

**T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİYOMALZEMELER İÇİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE
ÜRETİLEN TiMoCu ALAŞIMLARININ MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MURAT KURT

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Zülküf BALALAN**

BİNGÖL-2022



T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**BİYOMALZEMELER İÇİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
TiMoCu ALAŞIMLARININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Zülküf BALALAN danışmanlığında, Murat KURT tarafından hazırlanan bu çalışma .../.../2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mehmet YAZ

İmza :

Üye : Doç. Dr. Zülküf BALALAN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Özgür ÖZGÜN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

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

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimime başladığım günden beri her türlü bilgi ve tecrübelerini paylaşan başta danışmanım Sayın Doç. Dr. Zülküf BALALAN'a, tez çalışmamda değerli görüş ve düşüncelerinden faydalandığım Sayın Doç. Dr. Özgür ÖZGÜN hocama, laboratuvar çalışmalarında her türlü katkı ve desteğini sunan araştırma görevlisi Sayın Dr. Ömer EKİNCİ hocama, tezin yazma ve hazırlamasında bilgisinden faydalandığım makine mühendisi arkadaşım Sayın Mevlüt KESİCİ'ye ve çalışmamın her aşamasında beraber çalıştığım arkadaşım ve aynı zamanda benim gibi yüksek lisans öğrencisi olan Sabri BÜLBÜL hocama tüm kalbi duygularıyla şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca zamanlarından çaldığım, yalnız bıraktığım biricik çocuklarım, oğlum Béjan ve kızım Havin'e teşekkür ederim.

Son olarak 1 Mayıs 2005 ten beri her türlü kararında yanımda olan ve beni bu yolda cesaretlendiren hayat arkadaşım biricik eşime; tez çalışmam boyunca göstermiş olduğu sabır, anlayış ve desteğinden dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Murat KURT

Bingöl 2022

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Titanyum ve Alaşımları.....	5
2.1.1. Titanyumun Genel Özellikleri	5
2.1.2. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	9
2.1.3. Titanyum Alaşımlarının Kullanım Alanları	11
2.2. Biyomalzemeler	11
2.2.1. Biyomalzemelerin Sınıflandırılması	13
2.2.1.1. Seramikler.....	13
2.2.1.2. Kompozitler	14
2.2.1.3. Polimerler	14
2.2.1.4. Metaller.....	15
2.2.2. Biyomalzemelerin Özellikleri	15
2.3. Toz Metalurjisi.....	16
2.3.1. Metal Tozlarının Hazırlanması ve Üretim Yöntemleri	18
2.3.1.1. Mekanik Yöntemle Toz Üretimi.....	19
2.3.1.2. Kimyasal Yöntemle Toz Üretimi.....	21
2.3.1.3. Elektrolitik Yöntemle Toz Üretimi.....	22
2.3.1.4. Atomizasyon Yöntemiyle Toz Üretimi.....	23
2.3.2. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Parça Üretim Aşamaları	25
2.3.2.1. Toz Hazırlama Aşamaları	25

2.3.2.2. Tozu Karıştırma Aşaması.....	26
2.3.2.3. Tozu Presleme Aşaması	26
2.3.2.3.1. Tek Yönlü Presleme.....	28
2.3.2.3.2. Çift Yönlü Presleme.....	30
2.3.2.3.3. İzostatik Presleme	31
2.3.2.4. Sinterleme Aşaması.....	33
2.3.2.5. İkincil İşlemler	36
2.3.3. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları.....	36
2.3.4. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	37
3. MATERYAL VE YÖNTEM	39
3.1. Kullanılan Materyaller ve Numune Hazırlama	40
3.2. Numunelerin Üretimi ..	43
3.3. Numunelere Uygulanan Testler	46
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	51
4.1. Yoğunluk Testi ve Analizi	51
4.2. XRD Sonuçları ve Analizi	52
4.3. SEM ve EDS Sonuçları ve Analizi.....	54
4.4. Sertlik Testi Sonuçları ve Analizi.....	60
4.5. Çekme Testi ve Kırık Yüzey Sem Analizi.....	62
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	73

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Ti	: Titanyum
°C	: Santigrat
Cu	: Bakır
Mo	: Molibden
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işını Difraktometresi
EDS	: Enerji Dağılımı X- ışını Spektroskopisi
d	: Yoğunluk
d _{ham}	: Ham Yoğunluk
TM	: Toz Metalurjisi
N	: Newton
kN	: Kilonewton
g/cm ³	: Gram/Santimetreküp
Pa	: Paskal
MPa	: Mega Paskal
µm	: Mikrometre
HMK	: Hacim Merkezli Kübik Yapı
HMT	: Hacim Merkez Tetragonal
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik Yapı
HV	: Vickers Sertlik Değeri
D	: Çap
PA	: Plastik Akış
G	: Kayma Modülü
α	: Alfa
β	: Beta
HIP	: Sıcak İzostatik Pres

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Saf titanyumun allotropik yapısı.....	7
Şekil 2.2.	Üç boyutlu faz şeması.....	9
Şekil 2.3.	Biyomalzeme türleri.....	13
Şekil 2.4.	Biyomalzemelerin özellikleri.....	16
Şekil 2.5.	Toz metalurjisi işlem basamakları.....	18
Şekil 2.6.	İri yapıdaki talaş görünümü.....	19
Şekil 2.7.	Mekanik öğütme yönteminin şematik gösterimi.....	20
Şekil 2.8.	Mekanik alaşımlama.....	21
Şekil 2.9.	Elektrolitik yöntemle toz üretiminin mekanizması	23
Şekil 2.10.	Basınç değerine göre toz parçanın fiziksel özelliklerinin değişimi.....	28
Şekil 2.11.	Tek yönlü presleme	29
Şekil 2.12.	Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı.....	29
Şekil 2.13.	Çift yönlü sıkıştırma.....	30
Şekil 2.14.	Çift yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı	31
Şekil 2.15.	Sinterleme sıcaklığının toz parçaların özelliklerine etkisi.	33
Şekil 2.16.	Sinterleme esnasında nokta teması bağlarının gelişimi.....	34
Şekil 2.17.	İki küre sinterleme modeli.....	35
Şekil 2.18.	TM üretilmiş çeşitli ürünler.....	36
Şekil 2.19.	Toz metalurjisinin kullanım alanları.....	37
Şekil 3.1.	Tez çalışmasında yapılan işlem çalışmaların basamakları.....	39
Şekil 3.2.	Çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüleri	41
Şekil 3.3.	Tozların tartıldığı hassas terazi.....	42
Şekil 3.4.	Tozların karıştırma işleminde kullanılan çel-mak marka cihaz.....	42
Şekil 3.5.	Soğuk presleme işleminin yapıldığı hidrolik ünite.....	43
Şekil 3.6.	Silindirik numune üretiminde kullanılan çelik kalıp.....	44
Şekil 3.7.	Çekme numune üretiminde kullanılan çelik kalıp.....	44
Şekil 3.8.	Sinterlenmemiş silindirik numune.....	45

Şekil 3.9.	Sinterlenmemiş çekme numuneleri.....	45
Şekil 3.10.	Sinterleme işleminin yapıldığı fırın.....	46
Şekil 3.11.	Sinterlenen silindirik numune görselleri.....	47
Şekil 3.12.	Sinterlenmiş çekme numuneleri.....	47
Şekil 3.13.	SEM/EDS cihazı.....	48
Şekil 3.14.	Vickers sertlik ölçüm cihazı.....	49
Şekil 3.15.	Sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası çekme numuneleri.....	49
Şekil 3.16.	Çekme testinin yapıldığı cihaz	50
Şekil 4.1.	Üretilen numunelerin bağıl yoğunluk değerleri.....	51
Şekil 4.2.	Üretilen numunelerin XRD analizinden elde edilen paternler.....	53
Şekil 4.3.	Sinterlenmiş alaşımların SEM görüntüleri.....	56
Şekil 4.4.	Ti ₄ Mo ₅ Cu numunelerinin SEM ve EDS nokta analizleri.....	57
Şekil 4.5.	Ti ₁₆ Mo ₅ Cu numunelerinin SEM ve EDS nokta analizleri.....	58
Şekil 4.6.	Üretilen alaşımların vickers sertlik değerleri	61
Şekil 4.7.	Alaşımların çekme dayanımı değerleri	62
Şekli 4.8	Alaşımların % uzama grafiği.....	62
Şekil 4.9.	Sinterlenen alaşımların kırık yüzeyi SEM görüntüleri.....	63

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Titanyuma ait mekanik özellikler.....	6
Tablo 2.2. Titanyuma ait fiziksel özellikler.....	7
Tablo 2.3. Titanyum alaşımlarının faz yapılarına göre üç yapısal türünün özellikleri.....	10
Tablo 2.4. Farklı toz üretim metotlarıyla elde edilen bazı materyaller	25
Tablo 3.1. Kullanılan elementel tozlara ait özellikler.....	40
Tablo 3.2. Hazırlanan numunelerin ağırlıkça kimyasal bileşimlerinin yüzde (%) oranları.....	40
Tablo 4.1. Hazırlanan numunelerin vickers sertlik değerleri.....	60

BİYOMALZEMELER İÇİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN TiMoCu ALAŞIMLARININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışma biyomalzeme alanında kullanılmak üzere toz metalurjisi prosesleri kullanılarak $\text{Ti}_{1-x}\text{Mo}_x\text{Cu}$ alaşımları üretilmiştir. Farklı oranlarda Mo takviyesi yapılarak, 550 MPa basınç altında soğuk preslemeyle şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numuneler 5 farklı sıcaklıkta 180 dakika bekleme süresi ile sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme süresi boyunca oksidasyondan korumak için %99,99 saflıkta argon gazı kullanılmıştır. Daha sonra numunelere Arşimet prensibiyle yoğunluk testleri yapılmıştır. En yüksek yoğunluğa 1300°C 'de sinterlenen alaşımlarda ulaşıldığı için; X-ışınları analizi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüzey kırık analizi, (EDS) analizleri, çekme, sertlik gibi mekanik testler 1300°C üretilen numunelere uygulanmıştır. Yoğunluk testi ile artan Mo oranıyla bağlı yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmüştür. XRD analizi ile faz yapısını, SEM ile mikroyapı özellikleri belirlenmiştir. Mekanik özellikleri için, vickers sertlik ve çekme testlerinden faydalanılmıştır. İlave edilen alaşım elementlerinin ve farklı sinterleme sıcaklıklarının mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Mo artış oranına bağlı olarak mukavemet ve yoğunlukta azalma görülürken, sertlikte artış tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Titanyum alaşımı, toz metalurjisi, sinterleme, mikroyapı, mekanik özellikler.

INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TiMoCu ALLOYS PRODUCED BY POWDER METALLURGY FOR BIOMATERIALS

ABSTRACT

In this study, Ti_xMo₅Cu alloys were produced using powder metallurgy processes for use in the field of biomaterials. It was shaped by cold pressing under 550 MPa pressure by adding Mo reinforcement at different rates. The shaped samples were subjected to sintering at 5 different temperatures with a waiting time of 180 minutes. During the sintering period, 99.99% pure argon gas was used to protect it from oxidation. Then, density tests were performed on the samples with Archimedes principle. Since the highest density is reached in alloys sintered at 1300°C; Mechanical tests such as X-ray analysis (XRD), scanning electron microscopy (SEM), surface fracture analysis (EDS), tensile and hardness were applied to the samples produced at 1300°C. With the density test, it was observed that the relative density values decreased with increasing Mo ratio. Phase structure was determined by XRD analysis and microstructure properties were determined by SEM. For mechanical properties, vickers hardness and tensile tests were used. The effects of added alloying elements and different sintering temperatures on microstructure and mechanical properties were observed. Depending on the increase in Mo, a decrease in strength and density was observed, while an increase in hardness was detected.

Keywords: Titanium alloy, powder metallurgy, sintering, microstructure, mechanical properties.

1. GİRİŞ

Canlı dokuların fonksiyonlarını gerçekleştirmeleri amacıyla kullanıma sunulan biyomalzemeler sentetik yada doğal olarak elde edilen malzeme çeşitleridir. Biyolojik düzenle birbirini etkileme halinde olan bu cansız malzemeler biyomalzeme olarak tanımlanırlar. Bu malzemeler genelde protez tıbbi cihaz olarak kullanılmaktadırlar.

Son yıllarda geliştirilerek üretilen titanyum ve alaşımları, biyomedikal ve diş implant uygulamalarında kullanımı artan ve önemi gün geçtikçe artan malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu alaşımların; şekil hatırlatma özellikleri, süper elastiklikleri, yüksek derecede korozyon dirençleri, büyük oranda darbe sönümleme kapasiteleri ve eşit oranda dağılmış gözenekli yapıları sayesinde canlı dokuların büyümesine imkan sağlayan biyoyumluluk özeliğinden kaynaklı bir çok biyomedikal ve diş alanında tercih edilmektedirler (Sarıtaş vd. 2008).

Titanyum malzemesinin araştırılması ve geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar büyük bir hızla artmıştır. Özellikle uzay sanayisinde kullanımı önemli bir yer edinmiştir. Önümüzdeki yıllarda bu alanda titanyum malzemeleri toplam tüketilen malzemeler arasında oransal olarak artmaya devam edecektir (Allen, 1996).

Toz metalürjisi tekniği ile üretilen alaşımların maliyeti diğer üretim tekniklerine göre(özellikle döküme göre) daha ekonomiktir. Bu yöntemle üretilen malzemelerin kimyasal özelliklerine üretim aşamasında da müdahale edilebilir olması büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada elde edilen alaşım numunelerinin oransal özelliklerinin belirlenmesi ve üretiminde kullandığımız proses parametreleri literatür araştırması sonucu belirlenmiştir.

Bu çalışma genel anlamda beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm giriş kısmında toz metalürjisi genel bir bakış açısı ile ele alınmıştır. İkinci bölüm kaynak özetleri kısmında konu ile ilgili yapılan literatür taraması yapılmıştır.

Daha sonra sırasıyla Titanyum ve alaşımlarının genel özellikleri, sınıflandırılması ve kullanım alanları, biyomalzemelerin sınıflandırılması, özellikleri, toz metalurjisinin üretim aşamaları geniş bir çerçevede ele alınmıştır. Üçüncü bölümde materyal ve yöntem kısmında; çalışmada kullanılan malzeme, materyal, cihaz bilgileri ve uygulanan parametrelere yer verilmiştir. Dördüncü bölümde ise test ve analizlerde elde edilen sonuç ve veriler tablo ve grafiklere dönüştürülmüş olup bunlar detaylıca tartışılmıştır. Beşinci bölümde ise çalışmada elde edilen bulgular ışığında varılan sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapılan literatür araştırması sonucu biyomalzemeler için toz metalurjisi yöntemiyle üretilen TiMoCu alaşımları ile ilgili sınırlı sayıda çalışmanın yapıldığı görülmüştür. TiMoCu alaşımları ile ilgili yapılan bazı bilimsel çalışmalar özet şeklinde aşağıda verilmiştir.

Son yıllarda titanyumun çeşitli elementlerle alaşımlama fikri üzerinde çok değişik çalışmalar yapılmıştır. Titanyumla alaşım yapma özellikle korozyon direncini yükseltmek mevcut mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, geliştirilmesi amacıyla yapılmıştır. Bu sebeble, Ti alaşımlarında bulunan fazlar ve kristal yapısı mekanik özellikleri üzerinde oldukça belirleyicidir. Bazı alaşım elementlerinin takviye edilmesi veya oranlarının artırılıp düşürülmesi bazı fazlarını kararlı duruma getirebiliyor. Bu sebepten dolayı, titanyumu alaşımlama, bazı mekanik ve diğer özellikleri artırmak, geliştirmek malzeme biliminde oldukça önemli bir hal almıştır. Alaşım genel anlamda; “bir metal ile metalik bağlanma karakteri bulunan diğer metal(ler)in karışımı” olarak tanımlanmaktadır. Malzemelerin değişik özelliklerini iyileştirmek, geliştirmek amacıyla titanyuma çoğunlukla bakır (Cu), olmak üzere; gümüş (Ag), alüminyum (Al), demir (Fe), vanadyum (V) ve çinko (Zn) gibi birçok değişik elementler takviye edilerek farklı kombine alaşımlar üretilmiştir (Liu et al. 2017).

Titanyum ve titanyum esaslı alaşımlar yüksek oranlı mukavemet mükemmel korozyon direnci ve diğer metalik malzemelere göre olağanüstü biyouyumluluğa sahiptir. Bu nedenle başta havacılık, kimya, biyomedikal olmak üzere birçok alanda tercih edilmektedirler (Luo et al. 2012; Akbarpour et al. Javadhesari, 2017; Liu et al. 2019; Wang et al. 2019; Alshammari et al. 2020).

Xu et al. (2020), Ti-Cu bazlı alaşımlar üzerinde yaptıkları çalışmada artırılarak takviye edilen bakır oranının sürtünme, aşınma ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında Ti içerisine değişik oranlarda (%2,5; %7 ve %14) Cu

ilave edilmiştir. Artırılan Cu oranıyla intermetalik faz olan Ti_2Cu fazının yapıda daha fazla oluştuğunu tespit edilmiştir. Bu durum ise malzemenin dayanma mukavemetini artırırken, sürtünme katsayısında da azalma sağladığını kayıt etmişlerdir.

Saf titanyum, ticari olarak mükemmel biyouyumluluk ve tutarlı mekanik özellikleri sayesinde gün geçtikçe önem arz eden bir malzeme haline gelmiştir. Titanyum ve alaşımlarından elde edilen ürünler diğer malzemelerden elde edilen ürünlere göre daha yüksek maliyetli almaları sebebiyle bu ürünlerin üretimini dezavantajlı kılmaktadır. Üretim metotlarındaki karmaşık süreçler işlenebilirlikteki zorluklar, yüksek dereceki erime noktaları, atmosfer şartlarındaki yüksek reaktivite, ısı iletkenlikteki düşüklük vb sebebler titanyum ve alaşımlarının maliyetini oldukça artırmaktadır (Ramaswamy et al, 2016; Kikuchi et al. 2003).

Takahashi et al. (2002), Ti-Cu üzerine yapmış oldukları çalışmada; Ti ana matrisine ağırlıkça %2 ile %20 arasında Cu takviyesi yaparak elde ettikleri alaşımlarının mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında tüm alaşımların α -Ti faz yapılarına sahip olduklarını rapor etmişlerdi. Ancak %10 Cu ile alaşımlamanın matrisinde Ti_2Cu fazını indüklediğini tespit etmişlerdi. Daha sonra çalışmalarında %5 oranında Cu içeren Ti-Cu alaışımının %6'dan fazla Cu içeren Ti-Cu alaşımlara göre daha fazla uzama ve yaklaşık olarak 700 MPa gerilme dayanımına ulaştıklarını belirtmişlerdir.

Sun et al. (2008), Ti-2,5Cu alaışımında bulunan β fazının Ti_2Cu ve α -Ti fazlarına ayrışmasından kaynaklı, yapıda oluşan intermetalik Ti_2Cu fazın alaışımın sertliğini arttırdığını rapor etmişlerdir. Çalışmalarında Cu içeriği titanyum alaışımının mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde Ti_2Cu 'nun morfolojisi ve dağılımının çok önemli bir rol oynadığını ortaya koymuşlardı (Sun et al, 2004).

Peng et al. (2018), Ti-6Al-4V-5Cu alaşımları üzerine yapılan çalışmada Ti_2Cu ve β fazlarının dislokasyon sabitleme etkisini artırdığını ve bu durumun ise alaışımın mukavemetinde bir artışla sağladığını ortaya koymuşlardır. Bu nedenle, Ti-Cu alaşımlarında bulunan farklı yapıdaki fazların türü, boyutu ve dağılımı mikroyapıların optimizasyonunda büyük önem taşımaktadır.

Ti-Cu alaşımları saf titanyuma göre biyouyumluluk, yüksek antibakteriyel, ögütebilirlik ve yüksek korozyon direnci vb. özellikleri nedeniyle gün geçtikçe daha fazla biyomedikal malzemeleri olarak tercih edilmektedirler (Takahashi et al, 2005). Ti-Cu alaşımlarının daha fazla tercih edilme sebebi ise 900 MPa'nın üzerinde çekme mukavemetleri ve 850 MPa'nın üzerinde akma dayanımlarından kaynaklanmaktadır. Ti-Cu alaşımlarında elde edilen bu değerler biyouyumlu malzemeler için Ti alaşımları arasında en çok kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının mekanik değerleriyle yaklaşık olarak aynı seviyededir (Bao et al. 2018).

Liu et al. (2014), Titanyumun bakırla yapmış olduğu alaşımlar arasında; Ti_2Cu alaşımının en iyi sünekliğin sağlandığı, ancak ağırlıkça %5 ile %25 Cu içerikli Ti-Cu alaşımlarında süneklikte bir düşüş sağlandığını söylemişlerdi. Özellikle Ti-7Cu alaşımlarında bulunan %Cu oranı, ince taneli Ti_2Cu parçacıklarının oluşumuna sebep olduğu için süneklikte daha fazla düşüş sağladığını bildirmişler.

2.1. Titanyum ve Alaşımları

Titanyum bazlı alaşımlar yüksek korozyon direnci, mükemmel mekanik, fiziksel ve biyouyumluluk performansları nedeniyle başta biyomalzeme olmak üzere çok geniş bir alanda talep görmektedir. Titanyum bazlı alaşımların araştırılması, geliştirilmesi ve üretim çalışmaları gün geçtikçe gelişerek devam etmektedir.

2.1.1. Titanyumun Genel Özellikleri

Hafif yapısı ve grimsi bir görünüme sahip titanyum oldukça dayanıklı bir elementtir. kimyasal yapısı ve görünümü zirkonyuma çok benzemektedir. Titanyum, doğada miktarca bulunan elementler arasında dokuzuncu sırada bulunurken, metaller arasındaki sıralamada ise başta demir, alüminyum ve magnezyumdan sonra dördüncü sırada yer almaktadır. Yeryüzünde mineraller şeklinde bulunan titanyumum yirmiden fazla çeşidinin olduğu düşünülmektedir. Rutil, anataz ve brakit gibi mineraller tepkimelere karşı direnç gösteren en önemli mineralleri çeşitleridir (Gültekin, 1993). Diğer metallere oranla üretim maliyetleri daha fazladır. Direkt olarak cevherinden elde edilmeleri oldukça zordur. Titanyumun üretim proseslerindeki zorluklar ve yüksek derecedeki ergitme

tekniklerin kullanılmasından kaynaklı maliyeti oldukça yükseltmektedir. Ülkemizde de sadece Manisa Alaşehirde bir rezervi olduğu bilinmektedir. Yüksek derecedeki reaktif özeliği, karbon, hidrojen, azot, oksijen vb maddeler ile reaksiyona girme eğiliminden ötürü saf titanyumun üretimi oldukça zordur (Yalçın, 2007).

