

**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN TZM
ALAŞIMLARININ KARAKTERİZASYONU VE
AŞINMA PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**2018
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

HAKTAN SIRALI

**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN TZM ALAŞIMLARININ
KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Haktan SIRALI

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Aralık 2018

Haktan SIRALI tarafından hazırlanan “TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN TZM ALAŞIMLARININ KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA PERFORMANSININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

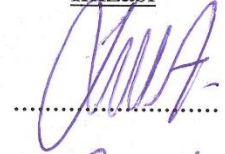


Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 24/12/2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ARSLAN (DÜ)



Üye : Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Tansel TUNÇAY (KBÜ)

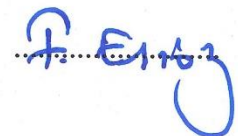


...../...../2018

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü V.





“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Haktan SIRALI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN TZM ALAŞIMLARININ KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Haktan SIRALI

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışman:

Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Aralık 2018, 76 sayfa

Bu çalışmada, farklı miktarlarda titanyum (Ti) ve zirkonyum (Zr) ilave edilerek üretilen TZM (Titanyum-Zirkonyum-Molibden) alaşımlarının karakterizasyonu ve aşınma performansları incelenmiştir. Farklı miktarlarda Ti ve Zr kullanılan TZM alaşımları 120 dak mekanik alaşımlanmıştır. Mekanik alaşımlama işleminin ardından üretilen alaşım tozları ön şekillendirilmiştir. Ön şekillendirilen alaşımlar vakum altında sinterlenmiş ve fırın içerisinde oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Üretilen alaşımlar, taramalı elektron mikroskobu (SEM+EDS), X-ışını kırınımı (XRD), sertlik, yoğunluk ölçümleri ile karakterize edilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde alaşımdaki Ti miktarı arttırıldığında tane sınırlarında oluşan gözeneklerin boyutunun küçüldüğü ve tane içlerine yoğunlaştığı görülmektedir. Alaşımdaki Zr miktarının artışı ile gözenek miktarının arttığı ve özellikle tane içlerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Aşınma testleri pin-on-disk tipi cihazında farklı yük ve kayma mesafelerinde test edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda alaşımın

içerisine ilave edilen Ti ve Zr miktarına bağı olarak sertlik değerlerinde artış görülürken yoğunluk değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Aşınma testleri sonrasında en düşük ağırlık kaybı 10 N yük uygulanan numunelerde elde edilirken, en yüksek ağırlık kaybı 30 N yük uygulanan numunelerde elde edilmiştir. Aşınma yüzeyi SEM ve EDS (haritalama) görüntüleri incelendiğinde oluşan aşınma mekanizmalarının hem adhesif hem de abrazif aşınma olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : TZM, molibden alaşımları, refrakter malzeme, mekanik alaşımlama, aşınma davranışları.

Bilim Kodu : 915.1.193



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

AN INVESTIGATION OF CHARACTERIZATION AND WEAR PERFORMANCE OF TZM ALLOYS PRODUCED BY POWDER METALLURGY

Haktan SIRALI

Karabük University

Graduate School Of Natural And Applied Sciences

Department Of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

December 2018, 76 page

In this study, characterization and wear performance of TZM (Titanium-Zirconium-Molybdenum) alloys produced by adding different amounts of titanium (Ti) and zirconium (Zr) were investigated. TZM alloys with different amounts of Ti and Zr is mechanically alloyed for 120 minutes. The alloy powders produced after the mechanical alloying process are preformed. The preformed alloys were sintered under vacuum and cooled to room temperature in heat treatment furnace. The alloys produced are characterized by scanning electron microscopy (SEM+EDS), X-ray diffraction (XRD), hardness and density measurements. When the microstructure images are examined, it is seen that when the amount of Ti in the alloy is increased, the size of the pores formed at the grain boundaries diminish and concentrate inside the grains. It was observed that the amount of pore increased with the increase in the amount of Zr in the alloy and the pores were concentrated especially in the interior.

Wear tests have been tested on the pin-on-disc type device at different load and shear distances. As a result of the studies carried out in the alloy due to the amount of Ti and Zr depending on the amount of hardness values of the alloy has been observed to decrease in intensity values. The lowest weight loss after the wear tests was obtained in the specimens with 10 N load applied, while the highest weight loss was observed in the specimens with 30 N load applied. Wear surface When the SEM and EDS (mapping) images are examined, it is seen that the wear mechanisms which are formed are both adhesive and abrasive wear mechanism.

Key Word : TZM molybdenum alloys, refractory material, mechanical alloying, wear behavior.

Science Code : 915.1.193

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında bilgileri ve tecrübeleri ile desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Dr. Öğr. Gör. İjlal ŞİMŞEK ve Dr. Öğr. Üyesi Musa YILDIRIM'a ayrıca çalışma sürem boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen doktora öğrencileri Rüstem BİNALİ ve Mücahit COŞKUN'a teşekkür ederim.

Bu Yüksek Lisans Tez Çalışmasında, Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Komisyonuna KBÜ-BAP-17-YL-420 numaralı proje ile desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Sevgili aileme, maddi ve manevi yardımlarını benden esirgmeden her zaman yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| KABUL..... | ii |
| ÖZET..... | iv |
| ABSTRACT..... | iv |
| TEŞEKKÜR..... | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xiii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xvi |
| | |
| BÖLÜM 1 | 1 |
| GİRİŞ | 1 |
| | |
| BÖLÜM 2 | 3 |
| TZM ALAŞIMLARI..... | 3 |
| 2.1. TZM ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ..... | 4 |
| 2.2. TZM ALAŞIMININ KULLANIM ALANLARI..... | 6 |
| | |
| BÖLÜM 3 | 7 |
| TOZ METALURJİSİ | 7 |
| 3.1. TOZ METALURJİSİNİN KULLANIM ALANLARI..... | 8 |
| 3.2. TOZ METALURJİSİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI..... | 9 |
| 3.3. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM TEKNİKLERİ | 10 |
| 3.3.1. Mekanik Yöntemler | 11 |
| 3.3.1.1. Talaş Kaldırma Yöntemi..... | 12 |
| 3.3.1.2. Öğütme Yöntemi..... | 12 |
| 3.3.1.3. Darbe Yöntemi..... | 13 |
| 3.3.1.4. Mekanik Alaşım Yöntemi | 14 |
| 3.3.2. Elektroliz ile Toz Üretim Yöntemi | 16 |

Sayfa

| | |
|--|-----------|
| 3.3.3. Kimyasal Yöntemler ile Toz Üretim Yöntemi..... | 17 |
| 3.3.3.1. Oksit İndirgeme | 17 |
| 3.3.3.1. Sıvı Fazdan Çökeltme | 18 |
| 3.3.3.3. Isıl Bozunma | 18 |
| 3.3.4. Atomizasyon Yöntemleri | 19 |
| 3.3.4.1. Gaz Atomizasyonu..... | 19 |
| 3.3.4.1. Su Atomizasyonu | 21 |
| 3.3.4.1. Santrifüj Atomizasyonu | 21 |
| 3.4. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİNDE PARÇA ÜRETİMİ | 22 |
| 3.4.1. Tozların Karıştırılması | 22 |
| 3.4.2. Tozların Preslenmesi..... | 23 |
| 3.4.3. Tozların Sinterlenmesi | 24 |
| 3.4.4. Son İşlemler | 27 |
| BÖLÜM 4 | 28 |
| AŞINMA..... | 28 |
| 4.1. AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER..... | 29 |
| 4.1.2. Sürtünme Elemanına Bağlı Aşınma Faktörleri | 29 |
| 4.1.3. Karşı Elemana Bağlı Aşınma Faktörleri | 30 |
| 4.1.4. Ortama Bağlı Aşınma Faktörleri..... | 30 |
| 4.1.5. Çalışma Koşullarına Bağlı Aşınma Faktörleri | 30 |
| 4.2. TRİBOLOJİK SİSTEM | 30 |
| 4.3. AŞINMA MEKANİZMALARI..... | 31 |
| 4.3.1. Oluş Mekanizmalarına Göre Aşınma Mekanizmaları | 32 |
| 4.3.1.1. Adhezif Aşınma | 32 |
| 4.3.1.2. Abrazif Aşınma | 33 |
| 4.3.1.3. Yorulma Aşınması | 35 |
| 4.3.2. Hasarın Fiziksel Görünümüne Göre Aşınma Mekanizmaları..... | 35 |
| 4.3.2.1. Korozyif Aşınma..... | 35 |
| 4.3.2.2. Erozyon Aşınması..... | 36 |
| 4.3.3. Aşınmanın Aldığı Özel İsimlere Göre Aşınma Mekanizmaları..... | 37 |
| 4.3.3.1. Öğütmeli Aşınma | 37 |

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 4.3.3.1. Oymalı Aşınma | 38 |
| 4.3.3.2. Kazımalı Aaşınma..... | 38 |
| 4.2. AŞINMA TESTLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ..... | 38 |
| 4.2.2. Kalın Farkı Metodu | 39 |
| 4.3.3. Radyo-İzotoplar Ölçüm Metodu | 39 |
| 4.3.4. Ultrasonik Ölçüm Metodu | 40 |
| 4.3.5. Optik Metod | 40 |
| 4.3.6. Mekanik Ölçüm Metodu | 41 |
| | |
| BÖLÜM 5 | 42 |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR | 42 |
| 5.1. DENEYSEL MALZEMELER..... | 42 |
| 5.2. MEKANİK ALAŞIMLAMA İŞLEMLERİ..... | 43 |
| 5.3. TOZ BOYUT ANALİZİ..... | 44 |
| 5.4. PRESLEME İŞLEMİ..... | 44 |
| 5.5. SİNTERLEME İŞLEMİ..... | 46 |
| 5.6. METALOGRAFİK NUMUNE HAZIRLAMASI | 46 |
| 5.7. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ..... | 47 |
| 5.8. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ..... | 47 |
| 5.9. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM+EDS) İNCELEMESİ ... | 48 |
| 5.10. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ..... | 48 |
| 5.11.AŞINMA DENEYLERİ..... | 48 |
| | |
| BÖLÜM 6 | 49 |
| DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA..... | 49 |
| 6.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ..... | 49 |
| 6.1.1. Titanyum Miktarı Değiştirilen TZM Alaşımının Mikroyapı İncelemeleri..... | 49 |
| 6.1.2. Zirkonyum Miktarı Değiştirilen TZM Alaşımının Mikroyapı İncelemeleri..... | 51 |
| 6.2. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ..... | 53 |
| 6.2.1. Titanyum Miktarı Değiştirilen TZM Alaşımının XRD İncelemeleri..... | 53 |
| 6.2.2. Zirkonyum Miktarı Değiştirilen TZM Alaşımının XRD İncelemeleri | 54 |

| | |
|---|----|
| 6.3. YOĞUNLUK VE SERTLİK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ . 55 | |
| 6.3.1. TZM Alaşımında Titanyum Miktarının Yoğunluk ve Sertlik Üzerindeki Etkileri..... | 55 |
| 6.3.2. TZM Alaşımında Zirkonyum Miktarının Yoğunluk ve Sertlik Üzerindeki Etkileri..... | 56 |
| 6.4. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ | 57 |
| 6.4.1. TZM Alaşımında Titanyum Miktarının Aşınma Davranışları Üzerindeki Etkileri..... | 57 |
| 6.4.2. TZM Alaşımında Zirkonyum Miktarının Aşınma Davranışları Üzerindeki Etkileri..... | 63 |
| BÖLÜM 7 | 69 |
| DENEYSEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 69 |
| KAYNAKLAR | 72 |
| ÖZGEÇMİŞ | 76 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1. TZM alaşımının diğer alaşımlarla karşılaştırmalı termal iletkenlik sıcaklık grafiği..... | 6 |
| Şekil 3.1. Toz metalurjisi iş akış şeması..... | 4 |
| Şekil 3.2. Toz metalürjisi ile üretilmiş parçaların kullanım alanları | 7 |
| Şekil 3.3. Öğütme yönteminin şematik gösterimi | 12 |
| Şekil 3.4. Darbeli yöntem ile toz üretiminin şematik gösterimi..... | 13 |
| Şekil 3.5. Mekanik alaşım ile elemanları ve Öğütme süresi ile değişen tozların mikroyapı görüntüleri..... | 14 |
| Şekil 3.6. Mekanik Alaşım ile Sistemde tozlar ve bilyeler arasındaki çarpışma ... | 15 |
| Şekil 3.7. Mekanik alaşımlamada başlangıçtaki ve sondaki mikroyapıları..... | 18 |
| Şekil 3.8. Elektroliz hücresinin şematik gösterimi | 18 |
| Şekil 3.9. Yatay gaz atomizasyon sisteminin şematik gösterimi..... | 20 |
| Şekil 3.10. Düşey gaz atomizasyon sisteminin şematik gösterimi..... | 20 |
| Şekil 3.11. Su atomizasyon ile toz üretim prosesleri | 21 |
| Şekil 3.12. Santrifüz atomizasyon sisteminin şematik gösterimi | 22 |
| Şekil 3.13. Presleme basıncı ile yoğunluk ve dayanım değişimleri | 23 |
| Şekil 3.14. Presleme işleminin şematik gösterimi..... | 24 |
| Şekil 3.15. Sinterleme evrelerinin şematik gösterimi..... | 25 |
| Şekil 3.16. Sinterleme sırasında yapıdaki değişikliğin şematik gösterimi | 26 |
| Şekil 3.17. Sinterleme esnasında gözeneklerin yapısal değişimi | 26 |
| Şekil 4.1. Tribolojik sistem elemanlarının şematik gösterimi..... | 31 |
| Şekil 4.2. Metallerin teması sonucunda oluşan adhezif aşınmanın şematik olarak gösterimi..... | 33 |
| Şekil 4.3. Abrazif aşınmanın şematik olarak gösterimi..... | 34 |
| Şekil 4.4. Abrazif aşınma biçimleri..... | 34 |
| Şekil 4.5. Yorulma aşınmasının şematik olarak gösterimi | 35 |
| Şekil 4.6. Korozif aşınmanın şematik olarak gösterimi | 36 |
| Şekil 4.7. Erozyon aşınmasının şematik gösterimi..... | 37 |
| Şekil 4.8. Öğütmeli aşınmanın şematik olarak gösterimi..... | 37 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.9. Optik metoda aşınma miktarını belirlemek için kullanılan mikro sertlik çukurunun şematik olarak gösterimi | 41 |
| Şekil 5.1. Hassas terazi..... | 43 |
| Şekil 5.2. Mekanik alaşımlama/öğütme cihazı..... | 44 |
| Şekil 5.3. Soğuk presleme kalıbı | 45 |
| Şekil 5.4. Tozların şekillendirilmesinde kullanılan pres. | 45 |
| Şekil 5.5. Sinterleme işlemlerinin yapıldığı vakumlu ısıtma fırınının görüntüsü..... | 46 |
| Şekil 5.6. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro sertlik cihazının görüntüsü | 47 |
| Şekil 6.1. Farklı oranlarda titanyum ilave edilerek üretilen TZM alaşımlarının SEM görüntüleri | 49 |
| Şekil 6.2. Yapısında %0,40 Ti kullanılarak üretilen TZM alaşımının EDS analizi | 50 |
| Şekil 6.3. Farklı oranlarda Zr kullanılarak üretilen TZM alaşımının SEM görüntüleri | 51 |
| Şekil 6.4. Farklı oranlarda Zr kullanılarak üretilen TZM alaşımının EDS analizi.. | 52 |
| Şekil 6.5. Yapıda %0,55 Ti, %0,06 Zr ve %99,36 Mo bulunduran TZM alaşımın XRD sonuçları..... | 53 |
| Şekil 6.6. Yapıda %0,40 Ti, %0,09 Zr ve %99,48 Mo bulunduran TZM alaşımın XRD sonuçları..... | 54 |
| Şekil 6.7. Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının sertlik ve yoğunluk değişimleri..... | 55 |
| Şekil 6.8. Farklı miktarlarda Zr içeren TZM alaşımlarının sertlik ve yoğunluk değişimleri..... | 56 |
| Şekil 6.9. Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının ağırlık kaybı ve aşınma oranları a) 10 N, a) 20 N ve c) 30 N..... | 58 |
| Şekil 6.10. Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının sürtünme katsayıları: a) 10 N,b) 20 N ve c) 30 N..... | 59 |
| Şekil 6.11. Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının aşınma yüzey SEM görüntüleri | 61 |
| Şekil 6.12. %0,55 Ti bulunduran TZM alaşımının 2000 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi EDS (mapping) görüntüleri..... | 62 |
| Şekil 6.13. Farklı miktarlarda Zr içeren TZM alaşımının aşınma ağırlık kaybı ve aşınma oranları a) 10 N, a) 20 N ve c) 30 N | 64 |
| Şekil 6.14. Farklı Zr miktarlarına sahip mekanik alaşımlanmış TZM alaşımının sürtünme katsayıları: a) 10 N, b) 20 N ve c) 30 N | 65 |
| Şekil 6.15. Farklı Zr miktarlarına sahip TZM alaşımının farklı yüklerdeki aşınma yüzey SEM görüntüleri | 66 |
| Şekil 6.16. 120 dak mekanik öğütülen %0,09 Zr bulunduran TZM alaşımının 2000 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi EDS (mapping) görüntüleri..... | 67 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

| | | |
|--------------|--|----|
| Çizelge 2.1. | Toz metalurjisi ve vakum ark ergitme ile üretilen TZM alaşımının kimyasal bileşimi..... | 3 |
| Çizelge 2.2. | TZM alaşımın genel özellikleri | 4 |
| Çizelge 2.3. | Yeniden kristalleştirme ve gerilim giderme tavlamalarında sonra TZM alaşımının mekanik özellikleri | 5 |
| Çizelge 5.1. | Titanyum oranı değiştirilen TZM alaşımının % element miktarları .. | 42 |
| Çizelge 5.2. | Zirkonyum oranı değiştirilen TZM alaşımının % element miktarları | 42 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|--------------------------------|--|
| Mo | : molibden |
| Ti | : titanyum |
| Zr | : zirkonyum |
| C | : karbon |
| Fe | : demir |
| Si | : silisyum |
| Ni | : nikel |
| H | : hidrojen |
| O | : oksijen |
| Cu | : bakır |
| Mn | : mangan |
| Ag | : altın |
| Nb | : niobyum |
| Hf | : hafniyum |
| Ta | : tantalyum |
| CO | : karbon monoksit |
| TiC | : titanyum karbür |
| ZrC | : zirkonyum karbür |
| Mo ₂ C | : molibden karbür |
| MoO ₂ | : molibden oksit |
| CH ₃ OH | : metanol |
| H ₂ SO ₄ | : sülfürik Asit |
| nm | : nanometre |
| µm | : mikrometre |
| MPa | : mega paskal |
| Rpm | : revolution per minute (dakikada bir devir) |

KISALTMALAR

| | |
|-----|--|
| TM | : Toz Metalurjisi |
| TZM | : Titanyum-Zirkonyum-Molibden |
| MA | : Mekanik Alaşımlama |
| MÖ | : Mekanik Ögütme |
| SEM | : Scanning Electron Microscobe (Taramalı Elektron Mikroskobu) |
| XRD | : X-Ray Diffraction (X-ışını kırınımı) |
| EDS | : Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağılım Spektrometresi) |
| HV | : Hardenss Vickers (Vickers Sertliği) |
| HRC | : Hardness Rockwell (Rockwell Sertliği) |
| DC | : Direct Current (Doğru Akım) |

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Molibden (Mo) 2610 °C ile ergime sıcaklığı en yüksek metallere biridir. Bu özelliğinden dolayı uzay ve havacılık sektörleri ile birlikte savunma sanayisinde de yaygın olarak kullanılan malzemelerden biridir. Teknolojinin hızla gelişmesi ile yüksek sıcaklıklarda uzun çalışma sürelerine sahip malzemelere olan ihtiyaç nedeniyle, bu malzemelerin alternatiflerinin ortaya konması için yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Alternatif olarak düşünülen tungstenin yüksek yoğunluğa sahip olması ve işlenmesinin oldukça zor olmasının yanı sıra ekonomik olmaması, tungstenin bu amaçlar doğrultusunda kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, molibdene az miktarlarda alaşım elementleri ilave edilerek yeni bir alaşım geliştirilmiştir. Bu alaşım, Titanyum-Zirkonyum-Molibden (TZM) alaşımı olarak adlandırılmaktadır. Böylece, molibdenin refrakter özelliği geliştirilerek, yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanılması amaçlanmıştır.

TZM alaşımları yaklaşık olarak %0,4-0,5 Ti, %0,06-0,09 Zr, %0,01 C içermektedir. İlave edilen bu alaşım elementleri ile karbür çökmesi amaçlanmaktadır. Yapıda oluşturulan karbürler (TiC ve ZrC) ile alaşım sistemi, yüksek sıcaklıklarda daha kararlı hale gelmektedir. Ayrıca, yapıda oluşturulan bu karbürler, yeniden kristalleşme sıcaklığını ve sürünmeye karşı direncinin arttırmaktadır [1].

