutu ve Oksidasyon Direnci Üzerine İşlem Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Temel VAROL’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 13/10/2025

Fethi Doğukan ÖMÜR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Titanyum Alaşımları ve Özellikleri.....	2
1.3. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	4
1.4. Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlem Süreci	9
1.5. Titanyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri	11
1.5.1. Titanyum Alaşımlarında Akma Dayanımı	11
1.5.2. Titanyum Alaşımlarında Çekme Dayanımı.....	12
1.5.3. Titanyum Alaşımlarında Kırılma Tokluğu.....	13
1.5.4. Titanyum Alaşımlarında Elastisite Modülü	14
1.6. Titanyum Alaşımlarının Geri Dönüşümü.....	15
1.7. Titanyum Alaşımlarının Kullanım Alanları	18
1.7.1. Havacılık ve Uzay Sanayi	18
1.7.2. Biyomedikal Sektörü	18
1.7.3. Kimyasal Uygulamalar	19
1.7.4. Otomotiv Sektörü.....	19
1.7.5. Denizcilik Sektörü	19
1.7.6. Mimarlık ve Tüketici Ürünleri	20
1.8. Ti-6Al-4V Alaşımı	20
1.8.1. Ti-6Al-4V Alaşımının Genel Özellikleri	20
1.8.2. Ti-6Al-4V Alaşımının Mekanik Özellikleri.....	22

1.9. Ti-6Al-4V Tozlarının Oksidasyon Davranışı.....	25
1.10. Toz Üretim Yöntemleri ve Mekanik Öğütme Yöntemi	26
1.11. Mekanik Öğütme Yöntemi.....	26
1.12. Mekanik Öğütme İşleminde Proses Kontrol Ajanı Kullanımının Tozların Morfolojisi Üzerindeki Etkileri	28
1.13. Literatür Özeti	29
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	34
2.1. Kullanılan Malzemeler.....	34
2.2. Malzeme Ön Hazırlık Aşaması	35
2.3. Ti-6Al-4V Alaşım Partiküllerinin Mekanik Öğütme İşlemi	36
2.4. Ti-6Al-4V Tozlarının Morfoloji İncelemeleri.....	37
2.5. Ti-6Al-4V Tozlarının Oksidasyon Davranışının İncelenmesi	40
3. TARTIŞMA VE BULGULAR.....	42
3.1. Partikül Boyut Dağılımı	42
3.2. Morfoloji ve EDS Analizi	49
3.3. XRD Analizi.....	62
3.4. Görünür Yoğunluk	65
3.5. Termogravimetrik Analiz (TGA)	67
4. SONUÇLAR.....	70
5. ÖNERİLER.....	71
6. KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans

ÖZET

MEKANİK ÖĞÜTME YÖNTEMİYLE HAZIRLANAN GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ Ti-6Al-4V TOZLARININ MORFOLOJİ, PARÇACIK BOYUTU VE OKSİDASYON DİRENCİ ÜZERİNE İŞLEM PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Fethi Doğukan ÖMÜR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Temel VAROL
2025, 81 Sayfa, 15 Sayfa Ek

Ti-6Al-4V yüksek özgül mukavemeti, mükemmel korozyon ve oksidasyon direnci nedeniyle hem tıbbi hem de havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Titanyum alaşımının yüksek maliyeti kaynaklı, endüstrilerde açığa çıkan atık talaş gibi geri dönüştürülebilir kaynakların toza dönüştürülmesini kritik kılmaktadır. Kapalı çevrimli üretim yöntemlerinde geri dönüşüm için etkili, ucuz ve sürdürülebilir bir yöntem olan mekanik öğütme yöntemi bu noktada etkili bir yöntemdir. Bu çalışmada, endüstriyel atık olarak çıkan Ti-6Al-4V talaşlarının farklı proses kontrol ajanı (PCA) oranlarında ajan takviyesi olarak metanol kullanılarak %0,5, %1 ve %2 ağırlıkça ve farklı öğütme sürelerinde (30-360 dakika) toz forma öğütülmesi incelenmiştir. Bu noktada toz morfolojisi, kristal yapısı, oksidasyon direnci ve görünür yoğunluk gibi özellikleri incelenmiştir. Öğütme parametreleri 20:1 bilya-toz oranında (BPR) ve 400 devir/dak şeklinde gerçekleştirilmiştir. Morfolojik olarak dönüşümlerin kontrolü sağlandığında başlangıçta pulumsu/ parçacıklı yapıyla sonrasında yarı-sferik (küresel) bir yapı nihai olaraktan küresel toz formun olduğu forma dönüşümü gözlemlenmiştir. %0,5 PCA ile öğütmesi gerçekleştirilen tozların ortalama $D_{50} \approx 20 \mu\text{m}$, $18,1 \mu\text{m}$ ve $21,8 \mu\text{m}$ parçacık boyutunda olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar noktasında ise 180 ile 360 dakika arasında ağırlıkça %2 PCA katkısı bulunan geri dönüştürülmüş Ti-6Al-4V tozlarının kullanımının en uygun olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Ti-6Al-4V, Mekanik Öğütme, Proses Kontrol Ajanı, Morfoloji, Oksidasyon Direnci, Görünür Yoğunluk

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PROCESSING PARAMETERS ON THE MORPHOLOGY, PARTICLE SIZE AND OXIDATION RESISTANCE OF RECYCLED Ti-6Al-4V POWDERS PREPARED BY MECHANICAL MILLING

Fethi Doğukan ÖMÜR

Karadeniz Technical University
The Graduate of Natural and Applied Sciences
Metallurgical and Material Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Temel VAROL
2025, 81 Pages, 15 Pages Appendix

Ti-6Al-4V is widely used in both medical and aerospace applications due to its high specific strength as well as excellent corrosion and oxidation resistance. However, because of the high cost of titanium alloys, converting recyclable resources such as waste chips generated in industry into powder form has become crucial. In this context, the mechanical milling method represents an effective, low-cost, and sustainable approach for recycling within closed-loop production systems. In this study, industrial Ti-6Al-4V chips were milled into powder form using methanol as a process control agent (PCA) at concentrations of 0.5, 1, and 2 wt.% and under varying milling durations (30–360 minutes). The investigation focused on properties such as powder morphology, crystalline structure, oxidation resistance, and apparent density. Milling parameters were set at a 20:1 ball-to-powder ratio (BPR) and a rotational speed of 400 rpm. Morphological examinations revealed a transition from flake/fragment-like structures at the beginning to semi-spherical forms, ultimately resulting in spherical powders. For powders milled with 0.5 wt.% PCA, the average particle sizes were observed as $D_{50} \approx 20 \mu\text{m}$, $18.1 \mu\text{m}$, and $21.8 \mu\text{m}$. The results demonstrated that recycled Ti-6Al-4V powders obtained with 2 wt.% PCA during 180–360 minutes of milling exhibited the most suitable properties for use.

Keywords: Ti-6Al-4V, Mechanical Milling, Process Control Agent, Morphology, Oxidation Resistance, Apparent Density

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Saf titanyumun kristal yapısı ve allotropik dönüşümü (Veiga vd., 2012).	4
Şekil 2.	Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması (Pushp vd., 2022b).	4
Şekil 3.	ABD teknik alaşımlarının bileşimlerinin çok bileşenli sistem (pseudobinary) bir β -izomorf faz diyagramı üzerinde haritalandırılması (Welsch vd., 1993).....	8
Şekil 4.	$\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarının kafes yapısı (Lenain, 2007).	9
Şekil 5.	Isıl işleme tabi tutulan Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapısı (Yadav ve Saxena, 2020).	10
Şekil 6.	a) Vrancken ve arkadaşlarının çalışmasından alınan, üretildiği formuyla Ti-6Al-4V örneğinde görülen kolonsal martenzitik yapı b) 850 °C’de 2 saat tavladıktan sonra hava ile soğutulmuş yapı. Açık renkli faz α , koyu renkli faz β ’dır (Tong vd., 2017).	11
Şekil 7.	Japonya’da Ti hurdalarının malzeme akışı, literatürden tahmin edilmiştir. Yüksek kaliteli Ti hurdaları, Ti külçe üretmek için yeniden eritilir. Düşük kaliteli Ti hurdaları, çelik endüstrisinde kullanılmak üzere Fe-Ti alaşımı için hammadde olarak kademeli geri dönüştürülmesi (Takeda vd., 2020).	16
Şekil 8.	Ti-6Al-4V alaşımının basma akma dayanımına tane boyutu ve ara yer element içeriğinin etkisi (Long vd., 2013).	23
Şekil 9.	Mekanik Öğütme prensibinin şematik gösterimi (Suryanarayana, 2001).	27
Şekil 10.	Vakum atmosferli fırın.	36
Şekil 11.	Yüksek enerjili bilyalı öğütücü cihazı.	37
Şekil 12.	Taramalı elektron mikroskobu cihazı (SEM-EDS).	38
Şekil 13.	X-ışını difraksiyonu (XRD) cihazı.	38
Şekil 14.	Partikül boyutu analizinin yapıldığı Mastersizer cihazı.	39
Şekil 15.	Titreşimli elek cihazı.	40
Şekil 16.	Termogravimetrik analiz cihazı.	41
Şekil 17.	Hall akış ölçer hunisi ve düzeneği.	41

Şekil 18.	%0,5, %1 ve %2 PCA ile 30 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.....	44
Şekil 19.	%0,5, %1 ve %2 PCA ile 60 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.....	44
Şekil 20.	%0,5, %1 ve %2 PCA ile 90 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.....	45
Şekil 21.	%0,5, %1 ve %2 PCA ile 120 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.....	45
Şekil 22.	%0,5, %1 ve %2 PCA ile 180 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.....	46
Şekil 23.	%0,5, %1 ve %2 PCA ile 240 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.....	46
Şekil 24.	%0,5, %1 ve %2 PCA ile 360 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.....	47
Şekil 25.	Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 30 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	49
Şekil 26.	Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 60 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	50
Şekil 27.	Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 90 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	50
Şekil 28.	Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 120 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	51
Şekil 29.	Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 180 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	51
Şekil 30.	Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 240 dakikalık	

	öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	52
Şekil 31.	Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 360 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	52
Şekil 32.	Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 30 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	54
Şekil 33.	Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 60 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	54
Şekil 34.	Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 90 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	55
Şekil 35.	Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 120 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	55
Şekil 36.	Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 180 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	56
Şekil 37.	Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 240 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	56
Şekil 38.	Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 360 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	57
Şekil 39.	Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 30 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	58

Şekil 40.	Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 60 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	59
Şekil 41.	Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 90 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	59
Şekil 42.	Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 120 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	60
Şekil 43.	Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 180 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	60
Şekil 44.	Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 240 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	61
Şekil 45.	Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 360 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.	61
Şekil 46.	Farklı öğütme sürelerinde %0,5, %1 ve %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin XRD desenleri ve Titanyuma ait XRD deseni. Buna göre, 30 dakika için desen (a), 60 dakika için desen (b).	62
Şekil 47.	Farklı öğütme sürelerinde %0,5, %1 ve %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin XRD desenleri ve Titanyuma ait XRD deseni. 90 dakika için desen (c), 120 dakika için desen (d).	63
Şekil 48.	Farklı öğütme sürelerinde %0,5, %1 ve %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin XRD desenleri ve Titanyuma ait XRD deseni. 180 dakika için desen (e), 240 dakika için desen (f).	63
Şekil 49.	Farklı öğütme sürelerinde %0,5, %1 ve %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin XRD desenleri ve Titanyuma ait XRD deseni. Buna göre, 360 dakika için desen (g).	64

Şekil 50.	%0,5 ağırlıkça, %1 ağırlıkça ve %2 ağırlıkça PCA ile ve farklı öğütme sürelerinde üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin görünür yoğunluğu.....	66
Şekil 51.	Ti-6Al-4V partiküllerinin farklı PCA oranları ve öğütme süreleriyle üretilmesine ait TGA eğrileri verilmiştir. %0,5 PCA içeren numunelere ait eğri (a) olarak gösterilmiştir.....	68
Şekil 52.	Ti-6Al-4V partiküllerinin farklı PCA oranları ve öğütme süreleriyle üretilmesine ait TGA eğrileri verilmiştir. %1 PCA içeren numunelere ait eğri (b) olarak gösterilmiştir.	69
Şekil 53.	Ti-6Al-4V partiküllerinin farklı PCA oranları ve öğütme süreleriyle üretilmesine ait TGA eğrileri verilmiştir. %2 PCA içeren numunelere ait eğri (c) olarak gösterilmiştir.....	69

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Titanyum alaşımlarında alaşım elementlerinin mikroyapı ve seçilmiş mekanik özelliklere etkisi (Yadav ve Saxena, 2020).....	3
Tablo 2.	Metalurjik yapılarına göre sınıflandırılmış titanyum alaşımları ve örnekleri (Pushp vd., 2022b)	6
Tablo 3.	Toz Metalurjisiyle üretilmiş Titanyum Alaşımlarının Mekanik Değerleri; (1): Sıkıştırılmış ve tavllanmış numuneden alınan değerler (%94 yoğunlukta), (2): Sıkıştırılmış, tavllanmış ve dövülmüş numuneden alınan değerler (yaklaşık %100 yoğunlukta)	15
Tablo 4.	Bilyalı öğütmenin proses parametreleri.....	35

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ti	: Titanyum
Al	: Alüminyum
V	: Vanadyum
PCA	: Proses Kontrol Ajanı
BPR	: Bilya/Toz Oranı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektroskopi
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
TGA	: Termogravimetrik Analiz
μm	: Mikrometre
nm	: Nanometre
RPM	: Dakikadaki Devir Sayısı
D ₅₀	: Ortanca Parçacık Boyutu
HSP	: Hekzagonal Sıkı Paket
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
MPa	: Megapascal (Basınç/Birim alan gerilmesi birimi)
FWHM	: Tam Tepe Genişliğinin Yarısı
°C	: Santigrat Derece
Dk	: Dakika
SLE	: Seçici Lazer Ergitme

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Titanyum, birçok endüstriyel ve tıbbi uygulamada önemli bir bileşendir. Periyodik tablodaki geçiş metallerinden biri olan titanyum, atom numarası 22 olan düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti ve yüksek korozyon direnci ile tanınmaktadır. (Yu, 2013). Havacılık, biyomedikal ve savunma sanayi dahil olmak üzere birçok stratejik sektör, titanyum ve titanyum alaşımlarının üstün mekanik özellikleri, korozyon dirençleri ve biyouyumlulukları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek özgül dayanım, ısıya dayanıklılık ve düşük yoğunluk gibi özellikleri nedeniyle bu malzemeler geleneksel malzemelere alternatif olarak tercih edilmektedir (Wei et al., 2011). Ti-6Al-4V (Grade 5), en sık kullanılan titanyum alaşımlarından biri olup, $\alpha+\beta$ faz yapısıyla hem sıcak hem de soğuk şekillendirme işlemlerine uygunluk göstermektedir. Ayrıca, yüksek kaynaklanabilirliği, yorulma dayanımı ve oksidasyona karşı gösterdiği direnç sayesinde, kritik mühendislik alanlarında yaygın biçimde tercih edilmektedir (Welsch et al., 1993). Titanyum alaşımlarının geri dönüştürülmesi, metal işleme sektöründeki artan çevresel ve ekonomik kaygılarla birlikte önem kazanmıştır. Titanyum, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyon direnci ve biyouyumluluğu ile dikkat çeken bir malzemedir. Ancak, titanyum alaşımlarının üretimi yüksek enerji talebi ve maliyet gerektirdiği için, geri dönüşüm bu malzemelerin sürdürülebilirliğinde önemli bir rol oynamaktadır (Tebaldo et al., 2024). Son yıllarda sürdürülebilir üretim anlayışı doğrultusunda, titanyum esaslı talaşların geri kazanımına yönelik çalışmaların sayısı artış göstermektedir. Bu bağlamda, geri dönüştürülmüş Ti-6Al-4V talaşlarının toz haline getirilmesinde mekanik öğütme yöntemi, etkili ve yaygın olarak kullanılan bir teknik olarak öne çıkmaktadır. Mekanik öğütme sonucunda elde edilen tozların morfolojisi, parçacık boyutu dağılımı ve yüzeyde oluşan oksidasyon özellikleri, üretilen nihai ürünün performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Suryanarayana, 2001). Ti-6Al-4V tozlarının mekanik öğütme işlemlerinde Proses Kontrol Ajanları (PCA), öğütme süreci üzerinde belirleyici bir rol oynamakta olup, elde edilen tozların yapısal özellikleri ve oksidasyon davranışları üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Mekanik öğütme esnasında PCA kullanımının, partikül aglomerasyonunun kontrol altına alınmasına katkı sağladığı ve tozların homojenliğini artırarak fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi için gerekli olan etkin

partikül akışını desteklediği bilinmektedir. Sonuç olarak, PCA'nın Ti-6Al-4V tozlarının bilyalı öğütülmesindeki rolü, öğütme sırasında tozların fiziksel olarak işlenmesine yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda oksidasyon davranışını kontrol etmede de önemli bir faktördür. Parçacık morfolojisi, oksidasyon kinetiği ve mekanik özellikler arasındaki etkileşim, titanyum alaşımlarının üretim süreçlerinde PCA'nın titizlikle seçilmesi ve uygulanması gerekliliğini vurgulamaktadır (Varela et al., 2021).

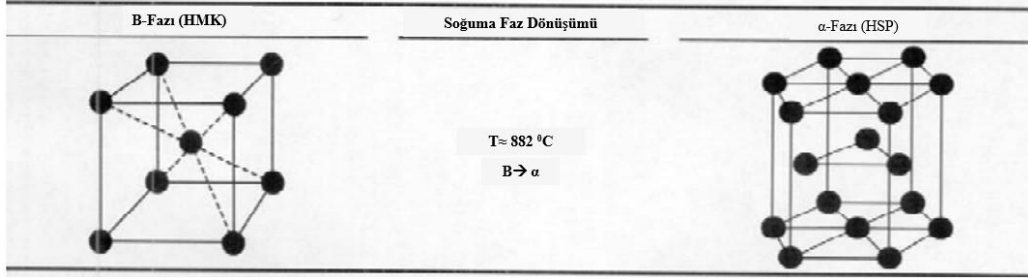
1.2. Titanyum Alaşımları ve Özellikleri

Alaşım elementleri titanyum alaşımlarının özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Örneğin, yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımına alüminyum ve vanadyum eklenmesinin mekanik dayanımı ve oksidasyon direncini artırdığı gösterilmiştir (Wang et al., 2021). Titanyumun en belirgin özelliklerinden biri, yüksek mekanik dayanım ve hafifliktir. Örneğin, titanyum ve alaşımlarının özgül ağırlığı, çeliğe oranları yaklaşık %50 daha düşük olmasına rağmen, yüksek bir çekme şartlarına (yaklaşık 240-550 MPa) sahiptir (Xu et al., 2013), (Vazquez Martinez et al., 2017), (Zheng & Xu, 2023). Titanyumun stratejik önemi, yaklaşık 1668 °C'lik yüksek erime noktası nedeniyle artmaktadır. Titanyum, uzay araçları ve jet motorları gibi önemli uygulamalar için ideal bir malzemedir çünkü sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımı bu noktada onu tercih edilebilir kılmaktadır.(Xu et al., 2013). Tablo 1' de titanyum alaşımlarındaki alaşım elementlerinin değişimiyle belirli mekanik özellikler noktasındaki etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 1. Titanyum alaşımlarında alaşım elementlerinin mikroyapı ve seçilmiş mekanik özelliklere etkisi (Yadav & Saxena, 2020).

Alfa Alaşımları	Titanyum Ti-5Al-2.5Sn	-Daha yüksek kısa süreli mukavemet	
Yakınsı Alfa Alaşımları	Ti-8Al-1Mo-1V Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	-Isıl işleme uygunluk ve yanıt verme	
Alfa+Beta Alaşımları	Ti-6Al-4V Ti-6Al-2Sn-6V	-Şekillendirilebilirlik ve işlenebilirlik açısından gelişmiş özellikler	
Yakınsı Beta Alaşımları	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo Ti-3Al-10V-2Fe	-Yüksek yoğunluk	
Beta Alaşımları	Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al		

Korozyon direnci de titanyumun başka bir önemli özelliğidir. Doğal olarak oluşan bir oksit tabakası sayesinde, titanyum birçok kimyasal maddeye, tuzlu suya ve asidik ortamlara karşı dayanıklıdır. Bu özellik, onu deniz ortamlarında ve endüstriyel kimyasal işlemlerde uygun hale getirmektedir (Naidoo et al., 2020), (do Prado et al., 2015). Biyomedikal uygulamalarda, titanyumun biyouyumluluğu en belirgin özelliklerindendir. Özellikle ortopedik ve dental implantlar gibi uygulamalarda, titanyum implantlarının vücut dokusuyla uyum sağlama yeteneği, osteointegrasyon için kritik öneme sahiptir. Bu süreç, titanyum implantlarının kemiğe kalıcı entegrasyonunu sağlayarak, biyomedikal mühendisliğinde geniş bir kullanım alanı sunmaktadır (do Prado et al., 2015), (Santiago-Medina et al., 2015). Titanyum ve titanyum alaşımları yalnızca medikal alanlar değil, aynı zamanda otomotiv ve kimya endüstrilerinde de geniş bir kullanıma sahiptir. Titanyumun hafifliği ve yüksek mukavemeti, performans araçlarında ve yarış arabalarında yaygın olarak tercih edilmesine yol açmaktadır (Z. Li et al., 2015). Titanyumun işlenebilirliği, diğer metallere göre bazı zorluklar içerse de, doğru tekniklerle aşılabilecek bir durumdur. Düşük işlenebilirlik özelliği, titanyum alaşımlarının yüksek sıcaklık ve basınca karşı gösterdiği dirençten kaynaklanmaktadır (Correa et al., 2018), (Dong et al., 2022). Şekil 1’ de saf titanyumun kristalografik hücresi ve allotropik dönüşümün çizimi gösterilmiştir.

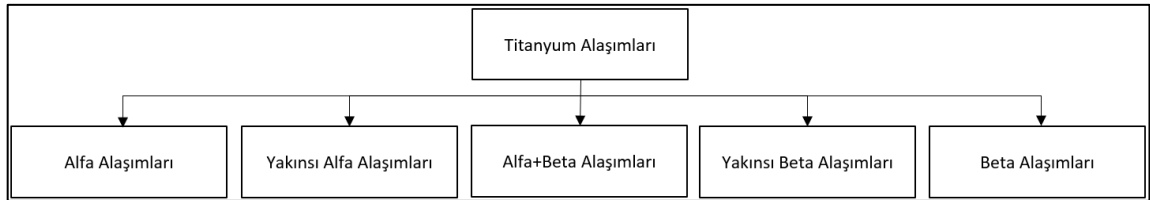


Şekil 1. Saf titanyumun kristal yapısı ve allotropik dönüşümü (Veiga et al., 2012).

Sonuç olarak kullanım alanları noktasında titanyum alaşımları hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri kaynaklı mühendislik uygulamaları noktasında ve endüstriyel sektörde oldukça kritik bir öneme sahiptir. Çevre dostu üretim süreçleriyle birlikte elde edilen yüksek performanslı uygulamalara ait tercihleri arttırmakta bu da titanyumun ilerleyen süreçlerde daha stratejik ve tercih edilir bir malzeme olmasını sağlamaya devam etmektedir.

1.3. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum esaslı alaşımlar, sahip oldukları metalurjik niteliklere bağlı olarak dört ana grup altında değerlendirilmektedir: α , yarı α , α - β ve β tipleri. Bu alaşımlarda yer alan elementler, α veya β fazının kararlılığını artırmak amacıyla nötr, α -stabilizatör ya da β -stabilizatör olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 2’de titanyum alaşımlarının sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2. Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması (Pushp et al., 2022b).

α -alaşımları α -fazlı tek-katı çözeltiden elde edilebilir. Bu alaşımlar yüksek sıcaklıklarda iyi özellikler gösterir ve esas olarak deforme olabilirlik ve korozyon davranışının gerekli olduğu yerlerde kullanılır (Tebaldo et al., 2024). Alpha alaşımları, genellikle alüminyum ve kalay gibi α -faz stabilizatörleri içerirken, beta alaşımları niyobyum,

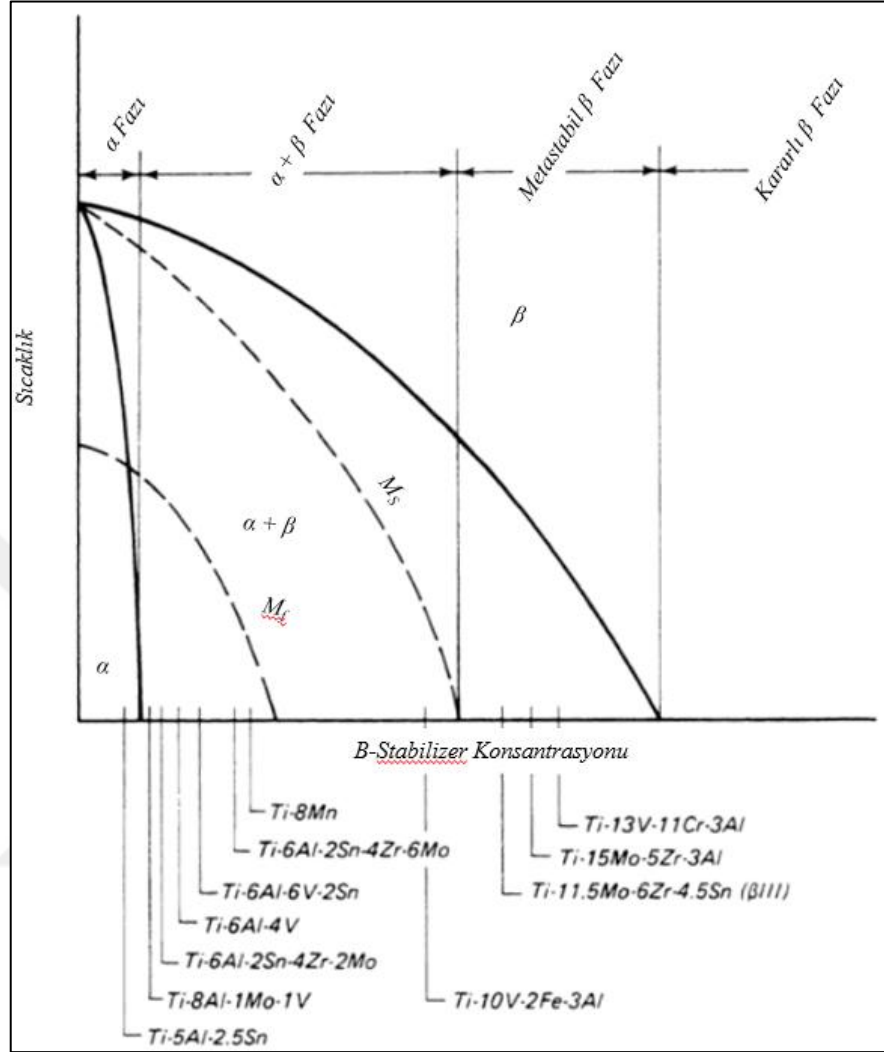
vanadyum veya molibden gibi β -faz stabilizatörleri içermektedir (Besisa & Yajima, 2024). Ti-6Al-4V alaşımı hem α hem de β fazları içeren bu iki fazın karışımından oluşan popüler bir örnektir. Bu alaşım, yüksek biyouyumluluğu ve dayanıklılığı nedeniyle tıbbi implantlar için sıkça tercih edilmektedir (Liu et al., 2011). Alüminyum ve kalay gibi alfa stabilizatörleri içeren alaşımsız titanyum ve alfa alaşımları, ortam sıcaklıklarında tek fazlı, altıgen sıkı paketlenmiş (HSP) kristal yapıya sahiptir. Saf titanyum ve α alaşımları, alüminyum ve kalay gibi α -stabilizatör elementlerin varlığıyla, oda sıcaklığında tek fazlı ve HSP kristal yapıya sahiptir. Tek fazlı olmaları, onların çekme mukavemetini sınırlı kılarken; yüksek ısıl kararlılıkları, tatmin edici sürünme dayanımı ve tokluk sağlamaktadır. α 'ya yakın olarak tanımlanan alaşımlar, %2'ye kadar β -stabilizatör ile az miktarda β fazı içerirken, %0,5'e kadar Si katkısı da silisyum çökeltilerinin oluşmasına neden olur. Bu nedenle, bu alaşımlar saf titanyum ve α alaşımlarına kıyasla daha yüksek çekme dayanımına sahiptir ve özellikle 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda en iyi sürünme direncini sergileyen titanyum alaşımı grubunu oluşturur (Weiss & Semiatin, 1999). Araştırmalar, alfa yakın alaşımların mükemmel oksidasyon ve termal kararlılığa sahip olduğunu ve bu sayede korozyon ve ısıya dayanıklılığın kritik olduğu ortamlarda avantajlı olduklarını göstermektedir (Piao et al., 2024). Ancak bu alaşımlarla ilgili bir zorluk, oda sıcaklığında sürünmeye karşı hassasiyetleridir ve bu durum daha geniş uygulama alanlarını sınırlayabilir (Boutana et al., 2008). Beta titanyum alaşımları, yüksek sıcaklık dayanımlarıyla dikkat çeker. Bu alaşım türü genellikle yüksek çekme dayanımı ve iyi süneklik sergiler ve bu da onları zorlu uygulamalar için uygun hale getirir. Ayrıca, beta alaşımlarının mekanik özellikleri düşük sıcaklıklarda farklı davranışlarla da ilişkilidir. Soğuk işleme uygulamaları sırasında, β -titanyum alaşımları martenzitik dönüşüm ve diğer mikro yapısal değişiklikler yoluyla önemli bir mukavemet kazanabilir (Sahoo et al., 2012). Ancak, β -titanyum alaşımlarının aşınma direnci, daha önce bahsedilen yüksek performans özellikleri nedeniyle zorluklarla karşılaşabilir (Kitashima et al., 2016). Yakınsı beta fazının en belirgin özelliklerinde biri yüksek sıcaklıkta stabil olabilmesidir, genellikle düşük sıcaklıklarda α fazına dönüşüm geçirebilir. Bu dönüşüm sonrasında alaşımın mekanik özelliklerini ve işlenebilirliğini arttırabilmektedir. Betaya yakın alaşımların mekanik davranışları, ısıl işlem ve deformasyon süreçleri sırasında metastabil β titanyum alaşımındaki çatlak oluşum süresi ve yayılmasına etkisi olduğu bilinmektedir. Bu noktada yakınsı β fazı mekanik dayanım, süneklik ve işlenebilirlik noktasında sağladığı avantajlarla önemli bir yere sahiptir (El-Chaikh et al., 2020). α - β

titanyum alaşımlarının temel özelliği hem α hem de β fazlarının hacim kesri, boyutu ve dağılımından büyük ölçüde etkilenen mekanik performanslarıdır. α fazı, oda sıcaklığında yüksek mukavemet ve iyi süneklik sağlarken, β fazı gelişmiş tokluğa ve iyileştirilmiş yüksek sıcaklık performansına katkıda bulunur (Song et al., 2015). Bu çift fazlı sistem, mukavemet ve işlenebilirlik arasında bir denge sağlayarak bu alaşımları çeşitli uygulamalarda çok yönlü hale getirir. Yaygın olarak kullanılan bir $\alpha+\beta$ titanyum alaşımı, toplam titanyum pazarının yaklaşık %45-60'ını oluşturan Ti-6Al-4V'dir (Ming et al., 2010). Bu alaşımın özellikleri arasında yüksek mukavemet-ağırlık oranları, iyi süneklik ve mükemmel korozyon direnci bulunur ve bunlar özellikle uçak gövdeleri ve motor bileşenleri gibi havacılık uygulamaları için faydalıdır. Tablo 2'de metalurjik yapılarına göre sınıflandırılmış titanyum alaşımları ve örnekleri gösterilmiştir.