Titanyum, alüminyum (Al) ile çelik arasında (4.51 gr/cm^3) değerinde bir yoğunluğa sahiptir ve nispeten hafif bir elementtir. Titanyum demirden daha fazla bir ergime derecesine (1668°C) ve alüminyum ile demir arasında orta değer bir elastisite modülüne sahiptir (Smith et al. 2001). Titanyuma ait bazı mekanik Tablo 2.1’de, fiziksel özellikler ise Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

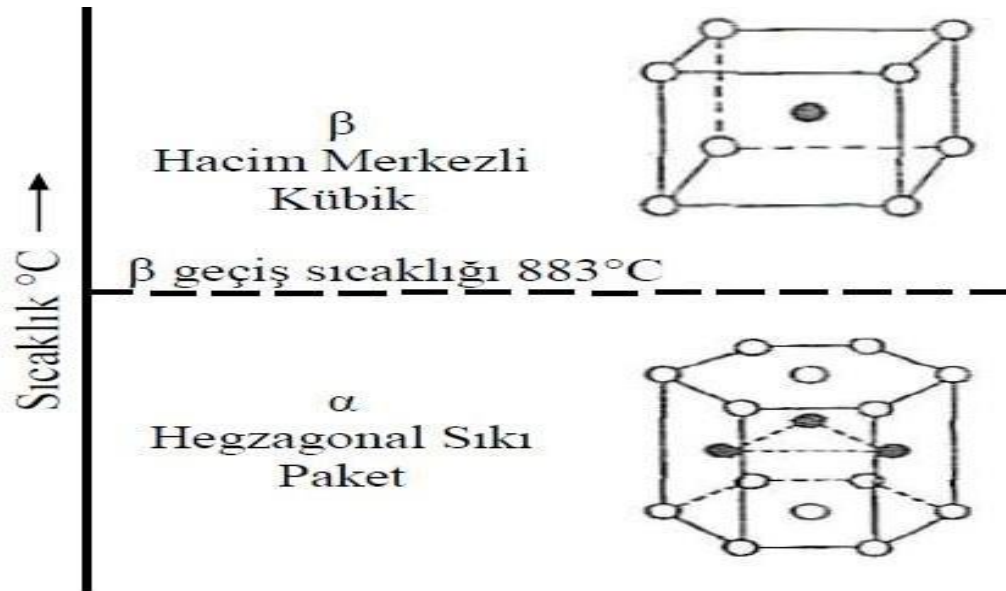
Tablo 2.1. Titanyuma ait mekanik özellikler (Keskin, 1991).

Mekanik Özellikler	Saf Titanyum (%98,9-99,5)
1-Elastisite modül (GPa)	102-107
2-Kesme modülü (GPa)	42
3-Çekme dayanımı (MPa)	260-690
(oda sıcaklığında 425°C ’de)	
4-Akma dayanımı (MPa)	140-325
(oda sıcaklığında	186-585
425°C ’de)	70-325
5-Uzama:(%)	17-30
oda sıcaklığında:	
425°C ’de :	25-30
6-Sertlik (Rockwell)	70-100 R _B
7-Kesme dayanımı (MPa)	345-415

Tablo 2.2. Titanyuma ait fiziksel özellikler (Keskin, 1991).

Fiziksel Özellikler	Saf Titanyum (%98,9-99,5)
Yoğunluk (gr/cm ³)	4,51
Ergime sıcaklığı (°C)	1650-1670
Isı iletkenliği (KCal/sa/cm/°C)	13,4-17,1
Genleşme katsayısı (200-900°C)(°C ⁻¹)x10 ⁶	9,18-9,90
Özdirenç (20°C)(μΩ-cm)	48-60

Titanyumda iki farklı allotropik kristal yapı mevcuttur. Bunlar sıkı düzenli hegzagonal (SDH) yapıya sahip α fazı bulunurken hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahip β fazı bulunur. Şekil 2.1’de 883 °C’ye kadar kararlı α fazı, 883°C’nin üzerinde SDH- α fazından HMK- β fazında dönüşür (Smith et al. 2001).



Şekil 2.1. Saf titanyumun allotropik yapısı

Saf titanyumun düşük bir yoğunluğa sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda; yüksek mukavemet, Sürünme direnci, rijitlik, tokluk vb. birçok özeliğe sahiptir. Ancak en önemli özeliği mükemmel bir korozyona direncine sahip olmalarıdır. Bu özeliğinden dolayı petrokimya, havacılık ve biyomedikal endüstrisinde geniş bir alanda kullanılmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının yüksek erime dereceleri çeliklerinkinden çok daha fazladır (URL 3, 2000; URL 2, 2013; Ahmed et al. 2014). Oksijene duyarlılığı yüksek olan bir elementtir (Erdem ve Aydın, 2006).

Titanyum endüstrinin bir çok alanında kullanılmaktadır. Özellikle değişik malzemelerin alaşımlandırılma işlemlerinde kullanılmaktadır (Anık, 1986).

Titanyumun ait bazı temel özellikler şu şekilde açıklanabilir:

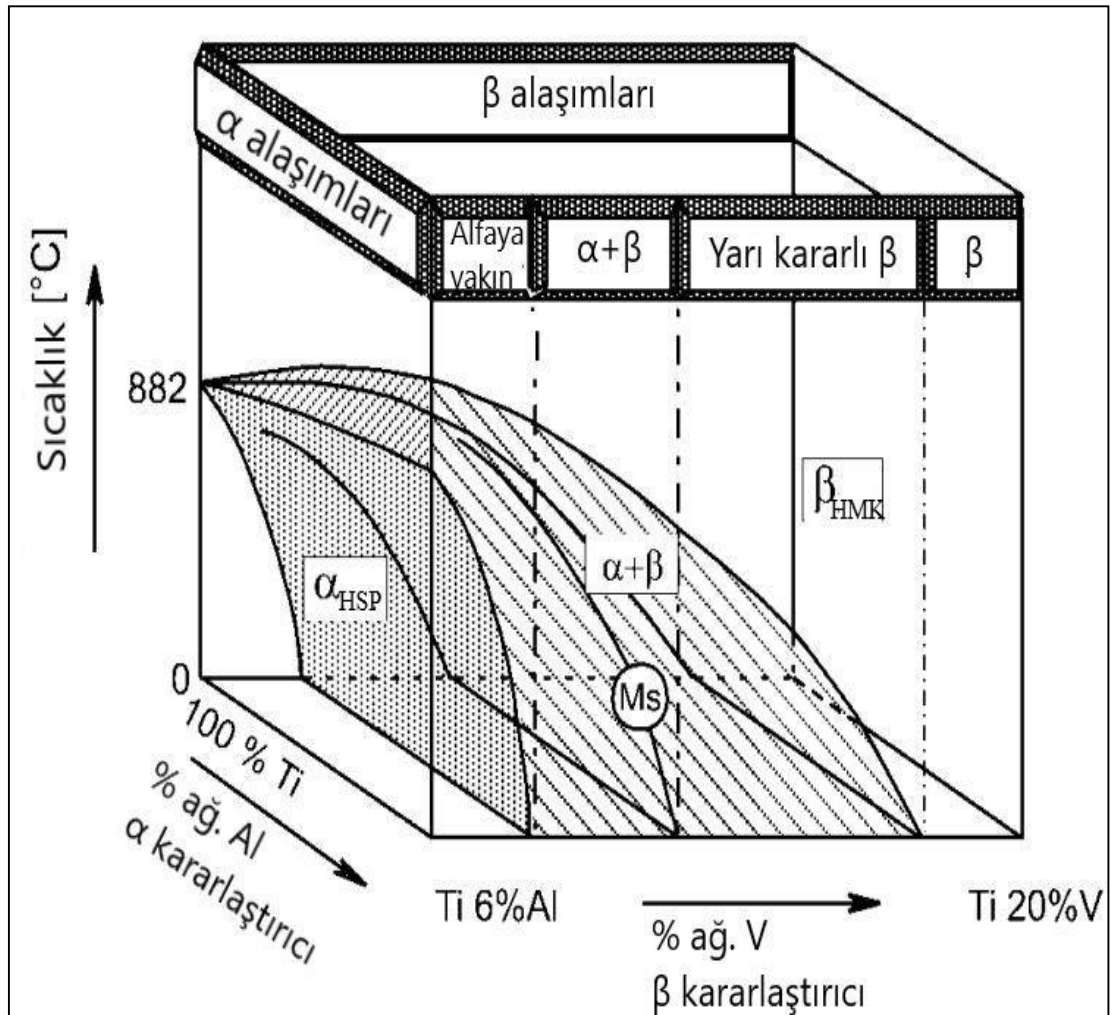
- Hemen hemen tüm formlarda bulunuyor olması,
- Daha kolay temin edilebilmesi ve daha ekonomik olması,
- Kaynakla birleştirilebilirlik özeliği,
- Düşük bir yoğunluğa karşın çelik kadar dayanıma sahip olma özeliği,
- Isıl şoklara ve yüksek sıcaklıklara karşı yükek dirençli göstermesi,
- Biyouyumluluk özeliği ve canlı dokulara karşı zehirlenme yapmaması (Bağcı, 2001).

Titanyum dünyada oldukça yaygın bir dağılıma sahiptir. Doğada yaklaşık olarak %0,6'lık konsantrasyonla bulunan bir elementir. Metalin başlıca bilinen konsantre kaynakları rutil, ilmenit, brokit titanomagnetit ve anataz mineralleridir (Welsch et al. 1993).

Bir çok mühendislik uygulamasında, ağır, dayanıksız ve maliyeti yüksek malzemenin yerine titanyum esaslı malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde mühendislik tasarımlarında istenilen dayanıklılık, hafiflik, güvenlik ekonomik, ömür vb. kriterler baz alındığında bu alaşımlar rahatlıkla düşünülebilir.

2.1.2. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımlarında, sınıflandırma yapılırken oda sıcaklığındaki şartlara bağlı olarak yapılarında bulunan α ve β faz oranlarına göre yapılmaktadır. Titanyum alaşımları; α alaşımları, β alaşımları ve α - β alaşımları olmak üzere faz yapılarına göre üç gruba ayrılırlar. α alaşımlarının yapısında sadece α fazından oluşmaktadır. β alaşımlarının yapısında yüksek oranda β fazı mevcuttur. α - β alaşımları ise çözündürme sıcaklığında hem α hem de β fazı içermektedir. Yapısında α faz oranı β fazından çok daha fazla ise bu alaşımlara da yakın- α alaşımları denilmektedir. ‘süper α ’ veya ‘lean β ’ isimleri de bu alaşımlar için kullanılmaktadır. Titanyum ve titanyum alaşımlarının genel sınıflandırması gösteren üç boyutlu faz şeması Şekil 2.2’de verilmiştir (McCracken, 1999; URL 2, 2013).



Şekil 2.2. Üç boyutlu faz şeması (Ahmed et al. 2014).

Alfa(α) titanyum alaşımları, tek fazlı bir yapıda olup katı bir çözültiden meydana gelmektedir. Bu alaşımlar yüksek oksidasyon, güçlü aşınma ve kararlı bir yapıya sahiptirler. Mukavemet değerleri ise düşüktür. Beta(β) titanyum alaşımlarıda katı çözültiden meydana gelen tek fazlı alaşımlardır. Mukavemet değerleri oldukça yüksektirler. α - β titanyum alaşımları ise tok ve yüksek sıcaklıklarda mukavemeti düşük çift fazlı bir yapıya sahiptirler. Titanyum alaşımlarının üç yapısal türünün karakteristik özellikleri Tablo 2.3’de verilmiştir (Characteristic et al. 2013).

Tablo 2.3. Titanyum alaşımlarının faz yapılarına göre üç yapısal türünün özellikleri (Characteristic et al. 2013).

Alfa (α)	Bu alaşımlara ısıtıl işlem uygulanmaz ve genellikle kaynak edilebilirler. Orta-düşük arası bir dayanıma sahiptir, çentik toklukları iyidir, makul bir süneklik ve çok düşük sıcaklıklarda mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Daha yüksek alaşımlı α ve yakın- α alaşımlar yüksek sıcaklıkta iyi sürünme dayanımı ve oksidasyon direnci de sunar.
Alfa+Beta α + β	Bu alaşımlara ısıtıl işlem uygulanabilir ve α alaşımlara göre daha iyi kaynak edilebilirler. Dayanım düzeyleri orta- yüksek arasındadır. Bu alaşımların sıcak şekil verme özelliği iyidir, fakat yüksek sıcaklıkta sürünme dayanımı çoğu α alaşımları kadar iyi sonuçlar vermez..
Beta(β)	β alaşımlı veya yakın alaşımlara raharlıkla ısıtıl işlem uygulanabilir, genellikle bu alaşımlara kaynak yapılabilir. Orta sıcaklıklar için iyi sürünme direnci ve yüksek dayanımlar sağlar. β alaşımlarına çözündürme işlemine uygulandığı zaman mükemmel şekillendirilebilirlik sağlanabilir..

2.1.3. Titanyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Hızla gelişen teknolojik gelişmeler yeni ve farklı özelliklere sahip malzeme ihtiyacını da artırmıştır. Sanayinin çok farklı sektörlerinde, düşük yoğunluklu, dayanımı yüksek, sert, yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci, yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımı vb. özelliklere sahip malzemelere talep artmaya başlamıştır.

Farklı özellikteki malzemelere artan talep malzeme biliminde da farklı arayışlara sevk etmiştir. Bu kapsamda titanyum ve titanyum alaşımlarına gün geçtikçe daha ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Yukarda geniş bir biçimde özellikleri açıklanan bu alaşımlar kimya, nükleer, uçak-uzay, jet motorlarında, gözlük çerçevelerinde, eşanjör yapımında, tıbbi protez, diş implant uygulamalarında, otomotiv sektöründe, haberleşme, gemi yapımı vb. bir çok alanda kullanılmaktadırlar. Kaynak edilebilirlik özeliği de kullanım alanının artmasında etkilili bir faktör olmuştur (Keskin, 2009).

2.2. Biyomalzemeler

Biyomalzemeler başta tıbbi cihaz, protez ve diş implant olmak üzere bir çok medikal alanda geniş bir kullanım alanına sahip malzemelerdir. Canlı dokularla beraber kullanıldıkları için mekanik ve kimyasal özelliklerinin bilinmesi ve incelenmesi önem arz etmektedir. 1960'lı yıllardan itibaren kullanılmaya başlanan bu malzemeler günümüzde de oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Yapay olarak üretilen biyomalzemeler metal ve alaşımlarıyla metalik bağlarla bağlanmaları onlara üstün fiziksel ve mekanik özellikler kazandırmıştır. Biyomalzemeler elde edildikleri malzeme türüne göre seramikler, kompozitler, polimerler ve metaller olmak üzere değişik gruplara ayrılırlar. Bu malzemeler canlı vücut içerisinde kemik ve etrafındaki dokulara iyon salınmasını sağlamaktadır. Bu durum bir elektron akışı meydana getirir. Oluşan akış ile metalik biyomalzeme arasında korozyon oluşmasına sebep olur. Biyomalzemelerden beklenen en önemli özellik canlı dokuların fonksiyonlarını yerine getirmede olumsuz reaksiyon etki ve iltihaplara sebep olmaması gerekir. Bu durum onları biyoyumlu malzeme olarak tanımlar. Titanyum ve alaşımlarının dış yüzeyini kaplayan bir oksit tabakası bulunmaktadır. Bu oksit tabakasının varlığı bu malzemelerde yüksek korozyon dayanımını

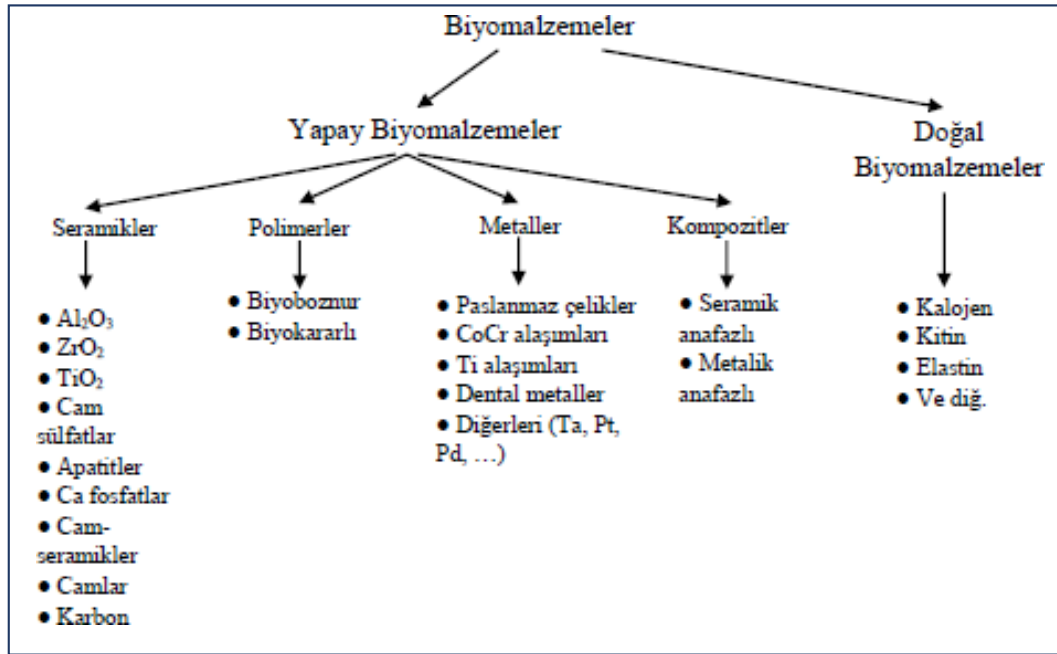
sağlamaktadır. Bu oksit tabakası aynı zamanda vücut içerisinde stabil davranış sergilemesini sağlamaktadır (Yılmaz vd. 2019).

Biyomalzemeler, dokuların içerisinde değişik koşul ve ortamlarda kullanılmaktadır. Biyomalzemelerden beklenen özellikler, kullanım alanına ve özeliğine göre farklılık göstermektedir. Dokularda kemik yerine kullanılan ve ortopedik olarak tanımlanan bu malzemelerden üstün mekanik özellikler beklenir. Ayrıca yüksek oranda yorulma dayanımına sahip olmaları gerekir. Biyomalzemeler, canlı dokularda sadece protez, tıbbi cihaz ve implant malzemeler olarak değil, vücut dışında kullanılan ve vücutla temas halinde olan ekstrakorporeal cihazlar olarakta kullanılmaktadır (Güven, 2014).

Biyomalzemeler, canlı doku ile sürekli temas halinde oldukları için canlı sağlığında biyolojik etkiler yaratabilir. Yaratığı bu biyolojik etkiler biyoinert, biyotolerant, biyoaktif ve biyobozunur olarak adlandırılan biyolojik malzeme çeşitlerini meydana getirir. Etkileşim içerisinde olduğu canlı doku ile uyumluluk gösteren herhangi bir olumsuz etkisi yok denecek kadar az olan malzemelere biyotolerant biyomalzemesi olarak tanımlanırlar. Biyotolerant malzemelere örnek olarak polimerler ve metalleri örnek gösterebiliriz. Polimerler ve metaller çoğunlukla ara yüzey reaksiyonu ile çevrelenirler. Biyoinert biyomalzemeler, doku çevrelendikleri için canlı doku ile etkileşimleri azalmaktadır. Bu durum onlara kimyasal kararlılığı sağlamaktadır. Biyoinert biyomalzemelere en iyi örnek Al_2O_3 ve ZrO_2 verilebilir. Dokularla etkileşim haline olup yeni hücre ve yeni doku meydana getirmesine yardım eden malzemelere biyoaktif malzeme denilmektedir. Biyoaktif cam ve biyoaktif seramik bu malzemelerin en önemli çeşitleridir. Biyomalzemelerin diğer önemli bir çeşidi ise biyobozunur malzemelerdir. Biyobozunur malzemeler canlı dokuların etrafını çevreleyerek onları emdikten sonra kimyasal olarak parçalamasını sağlar ve yok eder. Biyobozunur malzemelere örnek olarak seramikler, polimerler, ve magnezyum alaşımları verilebilir (Dikici, 2010).

2.2.1. Biyomalzemelerin Sınıflandırılması

Canlı dokulara uyum sağlamak amacıyla kullanılan biyomalzemeler doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Yapay olarak üretilen biyomalzemeler kompozitler, seramikler, polimerler ve metaller olmak üzere dört grupta çeşitlendirilirler. Şekil 2.3'te biyomalzemelerin sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 2.3. Biyomalzeme türleri (Vallet, 2001).

2.2.1.1. Seramikler

Bu malzemelerin en önemli özeliği yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı olmalarıdır. Seramikler silikat, metal oksit ve inorganik gibi türleri bulunmaktadır. Seramikler Biyomalzeme alanında oldukça tercih edilen malzemelerdir. Seramikler polikristal yapıya sahiptirler. Biyoseramik malzemeler; inert, biyoaktif, yarı inert (reaktif), biyobozunur ve tepkimeye giren özelliklerine sahiptirler. Biyoseramiklerin başlıca çeşitleri şunlardır; Al₂O₃ (alumina), Ca₃ (PO₄)₂ (kalsiyum fosfat) ,Cam seramikler, ceravital ve ZrO₃ (zirkonya). Biyoseramiklerin kullanım alanları şu şekilde verilebilir; sterilizasyon cihazları, dolgu malzemeleri, protez, tıbbi cihaz, ilaç salınım sistemleri ve vida kaplamaları (Park et al. 2003).

2.2.1.2. Kompozitler

Kompozitler, farklı kimyasal yapıya sahip malzemelerin homojen bir şekilde bir araya getirilerek farklı üretim yöntemleri uygulanarak elde edilen malzemelerdir. Tek malzeme türü ile karşılanmayan mekanik özellikleri elde etmek için en az iki veya daha fazla farklı türdeki malzemenin bir araya getirilmesiyle elde edilen ürünlerdir. Kompozitler üretilirken malzeme özellikleri kontrol edilebilir. Özelliklerinin geliştirilebilir olması diğer türlere karşı üstünlük sağlar. Canlı vücut kemikleri, diş dokusu, deri gibi biyomalzemeler doğal kompozitlere birer örnektir. Bu doğal kompozitler yapısında gözenekler, partiküller, fiber olup mikro ölçeğe sahiptirler. Biyomalzemeler doğrudan canlı sağlığını etkilediğinden dolayı elde edilen bütün malzemelerin en iyi biyouyuma sahip olması istenilmektedir. Bu malzemeler dokuyla sürekli etkileşim halinde olduğu için bozunmaması gerekmektedir. Biyokompozitler çoğunlukla kemik sabitleştirici, diş uygulamalarında sabitleştirici olarak, protez vidalama işlemlerinde, kalça protez sapları, dolgu malzemesi olarak, kemik destekleyici protezler, tedon ve lifler ile damar parçalarında sıklıkla tercih edilirler (Park et al. 2003).