TZM alaşımı gibi yüksek sıcaklık direncine ve refrakter özelliğine sahip alaşımların üretimi oldukça zordur. Çünkü yüksek çalışma sıcaklığına sahip olan bu alaşımların üretimleri için, yüksek miktarlarda enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, bu alaşımlarda yüksek sıcaklıklarda meydana gelen oksidasyon, üretimi zorlaştırmaktadır. Bu nedenle TZM alaşımları, genellikle toz metalurjisi ve vakum ark ergitme yöntemleri ile üretilmektedir. Vakum ark ergitme yöntemi ile yapılan

üretimlerde, heterojen tane boyutu, anot hazırlama işlemi ve ekonomik nedenlerden dolayı toz metalurjisi tercih edilmektedir [1].

Toz metalurjisi (TM) yöntemi ile yapılan üretimlerde, bir toz metalürjisi yöntemi olan mekanik alaşımlama/öğütme (MA/MÖ) yöntemi öne çıkmaktadır. Bu yöntemde, matris malzemesine alaşım elementleri ilave edilerek yüksek devirlerde bilyeler ile alaşımlama/öğütme yapılmaktadır. MA/MÖ işlemi sırasında, alaşımı oluşturan tozlar bilyeli öğütme sürecinde sürekli olarak ezilmeye, soğuk kaynaklanmaya, deformasyon sertleşmesine ve kırılmalara maruz kalmaktadır. MA/MÖ yöntemi, tozların belirlenen boyut ve homojenlikte elde edildiği bir katı hal yöntemidir. Bu yöntem ile istenilen özelliklerdeki malzeme elde etmek için birçok değişken bulunmaktadır. Öğütme atmosferi, öğütme hızı, öğütme süresi, bilye toz oranı, kaptaki doluluk oranı, öğütme tipi, öğütme sıcaklığı başlıca değişkenlerdir. Bu değişkenlerden en önemlileri ise, öğütme süresi ve bilye toz oranıdır [2].

Bu çalışmada, farklı miktarlarda Ti ve Zr ilave edilerek mekanik alaşımlama ile TZM alaşımlarının üretimi, karakterizasyonu ve aşınma performansları incelenmiştir. Böylece, titanyumun ve zirkonyumun alaşımın yapısında oluşturduğu karbürler ile birlikte, mikroyapıya olan etkisinin incelenmesi hedeflenmektedir. Üretim sırasında farklı miktarlarda titanyum ve zirkonyum içeren alaşım gruplarında, aynı öğütme süreleri ve bilye toz oranları kullanılmıştır. Sinterleme işlemleri, oksidasyonun önlenmesi için vakumlu atmosfer ortamında gerçekleştirilmiştir. Farklı miktarlarda Ti ve Zr içeren TZM alaşımlarının yoğunluk ve sertlik ölçümleri yapılarak titanyum, zirkonyumun ve karbürlerinin alaşımların yapısına etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Üretilen TZM alaşımlarının aşınma testlerinde ise farklı yükler ve kayma mesafeleri kullanılarak, değişken yüklere karşı alaşımların aşınma performanslarının ölçülmesi hedeflenmiştir.

BÖLÜM 2

TZM ALAŞIMLARI

TZM alaşımları ilk olarak 1954 yılında Climax Molybdenum Co. USA firması tarafından molibdene çok az miktarlarda titanyum, zirkonyum ve karbon ilave edilerek üretilmiştir. Saf molibdene zirkonyum, titanyum ve karbon ilave edilerek üretilen TZM alaşımlarının yoğunluğu yaklaşık olarak $10,16 \text{ g/cm}^3$, ergime sıcaklığı ise $2620 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. TZM alaşımlarına titanyum ve zirkonyumun ilave edilerek üretilmesinin temelinde, yapıda karbürler (TiC ve ZrC) oluşturularak alaşımların yüksek sıcaklık mukavemetinin kazandırılması amaçlanmaktadır [3].

TZM alaşımları, toz metalurjisi ve vakum ark ergitme yöntemleri olmak üzere iki farklı yöntemle üretilmektedir. Bu iki yöntem ile üretilen TZM alaşımlarının yapısında bulunan N, Si ve O miktarları farklılık göstermektedir. Toz metalurjisi ve vakum ark ergitme yöntemleriyle üretilen TZM alaşımlarının kimyasal bileşimleri, Çizelge 2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Toz metalurjisi ve vakum ark ergitme ile üretilen TZM alaşımlarının kimyasal bileşimi [1].

| Üretim Yöntemi | Ti | Zr | C | Fe | Si | Ni | N | H | O |
|-------------------|----------|-----------|-----------|------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Toz Metalurjisi | 0,4-0,55 | 0,06-0,12 | 0,01-0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,001 | 0,0005 | 0,003 |
| Vakum Ark Ergitme | 0,4-0,55 | 0,06-0,12 | 0,01-0,04 | 0,01 | 0,005 | 0,005 | 0,002 | 0,0005 | 0,03 |

2.1. TZM ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

TZM alaşımlarının mekanik ve fiziksel özellikleri, saf molibden ile çok yakındır. TZM alaşımının genel özellikleri ise, Çizelge 2.2’de verilmektedir. Fakat, TZM alaşımları molibdene göre daha yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığına sahiptir. Saf molibdenin yeniden kristalleşme sıcaklığı 900 °C, TZM alaşımın ise 1425-1595 °C arasındadır. Yeniden kristalleşme sıcaklığının yüksek olması nedeniyle, TZM alaşımı yüksek sıcaklık uygulamalarında yapısı değişmeden rahatlıkla kullanılabilir. TZM alaşımının yapısında bulunan Ti, Zr ve C alaşımın yapısında TiC ve ZrC oluşturmaktadır. Bu karbürler tane sınırlarında çökelerek, yeniden kristalleşmeyi yavaşlatıcı veya durdurucu etki göstermektedir. Ayrıca, oluşan bu sert karbürler, alaşımın da sertliğini ve sürünme dayanımını arttırmaktadır.

Çizelge 2.2. TZM alaşımlarının genel özellikleri [1].

| | | | |
|------------------------------------|---------|-------------------------------------|-----------|
| Sertlik (GPa) | 2,4-2,9 | Ergime Noktası (°C) | 2620 |
| Yoğunluk (g/cm ³) | 10,16 | Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı (°C) | 1425-1595 |
| Çekme Gerilmesi (MPa) | 620 | Akma Gerilmesi (MPa) | 550 |
| Termal Genleşme Katsayısı (µm/m·K) | 4,9 | Elastik Modül (GPa) | 320 |
| Isıl İletkenlik (W/m·K) | 120 | Kaynama Noktası (°C) | 4612 |

TZM alaşımlarına yeniden kristalleşme ve gerilim giderme tavlama uygulanmaktadır. Yeniden kristalleşme tavlama, deformasyona uğrayan alaşımın faz yapısında bir değişiklik yapmadan çekirdeklenme ve büyüme ile yani yeni taneler elde etmek için uygulanmaktadır. Gerilim giderme tavlama, vakum ark eritme ile üretilen alaşımlarda, alaşımın hızlı ve dengesiz soğutulması sırasında oluşan gerilmeleri gidermek için uygulanmaktadır. Bu işlem 1095-1260 °C sıcaklık

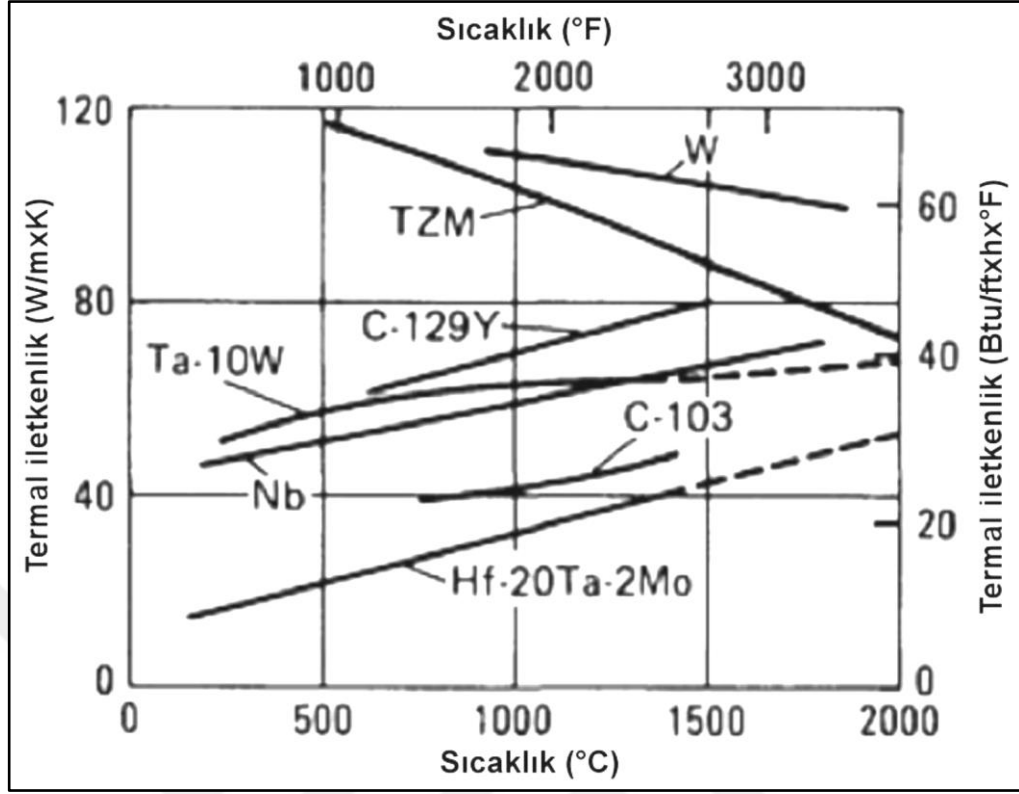
aralığında bir saat bekletilerek yapılmaktadır. Yeniden kristalleştirme ve gerilim giderme tavlamlarında sonra TZM alaşımlarının belirli sıcaklıklardaki akma mukavemetleri, çekme mukavemetleri ve yüzde uzama miktarları, Çizelge 2.3’de verilmektedir.

Çizelge 2.3. Yeniden kristalleştirme ve gerilim giderme tavlamlarında sonra TZM alaşımının mekanik özellikleri [1].

| Sıcaklık | Çekme Mukavemeti (MPa) | Akma Mukavemeti (MPa) | %Uzama |
|--|------------------------|-----------------------|--------|
| Yeniden Kristalleştirme Tavlaması | | | |
| 20 °C | 550 | 380 | 20 |
| 1095 °C | 505 | - | - |
| 1315 °C | 369 | - | - |
| Gerilim Giderme Tavlaması | | | |
| 20 °C | 965 | 860 | 10 |
| 1095 °C | 490 | 435 | - |
| 1650 °C | 83 | 62 | - |

Yeniden kristalleştirilme ve gerilim giderme tavlamları sonrasında TZM alaşımlarının mekanik özellikleri büyük oranda değişmektedir. Gerilim giderme tavlaması uygulanmış TZM alaşımının 1650 °C’de çekme mukavemeti 83 MPa’dır. Gerilim gidermesi tavlaması yapılmış TZM alaşımları, kontrollü atmosfer altında 1650 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda mukavemetini korunmaktadır. TZM alaşımının 20 °C (oda sıcaklığında) elastisite modülü 315 GPa, 1095 °C’da ise 205 GPa’dır.

TZM alaşımları 20-40 °C arasında 4,9 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ lineer termal genleşme katsayısına sahiptir. Termal iletkenlik ise 120 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ dir. Fakat, termal iletkenlik sıcaklık ile değişmektedir. Şekil 2.1’de refrakter metallerin, alaşımların ve TZM alaşımlarının sıcaklık ile değişen termal iletkenlik grafiği verilmektedir. Bu grafikte TZM alaşımlarının termal iletkenlik değerleri artan sıcaklık ile azalmaktadır. Ancak, 2000 °C’da termal iletkenlik değerinin Nb, Hf-20Ta-2Mo vb. gibi birçok malzemenin termal iletkenliğinden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 2.1. TzM alaşımının diğer alaşımlarla karşılaştırmalı termal iletkenlik sıcaklığı [1].

2.2. TzM ALAŞIMININ KULLANIM ALANLARI

TzM alaşımları günümüzde uzay ve havacılık sektörü, savunma sanayi, otomotiv sektörünün yanı sıra birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Bu alaşımlar özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarının olduğu alanlarda tercih edilmektedir. TzM alaşımları çok yüksek ergime sıcaklıklarına sahip olduklarından dolayı üretim maliyetleri de oldukça yüksektir [3].

Savunma sanayinde roket başlıklarında, ateşleme elamanlarında, nükleer reaktörlerin parçalarında, ısı ve radyasyon kalkanlarında, askeri araçların motor aksamlarında kullanılmaktadır. Tıbbi cihazların üretiminde kullanıldığı gibi ısı işlem fırınlarında, plastik enjeksiyon ve döküm kalıplarında da kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe motor parçalarında ve diğer iç aksamalarda kullanılırken, gaz boru hatlarında ve elektrotlarda da kullanılmaktadır. Ayrıca elektrik-elektronik uygulamalarında birçok parça üretimi, bu alaşımlardan yapılabilmektedir [3].

BÖLÜM 3

TOZ METALURJİSİ

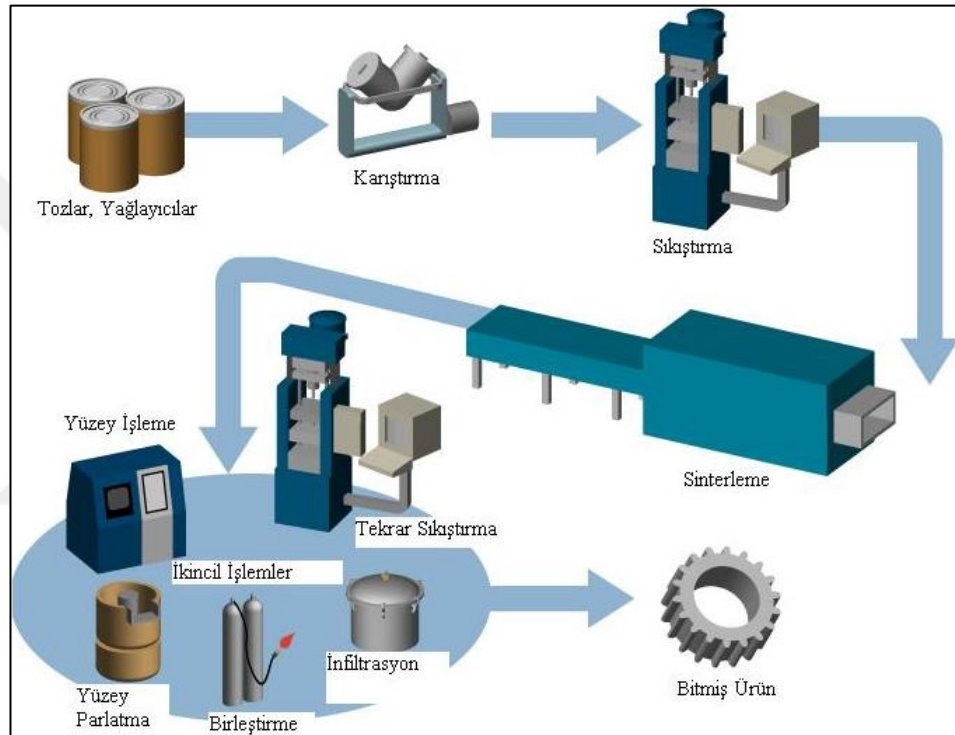
Modern toz metalürjisinin başlangıcı, 1829 yılında Wollaston tarafından çözeltilerde amonyak-platin klorür çökmesi ile platin sünger tozundan son ürün olarak kompakt platin üretilmesi olarak kabul edilmektedir. 1980'li yıllarda mekanik alaşımlama, hızlı katılaştırma ve enjeksiyon aşamaları gibi birçok önemli toz işlemlerinin geliştirilmesi ile günümüz toz metalürjisi birçok farklı ürün ile geleneksel üretim yöntemlerinin yerini almaya başlamıştır [4].

Malzeme bilimciler geleneksel üretim yöntemleriyle üretilen malzemelerden istenen özelliklerin hepsinin bir arada bulunmaması ve üretimin ekonomik olmaması gibi nedenlerden dolayı, daha iyi özellikli ve aynı zamanda ekonomik malzeme arayışına girmişlerdir. Malzemelerden istenen mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler, malzemenin bileşenlerinin özellikleri ile belirlenmektedir. Bundan dolayı, daha iyi özellikli malzemelere olan gereksinim artmıştır. Bu özelliklerdeki malzemelerin ihtiyacı nedeniyle metal temelli tozlar önem kazanmıştır [2].

Toz metalurjisi, çok küçük boyutlarda metal veya seramik tozlarının birbirine bağlanmasıyla oluşturulan kütleli ve son şekle yakın malzeme üretim yöntemidir. Üretimde kullanılan tozların boyutları, üretimi ve elde edilen malzemenin kullanılabilirliği gibi parametreler, toz metalürjisi teknolojisini kapsamaktadır. Toz metalürjisindeki ulaşılmak istenen hedef, metal malzemeleri toz halinde elde etmek ve bu tozları belirli basınç altında presleyerek, istenilen özellikleri kazandırmak için uygulanan sinterleme işlemi ile iş parçasının üretimidir [5].

Presleme işleminden önce, tozların şekillendirilebilmesi ve kalıptan ayırmak için yağlama işlemi uygulanmaktadır. Ayrıca bu yağlama işlemi, sürtünmeyi azaltarak kalıp ömrünü de arttırmaktadır. Presleme işleminde basıncın belirlenmesi ve presleme ile daha önceden karıştırılan tozlar sıkıştırılarak, kalıbın şeklini alması

sağlanmaktadır. Presleme ile elde edilen parçalar oldukça düşük bir dayanıma sahiptir ve bu ham mukavemet (green strength) olarak adlandırılmaktadır. Son olarak malzemenin ergime sıcaklığının altında belirlenen bir sıcaklıkta yapılan sinterleme işlemi ile homojen bir yapı elde edilerek, yoğunluk ve mukavemet değerlerinde artış sağlanmaktadır. Toz metalürjisi ile üretilen malzemeler kullanıldığı alana göre ek işlemlere ihtiyaç duyabilmektedir. Toz metalürjisi iş akış şeması Şekil 3.1'de verilmektedir [6].



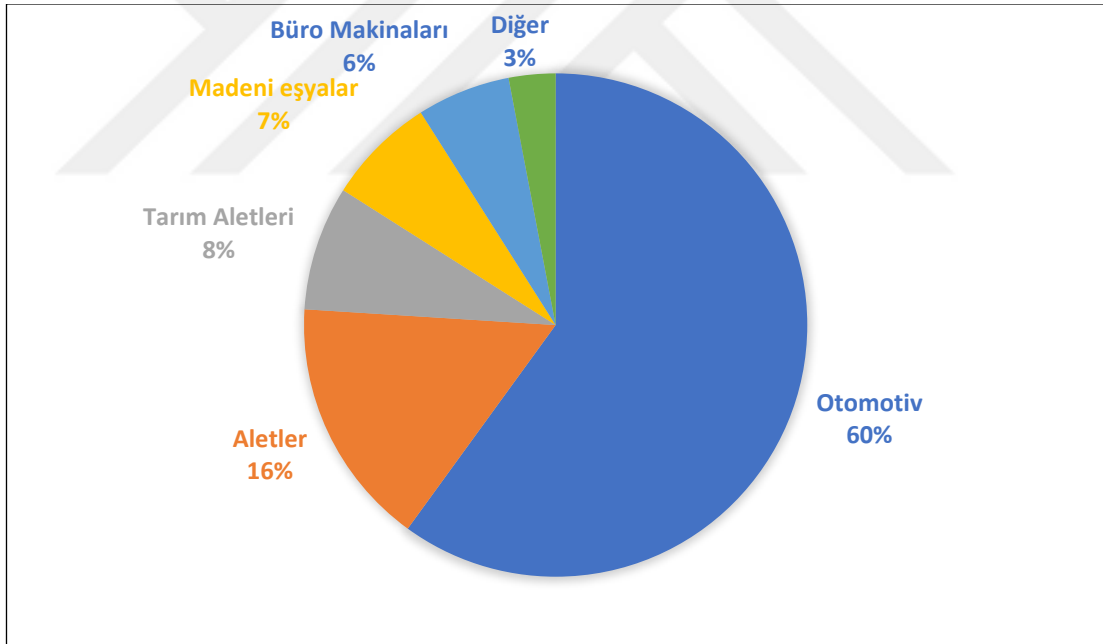
Şekil 3.1. Toz metalürjisi iş akış şeması [5].