Tablo 2. Metalurjik yapılarına göre sınıflandırılmış titanyum alaşımları ve örnekleri (Pushp et al., 2022b)

Alaşımlar	Örnekler
Alfa alaşımlar	Ticari saf titanyum – ASTM sınıf 1, 2, 3 ve 4; Ti/Pd alaşımları – ASTM sınıf 7 ve 11
Alfa + bileşik	Ti-%2,5Cu – IMI 230
Yakın alfa alaşımlar	Ti-%8Al-%1Mo-%1V Ti-%6Al-%5Zr-%0,5Mo-%0,2Si – IMI 685 Ti-%6Al-%4Zr-%2Sn-%2Mo-%0,08Si Ti-%5,5Al-%3Zr-%3,5Sn-%0,3Mo-%1Nb-%0,3Si – IMI 829 Ti-%5,8Al-%3,5Zr-%4Sn-%0,5Mo-%0,7Nb-%0,3Si – IMI 834
Yakın alfa alaşımlar	Ti-%6Al-%4Zr-%3Sn-%0,5Mo-%0,5Si – Ti 1100 Ti-%6Al-%4V Ti-%4Al-%4Mo-%2Sn-%0,5Si – IMI 151 Ti-%4Al-%4Mo-%4Sn-%0,5Si Ti-%6Al-%6V-%2Sn Ti-%6Al-%4Zr-%2Sn-%1Mo
Alfa-Beta alaşımlar	Ti-%3Al-%8V-%6Cr-%4Mo-%4Zr – Beta C Ti-%15V-%3Cr-%3Sn-%3Al Ti-%6V-%6Mo-%5,7Fe-%2,7Al – TIMETAL 125
Metastabil beta alaşımlar	

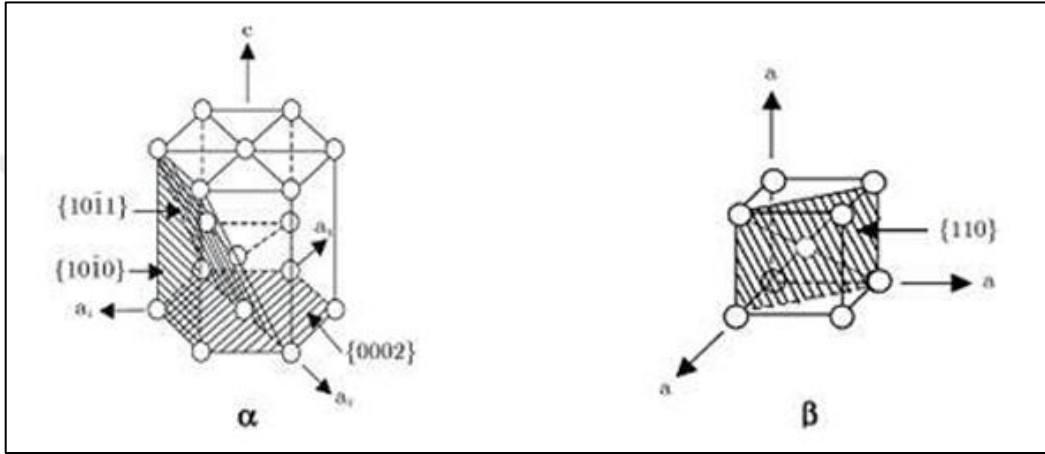
Dahası $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri, özel uygulama ihtiyaçlarına göre performansı artırmak için ısıtıl işlem ve işleme yöntemleriyle değıştirilebilen mikro yapılarından etkilenir (Rozumek et al., 2014), (Suhail et al., 2024). Aşınma direncinin ele alınması, $\alpha+\beta$ titanyum alaşımları ile ilgili bir diğler önemli husustur. Ortopedik implantlar gibi biyomedikal uygulamalardaki önemli kullanımları göz önüne alındığında, araştırmacılar bu alaşımların aşınma direncini artırmaya odaklanmıştır. Aşınma direncini ve biyoyumluluğunu artırmak için kaplamalar ve anodizasyon dahil olmak üzere çeşitli yüzey işlemleri geliştirilmiştir (Brunke et al., 2020). $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarının işlenmesindeki zorluklar iyi belgelenmiştir. Alaşımların işlenmesi, yüksek mukavemet ve toklukları nedeniyle genellikle zordur. ABD teknik alaşımlarının bileşimlerinin çok bileşenli sistem (pseudobinary) bir β -izomorf faz diyagramı üzerinde haritalandırılması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. ABD teknik alaşımlarının bileşimlerinin çok bileşenli sistem (pseudobinary) bir β -izomorf faz diyagramı üzerinde haritalandırılması (Welsch et al., 1993)

Son çalışmalar, özellikle havacılık ve tıbbi implant üretiminde hayati önem taşıyan takım aşınmasını en aza indirmek ve yüzey kalitesini optimize etmek için uyarlanmış işleme stratejilerine olan ihtiyacı vurgulamaktadır (Motyka, 2021). Saf titanyum allotropiktir, bu nedenle oda sıcaklığında alfa faz ve birim hücresi sıkı düzen hekzagonal (SDH) yapıda iken, yüksek sıcaklıklarda (881 °C) alfa faz ve birim hücresi hacim merkezli kübik (HMK) yapıda bulunur. Faz hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahip titanyum alaşımları yüksek sıcaklıklarda kararlı bir mevcut kayma sistemine sahiptir, bu nedenle ikizlenme mekanizması çok nadir görülür. Titanyum alaşımlarında ikizlenme mekanizması (112) ve [111] yönünde gerçekleşmektedir. Ti-6Al-4V alaşımı $\alpha + \beta$ faz yapısına sahip olup sıkı paketlenmiş hekzagonal (SDH) kafes yapısında; bazal (0002) düzlem, üç prizmatik ($10\bar{1}0$)

düzlem, altı adet $(10\bar{1}1)$ doğrusal piramit düzlemi ve $[11\bar{2}0]$ yönelimi bulunmaktadır. Alfa (α) ve titanyum alaşımlarının kafes yapıları gösterilmiştir. Sonuç olarak, $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarının hem mühendislik hem de endüstriyel kullanımlarında performanslarını iyileştirmek çok önemlidir (Klimenko et al., 2018). Şekil 4'te $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarının kafes yapısı verilmiştir.

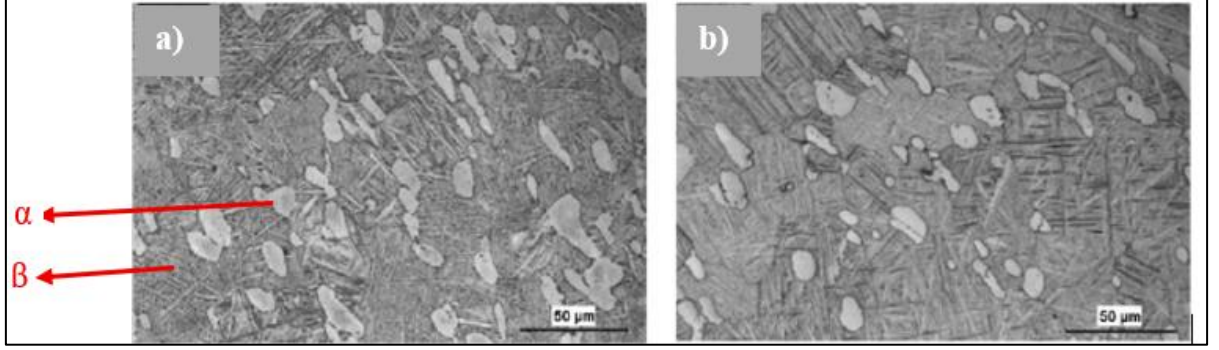


Şekil 4. $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarının kafes yapısı (Lenain, 2007).

1.4. Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlem Süreci

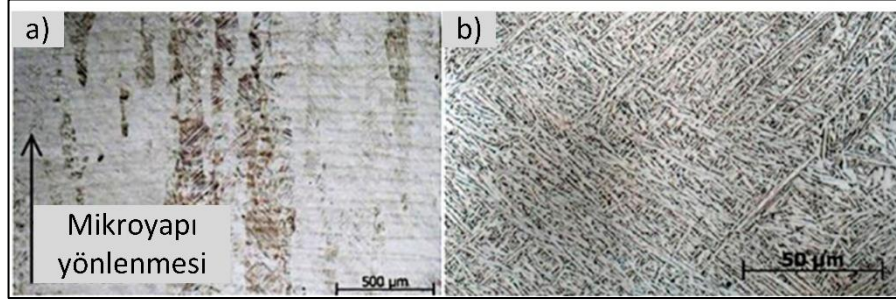
Titanyum alaşımlarının ısıtıl işlemi, bu malzemelerin mikro yapılarını ve ardından mekanik özelliklerini en üst düzeye çıkarmak için çok önemlidir. Titanyum alaşımları, özellikle verimlilik ve işleme zorlukları nedeniyle, ısıtıl işlem ile hazırlanmalı ve uygulanmalıdır. Ti6Al4V alaşımı, yüksek güçlü/öğütücü özellikleri, hafifliği ve iyi korozyon direnci nedeniyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (Çelik & Kılıçkap, 2018). Titanyum alaşımlarında ısıtıl işlem süreci geleneksel olarak birkaç aşamadan oluşur: çözeltiye alma, ardından yaşlandırma veya tavlama işlemleriyle mekanik ve mikroyapısal özelliklerin iyileştirilmesi sağlanır (Wang et al., 2022). Sıcaklık ve işlem süresinin malzeme üzerindeki etkisi, titanyum alaşımının ısıtıl işlemi için çok önemlidir. Tavlama işleminin ardından kriyojenik uygulamaların, oda sıcaklığında Ti-6Al-4V alaşımının şekil alabilirliğini nasıl etkilediğini inceledi. Elde edilen bulgular, malzemenin çeşitli uygulamalarda daha iyi performans göstermesine olanak sağladığını göstermiştir (Hu et al., 2018). Titanyum alaşımlarının formlama kabiliyeti, ısıtıl işlemler tarafından da

etkilenebilir. Herhangi bir metalde olduğu gibi, titanyum alaşımlarının şekil verilebilirliğini artıran sıcaklık ve işleme oranları, malzemelerin viskoelastik özelliklerini etkiler. Ayrıca, ısıtım işlem hastalığı olan "hidrojen çatlama," titanyum alaşımlarında dikkatli bir ısıtım işlem stratejisi gerektiren önemli bir konudur. Bu tür çatlamlar, titanyum içindeki hidrojenin difüzyonu ve oluşan iç gerilmelerle ilişkilidir (Tal-Gutelmacher & Eliezer, 2005). Isıtım işleminin titanyum alaşımları üzerindeki etkisi, yapısal sorunların ötesine uzanır; mekanik performansı önemli ölçüde etkiler. Vikas ve arkadaşları, Ti-6Al-4V titanyumda α - β ısıtım işleminin yüksek mukavemeti korurken sünekliği artırdığını göstermiştir (Vikas et al., 2022). Isıtım işleme tabi tutulan Ti-6Al-4V alaışımının mikroyapısı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Isıtım işleme tabi tutulan Ti-6Al-4V alaışımının mikroyapısı (Yadav & Saxena, 2020).

Su ile soğutulmuş ısıtım işlem görmüş Ti6Al4V ürünlerde, β fazı içindeki bir sıcaklıkta iğnemi martenzit bulunmaktadır. Hava ile soğutulmuş numunelerde ise, dönüştürülmüş β fazında eş eksenli bir α fazı ve fırında soğutulmuş ortamda α / β lamelli bir faz bulunmaktadır. $\alpha + \beta$ fazında, su ile soğutma sırasında β yapıları içinde daha fazla hacimde α fazı bulunur. Su ile söndürme, hızlı soğuma nedeniyle Ti6Al4V'nin yüksek sertliğine ve martenzitik mikro yapıya neden olur (Şekil 6).



Şekil 6. a) Vrancken ve arkadaşlarının çalışmasından alınan, üretildiği formuyla Ti-6Al-4V örneğinde görülen kolonsal martenzitik yapı b) 850 °C’de 2 saat tavladıktan sonra hava ile soğutulmuş yapı. Açık renkli faz α , koyu renkli faz β ’dır (Tong et al., 2017).

Metallerin yavaş soğuması nedeniyle, tavlama işlemi titanyum alaşımının çekme dayanımını ve özellikle tokluğunu geliştirir. Çözelti ısıtılmasına tabi tutulmuş Ti6Al4V’de su, alaşımın yorulma ömrünü uzatır (Omoniyi et al., 2021). Sonuç olarak, titanyum alaşımlarının ısıtılma işlemi, malzemenin performansını artırmak için hayati önem taşıyan bir prosedürdür. Bu işlem, uygun sıcaklığı, işlem süresini ve olası yüzey değişikliklerini dikkate alarak titanyum alaşımının mekanik özelliklerini geliştirir. Titanyum alaşımlarındaki mikro yapı, dikkatli bir şekilde kontrol edildiğinde endüstriyel kullanım için daha uygun hale gelecektir.

1.5. Titanyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

1.5.1. Titanyum Alaşımlarında Akma Dayanımı

Titanyum alaşımları genel olarak yüksek akma dayanımı değerleri sunar, bu da onları özellikle havacılık ve uzay endüstrilerinde yaygın olarak kullanılabilir hale getirir. Örneğin, Ti-6Al-4V alaşımı, doğru ısıtılma işlemi uygulandığında yüksek akma dayanımı (yaklaşık 896 MPa) sağlayabilir. Alaşımdaki alüminyum miktarının artması, alaşımın akma dayanımını artırmaktadır çünkü alüminyum, titanyumun α fazını stabilize ederek yapının daha sert olmasına yardımcı olur (Wang & Wei, 2004), Mikro yapının etkisi de titanyum alaşımlarının akma dayanımında belirleyici bir rol oynamaktadır. Örneğin, farklı ısıtılma işlemleri uygulandığında, titanyum alaşımlarının mikro yapısında meydana gelen değişiklikler, mekanik özelliklerini büyük ölçüde değiştirebilir. "Aging" ya da yaşlandırma işlemi,

titanyum alaşımındaki fazların dağılımını ve yoğunluğunu değiştirerek akma dayanımını artırabilir. Özellikle, bu işlem sonucunda elde edilen morfolojik değişiklikler, alaşımın düşük sıcaklıkta gösterdiği deformasyona karşı direncini artırabilmektedir (Boraei et al., 2024). Titanyum alaşımlarının akma dayanımını etkileyen diğer bir husus ise işleme yöntemleridir. Titanyum alaşımlarının kesme işlemi sırasında uygulanan stres ve gerilim ortamı, akma dayanımını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Örneğin, sıcak işleme yöntemleri, malzemenin akma dayanımını geliştirirken, aynı zamanda bu işlemlerin nasıl yapıldığı da sonuçları değiştirmektedir (Gupta et al., 2021).

1.5.2. Titanyum Alaşımlarında ekme Dayanımı

Titanyum alaşımlarının yapısal mühendislikteki önemli rolü göz önüne alındığında, çekme dayanımı terimi, bir malzemenin çekme yüküne karşı gösterdiği direnci ifade eder. Titanyum alaşımlarının çekme dayanımı, mikroyapının özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Titanyum alaşımlarının çekme dayanımı, sıcaklık ve ısıl işlem parametreleri kaynaklı önemli ölçüde etkilenir (Demirel & Karaağaç, 2021). Aynı zamanda yüksek mukavemet noktasında avantajlar elde etmek için kullanılan titanyum alaşımları alüminyum ve vanadyum gibi elementlerin takviyesiye beraber formüle edilmiştir. Bu noktada titanyum metal matriksli kompozitlerin mekanik davranışlara karşı olan etkisi incelendiğinde çekme dayanımı noktasında belirgin iyileşmelere sahip olduğu görülmüştür (Topcu, 2023). Yüzey işlemleri yani özel prosesler süreçlerinde incelendiğinde de titanyum alaşımlarının çekme dayanımını arttırmak için etkili yöntemler olduğu görülmüştür. rneklenecek olursa anodizasyon ve lazer yüzey işleme gibi yüzey işleme tekniklerinin yüzey kalitesi ve dayanım noktasında olumlu etkiler yarattığı görülmüştür. Titanyum alaşımlarının işlenmesi sırasında gerçekleşen zorlukların yüzey işlemlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi vurgulanmış. Yüzey işlemleriyle yapının dışarıdan gelen kuvvetler ve yükler altındaki dayanıklılığını arttırarak çekme dayanımında gelişmiş performans gösteren yüzeyler haline getirmektedir (elik & Kılıçkap, 2018). Sonuç olarak, Ti6Al4V alaşımının çekme dayanımında mikro yapı, alaşım bileşimi, ısıl işlemler ve yüzey işlemleri gibi birçok faktör rol oynamaktadır. Bu alaşımın yüksek çekme dayanımı ve diğer mekanik özellikleri, onu modern mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir malzeme haline getirmektedir. Titanyum alaşım

araştırmaları, çekme dayanımının artırılmasına yönelik yenilikçi yöntemler geliştirmeye devam etmektedir.

1.5.3. Titanyum Alaşımlarında Kırılma Tokluğu

Titanyum alaşımlarında kırılma tokluğu, alaşım bileşimi, mikro yapı ve ısıı işlem süreçleri dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenir. Örneğin, β titanyum alaşımlarındaki α fazı gibi belirli mikro yapıların oluşumu, kırılma tokluğunu önemli ölçüde artırır. Tane sınırı α fazının bu alaşımlarda sünekliliğe ve deformasyon ve kırılmaya karşı daha iyi dirence nasıl katkıda bulunduğunu tartışmıştır. Tane sınırındaki mekanik etkileşimler, özellikle dinamik yükleme koşulları altında kritik öneme sahip olan mukavemet ve tokluğun dengelenmesinde önemli bir rol oynar (Foltz et al., 2011). Titanyum alaşımları, özellikle Ti6Al4V askeri, havacılık ve biyomedikal mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılır. Bu alaşımların üstün mekanik üretim özellikleri de vardır. Bu alaşımların kırılma tokluğu önemli bir özelliğidir. Kırılma tokluğu, bir malzemenin çatlaması ve kırılma anındaki enerjinin kaydedildiği bir kayıttır. Bu, özellikle önemli yapısal projelerde çok önemlidir. Titanyum alaşımlarında, mikro yapının üzerindeki kırılma tokluğuna doğrudan etkisi vardır. Örneğin, metastatik beta titanyum alaşımlarının, çözüm sıcaklığı ve yaşlandırma işlemleri ile yüksek dayanıklılık ve kırılma tokluğu arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu tür alaşımlarda, belirli elementlerin segregasyonu mikro bölgesel farklılıklara neden olarak, mekanik özellikleri artırma potansiyeline sahiptir. Çalışmalarda, bu alaşımların soğuk işlem ve yaşlandırma gibi işlemlerle, yüksek çekme dayanımı ve tokluğa sahip oldukları kanıtlanmıştır (Gao et al., 2018), (Jiang et al., 2023). α ve β fazlarının varlığı, malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Özellikle, α fazının lamellerinin inceliği ve kalınlığının kırılma tokluğunu artırdığı gözükümüştür bu lamel yapılar, malzemenin deformasyon davranışını optimize ederek, çatlak yayılma hızını azaltır ve böylece yüksek kırılma tokluğu sağlar (Ran et al., 2022), (Wei et al., 2017).

1.5.4. Titanyum Alaşımlarında Elastisite Modülü

Titanyum alaşımları, özellikle elastik modülüyle karakterize edilen mekanik performansları gibi olağanüstü özellikleri nedeniyle malzeme biliminde önemli ilgi görmüştür. Elastik modül, özellikle malzemelerin biyolojik dokularla uyumluluğunun çok önemli olduğu biyomedikal alanda olmak üzere, çok çeşitli uygulamalar için önemli bir özelliktir. Özellikle titanyum alaşımları, geleneksel metallere kıyasla düşük elastik modülüyle bilinir ve bu da onları ortopedik ve dental implantlarda gerilim koruma etkilerini azaltmak için avantajlı kılar (Martins Junior et al., 2024), (Niinomi & Nakai, 2011). Titanyum alaşımlarının elastik modülü, alaşım elementleri ve ortaya çıkan faz bileşiminden büyük ölçüde etkilenir. Araştırmalar, niyobyum, tantal ve molibden gibi β -dengeleyici elementlerin elastik modülünü azalttığını ve titanyum alaşımlarında oda sıcaklığında bile var olabilen kararlı bir β fazını desteklediğini göstermektedir (Sarraf et al., 2022), (Han & Lee, 2024). Ayrıca, titanyum alaşımlarının mikro yapısal özellikleri, elastik modülü de dahil olmak üzere mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Tavlama ve termomekanik işleme gibi işleme yöntemlerinin, titanyum alaşımlarının mikro yapısını ve dolayısıyla mekanik davranışını önemli ölçüde etkilediğini gösteren birçok çalışma mevcuttur. Örneğin, Ti-12Mo-30Nb alaşımı, molibden ve niyobyumun β fazındaki çözünürlüğü nedeniyle Young modülünde belirgin bir azalma sergiler ve ticari Ti-6Al-4V alaşımına kıyasla %42'lik bir azalma gösterir özellikle araştırmalar, elastikiyet modülünün alaşım bileşimine ve uygulanan ısı işleme bağlı olarak da değişebileceğini göstermiştir. Örneğin, Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr alaşımları üzerinde yapılan bir çalışmada bildirildiği gibi, α' martenzitik faz daha yüksek bir Young modülüne sahiptir ve bu da mekanik özelliklerin belirlenmesinde faz dağılımının önemini vurgulamaktadır (Schettini et al., 2020), (Hao et al., 2002), (Han & Lee, 2024). Mekanik özellikler ve biyouyumluluğun benzersiz birleşimi, titanyum alaşımlarını biyomedikal uygulamalar için özellikle uygun hale getirir. Düşük elastikiyet modülleri sayesinde stres korumasını en aza indiren ve kemik iyileşmesini ve bütünleşmesini artıran implantlarda giderek daha fazla kullanılmaktadırlar (Martins Junior et al., 2024), (Niinomi & Nakai, 2011). Alan ilerledikçe, titanyum alaşımlarında mukavemet, yorulma direnci ve elastik modül gibi mekanik özelliklerin dengesini keşfetmeye yönelik araştırmalar devam edecektir. Hem düşük elastik modül hem de yüksek mukavemet sergileyen alaşımlara yönelik arayış, şüphesiz biyomedikal uygulamalarda ilerlemelere yol

açacak ve bu malzemelerin hasta sonuçlarına olumlu katkıda bulunmasını sağlayacaktır. Özetle, titanyum alaşımları, elastik modülü bileşimlerinden, faz dağılımlarından ve işleme geçmişlerinden etkilenen benzersiz bir malzeme sınıfını temsil eder. Bu faktörler arasındaki ilişkilerin sürekli araştırılması, özellikle implant performansı için mekanik özellikler ve biyouyumluluk dengesinin önemli olduğu biyomedikal uygulamalarda, titanyum alaşımlarının tüm potansiyelinin ortaya çıkarılması için çok önemlidir (Sarraf et al., 2022). Tablo 3'te titanyum alaşımlarının mekanik değerleri yer almaktadır.

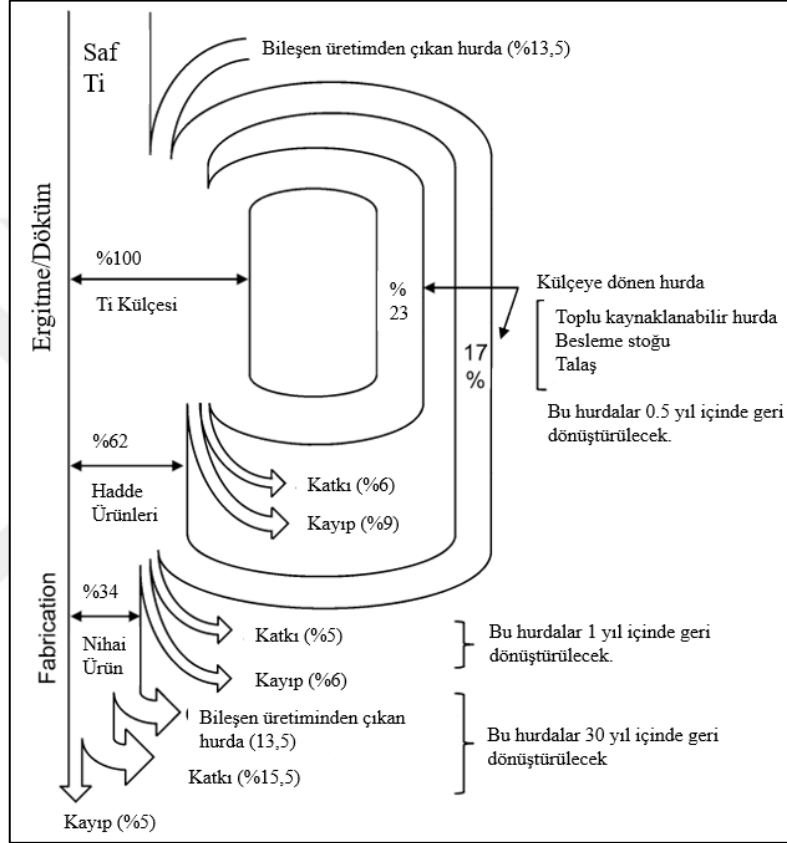
Tablo 3. Toz Metalurjisiyle üretilmiş Titanyum Alaşımlarının Mekanik Değerleri; (1): Sıkıştırılmış ve tavllanmış numuneden alınan değerler (%94 yoğunlukta), (2): Sıkıştırılmış, tavllanmış ve dövülmüş numuneden alınan değerler (yaklaşık %100 yoğunlukta)

Özellikler	Saf Titanyum (TM ₍₁₎)	Ti-5Al-2.5Sn (ELI) (TM ₍₂₎)	Ti-6Al-4V (TM ₍₂₎)	Ti-6Al-6V-2Sn (TM ₍₁₎)
Çekme Dayanımı (MPa)	480	795	925	965
Akma Dayanımı (MPa)	370	715	840	840
% Uzama	18	16	12	5
% Kesit Daralması	22	27	27	5

1.6. Titanyum Alaşımlarının Geri Dönüşümü

Titanyum alaşımları, özellikle havacılık, tıp ve otomotiv endüstrisi gibi çeşitli sektörlerde çok değerlidir. Bununla birlikte, titanyum ve alaşımlarının üretimi ve işlenmesi önemli ölçüde çevresel etkileri bulunmaktadır. Sonuç olarak, titanyum geri dönüşümü, üretimiyle ilgili atıkları azaltmak ve sürdürülebilirliği teşvik etmek için önemli bir yöntemdir. Titanyum alaşımlarının geri dönüşümü işleminin ilk adımı, kullanım ömrü dolmuş titanyum alaşımları ve üretim atıkları dahil olmak üzere hurda malzemelerin temin ve tedarik edilmesiyle başlar. Bu hurda malzemeler, üretim sürecinden arta kalan parçalar, kesim fazlalıkları ve titanyum alaşımlarından dövülerek yapılan eski parçalardır. Saf titanyum madenciliği nedeniyle çevreye verilen zararları azaltmak için bu hurdaların kullanılması hayati önem taşımaktadır. Hurda malzemelerinin yeniden kullanılması, kaynakların korunmasına yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda havacılık ve savunma sanayisinin titanyum ihtiyacını karşılamak için çok önemlidir. Hammadde kıtlığı havacılık,

otomotiv ve savunma sanayilerinde üretim hatlarını durdurur ve ekonomik sorunlara neden olur. Bununla birlikte, titanyum cevheri çıkarılırken yaşam alanlarının tahrip edilmesi ve yüksek enerji tüketimi nedeniyle çevreye verilen zararı geri dönüşüm yoluyla da azaltmak mümkündür (Judd et al., 2024).



Şekil 7. Japonya'da Ti hurdalarının malzeme akışı, literatürden tahmin edilmiştir. Yüksek kaliteli Ti hurdaları, Ti külçe üretmek için yeniden eritilir. Düşük kaliteli Ti hurdaları, çelik endüstrisinde kullanılmak üzere Fe-Ti alaşımı için hammadde olarak kademeli geri dönüştürülmesi (Takeda et al., 2020).