2.2.1.3. Polimerler

Monomer yapıların bir araya gelerek meydana getirdiği büyük büyük moleküllü yapılara polimer denilmektedir. Biyomedikal alanında çok geniş bir kullanım alanına sahip olan polimerler oldukça önem arz eden malzemelerdir. Polimerler çok farklı şekillerde sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma; imal edildikleri tepkime çeşidine göre, fiziksel yapılarına göre, monomer yapılarına göre ve molekül yapılarına göre yapılmaktadır. Biyopolimerler, biyomalzeme alanında oldukça önemli malzemeler olup elde edildikleri yapılara göre iki türe ayrılmaktadırlar. Bunlar doğal yapılı polimerler ve sentetik yapılı polimerlerdir. Doğal polimerler canlıların organizmasında kendiliğinden oluşan polimerlerdir. Sentetik polimerler ise yapay olarak üretilmektedirler. Bunlarda kendi aralarında plastik ve elastomerler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Kimyasal bozunmalara karşı oldukça dirençli olan elastomerler de en çok kullanılan türü ise stiren-bütadien diye adlandırılan kauçuktur. Süngerimsi bir yapıya sahip elastomer biyomalzemesine herhangi bir baskı kuvveti uygulanıp kaldırıldığında eski haline gelebilmektedir. Plastik yapılı polimerler kendi aralarında iki gruba ayrılırlar. Bunlar

termosetler ve termoplastiklerdir. Termoset plastikler, tersinmez bozunuma sahiptir. Termoset plastikler polimerler arasında en çok kullanılan ve bilinen türü epoksi reçinedir. Termoplastikler, tersinir bozunur özeliğe sahiptirler. Defalarca kullanılabilen ve tekrar şekillenebilen plastik türleridirler. Biyomalzeme alanında kullanılan termoplastik ürünler ise şunlardır; polivinil klorür, teflon (florlu hidrokarbon), poliolefinler, termoplastikler, polimetil metakrilat, ve polikarbonat termoplastiklerdir (ASM, 1991). Polimerlerin en çok kullanıldığı yerler; kalça ve bilek protezleri, sert doku protezleri, diyaliz cihazı ve parçaları, damar ve işitme protezleri, göz lensleri, yapay kalp, ameliyat ipi vb yerlerdir.

2.2.1.4. Metaller

Metal ve alaşımlarından elde edilen malzemeler de biyomalzeme alanında büyük bir öneme sahiptirler. Metalik bağlarla bağlanma özellikleri onlara üstün mekanik özellikler kazandırmıştır. Bu özelliklerinden dolayı çoğunlukla ortopedik uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Diğer kullanım yerleri ise; kalp ve damar cerrahisi, yüz ve çene cerrahisi, yapay kalp parçalarının uygulanması, diş implant, eklem protezi, kalp kapakçığı ve vana, kemik yenileme malzemesi vb. canlı vücutlarının çok farklı bölgelerinde kullanılırlar. Biyomalzeme alanında kullanılan metallerin, mekanik ve fiziksel özelliklerinin geliştirilmesi ve ilave özellikler kazandırma işlemlerindeki avantajından dolayı tercih edilmektedirler. Metalik biyomalzemeler, canlı doku ile etkileşim halinde oldukları için; herhangi bir bozunma olmamalı yani korozyona karşı dirençli olmalıdır. Bu malzemelerden beklenen diğer bir konu ise dokuda herhangi bir alerjik, toksik durum oluşturmaması ve dokuyla biyouyumlu olması gerekir (Meral, 2013).

2.2.2. Biyomalzemelerin Özellikleri

Biyomalzemeler, canlıların kas-iskelet sistemiminin mekanik koşullarına iyi derecede biyouyumluluk gösteren malzemelerdir. Son yıllarda metalik bazlı biyomalzemeler oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadırlar. Metal ve alaşımlarından elde edilen biyomalzemeler belirli şartlarda, ağır, uzun süreli, değişken ve ani yüklemelere karşı özelliklerini korumaları nedeniyle daha fazla kullanılmaya başlamıştır. Tüm bu avantajlara rağmen dezavantajlarıda bulunmaktadır. Bunlar; dokularla uyumun düşük

düzyeyde olması, yoğunluklarının yüksek olması, dokulardan daha çok sert bir yapıda olmaları, korozyona uğramaları ve dokularda alerjik reaksiyonlarına sebebiyet veren iyonu salımı gibi. Titanyum ve titanyum alaşımları, kristal biçimleri ve yapılarında bulunan kuvvetli metalik bağlar sayesinde üstün mekanik özellikler taşımaktadırlar. Biyomalzeme alanında platin, altın, paslanmaz çelikler, gümüş, kobalt vb. metal ve metal alaşımlarından yapılan ürünler sıkça kullanılmaktadır. Biyomalzemelerde olması gereken özellikleri Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Biyomalzemelerin özellikleri (LEVTEMS, 2020).

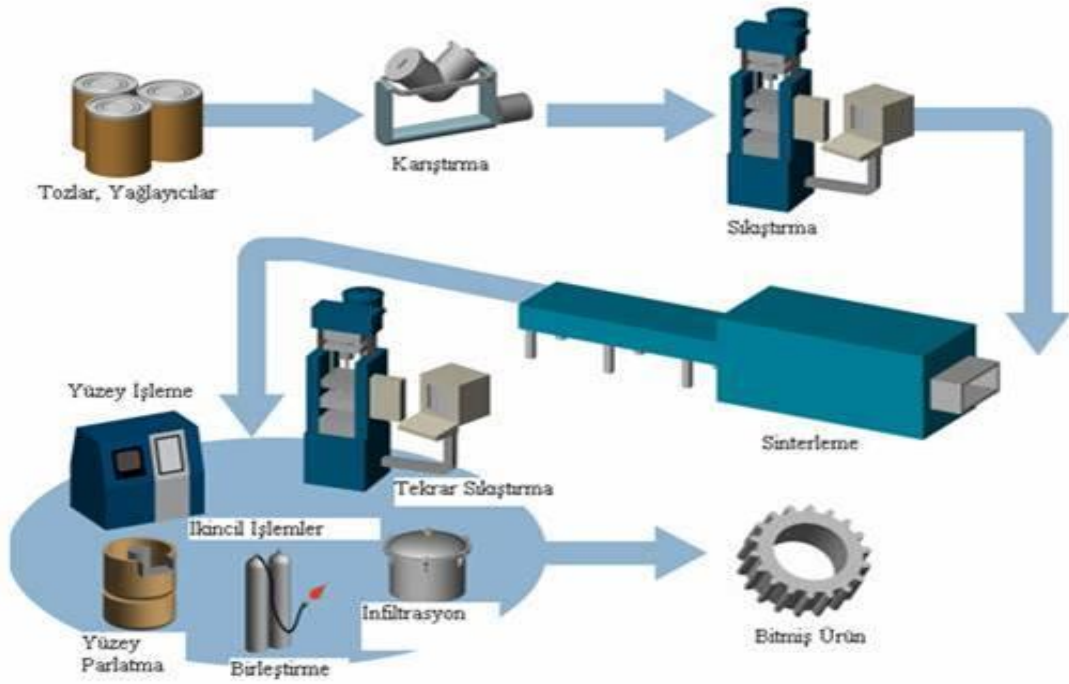
2.3. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi, çok karmaşık şekildeki parçaların daha kolay bir şekilde elde edilmesinde uygulanan bir üretim yöntemidir. İleri düzeyde bir üretim metodu olan toz metalurjisi, çok değişik malzemelerin üretimine olanak sağlamaktadır. Özellikle küçük ebatlı parçaların çok sayıda ve seri bir şekilde elde edilmesine imkan sağlayan ekonomik bir üretim metodudur. Gelişen teknoloji bu alanda etkilemiştir. Toz metalurjisi, üretim süreçleri olarak nano-parçacık teknikleri, sıcak izostatik presleme, sinterleme, toz metal enjeksiyonu, mekanik alaşımlama vb. konularla sürekli gelişerek büyüyen bir pazara sahiptir.

Toz metalurjisi, hem metal hem de metal olmayan farklı türdeki malzemeler kullanılmasına imkan sağlayan bir üretim metodudur. Özellikle son ürünün metalurjik içeriği ve yoğunluğu kolay bir şekilde kontrol edilmektedir. Toz metalurjisi günümüzde tasarım mühendislerinin gün geçtikçe ilgisini çekmektedir. Üretim hızının yüksekliği, tozun kalıba doldurulması ve toz karışımının şekillendirilmesi çok kısa sürede gerçekleşebilmektedir. Yapılan işlemler sırasında meydana gelen malzeme(toz) kaybı sinterleme sırasında oluşan hatalı parçalarla oluşan kayıplar dışında oldukça düşüktür. Bu nedenle toz metalürjisi ile malzeme üretimi oldukça ekonomiktir. TM çok düzgün parçalar elde edildiği için sinterlenme sonrası ikincil işlemlere pek gerek kalmaz. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların gözeneklilik miktarı kolay kontrol edilmekte ve filtre parçaları, kendinden yağlamalı burçlar gibi özel parçalar üretilmektedir.

Toz metalürjisi ile üretimin birçok avantajı yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Yüksek mukavemetli, aşınma direnci yüksek çelik kalıplar kullanıldığından oldukça maliyetlidir. Bu yönteminin döküm, dövme gibi geleneksel yöntemlerle ekonomik anlamda yarışabilmesi için , en az 15000 parça gibi yüksek üretim miktarları olmalıdır. Az sayıda parça üretimi bu yöntemi ekonomik olmaktan çıkarır. Metalurjik parça boyutu presleme sırasında gerekli presleme basıncı nedeniyle sınırlanmakta, bundan dolayı büyük boyutlu parçaların üretilmesinde elverişli değildir. Sinterlenmiş parçalarda, oluşan kırılgeçirgenlik problemi zaman ve maliyet kayıplarına sebep verebilir.

Toz metalürjisi ile üretim düşük miktarda enerji sarfiyatıyla sağlandığından günümüzde yaşanan enerji ve hammadde maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde malzeme kayıpları yok denilecek kadar azdır (Babayev, 2011). Toz metalurjisi işlem basamakları Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Toz metalurjisi işlem basamakları (Söyler, 2007).

2.3.1. Metal Tozlarının Hazırlanması ve Üretim Yöntemleri

Günümüzde metal tozların işleme ve hazırlama teknolojisine olan yönelimler ve bunun paralelinde malzeme üretimine yönelik yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları hızla gelişim göstermiştir. Metal ve alaşımlarından üretilen materyaller günümüz endüstrisinde kullanım alanı ise plastik ve seramik malzemelere oranla daha geniş bir alanı kapsamaktadır. TM sektöründe kullanılan metal tozların, üretiminin yapılması, bu tozların hazır hale gelmesi en az kullanımları kadar önemli bir hal almıştır. Gelişen teknolojik gelişmeler bu alanı da etkilemiştir. Metal tozların üretiminde birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Metal tozların üretiminde en önemli unsur geniş bir dağılım aralığında istenilen şekil ve boyutta kirlenme olmasızın tozu elde etmektir. Tozların boyutu ve şekil yapısı, preslemeyi oldukça etkilemektedir. Homojen bir yapı elde etmek amacıyla presleme öncesinde bu tozların iyice harmanlanıp karıştırılması gerekmektedir. Bu durum iyi sıkıştırılabilirlik ve yüksek yoğunluk elde etmede oldukça önem arz etmektedir (Sarıtaş vd. 2007).

Metalik tozlar homojen bir şekilde harmanlanıp karıştırılmasa Presleme ve sinterleme aşamalarında başarılı sonuçlar elde etmek oldukça zor olur. Tozlar tek düze biçimde harmanlanıp dağıtılmalıdır iyice karıştırılmaldır. TM kullanılan metal tozlarının üretiminde başlıca şu yöntemler kullanılmaktadır. Mekanik yöntemler, kimyasal yöntemler, elektrolitik yöntemler ve atomizasyon yöntemi olarak sıralayabiliriz.

2.3.1.1. Mekanik Yöntemle Toz Üretimi

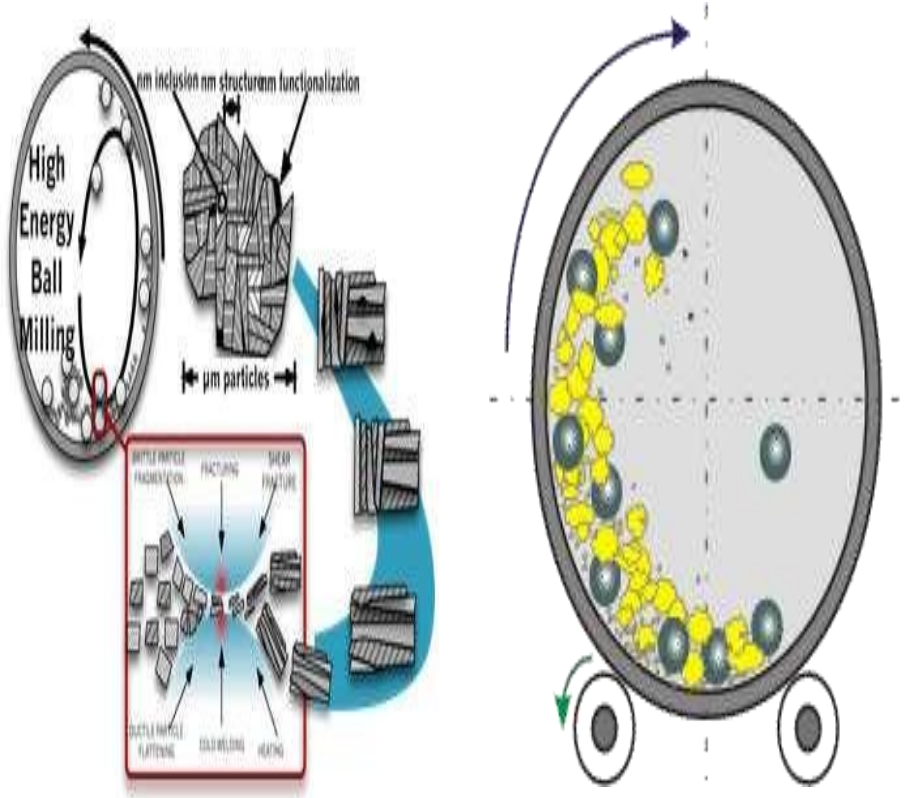
Mekanik yöntemler kullanarak toz üretimi üç farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlar; talaşlı üretim, mekanik öğütme, mekanik alaşımlama;

Talaşlı Üretim: Bu yöntemle imal edilen malzemeler genel olarak iri ve saf olmayan bir yapıdadırlar. Metalik olarak elde edilen talaşlar uzun ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Bu yöntemle üretilen talaşları temizlemek için değişik kimyasal metotlar uygulanmaktadır. Temizlenen talaşlardan küçük boyuttaki toz tanecikleri elde etmek için öğütme işlemi yapılır. Elde edilen talaşların iri olması, ekstra bir öğütme işlemi gerektirmesi, temizlenme koşullarının zor olması gibi süreçlerin zaman ve üretim maliyetleri nedeniyle az kullanılan bir yöntemdir. Şekil 2.6’da talaşlı üretimle elde edilen iri yapıdaki talaş görseli verilmiştir.



Şekil 2.6. İri yapıdaki talaş görünümü

Mekanik Öğütme: Bu yöntemle öğütme işlemi sert metal veya seramik malzemeden üretilmiş bilyelerin malzemeye çarpması sonucu oluşan darbe etkileri altında özellikle gevrek ve kırılgan yapıları malzemelerin küçültülerek toz haline getirilmesi işlemidir. En eski toz üretim metotlarından birisidir. Mekanik öğütme yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Mekanik öğütme yönteminin şematik gösterimi

Mekanik Alaşımlama: Bu sistemde kapalı bir kaba yerleştirilen tozlar döndürülen yüksek sertlikteki bir mil ve kaba konulan bilyelerin tozları kırması, deforme etmesi ve soğuk kaynaştırma meydana getirerek ince tane yapısına sahip tozlar üretilir. Katı hal şeklinde oluşan yüksek enerjili bir toz öğütme yöntemidir. Bu teknik daha çok bakır tozlarının elde edilmesinde kullanılmıştır. Bunun yanında Demir, magnezyum, alüminyum ve paslanmaz çelik vb. malzemelerin içerisine TiC, SiC, TiN, SiO₂, B₂C, Al₂O₃ vb. oksit, karbür yada nitrürler ilave yapılarak kompozit malzeme üretimi yapılmaktadır..



Şekil 2.8. Mekanik alaşımlama

2.3.1.2. Kimyasal Yöntemle Toz Üretimi

Piyasadaki metal tozların büyük bir çoğunluğu kimyasal metotlar uygulanarak üretilmektedir. Kimyasal yöntemlerle toz üretimi katı, sıvı ve gaz tepkimeleriyle yapılmaktadır. Kimyasal yöntemle toz üretimi metotları şu şunlardır;

- Sıvıdan Çöktürme
- Termal Ayrışma
- Gaz Altında Katının Ayrışması Yöntemi
- Gazdan Çöktürme

Kimyasal yöntemle toz üretim avantajları şu şekilde sıralanabilir;

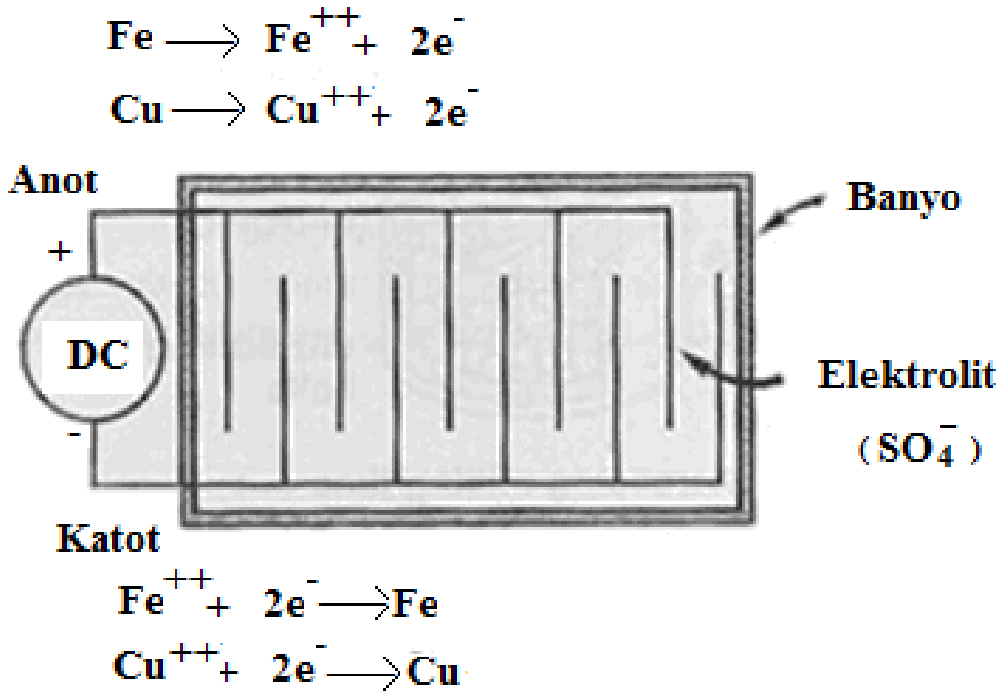
- Gözenekli yapılar elde edilebilir.
- Metal ve oksitlerin boyut kontrolleri yapılabilir.
- Metal oksitlerin bulunabilirliği oldukça kolaydır.
- Clad yapılmış tozlar elde etmek mümkündür.
- Tozların akıcılığı oldukça iyidir.

Bu yöntemle toz üretiminin dezavantajları ise şunlardır;

- Bu yöntemlerle alaşım elde etmek zor ve maliyetlidir.
- Metal oksit oluşumu bu tozların saflığını olumsuz olarak etkilemektedir.

2.3.1.3. Elektrolitik Yöntemle Toz Üretimi

Saflık oranları yüksek metal tozlarının elde edilmesinde bu yöntem oldukça kullanılmaktadır. Bu metotla üretilen tozlar %99.99 saflıkta olup preslenme ve sinterlenme kabilyetleri oldukça yüksektir (Pavlovic et al. 2001). Bu teknikte üretimi yapılacak olan malzeme anot olarak seçilir ve elektrolitik banyo içine yerleştirilir. Daha sonra sisteme bir gerilim uygulanır. Bu gerilim üretimi yapılacak olan malzemeyi çözerek katot üzerinde toplar. Bu işlemler sonucunda üretilen metal tozları yıkanarak kurutmaya bırakılır daha sonra redüklenerek tavlanır ve son olarak öğütülerek ince taneli toz haline getirilirler (Shugo et al.1993). Bu yöntemle üretimi yapılan tozlar dentritik, süngerimsi ve gözenekli bir yapıya sahiptirler. Metal tozun kendine has özellikleri, sistemde geçen akım yoğunluğuna, elektrolit sıcaklığına, elektrolit kompozisyonuna, elektrolit sirkülasyon hızına, katot ve anot büyüklüğüne, şekline, tozun uzaklaştırma hızı ve elektrot aralığı gibi bir çok faktöre bağlıdır. Oluşan banyo sıcaklığı genellikle 60°C dolayındadır. Bu metotla en çok bakır tozlarının üretimi yapılır. Bununla beraber nikel, kobalt, demir vb. birçok metal tozun da üretimi yapılmaktadır (Hiçyılmaz, 1999). Şekil 2.9’da elektrolitik yöntemin şematik çizimi gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Elektrolitik yöntemle toz üretiminin mekanizması (Baksan, 2001)

2.3.1.4. Atomizasyon Yöntemiyle Toz Üretimi

Atomizasyon yöntemde sıvı bir metalin 100-150 μm 'den daha küçük boyutlarda sıvı damlacıklar oluşturarak parçalanması ve bu oluşan küçük partiküllerin hızlı bir şekilde soğumasıyla toz haline getirilme işlemidir. Bu şekilde ergitilebilen metal malzemelerin atomize edilebileceği söyleyenebilir (Hatman et al. 1992). Günümüz endüstrisinde en çok kullanılan toz üretim yöntemi atomizasyon yöntemidir. Bu yöntemde temel prensip, atomizasyon ortamında ergiyik metalin kararsız ve dağılmış hal alana kadar parçalanmasıdır. Atomizasyon yöntemiyle toz üretimi işleminde kullanılan gazlar genellikle azot, argon veya havadır. Yöntemde kullanılan sıvı maddesi ise su'dur. Akışkan hızı, akışkan debisi, akan metalin kalınlığı püskürtme açısı, püskürtme konisi, gibi birçok parametrenin kontrolü ile çok farklı ebatlarda toz elde etmek mümkündür. Katılma hızına bağlı olarak parçacığın şekli küresel halden, su veya düşük ısı kapasiteli gaz kullanılması halinde ise daha düzensiz parçacığa kadar farklılık gösterebilir.

Yüksek hacimli, ekonomik toz üretimi için su ve gaz atomizasyon yöntemleri çok uygundur. Bu yöntemle üretim tekniği; bir sıvı metalin pota dibindeki bir delikten akması sırasında, üzerine basınçlı gaz veya sıvı gönderilmesi ile ergimiş metalin çok ince parçalara ayrıştırılarak katılaştırılmasıdır. Günümüzde üretimi yapılan metal tozlarının yaklaşık %80'ni atomizasyon yöntemi ile yapılmaktadır. Sıvı metalin gaz jeti kullanılarak parçalanmasına “gazla atomizasyon” su jeti kullanılarak parçalanması “suyla atomizasyon” ve santrifüj kuvvetle parçalanmasında “santrifüj atomizasyon” yöntemi denilmektedir. Verilen bu yöntemler arasında en fazla kullanılan su atomizasyonu yöntemidir (Babayev, 2007).

Metal tozlarının üretiminde bu yöntemin tercih edilme sebepleri şöyle verilebilir;

--Atomizasyon yöntemi ile toz üretiminde bir çok teknik kullanılmaktadır. Bu yöntemdeki çeşitlilik nedeniyle, istenilen şekil, boyut ve yüzey yapısına sahip tozlar üretilebilir. Böylece farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip tozlar elde edilebilir.

--Eritilerek toz haline getirilen malzemelerin tamamına yakını bu metot kullanılmaktadır.