Üretim yöntemi olarak toz metalürjisinin tercih edilmesinin en önemli sebepleri parçaların kayıpsız olarak, istenilen toleranslarda, daha ekonomik ve şekil fark etmeksizin üretilmesidir. Bu sebeplerden dolayı, toz metalürjisi ile üretim diğer üretim yöntemlerinin yerine almakta ve yaygınlaşmaktadır [7].

3.1. TOZ METALURJİSİNİN KULLANIM ALANLARI

Gelişen teknoloji ile beraber toz metalürjisi uygulama alanları da oldukça genişlemiştir. Genellikle demir içerikli malzemelerin üretiminde kullanılan toz

metalürjisi, otomotiv sektörünün vazgeçilmezi olmuştur. Toz metalürjisi otomotiv sektörünün dışında da birçok sektörde kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak uzay ve havacılık sektöründe yakıt elemanları, jet motor parçaları, uçak fren balataları, roket yakıtları, yüksek sıcaklık filtreleri gösterilebilir. Savunma sanayinde ise patlayıcılar, silah parçaları ve zırh delici mermilerin üretiminde kullanılmaktadır. Endüstride özellikle refrakter malzemelere olan talebin artmasıyla, aşınmaya dayanıklı ürünlerin imalatında toz metalürjisi kullanılmaktadır. Ayrıca toz metalürjisi ayrıca elektrik kontakları ve fırçaları, mıknatıslar, röle kontakları, şarj edilebilir piller, lehimleme aletleri, devre levhaları, ampul filamanları gibi elektrik elektronik, uygulamalarında tercih edilmektedir. Bunların dışında boyalar, gözenekli betonlar, kaynak elektrotları, baskı mürekkepleri, diş dolgusu ve ortopedik cihazlar gibi birçok endüstriyel ürünlerin üretiminde de kullanılmaktadır. Toz metalürjisi ile üretilmiş parçaların kullanım alanları genel olarak, Şekil 3.2’de görülmektedir [5,8].



Şekil 3.2. Toz metalürjisi ile üretilmiş parçaların kullanım alanları [8].

3.2. TOZ METALURJİSİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Diğer üretim yöntemlerinde olduğu gibi toz metalurjisinin de avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Karmaşık yapılu parçalar (diğer üretim metotlarına göre) toz metalürjisi metodu ile daha hızlı ve hassas ve olarak üretilmektedir. Bu

yöntemle yüksek saflıkta malzemeler kolaylıkla üretilebilirken, belirli miktarda gözenekli ve geçirgenlik gerektiren malzemelerde kolaylıkla üretilebilmektedir. Toz metalürjisi ile üretilen parçalar oldukça iyi yüzey kalitesi ve boyutsal toleranslara sahiptir. Bundan dolayı, talaşlı imalat gibi alternatif işlemlere gerek kalmamaktadır. Toz metalürjisi üretim aşaması sırasında malzeme kaybının minimum olması nedeniyle, oldukça ekonomik bir üretim yöntemi olmaktadır. Ergime sıcaklığı oldukça yüksek olan metaller ve geleneksel üretim yöntemi olan döküm ile üretilemeyen, ergime sıcaklıkları birbirinden farklı elementlerden oluşan alaşımların üretiminde yalnızca toz metalürjisi yöntemi kullanılmaktadır. Ayrıca toz metalürjisi, diğer yöntemlere göre üretim aşamaları kolay kontrol edilebilen, çok az iş gücü gerektiren, çevre dostu olan bir üretim yöntemi olarak günümüzde en çok tercih edilen üretim yöntemlerinden biridir [9].

Diğer üretim yöntemlerinde olduğu gibi toz metalürjisinin avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Bu yöntem ile tasarımında radyal delik, girintili ve köşeli parçaların üretimi imkansız veya oldukça zordur. Toz metalürjisi ile üretilen ürünlerin mekanik ve fiziksel özellikleri diğer yöntemlerle göre daha düşük değerlere sahiptir. Bu yüzden, genellikle ikinci bir işleme ihtiyaç duyulmamaktadır. Malzeme üretim aşamasında (diğer yöntemlere göre) ekonomik olan toz metalürjisi, ilk yatırım maliyeti açısından oldukça pahalıdır. Buna ilaveten proje tipi üretimlerde kalıp maliyeti ve kullanılan metal tozlarının maliyetinin ingot yapıdaki malzemelere göre daha fazla olması, maliyeti oldukça yükseltmektedir. Presleme işleminde, üretilmesi planlanan parça boyutları arttıkça, basınç değerlerinin de artırılması gerekmektedir. Ayrıca, karıştırılacak olan tozlara çevreden yabancı madde veya başka tozların karışma ihtimali nedeniyle temizliğe çok dikkat etmek gerekmektedir [9].

3.3. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM TEKNİKLERİ

Yeryüzünde bulunan elementlerin büyük bir çoğunluğu toz haline getirilebilmektedir. Toz metalürjisinde parça üretiminde adından da anlaşıldığı gibi toz parçacıkları kullanılmaktadır. Bu parçacıkların kimyasal bileşimi, şekli ve boyutları çok önemlidir. Üretilen tozlar farklı boyutlarda ve geometride olabilmektedir. Tozların boyut, maliyet, mikroyapıları ve geometrik şekli gibi bazı

özellikleri, üretim yöntemine göre farklılık göstermektedir. Toz üretiminde yaygın olarak mekanik alaşımlama, atomizasyon, elektroliz, öğütme ve oksit indirgeme gibi mekanik ve kimyasal teknikler kullanılmaktadır [10]. Toz üretim yöntemleri şu şekilde sıralanmaktadır.

- Mekanik Yöntemler
 - Talaş Kaldırma Yöntemi
 - Öğütme Yöntemi
 - Darbe Yöntemleri
 - Mekanik Alaşımlama
- Elektroliz ile Toz Üretim
- Kimyasal Yöntemler ile Toz Üretimi
 - Oksit İndirgeme
 - Sıvı fazdan çöktürme
 - Isıl Bozunma
- Atomizasyon Yöntemleri
 - Gaz Atomizasyonu
 - Su Atomizasyonu
 - Santrifüj Atomizasyonu

3.3.1. Mekanik Yöntemler

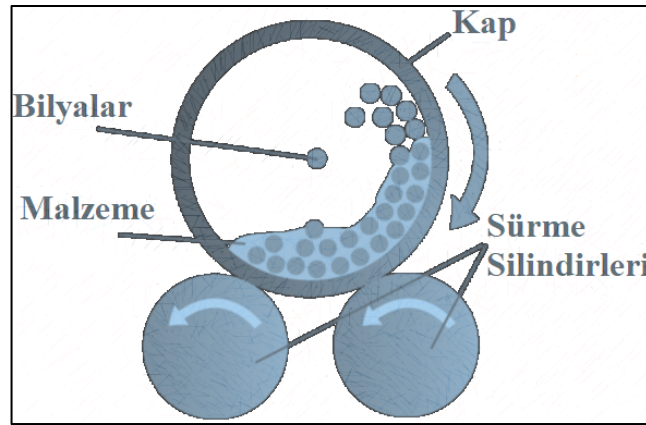
Malzeme üzerine kesme, darbe, basma, sıkıştırma ve aşındırma olarak uygulanan temel olarak dört mekanik yöntem bulunmaktadır. Öğütme ile bir aşındırıcının ve bir aşınanın olduğu bir sistemde, birbirleri üzerine uyguladıkları sürtünmenin etkisi ile toz parçalarının boyutları küçülmektedir. Talaşlı imalatta kesme metodu ile malzeme parçalara ayrılmaktadır. Malzeme üzerine uygulanan anlık darbe ile iri tanelerin boyutlarında azalma sağlanmaktadır. Son olarak basma kuvveti uygulanan malzeme kırılma noktasını geçerek toz haline gelmektedir [11].

3.3.1.1. Talaş Kaldırma Yöntemi

Talaş kaldırma yöntemlerinden taşlama, tornalama ve frezeleme tekniklerini kullanarak büyük boyutlu ve karmaşık şekilli tozlar üretilebilmektedir. Talaşlı imalat işlemlerinden sonraki arta kalan talaş sayesinde metal tozlarının geri dönüşümü ve kaba tozların üretimi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen talaşlar, çeşitli kimyasallar kullanılarak temizlenir ve ardından kaba taneler öğütülerek ince taneli hale getirilmektedir. Özellikle yüksek karbonlu çeliklerin üretimi bu yöntemle gerçekleştirilmektedir [5].

3.3.1.2. Öğütme Yöntemi

Öğütme yönteminde bilyeler, çekiçler ve çubuklar yardımıyla mekanik darbe işlemi uygulanarak, metal malzemelerden ince taneli tozlar üretilmektedir. Talaşlı imalat veya diğer darbeli yöntemlerden elde edilen kaba taneli toz tanelerinin küçültülmesinde öğütme yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, öğütme işleminde ilk olarak, bir öğütme hücreesine aşınmaya dayanıklı bilyeler ile birlikte kaba taneli tozlar yerleştirilir [12].



Şekil 3.3. Öğütme yönteminin şematik gösterimi [13].

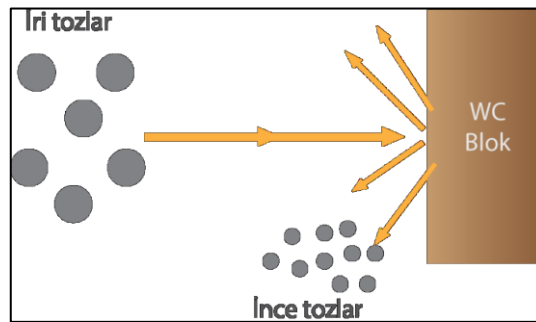
Sürme silindirlere vasıtasıyla dönen öğütücü kap içerisinde bulunan aşınmaya dayanıklı bilyeler, toz malzeme ile sürekli ederek tozları daha küçük boyutlu hale getirmektedir. Öğütücü kabın hızı öğütme sırasında çok önemli bir etkidir. Eğer öğütücü kabın hızı çok yüksek ise merkez kaç kuvvetinin etkisi ile bilyelerin hareketi

sınırlanır ve kabın alt kısmına düşmeden kap ile beraber dönmesine sebep olur. Öğütme işlemi düşük hızlarda yapıldığında kullanıldığında ise bilyeler (yatayda oldukları kısımda) yuvarlanma hareketi yaptığı için tozlar öğütülememektedir. Öğütme işleminde homojen bir karışım elde edebilmek için belirli oranlar kullanılmaktadır. Bilye çapı öğütülen malzemenin çapının en az 30 katı olmalıdır. Bilyeler kabın hacminin %50'sini, öğütülen malzeme ise %25'ini geçmemelidir [14]. Öğütme işleminde eğer tozlar gevrek yapılı ise malzeme, bilyelerle olan temas ile küçülmektedir. Fakat, malzeme sünek yapıda ise çok küçük boyutlara parçalanamamakta ve yassılaşmaktadır. Özellikle demir alaşımları ve kırılabilirliği yüksek olan malzemeler, bilyeli değirmenlerde öğütülmektedir [11].

Öğütme işleminde titreşimli öğütücüler de kullanılmaktadır. Döner tip öğütücülere oranla daha kısa sürede aynı özelliklerde toz elde edilebilmesi açısından, daha verimli oldukları kabul edilmektedir. Öğütme işleminde sonra elde edilen tozlar sert, farklı şekillerde, düşük akma ve paketlenme özellikleri sebebi ile öğütme işleminin ardından tavlanması gerekebilmektedir [14].

3.3.1.3. Darbe Yöntemi

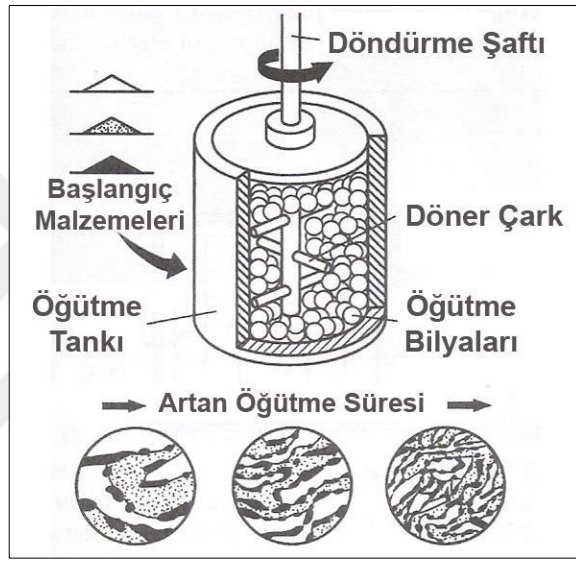
Darbe yönteminde amaç, diğer toz üretme yöntemleri ile elde edilen büyük tozların tane boyutlarını daha da küçültmektir. Bu yöntemde büyük taneli tozlar, yüksek basınç altındaki oldukça sert WC bloklara çarptırılmaktadır. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi bloğa çarpan büyük taneli tozların küçülmesi sağlanmaktadır. Fakat, bu çarpışmaların etkisi ile ortamda bir ısı oluşmaktadır. Bu yüzden, bu yöntem, koruyucu gaz ortamında kontrollü bir şekilde yapılmaktadır [15].



Şekil 3.4. Darbeli yöntem ile toz üretiminin şematik gösterimi [15].

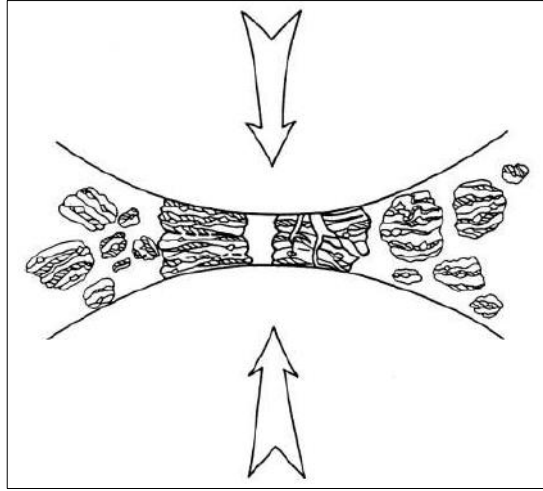
3.3.1.4. Mekanik Alaşım Yöntemi

MA/MÖ sisteminde öğütme bilyeleri, bu bilyelerin yerleştirildiği bir kap ve öğütülecek tozları karıştırarak hareketi sağlayan bir şaft bulunmaktadır. Mekanik alaşımla işleminin amacı, büyük boyutlardaki tozların bilyeler arasına girerek boyutunun küçültülmesidir. Mekanik alaşımlama elemanları ve öğütme süresine bağlı olarak fazların matris içerisinde homojen olarak dağılımı, Şekil 3.5'te gösterilmektedir [5].



Şekil 3.5. Mekanik alaşımla elemanları ve öğütme süresi ile değişen tozların şematik görüntüsü [5].

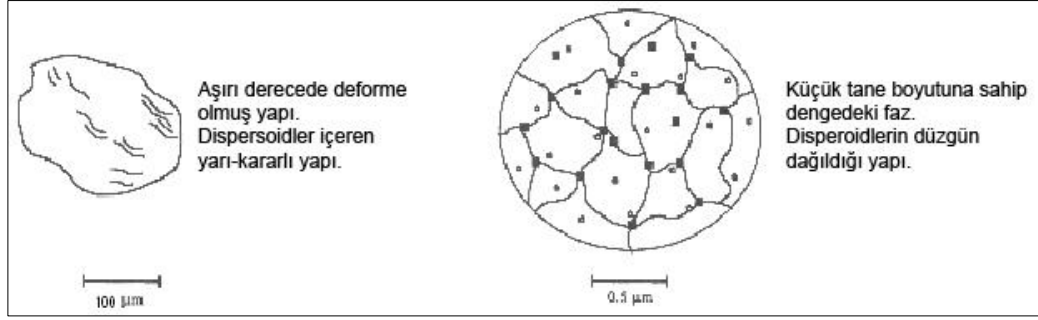
İşlem sırasında yalnızca tozlar ve bilyeler çarpışmamaktadır (Şekil 3.6). Aynı zamanda tozlar, birbirine soğuk kaynaklanmakta ve tekrar kırılmaktadır. Bu kaynaklanma ve tekrar deformasyona uğratma işlemleriyle daha küçük boyutlarda, homojen yapıya ve yüksek dayanıma sahip tozlar elde edilmektedir. Bu işlemde, kaynaklanma ve öğütme arasındaki dengeyi korumak için farklı ortamlar da kullanılmaktadır [16].



Şekil 3.6. Mekanik alaşımla sisteminde tozlar ve bilyeler arasındaki çarpışma [16].

MA/MÖ sisteminde, diğer sistemlerde olduğu gibi dikkat edilmesi gereken temel parametreler bulunmaktadır. Bunlar; tozda ortalama boyutu, alaşımlama süresi, ortam atmosferi, ortam sıcaklığı, bilye-toz oranı ve öğütme süresidir. Sistemin enerjisini oluşturan bu özelliklerin herhangi birinde yapılan değişiklik ile sistemin verimi değişmektedir. Diğer toz üretim yöntemlerindeki gibi, mekanik alaşımlamada da kirlilik sorunu bulunmaktadır. Bu sorunu en aza indirmek veya tamamen gidermek için aynı malzemeden üretilen bilye, karıştırıcı ve kap kullanmak gerekmektedir [17].

MA/MÖ işleminin ilk aşamasında, tozlar bilyelerle çarpışarak ve soğuk kaynaklanarak başlangıç boyutlarının üç katına kadar büyüme eğilimi gösterebilmektedirler. Bu çarpışmalar sırasında tozlar düzleşip üst üste binerek yeni temiz yüzeylerin teması ile soğuk kaynaklanma olmaktadır. Gevrek tozlar ise bu yüzeyler arasına sıkışarak kırılmaktadır. Sürekli tekrarlanan kırılma ve soğuk kaynaklanma ile birlikte, tozlarda büyük oranda deformasyon sertleşmesi görülmektedir. Tozların boyutlarındaki düşüş ile birlikte mikroyapıdaki karışmada hızlanmaktadır. Sistemin sürekli hareketiyle ortaya çıkan kinetik enerji yapıda ısı artışı ve çözünmelere neden olmaktadır. Bu sırada düşük düzeydeki difüzyon hareketi ile birlikte, yeni fazların oluşumu da görülebilmektedir [18].

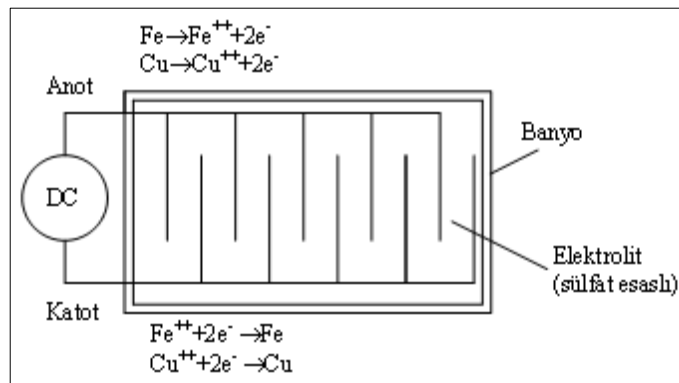


Şekil 3.7. Mekanik alaşımlamada başlangıçtaki ve sondaki mikroyapıları [16].

Son olarak, tane boyutlarının büyümesine sebep olan soğuk kaynaklanma seviyesi ile tane boyutlarını küçülten kırılma mekanizmalarının dengelenmesi ile düzenli yapı elde edilmektedir. Bu düzenli yapı büyük ve küçük tanelerin homojen olarak karışmasıyla oluşmaktadır. Şekil 3.7’de, mekanik alaşımdan önce ve sonraki mikroyapı görüntüleri verilmektedir.

3.3.2. Elektroliz ile Toz Üretim Yöntemi

Elektroliz yöntemi ile preslenebilen, sinterlenebilen ve yüksek iletkenliğe sahip metal tozlarının üretimi yapılmaktadır. Bu yöntem, özellikle yüksek saflıkta Fe, Mn, Cu ve Ag tozlarının üretilmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 3.8. Elektroliz hücresinin şematik gösterimi [19].