Titanyum geri dönüşümü, mekanik işleme ve çeşitli ekstraksiyon teknikleri gibi bir dizi süreçten oluşur. Bu yöntemlerden biri olan toz metalurjisi, geri dönüştürülmüş hurdadan titanyum eldesinin yüksek verimliliği nedeniyle çok önemlidir. Yapılan araştırmalar, titanyum alaşımlı çubukların üretiminde toz kompakt ekstrüzyonun yararları arasında, hurda malzemenin kullanımını azalttığı ve elde edilen malzemenin özelliklerini geliştirerek şekillendirme ve üretimi kolaylaştırdığı göstermektedir (Yang et al., 2014). Geri dönüşüm ile elde edilen toz titanyum, sonrasında titanyum bileşenlerin 3 boyutlu baskısı için katkı

maddesi üretimi noktasında ileri üretim teknolojilerinde kullanılabilir ve bu alanda daha kritik gelişmeler için ilerleme sağlanabilir (Tebaldo et al., 2024). Titanyum üretiminin sürdürülebilirliğine yönelik yapılan çalışmalarda, atık üretiminin azaltılması ve gelişmiş geri dönüşüm teknikleriyle iyileştirilmiş kaynak verimliliği vurgulanmıştır (Gupta & Laubscher, 2017). Titanyumun yeniden kullanılacak ürün haline getirilmesi, madenden çıkarma süreçlerine olan bağlılığı azaltarak, sera gazı salınımını ve geniş ekolojik ayak izini azaltır (Judd et al., 2024). Bununla birlikte mekanik öğütmede titanyum geri dönüşümünde önemli bir adımdır, çünkü yalnızca boyut küçültmeye yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda geri dönüştürülen malzemenin mekanik özelliklerini ve tane incelmesini de etkiler. Öğütme işlemi sırasında titanyum hurdası mekanik kuvvetlere maruz kalır, tane yapısı incelir ve elde edilen tozun homojenliği artar (Peeratatsuwana & Chowwanonthapunya, 2020). Geri dönüştürülmüş titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri, mekanik öğütme de dahil olmak üzere geri dönüşüm sürecinin etkinliğine büyük ölçüde bağlıdır. Öğütme sırasında mekanik aktivasyon, geri dönüştürülmüş titanyum tozlarının sertliğini ve çekme mukavemetini artırabilir ve yüksek performanslı sektörlerde kullanım için uygunluğu da bu noktada vurgulanmaktadır (Judd et al., 2024). Ancak hurda titanyumun diğer metallerle teması ve kirlenmesi, titanyum geri dönüşümünde karşılaşılan en büyük sorundur. Geri dönüştürülmüş titanyumun mekanik özellikleri ve kalitesi bu nedenle olumsuz etkilenebilir. Elde edilen titanyumun saflığı, mekanik bütünlüğü ve korozyonu tehlikeye atabilir. Havacılık ve biyomedikal uygulamalarda mekanik bütünlük ve korozyon çok önemlidir, bu nedenle geri dönüştürülmüş titanyumun saf titanyumla aynı özellikler göstermesi beklenmektedir. Bu durum, dönüştürülmüş ürün kalitesinin saflığa yakın olması için kapsamlı ayıklama ve işleme süreçlerinin önemini göstermektedir (Takeda et al., 2020). Sonuç olarak, titanyum alaşımlarının geri dönüşümü hem olumlu hem de olumsuz yönleri sahiptir. Titanyum geri dönüşümünün çevresel ve ekonomik faydaları büyük olsa da, kirlenme ve maliyet etkinliği gibi sorunları çözmek için sürekli olarak geliştirilmelidir. Titanyum geri dönüşümünün tüm potansiyelini gerçekleştirmek için, malzemelerin sürdürülebilir kaynaklardan elde edilmesini ve özelliklerini korumasını garanti eden yeni geri dönüşüm teknolojileri ve teknikleri önemlidir. Titanyum alaşımlarının geri dönüşümü muhtemelen malzeme bilimleri ve üretimin gelecekteki yerinde önemli bir rol oynayacaktır, çünkü endüstriler giderek daha sürdürülebilir uygulamaları benimsemeyi hedeflemektedir.

1.7. Titanyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Yüksek mukavemet-ağırlık oranları, mükemmel korozyon direnci ve biyouyumluluk gibi olağanüstü özellikleri nedeniyle titanyum alaşımları çok sayıda sektörde hayati önem taşımaktadır. Titanyum, düşük özgül ağırlığı ve yüksek mekanik özellikleri nedeniyle otomotiv, havacılık ve tıbbi sektörlerde sıklıkla tercih edilen bir malzemedir. Titanyum alaşımlarının, korozyon ve aşınma dirençleri endüstriyel alanda kullanımının sürekli genişlemesine neden olmaktadır. Ancak titanyumun üretim süreçleri maliyet ve üretim süreci ihtiyaçlarından kaynaklı malzemenin kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır (Demirel & Karaağaç, 2021).

1.7.1. Havacılık ve Uzay Sanayi

Titanyum alaşımları, olağanüstü mekanik özellikleri ve aşırı sıcaklıklara ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti-6Al-4V gibi alaşımlar, özellikle yüksek mukavemet ve düşük ağırlığın kritik olduğu jet motorları olmak üzere uçak yapıları ve motor bileşenlerinde tercih edilmektedir (Sandu et al., 2019). Zong ve arkadaşları, α ve β fazlarını bir arada barındıran TC11 alaşımının, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve iyi hizmet sıcaklığı performansı nedeniyle havacılık uygulamaları için özellikle uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, titanyum alaşımları, dayanıklılık ve ağırlık tasarrufunun çok önemli olduğu kompresör diskleri ve uçak gövdesi yapıları gibi bileşenlerin üretiminde kullanılır (Zong et al., 2009), (Serboi et al., 2012).

1.7.2. Biyomedikal Sektörü

Biyomedikal alanda, titanyum alaşımları biyouyumlulukları ve korozyon dirençleri ile tanınır ve bu özellikleri onları tıbbi implantlar ve cihazlar için ideal hale getirir. Barbinta ve arkadaşları, yeni titanyum alaşımlarının insan vücudundaki sitotoksikite ve uyumlulukları açısından nasıl değerlendirildiğini tartışırken, tantalın metal iyonlarının konsantrasyonunu azaltmadaki rolünü de vurgulamıştır (Bărbînță et al., 2014). Titanyum, vücudun aşındırıcı ortamına dayanma ve kemikle bütünleşme özelliği nedeniyle ortopedik implantlarda, diş implantlarında ve protez cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Li et al., 2014).

Titanyum ve alaşımlarının mükemmel yorulma direnci ve mekanik mukavemet gibi benzersiz özellikleri, bunları insan vücudunda kalıcı sabitlemeler için uygun hale getirir (Merklein et al., 2013).

1.7.3. Kimyasal Uygulamalar

Mükemmel korozyon dirençleri nedeniyle, titanyum alaşımları kimya işleme endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimya üretiminde boru sistemleri ve tanklar gibi aşındırıcı maddelere maruz kalan ekipmanlar, agresif ortamlara dayanma yetenekleri nedeniyle uygundur (Shuai et al., 2011). Titanyum alaşımları, düşük yoğunluğu ve yüksek termal kararlılığı nedeniyle, çeşitli kimyasal işlemlerde, özellikle dayanıklılık ve kimyasal saldırıya karşı direnç gerektiren işlemlerde faydalıdır (Dong et al., 2022). Kırılma direnci sayesinde kimyasal sistemlerde ve borularda kullanılabilirliği, çeşitli endüstriyel uygulamalarda daha fazla kullanılabilmesini sağlar. Petrokimya tesislerinde titanyum, kopmalar nedeniyle gerçekleşen hasar koşullarından kaynaklı uzun süreli dayanıklılık özelliğinden kaynaklı sık sık tercih edilmektedir (Z. Li et al., 2015).

1.7.4. Otomotiv Sektörü

Titanyum alaşımları, yarış arabaları ve üst düzey araçlar gibi yüksek performanslı bileşenlerin üretiminde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu eğilim, egzoz sistemleri ve süspansiyon parçaları için bir malzeme olarak titanyuma olan ilginin artmasıyla açıklanabilir (Kabil & Kaynak, 2020). Titanyum alaşımlarının performanstan ödün vermeden ağırlığı azaltma potansiyeli, yakıt verimliliği ve daha düşük emisyon hedefleyen otomotiv üreticileri için caziptir (Kabil & Kaynak, 2020).

1.7.5. Denizcilik Sektörü

Deniz mühendisliği, deniz suyu korozyonuna karşı dirençli olmaları nedeniyle gemi yapımında ve açık deniz yapılarında kullanılan titanyum alaşımlarından yararlanmaktadır.

Deniz ortamlarında titanyum alaşımlarının kullanılması, zorlu koşullara maruz kalan bileşenlerin ömrünü ve dayanıklılığını artırmaktadır (Yu, 2013).

1.7.6. Mimarlık ve Tüketici Ürünleri

Geleneksel sektörlerin ötesinde, titanyum alaşımları, cazip görünüm ve yüksek dayanım gerektiren mimari uygulamalarda da kullanılmaktadır. Titanyum alaşımlarının dayanıklılığı ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle köprüler ve diğer yapısal bileşenler avantajlıdır. Titanyum, hafif ve dayanıklı yapısı nedeniyle spor, moda ve kişisel aksesuarlar gibi tüketici ürünlerinde de kullanılmaktadır (Besisa & Yajima, 2024). Titanyum alaşımlarının modern mühendislik ve imalatta oynadığı önemli rol, çeşitli endüstrilerdeki çok yönlülüğünden kaynaklanmaktadır. Benzersiz özellikleri, uygulamalarda performansı artırır ve yüksek dayanıklılık, hafif malzemeler ve biyoyumluluk gerektiren alanlarda teknolojiyi ilerletir. Titanyum alaşımlarının modern tasarım ve mühendislikte vazgeçilmez malzemeler olarak konumları, sürekli araştırma ve geliştirme ve yeni işleme teknikleri sayesinde daha geniş bir şekilde kullanılacaktır.

1.8. Ti-6Al-4V Alaşımı

1.8.1. Ti-6Al-4V Alaşımının Genel Özellikleri

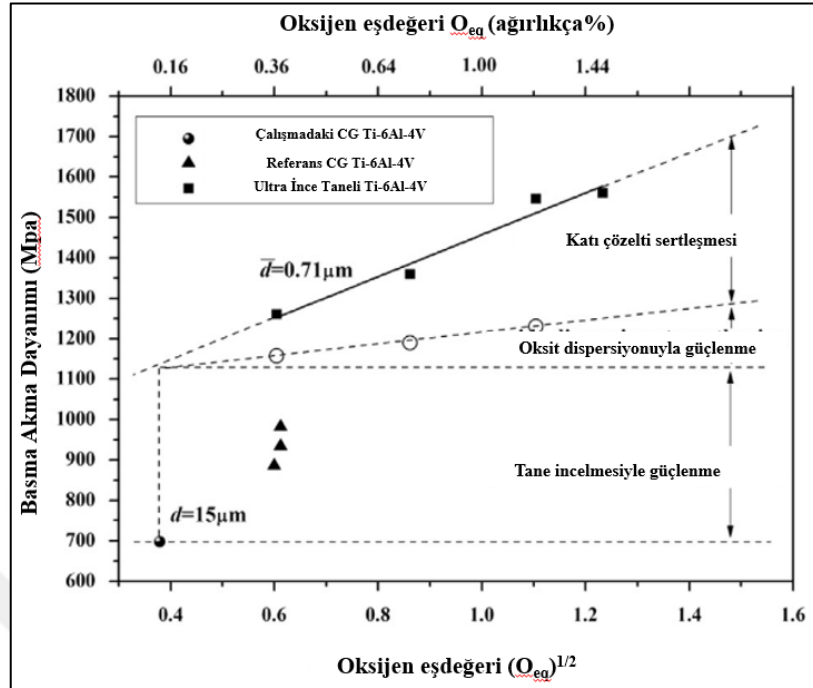
Ti-6Al-4V, mekanik özellikler, korozyon direnci ve biyoyumluluk arasında oluşmuş olağanüstü dengesiyle bilinen, en yaygın kullanılan titanyum alaşımlarından biri olmaktadır. Alaşım, yaklaşık %90 titanyum, %6 alüminyum ve %4 vanadyum içererek benzersiz bir alfa (α) ve beta (β) faz kombinasyonu sağlar. Bu çift fazlı yapı sayesinde, özellikle yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve mükemmel yorulma direnci noktasında havacılık, otomotiv ve biyomedikal alanlarında çeşitli uygulamaları destekler (Hou et al., 2018). Ti-6Al-4V'nin mekanik özellikleri özellikle dikkat çekmektedir. Yaklaşık 880 MPa çekme dayanımı ve yaklaşık 800 MPa akma dayanımı sergiler ve bu da onu yapısal uygulamalarda özellikle değerli kılar. Ayrıca, alaşımın elastik modülü genellikle 110-120 GPa aralığında bildirilmekte olup, bu da yük altında mekanik bütünlüğünü koruma kabiliyetini

vurgulamaktadır (Brigunte et al., 2012). Bu özellikler, onu, doğal kemikle yakın hizalanmış mekanik özelliklerinin stres kalkanını azaltmada avantajlı olduğu yük taşıyan tıbbi implantlar için uygun bir aday haline getirmektedir (Vajpai et al., 2016). Ti-6Al-4V'nin dikkat çekici özelliklerinden biri, diğer titanyum alaşımlarına kıyasla mükemmel işlenebilirliği ve şekillendirilebilirliğidir. Bu özellik, geleneksel dövme işlemleri, seçici lazer eritme (SLE) ve elektron ışıyla eritme (EBM) dahil olmak üzere çeşitli üretim teknikleriyle geliştirilebilir. Örneğin SLE, geleneksel olarak üretilen benzerlerine kıyasla daha yüksek mukavemet ve sertlikle sonuçlanabilen benzersiz bir iğnemsî mikro yapı sağlar, ancak süneklikten ödün verebilir. Araştırmalar, SLE ile üretilen Ti-6Al-4V'nin mikro yapı ve gözeneklilik gibi faktörler nedeniyle dövme versiyonlara göre önemli ölçüde daha düşük süneklik sergilediğini göstermektedir (Shunmugavel et al., 2017). Ti-6Al-4V'nin mikro yapısal özellikleri kritik öneme sahiptir ve mekanik davranışlarını önemli ölçüde etkiler. Alaşımın mikro yapısı, performans özelliklerini etkileyen çeşitli işleme teknikleriyle değiştirilebilir. Örneğin, EBM'de, işleme sırasında geleneksel olarak işlenmiş benzerlerine eşdeğer, hatta daha üstün bir mukavemet sağlayan ince bir mikro yapı geliştirilir. Bu tür dönüşümler, alaşımı belirli uygulamalara göre uyarlarken nihai çekme dayanımının artmasına katkıda bulunabilir (Kok et al., 2015). Ti-6Al-4V, iyi aşınma direnciyle bilinir; ancak kayma ve tribolojik ortamlar gibi belirli koşullar altında bu direnç zayıflayabilir. Ti-6Al-4V'nin aşınma direnci, plastik deformasyona yatkınlığı ve yüzey oksit korumasının etkisiz olması nedeniyle sınırlı olabilir. Yüksek kayma hızlarında aşınmanın buna bağlı olarak arttığını ve aşınma performansını iyileştirmek için yüzey işlemleri veya kompozit modifikasyonları üzerinde araştırma yapılması gerektiğiyle ilgili veriler sunulmaktadır (X. Li et al., 2015). Alaşımın biyouyumluluğu, itibarını önemli ölçüde artırarak onu diş ve ortopedik uygulamalar da dahil olmak üzere çeşitli biyomedikal implantlar için popüler bir tercih haline getirir. Mekanik özellikleri, insan kemiğinkilerle yakından örtüşür ve bu da stres kalkanını en aza indirmek ve biyolojik dokularla daha iyi bütünleşmesini sağlamak için çok önemlidir (Niinomi & Nakai, 2011). Ayrıca, pasif bir oksit tabakasının oluşumuna atfedilen Ti-6Al-4V'nin korozyon direnci, biyolojik uygulamalardaki uzun ömürlülüğüne ve etkinliğine büyük ölçüde katkıda bulunur (Niinomi & Nakai, 2011). Isıl işlemler, alaşımın özelliklerinin optimize edilmesinde de hayati bir rol oynayabilir. Örneğin, uygun ısı işlem, alfa (α) ve beta (β) fazlarının oranını ve dağılımını değiştirerek istenen mekanik özellikleri sağlayabilir. Sıcaklık ve süre gibi parametrelerin optimizasyonu, sertlik ve çekme

özelliklerini iyileştirerek, Ti-6Al-4V'nin zorlu performans standartları gerektiren belirli uygulamalar için uygunluğunu artırabilir (Bathini et al., 2010). Standart konfigürasyonlara ek olarak, devam eden araştırmalar, Ti-6Al-4V'nin performansını daha da artırmak için yenilikçi bileşimsel ayarlamalar ve işlem parametrelerini araştırmaktadır. Karbon veya seramik takviyeler gibi elementlerin eklenmesi, alaşımın hafif yapısından ödün vermeden sertlik ve aşınma direnci gibi belirli özellikleri iyileştirmede umut verici sonuçlar göstermiştir (Wei et al., 2011). Ti-6Al-4V, mekanik mukavemet, biyouyumluluk ve çeşitli işleme tekniklerine uyum özellikleriyle titanyum ailesinin önemli bir alaşımıdır. Özellikleri, alaşımın zorlu uygulamalarda kullanılmasını teşvik ederken, işleme yöntemlerindeki sürekli gelişmeler alaşımın performans metriklerini sürekli olarak geliştirmektedir. Ti-6Al-4V'nin olağanüstü mekanik özellikleri, çok yönlü üretim olanakları ve biyouyumluluk, mikroyapısal özellikleri ve bileşiminin bir sonucudur. Havacılık ve biyomedikal gibi çeşitli sektörlerdeki uygulamaları, performansını daha da iyileştirmeyi amaçlayan devam eden araştırmalarla destekleniyor.

1.8.2. Ti-6Al-4V Alaşımının Mekanik Özellikleri

Kendine özgü mekanik özellikleri nedeniyle, Ti-6Al-4V en yaygın titanyum alaşımlarından biridir ve bu nedenle özellikle otomotiv, havacılık ve biyomedikal sektörlerdeki çeşitli uygulamalar için kritik bir malzemedir. Alaşımın en belirgin mekanik özellikleri arasında orta düzeyde sünekliliği, etkileyici yorulma direnci ve yüksek mukavemet-ağırlık oranı yer alır. Alaşım, temel olarak, genel mekanik davranışına katkıda bulunan hem alfa (α) hem de beta (β) fazlarından oluşan çift fazlı yapısıyla karakterize edilir (Reis et al., 2014). Ti-6Al-4V'nin çekme dayanımı, yapısal uygulamalardaki performansını doğrudan etkileyen önemli bir özelliktir. Tipik olarak, bu alaşım, maruz kaldığı özel işlem ve işleme koşullarına bağlı olarak yaklaşık 900 MPa'dan 1100 MPa'nın üzerine kadar değişen bir çekme dayanımı sergiler. Akma dayanımı genellikle 800 MPa'nın üzerinde kaydedilir ve bu, deforme olmadan yüksek gerilimlere dayanması gereken bileşenler için önemlidir. Özellikle, araştırmalar, eklemeli üretim varyantlarının, geleneksel olarak işlenmiş alaşımlara göre yaklaşık %15-20 daha yüksek akış gerilimlerine ulaşabileceğini göstermiştir (Wojtaszek et al., 2013). Şekil 8'de Ti-6Al-4V alaşımının basma akma dayanımına tane boyutu ve arayer element içeriğinin etkisi verilmiştir.



Şekil 8. Ti-6Al-4V alaşımının basma akma dayanımına tane boyutu ve ara yer element içeriğinin etkisi (Long et al., 2013).

Mekanik özelliklerdeki bu artış, daha küçük tane boyutları ve çeşitli faz dağılımları gibi eklemeli üretim süreci sırasında gelişen benzersiz mikroyapısal özelliklere bağlanmaktadır (Hou et al., 2018). Yüksek çekme mukavemetine ek olarak, Ti-6Al-4V mükemmel yorulma direnci gösterir ve bu da onu tekrarlanan yükleme ve boşaltma döngüleri gerektiren uygulamalar için uygun hale getirir. Bu alaşımın yorulma sınırının genellikle 480-550 MPa civarında olduğu ve bu sayede döngüsel yükler altında yapısal bütünlüğünü koruduğu bildirilmektedir (Takano et al., 2024). Çalışmalar, Ti-6Al-4V'nin yorulma ömrünün mikroyapısal özelliklerinden önemli ölçüde etkilenebileceğini ve daha ince mikroyapıların genellikle daha iyi yorulma performansı sağladığını göstermektedir (Bolzoni et al., 2012). Bu mikroyapılar, ısıtılma veya seçici lazer eritme gibi gelişmiş üretim süreçleriyle elde edilebilir ve bu da geleneksel dövme malzemelere kıyasla yorulma davranışında farklılıklara yol açar (Wei et al., 2018). Ayrıca, Ti-6Al-4V'nin sünekliği, mekanik profilinin bir başka belirleyici yönüdür. Raporlar, alaşımın orta derecede sünekliğe sahip olmasına rağmen, üretim yöntemlerine ve ısıtılma işlemlere bağlı olarak önemli değişkenlikler olabileceğini göstermektedir. Örneğin, katkılı olarak üretilen versiyonlardaki süneklik, gözeneklilik ve heterojen mikro yapıların varlığı nedeniyle geleneksel olarak

Üretilen muadillerinden daha düşük olabilir (Sandgren et al.). Kopma uzaması tipik olarak %10-15 civarındadır ve diğ er bazı malzemelerden daha düşük olmasına rağ men esnekliğin kritik olduğu birçok uygulama için yeterlidir (Zhang et al., 2024).  alışmalar ayrıca işleme parametrelerinin optimize edilmesinin mukavemetten ödün vermeden sünekliği artıracabileceğini belirtmiştir (Bolzoni et al., 2012). Aşınma direnci, Ti-6Al-4V'nin özellikle tribolojik uygulamalarda önemli olan bir diğ er önemli mekanik zelliiğidir. Bu alaşım sertliği nedeniyle aşınmaya karşı yüksek direnç gösterme eğilimindedir, ancak bu, aşındırıcı ortamlarda veya sürtünme yorgunluğuna maruz kaldığında olduğu gibi belirli koşullar altında azalabilir (Ma et al., 2020). Kaplama teknikleri ve kompozit takviye stratejileri ( rneğin TiC veya TiB ilaveleri), aşınma direncini daha da artırma, aşınma kaybını etkili bir şekilde azaltma ve malzemenin hizmet ömrünü uzatma potansiyelini göstermiştir (Oliveira et al., 2018). Bu takviyelerin kullanılmasının yorulma sınırı ve aşınma direncinde iyileşme sağladığı kanıtlanmış olup, bu durum kompozitleri zorlu uygulamalar için özellikle cazip hale getirmektedir (Baragetti, 2013). Ayrıca, Ti-6Al-4V'nin termal kararlılığı, yüksek sıcaklıklar altında çalıştığında kritik önem taşır. Mekanik zellikleri değişebileceğinden, yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kaldığında performansı düşme eğilimi gösterir ve bu da mukavemet ve stabilizenin azalmasına neden olur (Wei et al., 2011). Bununla birlikte, sürünme direncini artırmak için ultra ince taneli (UFG) yapılar gibi yenilikler araştırılmıştır, bu da alaşımın termal stres altındaki davranışını önemli ölçüde iyileştirebilir, yüksek sıcaklıklarda deformasyona karşı koyarken gücü koruyabilir (Fang et al., 2023). Sonuç olarak, Ti-6Al-4V, yüksek performanslı uygulamalar için çok yönlü bir malzeme olmasını sağlayan yüksek mukavemet, yorulma direnci, orta düzeyde süneklik ve aşınma direnci gibi dikkate değer mekanik özelliklerle karakterize edilen bir alaşımdır. Devam eden araştırmalar ve teknolojik gelişmeler, mekanik özelliklerini geliştirmeye ve işleme ve kompozitlerdeki yenilikler yoluyla uygulamalarını genişletmeye devam etmektedir.

1.9. Ti-6Al-4V Tozlarının Oksidasyon Davranışı

Ti-6Al-4V alaşımı, en yaygın titanyum alaşımlarından biridir ve özellikle toz halindeyken güçlü bir oksidasyon davranışı gösterir. Bu alaşım, yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlamasına rağmen, oksidasyona duyarlı olması nedeniyle hem mekanik özelliklerini hem de uygulama performansını bozabilir. Ti-6Al-4V tozlarının oksidasyonu, toz metalurjisi ve katmanlı imalat gibi çeşitli işleme tekniklerinde çok önemlidir. Ti-6Al-4V'nin oksidasyon davranışı, özellikle malzeme matrisine oksijenin dahil olması nedeniyle zararlı etkilere yol açabilir. Araştırmalar, hidrojenasyon-dehidrojenasyon (HDH) tozlarında ve tozun geri dönüşüm sürecinde sıklıkla görülen yüksek oksijen içeriğinin, kırılma eğilimine yol açabileceğini göstermektedir. Bu fenomen, oksijen ara parçacıklarının matris boyunca yayılmasıyla ortaya çıkar ve alaşımın süneklik ve çekme özelliklerinde önemli değişikliklere neden olur. Oksijen, yeniden kullanılan Ti-6Al-4V tozlarında kademeli olarak birikebilir, bu da metal matrisine oksijen nüfuz etmesine ve malzemenin gevrekleşmesine neden olarak sünekliği azaltır (Gim et al., 2025). Ti-6Al-4V'nin oksidasyon davranışını etkileyen bir diğer faktör, kullanılan işleme tekniklerine göre değişebilen mikroyapısal özellikleridir. Örneğin, seçici lazer eritme (SLE) gibi eklemeli üretim teknikleri, Ti-6Al-4V'nin mikroyapısını önemli ölçüde etkiler. Hızlı soğuma hızları, daha geleneksel mikroyapılara kıyasla farklı oksidasyon direnci gösterebilen iğnemi şekilde α' martenzitik yapıya yol açar. Çalışmalar, mikroyapının oksidasyon kinetiğini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır; gelişmiş mikroyapılar genellikle artan oksidasyon direnciyle ilişkilidir (Vilaro et al., 2011). Ti-6Al-4V'nin döngüsel oksidasyonu üzerine yapılan araştırmalar, oksidasyon davranışının sıcaklık ve alaşım matrisindeki stabilize edici maddelerin varlığından etkilenebileceğini göstermiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalma, oksidasyon hızını yavaşlatabilen ancak mikro yapısal bütünlük ve faz bileşimine duyarlı olan koruyucu bir oksit tabakasının oluşumunu teşvik etme eğilimindedir. Oksit tabakasının stabilitesi, bozulma hızlandırılmış oksidasyon oranlarına ve ardından malzemenin zayıflamasına yol açabileceğinden, genel oksidasyon direncinin belirlenmesinde çok önemlidir (Kim et al., 2016). Ayrıca, Ti-6Al-4V'nin oksidasyon davranışını modüle etmede alaşım elementlerinin rolü önemli bir ilgi alanı olmuştur. Alüminyum ve vanadyum gibi ek elementlerin dikkatli bir şekilde seçilmesi ile, oksit tabakasının oluşumunun iyileştirilmesi yoluyla oksidasyon direncini artırmak mümkündür. Bu sayede, oksidatif ortamlarda olumsuz reaksiyonları azaltırken, alt tabaka

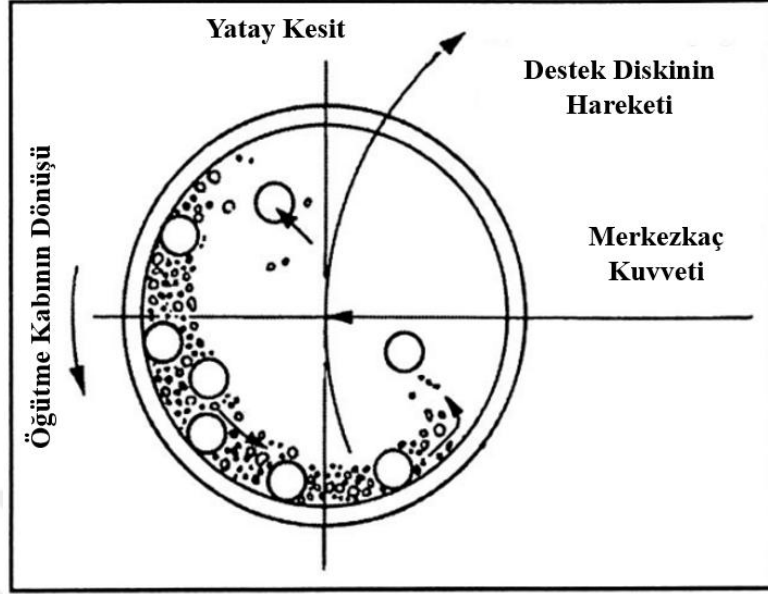
malzemesinin avantajlı özellikleri korunur. Bu alaşım stratejileri, özellikle havacılık ve biyomedikal cihazlar gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında Ti-6Al-4V bileşenlerinin çalışma ömrünü uzatmak için kritik öneme sahiptir (CASADEBAIGT et al., 2020). Sonuç olarak, Ti-6Al-4V tozlarının oksidasyon davranışı çok yönlü bir konudur ve üretim süreçleri, mikroyapısal özellikler ve oksidasyon kinetiği ile ilgili kontrollü çalışmalar yoluyla kapsamlı bir anlayış gerektirir. Araştırmalar ilerledikçe, bu faktörlerin optimize edilmesi, oksidatif bozulmaya karşı direnç gösteren ve gelişmiş mekanik özelliklere sahip Ti-6Al-4V bazlı bileşenlerin geliştirilmesinde çok önemli olacaktır. Bu, çeşitli sektörlerde uygulanabilirliklerinin genişletilmesini sağlayacaktır.

1.10. Toz Üretim Yöntemleri ve Mekanik Öğütme Yöntemi

Modern malzeme bilimi ve mühendisliğinde toz üretim teknikleri çok önemlidir. Bu tekniklerin amacı, çeşitli metal ve alaşım tozlarının özelliklerini en üst düzeye çıkararak, çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilecek yüksek performanslı malzemeler oluşturmaktır. Toz Metalurjisi (TM), ergitme yerine sıkıştırma yöntemlerine dayanan "tozların karıştırılması, preslenmesi ve sinterlenmesi" aşamalarında gelişen üretim yöntemi prensibine dayanmaktadır (Şimşir, 2020). Toz metalürjisi, karmaşık bileşenlerin daha kolay ve daha hızlı bir şekilde üretilmesini ve belirli malzemelerin özelliklerinin en üst düzeye çıkarılmasını sağlar (Şenel & Gürbüz, 2020).

1.11. Mekanik Öğütme Yöntemi

Malzeme bilimi ve mühendislik alanında, özellikle toz üretimi ve materyal işleme aşamalarında, mekanik öğütme süreci yaygın olarak kullanılır. Öğütme işlemi, malzemelerin yüzey alanını genişleterek ve parçacık boyutunu azaltarak reaktantların etkileşimlerini önemli ölçüde artırır. Bilyalı değirmenlerde (Şekil 9) yaygın olarak kullanılan mekanik öğütme, tozların fiziksel özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir (Varol, 2018).



Şekil 9. Mekanik Öğütme prensibinin şematik gösterimi (Suryanarayana, 2001).

Öğütme sürecinde meydana gelen fiziksel değişiklikler yoluyla mekanik aktivasyon, malzemelerin kimyasal reaktivitesini artırmayı amaçlar. Mekanik aktivasyon, mineral ve metal tozlarının yüzey aktivitesini artırarak onları kimyasal tepkimeye daha yatkın hale getirir (Göktaş, 2023). Bu işlem, mikro yapısal değişikliklere ve malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmede önemli bir rol oynar. Örneğin, mekanik öğütme işlemi yoluyla seramik tozlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, bu yöntemle özelliklerin nasıl optimalleştirilebileceğini göstermektedir (Aksöz et al., 2017). Bununla birlikte, öğütme sürecine çeşitli parametrelerin etkileri incelenmiştir. Öğütme süresi, bilye-toz oranı ve öğütme hızı gibi bağlamlar, seramik ve metal tozlarının fiziksel özelliklerini değişimlerde büyük önem taşımaktadır. Özellikle bilyeli değirmenlerde uygulanan mekanik öğütme süreçlerinde, uygun parametrelerin seçilmesiyle daha homojen ve istenen özelliklere sahip tozlar elde edilir. Örneğin, Al-KNT kompozitlerinin mekanik özelliklerine ilişkin araştırmalar, belirli öğütme süreleri ve hızlarında en iyi performansı gösterdiklerini göstermiştir (Şenel, 2021). Mekanik öğütme, çevresel açıdan güvenli bir yöntemdir. Bu yaklaşım, işleme sürecinin daha güvenilir ve temiz olmasını sağlar ve çeşitli çözücülerin kullanılmasını sağlar. Özellikle yarı kararlı durumlarda ürün elde edilmesini sağlamak için mekanik aktivasyon metotları geleneksel yöntemlerle birleştirilebilir. Bu, yeni malzemelerin geliştirilmesini sağlar. Sonuç olarak, mekanik öğütme, modern malzeme bilimi için temel

bir süreçtir ve yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesine izin verir. Dikkatli parametrelerin ayarlanması, ideal fiziksel ve mekanik özelliklere sahip toz üretmek için mümkündür, bu da malzeme bilimi ve mühendislik alanında çok çeşitli uygulama alanları sunmaktadır.