-- Demir tozlarının yanı sıra bakır, alüminyum, paslanmaz çelik, demir ve demir dışı alaşımlar gibi yüksek kaliteli tozlardan da atomizasyon işlemi ile toz üretimi sağlanmaktadır.

Yaygın olarak kullanılan atomizasyon metotları şu şekilde verilebilir;

- a) Gaz atomizasyon metodu
- a) Yağ atomizasyon metodu
- b) Döner disk atomizasyon metodu
- c) Su atomizasyon metodu

Tablo 2.4. Farklı toz üretim metotlarıyla elde edilen bazı materyaller (Söyler, 2007)

Materyal	Metot
Takım çelikleri	Atomizasyon
Alüminyum	Atomizasyon metodu ve mekanik öğütme metodu
Berilyum	Mekanik öğütme metodu ve atomizasyon metodu
Kobalt	Kimyasal metotla
Nikel alaşımlar	Atomizasyon metoduyla
Bakır alaşımları	Atomizasyon metoduyla
Altın	Atomizasyonu, Kimyasal yöntemler, Elektrolitik
Demir	Atomizasyon metoduyla
Süperalaşımlar	Mekanik alaşımlama metoduyla, ve Atomizasyon

5.3.2. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Parça Üretim Aşamaları

Toz metalurjisi ile parça üretimi yapılırken ilk etapta tozlarda bir takım işlemlerin yapılması gerekmektedir. Yapacağımız alaşıma göre tozların % olarak oranları belirlenir. Daha sonra belirlenen oranlarda tartım işlemleri yapılır. Tartılan tozlar karıştırma cihazlarında karıştırılır, oda sıcaklığında hazırlanan hassas kalıplarda, uygun basınçlarda preslenerek şekillendirilme işlemi yapılır. Toz parçacıkları arasındaki metalurjik bağların oluşturulabilmesi için kontrollü atmosferlerde sinterlenmesiyle parça üretimi yapılır. Sinterleme işleminden sonra parçalara temizleme, çapak varsa kesme, yağlama ve ısıtma işlemleri gibi ek işlemler de yapılarak parça üretim işlemi tamamlanır.

2.3.2.1. Toz Hazırlama Aşamaları

Bu aşamada; karışımda kullanılacak tozlar belirlenir. Literatür araştırması sonucu belirlenen orandaki tozlara tartım işlemi yapılır. Elde edilen tozların boyut analizi yapıldıktan sonra, tozların akıcılık ve görünür yoğunlukları belirlenme işlemi yapılır. Tozların yüzeyinde oluşan oksitlerin temizlenmesi, yağlayıcı vb. katkıları takviye edilerek tozlar karıştırılma işlemine hazır hale getirilir.

2.3.2.2. Tozu Karıştırma Aşaması

TM teknolojisinin önemli bir aşamalarından bir tanesi de tozların homojen bir şekilde karıştırılma işlemidir. Karıştırma işlemi; farklı boyut ve kimyasal özelliklere sahip tozları birleştirmek, harmanlamak, bir araya getirmek ve homojen yapılı bir dağılım elde etmek için yapılan işlemler bütünüdür. Karıştırma işlemiyle aynı zamanda farklı büyüklükteki toz taneciklerinin dağılımı homojen bir şekilde yapılmalıdır. İnce taneli tozlar kaba taneli tozların arasında yerleşerek yoğunluk gradyanı minimuma indirilir. Karışım, imalatı yapılacak toz numunenin ağırlığına göre yüzde (%) olarak karışım elementlerinin ağırlığı belirlenerek oluşturulur. Karışım içerisine, genellikle ağırlık olarak %0,5-1,5 arası yağlayıcı ilave edilmektedir. Yağlayıcı olarak kalsiyum stearat, parafin, çinko stearat, stearik asit ve lityum stearat en çok kullanılan maddelerdir. Sıvı yağlayıcılar tozların akma özelliğini bozduğundan karışıma takviye edilen yağlayıcılar genellikle kuru toz şeklindedir. Yağlama, yağlayıcının kalıp duvarlarına sürülmesi veya doğrudan preslenecek toza katılması şeklinde uygulanır. Teorik olarak kalıp duvarlarının yağlanması tercih edilir. Çok karmaşık şekilli parçaların seri üretiminde bu durumun sağlanması oldukça zor olduğunda yağlayıcılar yoğunlukla presleme öncesi tozun içerisine ilave edilir. İlave edilen yağlayıcılar sinterlemenin bağlayıcı giderme aşamasında sistemden uzaklaştırılır (German, 2007).

2.3.2.3. Tozu Presleme Aşaması

Metal tozları kalıp içerisinde şekil aldığı için tozun kalıp içerisinde boşluk bırakmayacak şekilde doldurulması istenmektedir. Tozlar kalıp içerisinde soğuk olarak preslendiğinde, teorik yoğunluğa mümkün olduğunca yaklaşılması istenmektedir. Eşit presleme basıncına rağmen her metal tozunda presleme sonucunda ulaşılan yoğunluk, o malzemenin teorik yoğunluğuna göre çok farklıdır. Bu durum;

- Tozların malzeme cinsine (özellik yüzey, imal yöntemleri)
- Tozların tane büyüklükleri, şekil yapısı ve yüzey durumuna
- Tozların görmüş olduğu ön işlemler gibi önemli faktörlere bağlıdır.

Malzemenin yumuşaklığı ne derece fazla ise, preslenebilirlikte o derece yüksek olmaktadır. Preslenebilirlik kabiliyeti, toz tanelerinin presleme sırasında kendi

aralarındaki sürtünme ilişkisiyle ve tanelerle kalıp arasındaki sürtünmeyle de yakından ilgilidir.

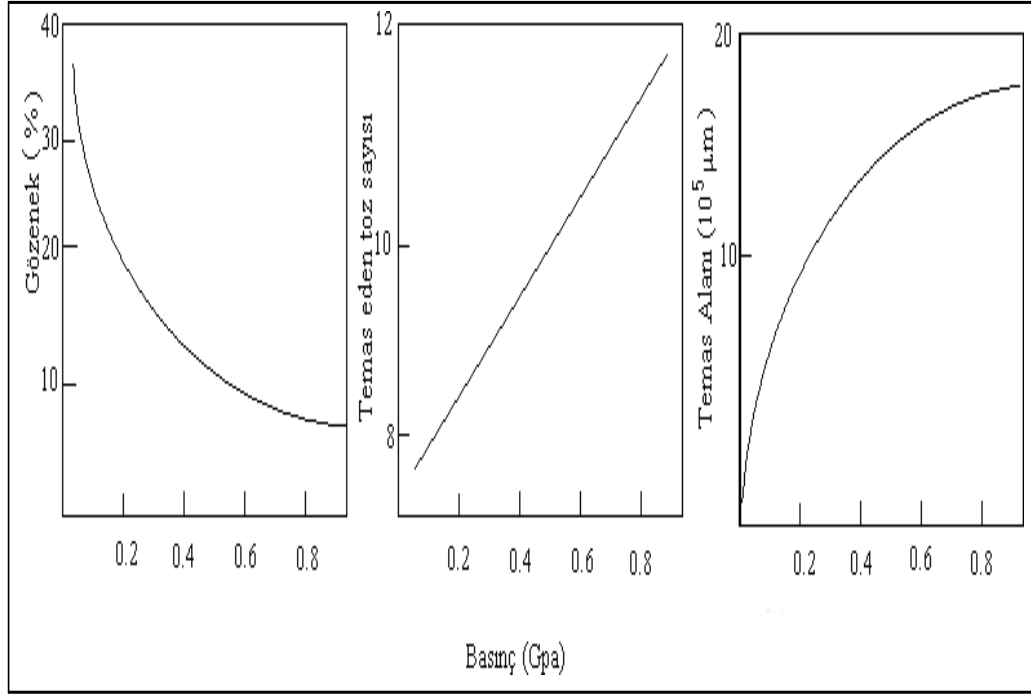
Preslemede yoğunluk kavramı oldukça önem arz etmektedir; bunlardan görünür yoğunluk; belirli bir hacimde tozun sıkıştırılmamış ağırlığı olup, g/cm^3 cinsinde ifade edilir. Teorik yoğunluk ise, ergitilerek dökülmüş malzemelerin yoğunluğudur.

Belirli bir oranda toz miktarının belirli bir kuvvet altında kolay sıkışabilme ve teorik yoğunluğa yaklaşma derecesine tozun sıkıştırılabilirliği denilmektedir. Sıkıştırma sırasında tozun davranışını doğrudan belirlediği için sıkıştırılabilirlik önem arz etmektedir. Metal tozlarının sıkıştırılabilirliğine; toz şekli, toz partikül boyutu ve dağılımı, toz sertliği, normal yağlayıcılar etki etmektedirler. Presleme (sıkıştırma) ve sinterleme (ısıtma) işlemleri ile üretilen parçaların üretiminde yüksek sıkıştırılabilirlik en önemli faktördür. Tozu sıkıştırma yapmadan önceki hacminin sıkıştırma yaptıktan sonraki hacmine oranı sıkıştırma oranı, olarak tanımlanır.

Toz metalürjisinde preslenme aşamasında gerçekleştirilmek istenen hedefler şu şekilde sıralanır;

- Metal tozlarının istenilen boyut, yoğunluk ve sık duruma getirmek
- Sinterleme sonucu üretilen son ürünlerde herhangi bir boyutsal değişikliğin meydana gelmemesi
- İstenilen gözenek yapısı ve gözenek oranının elde edilmesi
- Presleme sonrası yapılacak işlemler için gerekli mukavemeti sağlamaktır.

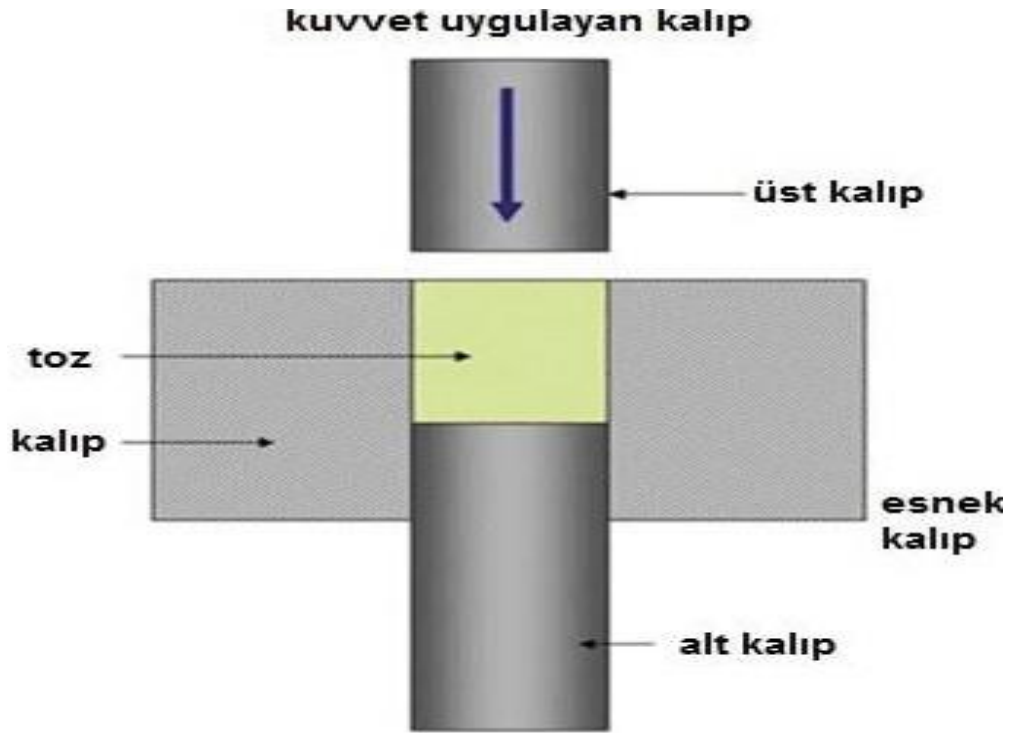
Preslenmeye uygulanan basınç değerine göre gözenek oranı da değişmektedir, uygulanan basınç oranı gözenek oranı da azalmaktadır. Bunun yanında artan presleme basıncı ile birbirine temas eden tane sayısı ve yüzey alanı artmaktadır. Artan yoğunluk değeri beraber elde edilen malzemenin çekme dayanımında artmaktadır. Şekil 2.10'daki grafiklerde değişen basınç değerinin tozların fiziksel özelliklerine etkisini gösterilmektedir.



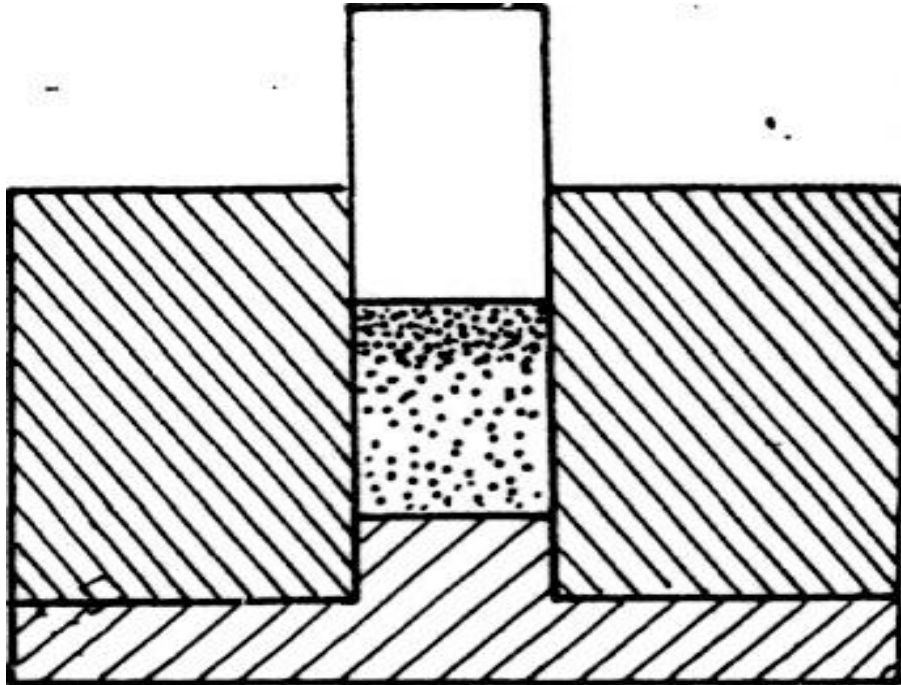
Şekil 2.10. Basınç değerine göre toz parçanın fiziksel özelliklerinin değişimi (Onur, 1996)

2.3.2.3.1 Tek Yönlü Presleme

Bu yöntemde sıkıştırma işlemi için prese tek yönlü bir kuvvet uygular. Kalıp elemanı olan üst zımba kalıp içindeki boşluktan girerek sıkıştırılacak olan tozu sabit olan alt zımbaya kalıp boşluğunda sıkıştırır. Tek yönlü sıkıştırmada işleminde tozlar arası ve tozlarla kalıp yüzeyi arasında oluşan sürtünme düzensiz bir basınç dağılımına sebep olur. Tek yönlü olarak uygulanan sıkıştırma basıncı kalıp boyunca düzenli olarak uygulanmadığı için sıkıştırılan parçadaki yoğunluk homojen bir dağılım göstermemektedir. Bu sebepten dolayı yoğunluk hareketli daha çok üst zımbaya yakın bölgelerde daha yoğun, sabit zımbaya doğru giderek azalma görülmektedir (Aydın, 1997). Şekil 2.11’de tek yönlü preslemenin şematik gösterimi Şekil 2.12’de Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımının kesit görüntüsü verilmiştir.



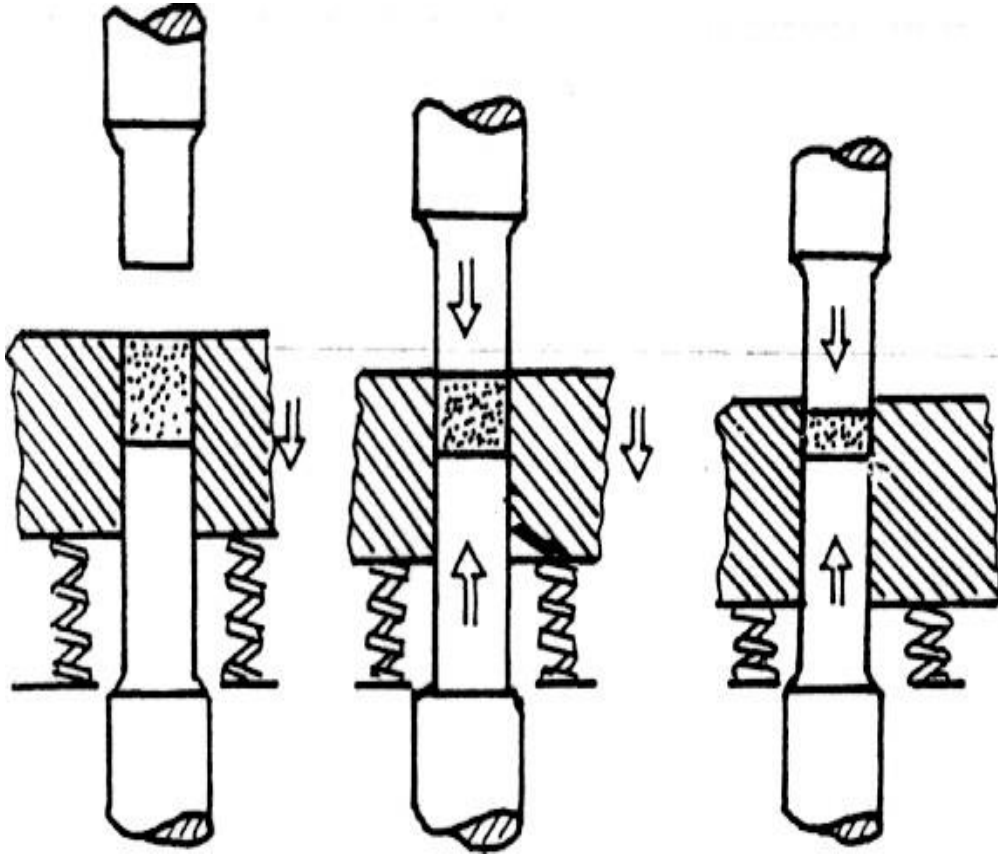
Şekil 2.11. Tek yönlü presleme



Şekil 2.12. Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı

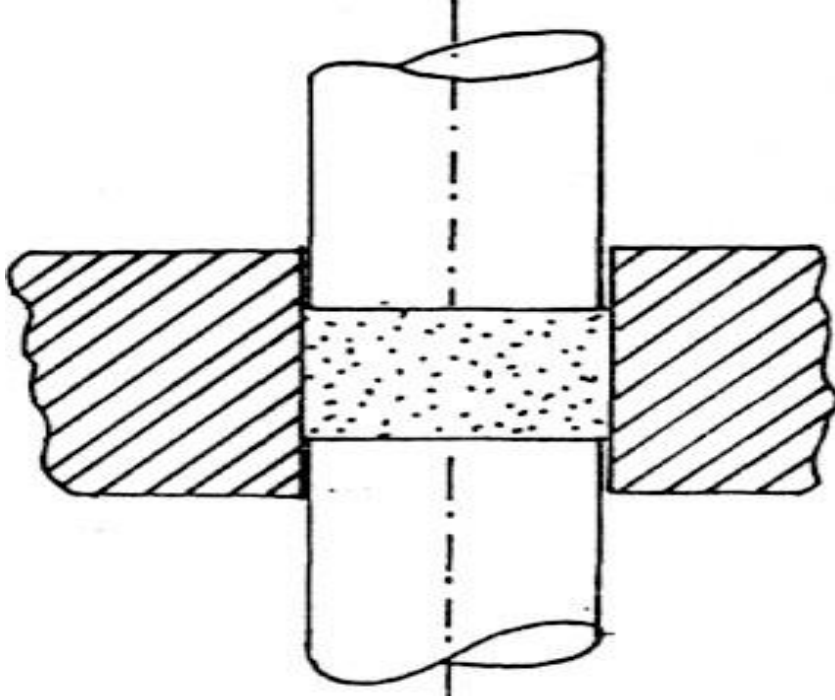
2.3.2.3.2. Çift Yönlü Presleme

İki yönde sıkıştırma işleminde tozlar üst ve alt zımba aracılığıyla aynı esnada sıkıştırılmaktadır. Üst ve alt zımba aracılığıyla eşit veya farklı değerlerde basınç kuvvetleri uygulanabilir. İki taraflı sıkıştırma yönteminde, üst zımba toza basınç uygular ve kalıp yüzeyi ile toz arasındaki sürtünme kuvveti geçtiğinde, kalıbı destekleyen kuvvet (yay gibi) geçer ve kalıp hareket eder. Alt zımba yukarı hareket ediyor gibi görünmektedir. Gerekli kuvvet uygulanıp presleme işlemi yapıldıktan sonra alt zımba kaldırılır ve iş parçası kalıptan çıkarılır. Şekil 2.13'te çift taraflı sıkıştırma işleminin şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.13. Çift yönlü sıkıştırma

Çift yönlü preslemede sıkıştırılan parçaların yoğunluk dağılımı, tek yönlü presleme yöntemi ile üretilen parçaların yoğunluk dağılımlarına oranla daha homojen bir yapıdadır. Şekil 2.14’de çift yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımının kesit görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.14. Çift yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı

2.3.2.3.3. İzostatik Presleme

Bu yöntem soğuk izostatik presleme (CIP) ve sıcak izostatik presleme (HIP) olmak üzere iki farklı gruba ayrılır.

Soğuk izostatik presleme yöntemi metal tozlarının hidrolik (akışkan) kuvvet altında preslenme işlemidir. İzostatik presleme işleminde genellikle bir akışkan içerisinde (Su yada yağ) oda sıcaklığında soğuk olarak yapılır. Bundan dolayı bu işleme soğuk izostatik presleme yöntemi (CIP) denilmektedir. Soğuk izostatik presleme uygulamasında, tozlar kauçuktan yapılmış bir kalıba doldurularak yağ ile sıvanmış basma hücresine konulur. Pistonla basınç uygulandığında, yağ kalıbın tüm noktalarına aynı basıncı uygular ve numune üzerindeki tüm noktalar aynı yoğunluğa sahiptir. Alttaki zimbalar yukarı doğru hareket ediyor gibi görünür. Soğuk presleme yöntemi ile üretilen başlıca elemanlar; takım

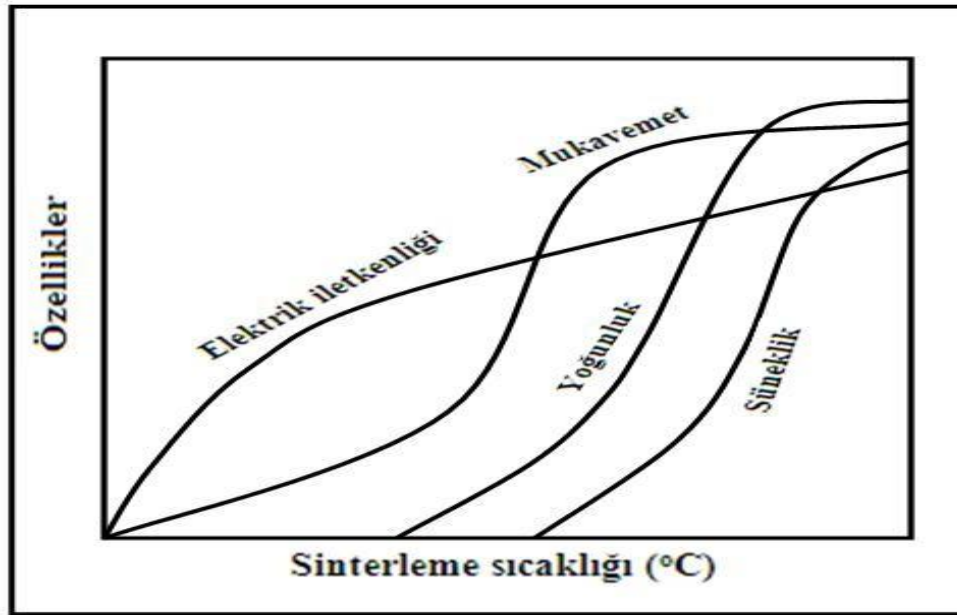
elik kütükler ve süper alaşımlı ak trbınleridir (Aydın, 1997). İstenen değerlere yakın bir boyut ve şekillerdeki parçaların imal edilmesinde soğuk izostatik presleme yöntemi uygulanmaktadır.