Gerekli çalışma şartları sağlandığında, elektroliz hücresindeki katot üzerinde saf tozlar biriktirilebilmektedir. Şekil 3.8’de, Fe ve Cu için elektroliz hücresinin şematik gösterimi verilmektedir. Üretilmek istenen tozların yapısında bulunan malzeme

elektroliz banyosunun içerisine yerleştirilmektedir. Ardından bu banyoya elektrik akımı uygulanmaktadır. Uygulanan elektrik akımı ile birlikte anottaki malzemenin çözünmesi sağlanmaktadır. Anotta çözünen metal, katot üzerinde birikerek toplanmaktadır. Elde edilen metal parçaları dendritik yapıdadır. Katot üzerinde biriktirilen metal alınır, kurutulur ve toz haline getirilmek için öğütülür. Öğütülen tozlar üzerindeki gerilmeleri ve uçucuları gidermek için tavlama yapılmaktadır. Tavlama işlemi asal gaz ortamında yapılmasının nedeni oksidasyonu önlenmektir.

Elektroliz yöntemi ile iyi sıkıştırılabilen, çok yüksek saflıkta, süngerimsi, yumuşak ve düzensiz yapıya sahip tozlar üretilmektedir. Tozun özelliklerini üretim sırasındaki hız, akım, sıcaklık ve karışım gibi parametreler etkilemektedir. Elektroliz yöntemi ile çok yüksek saflıkta ve çok iyi sıkıştırılma oranına sahip tozlar üretilebildiği için tercih edilen bir yöntem olmaktadır [20].

3.3.3. Kimyasal Yöntemler ile Toz Üretim Yöntemi

Bu yöntemde metal tozları katı, sıvı ve gazlar ile uygulanan tepkimelerle üretilmektedir. Çoğu metal tozunun üretimi bu yöntem ile yapılabilmektedir. Tepkimelerin parametrelerinde yapılan değişiklikler ile tozların şekil ve boyut gibi özellikleri kolaylıkla belirlenmektedir. Birçok kimyasal yöntem ile toz üretilmektedir. En yaygın kullanılan yöntemler oksit indirgeme, sıvı fazdan çöktirme ve ısı bozunmadır [5].

3.3.3.1. Oksit İndirgeme

Oksit giderme yöntemi ile metal oksitlerden oksit uzaklaştırılarak, metal tozları üretilmektedir. Öğütülmüş ve manyetik olarak ayrıştırılmış oksit, kireç taşı ve grafit gibi indirgeyicilerle birlikte karıştırılmaktadır. Bu karıştırma işleminden sonra, ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Genellikle CO (karbon monoksit) gibi gazlar ortaya çıkmakta ve bu gazlar ile birlikte oksit indirgenmektedir. Ayrıca öğütülmüş oksidin ısıtılmış hidrojenle yaptığı temas ile de, aynı şekilde oksit indirgenmektedir.

Oksit indirgeme yönteminde alaşım tozlarının üretimi yapılamamaktadır. Ayrıca oksit ne kadar saf ise metal tozları da o kadar olmaktadır. Bu yöntem ile boyut kontrolü ve parçacıklı toz üretimi yapılabilmektedir [21].

3.3.3.2. Sıvı Fazdan Çökeltme

Sıvı fazdan çökeltme yöntemi ile yüksek saflıkta tozlar üretilebilmektedir. Bu kimyasal yönteme başlamadan önce, yapıda istenilen malzemeleri içeren bir çözelti hazırlanmaktadır. Çözeltiye çöktürme işlemi veya çözücünün buharlaştırılması işlemleriyle toz elde edilmektedir. Çökeltmenin gerçekleşmesi için birçok yöntem bulunmaktadır. Çözeltideki çöktürücü miktarı artırılarak veya basınç veya sıcaklık artırılması ile çökeltme işlemi yapılabilmektedir [10].

Üretilen tozun özellikleri, kullanılan çözelti, çöktürücü, ortamın basınç ve sıcaklığı gibi parametrelerin değiştirilmesi ile değişmektedir. Bu yöntem, küçük taneli tozların üretiminde kullanılmaktadır. Üretilen tozların şekli süngerimsi, kübik ve düzensiz olmaktadır. Bu yöntemle üretilen tozların şeklinden dolayı, paketlenme ve akış özellikleri düşüktür [19].

3.3.3.3. Isıl Bozunma

Kimyasal yöntemlerden birisi olan ısıl bozunmada tozlar, buhar yoğunlaştırılması ve bozunması ile üretilmektedir. Bozunma işleminde metalik malzemelerin tozları üretilmektedir. İşlem sırasında ilk önce malzeme karbon monoksit ile tepkimeye girmektedir. Bu tepkimenin olabilmesi için sıcaklık artırılırken, basınç düşürülmektedir. Bu şekilde ayrışma işlemi başlamaktadır. Ardından soğutma işlemi uygulanır ve damıtma ile malzemenin saflaştırılması sağlanmaktadır. İstenen tozun elde edilebilmesi için ise sıvı bir katalizör kullanılmaktadır. Bu katalizör vasıtasıyla son ısıtma yapılarak, buhar bozunması ile ürün elde edilmektedir [18,21].

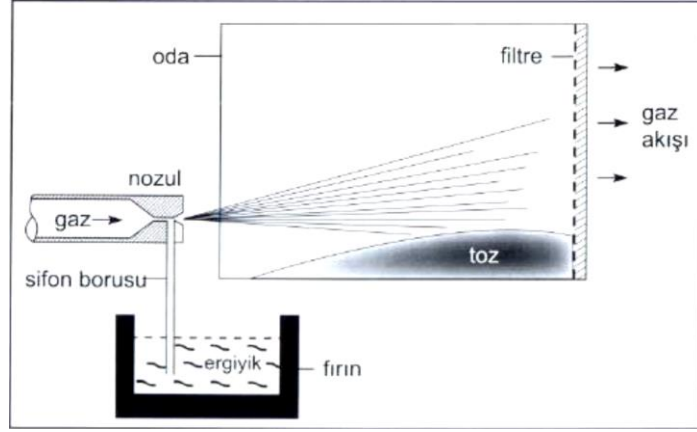
3.3.4. Atomizasyon Yöntemleri

Günümüzde metal tozlarının üretiminin büyük çoğunluğu, atomizasyon yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Atomizasyon yöntemi, potadan akıtılan ergimiş metalin basınçlı gaz veya sıvı püskürtülerek sıvı damlacıkları haline getirilmesine prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem ile 150µm den küçük, farklı aralıklarda ve şekillerde toz üretilmektedir. Bu yöntem ile elementel tozların yanı sıra alaşımlar da üretilebilmektedir. Atomizasyon yönteminde tozun kimyasal yapısının, şeklinin ve boyutunun kontrol edilebilmesi ve bu yöntemin diğer yöntemlere göre daha hızlı olması nedeniyle, en çok tercih edilen yöntemidir. Atomizasyon yönteminin gaz atomizasyonu, su atomizasyonu ve santrifüj atomizasyonu olmak üzere farklı tipleri bulunmaktadır [9,18].

3.3.4.1. Gaz Atomizasyonu

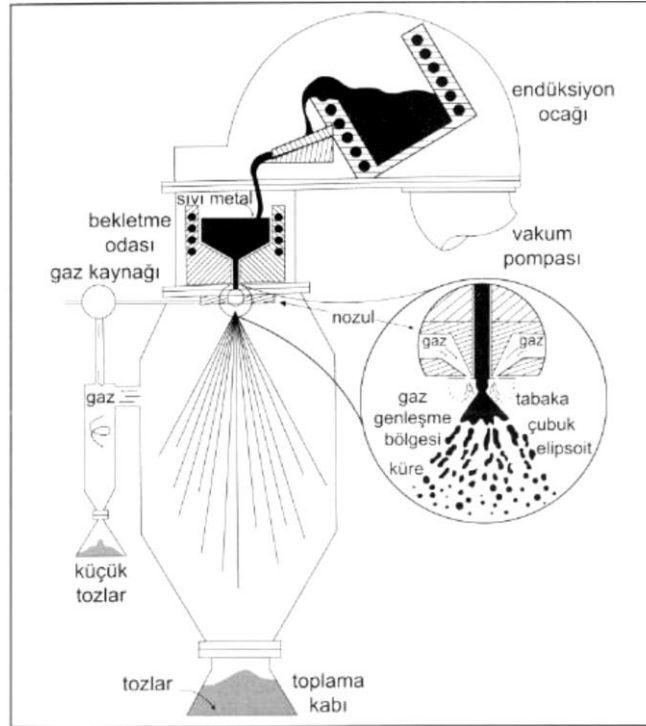
Gaz atomizasyonu yönteminde ergitilen metal argon, nitrojen ve oksijen gibi yüksek hızlı gazlar kullanılarak toz haline getirilmektedir. Sistemde gazın yüksek hızla çıkışı ve sıvı metal ile teması, gazın çok hızlı genişemesinin de etkisiyle enerji sıvı metale aktarılmaktadır. Bu şekilde sıvı metalin damla damla parçalanmasına ve katılaşması sağlanmaktadır [10].

Düşük sıcaklık kullanılarak toz üretilen atomizasyon sistemleri, yatay sistemlerdir. Nozul olarak adlandırılan gaz üfleçinden çıkan gaz, yüksek hızının etkisi ile metali genişleme bölgesine çekmektedir. Gazın hızı arttıkça oluşan damlacıkların boyutu da küçülmektedir. Yatay gaz atomizasyonun sisteminin gösterimi, Şekil 3.9'da verilmektedir [19].



Şekil 3.9. Yatay gaz atomizasyon sisteminin şematik gösterimi [19].

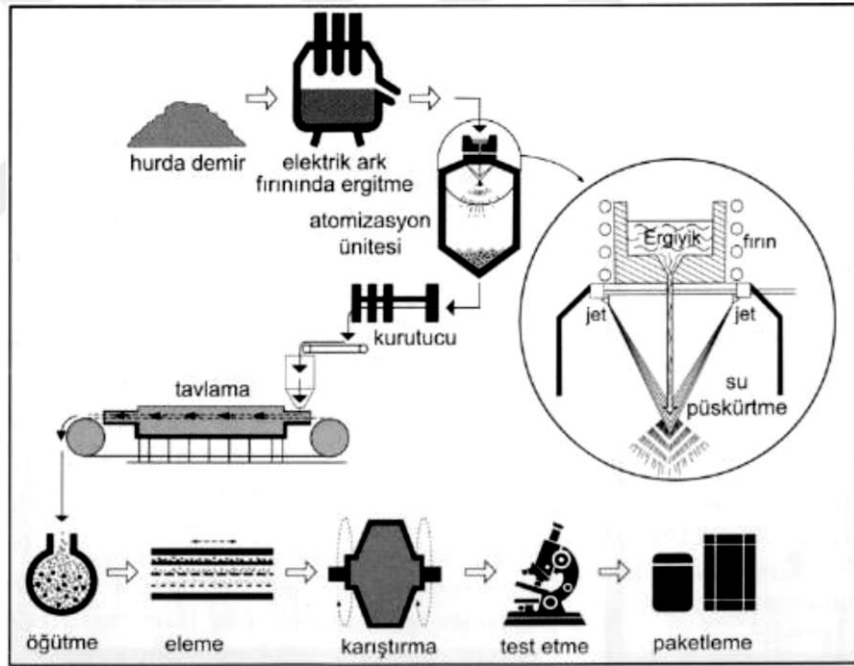
Yüksek sıcaklıkta kullanılarak toz üretilen atomizasyon sistemleri ise, dikey olarak üretilmektedir. Bu sistemde üretilen tozların oksidasyonunu önlemek için asal gazlarla dolu, kapalı bir alan kullanılmaktadır. Bu yöntemde sıvı metal, ergime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılmakta ve ardından soğuk nozula iletilmektedir. Sıvı metalin akış yönüne dik şekilde bulunan nozuldaki gaz üflenerek toz elde edilmektedir. Düşey gaz atomizasyon sisteminin şematik gösterimi, Şekil 3.10'da verilmektedir.



Şekil 3.10. Düşey gaz atomizasyon sisteminin şematik gösterimi [19].

3.3.4.1. Su Atomizasyonu

Su atomizasyon yöntemi ile ergitilen metal, su veya yağ jeti kullanılarak toz haline getirilmektedir. Atomizasyonda ergime sıcaklığı 1600 °C veya altı ve reaktifliği düşük malzemeler için su tercih edilmektedir. Gaz atomizasyonunda olduğu gibi sıvı metalin tankın dibine doğru hareketi sırasında, gaz yerine su jetleri kullanılarak parçalanması sağlanmaktadır. Oluşan damlacıklar gaz atomizasyon yöntemindekilere göre daha hızlı soğudukları için, kullanılan tank boyutları daha kısa olarak tasarlanmaktadır. Su atomizasyonunda tozların yüzeylerindeki oksitleri gidermek için ve boyut dağılımı gibi istenilen özellikleri elde etmek için, ek işlemler yapılmaktadır. Su atomizasyon yönteminin tüm aşamaları, Şekil 3.11’de verilmektedir.

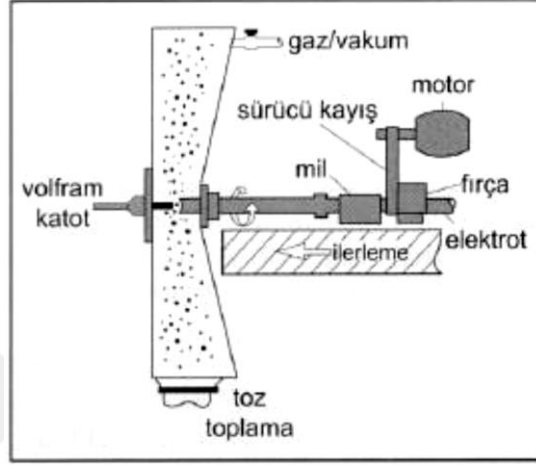


Şekil 3.11. Su atomizasyonu ile toz üretiminin aşamaları [19].

3.3.4.1. Santrifüj Atomizasyonu

Santrifüj atomizasyon yönteminde döner elektrotun ucundaki ergitilen metal, merkez kaç kuvvetinin de etkisi ile toz haline getirilmektedir. Bu yöntem ile reaktif malzemeler ve ergime sıcaklığı çok yüksek olan tozların üretimi yapılmaktadır [10].

Santrifüj atomizasyon yönteminde üretilmek istenen toz ile aynı malzemeden yapılmış elektrot ve tungsten elektrot kullanılmaktadır. Ergime ile birlikte dönen mil sayesinde, sıvı metal parçalanarak tanka toplanmaktadır. Oksidasyon oluşumunu önlemek için asal gaz veya vakum ortamında atomizasyon yapılmaktadır. Şekil 3.12’de, santrifüj atomizasyon sistemi şematik olarak gösterilmektedir [22].



Şekil 3.12. Santrifüj atomizasyon sisteminin şematik gösterimi [10].

3.4. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİNDE PARÇA ÜRETİMİ

Üretilen tozların özellikleri, her bir üretim yönteminde farklılık göstermektedir. Toz metalürjisi ile üretilen parçanın özellikleri de kullanılan tozun özelliklerine göre değişmektedir. Toz metalürjisi ile parça üretiminde çeşitli işlemler yapılmaktadır. Bunlar tozların karıştırılması, preslenmesi, sinterleme ve son işlemlerdir.

3.4.1. Tozların Karıştırılması

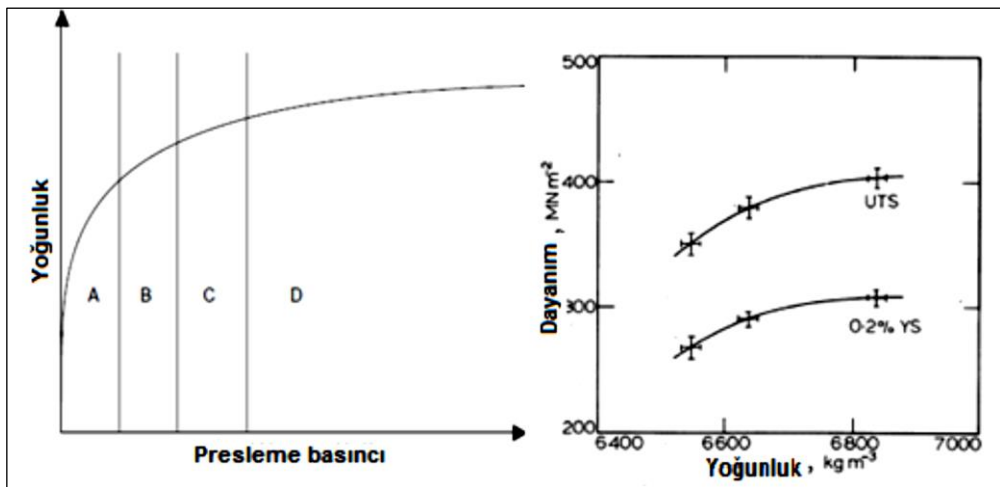
Toz metalürjisi ile parça üretiminde, toz üretiminden sonra tozların homojen olarak karıştırılması önemlidir. Karıştırma işlemi olarak parça üretiminde tek bileşen kullanılıyorsa harmanlama, birden fazla bileşen kullanılıyor ise karıştırma olarak adlandırılmaktadır. Tek bileşen kullanılarak üretilen malzemeye istenilen özelliklerin tümünün kazandırılması zor olduğu için, üretilen malzemelerin büyük çoğunluğuna katkı elemanları ilavesi yapılmaktadır.

Karıştırılan tozların yanında yağlayıcıların ve bağlayıcıların bulunduğu karışımlar kullanılmaktadır. Yağlayıcı ve bağlayıcı oranı, karışım için oldukça önemlidir. Bu oran arttıkça ham yoğunluk değerlerinde ciddi azalmalar meydana gelmektedir. Genellikle tozun hacminin, karıştırıcının hacminin en fazla %50-60'ı kadar olduğu doluluk oranı tercih edilmektedir. Bu değer aşıldığında tozların hareketleri kısıtlanmaktadır.

Dönme hızı da karışımın verimini etkilemektedir. Yüksek hızlarda karıştırma işlemi yapıldığında homojenlik azalırken, düşük hızlarda ise karışım için gerekli süre uzamaktadır. Karıştırma işlemi tozları birleştirme ve sıkıştırma, sinterleme sırasında yeni bileşimler oluşturma ve tozların kolay şekillendirilmesi için yapılmaktadır [19,23].

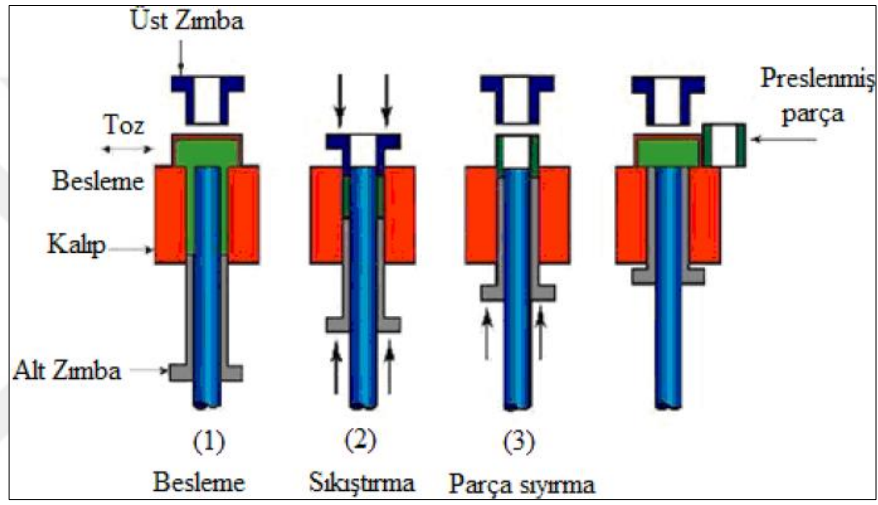
3.4.2. Tozların Preslenmesi

Toz metalurjisi ile parça üretiminde en önemli aşamalardan birisi de presleme işlemidir. Presleme işlemi ile karıştırılan tozlar şekillendirmekte ve yoğunluk kazandırılmaktadır. Bu aşama, parça üretiminde kritik sayılabilecek bir aşamadır. Çünkü son ürünlerin özellikleri yoğunlukla orantılıdır. Ayrıca, ön şekillendirilen parçalar, sinterleme işleminden önce kendi ağırlığını taşıyabilecek mukavemete sahip olmalıdır. Presleme basıncının etkisi ile yoğunluk ve dayanım değişimleri, Şekil 3.13'te gösterilmektedir [24,25].



Şekil 3.13. Presleme basıncı ile yoğunluk ve dayanım değişimleri [23].

Presleme işlemi, rijit bir kalıp içerisine hazırlanan karışım tozunun ve yağlayıcının ilave edilmesiyle başlamaktadır. Yağlayıcı kullanımının amacı tozların kalıbı aşındırmaması, kalıptan kolayca çıkması ve toz tanecikleri arasındaki sürtünmeyi azaltmaktır. Sıkıştırma işlemi genellikle, tozun tek eksen yönünde preslenmesiyle gerçekleşmektedir. Toz doldurulan kalıba üst baskı plakası ile basma işlemi uygulanırken, parça alt pistonun hareketi ile çıkartılmaktadır. Presleme işleminin şematik gösterimi, Şekil 3.14'te verilmektedir. Presleme işlemi sırasında kullanılan kalıplar, basit veya karmaşık şekillerde olabilmektedir [24].