1.12. Mekanik Öğütme İşleminde Proses Kontrol Ajanı Kullanımının Tozların Morfolojisi Üzerindeki Etkileri

Farklı toz metalleri ve alaşımları üretimi yapmak için yaygın olarak kullanılan mekanik öğütme yöntemi, işleme katılan tozların morfolojisini kritik oranda değiştirmektedir. Özellikle mekanik öğütme yöntemi sırasında kullanılan proses kontrol ajanlarının (PCA) türü ve oranı bu etkiye doğrudan bağlantısı bulunmaktadır. Mekanik öğütmenin temel bileşenleri arasında toz parçalarının bilyelerle çarpışarak kırılması ve parçalanması yer alır. Bununla birlikte, bu süreçlerde tamamen kontrolsüz kırılma ve deformasyon meydana gelmesiyle birlikte tozların homojenliğini etkilediğinden, proses kontrol ajanlarının bu noktada kullanımı büyük önem taşımaktadır. Proses kontrol ajanları, agresif kirlenici maddeleri ve aglomerasyonu azaltarak öğütme verimliliğini artırır. Örneğin, mekanik öğütme işleminde kullanılan PCA'lar (proses kontrol ajanları) toz parçacıklarının morfolojisini, boyutunu ve yüzey özelliklerini değiştirebilme potansiyeline sahiptir. Cu25W kompozit tozlarının mekanik öğütme işlemi sırasında çeşitli PCA'ların etkisinin incelemesini yapmış olduğu çalışmalarında, tozların homojenliğinin sağlanması için PCA'ların önemini vurgulamışlardır. Toz karışımındaki yerel bileşim segregasyonlarını azaltarak, farklı PCA türlerinin kullanılması aşınma direnci özelliğini arttırmaktadır (Bıyık, 2019). Mekanik öğütme sürecinde soğuk kaynak ve plastik deformasyon araçları kullanılarak malzemenin kristal yapısının nasıl değiştiği üzerinde durulmuştur. Proses kontrol ajanları, parçaların birbirleriyle daha iyi etkileşim kurmasını sağlayarak daha homojen bir toz morfolojisi oluşturabilir. Bu durum, mekanik öğütme işlemi süreci sırasında meydana gelen parçacıkların morfolojik değişimlerini ve soğuk kaynak aşamalarını önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır (Avar, 2019). Cevher hazırlama süreçlerinde mekanik aktivasyon uygulamaları üzerine yapılan çalışmada, bu işlemler sırasında etki gösteren donanmanın ayrıntıları ele alınmıştır. Cevher hazırlama sürecinde mekanik aktivasyonun fizikokimyasal özellikleri değiştirdiği keşfedilmiştir. Bu değişiklikler, metal tozlarının öğütülmesi sırasında

PCA'ların etkisini görmemizi sağlar. Öğütme sürecinin verimliliğini artırmak ve nihai tozların morfolojisini önemli ölçüde etkilemek için PCA kullanılmaktadır (Göktaş, 2018). Mekanik öğütme sürecinde kullanılan PCA'lar, seramik tozların öğütülmesi gibi diğer alanlar üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Al_2O_3 seramik tozlarının öğütülmesinde PCA'ların etkilerini inceleyerek, öğütme parametreleri arasında kırılma eğilimlerinin en önemli olduğunu göstermiştir. İncelenen sonuçlar neticesinde, PCA'nın etkili kullanımının toz morfolojisini ve öğütme sürecinin genel verimliliğini artırabileceğini göstermektedir (Varol, 2018). Sonuç olarak, mekanik öğütme işleminde kullanılan proses kontrol ajanları, toz morfolojisini, parçacık boyutunu ve nihai ürünün özelliklerini doğrudan etkileyen önemli bir bileşendir. Toz metalurjisi alanında PCA kullanımı, verimliliği artırırken istenen niteliklere sahip homojen tozların elde edilmesini kolaylaştırır.

1.13. Literatür Özeti

Enerji, otomotiv, biyomedikal ve havacılık sektörlerindeki gelişmeler incelendiğinde, bu gelişmelerin gelişen ve değişen malzeme türleriyle ayrılmaz bir şekilde bağlantılı olduğu açıktır. Geçmişten günümüze bu alanlarda kullanılan malzemeler incelendiğinde, Al, Cr, Ni ve Cu gibi saf metaller, alaşımlı çelik ve paslanmaz çelik türü malzemelerin bu endüstrilerde yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Geleneksel malzemeler artan performans standartlarına ayak uyduramadığından, bu alanlarda artık özel kompozitler, süper alaşımlar, yüksek entropili malzemeler veya titanyum ve alaşımları gibi metaller tercih edilmektedir. Ti alaşımları, çelik bazlı malzemelere kıyasla mükemmel korozyon direnci, yüksek mekanik mukavemet, üstün aşınma direnci ve düşük yoğunluk gibi olağanüstü özellikleri nedeniyle bu malzemeler arasında öne çıkmaktadır (Bolzoni et al., 2017), (Cai et al., 2022), (Akula et al., 2023). İlk geliştirilen Ti alaşımlarından biri olan Ti-6Al-4V alaşımı, Ti alaşımları arasında %75 kullanım oranına sahiptir ve geliştirilmiş Ti alaşımlarının atası olarak kabul edilmektedir. Bu alaşım, havacılık ve biyomedikal uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Pushp et al., 2022a).

Saf Ti ve Ti bazlı alaşımların üretimi için sıvı faz ve katı faz olarak bilinen iki temel yöntem vardır. Sıvı faz, diğer adıyla döküm yöntemi; Titanyumun yüksek erime noktası, özel seramik kalıplara duyulan ihtiyaç ve oksijen ve malzeme kaybına yönelik endişe nedeniyle vakumlu eritme sistemlerinin kullanılması gerekliliğinden dolayı çok zahmetli ve maliyetli

bir üretim yöntemidir (Solorio et al., 2022). Öte yandan, katı faz üretim yöntemlerinin temelini oluşturan toz metalurjisi, üretim maliyetleri ve işlem sıcaklıklarının düşürülmesi ile Ti ve Ti bazlı mühendislik parçalarının imalatı için cazip bir alternatif sunmaktadır (Raynova et al., 2021). İstenilen alaşım yapısına bağlı olarak, mühendislik malzemeleri düşük işlem sıcaklıklarında üretilebilir (Varol, 2012). Ayrıca, döküm yöntemindeki çözünürlük sınırlaması olmadan, karıştırma ve öğütme teknikleriyle üretilen alaşım ve kompozit tozlarla yeni malzeme türleri geliştirilebilir.

Metal tozları, toz metalurjisi parçalarının en pahalı bileşenidir. Metal tozlarının üretiminde kullanılan prosesin, tozların fiyatı, boyutu ve morfolojisi üzerinde doğrudan etkisi olduğu belirtilmelidir. Metal parçacıkları genellikle gaz ve su atomizasyon teknikleri kullanılarak üretilir. Bu tekniklerde metalin eritilmesi sırasında yüksek enerji gereklidir. Gaz atomizasyon tekniğinde kontrollü atmosfer koşulları sağlamak için argon ve diğer pahalı inert gazlar kullanılmalıdır. Öte yandan, su atomizasyon yönteminde oksit oluşumu kaçınılmazdır ve bu nedenle toz üretiminden sonra bir indirgeme işlemi uygulanmalıdır (Im et al., 2022). Metal hurdaların bilye çarpmasıyla toza dönüştürülmesi, toz metalurjisi tabanlı yöntemlerde kullanılan metal tozlarının üretimi için başka bir tekniktir. Mekanik geri dönüşüm olarak bilinen bu teknik, geleneksel atomizasyon yöntemleri kadar fazla enerji gerektirmez. Mekanik öğütme tekniği, tozların bilye-toz-bilye ve bilye-toz-hazne yüzey çarpışmaları nedeniyle plastik deformasyonla kırıldığı bir kırma-öğütme işlemidir. İşleme hurdaları, mekanik öğütme tekniği kullanılarak kolayca kaba ve ince tozlara dönüştürülebilir (Hesse et al., 2021). Bu yöntem, tornalama ve frezeleme gibi işleme işlemleri sonucunda elde edilen düz ve kırılğan hurdaları Ti, Al, Cu ve Mg gibi metalik tozlara dönüştürmek için çok pratik ve düşük maliyetli bir yöntemdir. Proses kontrol ajanı (PCA), top-toz ağırlık oranı (BPR), öğütme süresi ve dönüş hızı gibi çok sayıda işlem parametresine sahip olan mekanik öğütme için en önemli husus, en iyi işlem parametrelerini seçerek tozlar üretmektir (Eryomina & Lomayeva, 2020).

Çanakçı ve Varol (Canakci & Varol, 2015), çalışmalarında talaşlı imalat talaşlarından AA7075 tozlarının üretiminde mekanik öğütme yöntemini uygulamışlardır. Öğütme süresinin öğütülmüş talaşlarının ve üretilen tozların morfolojisi, parçacık boyutu ve toz verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üretilen tozlar, taramalı elektron mikroskobu (SEM), lazer partikül boyutu analizörü, X-ışını difraksiyonu (XRD) ve enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) ile karakterize edilmiştir. Öğütülmüş tozların morfolojisi ve boyutuna dayalı bir talaş

öğütme modeli sunulmuştur. 10 saatlik öğütme işleminden sonra, AA7075 tozlarının ortalama partikül boyutunun 35 μm 'ye düştüğü bulunmuştur. Sonuçlar, talaş morfolojisinin (segmentli şekil) toz morfolojisinden (düzensiz şekil) değişmesinde kritik öğütme süresinin 5 saat olduğunu göstermiştir. 10 saatlik öğütme işleminden sonra üretilen tozların parçacık boyutunun, ilk talaşların parçacık boyutundan yaklaşık 286 kat daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Nazari ve ark. (Nazari et al., 2015), Değişik miktarlarda yüzey aktif madde (etilen bis-stearamid; EBS) ve öğütme süresinin, bilyalı öğütülmüş Ti-10Nb-3Mo (ağırlıkça %) alaşımının sıkıştırılabilirliği üzerindeki birleşik etkilerini araştırmıştır. Mekanik öğütme işlemi, farklı miktarlarda EBS (ağırlıkça %0-%3) içeren elementel tozlar üzerinde 5 ve 10 saat süreyle gerçekleştirilmiş ve bilyalı öğütme ile öğütülmüş tozlar, 500–1100 MPa aralığında tek eksenli soğuk presleme ile konsolide edilmiştir. Sonuçlar, bilyalı öğütme işleminde yüzey aktif maddenin eklenmesinin, parçacıkların paketlenme yoğunluğunda önemli değişikliklere yol açtığını göstermiştir. Daha fazla miktarda EBS ile bilyalı öğütme ile öğütülmüş tozlar ve daha kısa öğütme süresi için nispi yoğunluk daha yüksek tespit edilmiştir. Tozların sıkıştırılabilirliği, Panelli ve Ambrosio Filho tarafından geliştirilen sıkıştırma denklemi ile incelenmiş; Yoğunlaştırma parametresinin (A), EBS miktarının artmasıyla arttığı, öğütme süresinin artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir.

Fouzia ve ark. (Fouzia et al., 2021), gerçekleştirdikleri çalışmada, bilyalı öğütme süresinin (2, 6, 8, 12 ve 18 saat) biyomedikal nanokristal Ti-6Al-4Fe (ağırlıkça %) alaşımlarının kristal yapısı, faz evrimi, yoğunlaşma ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. X-ışını difraksiyonu (XRD), 6 saatlik öğütme sonrasında alüminyum (Al) ve Fe'nin Ti matrisine tamamen çözünerek Ti (Al, Fe) katı çözeltileri oluşturduğunu doğrulamıştır. XRD ayrıca, kristalit boyutunun 56 nm'den 30 nm'ye düştüğünü ve öğütme süresinin artmasıyla mikro gerilimin arttığını ortaya koymuştur. Öğütme süresinin artmasıyla alaşımlarda yoğunluğun arttığı ve gözenekliliğin azaldığı da gözlemlenmiştir. Ayrıca, geliştirilen Ti-6Al-4Fe alaşımları için elde edilen gözeneklilik değerleri %1 ile %12 arasında değişmekte olup, bu değerler kortikal kemiklerin gözenekliliğiyle karşılaştırılabilir ve bu da onu kemik protezleri için potansiyel bir aday haline getirmektedir. Mikro sertlik ölçümleri, Ti-6Al-4Fe alaşımlarının sertliğinin geleneksel Ti-6Al-4V alaşımlarının sertliğinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. 2 saat boyunca öğütülmüş tozlarla üretilen Ti-6Al-4Fe alaşımının Young Modülü değerinin en

düşük olduğu gözlemlenmiştir. Öğütme süresi, alaşım numunelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde de önemli bir etkiye olduğu tespit edilmiş ve öğütme süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.

Annan ve ark. (Annan et al., 2021), Mekanik olarak alaşımlı Ti-Al tozu üzerinde öğütme parametrelerinin parçacık boyutu ve faz oluşumu üzerindeki etkisini incelenmişlerdir. Titanyum alüminit üretmek için CP Ti ve Al karışımını öğütmek üzere yüksek enerjili bilyalı öğütücü kullanılmıştır. Alaşım, öğütme hızı ve öğütme süresi değiştirilirken, sabit bir bilya-toz ağırlık oranı olan 10:1 ile üretilmiştir. Mekanik olarak üretilen tozlar, mekanik alaşımlama tekniğinden sonra kimyasal homojenliği ve faz oluşumunu araştırmak için EDX, XRD ve SEM kullanılarak analiz edilmiştir. Öğütmeden çıkan mekanik olarak alaşımlı tozların analizi, farklı öğütme hızı, öğütme süresi, element bileşimi ve oluşan fazlar sırasında morfoloji evrimi açısından raporlanmıştır. 500 rpm hızında 5-20 saatlik öğütme süresi aralığında öğütülen alaşımlarda Ti alfa (α -Ti) ve gama fazı (γ -TiAl) oluşumu gözlemlenmiştir.

Soufiani ve arkadaşları (Soufiani et al., 2010), yüksek enerjili mekanik öğütme yoluyla nanokristal Ti6Al4V tozunun üretilmesini incelemişlerdir. Bu bağlamda, Ti6Al4V tozu, Ti6Al4V işleme artıkları balya öğütme yoluyla üretilmiştir. Tozların yapısal ve morfolojik değişimleri, X-ışını difraksiyonu, taramalı elektron mikroskobu ve mikro sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Sonuçlar, bilyalı öğütme işleminin Ti6Al4V'nin koherent saçılma bölgesinin boyutunu yaklaşık 20 nm'ye düşürdüğünü ortaya koymuştur. Ayrıca, bilyalı öğütme sırasında morfoloji ve parçacık boyutunda dikkate değer bir değişiklik meydana gelmiştir. Dahası, öğütme sırasında faz evrimi de dikkate alınmıştır. Öğütülmüş Ti6Al4V tozu, orijinal numunelere kıyasla daha yüksek mikro sertlik sergilemiştir.

Dikici ve Sutcu (Dikici & Sutcu, 2017), titanyum talaşlarından Ti6Al4V tozlarının üretiminde mekanik disk öğütme yönteminin kullanımını araştırmışlardır. Çalışmalarında, öğütme hızı ve öğütme süresinin geri dönüştürülmüş tozların özellikleri (partikül boyutu, morfoloji, kristal fazlar ve oksijen içeriği) üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Talaşları ve üretilen tozlar sırasıyla XRD, SEM, partikül boyutu ve elementel oksijen analizleri ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar, öğütme parametrelerinin Ti6Al4V tozlarının parçacık boyutu ve morfolojileri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Öğütme hızı 800 rpm'den 1400 rpm'ye, öğütme süresi 4 dakikadan 24 dakikaya çıktığında, pullu tozların parçacık boyutu azalmıştır. Sonuçlar, ortalama ortalama parçacık boyutlarının (d_{50}) 1400

rpm'de 4 dakika ve 1200 rpm'de 24 dakika öğütme sonrasında sırasıyla yaklaşık 330 ve 211 μm olduğunu göstermiştir. XRD sonuçlarına göre, faz içeriğinde önemli bir değişiklik kaydedilmemiştir. Genel olarak, uygulanan öğütme işleminin Ti6Al4V hurdalarından kısa sürede mikron boyutunda tozlar üretmek için oldukça etkili olduğunu göstermiştir.

Mevcut literatürün incelenmesi, mekanik öğütmenin işleme hurdalarından metalik tozlar üretmek için uygun bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, mekanik öğütme işleminin en önemli parametrelerinden biri olan PCA'nın, mekanik öğütme ile sentezlenen Ti-6Al-4V alaşım tozlarının özellikleri üzerindeki etkisi henüz araştırılmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmanın ana amacı, Ti-6Al-4V işleme artıkları yüksek top-toz ağırlık oranına sahip mekanik öğütme ile Ti-6Al-4V alaşım tozlarına geri dönüştürmek ve Ti-6Al-4V işleme artıkları geri dönüştürülerek üretilen Ti-6Al-4V tozlarının parçacık boyutu, morfolojisi, görünür yoğunluğu, kristalin yapısı ve oksidasyon direnci üzerinde PCA'nın etkisini sistematik olarak araştırmaktır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Ti-6Al-4V torna talaşları, Trabzon, Türkiye’de bulunan AGS Medical Fabrikası’ndan temin edilmiştir. Etanol ($\geq$ %99,9 saflık) ise Darmstadt, Almanya’da bulunan Merck Group’tan sağlanmıştır. Ti-6Al-4V talaşlarının etanol ile yağ öğütme işlemi uygulanıp fırında kurutulması yapılmıştır ve burada talaşlardan kalmış soğutma sıvısı, yağ gibi kirliliklerin temizlenmesi sağlanmıştır ardından kurutma işlemi sağlanarak oksidasyonun önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Ön hazırlık aşamasından sonra yüksek enerjili bilyalı değirmende yapılan mekanik öğütme ile talaşların parçacık boyutunun küçültülmesi, yüzey alanının artması ve toz morfolojisinin iyileştirilmesi sağlanmıştır. Öğütme sonrası elde edilen tozlar, morfolojik analiz, parçacık boyutu dağılımı, kristal yapı incelemesi, yoğunluk ölçümleri ve oksidasyon testleri ile kapsamlı şekilde karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mekanik öğütme süresi ve kullanılan işlem koşullarının, tozların boyut dağılımı, şekli ve oksidasyon davranışı üzerinde belirleyici etkiler yarattığını göstermiştir. Bu bulgular, Ti-6Al-4V talaşlarının mekanik öğütme ile geri kazanılmasının önemi ve sonuçları irdelenmiştir.

2.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan malzemeler olarak AGS Medical Fabrikasından temin edilmiş torna talaşı olan Ti-6Al-4V alaşımını ana hammadde olarak geri dönüşüm yöntemiyle toz formuna dönüştürmek için, Merck Group firmasından alınan Etanol (%99,9 saflıkta) ile yağ öğütme işlemi sırasında talaş üzerindeki yağ, soğutma sıvısı ve diğer kirleticileri tamamen uzaklaştırmak, parçacık boyutunda homojenleşme sağlamak amacıyla, Metanolü öğütme sürecinde tozların değirmen haznesi ve bilyalara yapışmasını önleyip öğütme verimliliğini arttırmak ve aglomerasyonu önlemek amacıyla proses kontrol ajanı olarak, Tungsten Karbür (WC) öğütme bilyaları ve öğütme haznesini parçacık küçültme sağlamak ve tozların öğütme ortamından elementel olarak kirlenmesine engel olmak ve elek setlerini ise üretilen tozların partikül boyutu dağılımını belirlemek ve farklı fraksiyonlardaki ağırlık oranlarını hesaplamak amacıyla ilgili malzemelerin kullanımı tercih edilmiştir.

2.2. Malzeme Ön Hazırlık Aşaması

İlk aşamada Ti-6Al-4V talaşları, etanol ile 1 saat yaşı öğütme işlemine tabi tutulmuş ve ardından fırında kurutulmuştur. Etanol ile gerçekleştirilen yaşı öğütme işleminin amacı, bilyalı öğütme yöntemiyle nihai toz üretimine uygun partikül boyutu homojenliğini sağlamak ve talaşlar üzerinde talaşlı imalat işlemleri sonucu oluşan yağ ve benzeri kalıntıları tamamen uzaklaştırmaktır. Kurutma işleminde, oksidasyon gibi mekanizmaların oluşmasını önlemek amacıyla vakum atmosferli bir fırın kullanılmıştır. Yaşı öğütme işlemi sonucunda, etanolün partiküller üzerindeki safsızlıkları giderdiği belirlenmiştir. (Tablo 4)

Tablo 4. Bilyalı öğütmenin proses parametreleri

Numune	Bilya Toz Oranı (Ağırlıkça)	Hız (rpm)	PCA (%ağırlıkça)	Zaman (dk)
Ti-6Al-4V-0.5-30	20:01	400	0.5%	30
Ti-6Al-4V-0.5-60 60				
Ti-6Al-4V-0.5-90 90				
Ti-6Al-4V-0.5-120 120				
Ti-6Al-4V-0.5-180 180				
Ti-6Al-4V-0.5-240 240				
Ti-6Al-4V-0.5-360 360				
Ti-6Al-4V-1-30	20:01	400	1%	30
Ti-6Al-4V-1-60 60				
Ti-6Al-4V-1-90 90				
Ti-6Al-4V-1-120 120				
Ti-6Al-4V-1-180 180				
Ti-6Al-4V-1-240 240				
Ti-6Al-4V-1-360 360				
Ti-6Al-4V-2-30	20:01	400	2%	30
Ti-6Al-4V-2-60 60				
Ti-6Al-4V-2-90 90				
Ti-6Al-4V-2-120 120				
Ti-6Al-4V-2-180 180				
Ti-6Al-4V-2-240 240				
Ti-6Al-4V-2-360 360				

Son aşamada, yaşı öğütme ve kurutma işlemlerinden geçmiş Ti-6Al-4V partikülleri, katı hâl bilyalı öğütme işlemine tabi tutularak Ti-6Al-4V alaşım tozları elde edilmiştir.



Şekil 10. Vakum atmosferli fırın.

2.3. Ti-6Al-4V Alaşım Partiküllerinin Mekanik Öğütme İşlemi

Ti-6Al-4V alaşım partikülleri, farklı PCA (ağırlıkça %0,5'ten %2'ye) oranları ve farklı öğütme süreleri (0–360 dakika) ile planet tipi bilyalı değirmende (Retsch, PM200) öğütülmüştür. Katı hal bilyalı öğütme işlemine ait parametreler Tablo 4'de verilmiştir. Bu çalışmanın amacı, Ti-6Al-4V talaşlarından Ti-6Al-4V tozları elde etmektir; bu nedenle Tablo 4'de belirtilen PCA ve öğütme süresi parametreleri kullanılmıştır. Böylelikle PCA'nın (üç farklı) ve öğütme süresinin (yedi farklı) talaşlardan toz üretimine olan karşılaştırmalı etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Tablo 4'de yer alan tüm deneyler, deneysel sonuçların tekrarlanabilirliğini belirlemek amacıyla üç kez gerçekleştirilmiştir. Deneyler, çift hazneli PM200 bilyalı değirmen cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 11. Yüksek enerjili bilyalı öğütücü cihazı.

Tablo 4’de görüldüğü üzere Ti-6Al-4V alaşım partikülleri, 20:1 bilya-toz ağırlık oranı ile 400 dev/dak hızda öğütülmüştür. Bu çalışmada PCA olarak metanol kullanılmıştır. Öğütme bilyaları ve haznesi, öğütme işlemi sonucunda elde edilecek Ti-6Al-4V alaşım tozlarının elementel olarak kirlenmesini önlemek amacıyla yüksek sertlikte tungsten karbür (WC) malzemedan seçilmiştir. Tüm katı hâl bilyalı öğütme işlemleri, 20 g başlangıç malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm öğütme işlemleri sonucunda, başlangıç Ti talaş miktarının %99’u Ti tozu olarak elde edilmiştir. Süreç kontrol ajanı (PCA) sayesinde, bilya ve değirmen yüzeylerine yapışma gibi toz kayıpları gözlenmemiştir.

2.4. Ti-6Al-4V Tozlarının Morfoloji İncelemeleri

Üretilen Ti-6Al-4V alaşım tozlarının farklı üretim parametrelerine bağlı morfoloji değişimlerini incelemek amacıyla Zeiss Evo LS10 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 12. Taramalı elektron mikroskobu cihazı (SEM-EDS).

Element analizleri, enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Faz analizleri ise X-ışını difraksiyonu (XRD) yöntemiyle yapılmıştır.



Şekil 13. X-ışını difraksiyonu (XRD) cihazı.

Öğütülen tozların partikül boyutu dağılımları, ISO 13320:2020-01 “Partikül boyutu analizi-lazer kırınım yöntemleri” standardına uygun olarak Malvern MasterSizer é2000 cihazı ile belirlenmiştir. Partikül boyutu dağılım testleri dört kez yapılmış ve ortalama değerler hesaplanmıştır.



Şekil 14. Partikül boyutu analizinin yapıldığı Mastersizer cihazı.

Ti-6Al-4V alaşım tozlarının partikül boyutu dağılımını daha kapsamlı belirlemek amacıyla elek analizi çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Elek analizi deneyleri için Retsch AS200 titreşimli elek cihazı kullanılmış, elek boyutları 125 μm , 63 μm ve 40 μm olarak seçilmiştir. Elek analizleri, ASTM B214-16 “Metal Tozlarının Elek Analizi için Standard Test Yöntemi” standardına uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 15. Titreşimli elek cihazı.

Tüm elek analizi sonunda, her elek fraksiyonundaki toz miktarı tartılarak ağırlık dağılımı hesaplanmıştır. Elek analizi deneyleri üç kez tekrarlanmış ve ortalama değerler elde edilmiştir.

2.5. Ti-6Al-4V Tozlarının Oksidasyon Davranışının İncelenmesi

Ti-6Al-4V partiküllerinin oksidasyon davranışını belirlemek amacıyla Perkin Elmer TGA 4000 cihazı ile termogravimetrik analiz (TGA) yapılmıştır.



Şekil 16. Termogravimetrik analiz cihazı.

TGA deneyleri her numune için üç kez tekrarlanmıştır. Partiküllerin görünür yoğunluk değerleri, ASTM B212-21 “Serbest Akışlı Metal Tozlarının Görünür Yoğunluğunun Hall Akış Ölçer Hunisi Kullanılarak Belirlenmesi için Standard Test Yöntemine göre hesaplanmıştır. Görünür yoğunluk deneyleri de üç kez tekrarlanarak deneysel sonuçların güvenilirliği sağlanmıştır.



Şekil 17. Hall akış ölçer hunisi ve düzeneği.

3. TARTIŞMA VE BULGULAR

3.1. Partikül Boyut Dağılımı

Farklı PCA içerikleri ve farklı öğütme süreleri için Ti-6Al-4V partiküllerinin partikül boyutu dağılımı Şekil 1’de gösterilmektedir. %0,5 ağırlıkça PCA ve %1 ağırlıkça PCA ile 30 dakika öğütülen Ti-6Al-4V partiküllerinin partikül boyutu dağılımları incelendiğinde, %0,5 ağırlıkça PCA için tek modlu (unimodal) dağılım elde edilirken, %1 ağırlıkça PCA için çift modlu (bimodal) bir dağılım gözlenmiştir (Şekil 18). Partikül boyutu dağılımlarında gözlenen çift modlu yapı, 30 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen toz kütlesi içerisinde hem iri hem de ince boyutlu pul şeklinde Ti-6Al-4V partiküllerinin bulunmasına bağlanabilir. %2 ağırlıkça PCA içeren ve 30 dakika öğütülen toz kütlesinde de pul şeklinde partiküller bulunmasına rağmen, tek modlu dağılımın nedeni, ince ve iri partikül boyutu değerleri arasındaki farkın, diğer iki gruba (%0,5 ağırlıkça PCA ve %1 ağırlıkça PCA) kıyasla birbirine daha yakın olmasıdır.

30 dakikalık öğütme sonrası ortalama partikül boyutları sırasıyla %0,5 ağırlıkça PCA için 492,7 μm , %1 ağırlıkça PCA için 687,1 μm ve %2 ağırlıkça PCA için 289 μm olarak belirlenmiştir. Üç PCA oranı için de ortalama partikül boyutunun oldukça iri olmasının sebebi, 30 dakikalık öğütmenin talaş formundan partikül formuna dönüşümün ilk aşaması olmasıdır. Elek analizi sonuçlarına göre, %0,5 ağırlıkça PCA ile 30 dakika öğütülen Ti-6Al-4V partiküllerinin %79’u 125 μm üzerinde olup, 40 μm altındaki partiküller toz kütlesinin %10,7’sini oluşturmaktadır. %1 ağırlıkça PCA için bu değerler sırasıyla %88,6 ve %3,4’tür. Bu sonuç, ortalama partikül boyutunun neden %1 ağırlıkça PCA için daha yüksek olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. %2 ağırlıkça PCA ile 30 dakika öğütülen partiküllerin %71,8’i 125 μm üzerinde, %8,5’i ise 40 μm altındadır.