Sıcak izostatik presleme (HIP) yöntemi ise, ısı ve basınç aynı anda uygulanarak yapılan sıkıştırma işlemidir. Bu yöntemde i gözeneklerden tamamen arınmış parçalar üretmek mümkündür. Bu yöntemde presleme hem tek yönlü zımba hemde çift yönlü zımba ile yapmak mümkündür. Tek taraflı sıkıştırma ile tam yoğunluk elde etmek çok zordur. İki taraflı sıkıştırmada, st ve alt zımbalar tozu aynı anda sıkıştırır. Bu işlemde, kalıp duvarı ile toz parçacıkları arasındaki sürtünme kuvveti, kalıp tabanındaki yay gibi esnek bir elemanın yay kuvvetini yenerek kalıbı aşağı doğru hareket ettirerek alt zımbanın eşit basınç uygulayabilmesini sağlar. Daha sonra tozun taban yüzeyine alt zımbanın, st zımba ile eşit şiddetle basınç uygulamasını sağlar. Sıkıştırma işleminin tamamlanmasından sonra, TM üretilen parça alt zımbanın yukarı doğru hareketi ile kalıptan çıkarılır. Yoğunluk dağılımı tek taraflı preslemeye göre daha homojen homojen bir biçimdedir. En düşük yoğunluk, esas olarak sıkıştırma bölümünün merkezinde meydana gelir. Yoğunluk dağılımı, merkezden geçen dikey ve yatay eksenlere göre simetriktir (Hiçyılmaz 1999). Statik veya dinamik olarak ısıtılan bir toz, tek bir eksen den zıt yönlerde bir veya iki yerden basına maruz bırakılır. Toz metalin bir sıkıştırma kutusunda sıcak preslenmesi, toz metalin eski sıkıştırma uygulamalarından biridir. Sıcak presleme, mkemmek özelliklere sahip bir ürün verir. Zamanla kalıp aşınması, sıvı metalin zımba yüzeyinden kalıp duvarına kaynaması, sıkıştırma yüzeyinin bozulması, kutu duvarı ile hareketli burç arasındaki boşluk, malzeme kaybı, ikinci el takım aşınması vb. dezavantajları da vardır (Aydın,2006). Geleneksel soğuk pres sinterleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, sıcak presleme teknolojisi daha az enerji gerektirir, daha az zaman alır (tipik olarak 10-15 dakika) ve daha düşük sıcaklıklar kullanır. Ek olarak, bu teknik, soğuk pres sinterleme işlemine kıyasla daha yüksek yoğunluklar elde edebilir (Balın, 2011).

2.3.2.4. Sinterleme Aşaması

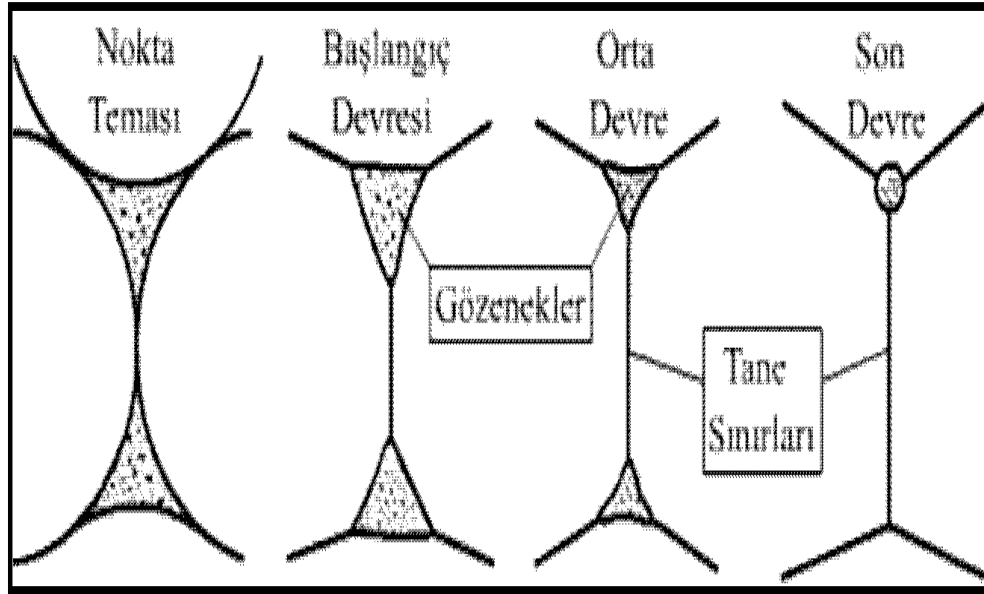
Sinterleme, preslenerek elde edilmiş ürünlerin mukavemet değerlerini artırmak amacıyla kontrollü bir atmosfer altında, yüksek sıcaklıklar kullanılarak uygulanan bir tür ısıtma işlemidir. Toz Parçacıklarının hazırlanmış bir kalıp içerisinde sıkıştırılarak şekil verilmesi sonucunda parçalarda meydana ve tam olarak bağlanmamış mekanik bağlar, sinterleme aşamasında birbirlerine bağlanarak kuvvetli metalik bağlara dönüşür. Bu şekilde iş parçalarına daha fazla mukavemet kazandırılmaktadır. Sinterleme yapılmadan önceki mukavemet ile sinterleme yapıldıktan sonraki değerler arasında çok büyük farklar bulunmaktadır. Tek bileşenli sistemlerde sinterleme yapılırken sinterleme sıcaklığı, sinterlenecek metalin ergime derecesinin altındaki bir sıcaklıkta yapılmaktadır. Ancak birden fazla bileşenli sistemlerin sinterlenmesi; en düşük ergime sıcaklığına sahip bileşenin ergime sıcaklığının biraz üstündeki bir değerde yapılmaktadır (Ataş, 2003).

Sinterleme sıcaklığı arttıkça sinterleme süresi düşmektedir. Yani süre ile sıcaklık değeri arasında bir ilişki bulunmaktadır. Sinterleme sıcaklığı ve süresinin uzunluğu üretim maliyetini de artırmaktadır. Genelde sinterleme sıcaklığı arttıkça malzemenin mukavemet değeri, yoğunluğu elektrik iletkenliği ve süneklik gibi özellikleri de artmaktadır. Sinterleme sıcaklığının toz parçalarının özelliklerine etkisi Şekil 2.15'te verilmiştir.



Şekil 2.15. Sinterleme sıcaklığının toz parçaları özelliklerine etkisi (Sands et al. 1996)

Şekil 2.16’da görüldüğü gibi sinterlemenin başlangıcında toz taneleri birbirlerine nokta şeklinde temas halindedir. Sinterleme işlemi genel olarak üç kademedan oluşmaktadır. Bunlar; başlangıç devresi, orta devre ve son aşamadır.

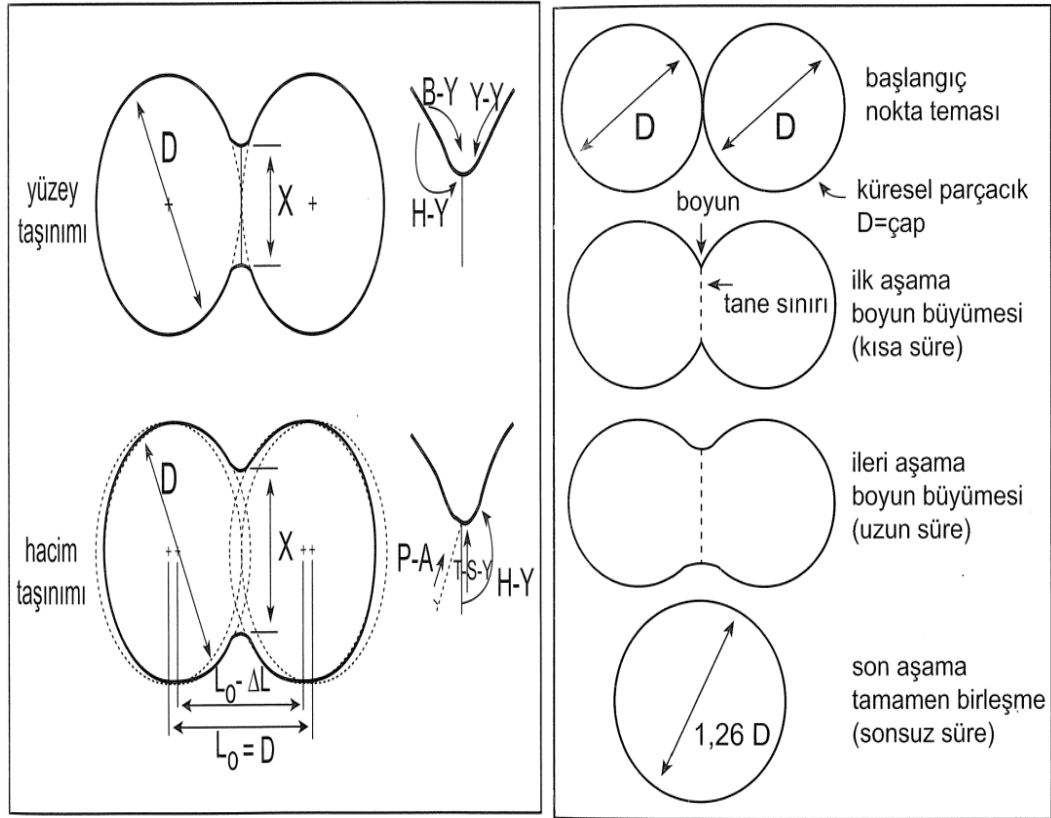


Şekil 2.16. Sinterleme esnasında nokta teması bağlarının gelişimi (Somunkıran, 1996)

Sistemin içinde bulunan iç enerjisindeki azalma sinterlemenin gerçekleşmesini meydana getiren itici güç durumumdur. İç enerjisinde azalmayı meydana faktörler, gözeneklerin yapısında oluşan şekil ve boyut değişimleri ve tane büyümeleri gibi olaylar partiküllerin birbiri ile temas alanlarının artmasını sağlar. Daha sonra yüzey alanının azalması, gözenek hacminde azalma ya da gözeneklerin küreselleşmesi meydana gelir. Bu durum çok bileşenli sistemlerde ise katı fazın sıvı faz içerisinde çözünmesi sonucu oluşan yoğunluk farkının giderilmesidir (German, 1996).

Sinterleme esnasında oluşan boyutsal değişimler, gözeneklerdeki şekil değişimleri, oluşan ve tane büyümesi gibi olaylar, mikroyapı içerisinde sıcaklık etkisiyle meydana gelen bazı atomsal taşınım mekanizmalarıyla gerçekleşmektedir. Atomal taşınım mekanizmaları, yüzey difüzyonu, hacim difüzyonu, tane sınırları difüzyonu, yoğunlaşma, buharlaşma ve plastik akıştır. Yüzey difüzyonu ile boyutsal değişim olmamaktadır. Ancak Şekil 2.17’de görüldüğü gibi sinterleme sırasında hacim difüzyonu boyutsal

değişmeye sebebiyet vermektedir. Bu mekanizma hacim difüzyonunu, tane sınırı difüzyonunu, plastik ve viskoz akışı kapsamaktadır (Özgün, 2006; German, 2007).



Şekil 2.17. İki küre sinterleme modeli (German, 2007)

Küreden-küreye sinterleme de iki tür sinterleme mekanizmasında boyun büyümesi için yüzeyden malzeme taşıma mekanizması yüzey kaynaklarından sağlanır. Yüzey taşınım mekanizmalarında boyun büyümesi için kütle taşınımı yüzey kaynakları buharlaşma-yoğunlaşma (BY), yüzey yayınımlı (YY), hacim yayınımlı (HY) ile gerçekleşir. Hacim taşınım işlemlerinde boyun büyümesi için kütle taşınımı iç kütle kaynakları (plastik akış (PA), tane sınırları yayınımlı, (TSY) hacim yayınımlı) ile gerçekleşmektedir. Hacim taşınım mekanizmaları sadece çekme ve yoğunlaşma gerçekleşir (German, 2007).

TM sinterleme işlemi üç aşamada gerçekleşir. Bu aşamalar; ilk başlangıç sinterlemesi, orta devre sinterlemesi ve son bitiş sinterlemesi olarak sıranabilir. Sinterlemenin ilk aşamasında kütle taşınım mekanizmasına bağlı olarak taneler arasındaki temas noktalarında boyun büyümesi ile başlamaktadır.

2.3.2.5. İkincil İşlemler

Toz Metalurjisinin son aşaması olan sinterleme işleminden hemen sonra bazı ek işlemler gerekebilir. İkincil işlemlerde temel amaç üretilen parçaların tamamen kullanıma hazır hale getirmektir. Bu işlemler; yüzey temizleme, yüzey parlatma, ayrı hazırlanmış parçaları birleştirme, yüzeye kaplama yapma, yüzey sertleştirme, yeniden boyutlandırma, ısıl işlem, boyama, yağ emdirme vb. olarak sıralanabilir. Bu işlemler ihtiyaç ve isteğe bağlı olarak yapılabilir. Tekrar presleme işlemi yapılarak yoğunluk artırılabilir.

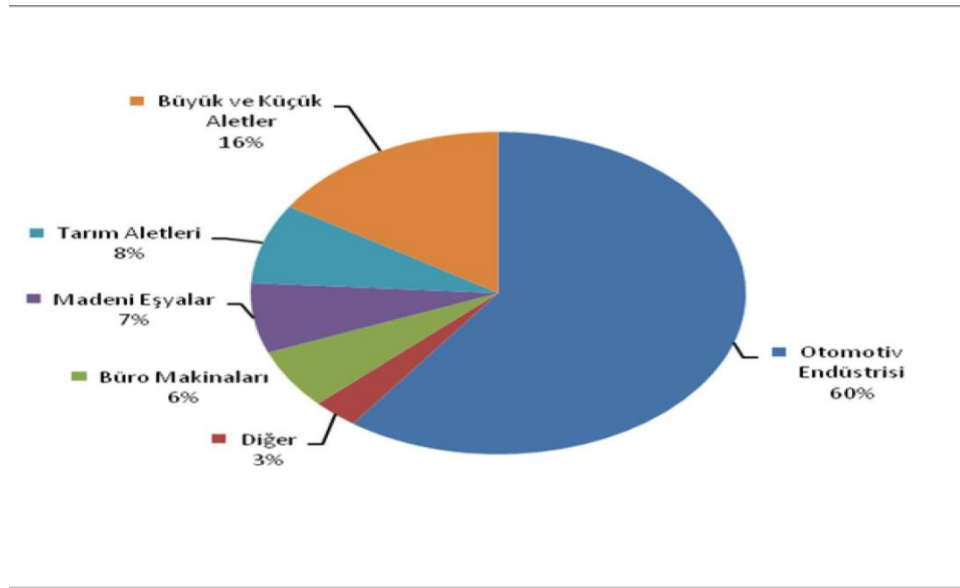
2.3.3. Toz Metalurjisi Uygulama Alanları

Toz metalürjisi ile üretilen parçalar başta otomotiv endüstrisi olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu ürünler çoğunlukla biyomedikal, tungsten lamba filamentleri, diş ve implant uygulamalarında, uçak fren balataları, dişli çarklar, yağlamasız yataklar, kaynak elektrotları, ortopedik gereçler, elektrik kontakları, ofis makinaları parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, lehimleme aletleri, jet motor parçaları, katalizörler, yüksek sıcaklık filtreleri, nükleer güç yakıt elemanları, devre levhaları gibi bir çok sektörün uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Ataş, 2003). Bu yöntemle üretilen bazı ürünler Şekil 2.18’de gösterilmektedir.



Şekil 2.18. TM ile üretilmiş çeşitli ürünler

Toz metalurjisi ile parça üretimi tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de hızlı bir gelişim göstermektedir. Bugün ülkemizin toplam demir esaslı sinter üretimi yaklaşık 3000 ton civarındadır. Bu yöntemle yapılan üretim başta otomotiv sektörü olmak üzere, elektronik sektöründe, beyaz eşya ve dayanıklı diğer tüketim malları sektöründe, savunma sanayisinde ve diğer birçok sektöre yönelik yapılmaktadır. Toz metalürjisinin kullanım alanlarına ait yüzdelik (%) dilimleri Şekil 2.19’da verilmiştir (Özgün, 2007).



Şekil 2.19. Toz metalürjisinin kullanım alanları (Özgün, 2007).

2.3.4. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Toz metalürjisinin diğer üretim yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları şu şekildedir.

Toz Metalurjisi Yönteminin Avantajları:

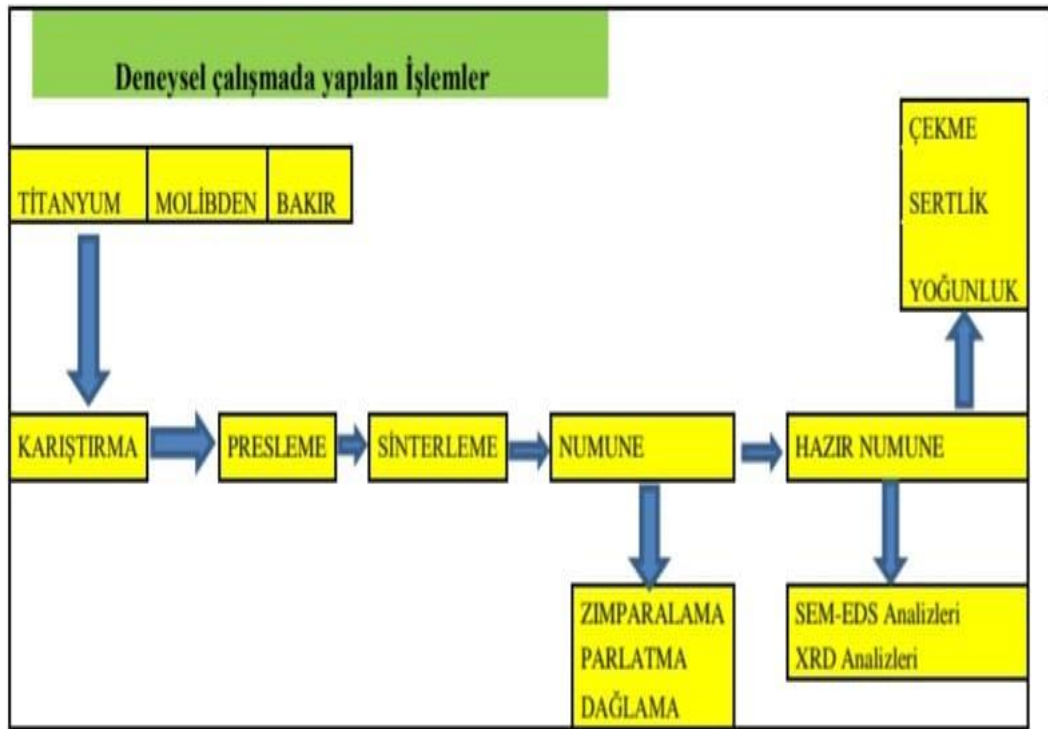
- Talaşlı işlem gereksiniminin azaltılabilmesi yada tamamen ortadan kaldırılması mümkündür.
- Diğer üretim yöntemlerine göre daha yüksek üretim hızı sağlanabilir.
- Karmaşık şekillerin üretilmesi daha kolaydır.
- Birleşim aralığı çok geniştir.
- Özelliklerin kazandırılması işleminde geniş bir aralık sağlar.
- Oluşan hurdanın azaltılması yada ortadan kaldırılması sağlanabilir (Çalışkan, 2000).