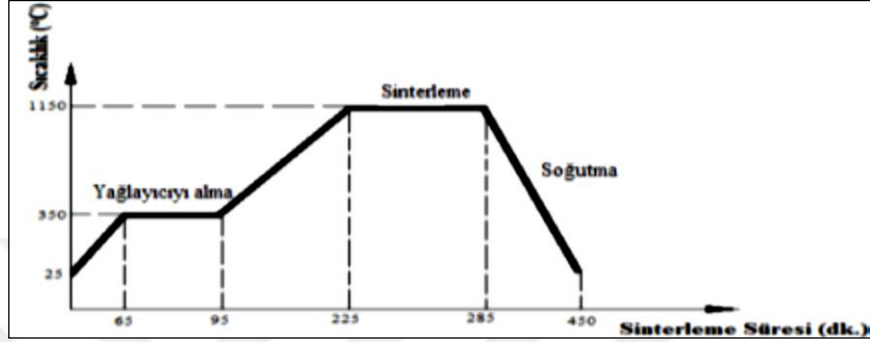
Şekil 3.14. Presleme işleminin şematik gösterimi [24].

Presleme işleminde mekanik, hidrolik ve pnömatik presler kullanılmaktadır. Bu presler ortalama 70-700 MPa basınç uygulayabilmektedir. En çok tercih edilen basınç, 145-450 MPa aralığındadır [24].

3.4.3. Tozların Sinterlenmesi

Toz metalurjisi ile parça üretiminde presleme işleminden sonraki en önemli aşama, sinterleme aşamasıdır. Sinterleme, preslemede yoğunluk kazandırılmış tozlara ergime sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta dayanım kazandırılması işlemidir. Preslenen tozlar arasındaki bağ mekanik kitlenme ve yapışma gibi zayıf bağlardan oluştuğu için, kristal kafes sistemine göre çok zayıf kalmaktadır. Sinterleme işlemi ile toz parçacıkları arasında sıkı bir bağ oluşturularak, yüzey temas noktaları

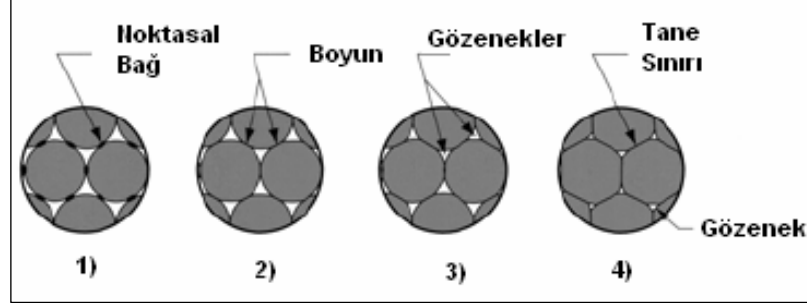
arttırılmakta ve böylece yüzey ve hacim difüzyonu hedeflenmektedir. Bu sayede malzeme daha yoğun bir yapıya sahip olmakta ve mukavemeti artmaktadır. Sinterleme işlemi ile toz parçacıklarının yüzey enerjileri azaldığı için, kusursuz yapıda malzemeler üretilebilmektedir. Sinterleme sırasında yoğunluk, %100'e kadar artabilmektedir [25].



Şekil 3.15. Sinterleme aşamalarının şematik gösterimi [25].

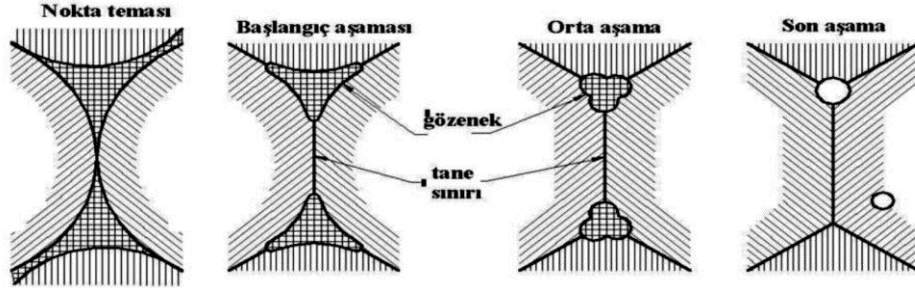
Sinterleme işlemi genel olarak ön ısıtma, sinterleme ve soğutma olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar şematik olarak, Şekil 3.15'de gösterilmektedir. Ön ısıtma sırasında toza katılan yağlayıcıların parçadan uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca, toz taneciklerin birbirine temas ettiği noktalar, yüzey enerjisi en yüksek olanların sınırlarında gerçekleşmektedir. Böylece, boyun büyümesi olarak adlandırılan olay gerçekleşmektedir. Sinterleme aşamasında ise en yüksek sıcaklığa ulaşılmaktadır. Bu aşamada, taneler arası gözenek sayısında azalma ve tanelerin büyümesi olmaktadır. Boyutsal küçülme, en yoğun sinterleme aşamasında gerçekleşmektedir. Sıcaklığın düşmeye başladığı noktadan itibaren ise, soğutma aşaması başlamaktadır. Bu aşamada, toz parçacıkları arasındaki sınırlar artarken, gözeneklerin boyutları azalmaktadır. Soğuma aşamasında 850 °C - 500 °C gibi kritik sıcaklık aralıklarında, soğumanın hızına bağlı olarak malzemede faz dönüşümleri olmakta ve parçanın mekanik özellikleri değişmektedir. Ayrıca birbirlerinden ayrılan gözeneklerdeki yağlayıcı ve bağlayıcıların buharlaşmasıyla gaz basınçları oluşmaktadır. Bu basınç ile gerilimden oluşan iç kuvvetler dengelenir ise istenilen yoğunluk elde edilememektedir. Bu durumun önüne geçmek için, sinterleme işlemi vakum atmosferinde yapılmaktadır. Sinterleme sırasındaki toz

parçacıklarının malzemenin yapısındaki değişimi, Şekil 3.16'da gösterilmektedir [25].



Şekil 3.16. Sinterleme sırasında yapıdaki değişikliğin şematik gösterimi [25].

Sinterleme sırasında toz parçacıkları arasında ilk önce noktasal temas olmaktadır. Daha sonra toz parçacıklarda bir boyunlaşma gerçekleşerek tane sınırları oluşmaktadır. Sinterleme süresinin artmasıyla tane sınırlarının kesişim kısımlarındaki gözenekler büzülerek küçülmektedir. Son olarak gözeneklerin kapanan kanalları ile birlikte kapalı gözenekler oluşmaktadır. Sinterleme sırasında gözeneklerin yapısal değişimi, Şekil 3.17'de verilmektedir.



Şekil 3.17. Sinterleme sırasında gözeneklerin yapısal değişimi [23].

Sıcaklık, toz boyutu, tozların yoğunluğu, tozların oksite olan ilgisi ve sinterleme atmosferi, sinterlemeyi etkileyen başlıca faktörlerdendir. Sinterleme işleminde istenen etkiyi oluşturabilmek için tozların yüzeyinde oksit tabakalarının olmaması gerekir. Aksi takdirde, bu yüzeylerde bulunan oksit tabakaları sebebiyle sinterlemeden istenilen verim alınamamaktadır.

3.4.4. Son İşlemler

Sinterleme işleminden sonra üretilen malzemelerin boyutları en baştan belirlendiği için, herhangi bir ek işleme gerek kalmamaktadır. Fakat bazı malzemelerde gerek yapılan üretim hataları gerekse üretilen parçaların çok karmaşık şekilde olması nedeniyle bazı son işlemler uygulanmaktadır.

Sinterlenmiş malzemenin mekanik özelliklerini (özellikle yoğunluğunu) arttırmak için, ikinci presleme yapılmaktadır. Bu işleme ikincil preslenme denir. Sinterlenmiş malzemenin boyut değişikliği için, boyutlandırma denilen presleme işlemi yapılmaktadır. Parça yüzeyindeki detayları arttırmak için de kabartma olarak adlandırılan presleme işlemi uygulanmaktadır. Presleme ile elde edilmesi güç geometrik ayrıntıları elde etmek için, talaşlı imalat işlemler tercih edilmektedir [26].

BÖLÜM 4

AŞINMA

Birbirleriyle temas eden malzemelerin arasında fiziksel ve kimyasal etkiler ile oluşan malzeme kaybı ve yüzey deformasyonu aşınma olarak tanımlanmaktadır. Eğer birbirleriyle temas eden iki malzeme arasında bağıl hareket bulunmuyor ise, bu olay aşınma olarak tanımlanamamaktadır [27].

Aşınma sonucunda parçalar, üretildikleri forma zarar geldiğinden dolayı kendilerinden beklenen davranışı yerine getiremez duruma gelmektedirler. Özellikle sürtünmenin gerçekleştiği makine parçalarında aşınma kaçınılmazdır. Aşınma etkisiyle makine parçaları zamanla kullanılamaz hale gelmekte ve büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır [27].

Birbirleri ile temas halinde çalışan makine parçalarında aşınmayı önlemek mümkün değildir. Ancak, yağlayıcı kullanarak aşınmayı kısmen engellemek ve çalışma ömrünü arttırmak mümkündür. Makina parçalarında meydana gelen aşınma, kullanılan yağlayıcıların yağlama özelliğini kaybetmesiyle gerçekleşmektedir [27].

Aşınma, temas halindeki malzemelerin yüzeylerinde üç farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar, yüzeylerin belirli bölgelerindeki erime, kimyasal çözünmesi ve yüzeyden fiziksel etki ile oluşan kopmadır. Ayrıca aşınma, fiziksel olarak yüzeyden ayrılan parçacığın neden olduğu hasar olarak da kabul edilmektedir. Mühendislik malzemelerinde görülen hasarın aşınma olarak kabul edilebilmesi için bazı şartların oluşması gerekmektedir.

Bu şartlar;

- Mekanik bir etken olması,
- Sürtünmenin (bağıl hareketin) olması,

- Yavaş ve devamlı olması,
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- İstem dışında meydana gelmesidir.

Bu şartların birinin bile sağlanmaması durumunda oluşan hasar, aşınma olarak adlandırılmamaktadır (örneğin korozyon tüm şartları sağlamasına karşın sürtünme ve bağlı hareket olmadan kimyasal etkiler ile oluşmaktadır) [27].

4.1. AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Belirli şartların sağlanması ile malzemede meydana gelen kayıplar aşınma olarak tanımlanırken, aşınmaya etki eden faktörlerde oldukça fazladır. Bu faktörler sürtünme elemanına, karşı elemana, ortama ve çalışma koşullarına bağlıdır.

4.1.2. Sürtünme Elemanına Bağlı Aşınma Faktörleri

Malzemeler, kullanılan şartlara göre farklı aşınma davranışları gösterebilmektedir. Bu yüzden, malzeme seçimi aşınmayı etkileyen başlıca faktörlerden birisidir. Malzemenin mikroyapısına bakıldığında, perlitik yapılı malzemelerin lamel şekilli malzemelere göre aşınma direnci daha yüksektir. Aynı şekilde malzemenin sertliğinin artmasıyla, aşınma direnci de artmaktadır. Ayrıca, elastikiyet modülünü yüksek olan malzemelerin, aşınma dirençleri de daha yüksektir [28].

Malzemelere uygulanan plastik şekillendirme işlemleri, ısıl işlemler ve yüzey pürüzlüğü, malzemedan kaynaklanan aşınma etkileri olarak kabul edilmektedir. Soğuk şekillendirme ile artan pekleşme, malzemenin sertliğini ve aşınma direncini arttırmaktadır. Malzemelere uygulanan ısıl işlemlerde malzemenin sertliğini arttırdığı için, aşınma direncini de arttırmaktadır. Ayrıca, yüzey pürüzlülük değeri ne kadar azalır, pürüzlerin temas alanı da o kadar düşmekte ve karşılıklı pürüzler birbirleri ile temas edememektedir. Bu nedenle, malzemelerin aşınma dirençleri artmaktadır. Fakat zamanla birlikte kullanıldığı çalışma ortamına göre pürüzlülük değeri artmakta ve aşınma kaçınılmaz hale gelmektedir [29].

4.1.3. Karşı Elemana Bağlı Aşınma Faktörleri

Aşınmaya maruz kalan malzemelerin seçiminde, aşınması muhtemel parçaların mikroyapıları, üretim yöntemleri ve sertlik gibi özelliklerine özellikle dikkat edilirken, aşındırıcı malzemeye dikkat edilmemektedir. Aşınan malzemenin ömrünü arttırmak için, daha sert ve aşınmaya dayanıklı malzemeler seçilmektedir. Fakat aşındırıcıdan daha sert ve aşınma dayanımı daha yüksek malzeme kullanıldığında aşınan parça aşındırıcı durumuna geçmektedir. Bu şekilde çok büyük maddi kayıplar yaşanabilmektedir [28].

4.1.4. Ortama Bağlı Aşınma Faktörleri

Aşınmanın gerçekleştiği ortamdaki sıcaklık, nem ve ortam atmosferi aşınmayı etkileyen faktörlerdir. Malzemelerin temas eden yüzeylerinde (sürtünmenin etkisi ile) sıcaklık artışı olmaktadır. Bu sıcaklık artışı, malzemenin özelliklerini değiştirerek aşınma miktarını önemli oranda arttırmaktadır [30].

4.1.5. Çalışma Koşullarına Bağlı Aşınma Faktörleri

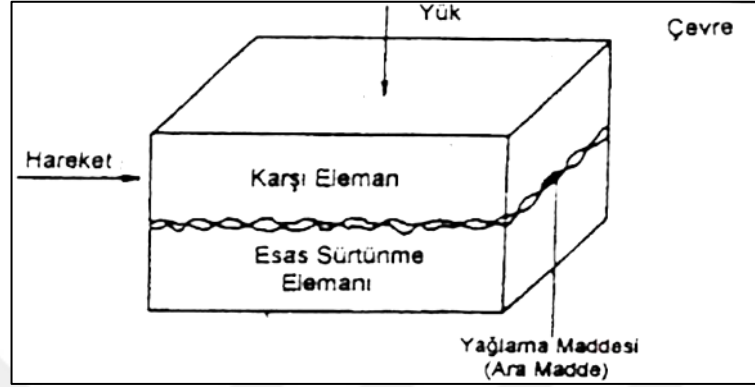
Aşınma testleri sırasında, aşınma yüzeylerindeki basıncın artması ile birim yüzey alanındaki kuvvet de arttığı için aşınma kaybının artmasına neden olmaktadır. Yük belirli bir noktaya kadar aşınmayı artırırken, bu değerden sonra kayma ile dengelenmektedir [29].

4.2. TRİBOLOJİK SİSTEM

Birbirlerine karşı bağıl hareket eden malzemelerinin yüzeylerinde gerçekleşen aşınma, sürtünme ve yağlama işlemlerinin tümü tribolojik sistem olarak tanımlanmaktadır. Triboloji malzeme, fizik, kimya ve mühendislik bilimlerini kullanarak aşınma problemlerini çözen bir bilim dalıdır.

Aşınma yoğunluk, mukavemet ve ısıl geçirgenlik gibi bir malzeme özelliği değil, bir sistem bütünlüğüdür. Bir parçada aşınmanın gerçekleşebilmesi için aşınma çifti, karşı

eleman, ara madde, yük ve hareket gerekmektedir. Bu elemanların oluşturduğu sisteme ise tribolojik sistem olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.1’de, bir tribolojik sistem elemanlarının şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 4.1. Tribolojik sistem elemanlarının şematik gösterimi [31].

Tribolojik sistem elemanları, aşınan bir ana malzeme, aşındıran karşı malzeme ve bu ikisinin oluşturduğu aşınma çifti ile birlikte yağlayıcı görevi gören ara madde, uygulana yük, çevre ve aşınma çiftinin birbirine karşı olan hareketinden oluşmaktadır.

Tribolojik sistemde birçok farklı aşınma mekanizmaları bulunmaktadır. Bu aşınma türleri adhezif, abrazif, tribooksidasyon ve yorulma aşınmalarıdır [31].

4.3. AŞINMA MEKANİZMALARI

Tribolojik bir sistemde, aşınma mekanizmaları farklı parametrelere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Birbirinden farklı çeşitli aşınma mekanizması bulunmaktadır. Bu mekanizmalar hasarın fiziksel görünümüne, aşınmanın aldığı özel isimlere ve oluş şekline göre sınıflandırılmaktadır. Bu mekanizmalar;

Hasarın fiziksel görünümüne göre aşınma mekanizmaları;

- Korozyon Aşınma
- Erozyon Aşınması

Aşınmanın aldığı özel isimlere göre aşınma mekanizmaları;

- Ögütmeli Aşınma
- Oymalı Aşınma
- Kazımalı Aşınma

Oluş mekanizmalarına göre aşınma mekanizmaları;

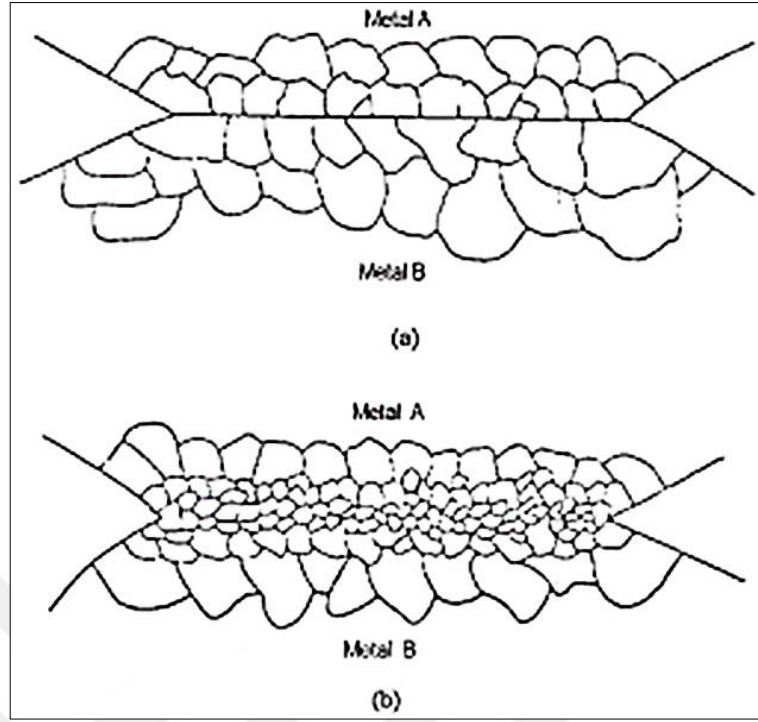
- Adhezif Aşınma
- Abrazif Aşınma
- Yorulma (Titreşim) Aşınması

4.3.1. Oluş Mekanizmalarına Göre Aşınma Mekanizmaları

4.3.1.1. Adhezif Aşınma

Özellikle birbirleriyle aynı özelliklere sahip metalik malzemeler arasında adhezif çekim kuvveti ile gerçekleşen aşınma yöntemi, adhezif aşınma olarak tanımlanmaktadır. Adhezif kuvvetin oluşabilmesi için moleküllerin yaklaşması gereklidir. Birbirleri üzerinde hareket eden yüzeylerde, basıncın etkisi ile birlikte malzemeler akma gerilmesini aşmaktadırlar. Akmanın geçildiği bölgelerde basıncın da etkisiyle temas halindeki yüzeyler arasında yapışmalar olmaktadır. Bu yapışmalar, kaynaklanma olabildiği gibi, yüzeyde bulunan pürüzlerin kırılması ile de olabilmektedir. Bu olayların tümü, adhezif aşınma mekanizması olarak adlandırılmaktadır.

Adezyon teorisinde birbirleri ile temas eden metallerin belirli bölgelerindeki basınç farklılıkları ile kaynak bağları oluşmaktadır. Bölgesel haldeki kaynaklanma, soğuk kaynaklanma olarak ifade edilmektedir. Yüksek bölgesel basınçlarla beraber sürtünmeden kaynaklanan ısınmada artması ile kaynak bağlarının oluşumu gerçekleşmektedir. Isının etkisi ile olan kaynaklanma ise sıcak kaynaklanma olarak adlandırılmaktadır. Adhezif aşınmada oluşan kaynaklanmalar, Şekil 4.2'de verilmektedir [32].