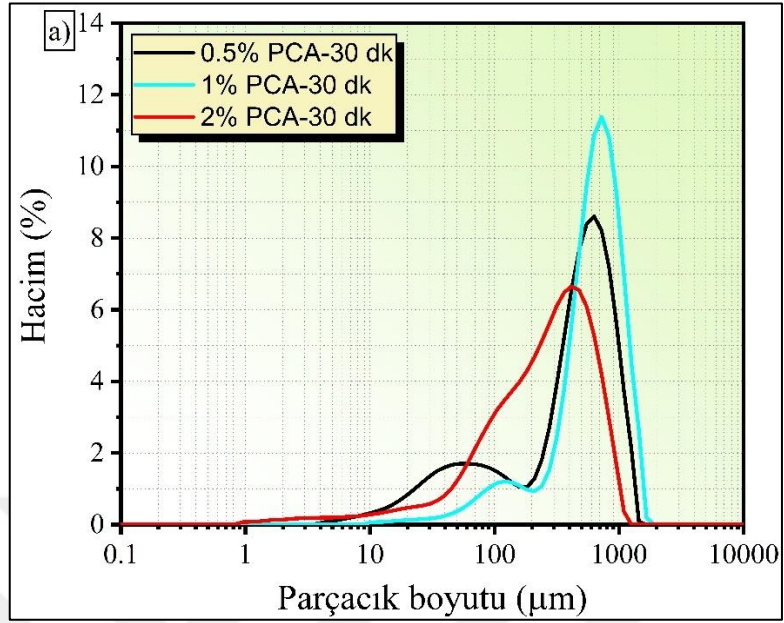
60 dakikalık öğütme sonrası elde edilen partikül boyutu dağılımlarında, %0,5 ağırlıkça PCA ve %1 ağırlıkça PCA için çift modlu dağılımın tek modlu dağılıma dönüştüğü görülmektedir (Şekil 19). 60 dakikalık öğütme sonrası ortalama partikül boyutları, %0,5

ağırlıkça PCA için 129,7 μm , %1 ağırlıkça PCA için 273,8 μm ve %2 ağırlıkça PCA için 117,2 μm olarak bulunmuştur. İnce ve iri partikül boyutu değerleri incelendiğinde, 60 dakika öğütme süresi için en homojen partikül boyutu dağılımının %0,5 ağırlıkça PCA ile elde edildiği görülmektedir. Elek analizi sonuçlarına göre, %0,5 ağırlıkça PCA ile 60 dakika öğütülen partiküllerin %43'ü 125 μm üzerinde, %17,1'i ise 40 μm altındadır. %1 ağırlıkça PCA için bu oranlar %57,1 ve %14,3; %2 ağırlıkça PCA için ise %24,1 ve %36,2'dir. Bu veriler, %2 PCA oranında ortalama partikül boyutunun diğer koşullara göre daha düşük çıkmasının nedenini açık olarak göstermektedir. Tüm PCA gruplarında 60 dakikalık öğütme sonrası geniş partikül boyutu dağılımının nedeni, toz kütlesi içinde hem iri boyutlu hem de ince boyutlu pul şeklinde Ti-6Al-4V partiküllerinin bulunmasıdır.

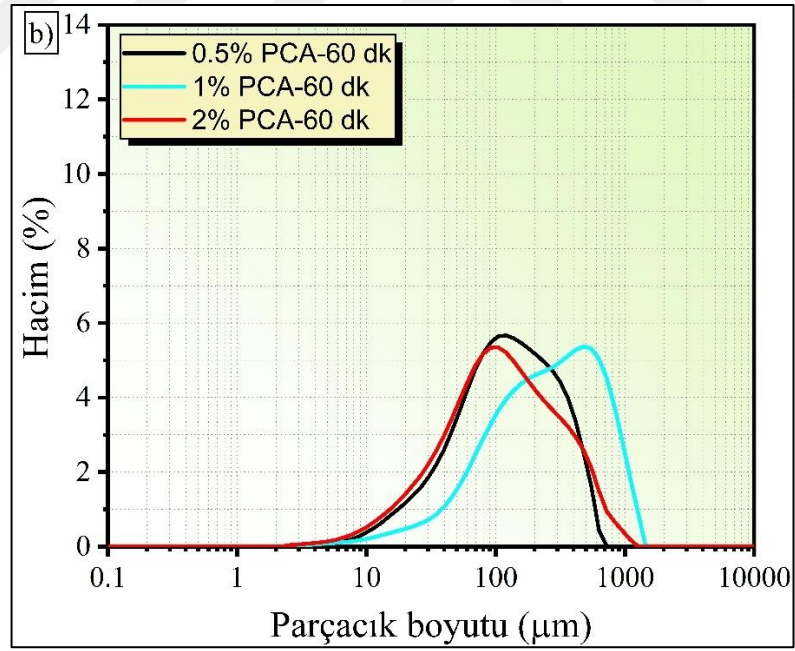
90 dakika öğütme ve %0,5 ağırlıkça PCA ile üretilen tozların partikül boyutu dağılımı incelendiğinde, Şekil 20'de gösterildiği gibi tek modlu ve ideal bir dağılım elde edildiği görülmektedir. %1 ağırlıkça PCA için de benzer bir dağılım elde edilmiş, ancak %0,5 ağırlıkça PCA'ya kıyasla biraz daha geniş bir dağılım gözlenmiştir (Şekil 20). Buna karşın, %2 ağırlıkça PCA ile 60 dakika öğütme sonrasında tek modlu dağılım elde edilirken, 90 dakikalık öğütme sonunda çift modlu dağılıma geri dönüş olduğu tespit edilmiştir (Şekil 20). Bunun nedeni, iri boyutlu pul şeklindeki Ti-6Al-4V partiküllerinin soğuk kaynak (cold welding) yapmasıdır.

90 dakikalık öğütme sonrası ortalama partikül boyutları sırasıyla %0,5 ağırlıkça PCA için 66,8 μm , %1 ağırlıkça PCA için 90,7 μm ve %2 ağırlıkça PCA için 190,8 μm olarak belirlenmiştir. Yapılan elek analizi, partikül boyutundaki azalmayı açıkça göstermektedir. Buna göre, %0,5 ağırlıkça PCA ile 90 dakika öğütülen partiküllerin %7,8'i 125 μm üzerinde, %23,6'sı ise 40 μm altındadır. %1 ağırlıkça PCA için bu oranlar %25,6 ve %26,1; %2 ağırlıkça PCA için ise %47,5 ve %23,1 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, ortalama partikül boyutunun %2 ağırlıkça PCA için neden daha düşük olduğunu ve aynı zamanda soğuk kaynak oluşumunu kanıtlamaktadır.

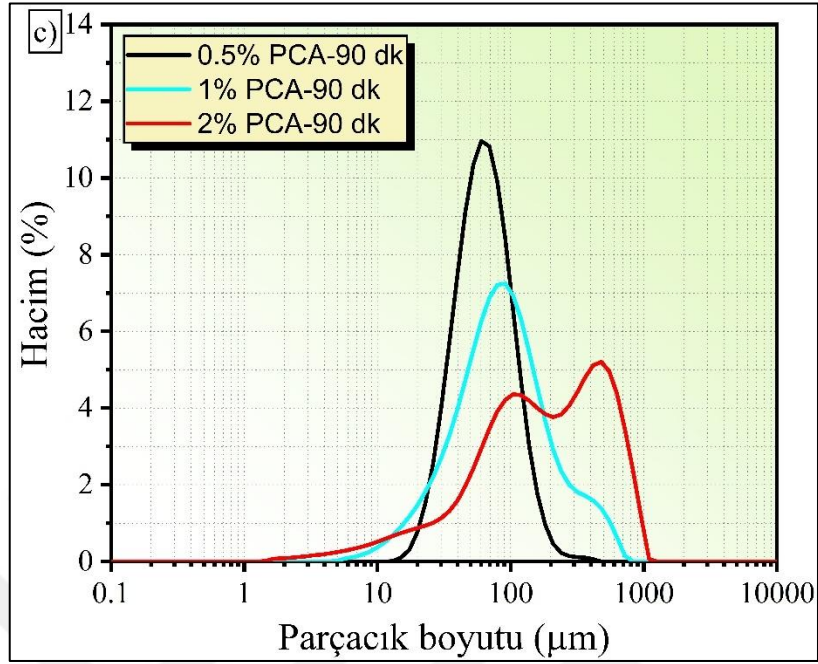
120 dakika öğütme sonrasında, %0,5 ağırlıkça PCA ile yapılan öğütmede partikül boyutu ve dağılımında önemli bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 21). %0,5 PCA oranında 90–120 dakikalık öğütme süresinde soğuk kaynak oluşumunun etkili olması, bu durumun temel nedeni olarak gösterilebilir. Bu süre aralığı, toz oluşum süreci şeklinde tanımlanabilir.



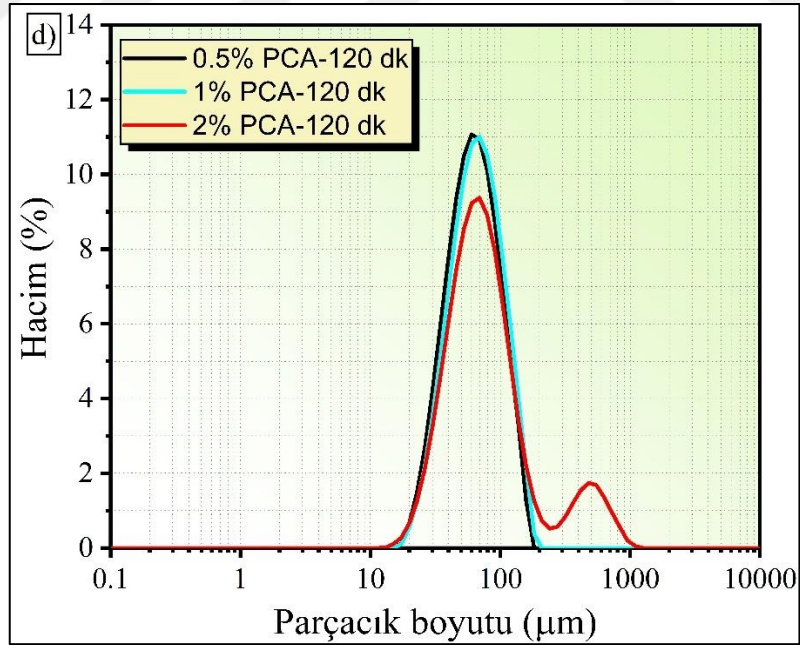
Şekil 18. %0,5, %1 ve %2 PCA ile 30 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.



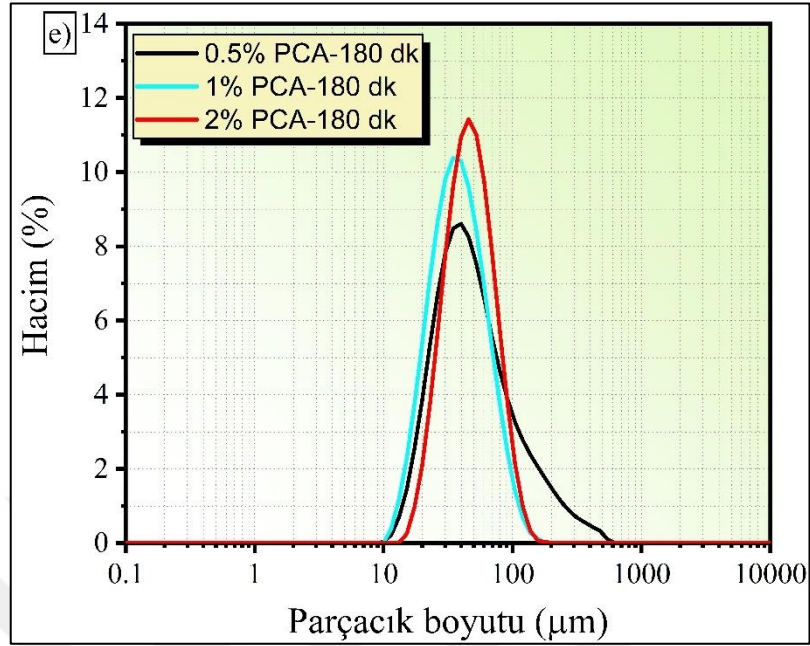
Şekil 19. %0,5, %1 ve %2 PCA ile 60 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.



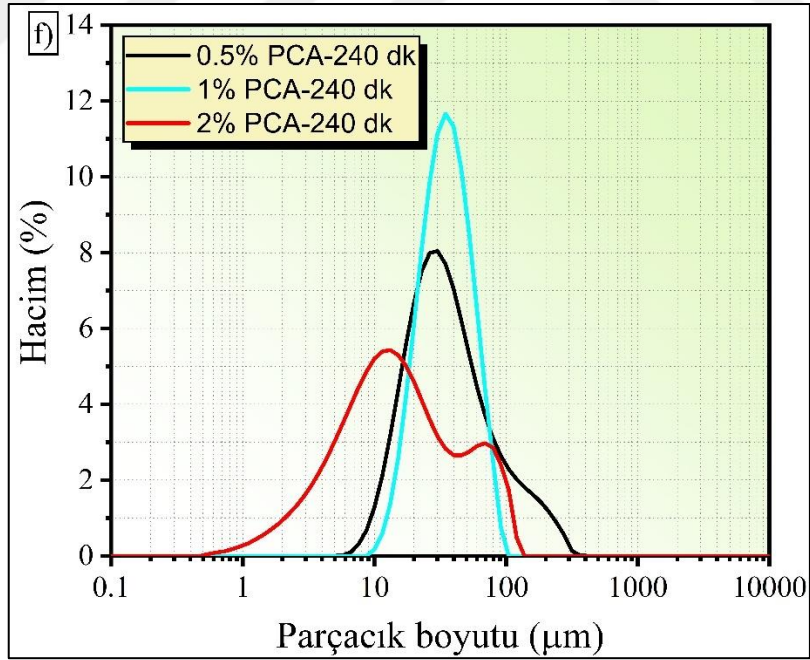
Şekil 20. %0,5, %1 ve %2 PCA ile 90 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.



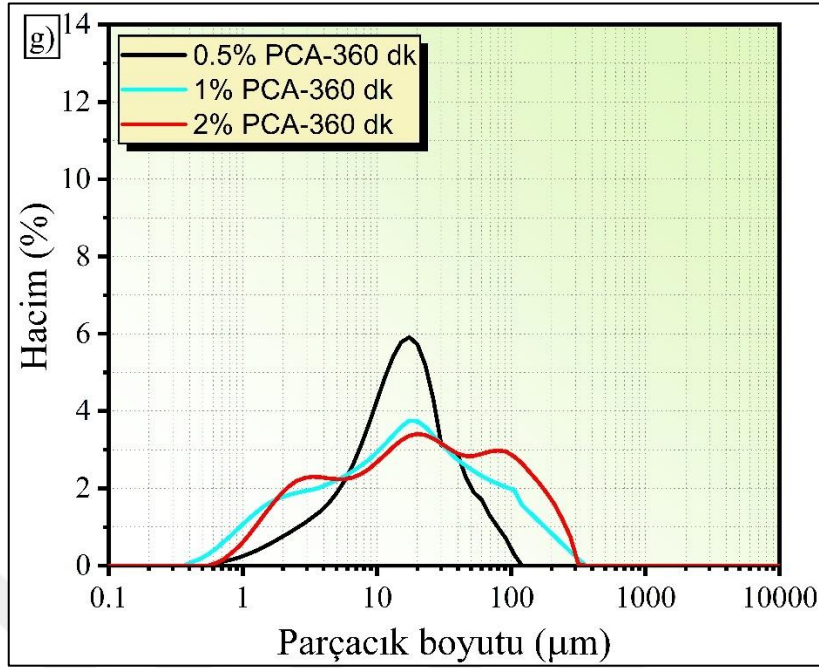
Şekil 21. %0,5, %1 ve %2 PCA ile 120 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 22. %0,5, %1 ve %2 PCA ile 180 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 23. %0,5, %1 ve %2 PCA ile 240 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 24. %0,5, %1 ve %2 PCA ile 360 dakikalık öğütme sonunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin boyut dağılımlarını göstermektedir.

Bu durumun nedeni, özellikle bu zaman aralığında küresel Ti-6Al-4V partiküllerinin gözlemlenmesidir. Şekil 18'de 120 dk (d) kısmında görüldüğü üzere, %1 ağırlıkça PCA ile 120 dakika öğütme sonucunda elde edilen Ti-6Al-4V partiküllerinin partikül boyutu dağılımı oldukça homojendir. Elde edilen bulgular, pul şeklindeki partiküllerin azalmasına ve Ti-6Al-4V tozlarının yarı küresel ile küresel forma dönüşmesine bağlanabilir. Şekil 18d'de görüldüğü gibi, %2 PCA katkısıyla yapılan öğütmede 120 dakika sonunda çift modlu partikül boyutu dağılımı hâlen gözlenmektedir. Ancak bu dağılım, 90 dakikalık öğütmede olduğu gibi soğuk kaynaktan değil, kırılma etkisinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, soğuk kaynak sonrası oluşan kırılmaların, toz kütlelerinde heterojen partikül boyutu dağılımlarına neden olabileceği de dikkate alınmalıdır.

120 dakikalık öğütme sonrası ortalama partikül boyutları, sırasıyla %0,5 ağırlıkça PCA için 65,9 μm , %1 ağırlıkça PCA için 70 μm ve %2 ağırlıkça PCA için 76 μm olarak belirlenmiştir. %2 ağırlıkça PCA ile 120 dakika öğütme sonrası geniş partikül boyutu dağılımının nedeni, toz kütlelerinde hem iri yarı küresel Ti-6Al-4V partiküllerinin hem de ince, düzensiz ve yarı küresel Ti-6Al-4V partiküllerinin bulunmasıdır. Elek analizi sonuçlarına göre, %0,5 ağırlıkça PCA ile 120 dakika öğütülen Ti-6Al-4V partiküllerinin

%4,2'si 125 μm üzerinde, %26,5'i ise 40 μm altındadır. %1 ağırlıkça PCA için bu oranlar sırasıyla %4,2 ve %29,8; %2 ağırlıkça PCA için ise %8,3 ve %27,2'dir.

180 dakika öğütme sonrası ortalama partikül boyutları, %0,5 ağırlıkça PCA için 49 μm , %1 ağırlıkça PCA için 40,3 μm ve %2 ağırlıkça PCA için 50,9 μm olarak ölçülmüştür. Boyut küçülmesi, kırılma işleminin etkinliğini koruyarak devam ettiğinin bir göstergesidir. Şekil 22'de görüldüğü üzere, %0,5 ağırlıkça PCA içeren öğütmede yarı küresel ve iri partiküllerin varlığı nedeniyle partikül boyutu dağılımı daha geniştir. 30 dakikalık öğütme sonunda elde edilen partikül boyutu ile 180 dakikalık öğütme sonunda elde edilen partikül boyutu karşılaştırıldığında, %0,5 ağırlıkça PCA, %1 ağırlıkça PCA ve %2 ağırlıkça PCA için ortalama partikül boyutlarının sırasıyla 10,1 kat, 17 kat ve 5,7 kat küçüldüğü görülmektedir. 180 dakika sonunda, %1 ağırlıkça PCA ve %2 ağırlıkça PCA içeren öğütmelerden elde edilen partikül boyutu dağılımları oldukça iyi olup (Şekil 22), bu durum toz kütlesinde homojen toz boyutunun bulunmasına bağlanabilir. Elek analizi sonuçlarına göre, %0,5 ağırlıkça PCA ile 180 dakika öğütülen partiküllerin %0,31'i 125 μm üzerinde, %76'sı ise 40 μm altındadır. %1 ağırlıkça PCA için bu değerler %5,3 ve %74,8; %2 ağırlıkça PCA için ise %7,1 ve %48,9'dur.

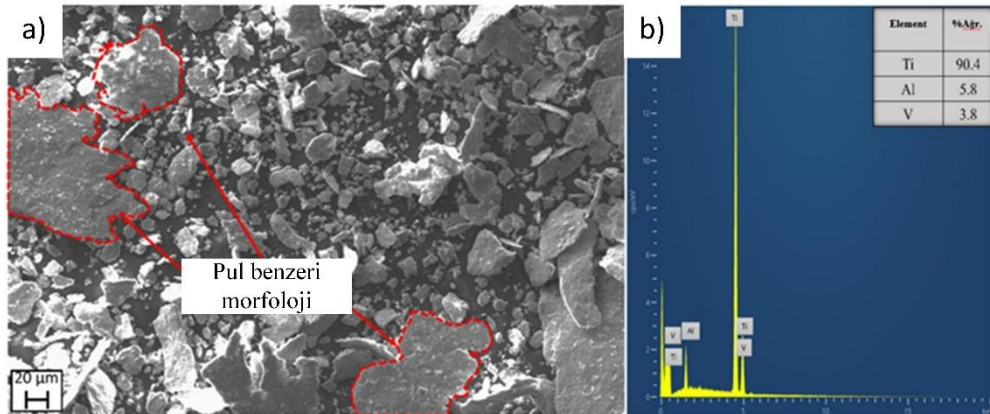
240 dakika öğütme sonrası ortalama partikül boyutları, %0,5 ağırlıkça PCA için 36 μm , %1 ağırlıkça PCA için 37 μm ve %2 ağırlıkça PCA için 15 μm olarak bulunmuştur. Ancak, %0,5 ağırlıkça PCA içeren öğütmede 240 dakika sonunda elde edilen partikül boyutu dağılımı çift modlu (Şekil 23) olmuştur. Çift modlu yapı, ortalama partikül boyutu yaklaşık 15 mikron olmasına rağmen, %2 PCA grubunda iri partiküllerin bulunmasıyla açıklanabilir. Bu sonuç, elek analizi verileriyle de teyit edilmektedir. Elek analizi sonuçlarına göre, %0,5 ağırlıkça PCA ile 240 dakika öğütülen partiküllerin %0,06'sı 125 μm üzerinde, %93,6'sı ise 40 μm altındadır. %1 ağırlıkça PCA için bu oranlar %0,13 ve %87,9; %2 ağırlıkça PCA için ise %1,4 ve %78,4'tür.

360 dakika öğütme sonrası ortalama partikül boyutları, %0,5 ağırlıkça PCA için 20 μm , %1 ağırlıkça PCA için 18,1 μm ve %2 ağırlıkça PCA için 21,8 μm olarak belirlenmiştir. 30 dakika öğütme sonunda elde edilen partikül boyutu ile 360 dakika sonunda elde edilen partikül boyutu karşılaştırıldığında, %0,5 ağırlıkça PCA, %1 ağırlıkça PCA ve %2 ağırlıkça PCA için ortalama partikül boyutlarının sırasıyla 24,6 kat, 38 kat ve 13,3 kat küçüldüğü görülmektedir. Bu sonuçlar, mekanik öğütme yönteminin milimetre boyutundaki atıkları kısa sürede mikron boyutundaki tozlara dönüştürme yeteneğini açıkça ortaya koymaktadır.

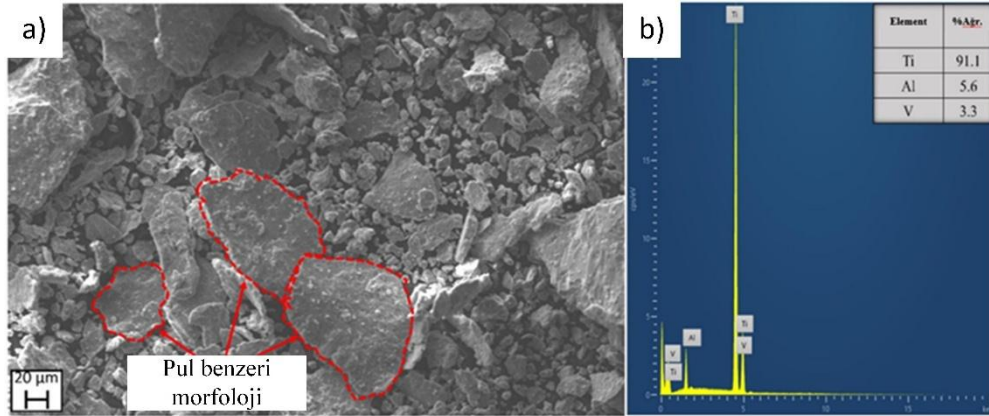
Şekil 24 incelendiğinde, tüm PCA grupları için partikül boyutu dağılımlarının geniş olduğu görülmektedir. Bu olgu, Ti-6Al-4V partikülleri arasında süren soğuk kaynak oluşumuna bağlanabileceği gibi, küçük boyutlu tozların aglomerasyon eğiliminin de dağılımı genişlettiği anlaşılmaktadır.

3.2. Morfoloji ve EDS Analizi

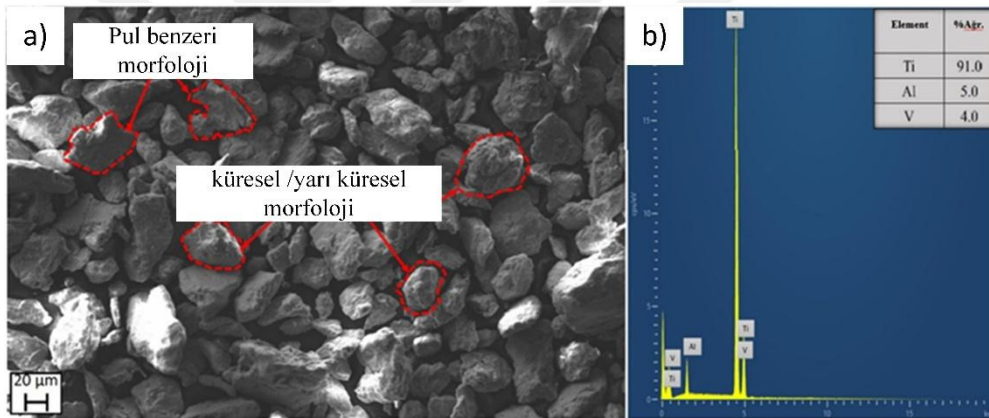
Farklı PCA (metanol) katkı oranları ve değişen öğütme sürelerinde elde edilen Ti-6Al-4V tozlarının SEM görüntüleri Şekil 25-Şekil 45 arasında gösterilmektedir. Şekil 25a'da görüldüğü üzere, 30 dakika ve %0,5 ağırlıkça PCA ile üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfolojisi pul şeklindedir. Toz kütesinde, iri ve ince boyutlu olmak üzere pul şeklinde morfolojiye sahip partiküller bulunmaktadır. 0,5 saatlik öğütme süresinin başlangıç aşamasında elde edilen pul morfolojisi, %0,5 PCA'nın bilya-toz-bilya ve bilya-toz-hazne çarpışmalarından kaynaklanan deformasyon mekanizmasını etkin şekilde desteklediğini ortaya koymaktadır. Morfolojik dönüşümün yanı sıra, Şekil 25a'da gözlenen bir diğer önemli sonuç, kırılma ve dolayısıyla partikül boyutunun küçülmesidir. Şekil 25b incelendiğinde, EDS spektrum grafiğinde Ti, Al ve V dışında herhangi farklı bir elementin bulunmadığı görülmektedir. EDS spektrum grafikleri karşılaştırıldığında, desenlerin literatürdeki çalışmalarla benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir (Adesina & Popoola, 2017).



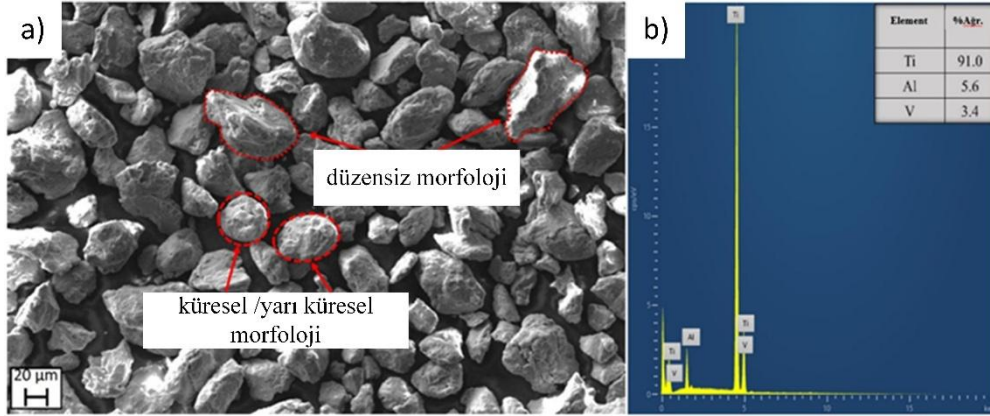
Şekil 25. Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 30 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



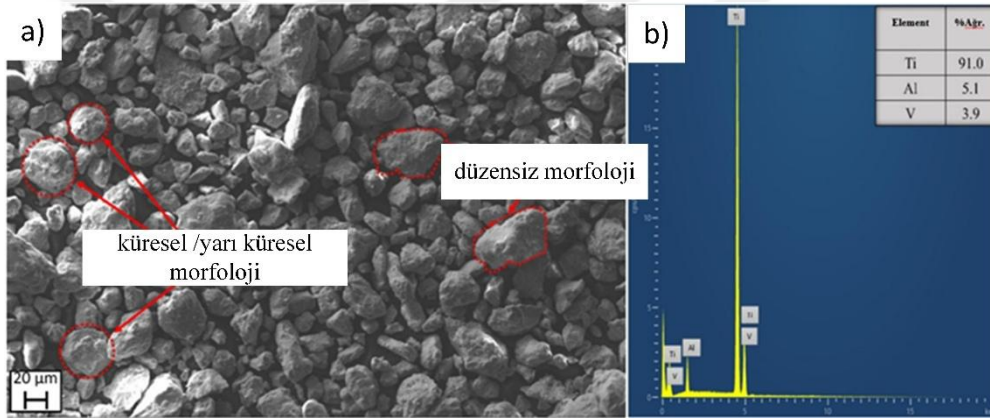
Şekil 26. Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 60 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



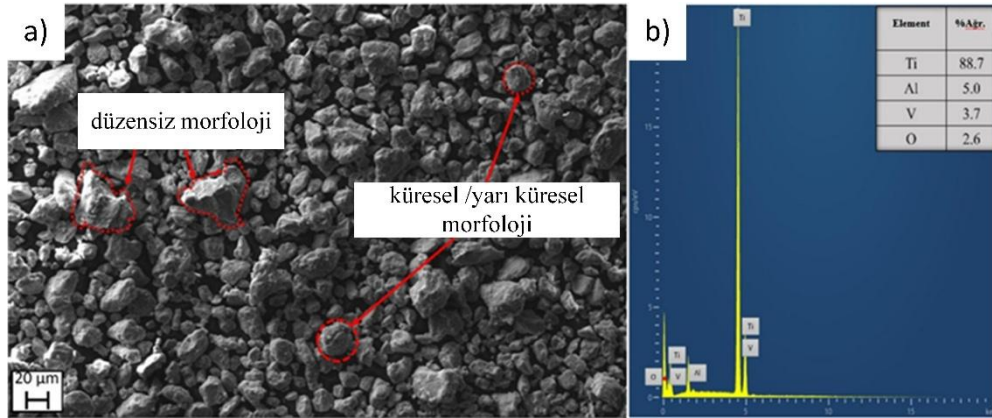
Şekil 27. Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 90 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



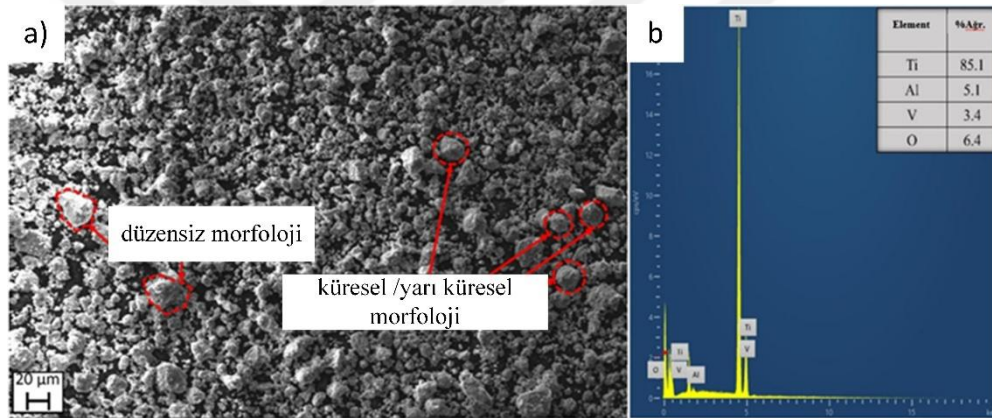
Şekil 28. Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 120 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



Şekil 29. Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 180 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



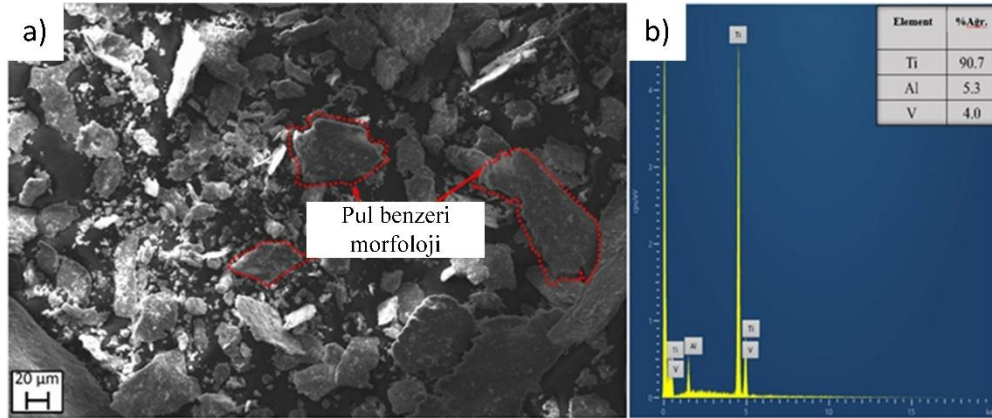
Şekil 30. Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 240 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



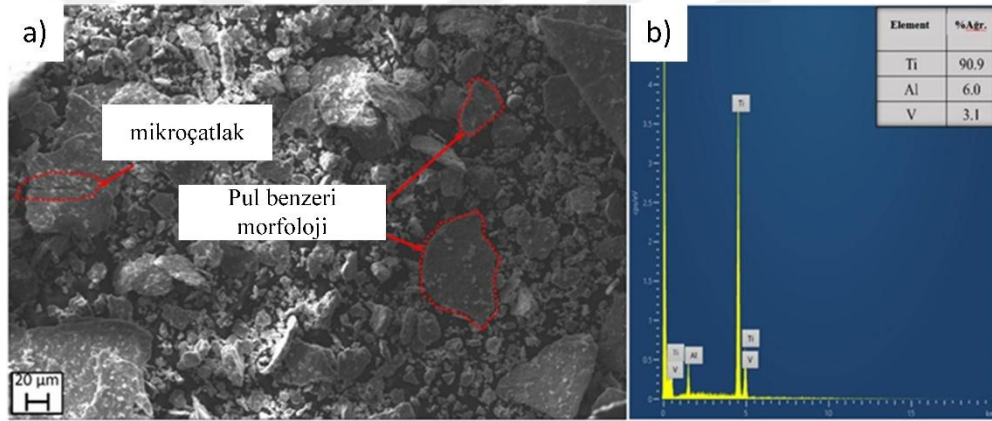
Şekil 31. Farklı sürelerde %0,5 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 360 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.