Toz Metalurjisi Yönteminin Dezavantajları:

- a) Bu yöntemle üretilen parçaların mekanik özellikleri dövme ve dökümle karşılaştırıldığında daha düşüktür.
- b) Az sayıdaki parça üretiminde oldukça maliyetlidir.
- c) TM üretilen parçaların ağırlıkça birim maliyetleri döküm ve dövme malzemelerine göre daha pahalıdır.
- d) Bazı değişik şekillerdeki parçaların üretiminde uygun değildir.
- e) Yoğunluğun parça içinde homojen olmayışı, özelliklerin de değişimine neden olmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada geleneksel toz metalurjisi yönteminin aşamalarını izleyerek beş farklı sinterleme sıcaklığı ve beş farklı Mo oranı parametrelerini kullanarak $Ti_{x}Mo_5Cu$ alaşım numunelerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Tozları hazırlama, presleme, sinterlenme aşamalarından sonra elde edilen numunelere; temizleme, parlatma ve dağlama işlemi yapılmış, daha sonra bu numunelere SEM/EDS, XRD analizleri ve yoğunluk, sertlik ve çekme gibi mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler yapılırken kullanılan malzeme ve cihazlar özellikleri ile verilmiştir. Yapılan işlem basamakları kısaca Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada yapılan işlem basamakları

3.1. Kullanılan Materyaller ve Numune Hazırlama

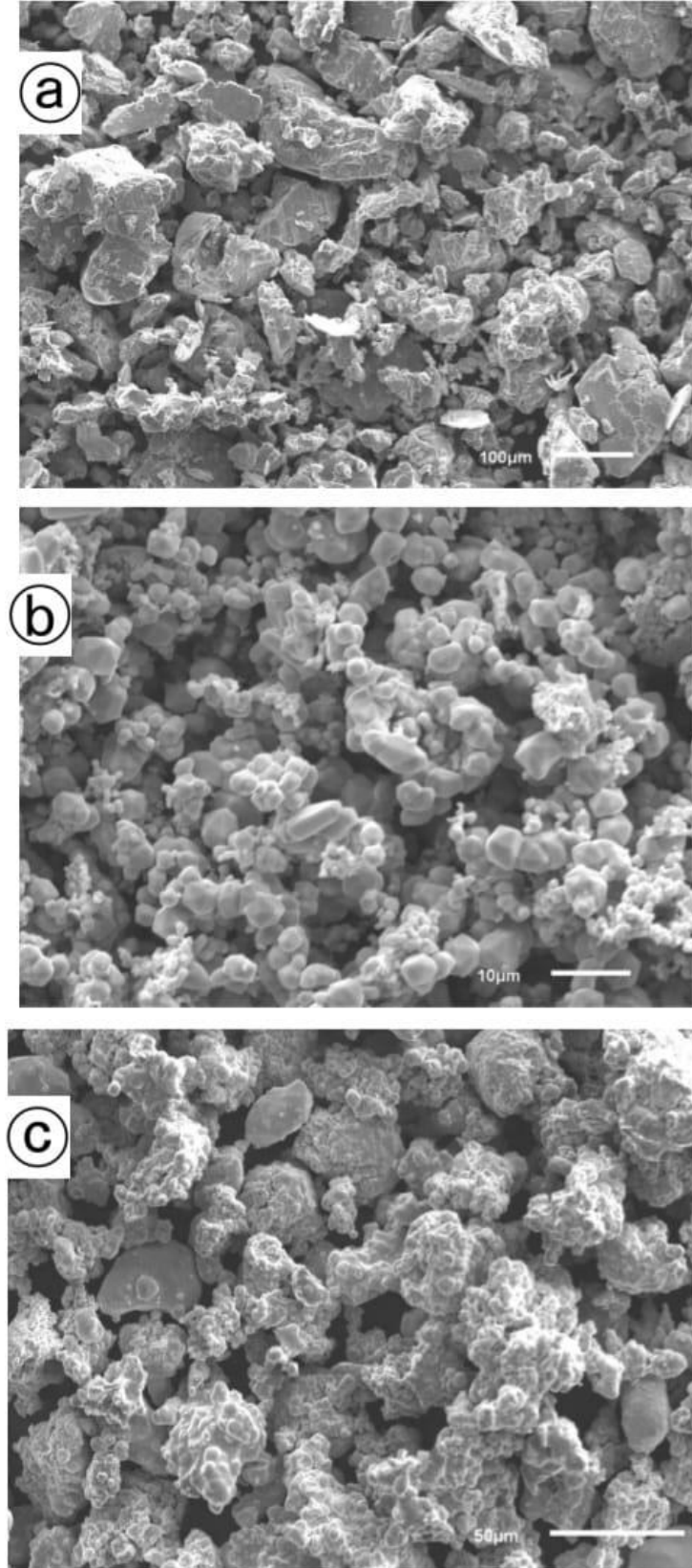
Bu çalışmada kullanılan elementel tozlar ve özellikleri Tablo 3.1’de ve bunların SEM görüntüleri ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu tozlar Sigma Aldrich adlı firmadan temin edilmiştir. Temin edilen tozlar Tablo 3.2’de verilen numunelerin ağırlıkça yüzde oranları 0,0001 hassasiyetli terazide tartılarak 5 farklı karışım için beş farklı tüp içerisine konulmuş ve. hassas tartma işleminin yapıldığı terazi Şekil 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan elementel tozlara ait özellikler

Toz Cinsi	Tozun Saflığı (%)	Parçacık Boyutu (μm)	Üretici Firma
Titanyum (Ti)	$\geq 99,98$	$<45 \mu\text{m}$	Sigma Aldrich
Molibden (Mo)	$\geq 99,97$	1-5	Sigma Aldrich
Bakır (Cu)	99,99	45 μm	Sigma Aldrich

Tablo 3.2. Hazırlanan numunelerin ağırlıkça kimyasal bileşimlerinin yüzde (%) oranları

Numune	Numune İçerikleri	Birim Ti	Birim Mo	Birim Cu
S1	Ti-4Mo-5Cu	%91	%4	%5
S2	Ti-8Mo-5Cu	%87	%8	%5
S3	Ti-12Mo-5Cu	%83	%12	%5
S4	Ti-16Mo-5Cu	%79	%16	%5
S5	Ti-20Mo-5Cu	%75	%20	%5



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüleri; a) Ti tozu, b) Mo tozu, c) Cu tozu



Şekil 3.3. Tozların tartıldığı hassas terazi

Yüksek düzeyde homojen bir karışım sağlamak ve karışım esnasında tozların topaklanmasını önlemek için her tüpe 5-6 adet 6,35mm çapında çelik bilyeler konularak Çel-Mak marka turbula cihazında 6 saat karıştırma işlemi yapılmıştır. Tozların karıştırma işleminde kullanılan cihazın görselli Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Tozların karıştırma işleminde kullanılan çel-mak marka cihaz

3.2. Numunelerin Üretimi

Homojen bir şekilde karıştırılan tozlar daha sonra Bingöl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında bulunan 40 ton kapasiteli Hidro Metal marka pres makinesi ile 550 MPa basınç uygulayarak numuneler şekillendirilmiştir. Presleme işleminin yapıldığı cihaz Şekil 3.5'te verilmiştir. Şekillendirme işleminde kullanılan hazır kalıplar Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Üretilen 12 mm çapında ve 8 mm yüksekliğindeki silindirik numunelerden her alaşım tozunda için 5 adet numune üretilmiştir. Bu numunelere daha sonra yoğunluk, mikroyapı ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Şekil 3.7'de verilen 8 mm kalınlığında ve 900 mm boyundaki çelik kalıpla her alaşım için 3 adet numune üretilmiş, bu numunelere çekme testi uygulanmıştır.



Şekil 3.5. Soğuk presleme işleminin yapıldığı hidrolik ünite

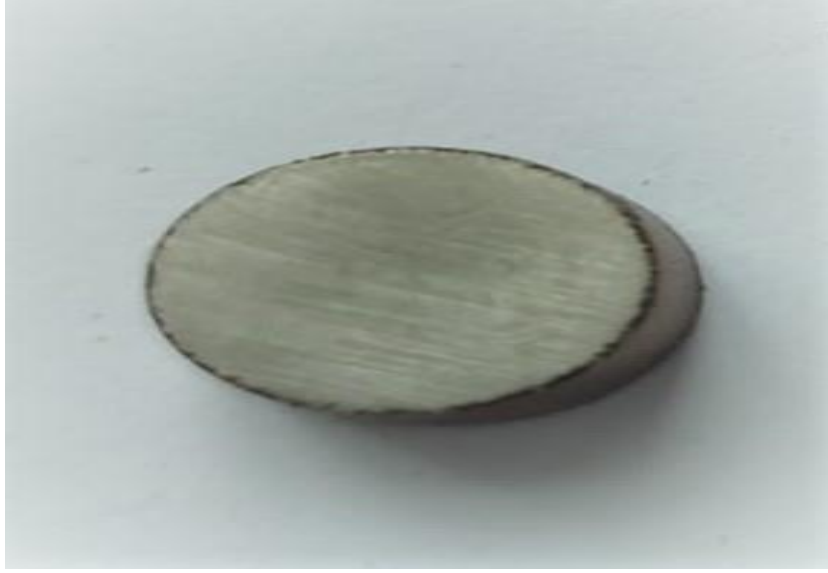


Şekil 3.6. Silindirik numune üretiminde kullanılan çelik kalıp



Şekil 3.7. Çekme numune üretiminde kullanılan çelik kalıp

550 MPa basınç altında soğuk presleme sonucu üretilen silindirik numune görselleri Şekil 3.8’de çekme numuneleri ise Şekil 3.9’da verilmiştir. Bu numuneler sinterleme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.8. Sinterlenmemiş silindirik numune



Şekil 3.9. Sinterlenmemiş çekme numuneleri

Soğuk presle şekillenen ham numunelere her seri için 5 farklı sıcaklık değeri (1200°C-1225°C-1250°C-1275°C-1300°C) belirlenerek sinterleme yapılmıştır. Sinterleme işlemi PROTHERM-HLF marka fırında yapılmıştır. Sinterleme işleminde numuneler alümina altlıklar üzerine konularak fırına yerleştirilmiş, sinterleme işlemi maksimum sıcaklığa çıkma süresi 120 dakika olarak belirlenmiştir. 180 dakika bekleme süresi ve 10°C/min ısıtma ve soğutma hızı ile yapılmıştır. Sinterleme işleminin bütün aşamalarında ortama %99,99 saflıktaki Argon (Ar) gazı atmosferinde gerçekleştirilmiştir. İşlemin yapıldığı PROTHERM-HLF marka fırın Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10. Sinterleme işleminin yapıldığı fırın

3.3. Numunelere Uygulanan Testler

Sinterlenen numunelere Arşimet prensibine göre yoğunluk analizleri yapıldıktan sonra sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 silisyum karbür zımparalar kullanılarak temizlenmiş, saf alkol ile numuneler çuha ile parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra etil alkol içerisine %3 nitrik asit ilave edilerek nital çözeltisi elde edildi. Hazırlanan bu çözelti ile numuneler dağlanmıştır.

Sinterlenen silindirik numune görselleri Şekil 3.11’de sinterlenen çekme numuneleri ise Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Sinterlenen silindirik numune görselleri; S1=Ti4Mo5Cu, S2=Ti8Mo5Cu, S3=Ti12Mo5Cu, S4=Ti16Mo5Cu, S5=Ti20Mo5Cu



Şekil 3.12. Sinterlenmiş çekme numuneleri

Hazırlanan numunelerin faz analizleri için XRD (X-ışını dağılımı) Rigaku Ultima X-Ray Diffractometer markalı cihazda Cu X-ışını tüpü ($\lambda=1,5405$) kullanılarak 0,02/0,4 derece/saniye tarama hızı parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin parçacık

boyutu, parçacık Şekli, yüzey alanı, parçacıklar arasındaki sürtünme, dağılımı, mikroyapı bileŐim, homojenlik vb. zeliklerin analizleri için JEOL-JSM/6510 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bu cihaza bağlı olan IXRF-550 marka EDS sistemi ile analizler gerçekleştirilmiştir. SEM/EDS işleminde kullanılan cihaz Şekil 3.13’de verilmiştir. Aynı Şekilde Wilson Hardness THV-1D markalı Vickers sertlik ölçüm cihazında da 300 g yük kullanılarak serlik ölçümleri yapılmış, kullanılan cihaz Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. SEM/EDS cihazı



Şekil 3.14. Vickers sertlik ölçüm cihazı



Şekil 3.15. Sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası çekme numuneleri

Şekil 3.15’de görüldüğü gibi sinterlenmiş numunede boyca kısalmanın meydana geldiği görülmektedir.

Çekme testleri için ASTM E8 standartında hazırlanan numuneler AG-IC 50 kN model ve Shimadzu markalı cihaz kullanılarak 1 mm/dk sabit hızla çekilmiştir. Çekme işleminin yapıldığı cihaz Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. Çekme testinin yapıldığı cihaz

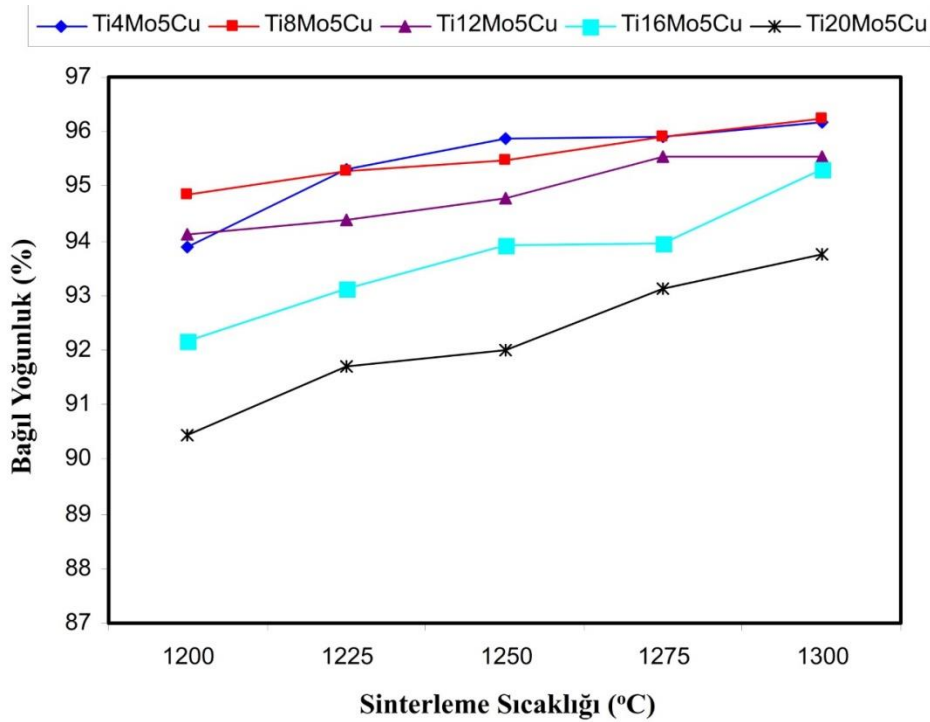
Çekme testleri her alaşım numunesi için üç adet yapılmış olup her birinin aritmetik ortalaması alınarak elde edilen sonuçlar grafik haline getirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasında yapılan test ve analiz sonuçları, resim, tablo ve grafik şekline dönüştürülerek elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve literatürle karşılaştırılmıştır.

4.1. Yoğunluk Sonuçları ve Analizi

Üretilen Ti_xMo_5Cu alaşımlarının yoğunlukları Arşimet Prensibine göre belirlenmiştir. Belirlenen yoğunluklara göre hesaplanan bağıl yoğunluk değer grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Üretilen numunelerin bağıl yoğunluk değerleri

Şekil 4.1’deki grafik incelendiğinde bütün numunelerde maksimum yoğunluk değerine en yüksek sinterleme sıcaklığı olan 1300 °C’de ulaşıldığı görülmüştür. Sinterleme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak elde edilen bağıl yoğunluk değerlerinin de arttığı

görülmektedir. Bu durum; Xu et al. (2020) yapmış oldukları çalışmada artan sinterleme sıcaklıklarının yoğunluk üzerinde ilk etapta kademeli bir artış sağladığını ve daha sonra artan sinterleme ile belirli bir seviyede (yaklaşık %98) stabilize olma eğilimindedir. Aynı konu ile ilgili diğer bir çalışma ise sinterleme sıcaklığı arttıkça gözenek miktarının azaldığını buna bağlı olarak bağıl yoğunlukların arttığını rapor etmişlerdir (Islak vd. 2017).

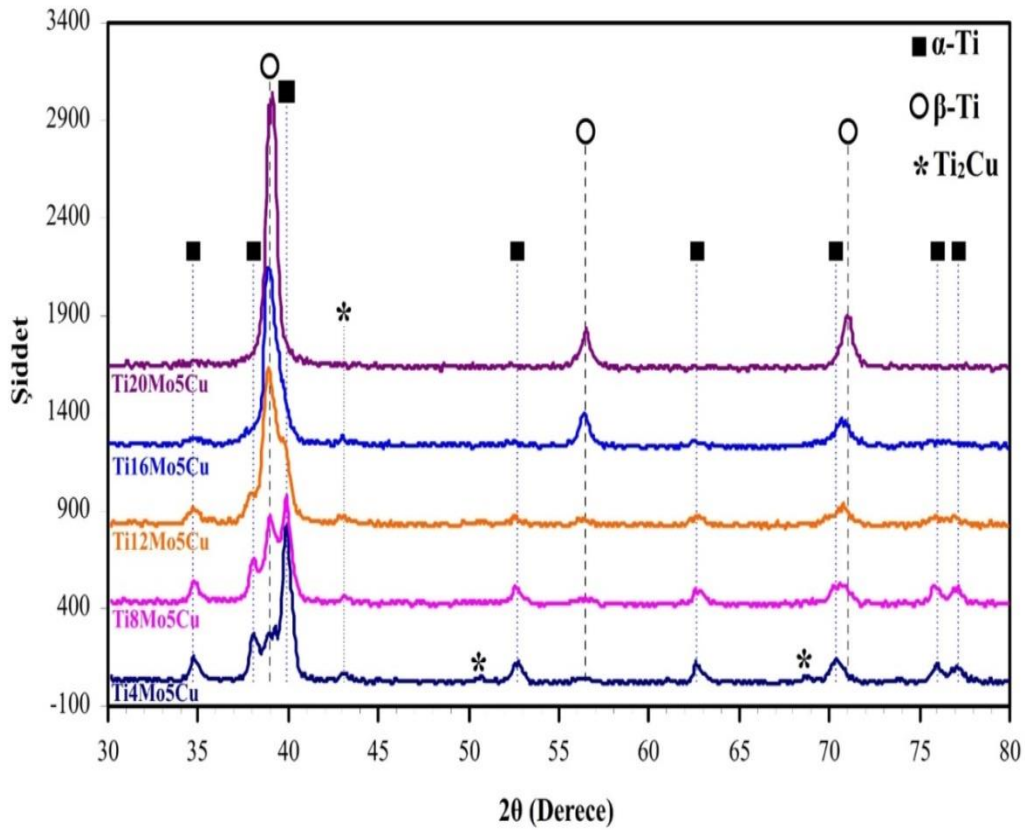
Grafik incelendiğinde bağıl yoğunluk değerleri üzerinde sinterleme sıcaklığının etkisinin yanında Mo içeriğinin de etkili olduğu anlaşılmaktadır. Aynı sıcaklıkta sinterlenmiş numunelerin bağıl yoğunluk değerleri kıyaslandığında Mo oranı arttıkça bağıl yoğunluk değerinin düştüğü görülmüştür. Özellikle 1250°C sinterleme sıcaklığındaki tüm numunelerde molibden oranı artmasına rağmen bağıl yoğunluk değerlerindeki azalma net olarak görülmektedir.

Son olarak Xu ve arkadaşlarının 1320°C’de sinterlemiş oldukları Ti10Mo5Cu alaşımında elde ettikleri %96,8 bağıl yoğunluk oranı, 1300°C sinterleme sıcaklığında elde ettiğimiz S2(Ti8Mo5Cu) alaşımındaki bağıl yoğunluk değeri yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Buradaki %1 yoğunluk farkının ise sinterleme sıcaklığının, partikül boyutu ve farklı presleme basıncıdan kaynaklandığı söylenebilir.

4.2. XRD Sonuçları ve Analizi

1300°C’de sinterlenen numunelere uygulanan XRD analizleri sonucu elde edilen kırınım desenleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Kırınım desenlerinden tüm numunelerin mikroyapısının genel olarak α -Ti ve β -Ti olmak üzere iki fazdan oluştuğu görülmektedir. Wei vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada Ti10MoxCu alaşımının farklı XRD analizleri sonucu elde edilen kırınım desenleri esas olarak α ve β fazlarından oluşur görüşünü bildirmişler. Titanyum alaşımlarında, bir alaşım elementinin en önemli özelliği α - β dönüşüm sıcaklığına etkisidir. Bazı alaşım elementleri, α - β dönüşüm sıcaklığını yükselterek α kristal yapısını stabilize ederken bazı alaşım elementleri ise α - β dönüşüm sıcaklığını düşürerek β fazını kararlı hale getirmektedir. Bu bakımdan alaşım elementlerini α yapıcılar ve β yapıcılar şeklinde sınıflandırmak mümkündür. Beta alaşımları V, Nb ve Mo gibi geçiş elementleri içerir ki, bu elementler α - β dönüşüm sıcaklığını düşürdükleri

için hacim merkezli kübik kristal yapıya sahip β fazının artmasına neden olurlar (ASM, 1991). XRD kırınım grafiği incelendiğinde artan Mo oranıyla birlikte α -Ti fazına ait piklerin şiddetinde azalma, β -Ti fazına ait piklerin şiddetinde ise artış olduğu görülmektedir. Bu durum yukarıda da açıklandığı üzere β yapıcı bir element olan Mo'nin α - β dönüşüm sıcaklığını düşürmesinden ve dolayısıyla mikroyapıdaki β fazı miktarının artmasına neden olmasından kaynaklanmaktadır. Sinterleme işlemlerinin yüksek saflıktaki argon atmosferinde yapılmış olması sayesinde, kırınım desenlerinde herhangi bir oksit bileşiğine ait pik görülmemiştir. Ağırlıkça %4, 8, 12 ve 16 Mo içeren numunelerin kırınım desenlerinde Ti_2Cu bileşiğine ait pikler bulunduğu, bu piklerin şiddetinin artan Mo oranıyla birlikte azaldığı görülmektedir. Ağırlıkça %20 Mo içeren numunelerde ise Ti_2Cu bileşiğine ait pikler bulunmamaktadır. Bu durum Mo miktarındaki artışın Ti_2Cu bileşiğinin oluşumunu güçleştirdiğini düşündürmektedir. $Ti_{10}Mo_3Cu$ ve $Ti_{10}Mo_5Cu$ alaşımlarında, ayrıca az miktarda Ti_2Cu fazı vardır (Xu et al. 2020). Bu sonuç XRD grafiğinde elde edilen fazlarla uyumludur.



Şekil 4.2. Üretilen numunelerin XRD analizinden elde edilen paternler

4.3. SEM/EDS Sonuçları ve Analizi

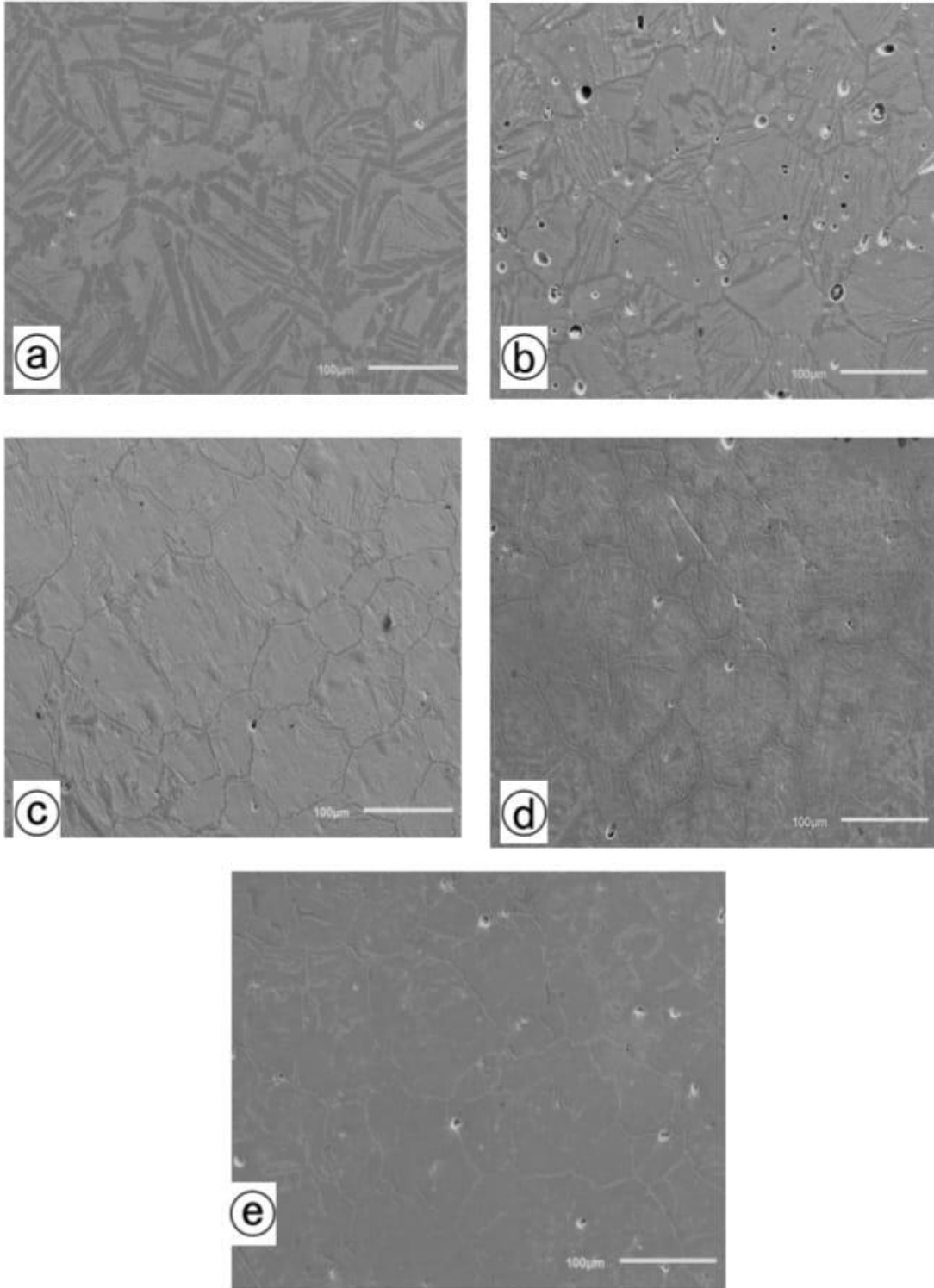
SEM incelemeleri en yüksek bağıl yoğunluğun elde edildiği 1300°C’de sinterlenen numunelere uygulanmıştır. Şekil 4.3’de 1300°C’de sinterlenen numunelerden alınmış SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde Şekil 4.1’de verilen bağıl yoğunluk değerleri ile uyumlu olarak mikroyapıda gözenekliliğin oldukça az olduğu görülmektedir. Gözenek miktarı artan Mo oranıyla birlikte artış göstermektedir. Xu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada artan Cu oranının ergime sıcaklığını düşürerek sinterleme sıcaklığını düşürdüğü rapor edilmiştir. Çalışmamızda ise Cu oranı sabit tutularak Mo oranı değiştirilmiştir. Gerek elde edilen bağıl yoğunluklar gerekse de SEM görüntüleri artan Mo oranıyla birlikte Ti alaşımlarının sinterlenebilirliğinin kötüleştiğini ortaya koymuştur.