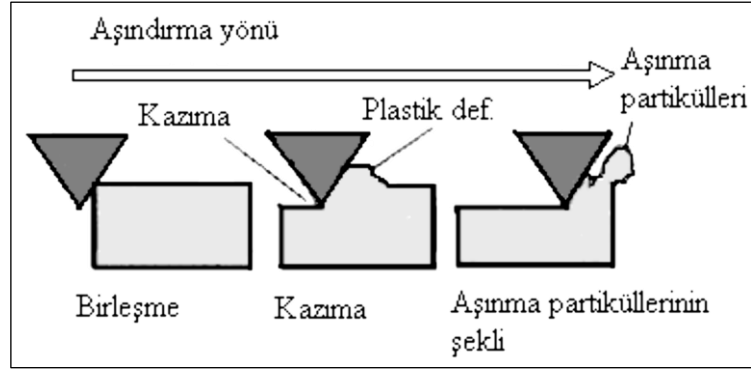


Şekil 4.2. Metallerin teması sonucunda oluşan adhezif aşınmanın şematik olarak gösterimi; a) soğuk kaynaklanma b) sıcak kaynaklanma [32].

Adhezif aşınma, en çok görülen aşınma mekanizmalarından biri olmasına karşılık, aşınmadaki hasarı artırıcı bir özelliğe sahip değildir. Ayrıca, adhezif aşınmada kopan metal parçaları ara yüzeyde kalabildiği gibi, basıncın ve sıcaklığın etkisi ile birbirlerine de bağlanabilmektedir. Eğer kopan bir parça diğer malzemeye bağlanır ise bu olay, malzeme transferi olarak tanımlanmaktadır [32].

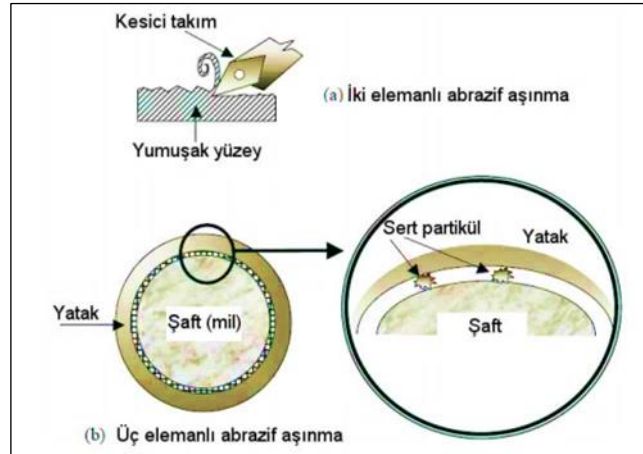
4.3.1.2. Abrasif Aşınma

Birbirleriyle temas halinde olan iki malzemenin, uygulanan yük veya basıncın etkisi ile sert olan malzemenin diğer malzeme üzerinde önce plastik deformasyon, daha sonra parça koparma işlemi uyguladığı aşınma türü, abrasif aşınma olarak adlandırılmaktadır. Bu aşınmada, aşınan malzeme genellikle katı iken, aşındırıcı sıvı da olabilmektedir [33].



Şekil 4.3. Abrazif aşınmanın şematik olarak gösterimi [33].

Birbirleri ile sürtünerek çalışan malzemelerin direk kendi aralarında etkileşimde bulunmaları, iki cisimli abrazyonu ifade etmektedir. İki malzeme arasında üçüncü bir ara malzeme serbest bir şekilde bulunabildiği gibi, bu iki malzeme arasındaki aşınma sonucu ayrılan parçalarda ara malzeme görevi yapabilmektedir. Üç elemanın birbirleri arasındaki aşınma ise, üç cisimli abrazyon olarak ifade edilmektedir. İki ve üç cisimli abrazif aşınma şematik olarak, Şekil 4.4'te verilmektedir. İki malzemeden kopan ve ara malzeme olarak bulunan parçacıklar ana malzemelerden daha sert yapıda oldukları için, aşınmanın hızlanmasına neden olmaktadır.

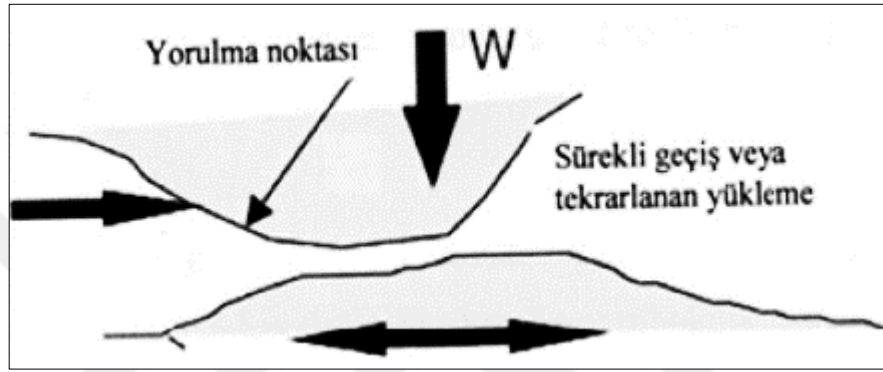


Şekil 4.4. Abrazif aşınma biçimleri a) iki elemanlı b) üç elemanlı [34].

En çok karşılaşılan aşınma mekanizmalarından biri olan abrazif aşınmayı azaltmak için, malzemelerin sertliklerinin artırılması veya aşınmanın olduğu yüzeylerine sert bir tabaka ile kaplama yapılması gereklidir.

4.3.1.3. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, malzemelere tekrarlı yükler uygulandığında, zamana bağlı olarak gerçekleşmektedir. Aşınmanın sürekli hale gelmesi ile aşınan yüzeyde, mikro çatlaklar oluşmaktadır. Mikro çatlakların zamanla artmasıyla birlikte, yüzeyden kopmalar olmaktadır. Bu aşınma türü, yorulma aşınması olarak ifade edilmektedir. Yorulma aşınmasının şematik olarak gösterimi, Şekil 4.5'te verilmektedir [35].



Şekil 4.5. Yorulma aşınmasının şematik olarak gösterimi [36].

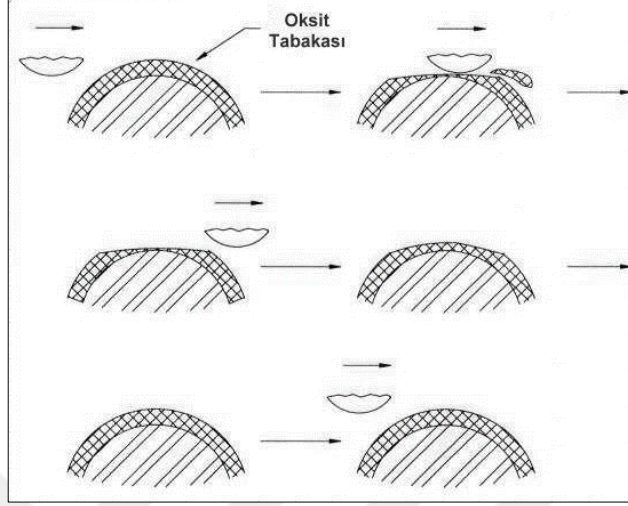
Özellikle mühendislik malzemelerinde gözüken yorulma aşınması, parça üzerinde kayma gerilmelerinin en yoğun olduğu bölgelerde plastik deformasyonun meydana gelmesiyle birlikte, yüzeye ulaşan çatlakların oluşturduğu kopmalar sonucu oluşmaktadır. Yorulma aşınması dişli çarklar ve rulmanlı yatakların yüzeylerinde oldukça sık görülmektedir [36].

4.3.2. Hasarın Fiziksel Görünümüne Göre Aşınma Mekanizmaları

4.3.2.1. Korozif Aşınma

Malzemenin yüzeyine katı, sıvı veya gaz kimyasalların etkimesi ile yüzeylerde bir tabaka oluşmaktadır. Bu tabaka oluşurken, eğer yüzeyden hacimsel kayıp olursa ve bu yüzeyler korozif etkilere maruz kalırsa korozif aşınma meydana gelmektedir. Korozif aşınmanın en iyi örneği oksidasyondur. Özellikle metal ve alaşımlarında sıklıkla görülen bu aşınma da oksit tabakası, sürtünmenin de etkisiyle kırılarak yüzeyden kopmaktadır. Kopan parçadan geriye kalan yeni yüzeylerinde oksitlenmesi

ile birlikte, bu işlem sürekli tekrarlanmakta ve kayıplara neden olmaktadır. Korozif aşınma şematik olarak, Şekil 4.6'da verilmektedir.

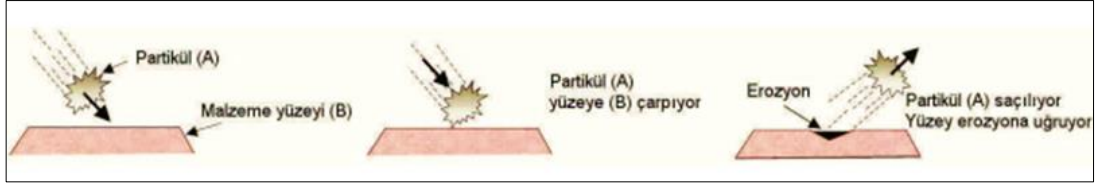


Şekil 4.6. Korozif aşınmanın şematik olarak gösterimi [35].

Korozif aşınma, yüksek sıcaklıkların ve nemli çalışma ortamlarında artmaktadır. Çalışma ortamında malzemelerin sıcaklığını ve nem miktarlarını belirli sınırlarda tutmak, aşınmanın hızını yavaşlatabilmektedir. Fakat aşınmayı tamamen önlemek için yeterli değildir. Aşınmayı önlemek için, temas yüzeylerine ince film kaplama işlemi uygulanmaktadır. Kullanılan bu filmler ile malzemenin aşınmasının önlenmesi hedeflenmektedir [35].

4.3.2.2. Erozyon Aşınması

Malzemenin yüzeyine akıcı olan sıvı veya gaz, hızlı bir şekilde temas etmektedirler. Bu çarpışma sırasında, akıcı madde parça yüzeyini aşındırmaktadır. Gaz ve sıvı ile birlikte bulunan abrazyif, taneler yüzeye belirli bir açıda gelmektedir. Malzemenin mukavemet değerleri aşıldığında bu durum, malzemede plastik deformasyona sebep olmaktadır. Bu aşınma türü, erozyon aşınması olarak adlandırılmaktadır.



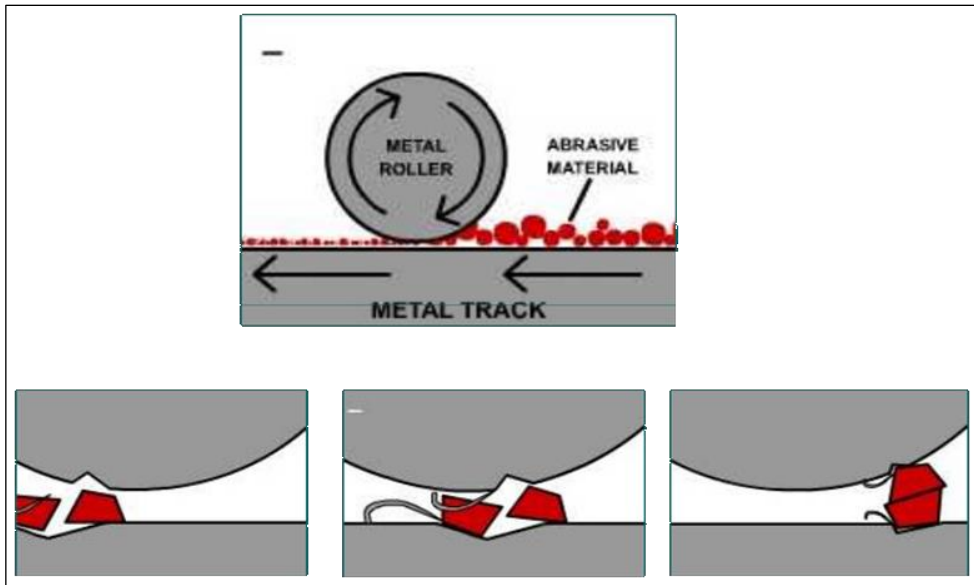
Şekil 4.7. Erozyon aşınmasının şematik gösterimi [35].

Erozyon aşınmasının oluşumu şematik olarak, Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Aşındırıcıların büyüklüğü, şekli, sertliği, hızı ve çarpma açısı gibi parametreler, aşınmayı etkilemektedir. Erozyon aşınması en çok pervanelerde, türbinlerde, nozullarda ve pompa elemanlarında görülmektedir [35,36].

4.3.3. Aşınmanın Aldığı Özel İsimlere Göre Aşınma Mekanizmaları

4.3.3.1. Öğütmeli Aşınma

Bu aşınma türünde, yüksek basınca maruz kalan aşındırıcı parçalar düşük hızlarla metal yüzeyleri arasında kalmakta ve metal yüzeyleri çizmekte veya parça koparmaktadır. Şekil 4.8’de de gösterildiği gibi hem aşındırıcı malzemeler basıncın etkisi ile plastik deformasyona uğramakta, hem de bu parçaları öğütme görevi yapan parçalar aşınmaktadır. Bu aşınma türü, öğütmeli aşınma olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 4.8. Öğütmeli aşınmanın şematik olarak gösterimi [33].

Öğütmeli aşınmayı gidermek için öğütücü parçaların sertlikleri arttırılmaktadır. Fakat sertliği çok arttırmak, malzemeyi daha gevrek yapılı yaptığı için kırılmalar olabilmektedir. Bu aşınma, en çok bilyeli değirmen ve iş makinalarında görülmektedir [33].

4.3.3.1. Oymalı Aşınma

Malzeme yüzeyini veya malzeme yüzeyine etki eden çok yüksek darbeler sonucu oluşan kopmalar veya delik olarak tabir edilen aşınma boşluklarının oluştuğu aşınma türü, oymalı aşınma olarak ifade edilmektedir. Oymalı aşınma daha çok delme ve kesme işlemlerinin yapıldığı parçalar ile delmenin ve kesmenin olduğu makine elemanlarında görülmektedir.

Oymalı aşınmayı gidermek için sertleştirme işlemleri yapılamamaktadır. Çünkü kullanım alanına göre daha sert bir cisim ile temas etme ihtimalinin yüksek olması ve parçaların aşınma sonrası şekil değişikliklerinin onarılamaz olması nedeniyle, aşınmaya uğrayan parçalar yenileriyle değiştirilmektedir [33].

4.3.3.2. Kazımalı Aşınma

Bağlı hareket yapmayan parçaların yüzeylerindeki titreşimin ve yavaş hareketin etkisiyle mikro seviyede kaynaklanmalarla oluşan deformasyonlar, kazımalı aşınma olarak ifade edilmektedir. Şaft gibi makine parçalarında görülen yorulma kırılmaları aslında kazımalı aşınmadan kaynaklanmaktadır.

Kazımalı aşınma, titreşimin olduğu bütün makine elemanlarında görülmektedir. Bunlar; otomotiv şaftlarının birleşme noktaları, titreşimli ortamlarda çalışan somun, perçin gibi bağlantı elemanlarında ve yataklarda yaygın olarak görülmektedir [33].

4.2. AŞINMA TESTLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Endüstride aşınma ve aşınan makine parçaları, büyük problemler yaratmaktadır. Bu problemler aynı zamanda iş gücüne, iş kazalarına ve maliyete etki etmektedir. Bu

yüzden aşınmanın tespit edilmesi, önlenmesi ve aşınmaya dirençli malzemelerin üretilmesi önemlidir. Aşınmanın tespit edilmesi için birçok yöntem bulunmaktadır. Ağırlık farkı metodu, kalınlık farkı metodu, radyo-izotop metodu, ultasonik metot, optik metot ve mekanik ölçüm metodu aşınmayı tespit etmekte en yaygın kullanılan yöntemlerdir [36-38].

3.2.1. Ağırlık Farkı Metodu

Ekonomik ve duyarlılık kapasitesinin yüksek olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Deney numunelerinde direkt ölçüm yapılamamaktadır. Yani numune herhangi bir yere bağlıyken çıkartılıp, ölçüm yapmak zorunluluğu bulunmaktadır. Zaman kaybı yaratması, dezavantaj olarak kabul edilmektedir. Ağırlık kaybı 1/1000 g hassasiyete sahip terazi yardımı ile yapılmaktadır. Aşınma miktarı gram olarak kabul edilirse, sürtünme yolu kilometre, miligram olarak kabul edilirse metre olarak ifade edilmekte ve bu birimlere karşılık gelen ağırlık kayıpları (g/km) ve (mg/m) olarak ifade edilmektedir [37].

4.2.2. Kalın Farkı Metodu

Aşınmadan önce ve aşınmadan sonra ölçülen kalınlık ve bunların karşılaştırılmasıyla aşınma miktarının hesaplandığı bir yöntemdir. Belirlenen kalınlık farkı ile hacimsel kayıp ve birim hacimdeki aşınma miktarı ölçülmektedir. Kalınlık ölçümü $\pm 1\mu\text{m}$ 'luk hassasiyette ölçülmektedir [37].

4.3.3. Radyo-İzotoplar Ölçüm Metodu

Ölçüm hassasiyeti yönünden diğer metotlardan daha iyi sonuçlar veren bir yöntem olan radyo-izotop ölçüm metodu, diğer yöntemler kadar ekonomik değildir. Bu sebepten dolayı yaygın olarak kullanılamamaktadır. Diğer ölçüm metotlarının kullanılmadığı veya yetersiz kaldığı durumlarda kullanılan tek yöntemdir. Bu yöntemle ile diğer metotlara göre 1000 kat daha hassas ölçümler yapılmaktadır.

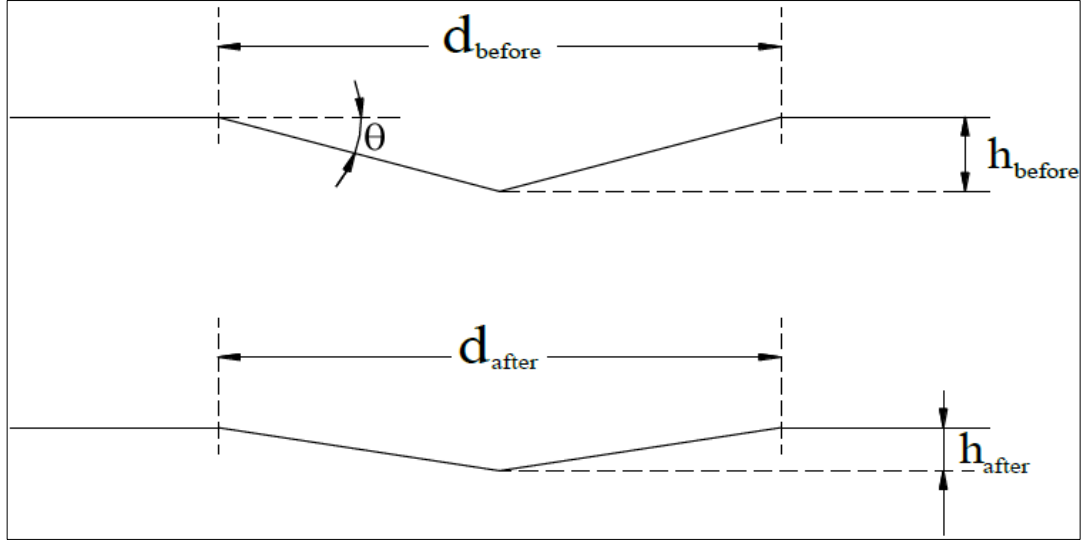
Çalışma prensibi, sürtünme yüzey bölgesinin proton veya yüklü α parçacıkları ile bombardıman edilerek radyoaktif hale getirmektir. Aşınma sonucu radyoizotopların yüzey bölgesinden ayrılmasıyla ortaya çıkacak aktivite değişimi ölçülerek, aşınma miktarı hesaplanmaktadır [39,40].

4.3.4. Ultrasonik Ölçüm Metodu

Bu yöntemde ses dalgaları kalınlığı ölçüm yapılan malzemeye gönderilerek, aşınma miktarı hesaplanmaktadır. Gönderilen ses dalgaların gidip gelme süreleri, kalınlık miktarını belirlemektedir. Bu yöntem ile parçaların yüzeylerinde biriken kalıntıları temizlemeden ölçüm yapılabilmektedir. Bu özelliği ile diğer yöntemlerde meydana gelen hatalar önlenmektedir. Bilgisayar destekli olması nedeniyle çok sayıda parça için bilgi depolanmakta, otomatik aşınma yüzdeleri ve ömür hesapları yapılabilmektedir [39,40].