Bununla birlikte, öğütme süresi arttıkça deformasyonun artmasına bağlı olarak daha fazla partikül kırılacaktır. Bir diğer önemli sonuç, morfoloji görüntülerinde de görüldüğü üzere (Şekil 25a ve Şekil 26a), sürekli deformasyon etkisi altında iri pul ve ince pul şeklindeki partiküller arasındaki boyut farkının azalmasıdır. Şekil 26Şekil 26b, incelenen yapının oksit gibi ilave bileşenler barındırmadığını açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 27a'da görüldüğü üzere, daha uzun öğütme süresi ile pul şeklindeki Ti-6Al-4V partikülleri kırılmaya başlamış ve 90 dakikalık öğütme sonunda kırılmış partiküller arasında meydana gelen soğuk kaynak sonucunda yarı küresel morfolojiye sahip partiküller oluşmuştur. Bilindiği üzere, soğuk kaynak işlemi, deformasyon sonucu oluşan pul şeklindeki morfolojiden sonra gelen ikinci aşamadır. Ti-6Al-4V partiküllerinin morfolojisinin ortaya

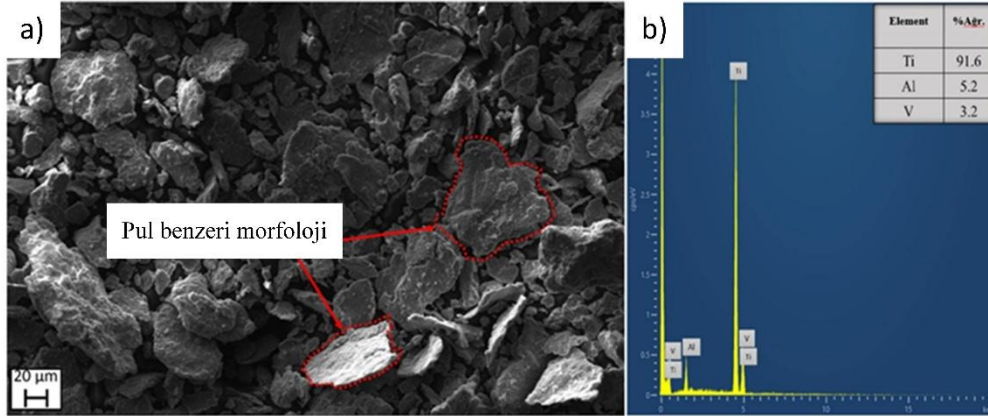
koyduğu bu sonuç, %0,5 ağırlıkça PCA'nın mekanik öğütme sistematığı ile uyumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir. Şekil 20'den elde edilen bir diğer önemli sonuç ise, 90 dakikalık öğütme sonrasında toz kütlesi içerisinde hâlâ pul şeklindeki Ti-6Al-4V partiküllerinin bulunmasıdır. Bu aşamada, pul şeklinden yarı küresel morfolojiye geçiş sonucunda Ti-6Al-4V partiküllerinin boyutu küçülmektedir. Elementel yapı açısından incelendiğinde, 90 dakikalık öğütme sonrasında da önceki deneylerde olduğu gibi herhangi bir artık element bulunmamaktadır (Şekil 27b). Öğütme süresi 120 dakikaya ulaştığında, morfoloji incelemeleri Ti-6Al-4V partikülleri arasında soğuk kaynağın devam ettiğini ve toz kütlesinde pul formundaki partiküllerin gözlenmediğini göstermektedir (Şekil 28a). Bu aşamada, öğütme süresindeki artışa rağmen soğuk kaynağın devam etmesinde PCA miktarının önemli bir etkisi olduğu belirtilmelidir. Bu araştırmalardan elde edilen yenilikçi sonuçlardan biri, PCA'nın etkinliğini kaybetmesiyle birlikte soğuk kaynak işleminin hemen aktif hâle gelmesidir. %0,5 ağırlıkça PCA için etkinliğin kaybolma süresi, 90 dakikalık öğütme olarak belirlenmiştir. 180 dakikalık öğütme sonrasında üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfolojileri incelendiğinde, 120 dakikalık öğütme sonrasında kırılma işleminin yeniden başladığı ve 180 dakikalık öğütme sonunda ince yarı küresel Ti-6Al-4V partiküllerinin elde edildiği görülmektedir (Şekil 29a). Elde edilen bu sonuç, araştırmanın ikinci yenilikçi katkısını temsil etmekte olup, %0,5 PCA ile öğütülmüş Ti-6Al-4V partiküllerinde kritik şekil sertleşme süresinin 120 dakika olduğunu kanıtlamaktadır. Şekil 29a'da görüldüğü üzere, toz kütlesi içerisinde düzensiz morfolojiye sahip az sayıda iri Ti-6Al-4V partikülü bulunmaktadır. İri partiküller, ince ve iri Ti-6Al-4V tozları arasındaki boyut aralığını olumsuz biçimde etkilemektedir. Şekil 30a'da görüldüğü üzere, 240 dakikalık öğütme sonunda oluşan partiküllerin morfolojisi ağırlıklı olarak küresel ve yarı küresel iken, düzensiz yapılı iri partiküllerin miktarı 180 dakikalık sürece göre daha azdır. 360 dakikalık öğütme sonunda ise ince boyutlu küresel ve yarı küresel partiküller üretilmiştir (Şekil 31a). Bununla birlikte, 240 dakika (Şekil 30b) ve 360 dakika (Şekil 31b) sonuçları incelendiğinde, hazne içerisindeki çarpışma ve sürtünmenin oluşturduğu ısının oksitleyici bir atmosfer meydana getirdiği net biçimde gözlenmektedir.



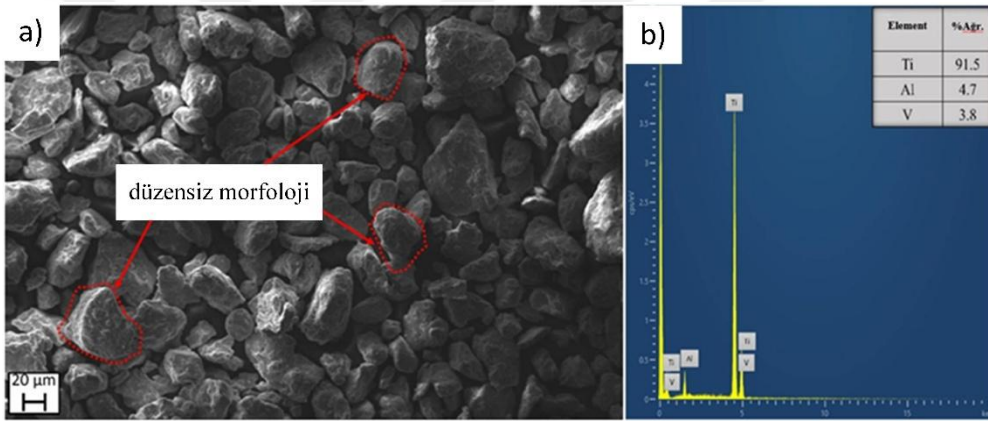
Şekil 32. Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 30 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



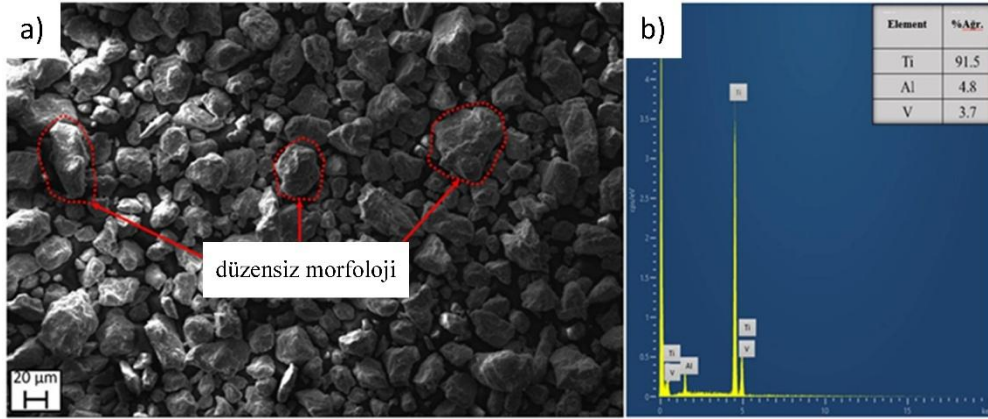
Şekil 33. Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 60 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



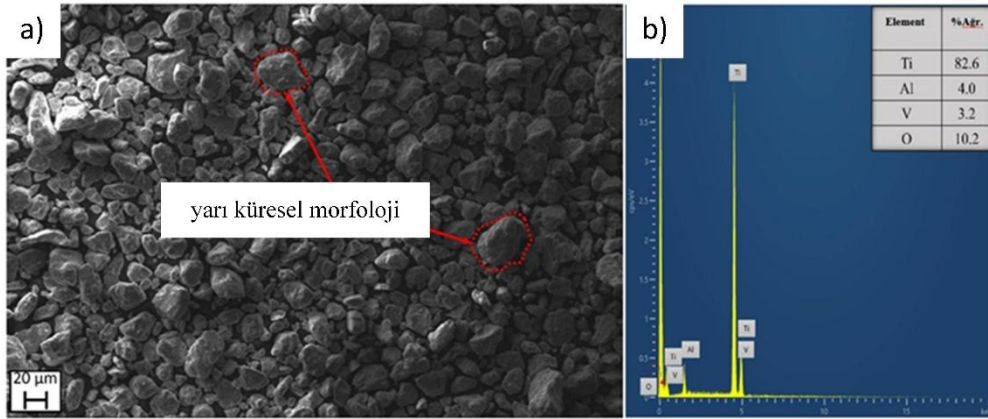
Şekil 34. Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 90 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



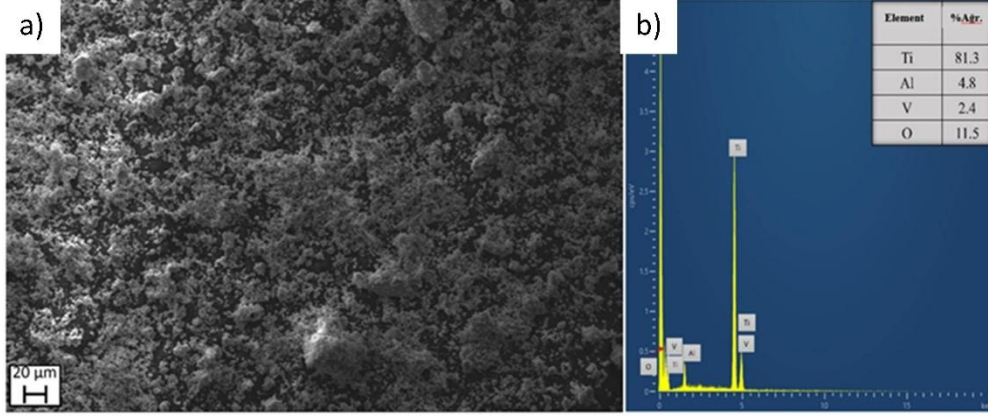
Şekil 35. Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 120 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



Şekil 36. Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 180 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



Şekil 37. Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 240 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



Şekil 38. Farklı sürelerde %1 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 360 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.

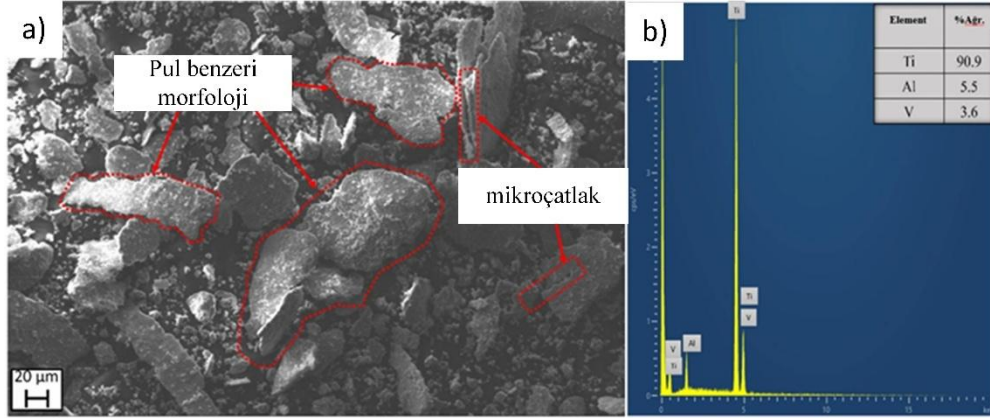
Şekil 32-Şekil 38, %1 ağırlıkça PCA ile farklı öğütme süreleri için üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin SEM görüntülerini ve EDS spektrum analizlerini göstermektedir. %0,5 ağırlıkça PCA ve %1 ağırlıkça PCA içeren mekanik öğütme süreçlerinde gözlemlenen morfolojik evrimin oldukça benzer olduğu belirtilmelidir. PCA oranındaki farklılık, pul formundaki morfolojinin gözlemlendiği deformasyon evresinin süresini, iri ve yarı küresel partiküllerle tanımlanan soğuk kaynak evresini ve küresel-yarı küresel morfolojiye sahip kırılma evresini değiştirerek mekanik öğütme sürecine doğrudan etki etmektedir. Şekil 25a ve Şekil 26a ile Şekil 32a, Şekil 33a ve Şekil 34a karşılaştırıldığında, %1 ağırlıkça PCA ile öğütme sonucu elde edilen pul şeklindeki Ti-6Al-4V partiküllerinin boyutunun, %0,5 ağırlıkça PCA ile elde edilenlere kıyasla daha büyük olduğu görülmektedir.

%0,5 ağırlıkça PCA ile 90 dakikalık öğütme sonrası morfoloji incelemeleri, soğuk kaynak işleminin baskın olduğunu göstermektedir (Şekil 27Şekil 27a). 90 dakikalık öğütme sonrasında, %1 PCA ile elde edilen morfoloji sonuçları, pul biçimli yapıyı destekleyen deformasyon mekanizmasının sürece hâkim olduğunu açıkça göstermektedir (Şekil 34a). Bu nedenle, %1 ağırlıkça PCA ve 120 dakikalık öğütme ile daha iri partikül boyutu elde edilmektedir (Zhang et al., 1999). Bu durum, PCA olarak kullanılan katkı malzemesinin öğütme haznesi içinde ve partikül yüzeylerinde koruyucu bir tabaka oluşturması, sürtünmeyi azaltması, soğuk kaynak oluşumunu engellemesi ve buna bağlı olarak deformasyonun gerçekleşmesi için gerekli süreyi artırması ile ilgilidir (Chen et al., 2010).

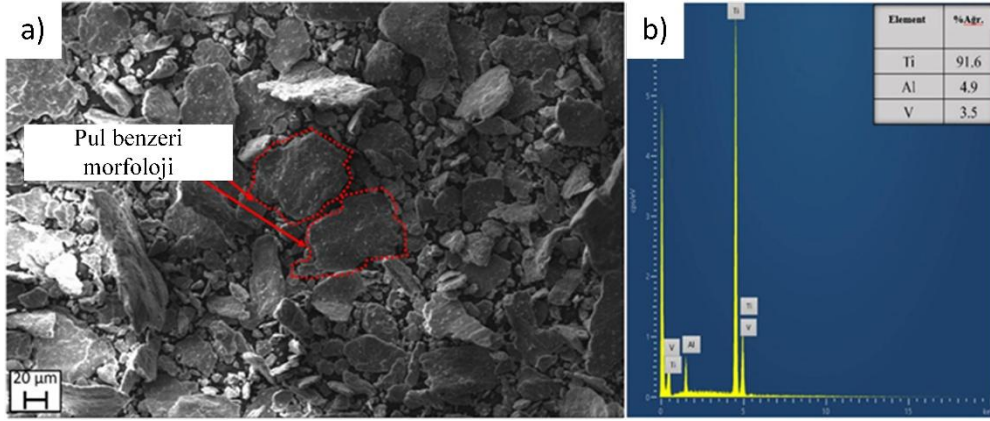
120 ile 240 dakika arasında soğuk kaynak işleminin baskın olduğu ve Ti-6Al-4V partiküllerinin boyutunun azaldığı görülmektedir (Şekil 36a-Şekil 37a). Şekil 35a-Şekil

37a'da görüldüğü üzere, soğuk kaynak esnasında partikül boyutunun azalması, küçük partiküllerin kırıldıktan sonra soğuk kaynak ile birleşmesine bağlanabilir. Öğütme süresi 120 dakikadan 240 dakikaya yükseldiğinde, partiküllerin daha küresel bir morfoloji kazandığı gözlenmektedir. Bu sonuç, soğuk kaynak başlangıcından kritik şekil sertleşme süresine kadar bilya-toz-bilya çarpışmalarının partiküllerin küreselleşmesi üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. %1 ağırlıkça PCA ile öğütülen Ti-6Al-4V partikülleri için kritik şekil sertleşme süresinin 240 dakika olduğu belirtilmelidir.

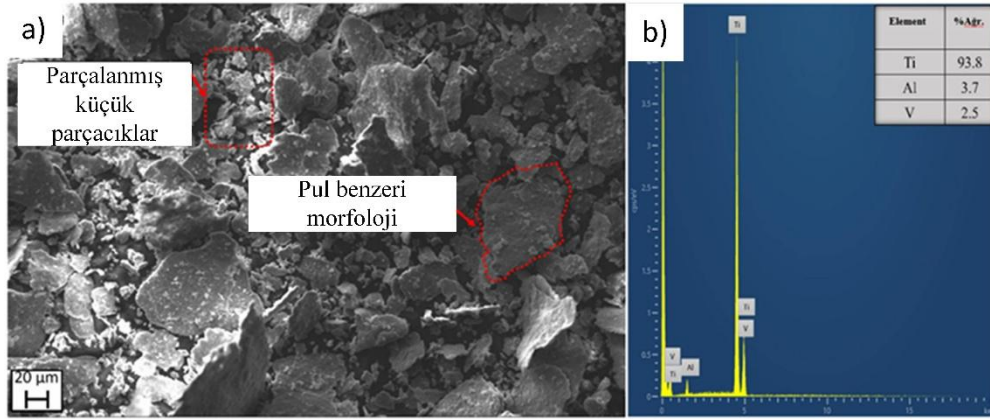
360 dakikalık öğütme sonrasında, kırılma işleminin yeniden aktif hale geldiği ve ince Ti-6Al-4V partiküllerinin elde edildiği görülmektedir. EDS sonuçlarına göre, Ti-6Al-4V partiküllerinde 240 dakikaya kadar herhangi bir oksijen saptanmamış, fakat 240 ve 360 dakikalık öğütme sürelerinin ardından oksijen varlığı belirlenmiştir (Şekil 32b–Şekil 38b).



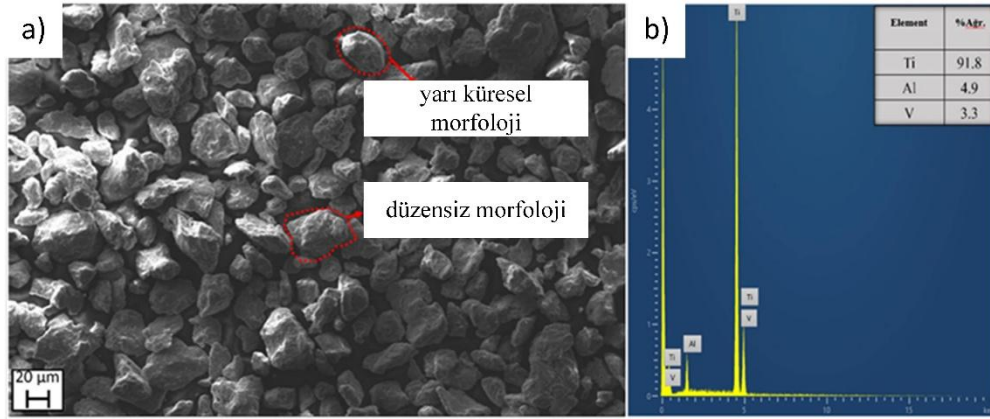
Şekil 39. Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 30 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



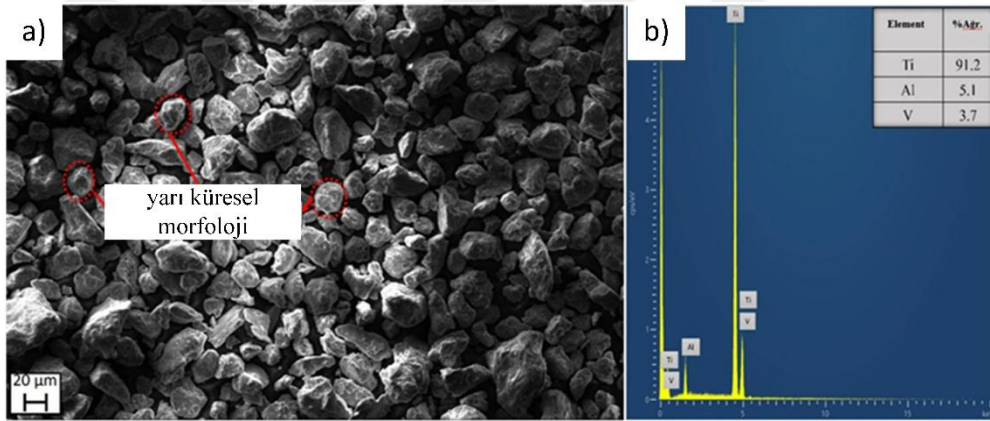
Şekil 40. Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 60 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



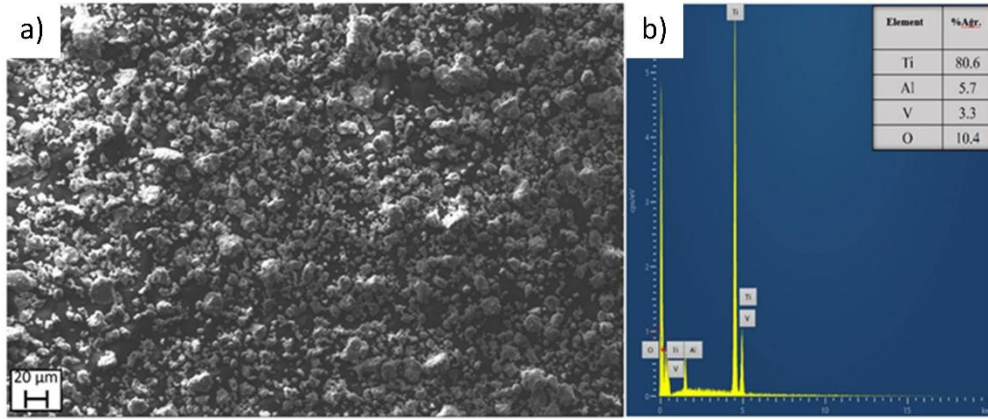
Şekil 41. Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 90 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



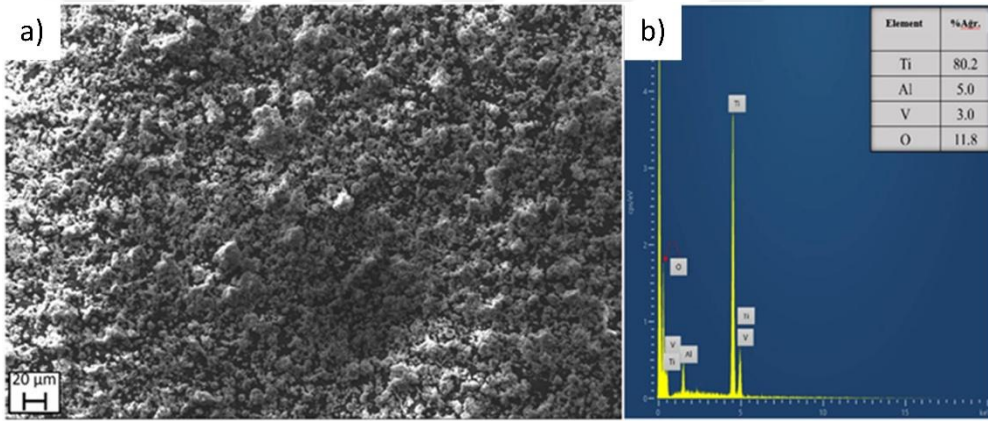
Şekil 42. Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 120 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



Şekil 43. Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 180 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



Şekil 44. Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 240 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.



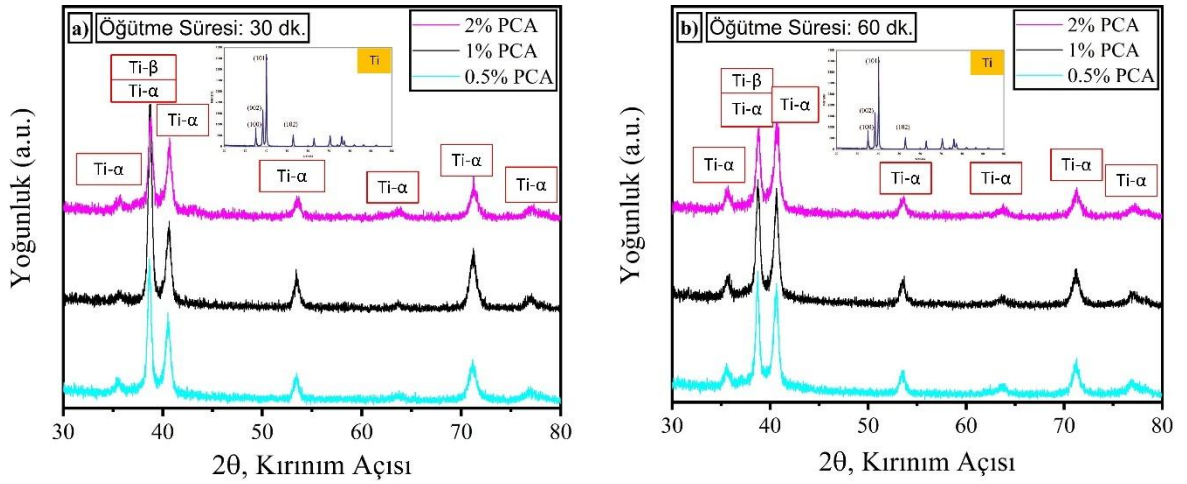
Şekil 45. Farklı sürelerde %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin morfoloji görüntüleri ve EDS spektrumları incelenmiştir. 360 dakikalık öğütme sonucunda elde edilen veriler; a) SEM mikro yapısı, b) EDS spektrum grafiği olarak sunulmaktadır.