XRD analizleri ile ilgili açıklamalarda tüm numunelerin mikroyapısının genel olarak α -Ti ve β -Ti fazlarından oluştuğu ifade edilmişti. SEM görüntülerinde de tüm numunelerin mikroyapısının bu iki fazdan oluştuğu görülmektedir. Her ne kadar XRD analizi ile ağırlıkça %16’ya kadar Mo içeren numunelerde Ti_2Cu bileşiğinin bulunduğu tespit edilmiş olsa da SEM görüntülerinde bu bileşiğe ait fazlar görülememektedir. Xu ve arkadaşlarının bahsi geçen çalışmalarında da Ti_2Cu fazının SEM ile tespit edilemediği, ancak TEM ile görüntülenebildiği belirtilmiştir (Xu et al. 2020).

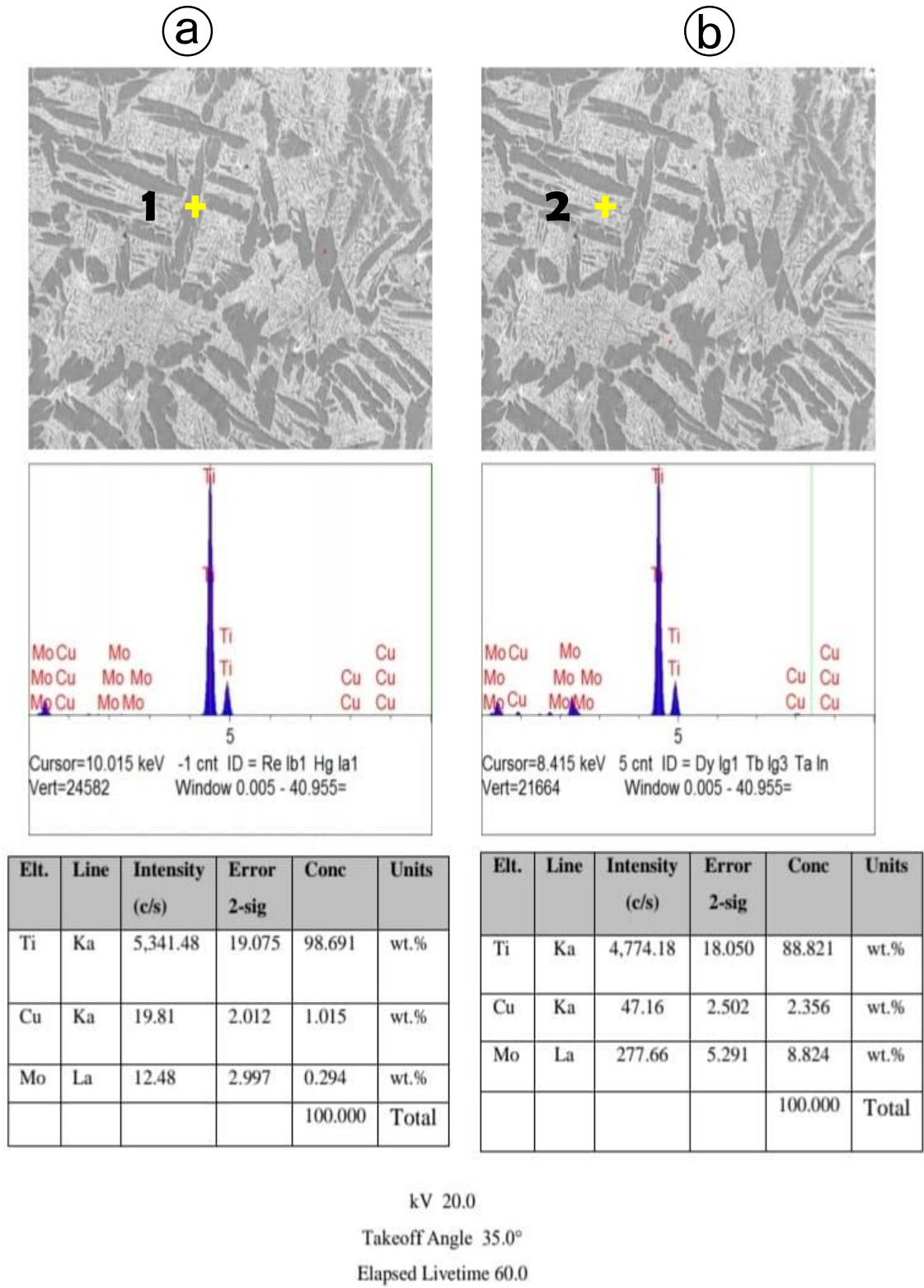
SEM görüntüleri incelendiğinde tüm numunelerde mikroyapının β -Ti matris (açık gri alanlar) içerisinde dağılmış α -Ti (koyu gri) fazlarından oluştuğu görülmektedir. Sinterleme işlemi 1300 °C’de yapılmış ve numuneler 10 °C/dk gibi düşük bir hızla soğutulmuştur. Numuneler sinterleme sıcaklığından oda sıcaklığına yavaş bir biçimde soğurken β -Ti fazının özellikle tane sınırlarından başlayarak α -Ti fazı çekirdeklenip büyüyerek bu mikroyapının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Daha önce de söz edildiği üzere Mo β -Ti fazını stabilize edici alaşım elementlerinden biridir. Mo β -Ti ve α -Ti dönüşüm sıcaklıklarını düşürerek soğuma esnasında mikroyapıda daha az α -Ti oluşmasına neden olmaktadır. Bu açıklamayla uyumlu olarak SEM görüntüleri kıyaslandığında artan Mo oranına bağlı olarak mikroyapıda oluşan α -Ti fazı miktarında bir azalma söz konusudur. Faz miktarındaki bu azalmanın yanında değişen Mo içeriğiyle birlikte α -Ti fazının kalınlığı da değişmektedir. %4 Mo içeren numunenin görüntüsünde oldukça kalın

lameller şeklinde α -Ti fazı oluşumu söz konusu iken %8 Mo içeren numunede α -Ti fazı iğnemsî (widmanstätten yapı) şeklinde görülmektedir. Mo oranının daha da artmasıyla α -Ti iğneleri daha da incelmış ve %20 Mo içeren numunenin görüntüsünde görülemeyecek bir hal almıştır. Her ne kadar %16 ve %20 Mo içeren numunelerin SEM görüntülerinde iğnemsî α -Ti fazı bulunmasa da tane sınırlarında neredeyse sürekli bir ağ şeklinde bulunduğu görülmektedir.

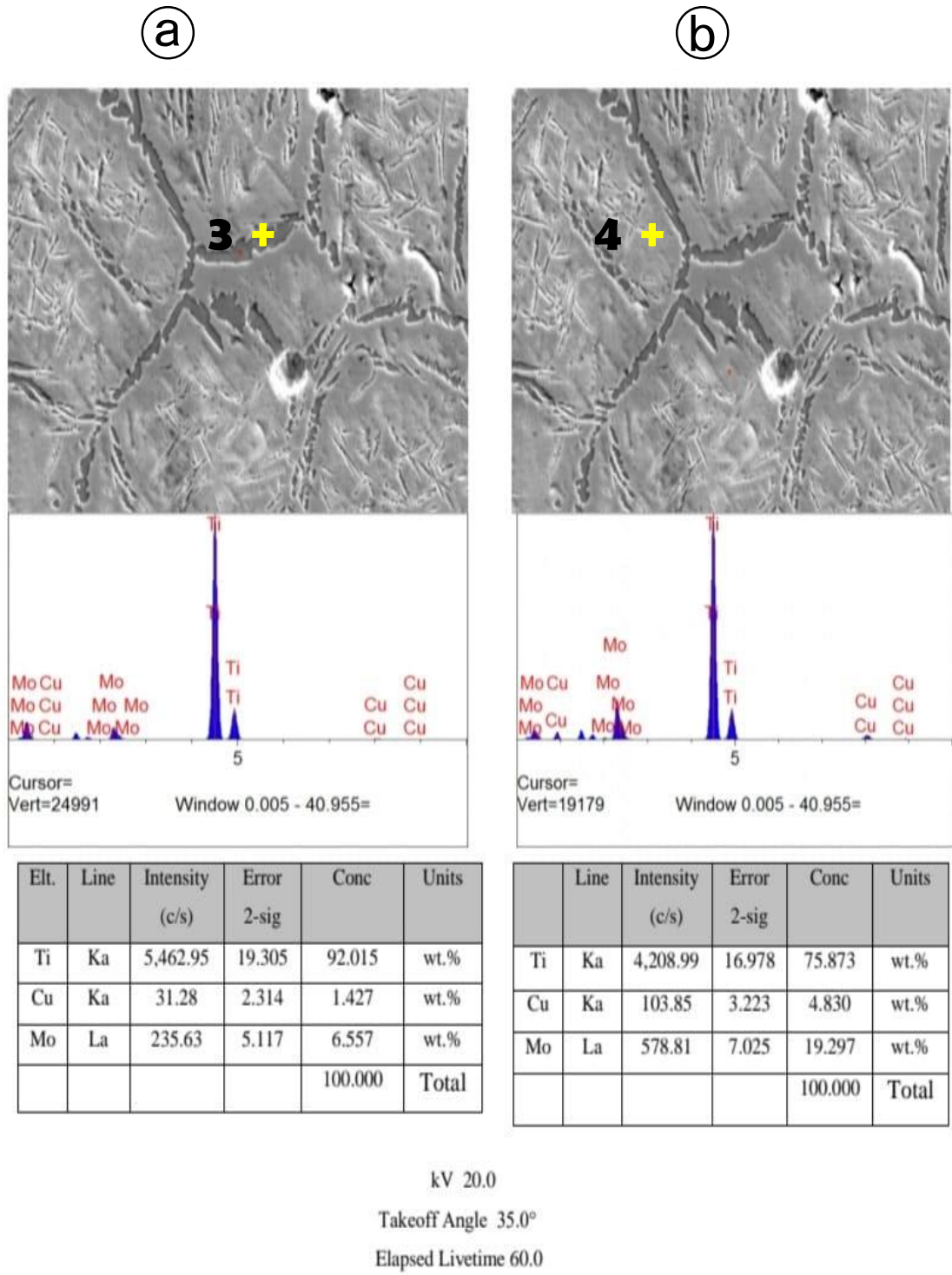
SEM görüntüleri incelendiğinde artan Mo içeriğiyle birlikte tane boyutunun da az miktarda arttığı görülmektedir. Bu durum artan Mo oranıyla birlikte yoğunlukta oluşan düşüşü de desteklemektedir.



Şekil 4.3. Sinterlenmiş alaşımların SEM görüntüleri; a) Ti4Mo5Cu, b) Ti8Mo5Cu, c) Ti12Mo5Cu, d) Ti16Mo5Cu, e) Ti20Mo5Cu



Şekil 4.4. Ti₄Mo₅Cu numunelerinin SEM ve EDS nokta analizleri



Şekil 4.5. Ti16Mo5Cu numunelerinin SEM ve EDS nokta analizleri

Sinterleme sıcaklığı 1300°C ve ağırlıkça %4Mo-%16Mo oranlarına sahip numunelerden alınan SEM/EDS noktasal analizlere ait fotoğraflar Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Şekil 4.4’ün a resminde yer alan Ti₄Mo₅Cu alaşımının 1 numaralı bölgedeki Mo oranı %0.3 iken, aynı şeklin b resmindeki 2 numaralı bölgede bu oran yaklaşık %9 civarındadır. Molibden oranının artışıyla birlikte Şekil 4.5’in a resminde 3 numaralı bölgedeki molibden oranı %6.5, b resimdeki 4 numaralı bölgede bu oran %19 düzeyine çıkmıştır. Aynı şekilde Cu oranında da her iki EDS analiz sonucunda koyu bölgeden açık bölgeye geçişte artış söz konusudur. Cu oranındaki artış bakırın beta Ti içerisinde katı çözünlülüğe sahip olduğu şeklinde açıklanabilir. Yüksek oranda molibdenin olması koyu renkli bölgeler α -Ti, açık renkli bölgeler β -Ti temsil etmesi, Mo’nin β -Ti yapıcı özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yavaş soğumayla birlikte β -Ti α ’ya dönüşmekte, fakat Mo buna engel olduğundan Mo oranı artışıyla oluşan α miktarında azalma görülmektedir.

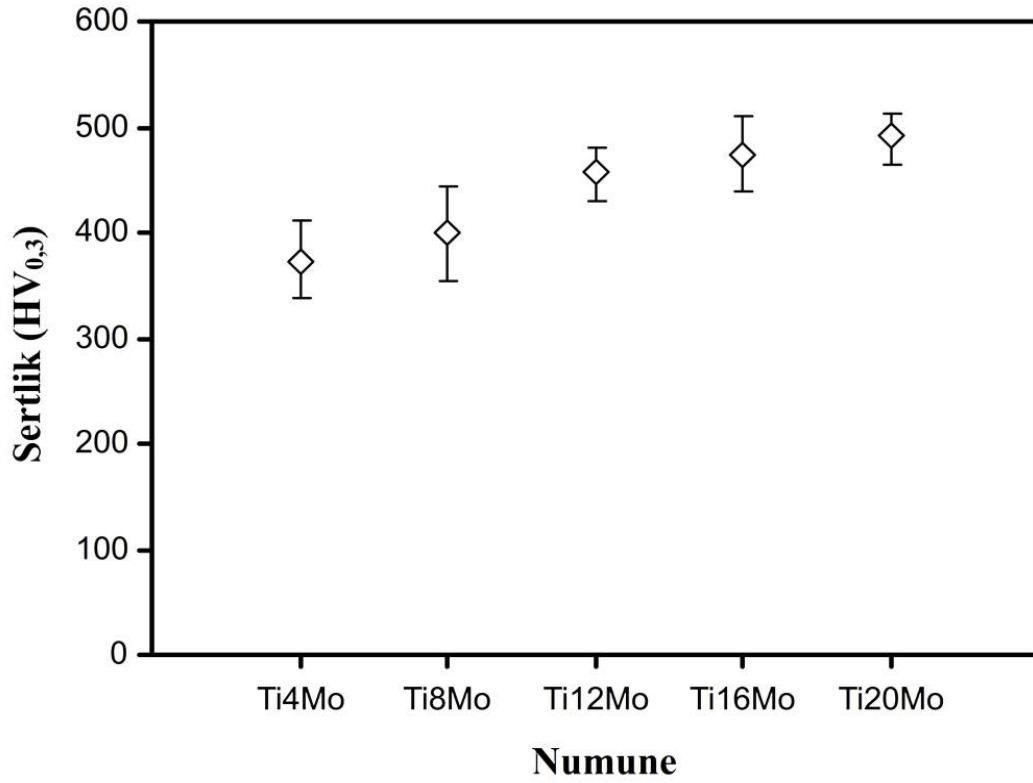
Tsai ve arkadaşları yaptıkları çalışmada EDS mikroyapı ve XRD grafiklerini karşılaştırmışlar ve XRD grafiğinde düşük yoğunluklarda Ti₂Cu bileşiğinde katı bir Cu çözültisi, yüksek yoğunluklarda ise α -Ti veya β -Ti fazlarını tespit etmişlerdir (Tsai et al.2011). Konu ile ilgili diğer bir çalışma ise Liu Et al. (2014) yaptıkları çalışmada XRD modeli yalnızca Ti₂Cu ve α -Ti’nin varlığını doğrulamakla birlikte, EDS analizinde Ti₂Cu yüksek bakır içeriğinde ($\approx$ 45% Cu) görüldüğünü isaret etmişlerdir. Bunun nedeni yüksek sinterleme sıcaklığı (1080 °C) olabilir. Böyle bir sıcaklıkta sadece Ti₂Cu fazı değil, Cu tozlarında da ergimesi olasıdır. Ergimiş Ti₂Cu ve Cu birleşecek ve yanıtıcı bir sonuç vereceğini tespit etmişlerdir.

4.4. Sertlik Testi Sonuçları ve Analizi

Bu çalışmada üretilen numunelerde en yüksek bağıl yoğunluk değerlerine 1300°C sinterleme sıcaklığında ulaşılmıştır. Bu yüzden sertlik ölçümü ve çekme deneyi gibi mekanik testler sadece 1300 °C sinterleme sonucu elde edilen numunelere uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri alınırken; her numunenin 5 farklı sertlik değeri ölçülmüştür. Daha sonra sertlik değerlerinin ortalaması alınarak elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir. Tablo 4.1 incelendiğinde en yüksek sertlik değerine S5 numaralı numunede 491,16 HV olarak ölçülürken en düşük sertlik değeri ise S1 numaralı numunede 373,5 HV olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.6’da grafik haline dönüştürülmüştür.

Tablo 4.1. Hazırlanan numunelerin vickers sertlik değerleri

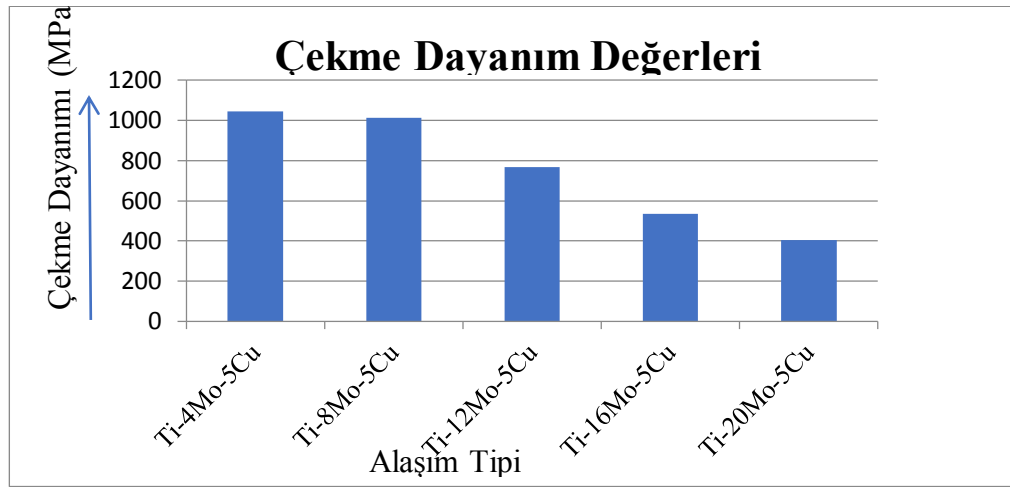
Numune Adı	Numune İçerikleri	Vickers sertlik (HV) Değeri
S1	Ti-4Mo-5Cu	373.5
S2	Ti-8Mo-5Cu	399,71
S3	Ti-12Mo-5Cu	457.61
S4	Ti-16Mo-5Cu	473.1
S5	Ti-20Mo-5Cu	491.16



Şekil 4.6. Üretilen alaşımların vickers sertlik değerleri

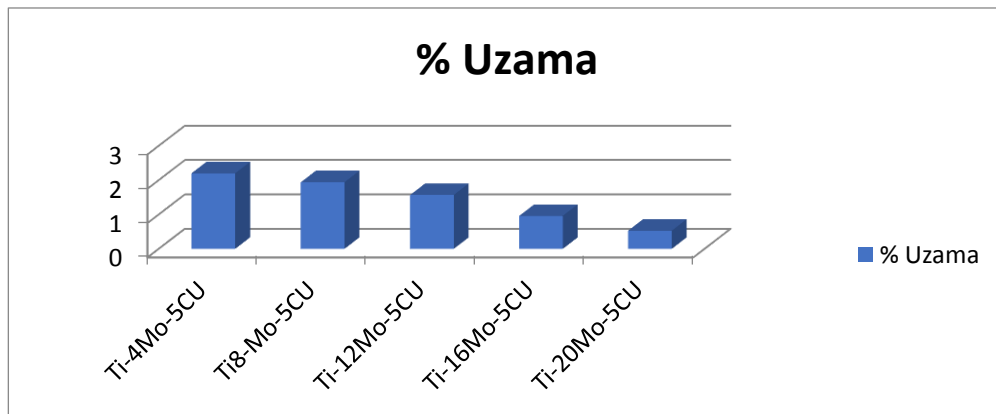
Sertlik grafiğini incelediğimizde Molibden oranı artıkça sertlik değerlerinin artışı görülmüştür. Saf titanyumun sertlik değeri yaklaşık olarak 354 HV iken ilave edilen molibdenin etkisi ile daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Yapı içerisine artarak dağılan molibden taneleri katı çözelti sertleşmesi sağlayarak sertliği artırmıştır. Xu ve arkadaşlarının Ti- Mo alaşımları üzerinde yapmış oldukları çalışmada Ti alaşımına artırılarak takviye edilen molibdenin katı çözelti göçlendirmesiyle indüklenen iğnemsiz α fazının çözelti ile güçlendirme etkisi yaparak sertliği artırdığını bildirmişlerdi (Xu et al. 2020).