4.3.5. Optik Metod

Optik metotla aşınma miktarını belirlemenin birçok farklı yöntemi bulunmaktadır. En yaygın olarak kullanan metot da, mikro sertlik çukuru oluşturmak ve çukurun boyutundaki değişimi incelemektir. Optik metotta aşınma miktarını belirlemek için kullanılan mikro sertlik çukurunun şematik olarak gösterimi, Şekil 4.9'da verilmektedir. Bu yöntemde belirlenebilir sınır yaklaşık olarak 10^{-4} cm civarında ve 1/5 oranında iz için 10^{-5} cm bir derinlik sınırı kullanılmaktadır. Bu şekilde profilo metre sınırlamalarıyla aynı sınırlama kullanılarak aşınma miktarının ölçümü yapılabilmektedir.



Şekil 4.9. Optik metotla aşınma miktarını belirlemek için kullanılan mikro sertlik çukurunun şematik olarak gösterimi [38].

Optik metotta aşınma miktarı eşitlik 3.1 ile belirlenmektedir.

$$\text{Aşınma Derinliği} = h_{bef} - h_{aft} = (d_{bef} - d_{aft}) \cdot \frac{\text{tg}\theta}{2} \quad (4.1)$$

Radyo aktif izleyiciler sayesinde aşınma miktarı aşınmanın başladığı andan itibaren ölçülebilmektedir. Bu ölçüm sınırı 10^{-9} ile 10^{-12} g arasında saptanabilmektedir [38].

4.3.6. Mekanik Ölçüm Metodu

Mekanik ölçüm metodu, özellikle büyük boyutlu parçaların aşınma miktarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemle büyük parçaların küçük boyutlardaki aşınma miktarları da kolaylıkla belirlenmektedir. Endüstride büyük ve sürekli aşınmaya uğrayan makine parçalarının aşınma ölçümlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Aşınmanın bir bantta oluşması ile profilometre yardımı ile şeridin profili çıkartılır ve aşınmış malzeme miktarı hesaplanmaktadır. Örneğin 3 cm uzunluğunda, 10^{-2} genişliğinde ve 10 mikro inçlik bir şeritte 10^{-5} g ağırlık kaybı saptanabilmektedir [38].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. DENEYSEL MALZEMELER

Deneysel çalışmalarda %99,7-99,9 arasındaki saflıkta molibden (Mo), titanyum (Ti), zirkonyum (Zr), karbon (C), demir (Fe), nikel (Ni), silisyum (Si) elementel tozları kullanılmıştır. Elementel tozlar Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. TZM alaşımlarının üretiminde farklı miktarlarda titanyum ve zirkonyum kullanılmıştır. Farklı miktarlarda Ti ve Zr içeren TZM alaşımlarının kimyasal bileşimleri Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının kimyasal bileşimleri (% ağırlık).

| Alaşım Kodu | Ti | Zr | C | Fe | Ni | Si | Mo |
|-------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,4 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,005 | 99,51 |
| 2 | 0,45 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,005 | 99,46 |
| 3 | 0,50 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,005 | 99,41 |
| 4 | 0,55 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,005 | 99,36 |

Çizelge 5.2. Farklı miktarlarda Zr içeren TZM alaşımlarının kimyasal bileşimleri (% ağırlık).

| Alaşım Kodu | Zr | Ti | C | Fe | Ni | Si | Mo |
|-------------|------|-----|------|------|-------|-------|-------|
| 5 | 0,06 | 0,4 | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,005 | 99,51 |
| 6 | 0,07 | 0,4 | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,005 | 99,5 |
| 7 | 0,08 | 0,4 | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,005 | 99,49 |
| 8 | 0,09 | 0,4 | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,005 | 99,48 |

Çizelge 5.1 ve 5.2’de belirtilen bileşimler 1/10000 g hassasiyetteki (Şekil 5.1’de gösterilen Precisa XB200h marka) hassas terazi ile ölçülerek hazırlanmıştır.



Şekil 5.1. Tozların hazırlanmasında kullanılan hassas terazi.

5.2. MEKANİK ALAŞIMLAMA İŞLEMLERİ

İstenilen kimyasal bileşimler hazırlanarak Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Üretim Metalurjisi Laboratuvarında bulunan tek öğütme hücreli, 225 ml kapasiteli, Fritsch Pulverisette marka planer tipi mekanik alaşımlama/öğütme (MA/MÖ) cihazında mekanik alaşımlandırılmıştır. Şekil 5.2’de deneysel çalışmalarda kullanılan MA/MÖ cihazı görülmektedir. Öğütme bilyeleri ve öğütme hücresi paslanmaz çelikten yapılmıştır. Mekanik alaşımlama işlemlerinde 10:1 bilye toz oranı kullanılmıştır. Her bir grup 400 rpm devir ile 120 dakika boyunca mekanik alaşımlanmıştır. Aglomerasyonu önlemek amacı ile işlem kontrol kimyasalı olarak etanol kullanılmıştır. Ayrıca işlem sırasında tozların ısını kontrol altında tutabilmek için her 10 dakikalık öğütme sonrası cihaz 10 dakika durdurulmuş ve işlem 120 dakika tamamlanana kadar tekrarlanmıştır.



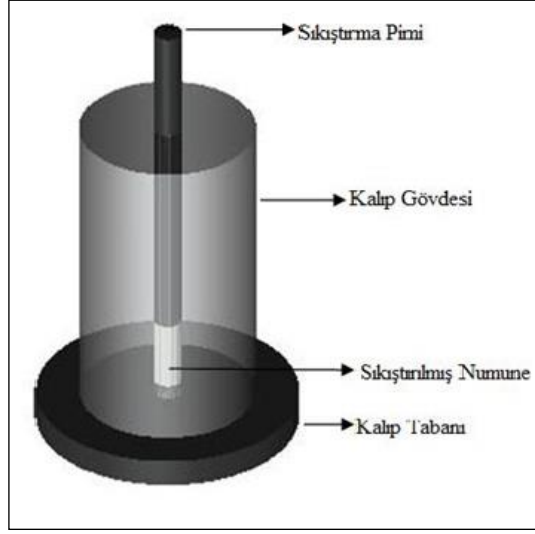
Şekil 5.2. Mekanik alaşımlama/öğütme cihazı.

5.3. TOZ BOYUT ANALİZİ

Mekanik alaşımlanan tamamlanmış tozların boyutlarının, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarındaki Malvern Instrument lazer toz boyut ölçüm cihazında ölçülmüştür.

5.4. PRESLEME İŞLEMİ

Mekanik alaşımlanmış tozlar aşınma ve karakterizasyon çalışmaları için 10x7 mm ölçülerinde soğuk preslenmiştir. Şekil 5.3'te soğuk presleme kalıbı gösterilmiştir.



Şekil.5.3. Soğuk presleme kalıbı.

Presleme işlemi, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Üretim Metalurjisi bünyesinde bulunan Hidroliksan marka pres ile 700 MPa basınç altında (soğuk presleme) yapılmıştır. Tozların şekillendirilmesinde kullanılan pres, Şekil 5.4'te verilmiştir. Yağlayıcı olarak çinko stearat kullanılmıştır.



Şekil 5.4. Tozların şekillendirilmesinde kullanılan pres.

5.5. SİNERLEME İŞLEMİ

Sinterleme işlemi, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Üretim Metalurjisi Laboratuvarında bulunan vakumlu ısıtma fırını (10^{-6} milibar) kullanılarak yapılmıştır. Numuneler $4^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızı ile 1300°C sıcaklığında 4 saat sinterlendikten sonra fırın ortamında oda sıcaklığına soğutulmuştur. Şekil 5.5'te sinterleme işlemlerinin yapıldığı vakumlu ısıtma fırınının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.5. Sinterleme işlemlerinin yapıldığı vakumlu ısıtma fırınının görüntüsü.

5.6. METALOGRAFİK NUMUNE HAZIRLAMASI

Sinterleme işleminden sonra numunelerin yüzeyleri, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Üretim Metalurjisi Laboratuvarında bulunan "PRESİ" marka Mecapol P262 model cihazında temizlenmiştir. Standart metalografik işlemlerle hazırlanan numuneler, $3\ \mu\text{m}$ elmas pasta ile parlatma keçesinde parlatılmış ve (%88 CH_3OH , %12 H_2SO_4) dağlayıcı ile 15V'luk gerilim uygulanarak 20°C 'de 60 sn. süreyle dağlanmıştır.

5.7. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Yoğunluk ölçümleri, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan PRECISA XB200 h marka maksimum 220 g ağırlık ölçebilen 1/10000 g hassasiyetli yoğunluk ölçüm cihazında, Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Her gruptan üçer adet numunenin yoğunluk ölçümlerinin aritmetik ortalaması hesaplanmıştır.

5.8. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Sertlik ölçümleri, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Üretim Metalurjisi Laboratuvarında bulunan ve görüntüsü Şekil 5.6'da verilen, Shimadzu marka mikro sertlik ölçüm cihazında (0,5N yük altında) yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde, her gruptan üçer adet numunenin 10 farklı bölgesinden ölçümler yapılarak, bu değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanmıştır.



Şekil 5.6. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro sertlik cihazının görüntüsü.

5.9. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM+EDS) İNCELEMESİ

Aşınma öncesi ve sonrasında, üretilen numunelerin mikroyapı SEM ve EDS görüntüleri, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü (MARGEM) Laboratuvarı'nda bulunan Zeiss marka Ultra/Plus (FEG) model tarama elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir.

5.10. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ

Yapıda oluşan fazların belirlenmesi amacıyla, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü AR-GE Laboratuvarında bulunan Rigaku marka XRD cihazında X-ışını kırınımı (XRD) incelemeleri yapılmıştır.

5.11. AŞINMA DENEYLERİ

Aşınma deneylerinde pin-on-disk tipi standart deney ünitesi kullanılmıştır. Bu cihaz farklı yük ve kayma hızında çalışma kabiliyetine sahiptir. Aşınma testlerinde 1 m/sn hızı, 10, 20 ve 30 N yük ve beş farklı kayma mesafesi (400-800-1200-1600-2000 m) kullanılmıştır.

Aşındırıcı döner disk için AISI4140 malzemesi 230 mm çapında, 20 mm kalınlığında ve 60 HRC sertliğe sahip disk kullanılmıştır. Numunelerin aşınma öncesi ve sonrası ağırlıkları ölçülerek, aşınmadan kaynaklanan kütle ve hacimsel kayıplar hesaplanmıştır. Aşınma deneyleri ASTM-G99-05 standartlarında göre yapılmıştır. Aşınma oranlarının belirlenmesinde Eşitlik 5.1'de verilen denklem uygulanmıştır.

$$Wa = \frac{\Delta G \text{ (g)}}{d.P.S. \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right).N.m} \quad (5.1)$$

Wa : Aşınma oranı (mm³/Nm), ΔG : Ağırlık kaybı (g), d : Yoğunluk (g/cm³), P : Yükleme ağırlığı (N), S : Kayma yolu (m), olarak verilmiştir.

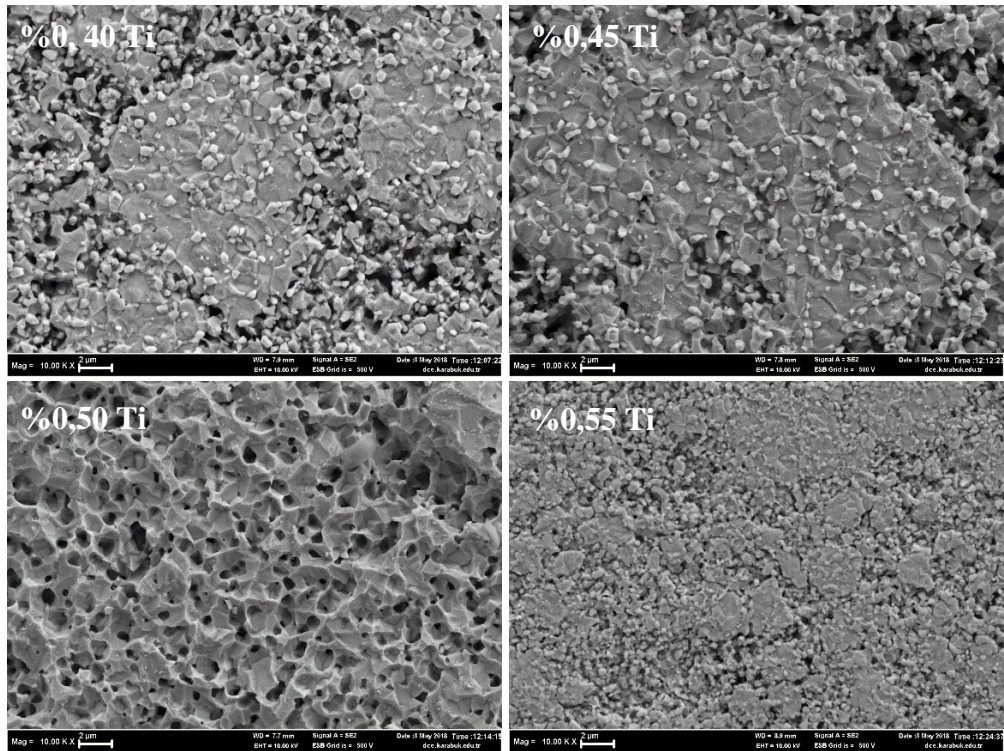
BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

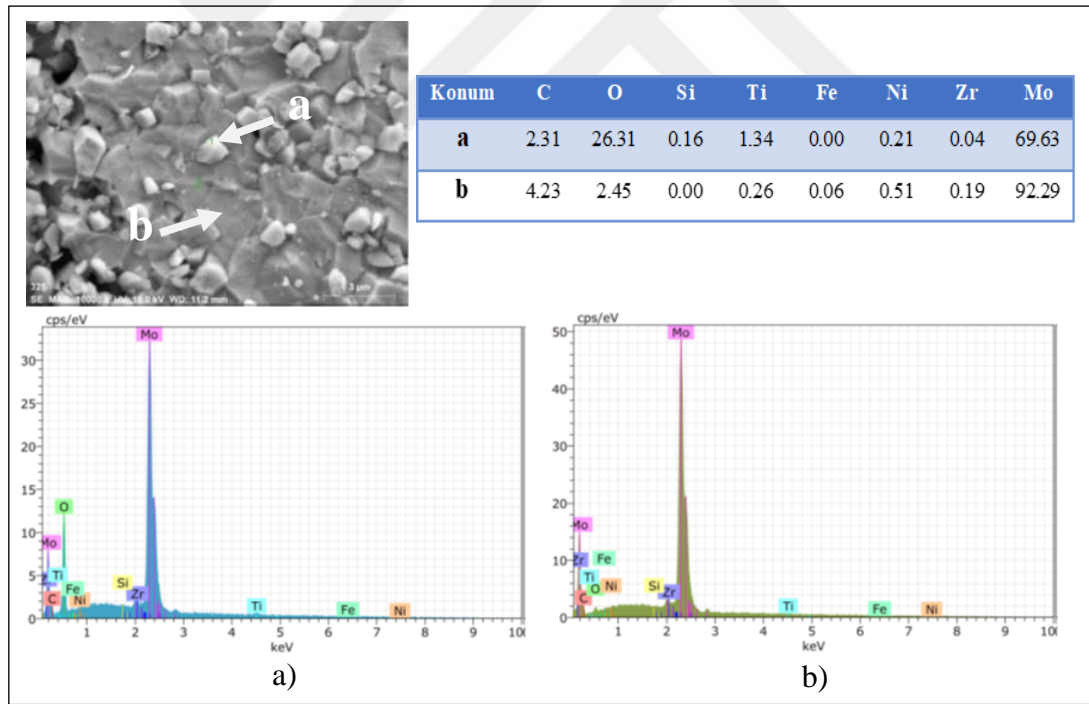
6.1.1. Farklı Miktarlarda Titanyum İçeren TZM Alaşımlarının Mikroyapı İncelemeleri

Farklı miktarlarda titanyum (%0.40, %0.45, %0,50 ve %0,55) ilave edilen TZM alaşımları, mekanik alaşımlandırıldıktan sonra soğuk preslenerek, sinterlenmiştir. Sinterlenen alaşımlar standart metalografik işlemler ile mikroyapı incelemeleri için hazırlanmıştır. Şekil 6.2’de farklı miktarlarda titanyum ilave edilerek üretilen TZM alaşımlarının mikroyapı SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 6.1. Farklı miktarlarda titanyum ilave edilerek üretilen TZM alaşımlarının mikroyapı SEM görüntüleri.

Şekil 6.1’de %0,40 ve %0,45 Ti içeren TZM alaşımlarının mikroyapısında (özellikle tane sınırlarında) gözenekler olduğu görülebilmektedir. Alaşıma ilave edilen Ti miktarı %0,50 çıkarıldığında, gözenek boyutunun küçüldüğü ve tane içlerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Alaşıma ilave edilen Ti miktarı %0,55’e çıkarıldığında ise, yapıda bulunan gözenek miktarı azalmaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada, yapıda oluşan TiC’lerin ana matris olan Mo’nin yeniden kristalleşme sıcaklığını yükselttiği, bu yüzden tane büyümesinin önlendiği ve daha homojen bir yapı oluştuğu ve gözenek boyutlarının küçüldüğü belirtilmiştir [39]. Bununla birlikte, daha önce yapılan başka bir çalışmada ise, gözenekliliğin artması ile TZM alaşımında daha iyi termal özellikler sağlandığı ve özellikle termal gerilmeye karşı direncin önemli olduğu özel uygulama alanlarında gözenekliliğin büyük rol oynadığı belirtilmiştir [40]. Şekil 6.2’de %0,40 Ti ilave edilen TZM alaşımının EDS (noktasal) analizi sonucu verilmektedir.



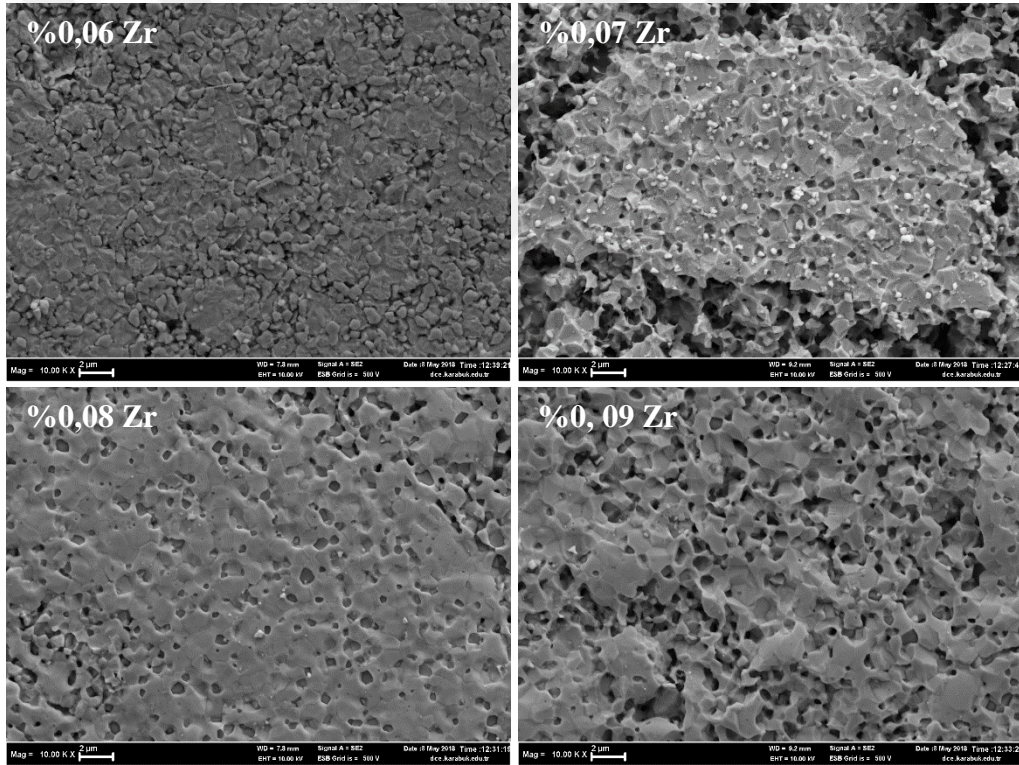
Şekil 6.2. %0,40 Ti ilave edilen TZM alaşımının EDS analizi sonucu.

Şekil 6.2’de verilen %0,40 Ti ilave edilen TZM alaşımının EDS (noktasal) analizi sonuçları incelendiğinde, yapıda oksidasyon (MoO_2) olduğu anlaşılmaktadır. İkinci olarak gösterilen alanın (b) ise ana matris olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre

yapı içerisinde homojen bir dağılım olmakla birlikte, bir miktar oksitlenme olduğu gözlenmektedir.