%2 ağırlıkça PCA ile elde edilen morfolojiler, diğer PCA miktarları kullanılarak elde edilen morfolojilere benzerlik göstermektedir. Morfolojik dönüşüm süreci, küresel morfolojilerle başlamakta, yarı küresel ve küresel morfolojiler ile devam etmekte ve son öğütme aşamasında ince ve küresel Ti-6Al-4V partiküllerinin sentezi ile sona ermektedir. Şekil 39a–Şekil 41a, bilya-toz-bilya ve bilya-toz-hazne çarpışmalarını içeren deformasyon mekanizması sonucu oluşan pul şeklindeki Ti-6Al-4V partiküllerini göstermektedir. Pul formundaki Ti-6Al-4V partiküllerinin Şekil 41a’da sunulan morfolojisi, bu tozların kendi aralarında soğuk kaynak ile kaynaşarak birleştiğini göstermektedir. Bunun nedeni, yüksek miktarda PCA nedeniyle kırılmayı tetikleyecek deformasyona kıyasla, öğütmenin erken aşamalarında soğuk kaynağın daha kolay gerçekleşmesidir. Sonuç olarak, %2 PCA oranıyla

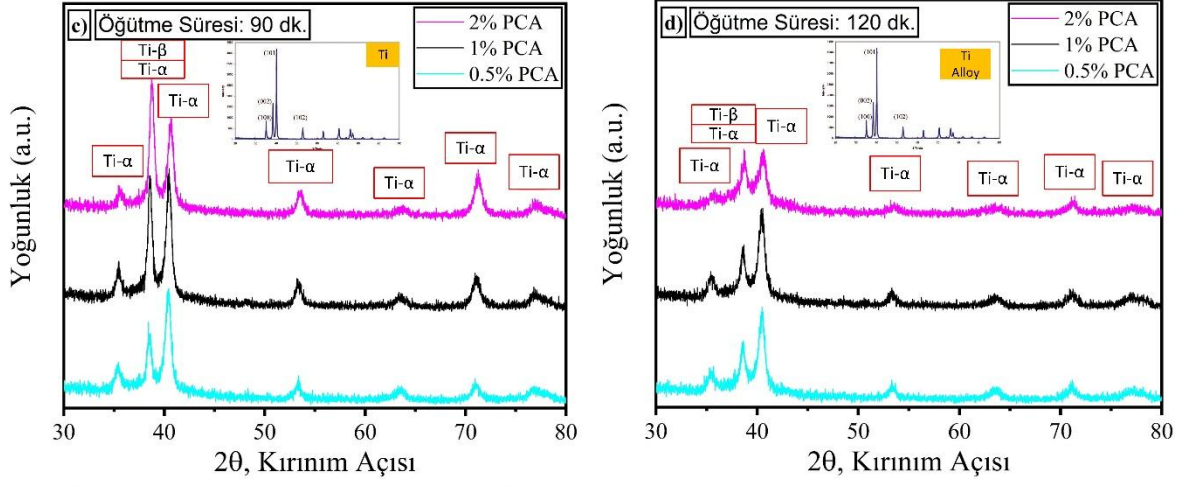
gerçekleştirilen öğütme sürecinde 90 dakikanın ardından partikül boyutunda artışın görülmesi normal ve kabul edilebilir bir durumdur. Öğütme işlemi 90 dakikaya ulaştığında, kırılma ve soğuk kaynak süreçleri devreye girmiş ve ortaya çıkan Ti-6Al-4V partikülleri yarı küresel ve küresel morfoloji kazanmıştır (Şekil 42a). Bu süreç, 180. dakikanın sonuna kadar devam etmiştir (Şekil 43a). Şekil 44a, %2 ağırlıkça PCA ile öğütülen Ti-6Al-4V partikülleri için 180 dakikalık öğütme süresinin kritik şekil sertleşme zamanı olduğunu göstermektedir. 180 dakikalık öğütme sonrasında, kırılma sürecinin yeniden aktif hâle geldiği ve ince Ti-6Al-4V partiküllerinin üretildiği gözlenmiştir.

3.3. XRD Analizi

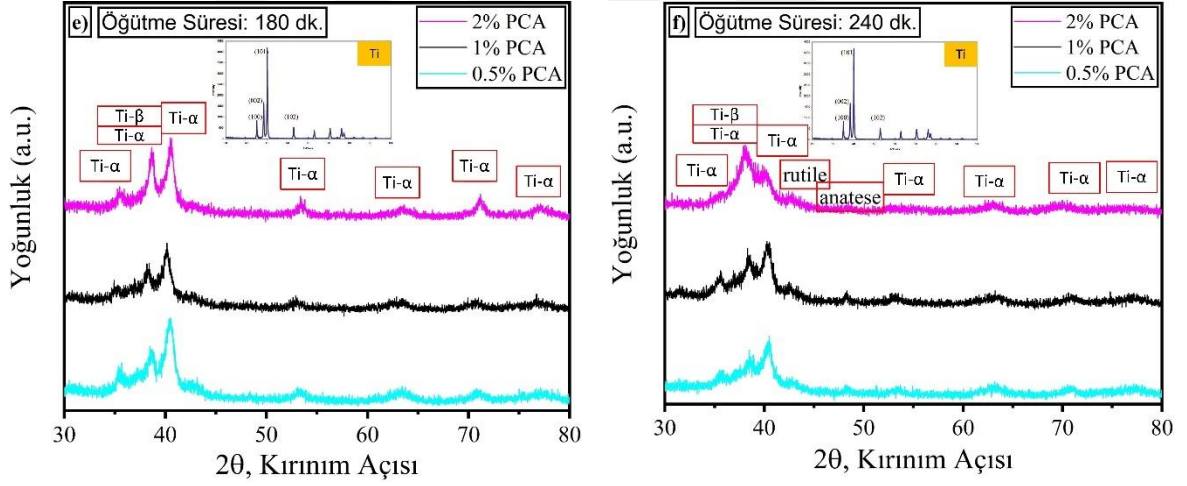
Her bir numunenin XRD eğrileri, öğütme süresi ve PCA içeriğinin Ti-6Al-4V partiküllerinin faz özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla incelenmiştir. Buna göre, öğütme süresi ve PCA oranının etkisini değerlendirmek için XRD desenleri Şekil 46-Şekil 49'te verilmiştir.



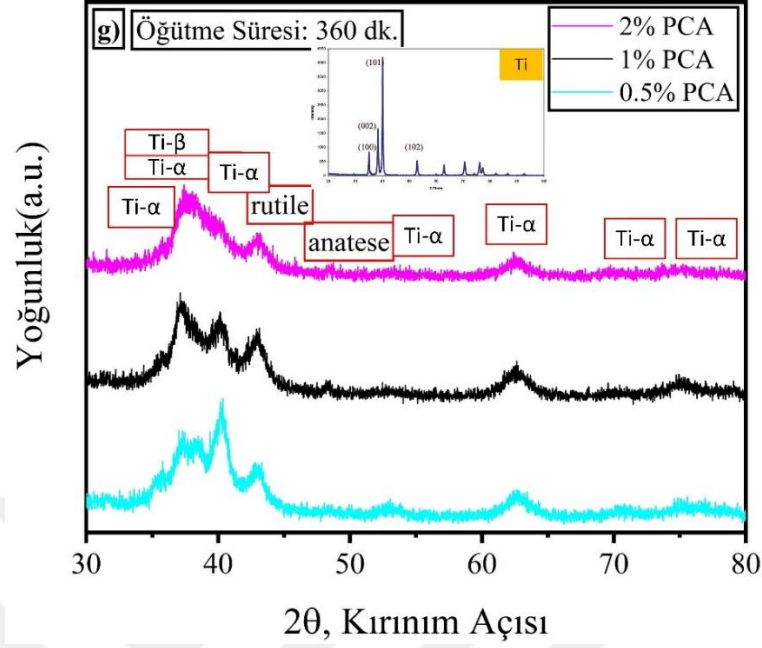
Şekil 46. Farklı öğütme sürelerinde %0,5, %1 ve %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin XRD desenleri ve Titanyuma ait XRD deseni. Buna göre, 30 dakika için desen (a), 60 dakika için desen (b).



Şekil 47. Farklı öğütme sürelerinde %0,5, %1 ve %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin XRD desenleri ve Titanyuma ait XRD deseni. 90 dakika için desen (c), 120 dakika için desen (d).



Şekil 48. Farklı öğütme sürelerinde %0,5, %1 ve %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin XRD desenleri ve Titanyuma ait XRD deseni. 180 dakika için desen (e), 240 dakika için desen (f).



Şekil 49. Farklı öğütme sürelerinde %0,5, %1 ve %2 PCA katkısıyla üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin XRD desenleri ve Titanyuma ait XRD deseni. Buna göre, 360 dakika için desen (g).

Genel olarak desenler incelendiğinde, PCA miktarındaki artışla birlikte tüm partikül örneklerinde tepelerin genişlediği görülmektedir. Deformasyon, kırılma, ara-difüzyon mekanizmaları ve soğuk kaynak, öğütülen Ti-6Al-4V partiküllerinin kristalit yapısını etkilemektedir. Öğütme sürecinde, soğuk kaynak mekanizmasının ardından kırılma mekanizmasının baskın hâle gelmesi, yeni kırılmış partiküllerin oluşumuna neden olacağından, yüzeyler sürekli olarak birbiriyle temas hâlinde bulunur. Bu sonuç, öğütme esnasında partikül bütünlüğünde yer alan elementlerin daha kolay difüze olmasına olanak sağlamaktadır (Shaw et al., 2003).

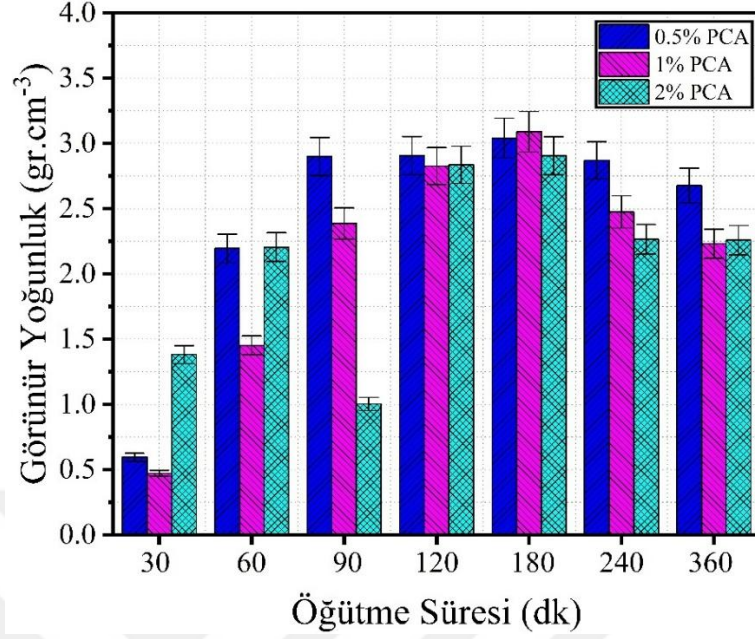
PCA olarak kullanılan metanol, öğütme ortamı veya dağıtıcı olarak görev yapabilir; partiküllerin parçalanmasına yardımcı olarak öğütmeyi kolaylaştırır. Ortaya çıkan bu etki, Ti-6Al-4V partiküllerinin kristal yapısında ve tane boyutunda değişimlere neden olabilir; bu değişimler ise XRD desenlerinde açıkça gözlemlenebilir. Özellikle, metanol ile yapılan öğütme, numunedeki amorf veya düzensiz fraksiyonun artmasına ve ortalama tane boyutunun azalmasına yol açabilir. PCA'nın bir diğer etkisi, Ti-6Al-4V partiküllerinin yüzey kimyasını değiştirebilmesidir. XRD ölçümleri sırasında partiküllerin X-ışını demetiyle etkileşiminde meydana gelen bu değişim, kırınım tepelerinin yoğunluğu ve konumunda farklılıklara neden olabilmektedir. Örneğin, metanolün Ti-6Al-4V partikülleri üzerinde

yüzey oksit tabakaları oluşturmaları, kırınım tepelerinin yüksek açılara kaymasına ya da genişlemesine yol açabilmektedir. Bu olgu, PCA yüzdesinin artmasıyla element tepelerinin genişlemesi şeklinde XRD sonuçlarında gözlenmektedir.

Benzer şekilde, öğütme süresinin artışıyla birlikte kırılma mekanizmasının neden olduğu ağır plastik deformasyon sonucu dislokasyon yoğunluğunun artması ve elementler arası difüzyon mesafesinin kısılması da tepe kaymalarına yol açmaktadır. Ayrıca, analizler Al ve V fazlarının varlık göstermediğini ortaya koymaktadır. Tam tepe genişliğinin yarı (FWHM) değerindeki artışla birlikte tepelerin genişlemesi, Ti esaslı tepelerin Ti kafesinde çözünmeye başladığının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Öğütme sırasında oluşan kırılma ile başlayan plastik deformasyon, mekanik sıkıştırma ve dislokasyon hareketleri, Al ile V elementlerinin difüzyon yolunu kısaltmakta ve bu elementlerin Ti kafesine difüze olmasını sağlamaktadır. Bu durum, aynı zamanda tane incelmelerini teşvik eden bir mekanizma olarak kabul edilmektedir (Hong et al., 2015).

3.4. Görünür Yoğunluk

Görünür yoğunluk değerlerinin öğütme süresi ve PCA içeriğine bağlı değişimi Şekil 50'de gösterilmektedir. Ti-6Al-4V partiküllerinin en yüksek görünür yoğunluk değerleri, %2 ağırlıkça PCA ile 30 ve 60 dakikalık öğütme sonrasında elde edilmiştir. Bu sonuç, %2 ağırlıkça PCA içeren öğütme işleminin, söz konusu öğütme sürelerinin sonunda en düşük ortalama toz boyutuna ulaşmış olmasına bağlanabilir. 60 dakikadan sonra, %0,5 ağırlıkça PCA ve %1 ağırlıkça PCA ile yapılan öğütmelerde daha aktif bir kırılma mekanizması devreye girerken, %2 ağırlıkça PCA içeren öğütmede soğuk kaynak baskın mekanizma haline gelmektedir.



Şekil 50. %0,5 ağırlıkça, %1 ağırlıkça ve %2 ağırlıkça PCA ile ve farklı öğütme sürelerinde üretilen Ti-6Al-4V partiküllerinin görünür yoğunluğu.

Bu nedenle, 60 dakikalık öğütme sonrasında %2 ağırlıkça PCA için görünür yoğunluk değerlerinde bir azalma, %0,5 ağırlıkça PCA ve %1 ağırlıkça PCA için ise bir artış gözlenmektedir. Morfoloji ve partikül boyutu incelemeleri, 120 dakikalık öğütmenin sonuna kadar en verimli kırılmanın %0,5 PCA katkılı öğütmede ortaya çıktığını ortaya koymaktadır. İnce tanelerin iri taneler arasındaki boşlukları doldurma eğilimi, görünür yoğunluk değerlerini yükseltmektedir. Bu nedenle, 120 dakikaya kadar en yüksek görünür yoğunluk değerleri, %0,5 ağırlıkça PCA içeren öğütme işleminde elde edilmiştir (Şekil 50). Tüm PCA oranları için en yüksek görünür yoğunluk değerleri, 180 dakikalık öğütme sonunda elde edilmiştir. Bu durum, Ti-6Al-4V partiküllerinin homojen toz boyutu dağılımına, partikül yerleşimi açısından ince toz boyutu ile iri toz boyutu arasındaki dengeye ve görünür yoğunluğu iyileştiren yarı küresel ile küresel morfolojiye bağlanabilir. 120 dakikalık öğütme sonunda en yüksek görünür yoğunluk değerlerinin elde edilmesinin bir diğer nedeni, Ti-6Al-4V partiküllerinin küresel morfolojiye sahip olmasıdır. Bilindiği üzere, küresel morfolojiye sahip tozlar en iyi akış performansını sergilemektedir. 180 dakikalık öğütme sonrasında, toz boyutlarının küçülmesi ve ince partiküller arasındaki çekim kuvvetleri nedeniyle oluşan aglomerasyonlar sonucu görünür yoğunluk değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Şekil 50

en yüksek görünür yoğunluk değerinin esas alındığında, teorik yoğunluğun %71'ine ulaşıldığını açıkça göstermektedir.

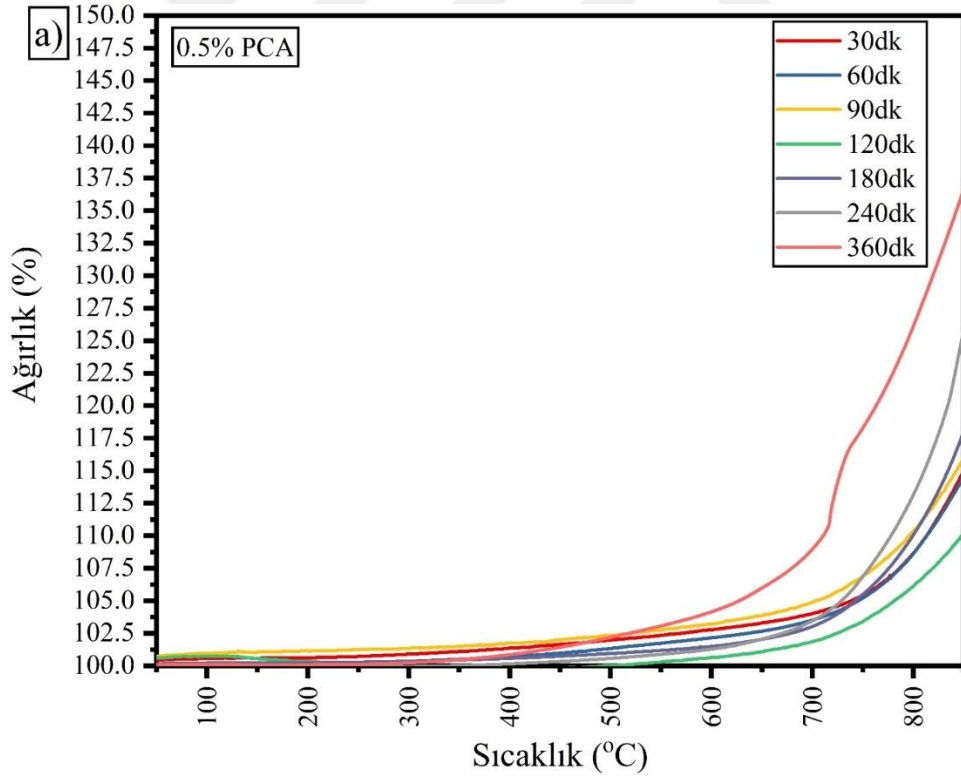
3.5. Termogravimetrik Analiz (TGA)

PCA içeriği ve öğütme süresindeki değişime bağlı olarak Ti-6Al-4V partikülleri için sıcaklık artışına karşılık kütle artışı eğrileri Şekil 51, Şekil 52 ve Şekil 53'te gösterilmektedir. %0,5 ağırlıkça PCA ile elde edilen tozların TGA eğrileri (Şekil 52b) incelendiğinde, 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda Ti-6Al-4V partiküllerinin kütle artışının belirgin şekilde başladığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu sıcaklık değerinin üzerinde oksidasyon olayının kendini göstermeye başladığını ortaya koymaktadır. Şekil 52b ve Şekil 53c'te de gösterildiği üzere, PCA oranı arttıkça oksidasyonun başladığı sıcaklık düşmüştür. PCA oranındaki artışın bir sonucu olarak, partikül boyutunun küçülmesi yüzey alanının genişlemesine yol açmakta, ısı ile temas eden alanın artması ise oksidasyon eğilimini tetiklemektedir.

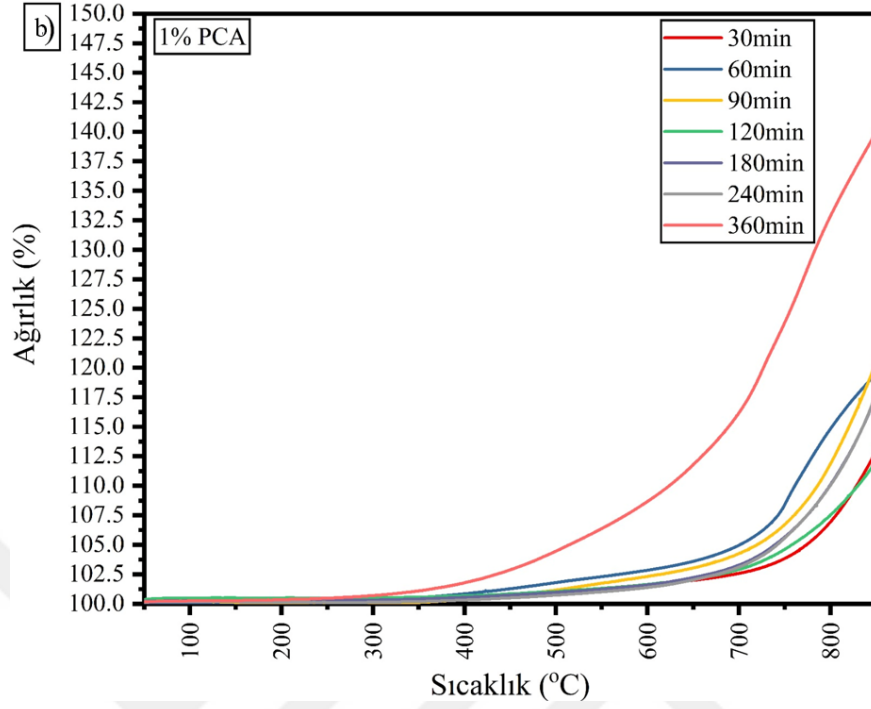
360 dakikalık öğütme sonrasında, %0,5 ağırlıkça PCA, %1 ağırlıkça PCA ve %2 ağırlıkça PCA için kütle artışı değerleri sırasıyla %37, %40 ve %42 olarak ölçülmüştür. Şekil 51a'da görüldüğü üzere, %0,5 ağırlıkça PCA içeren tüm öğütme süreleri için 300 °C'ye kadar kütle artışı oldukça düşüktür. %0,5 ağırlıkça PCA içeren öğütmelerde en düşük kütle artışı, 120 dakika öğütülmüş tozlarda görülürken; en yüksek artış, 360 dakika öğütülmüş tozlarda gözlenmiştir. Diğer taraftan, %1 ağırlıkça PCA içeren tüm öğütme süreleri için 400 °C'ye kadar kütle artışı oldukça düşüktür (Şekil 52b). %1 ağırlıkça PCA içeren öğütmelerde en düşük kütle artışı, 180 dakika öğütülmüş tozlarda görülürken; en yüksek artış, 360 dakika öğütülmüş tozlarda tespit edilmiştir.

Tüm PCA grupları için en düşük kütle artışının 120 ve 180 dakikalık öğütmelerden sonra elde edildiği görülmektedir. Bu durum, 120 ve 180 dakikalık öğütmelerde soğuk kaynak nedeniyle toz kütlesi içerisinde ince Ti-6Al-4V partiküllerinin miktarının düşük olmasına bağlanabilir. Elek analizi sonuçları da bu durumu desteklemektedir. Elek analizine göre, %0,5 ağırlıkça PCA ile 120 dakika öğütülen Ti-6Al-4V partiküllerinin %4,24'ü 125 µm üzerinde, %26,5'i ise 40 µm altındadır. %1 ağırlıkça PCA için bu oranlar sırasıyla %4,23 ve %29,8'dir. Öte yandan, %2 ağırlıkça PCA ile 180 dakika öğütülen Ti-6Al-4V partiküllerinin %7,1'i 125 µm üzerinde, %48,9'u ise 40 µm altındadır.

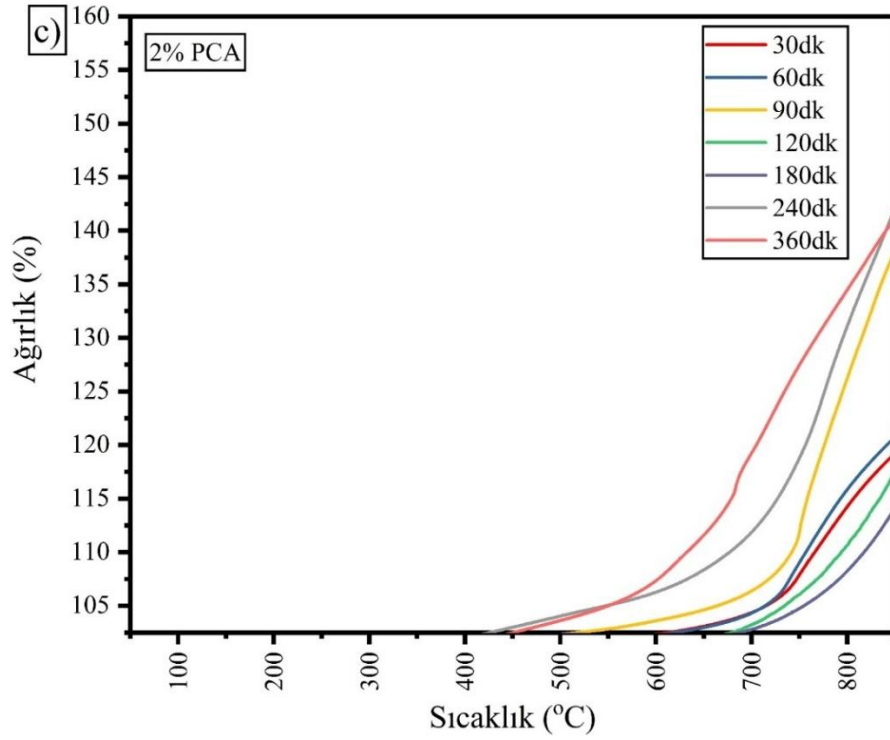
Literatürde, PCA katkısının soğuk kaynak olayına maksimum düzeyde katkıda bulunmasının, kırılma mekanizmasını devreye soktuğu ve partikül boyutunu küçülttüğü belirtilmektedir (Ramezani & Neitzert, 2012). 360 dakikalık öğütme için, toz bütünlüğü içinde kırılmış partiküllerin varlığının artması sonucu oksidasyon kaynaklı belirgin kütle artışı da dikkat çekmektedir. Bu noktada, öğütme süresinin artışıyla birlikte kütle artışında ek bir artış olmadığı belirtilmelidir. Bu durum, PCA katkı oranının artırılmasının, kırılma mekanizması üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu ve yüksek öğütme sürelerine gerek kalmadan partikül boyutunun önemli ölçüde küçültülebileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, belirli öğütme süreleri en uzun süreye sahip olmasa dahi, PCA oranındaki değişim kütle artışını öğütme süresinden bağımsız olarak etkilemiştir. Partikül boyutunun oksidasyon ve kütle artışı üzerindeki doğrudan etkisinin daha önce literatürde vurgulandığı bilinmektedir (Wainwright & Weihs, 2020).



Şekil 51. Ti-6Al-4V partiküllerinin farklı PCA oranları ve öğütme süreleriyle üretilmesine ait TGA eğrileri verilmiştir. %0,5 PCA içeren numunelere ait eğri (a) olarak gösterilmiştir.



Şekil 52. Ti-6Al-4V partiküllerinin farklı PCA oranları ve öğütme süreleriyle üretilmesine ait TGA eğrileri verilmiştir. %1 PCA içeren numunelere ait eğri (b) olarak gösterilmiştir.



Şekil 53. Ti-6Al-4V partiküllerinin farklı PCA oranları ve öğütme süreleriyle üretilmesine ait TGA eğrileri verilmiştir. %2 PCA içeren numunelere ait eğri (c) olarak gösterilmiştir.

4. SONUÇLAR

120–360 dakikalık öğütmelerde %0,5 ve %1 PCA katkısıyla üretilen yarı küresel ve küresel Ti-6Al-4V tozları, toz metalurjisi ve eklemeli imalat tekniklerinde kullanılabilecek özelliklere sahiptir. Öte yandan, bu üretim yöntemleri için en uygun tozlar, %2 PCA içeren ve 180–360 dakika öğütülmüş numunelerden elde edilmektedir.

Sonuçlar, 360 dakikalık öğütme sonrasında ortalama parçacık boyutlarının (D_{50}) sırasıyla %0,5 ağırlıkça PCA için yaklaşık 20 μm , %1 ağırlıkça PCA için 18,1 μm ve %2 ağırlıkça PCA için 21,8 μm olduğunu göstermiştir.

Elek analizi, %0,5 ağırlıkça PCA ile 120 dakika öğütülen Ti-6Al-4V partiküllerinin %4,24'ünün 125 μm üzerinde, %26,5'inin ise 40 μm altında olduğunu göstermektedir. %1 ağırlıkça PCA için bu değerler sırasıyla %4,23 ve %29,8'dir. Öte yandan, %2 ağırlıkça PCA ile 180 dakika öğütülen Ti-6Al-4V partiküllerinin %7,1'i 125 μm üzerinde, %48,9'u ise 40 μm altındadır.

XRD sonuçlarına göre, tüm PCA oranlarında partiküllerde herhangi bir elementel kontaminasyon gözlenmemiştir. Desenlerin genel değerlendirilmesi, PCA miktarındaki artışla beraber tüm örneklerde tepe genişlemelerinin oluştuğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca deformasyon, kırılma, ara-difüzyon ve soğuk kaynak mekanizmalarının, öğütülmüş Ti-6Al-4V partiküllerinin kristalit yapısına etki ettiği anlaşılmaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre, tüm PCA oranlarında en yüksek görünür yoğunluk değeri 180 dakikalık öğütme süresi sonunda gözlenmiştir. Bu bulgu, Ti-6Al-4V partiküllerinde homojen boyut dağılımı, ince ve iri partiküller arasındaki uygun yerleşim dengesi ve yarı küresel ile küresel morfolojinin yoğunluğu artırıcı etkisi ile ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, en yüksek görünür yoğunluk değeri %1 PCA katkısıyla gerçekleştirilen öğütmede elde edilmiş olup, bu değer teorik yoğunluğun %71'ine tekabül etmektedir.

TGA sonuçları, tüm PCA grupları için en düşük kütle artışının 120 ve 180 dakikalık öğütme sonrasında elde edildiğini göstermektedir. Bu durum, 120 ve 180 dakikalık öğütme süresince gerçekleşen soğuk kaynak nedeniyle toz kütlesi içerisinde ince Ti-6Al-4V partiküllerinin miktarının düşük olmasına bağlanabilir.

5. ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar ve ilgili süreç dahilinde aşağıdaki öneriler sunulmaktadır;

Öğütme sırasında kullanılan proses kontrol ajanlarının (PCA) tipi, konsantrasyonu; toz morfolojisi, partikül boyutu ve oksidasyon davranışına etkilerini daha detaylı incelemek için önerilir. Böylece sürecin optimize edilmesi ve istenen toz özelliklerinin hedeflenmesi mümkün olur.

Bilye-toz, öğütme hızı ve süre gibi parametrelerin farklı kombinasyonları sistematik olarak incelenmeli. Özellikle tozun homojenliği, partikül yüzey enerjisi ve oksidasyon gelişimi üzerindeki etkileri değerlendirilmeli.

Öğütülen tozların elde edilme şartlarına göre oluşan mikro yapılar (örneğin martenzitik veya lamelli $\alpha+\beta$ yapısı), çekme dayanımı, akma dayanımı, yorulma direnci, kırılma tokluğu ve elastik modül gibi mekanik özelliklerle ilişkilendirilmeli ve gerektiğinde mikroyapısal analizler (SEM vb.) ile desteklenmeli.