4.5. Çekme Testi ve Kırık Yüzey SEM Analizi

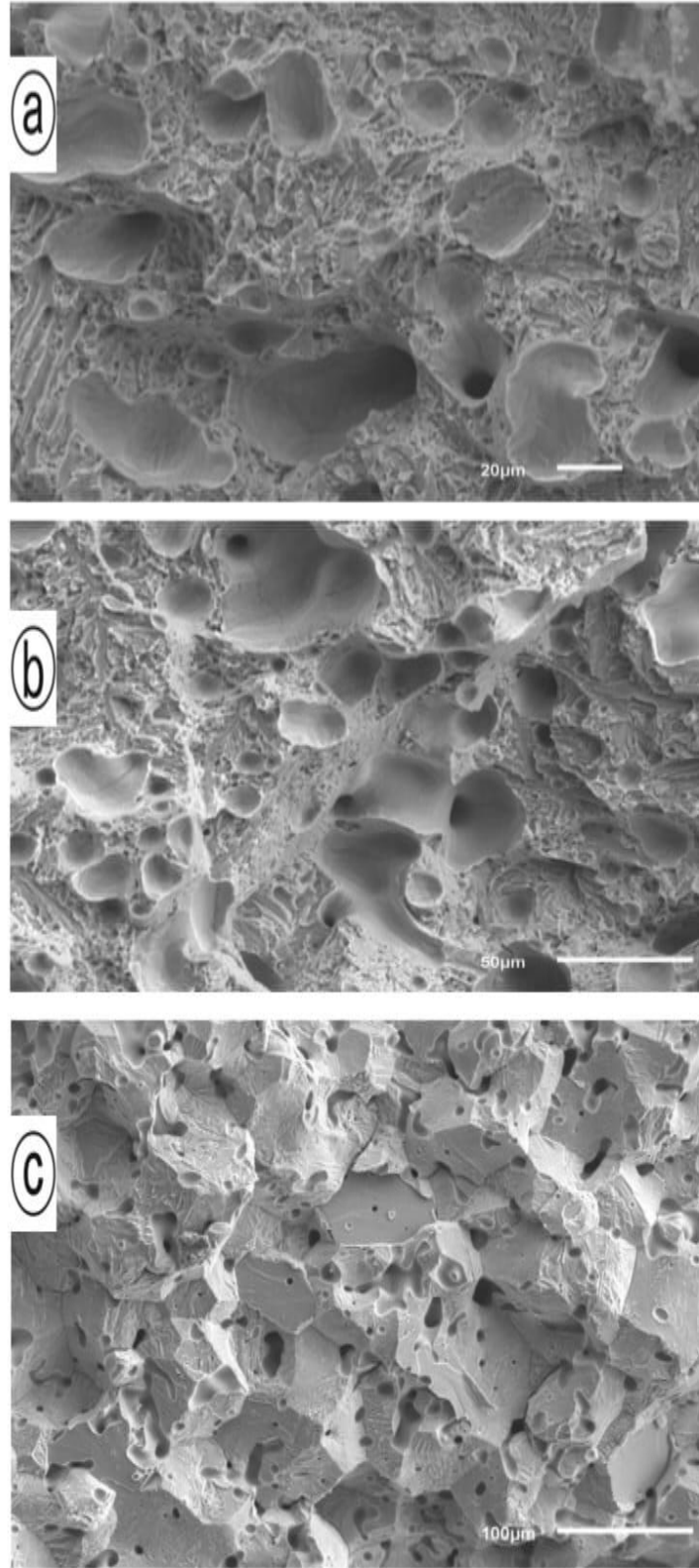


Şekil 4.7. Alaşımların çekme dayanımı değerleri

Farklı Mo içeriğine sahip Ti_xMo_5Cu alaşımlarının çekme deneyi sonucunda elde edilen çekme dayanım değerleri Şekil 4.7'deki grafikte gösterilmiştir. Mikroyapıdaki resimlerle de kıyaslandığında çekme mukavemeti, %4 Mo dan, %8 Mo geçerken az bir düşme görülürken, %12'den fazla Mo artışıyla birlikte mukavemet değerlerinin belirgin şekilde düştüğü görülmektedir. En yüksek çekme mukavemeti 1044,68 MPa ile Ti4Mo5Cu alaşımında elde edilirken, en düşük çekme dayanımı ise 404,992 MPa ve Ti20Mo5Cu alaşımında görülmüştür. Elde edilen çekme dayanım değerleri, Xu ve arkadaşlarının Ti10MoxCu alaşımında elde ettikleri 916,2–1162,2 MPa aralığındaki çekme dayanım değerlerine yakın sonuçlar olduğu görülmektedir (Xu et al. 2020).



Şekil 4.8. Alaşımların % uzama grafiği



Şekil 4.9. Sinterlenen alaşımların kırık yüzeyi SEM görüntüleri; a) Ti4Mo5Cu, b) Ti8Mo5Cu, c) Ti20Mo5Cu

1300°C’de sinterlenen farklı Mo içeriklerine sahip $Ti_{x}Mo_5Cu$ alaşımların kırık yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Kırık yüzey SEM görsellerinde görüldüğü gibi artan Mo oranı beraber gözenekler de artmıştır. Gözenek yapısında oluşan bu artış yoğunlukta oluşan düşme ile desteklenmektedir. Mo oranındaki artışla birlikte süneklikte bariz bir azalma olduğu görülmektedir. %4 Mo içeren numunede yüksek oranda gamze şeklinde çukurcuk oluşumu söz konusu iken Mo oranı arttıkça çukurcuk oluşumu azalmış ve daha gevrek bir kırılma söz konusu olmuştur. Özellikle %20 Mo içeren numunede hiç gamze şeklindeki çukurcuk oluşumu bulunmamakta klivaj (düzlemler boyunca) şeklinde bir kırılma meydana gelmiştir. Kırılma, çoğunlukla transgranuler (tane içi kırılma) olmak üzere hem transgranuler hem de intergranuler (tanelerarası kırılma) şeklinde gerçekleşmiştir. Yine Şekil 4.9’deki görsellerde görüldüğü gibi %4 Mo içeren alaşımda kırılmanın lifli ve mat olması onun sünek olduğunu gösterirken; %20 Mo alaşımlı görselde de pürüzsüz, parlak bir yüzey görüntüsü gevrek olduğunu göstermektedir. Mo oranının artışıyla birlikte elde edilen sertlik değerlerindeki artış da kırık yüzey fotoğraflarında görülen yapıyı desteklemektedir.

Molibden artışı faz dönüşüm sıcaklığını azaltarak β dengeleyici durumunu sağlamıştır. β dengeleyici elementleri kırık yüzeylerde gevrek bir yapı sağladığı görülmüştür. Subaşı ve Karataş (2016). Çalışmasında V, Nb, Mo, Cr ve Ta gibi alaşım elementlerinin Faz dönüşüm sıcaklığını azalttığını ve bunun sonucunda β dengeleyicisi etkisi yarattığını söylemiştir. Genellikle β dengeleyici elementlerin ise alaşımlarda gevrek bir yapı sağladıklarını rapor etmişlerdi. Artan Mo oranıyla süneklikten gevrekliğe doğru oluşan bu durum çekme dayanım değerleri ile uyum göstermektedir.

Süneklik üzerinde etkili olan başka bir durum ise alaşımda bulunan %5 Cu oranıdır. %5 Cu oranının az miktarda sünekliği azalttığı düşünülmektedir. Liu et al. (2014), Titanyumun bakırla yapmış olduğu alaşımlar arasında; Ti_2Cu alaşımının en iyi sünekliğin sağlandığı, buna karşın ağırlıkça %5-25 Cu içeriğine sahip Ti-Cu alaşımlarının çok daha düşük bir süneklik sağladıklarını söylemişlerdi. Özellikle Ti_7Cu alaşımlarında Cu içeriğindeki bir artış, ince Ti_2Cu parçacıklarının oluşumundan dolayı süneklikte çok daha fazla düşüşe sebep olduğunu bildirmişler.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemiyle Cu oranı sabit tutularak, farklı parametrelerde Mo kullanılmış ve biyomalzeme alanında yaygın olarak kullanılan Ti alaşımları üretilmiştir. Üretilen alaşımların mikroyapı ve mekanik özellikleri sonuç ve önerileri şu şekilde özetlenmiştir;

Sonuçlar:

1. $Ti_{x}Mo_{5}Cu$ alaşımında ilave edilen Mo oranı artışına paralel olarak süneklikte azalma meydana getirirken gevrek kırılma artmıştır. Bu durum çekme mukavemetini düşürmüştür.
2. $Ti_{x}Mo_{5}Cu$ alaşımında takviye edilen Mo artıka porozite artışıyla birlikte yoğunluk düşmüştür.
3. SEM ve XRD analizleri sonucunda yapı içerisine artarak dağılan molibden taneleri katı çözelti sertleşmesi sağlayarak sertliği artırdığı görülmüştür.
4. $Ti_{x}Mo_{5}Cu$ alaşımında, sinterleme sıcaklığı arttıkça gözenek miktarının azaldığını buna bağlı olarak bağıl yoğunlukların arttığı tespit edilmiştir.
5. Elde edilen alaşım numunelerinde artan Mo oranıyla sertlik artarken, mukavemet düşmüştür.
6. Literatürde $TiMoCu$ alaşımlarının özellikleri ile ilgili farklı çalışmaların oldukça az olduğu tespit edilmiştir.

Öneriler:

1. Sıcak izostatik presleme yöntemi kullanılarak daha yüksek yoğunlukta alaşımlar üretilebilir.
2. Aynı parametrelerdeki alaşım numunelerine farklı sinterleme süreleri yapılarak yoğunluk ve sertlik değerlerindeki ilişki incelenebilir.
3. Çalışmada sadece titanyum molibden alaşımı yapılarak molibdenin yoğunluk, sertlik, çekme ve mikroyapı üzerindeki etkileri karşılaştırılabilir.
4. $Ti_{x}Mo_5Cu$ Alaşımlarına ısıtıl işlem (yaşlandırma) işlemi uygulanarak mikroyapı ve mekanik özelliklerin incelenmesi yapılabilir.
5. Aynı çalışmada değişen molibden oranı ve farklı sinterleme sıcaklıklarının korozyon direnci üzerindeki etkileri karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

Ahmed, Y. M., Sahari, K. S. M., Ishak, M., & Khidhir, B. A. (2014). Titanium and its Alloy. *International Journal of Science and Research*, 3(10), 1351-1361.

Akbarpour, M. R., & Javadhesari, S. M. (2017). Wear performance of novel nanostructured Ti-Cu intermetallic alloy as a potential material for biomedical applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 699, 882-886.

Allen, P. (1996). "Titanium alloy development", *Adv Mater Process*, 154, 35–37.

Alshammari, Y., Jia, M., Yang, F., & Bolzoni, L. (2020). The effect of $\alpha + \beta$ forging on the mechanical properties and microstructure of binary titanium alloys produced via a cost-effective powder metallurgy route. *Materials Science and Engineering: A*, 769, 138496.

Andrade, P. N., Coelho, A. A., Afonso, C. R. M., Contieri, R. J., Robert, M. H., & Caram, R. (2010). Effects of composition on solidification microstructure of cast titanium alloys. In *Materials Science Forum* (Vol. 649, pp. 183-188). Trans Tech Publications Ltd.

Anık, S. (1986). Titanyum alaşımlarının kaynak kabiliyeti, *Mühendis ve Makina Dergisi*, Cilt 27, Sayı 318, 18-22.

ASM, (1991) *Metals Handbook, Properties and Selections: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol. 2, ASM International, USA, 1328.

Ataş, A. (2003). "Alaşımlı Demir Tozu Peletlerinin Sinterleme Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., F.B.E., İstanbul.

Aydın, M. ve Yetkin, H. (2006). MMK Üretiminde Farklı Tasarımlardaki Karıştırıcıların Etkisinin Araştırılması, *Teknoloji Dergisi*, Cilt 9, Sayı 1, 39- 46.

Aydın, Ş. (1997). *Toz Metalurjisi Yöntemleri İle Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Babayev, Y. (2007). Bir Kompresör Gövdesi İmalatının Toz Metalurjisi ve Difüzyon Kaynağı Yöntemleri Uygulanarak Optimizasyonu, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Babayev, Y. (2011). The Effect of Sintering Temperature and Duration on Wear Characteristics of Iron Based Powder Metal Parts. *Material and Manufacturing Processes*.

Bağcı, K. 2001, Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü, Müh. Ansik. Cilt IV, 2001.

Baksan, B. ve Gürler, R. (2001). Toz Metalurjisinin Savunma Sanayisinde Uygulanması, Metalurji Enstitüsü, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 26480.

Balın, A. (2011). Sıcak Presleme Tekniğiyle Üretilen CoCrMo Toz Alaşımının Sinterleme Sıcaklığının Mikroyapı Üzerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

Bao, M., Liu, Y., Wang, X., Yang, L., Li, S., Ren, J., & Zhang, E. (2018). Optimization of mechanical properties, biocorrosion properties and antibacterial properties of wrought Ti-3Cu alloy by heat treatment. *Bioactive materials*, 3(1), 28-38.

Çalışkan, C. (2000). Toz Metalurjisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Bitirme Projesi.

Dikici, B. (2010). “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Nikel Titanyum Alaşımlarının Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Dong, R., Zhu, W., Zhao, C., Zhang, Y., & Ren, F. (2018). Microstructure, mechanical properties, and sliding wear behavior of spark plasma sintered Ti-Cu alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49(12), 6147-6160.

Erdem, M. S. ve Aydın, K. (2006). Gaz türbinli uçak motorlarında titanyum alaşımlarının kullanımı, *Mühendis ve Makine*, Cilt 47, Sayı 558, 44-53.

Foo KS., Banks WM & Craven AJ. (1994). Interface characterization of an SiC particulate/6061 aluminium alloy composite, *Composites* 25(7): 677–683.

German, M. R. (1996). “Sintering Theory and Practice”, Wiley-Interscience, New York, USA.

German, R.M. (2007). Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Ed: Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, N. Birinci Basım, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları:05, Ankara.

Gültekin, A.H. (1993). “Titanyum Mineral Yatakları, Kayaçlarda Titanyum: İçeriği ve Bölümlenmesi”, *Jeoloji Mühendisliği*, 42, 21-37.

Güven, Ş.Y. (2014). “Biyoyumluluk ve Biyomalzemelerin Seçimi”, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2(3), ÖS: Biyomekanik, Isparta, sf 303-311.

Hatman, A. ve Karagöz, Ş. (1993). Su Atomize CuZn42 Alaşımı Tozu Üretimi ve Su Basıncının Toz Özelliklerine Etkileri, 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Ankara.

Hiçyılmaz, N. (1999). Toz Metalurjisi Yöntemi İle Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Islak, S., Özorak, C., & Hraam, H. (2017). Effect of sintering temperatures on transverse rupture strength of MgAl-cNT composites, 2nd International Defense Industry Symposium.

Keskin, İ. (1991). Malzeme El Kitabı, Genişletilmiş 2. baskı, Yayın ve Dağıtım Onarsan A.Ş, Ankara, 240.

Keskin, M. S. (2009). Titanyum (Grade1) malzemenin lazer kaynağı yöntemiyle birleştirilmesinin incelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.

Kikuchi, M., Takada, Y., Kiyosue, S., Yoda, M., Woldu, M., Cai, Z., ... & Okabe, T. (2003). Mechanical properties and microstructures of cast Ti-Cu alloys. Dental materials, 19(3), 174-181.

Köktaş, S. (2015). “Ti6Al4V Alaşımının İçyapı ve Yüzey Özelliklerinin CaP Bileşikleriyle Doyurulmuş Mg İçerikli MAO Filmlerinin Oluşumuna Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Leyens, C. & Peters, M. (Eds.). (2003). Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. John Wiley & Sons.

LEVTEMS (Web Sitesi 20 Ağustos 2020 Mühendislik / Teknoloji).

Liu, J., Li, F., Liu, C., Wang, H., Ren, B., Yang, K., & Zhang, E. (2014). Effect of Cu content on the antibacterial activity of titanium-copper sintered alloys. Materials Science and Engineering: C, 35, 392-400.

Liu, R., Ma, Z., Kolawole, S. K., Zeng, L., Zhao, Y., Ren, L., & Yang, K. (2019). In vitro study on cytocompatibility and osteogenesis ability of Ti-Cu alloy. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 30(7), 1-10.

Liu, X., Chen, S., Tsoi, J. K., & Matinlinna, J. P. (2017). Binary titanium alloys as dental implant materials-a review. Regenerative biomaterials, 4(5), 315-323.

Luo, Q. S., Li, S. F., & Pei, H. P. (2012). Progress in titanium fire resistant technology for aero-engine. Journal of aerospace power, 27(12), 2763-2768.

McCracken, M. (1999). Dental implant materials: commercially pure titanium and titanium alloys. Journal of prosthodontics, 8(1), 40-43.

Meral, M. (2013) “Çok İşlevli Uyluk Çivisi Tasarımı, Üretimi ve Mekanik Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Min, K. H., Kang, S. P., Kim, D. G., & Do Kim, Y. (2005). Sintering characteristic of Al₂O₃-reinforced 2xxx series Al composite powders. *Journal of alloys and compounds*, 400(1-2), 150-153.

Moshokoa, N. A., Raganya, M. L., Machaka, R., ME Makhatha, Obadele, B. A. (2021). Molibden içeriğinin döküm Ti-Mo alaşımlarının mikroyapısal gelişimi ve çekme özellikleri üzerindeki etkisi, *Mater. Bugün Komün.* 27 102347, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102347>.

Ohkubo, C., Shimura, I., Aoki, T., Hanatani, S., Hosoi, T., Hattori, M., & Okabe, T. (2003). Wear resistance of experimental Ti-Cu alloys. *Biomaterials*, 24(20), 3377-3381.

Onur, A. (1996). Yağ Atomizasyonu Yöntemi İle Metal Tozu Üretiliminin İncelenmesi. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü,

Özgün, Ö. (2007). “Toz Metalurjisi ile Üretilen Düşük Alaşımlı Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, F.B.E., Sakarya.

Park, J. B. and Bronzino, J.D. (2003). “Biomaterials”, Principles and Applications, CRC Press, Boca Raton, FL.

Pavlovic, M., G., Pavlovic, L., J., Ivanovic, E., R., Radmilovic, V., Popov, K., I. (2001), The Effect of Particle Structure on Apparent Density of Electrolytic Copper Powder, *J. Serb. Chem. Soc.* 66(11-12) 92.

Peng, C., Zhang, S., Sun, Z., Ren, L., & Yang, K. (2018). Effect of annealing temperature on mechanical and antibacterial properties of Cu-bearing titanium alloy and its preliminary study of antibacterial mechanism. *Materials Science and Engineering: C*, 93, 495-504.

Ramaswamy, R., Marimuthu, P., & Selvam, B. (2016). An overview on mechanical properties of particulate reinforced Ti6Al4V metal matrix composites. *ARNP J Eng Appl Sci*, 11(9), 6066-6069.

Sands, R. L. & Shakespeare, C. R. (1996) “Powder Metallurgy”, George Newnes Ltd., London.

Sarıtaş , S., Türker, M. ve Durlu, N. (2007). “Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara.

Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, N. 2008, Toz metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Uyum Ajans, Ankara.

Savaşkan, T. (1999.) “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Trabzon.

Shugo Y., Shimizu T., Morii K., Yamada,T. & Kusaka, K. (1993). Effects of heat treatment and thermal cycle on helical spring properties in NiTiCu alloy. *Proc Inter Conf Martensitic Trans*, Monterrey, p 1259.

Smith, W. F., Structure and Properties Of Engineering Alloys, Çev: Erdogan, M. (2001) Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Second Edition, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2,446-497.

Somunkıran, İ. (1999). “Demir Esaslı Molibden, Nikel, Bakır Katkılı Toz Metal Alaşımlarının Mekanik Özelliklerine Bakır Oranının Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, F.B.E., Elazığ.

Souza, S. A., Afonso, C. R. M., Ferrandini, P. L., Coelho, A. A., & Caram, R. (2009). Effect of cooling rate on Ti–Cu eutectoid alloy microstructure. Materials Science and Engineering: C, 29(3), 1023-1028.

Söyler, M. (2007). Toz Metalurjisi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze.

Subaşı, M. ve Karataş, Ç. (2016). Titanyum ve Titanyum Alaşımlarından Yapılan İmplantlar Üzerine İnceleme Gazi Üniversitesi, Atatürk Meslek Yüksekokulu, 06500, Beşevler, ANKARA

Sun, Q. Y., Yu, Z. T., & Zhu, R. H. (2008). Dynamic fracture toughness of Ti-2.5 Cu alloy strengthened with nano-scale particles at room and low temperatures. Materials Science and Engineering: A, 483, 131-134.

Takahashi, M., Kikuchi, M., Takada, Y., & Okuno, O. (2002). Mechanical properties and microstructures of dental cast Ti-Ag and Ti-Cu alloys. Dental materials journal, 21(3), 270-280.

Tsai, J. T., Cheng-Yu Han, Cheng Liang, and Shung-Tian Lin (2011). Microstructure and Properties of Ti-8Mo-12Fe and Ti-8Mo8Cu alloys with Cr₃C₂ Additives Produced in the Powder Metallurgy Processes Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei 106, Taiwan, ROC.

Uluta, A. Bor Takviyeli Bakır Kompozitinin Toz Metalurjisi yöntemi ile üretimi ve mekani-elektriksel özelliklerinin incelenmesi Doktora Tezi 2014.

URL 2, www.ASM.org, (2013). “Titanium and Titanium Alloys”, ASM International web. , Materials News Departments, 2013 (ASM International).

URL 3, www.RMI (2000). Titanium.com, “Titanium Alloy Guide”, RMI Titanium Company, an RTI International Metals, Inc. Company, Jan.

Vallet-Regí, M. (2001) “Ceramics for Medical Applications”, Journal of Chemical Society, Dalton Transactions, (2) 97-108.

Wang, J., Zhang, S., Sun, Z., Wang, H., Ren, L., & Yang, K. (2019). Optimization of mechanical property, antibacterial property and corrosion resistance of Ti-Cu.

Welsch, G., Boyer, R., & Collings, E. W. (Eds.). (1993). Materials properties handbook: titanium alloys. ASM international.

Xu, W., Chena, M., Lu, X., Da-wei Zhanga, Harsh-preet Singhc, Jian-shu Yub, Yu Pana, Xuan-hui Qua, Chao-zong Liu (2020b). *Effects of Mo content on corrosion and tribocorrosion behaviours of Ti-Mo orthopaedic alloys fabricated by powder metallurgy*

Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.

Xu, W., Houa, C., Mao Y., Lei Yang, Maryam Tamaddon, Jianliang Zhang, Xuanhui Qu, Chaozong Liu, Bo Su, Xin Lu. (2020a) *Characteristics of novel Ti-10Mo-xCu alloy by powder metallurgy for potential biomedical implant application* 659-666.

Xu, Y., Jiang, J., Yang, Z., Zhao, Q., Chen, Y., & Zhao, Y. (2020). The Effect of Copper Content on the Mechanical and Tribological Properties of Hypo-, Hyper-and Eutectoid Ti-Cu Alloys. *Materials*, 13(15), 3411.

Yalçın, B. (2007). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal edilen Titanyum Alaşımli İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması*”, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Yılmaz, Y., AVCI B. ve Demirören, H. (2019) Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye 2 Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye *Sorumlu Yazar ve Konuşmacı: yilmazyes@itu.edu.tr Sunum/Metin Türü: Sözlü Sunum/Tam Metin.

Yuan, Y., Luo R., Ren J., Zhang L., Jiang, Y. & Zhengyuan H. (2022). Design of a new Ti-Mo-Cu alloy with excellent mechanical and antibacterial properties as implant materials School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China b Department of Mechanical & Industrial Engineering, Northeastern University, Boston MA 02115.

Zhan, Y. & Zhang, G. (2003). The effect of interfacial modifying on the mechanical and wear properties of SiCp/Cu composites *Mater Lett* 57(29), 4583-4591.