Geri dönüşüm sürecinde oluşabilecek kirlilik (metalik kontaminasyon, oksijen birikimi vb.) mekanik ve korozyon performansı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Bu nedenle saflık analizleri, kimyasal karakterizasyon ve gerekirse arıtma tekniklerinin geliştirilmesi önerilir.

Alternatif öğütme teknolojileri test edilip verimlilik ve ürün özellikleri açısından kıyaslanması yapılabilir.

Öğütme işleminden sonra elde edilen tozlardan üretilen örnek malzemelere yönelik mekanik testlerin yanı sıra, yorulma, termal döngü ve korozyon testleri de gerçekleştirilmeli; böylece uygulama bazında malzeme davranışı daha güvenilir şekilde ortaya konabilir.

Mekanik öğütme ile elde edilen tozların, SLE veya EBM gibi teknolojilerle uyumlu partikül boyutu, morfoloji ve oksidasyon profiline sahip olup olmadığı değerlendirilerek, katmanlı imalat uygulamalarına adaptasyon sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Adesina, O., & Popoola, A. (2017). A study on the influence of laser power on microstructural evolution and tribological functionality of metallic coatings deposited on Ti-6Al-4V alloy. *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 11(3), 145-155.
- Aksöz, S., Demir, Ü., Ada, H., Gökmeşe, H., & Bostan, B. (2017). NiTi ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIM TOZLARINA MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ KULLANILARAK ELEMENTEL Nİ VE Tİ TOZLARININ İLAVESİNİN MIKROYAPISAL İNCELENMESİ. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 5(1), 99-106.
- Akula, S. P., Ojha, M., Rao, K. L., & Gupta, A. K. (2023). A review on superplastic forming of Ti-6Al-4V and other titanium alloys. *Materials Today Communications*, 34, 105343.
- Annan, K. A., Daswa, P., Motumbo, K., & Siyasiya, C. W. (2021). Influence of milling parameters on the structural and phase formation in Ti-20% Al alloy through mechanical milling. *Materials Today: Proceedings*, 38, 779-783.
- Avar, B. (2019). Nanokristal Co70Si15B15 toz alaşımların yapısal, termal ve manyetik özelliklerinin incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(1), 83-89.
- Baragetti, S. (2013). Corrosion fatigue behaviour of Ti-6Al-4V in methanol environment. *Surface and Interface Analysis*, 45(10), 1654-1658.
- Bărbîntă, A. C., Earar, K., Crimu, C. I., Drăgan, L. A., & Munteanu, C. (2014). In vitro evaluation of the cytotoxicity of some new titanium alloys. *Key Engineering Materials*, 587, 303-308.
- Bathini, U., Srivatsan, T. S., Patnaik, A., & Quick, T. (2010). A study of the tensile deformation and fracture behavior of commercially pure titanium and titanium alloy: influence of orientation and microstructure. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(8), 1172-1182.
- Besisa, N. H., & Yajima, T. (2024). Titanium-based alloys: classification and diverse applications. In *Titanium-based alloys-characteristics and applications*. IntechOpen.
- Bıyık, S. (2019). Cu25W kompozit tozunun bilyeli öğütme yöntemiyle üretimine farklı işlem kontrol katkılarının etkisinin incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 222-228.
- Bolzoni, L., Esteban, P., Ruiz-Navas, E. M., & Gordo, E. (2012). Mechanical behaviour of pressed and sintered titanium alloys obtained from master alloy addition powders. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 15, 33-45.
- Bolzoni, L., Ruiz-Navas, E. M., & Gordo, E. (2017). Quantifying the properties of low-cost powder metallurgy titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 687, 47-53.
- Boraei, N. F. E., Elshamy, I. H., & Ibrahim, M. A. (2024). A comparative study on the electrochemical corrosion behaviour of biomedical β -titanium alloy with TiAlV and titanium in hank's physiological solution and the impact of reactive oxygen species and immersion time. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 10(2), 38.
- Boutana, N., Bocher, P., Jahazi, M., Piot, D., & Montheillet, F. (2008). Microstructural modeling of cold creep/fatigue in near alpha titanium alloys using cellular automata

- method. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 32(2), 195-212.
- Briguerente, L., Couto, A. A., Guimarães, N. M., Reis, D. A., de Moura Neto, C., & Barboza, M. (2012). Determination of creep parameters of Ti-6Al-4V with bimodal and equiaxed microstructure. Defect and Diffusion forum,
- Brunke, F., Siemers, C., & Rösler, J. (2020). Second-generation titanium alloys Ti-15Mo and Ti-13Nb-13Zr: A comparison of the mechanical properties for implant applications. MATEC web of conferences,
- Cai, Z., Cheng, X., Chen, J., Xiang, T., & Xie, G. (2022). Optimized mechanical properties of titanium-oxygen alloys by powder metallurgy. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 4151-4163.
- Canakci, A., & Varol, T. (2015). A novel method for the production of metal powders without conventional atomization process. *Journal of Cleaner Production*, 99, 312-319.
- CASADEBAIGT, A., MONCEAU, D., & HUGUES, J. (2020). High temperature oxidation of Ti-6Al-4V alloy fabricated by additive manufacturing. Influence on mechanical properties. MATEC Web of Conferences,
- Chen, D., Jiang, Y., Cai, J.-G., Chen, Z.-H., & Huang, P.-Y. (2010). Production of intermetallic compound powders by a mechanochemical approach: solid-liquid reaction ball milling. *High-energy ball milling*, 149-166.
- Correa, D., Kuroda, P., Lourenço, M., Fernandes, C., Buzalaf, M. A. R., Zambuzzi, W., & Grandini, C. (2018). Development of Ti-15Zr-Mo alloys for applying as implantable biomedical devices. *Journal of Alloys and Compounds*, 749, 163-171.
- Çelik, Y. H., & Kılıçkap, E. (2018). Titanyum alaşımlarından Ti-6Al-4V'nin işlenmesinde karşılaşılan zorluklar: Derleme. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1), 163-175.
- Demirel, M. Y., & Karaağaç, İ. (2021). Titanyum alaşımlarının mikroyapı ve şekillendirilebilirliğine sıcaklığın etkileri. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(3), 192-207.
- Dikici, T., & Sutcu, M. (2017). Effects of disc milling parameters on the physical properties and microstructural characteristics of Ti6Al4V powders. *Journal of Alloys and Compounds*, 723, 395-400.
- do Prado, R. F., Rabêlo, S. B., de Andrade, D. P., Nascimento, R. D., Henriques, V. A. R., Carvalho, Y. R., Cairo, C. A. A., & de Vasconcellos, L. M. R. (2015). Porous titanium and Ti-35Nb alloy: effects on gene expression of osteoblastic cells derived from human alveolar bone. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 26(11), 259.
- Dong, S., Wang, W., Gao, Y., & Deng, G. (2022). Tribological properties of different-sized black phosphorus nanosheets as water-based lubrication additives for steel/titanium alloy wear contact. *Metals*, 12(2), 288.
- El-Chaikh, A., Danzig, A., & Muentner, D. (2020). Effect of Microstructure on Fatigue Properties of Several Ti-Alloys for Aerospace Application. MATEC Web of Conferences,
- Eryomina, M., & Lomayeva, S. (2020). Composites prepared by multistage wet ball milling of Ti and Cu powders: phase composition and effect of surfactant addition. *Advanced Powder Technology*, 31(5), 1789-1795.
- Fang, X., Liu, Y., Shao, Y., Xu, H., & Yang, F. (2023). Forging Temperature Effects on Crack Tip Creep Behaviour of Hot Hammer Forged Ti-6Al-4V Alloy. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023(1), 4414502.

- Foltz, J. W., Welk, B., Collins, P. C., Fraser, H. L., & Williams, J. C. (2011). Formation of grain boundary α in β Ti alloys: its role in deformation and fracture behavior of these alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(3), 645-650.
- Fouzia, H., Mamoun, F., Naouel, H., Linda, A., Gousseem, M., Said, M., Mohammed, A. S., Alex, M., Iost, A., & Weiß, S. (2021). The effect of milling time on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4Fe alloys. *Materials Today Communications*, 27, 102428.
- Gao, J., Nutter, J., Liu, X., Guan, D., Huang, Y., Dye, D., & Rainforth, W. M. (2018). Segregation mediated heterogeneous structure in a metastable β titanium alloy with a superior combination of strength and ductility. *Scientific reports*, 8(1), 7512.
- Gim, U., Kim, S., Kang, T. h., Lee, J., Jeong, S., Han, J., & Lee, B. (2025). Enhanced flow properties of SiO₂ nanoparticles coated low-cost hydrogenation-dehydrogenation Ti-6Al-4V powder for powder bed fusion process. *Powder Metallurgy*, 68(2), 95-107.
- Göktaş, M. (2018). Cevher Hazırlamada Mekanik Aktivasyon Uygulamaları. *Scientific Mining Journal*, 57(1), 57-66.
- Göktaş, M. (2023). Bilecik/Söğüt bölgesi kaolininin termal davranışı üzerine aşırı öğütmenin etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(3), 990-997.
- Gupta, K., & Laubscher, R. F. (2017). Sustainable machining of titanium alloys: a critical review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(14), 2543-2560.
- Gupta, N. K., Somani, N., Prakash, C., Singh, R., Walia, A. S., Singh, S., & Pruncu, C. I. (2021). Revealing the WEDM process parameters for the machining of pure and heat-treated titanium (Ti-6Al-4V) alloy. *Materials*, 14(9), 2292.
- Han, C.-B., & Lee, D.-G. (2024). Effect of oxygen on static recrystallization behaviors of biomedical Ti-Nb-Zr alloys. *Metals*, 14(3), 333.
- Hao, Y., Yang, R., Niinomi, M., Kuroda, D., Zhou, Y., Fukunaga, K., & Suzuki, A. (2002). Young's modulus and mechanical properties of Ti-29Nb-13Ta-4.6 Zr in relation to α "martensite. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(10), 3137-3144.
- Hesse, F. A. B., Verissimo, N. C., Soyama, J., & Bertazzoli, R. (2021). High-energy ball milling of intermetallic Ti-Cu alloys for the preparation of oxide nanoparticles. *Advanced Powder Technology*, 32(12), 4609-4620.
- Hong, S.-M., Park, J.-J., Park, E.-K., Kim, K.-Y., Lee, J.-G., Lee, M.-K., Rhee, C.-K., & Lee, J. K. (2015). Fabrication of titanium carbide nano-powders by a very high speed planetary ball milling with a help of process control agents. *Powder Technology*, 274, 393-401.
- Hou, X., Liu, Z., Wang, B., Lv, W., Liang, X., & Hua, Y. (2018). Stress-strain curves and modified material constitutive model for Ti-6Al-4V over the wide ranges of strain rate and temperature. *Materials*, 11(6), 938.
- Hu, Z., Zheng, H., Liu, G., & Wu, H. (2018). Effects of cryogenic treatment after annealing of Ti-6Al-4V alloy sheet on its formability at room temperature. *Metals*, 8(5), 295.
- Im, T., Gurung, K., Meyers, S., Cutolo, A., Oh, H., Lee, J.-S., Van Hooreweder, B., & Lee, C. S. (2022). A new strategy for metal additive manufacturing using an economical water-atomized iron powder for laser powder bed fusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 308, 117705.

- Jiang, Y., Yang, X., Tian, H., Ma, L., Li, L., & Yang, Y. (2023). Investigation on the high-feed milling of M28. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(1), 127-141.
- Judd, K. G., Tsaknopoulos, K., Sousa, B. C., Pepi, M., & Cote, D. L. (2024). Comparative Evaluation of Titanium Feedstock Powder Derived from Recycled Battlefield Scrap vs. Virgin Powder for Cold Spray Processing. *Materials*, 17(5), 1122.
- Kabil, A. O., & Kaynak, Y. (2020). Optimization of Cutting Parameters for Sustainable Machining of Titanium Ti-5553 Alloy using Genetic Algorithm. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 8(2), 310-315.
- Kim, M. J., Yadav, P., & Lee, D. B. (2016). Isothermal and cyclic oxidation of Ti-6Al-4V alloy. Defect and diffusion forum,
- Kitashima, T., Yamabe-Mitarai, Y., Iwasaki, S., & Kuroda, S. (2016). Effects of Ga and Sn additions on the creep strength and oxidation resistance of near- α Ti alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(12), 6394-6403.
- Klimenko, D., Ozerov, M., Suresh, S., Stepanov, N., Tikhonovsky, M. A., Salishchev, G., & Zhrebtssov, S. (2018). Microstructure evolution and properties of Ti-6Al-4V alloy doped with Fe and Mo during deformation at 800° C. Defect and Diffusion Forum,
- Kok, Y., Tan, X., Tor, S. B., & Chua, C. K. (2015). Fabrication and microstructural characterisation of additive manufactured Ti-6Al-4V parts by electron beam melting: This paper reports that the microstructure and micro-hardness of an EMB part is thickness dependent. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(1), 13-21.
- Lenain, A. (2007). *Relationships between thermomechanical processing, microstructure and mechanical properties of the beta metastable Ti-LCB alloy* UCL.].
- Li, X., Zhou, Y., Ji, X., Li, Y., & Wang, S. (2015). Effects of sliding velocity on tribo-oxides and wear behavior of Ti-6Al-4V alloy. *Tribology international*, 91, 228-234.
- Li, Y., Yang, C., Zhao, H., Qu, S., Li, X., & Li, Y. (2014). New developments of Ti-based alloys for biomedical applications. *Materials*, 7(3), 1709-1800.
- Li, Z., Yi, J., Huang, B., Wu, X., Qiao, W., Luo, X., & Chen, Z. (2015). Ultraviolet irradiation enhanced bioactivity and biological response of mesenchymal stem cells on micro-arc oxidized titanium surfaces. *Dental materials journal*, 34(2), 135-147. <https://doi.org/10.4012/dmj.2014-125>
- Liu, S. J., Cai, F. F., Cui, C. X., & Yao, X. (2011). Determination of phase transformation point of new type Ti-5Al-3.3 V-8Mo-10Nb-1.0 Zr-0.5 Cr alloy. *Advanced Materials Research*, 311, 742-747.
- Long, Y., Zhang, H., Wang, T., Huang, X., Li, Y., Wu, J., & Chen, H. (2013). High-strength Ti-6Al-4V with ultrafine-grained structure fabricated by high energy ball milling and spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 585, 408-414. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.07.078>
- Ma, A., Liu, D., & Zhang, X. (2020). Influence of soft interlayers on fretting fatigue and fretting wear resistance of Ti-6Al-4V alloy. MATEC Web of Conferences,
- Martins Junior, J. R. S., Kuroda, P. A. B., & Grandini, C. R. (2024). Investigation of the chemical composition, microstructure, density, microhardness, and elastic modulus of the new β Ti-50Nb-xMo alloys for biomedical applications. *Materials*, 17(1), 250.
- Merklein, M., Hagenah, H., Kaupper, M., & Schaub, A. (2013). Mechanical response of Ti-6Al-4V alloy on deformation at moderate temperatures. *Key Engineering Materials*, 549, 311-316.

- Ming, W. W., Chen, M., Rong, B., & Han, B. (2010). Machinability evaluation of the finish hard turning $\alpha + \beta$ titanium alloys. *Key Engineering Materials*, 431, 551-554.
- Motyka, M. (2021). Martensite formation and decomposition during traditional and AM processing of two-phase titanium alloys—An overview. *Metals*, 11(3), 481.
- Naidoo, L., Fatoba, O., Akinlabi, S., Mahamood, R., Shatalov, M., Murashkin, E., Hassan, S., & Akinlabi, E. (2020). Material characterization and corrosion behavior of hybrid coating Ti–Al–Si–Cu/Ti–6Al-4V composite. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 51(6), 766-773.
- Nazari, K. A., Nouri, A., & Hilditch, T. (2015). Compressibility of a Ti-based alloy with varying amounts of surfactant prepared by high-energy ball milling. *Powder Technology*, 279, 33-41.
- Niinomi, M., & Nakai, M. (2011). Titanium-based biomaterials for preventing stress shielding between implant devices and bone. *International journal of biomaterials*, 2011(1), 836587.
- Oliveira, V., Cioffi, M. O. H., Barboza, M. J. R., Landers, R., Schmitt, B., Tapia, D., & Voorwald, H. J. (2018). Plasma immersion ion implantation (PIII) influence on Ti-6Al-4V alloy: Frequency effect. *International Journal of Fatigue*, 109, 157-165.
- Omoniyi, P., Akinlabi, E., & Mahamood, R. (2021). Heat treatments of Ti6Al4V alloys for industrial applications: An overview. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,
- Peeratatsuan, C., & Chowwanonthapunya, T. (2020). Investigation of the grain refining performance of Al-5Ti-1B master alloy on the recycling process of A356 alloy. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 51(10), 1346-1352.
- Piao, R., Wang, W., Hu, B., & Hu, H. (2024). Characterization and growth kinetics of borides layers on near-alpha titanium alloys. *Materials*, 17(19), 4815.
- Pushp, P., Dasharath, S., & Arati, C. (2022a). Classification and applications of titanium and its alloys. *Materials Today: Proceedings*, 54, 537-542.
- Pushp, P., Dasharath, S. M., & Arati, C. (2022b). Classification and applications of titanium and its alloys. *Materials Today: Proceedings*, 54, 537-542. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.008>
- Ramezani, M., & Neitzert, T. (2012). Mechanical milling of aluminum powder using planetary ball milling process. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 55(2), 790-798.
- Ran, X., Wang, Z., Liu, C. C., Li, P. J., & Lv, Z. G. (2022). Interrelationship of Fracture Mechanism and Microstructure of TC18 Titanium Alloy. Materials Science Forum,
- Raynova, S., Yang, F., & Bolzoni, L. (2021). Mechanical behaviour of induction sintered blended elemental powder metallurgy Ti alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 799, 140157.
- Reis, D. A. P., dos Reis, A. G., Yogi, L. M., da Silva, M. M., Ueda, M., & Zepka, S. (2014). Comparison between Laser Surface Nitriding and Nitrogen Plasma Immersion Ion Implantation (N-PIII) on Creep Behavior of Ti-6Al-4V Alloy. Materials Science Forum,
- Rozumek, D., Hepner, M., & Marcisz, E. (2014). Fatigue crack growth in titanium alloy after hardening and ageing. *Key Engineering Materials*, 598, 213-218.
- Sahoo, R., Jha, B., Sahoo, T., Mishra, B. K., Bylya, O. I., & Sarangi, M. (2012). A study on variation of microstructural parameters in titanium alloys during near superplastic regime of deformation. *Applied Mechanics and Materials*, 110, 4723-4729.

- Sandgren, H., Zhai, Y., Lados, D., Shade, P., Schuren, J., Groeber, M., Kenesei, P., & Gavras, A. Characterization of fatigue crack growth behavior in LENS fabricated Ti-6Al-4V using high-energy synchrotron x-ray microtomography, *Addit. Manuf.* 12 (2016) 132–141. In.
- Sandu, A. V., Baltatu, M. S., Nabialek, M., Savin, A., & Vizureanu, P. (2019). Characterization and mechanical proprieties of new TiMo alloys used for medical applications. *Materials*, 12(18), 2973.
- Santiago-Medina, P., Sundaram, P., & Difffoot-Carlo, N. (2015). Titanium oxide: a bioactive factor in osteoblast differentiation. *International Journal of Dentistry*, 2015(1), 357653.
- Sarraf, M., Rezvani Ghomi, E., Alipour, S., Ramakrishna, S., & Liana Sukiman, N. (2022). A state-of-the-art review of the fabrication and characteristics of titanium and its alloys for biomedical applications. *Bio-design and Manufacturing*, 5(2), 371-395.
- Schettini, Y. S., Borborema, S. G., Cossu, C. M. F. A., Nunes, C. A., & de Almeida, L. H. (2020). Production and Characterization of the Ti-12Mo-30Nb Alloy. *Materials Science Forum*,
- Serboi, C., Velicu, S., Darnis, P., Laheurte, R., & Ionescu, C. (2012). The Preliminary Study of Machinability during Milling of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V). *Applied Mechanics and Materials*, 186, 200-207.
- Shaw, L., Villegas, J., Luo, H., Zawrah, M., & Miracle, D. (2003). Effects of process-control agents on mechanical alloying of nanostructured aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34(1), 159-170.
- Shuai, M. R., Huang, Q. X., & Zhu, Y. C. (2011). Finite element simulation of the hot-rolling process of titanium alloy bar. *Advanced Materials Research*, 145, 181-186.
- Shunmugavel, M., Polishetty, A., Goldberg, M., Singh, R., & Littlefair, G. (2017). A comparative study of mechanical properties and machinability of wrought and additive manufactured (selective laser melting) titanium alloy–Ti-6Al-4V. *Rapid Prototyping Journal*, 23(6), 1051-1056.
- Solorio, V., Vergara-Hernández, H., Olmos, L., Bouvard, D., Chávez, J., Jimenez, O., & Camacho, N. (2022). Effect of the Ag addition on the compressibility, sintering and properties of Ti6Al4V/xAg composites processed by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*, 890, 161813.
- Song, X. Y., Wang, Y. L., Zhang, W. J., Hui, S. X., & Ye, W. J. (2015). Influence of duplex annealing on the microstructure and mechanical properties of Ti62421S titanium alloy plate. *Materials Science Forum*,
- Soufiani, A. M., Enayati, M., & Karimzadeh, F. (2010). Fabrication and characterization of nanostructured Ti6Al4V powder from machining scraps. *Advanced Powder Technology*, 21(3), 336-340.
- Suhail, H. M., Chinnamuthu, N., & Chinnamuthu, S. (2024). Experimental study about the influence of Wire EDM parameters on surface roughness and kerf width of Ti-3Al-2.5 V superalloy. *Metallic Materials/Kovové Materiály*, 62(3).
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in materials science*, 46(1-2), 1-184.
- Şenel, M. C. (2021). Çok Katmanlı Karbon Nanotüp Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellik ve Mikroyapı İncelemesi. *Engineering Sciences*, 16(1), 39-47.

- Şenel, M. C., & Gürbüz, M. (2020). Al₂O₃ TANECİK BOYUTUNUN VE KATKI ORANININ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE MİKROYAPISI ÜZERİNE OLAN ETKİSİ. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 565-575.
- Şimşir, H. (2020). Yüzeyi ZnO Nanopartikülleri ile Kaplanmış Demir Matrisli Malzemelerin Karakterizasyonu ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 8(2), 365-370.
- Takano, T., Yoshinari, M., Sakurai, K., & Ueda, T. (2024). Cyclic Fatigue Properties of Titanium Alloys for Application in Dental Implants. *The Bulletin of Tokyo Dental College*, 65(1), 1-9. <https://doi.org/10.2209/tdcpublication.2023-0025>
- Takeda, O., Ouchi, T., & Okabe, T. H. (2020). Recent progress in titanium extraction and recycling. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 51(4), 1315-1328.
- Tal-Gutelmacher, E., & Eliezer, D. (2005). Hydrogen cracking in titanium-based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 404, 621-625.
- Tebaldo, V., Gautier di Confiengo, G., Duraccio, D., & Faga, M. G. (2024). Sustainable recovery of titanium alloy: From waste to feedstock for additive manufacturing. *Sustainability*, 16(1), 330.
- Tong, J., Bowen, C., Persson, J., & Plummer, A. (2017). Mechanical properties of titanium-based Ti-6Al-4V alloys manufactured by powder bed additive manufacture. *Materials Science and Technology*, 33(2), 138-148.
- Topcu, İ. (2023). H-Bor Nitrür Takviyesi İle Güçlendirilmiş Titanyum Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 22(44), 248-257.
- Vajpai, S. K., Ota, M., Ameyama, K., Watanabe, T., Maeda, R., Tingaud, D., & Dirras, G. (2016). Harmonic Structure: An Effective Tailored Heterogeneous Microstructural Design to Strengthen Ti-6Al-4V Alloy. *Proceedings of the 13th World conference on titanium*,
- Varela, J., Arrieta, E., Paliwal, M., Marucci, M., Sandoval, J. H., Gonzalez, J. A., McWilliams, B., Murr, L. E., Wicker, R. B., & Medina, F. (2021). Investigation of microstructure and mechanical properties for Ti-6Al-4V alloy parts produced using non-spherical precursor powder by laser powder bed fusion. *Materials*, 14(11), 3028.
- Varol, T. (2012). The production of AA2024 matrix-B₄C particle reinforced composites by powder metallurgy method and investigation of their properties. *Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey (Master thesis)*.
- Varol, T. (2018). The effect of milling time, milling speed and ball to powder weight ratio on the physical properties of submicron Al₂O₃ ceramic particles fabricated by mechanical milling method. *PAMUKKALE UNIVERSITY JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES-PAMUKKALE UNIVERSITESI MUHENDISLIK BILIMLERI DERGISI*, 24(4).
- Vazquez Martinez, J. M., Botana Pedemonte, F. J., Botana Galvin, M., Salguero Gomez, J., & Marcos Barcena, M. (2017). Sliding wear behavior of UNS R56400 titanium alloy samples thermally oxidized by laser. *Materials*, 10(7), 830.
- Veiga, C., Davim, J. P., & Loureiro, A. (2012). Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 32(2), 133-148.
- Vikas, K. S. R., Rao, K. S., Reddy, G. M., & Ramana, V. V. (2022). Influence of heat treatments on microstructural and mechanical properties of Grade 5 titanium friction welds. *Engineering Research Express*, 4(2), 025053.

- Vilaro, T., Colin, C., & Bartout, J.-D. (2011). As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(10), 3190-3199.
- Wainwright, E. R., & Weihs, T. P. (2020). Microstructure and ignition mechanisms of reactive aluminum–zirconium ball milled composite metal powders as a function of particle size. *Journal of Materials Science*, 55(29), 14243-14263.
- Wang, C., Li, B., Wang, T., Qi, P., Qiao, X., Yin, J., & Nie, Z. (2022). Microstructure and Thermal Stability of High-Temperature Titanium Alloy with Hf Element. *Advanced Engineering Materials*, 24(11), 2200337.
- Wang, S.-H., & Wei, M. (2004). Tensile properties of gas tungsten arc weldments in commercially pure titanium, Ti-6Al-4V and Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr alloys at different strain rates. *Science and technology of welding and joining*, 9(5), 415-422.
- Wang, X. Y., Zhu, S. D., Liu, Q., Fu, A. Q., & Li, J. L. (2021). Corrosion behavior on titanium alloys as OCTG in oil fields. *Materials Science Forum*,
- Wei, W.-H., Shao, Z.-N., Shen, J., & Duan, X.-M. (2018). Microstructure and mechanical properties of in situ formed TiC-reinforced Ti-6Al-4V matrix composites. *Materials Science and Technology*, 34(2), 191-198.
- Wei, Z., Cao, L., Wang, H., & Zou, C. (2011). Microstructure and mechanical properties of TiC/Ti-6Al-4V composites processed by in situ casting route. *Materials Science and Technology*, 27(8), 1321-1327.
- Wei, Z., Peng, G., Yongqing, Z., Shewei, X., Qian, L., Jing, W., Chaowen, H., & Jun, C. (2017). Relationship between mechanical properties and microstructure in a new high strength β titanium alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 46(8), 2076-2079.
- Weiss, I., & Semiatin, S. L. (1999). Thermomechanical processing of alpha titanium alloys—an overview. *Materials Science and Engineering: A*, 263(2), 243-256. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)01155-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)01155-1)
- Welsch, G., Boyer, R., & Collings, E. (1993). *Materials properties handbook: titanium alloys*. ASM international.
- Wojtaszek, M., Śleboda, T., Czulak, A., Weber, G., & Hufenbach, W. (2013). Quasi-static and dynamic tensile properties of Ti-6Al-4V alloy. *Archives of metallurgy and materials*, 58.
- Xu, J., Weng, X.-J., Wang, X., Huang, J.-Z., Zhang, C., Muhammad, H., Ma, X., & Liao, Q.-D. (2013). Potential use of porous titanium–niobium alloy in orthopedic implants: preparation and experimental study of its biocompatibility in vitro. *PloS one*, 8(11), e79289.
- Yadav, P., & Saxena, K. K. (2020). Effect of heat-treatment on microstructure and mechanical properties of Ti alloys: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2546-2557.
- Yang, F., Gabbitas, B., Mukhtar, A., & Downing, W. (2014). Preparation of titanium alloy rods by powder compact extrusion. *Advanced Materials Research*, 1019, 241-247.
- Yu, H. J. (2013). Research Progress of the Surface Oxidation of Titanium and its Alloys. *Advanced Materials Research*, 748, 188-191.
- Zhang, J., Hu, L., Ji, D., Su, K., & Chen, X. (2024). The study on the high cycle fatigue performance and life prediction of Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser engineered net shaping. *International Journal of Fracture*, 248(1), 275-290.

- Zhang, Y., Lu, L., & Yap, S. (1999). Prediction of the amount of PCA for mechanical milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 89, 260-265.
- Zheng, Y., & Xu, P. (2023). Effect of Nb content on phase transformation and comprehensive properties of TiNb alloy coating. *Coatings*, 13(7), 1186.
- Zong, Y., Shan, D., Xu, M., & Lv, Y. (2009). Flow softening and microstructural evolution of TC11 titanium alloy during hot deformation. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(4), 1988-1994.



ÖZGEÇMİŞ

Fethi Doğukan Ömür, 2016 yılında Yenişehir Mersin Anadolu Lisesi'nden mezun olmuştur. Lisans eğitimini 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden mezun olarak tamamlamıştır. Aynı üniversitede Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamış ve Mekanik Öğütme Yöntemiyle Hazırlanan Geri Dönüştürülmüş Ti-6Al-4V Tozlarının Morfoloji, Parçacık Boyutu ve Oksidasyon Direnci Üzerine İşlem Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi" başlıklı çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 122M371 No'lu proje kapsamında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Yüksek lisans tezinde elde ettiği bilimsel sonuçlar ve çalışmalar kapsamında Arabian Journal for Science and Engineering dergisinde yayımlanan "Evolution of Morphology, Particle Size and Oxidation Resistance of Recycled Ti-6Al-4V Powders Prepared by Planetary Ball Milling" başlıklı makale ile bilimsel literatüre kazandırılmıştır. Bu süreçte 2023 yılında TİSAŞ Trabzon Silah Sanayi A.Ş. bünyesinde Malzeme Laboratuvarı Sorumlusu olarak göreve başlamış, burada savunma sanayine yönelik çelik ve alüminyum alaşımlarının kimyasal analizleri, mikroyapı incelemeleri, sertlik testleri ve birçok kalite doğrulama süreçleri ve daha farklı alanlarda da aktif olarak görev almaya devam etmektedir. 2025 yılında 122M371 No'lu proje kapsamında ilgili başlıklı tez çalışmasıyla yüksek lisans derecesini almıştır.

Varol, T., Ömür, F. D., Akçay, S. B., Güler, O. ve Erdemir, F., (2024). Evolution of Morphology, Particle Size and Oxidation Resistance of Recycled Ti-6Al-4V Powders Prepared by Planetary Ball Milling. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50, 9123-9140.