6.1.2. Farklı Miktarlarda Zirkonyum İçeren TZM Alaşımının Mikroyapı İncelemeleri

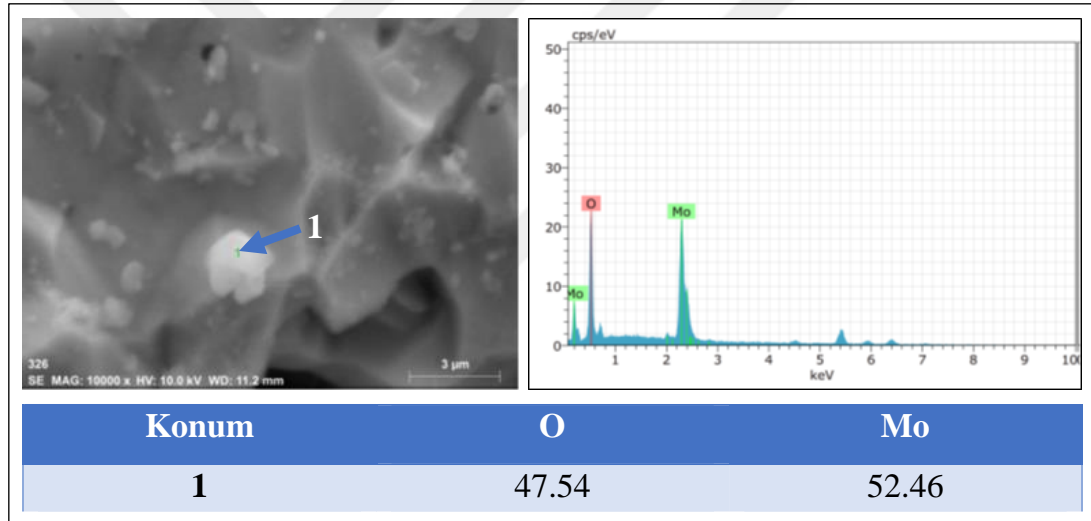
Farklı miktarlarda Zr içeren (%0,06, %0,07, %0,08 ve %0,09) TZM alaşımları mekanik alaşımlama (MA), soğuk presleme ve sinterleme işlemlerinden sonra, standart metalografik işlemler ile hazırlanarak mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Şekil 6.3’de, farklı miktarlarda Zr içeren TZM alaşımlarının mikroyapı SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 6.3. Farklı miktarlarda Zr ilave edilen TZM alaşımlarının mikroyapı SEM görüntüleri.

Şekil 6.3’de farklı miktarlarda Zr ilave edilerek mekanik alaşımlanan ve 10^{-6} milibar vakumda sinterlenerek üretilen TZM alaşımlarının mikroyapı SEM görüntüleri incelendiğinde, %0,09 Zr ilave edilen alaşımların mikroyapısının gözeneklerin olduğu görülebilmektedir. Bu gözenekler tane sınırlarında konumlanmaktadır. Alaşıma ilave

edilen Zr miktarı arttıkça, gözenek miktarının arttığı ve özellikle tane içlerinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, yine ilave edilen Zr miktarı arttıkça, gözenek miktarı da artmaktadır. Alaşıma ilave edilen Zr miktarı %0,09'a çıkarıldığında ise, hem gözeneklerin sayısının hem de hacminin arttığı görülmektedir. Daha önce yapılan bir çalışmada, TZM alaşımına ilave edilen Zr'un yeniden kristalleşme sıcaklığını yükselttiği, tane büyümesini engellediği belirtilmiştir [39]. Bununla birlikte, yapılan başka bir çalışmada ise gözenekliliğin artması ile TZM alaşımında daha iyi termal özellikler sağlandığı ve özellikle termal gerilmeye karşı direncin önemli olduğu özel uygulama alanlarında gözenekliliğin büyük rol oynadığı belirtilmiştir [40]. Şekil 6.4 de %0,06 Zr ilave edilen TZM alaşımının EDS analizi sonucu verilmiştir.



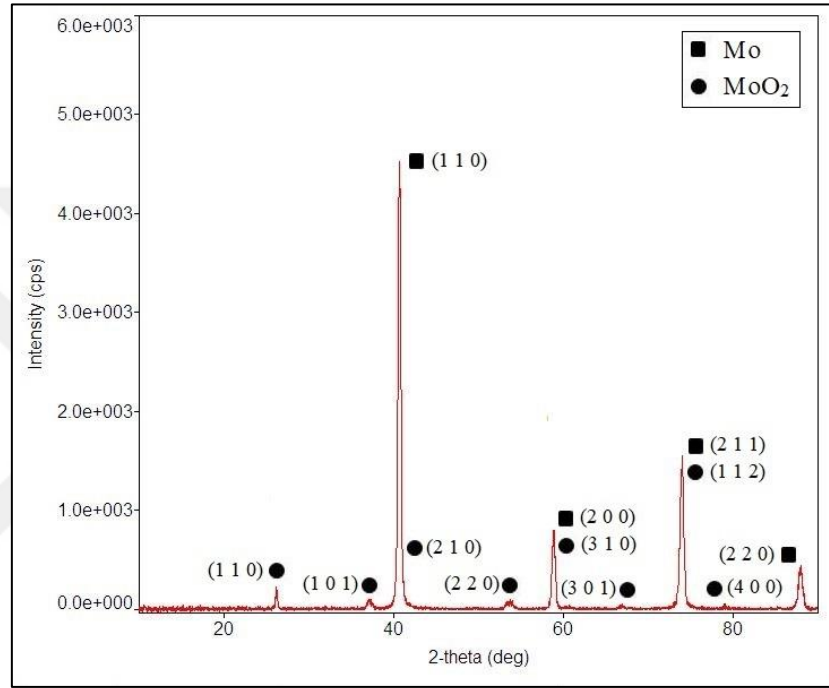
Şekil 6.4. %0,06 Zr ilave edilen TZM alaşımının EDS analizi sonucu.

Şekil 6.4'de %0,06 Zr ilave edilen TZM alaşımının EDS (noktasal olarak) analizi sonuçları değerlendirildiğinde, yapıda beyaz bölge olarak görülen fazın MoO₂ olduğu anlaşılmaktadır.

6.2. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ

6.2.1. Titanyum İlave Edilen TZM Alaşımlarının XRD İncelemeleri

Kimyasal bileşiminde %0,55 Ti, %0,06 Zr ve %99,36 Mo bulunan TZM alaşımının XRD sonuçları, Şekil 6.5’de verilmektedir.

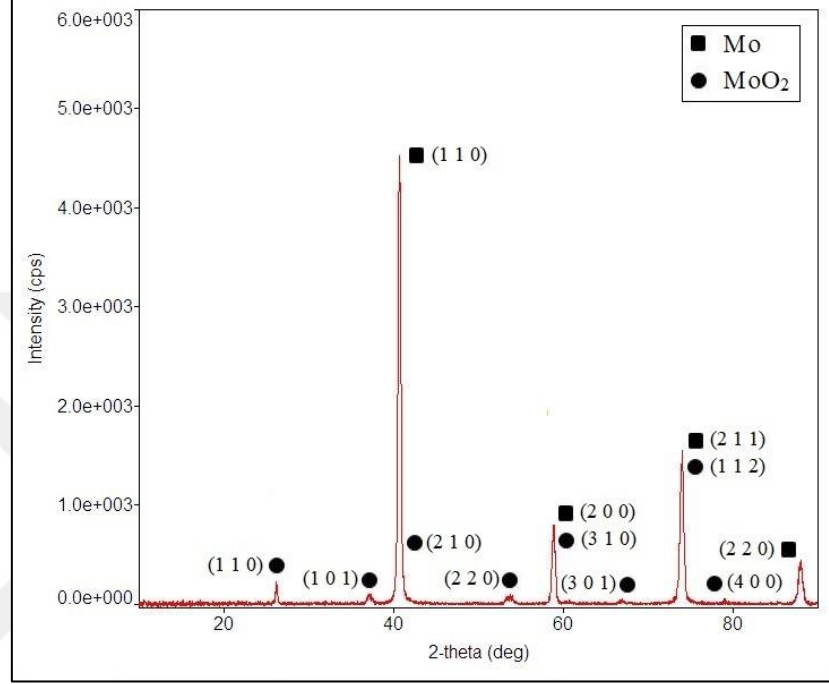


Şekil 6.5. Kimyasal bileşiminde %0,55 Ti, %0,06 Zr ve %99,36 Mo bulunan TZM alaşımın XRD sonuçları.

Şekil 6.5’da verilen ve %0,55 Ti ilave edilen TZM alaşımının XRD sonuçları incelendiğinde, 1300 °C’de 4 saat sinterlenen TZM alaşımının yapısında ana matrisin Mo olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, yapıda MoO₂’de bulunduğu anlaşılmaktadır. Yapıda oluşması beklenen karbürler (TiC, ZrC ve Mo₂C) görülememiştir. Ancak daha önce yapılan bir çalışmada, TiC ve ZrC piklerinin oluştuğu ve öğütme süresinin 120 dakikadan 30 saate çıkartılması ile amorf bir yapı elde edildiği belirtilmektedir [41]. Yapıda oluşması beklenen karbürlerin görülememesinin sebepleri iki şekilde açıklanabilir. Birincisi ağırlıkça %1’den daha az ilave edilen Ti’nin XRD’de saptama değerinin altında olmasıdır. İkinci sebep ise çok yüksek olan Mo piklerinin karbür pikleri ile çakışma ihtimalidir [42].

6.2.2. Zirkonyum Miktarı Değiştirilen TZM Alaşımının XRD İncelemeleri

Kimyasal bileşiminde %0,40 Ti, %0,09 Zr ve %99,48 Mo bulunan TZM alaşımının XRD sonuçları, Şekil 6.6'da verilmektedir.



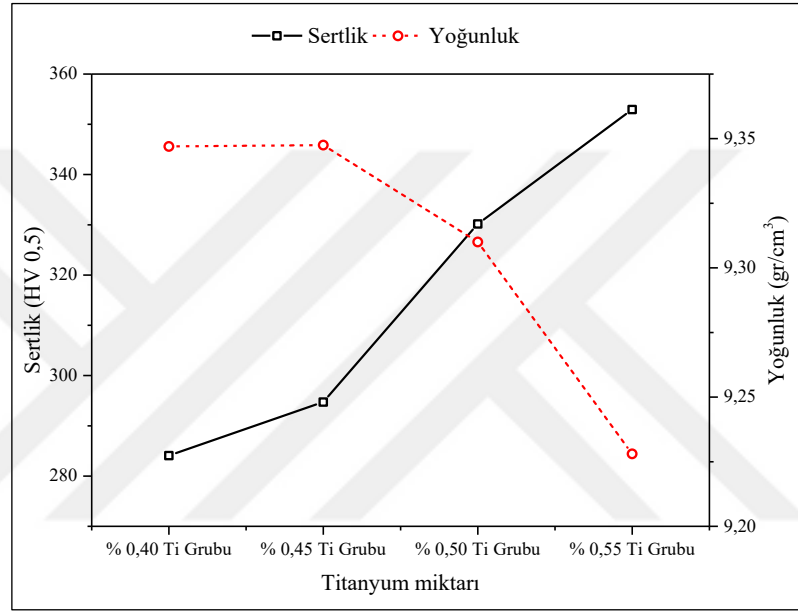
Şekil 6.6. Kimyasal bileşiminde %0,40 Ti, %0,09 Zr ve %99,48 Mo bulunan TZM alaşımın XRD sonuçları.

Şekil 6.6'da verilen ve %0,09 Zr ilave edilen TZM alaşımının XRD sonuçları incelendiğinde, 1300 °C'de 4 saat boyunca sinterlenen TZM alaşımının yapısında ana matris olan Mo ve yapıda oluşan MoO₂ net bir şekilde görülmektedir. Yapıda görülmesi beklenen ZrC görülememiştir. Ancak daha önce yapılan bir çalışmada, TiC ve ZrC piklerinin belirgin olarak görüldüğü belirtilmektedir [41]. Yapıda görülemeyen karbürlerin sebepleri iki şekilde açıklanabilir. Ağırlıkça %1'den daha az ilave edilen Zr'nin XRD'de saptama değerinden daha alt bir değerde olmasıdır. İkinci sebep ise Mo ve MoO₂ piklerinin karbür pikleri ile çakışma ihtimalidir [42].

6.3. YOĞUNLUK VE SERTLİK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.3.1. TZM Alaşımında Titanyum Miktarının Yoğunluk ve Sertlik Üzerindeki Etkileri

Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının sertlik ve yoğunluk değişimleri, Şekil 6.7'da verilmiştir.



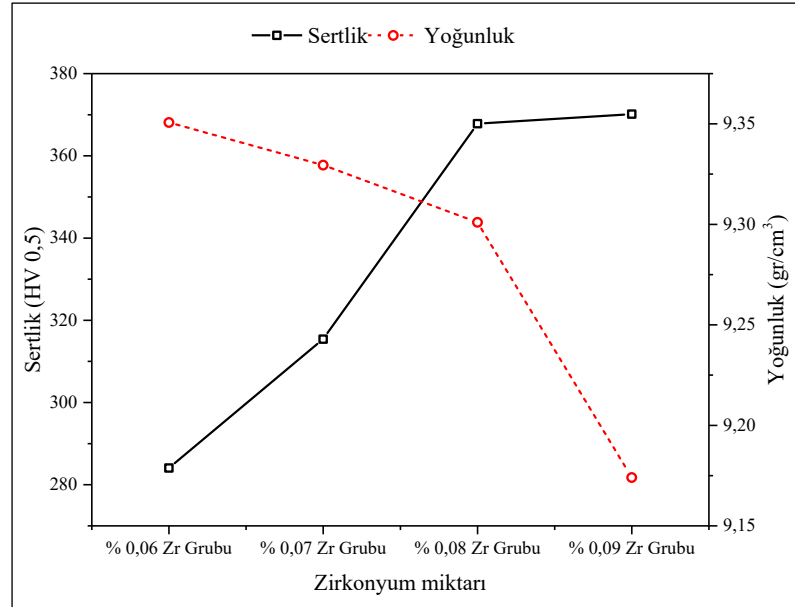
Şekil 6.7. Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının sertlik ve yoğunluk değişimleri.

Şekil 6.7'da verilen sertlik sonuçları incelendiğinde alaşım içerisindeki Ti miktarındaki artışa paralel olarak alaşımların sertliklerinin arttığı anlaşılmaktadır. En düşük sertlik %0,40 Ti içeren alaşımda (284 HV) ölçülürken, en yüksek sertlik %0,55 Ti içeren (353 HV) alaşımda ölçülmüştür. Farklı miktarlarda Ti içeren alaşımlar karşılaştırıldığında, Ti miktarı arttırıldıkça alaşımların sertliğinin de arttığı görülmektedir. Yapıdaki Ti ve C'un oluşturduğu TiC'ler alaşımların sertliklerinin artmasında önemli rol oynamaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada, TZM alaşımlarında Ti miktarının tane sınırlarında konumlanması ve yapıda oluşan karbürlerin (TiC) etkisi ile sertlikte artışa neden olduğu belirtilmektedir [43]. Yine Şekil 6.6'de verilen TZM alaşımlarının yoğunluk değişimleri incelendiğinde, en yüksek yoğunluk değerinin %0,40 Ti içeren alaşımda elde edildiği anlaşılmaktadır.

Verilen grafikten görüldüğü gibi TZM alaşımlarına ilave edilen Ti miktarı arttıkça, alaşımların yoğunluğu azalmaktadır. Buna bağlı olarak da en düşük yoğunluk %0,55 Ti içeren TZM alaşımında ölçülmüştür. Daha önceki yapılan bir çalışmada, TZM alaşımının yoğunluğunun belirlenmesinde sinterleme süresinin ve sıcaklığının önemli bir etken olduğu belirtilirken, ortalama yoğunluk değerlerinin $9,95 \text{ g/cm}^3$ - $10,16 \text{ g/cm}^3$ aralığında olduğu belirtilmektedir [40]. Yapılan deneysel çalışmalarda en yüksek yoğunluk değerleri, %0.40 ve %0.45 Ti içeren alaşımlarda ölçülmüştür. TZM alaşımlarına ilave edilen Ti miktarı arttırıldığında (%0.50 ve %0.55 Ti), alaşımların yoğunluklarının belirgin bir şekilde azaldığı görülebilmektedir. Yoğunluk değişimindeki bu azalmanın, Ti'un yoğunluğunun (4.52 g/cm^3) alaşımın yoğunluğundan daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

6.3.2. TZM Alaşımında Zirkonyum Miktarının Yoğunluk ve Sertlik Üzerindeki Etkileri

Farklı miktarlarda Zr ilave edilen TZM alaşımlarının yoğunluk ve sertlik değişimleri, Şekil 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.8. Farklı miktarlarda Zr içeren TZM alaşımlarının sertlik ve yoğunluk değişimleri.

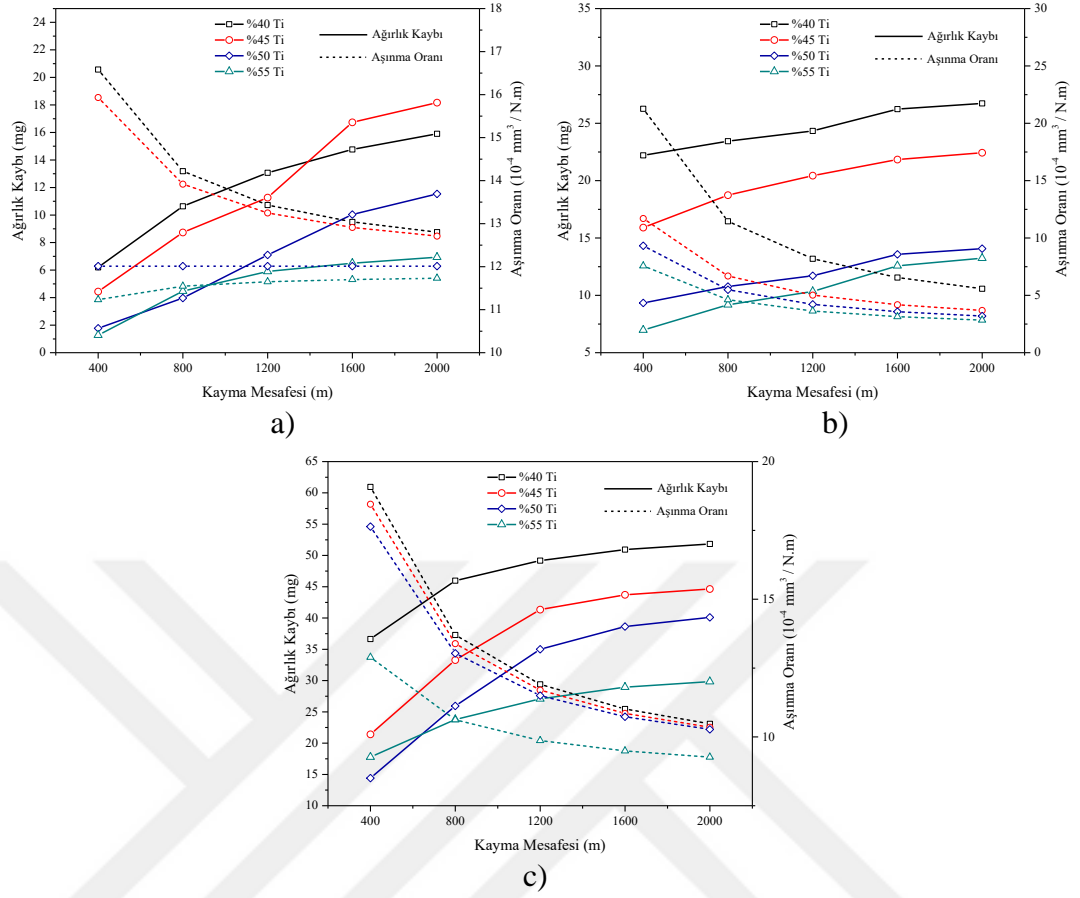
Şekil 6.8’de Zr ilave edilen TZM alaşımlarının sertlik değişimi incelendiğinde (aynı Ti ilave edilen alaşımlarda olduğu gibi), alaşımlara ilave edilen Zr miktarı arttıkça, alaşımların sertliklerinin arttığı anlaşılmaktadır. Elde edilen en düşük sertlik değeri, %0,06 Zr içeren alaşımda (284 HV) ölçülürken, en yüksek sertlik değeri %0,09 Zr içeren (370 HV) TZM alaşımda ölçülmüştür. Çalışma kapsamında farklı miktarlarda Ti ilave edilen TZM alaşımları ile Zr ilave edilen alaşımların sertlik sonuçları karşılaştırıldığında, elde edilen sertlik sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu da net olarak anlaşılmaktadır. Daha önceki çalışmalarda zirkonyumun yapıda oluşan karbürleri ile yüksek sıcaklıklarda uygulanan sinterleme işlemi sonucunda tane kabalaşmasını önlediği ve sertliği arttırdığı belirtilmiştir [40].

Şekil 6.8’de verilen TZM alaşımlarının yoğunluk değişimleri incelendiğinde ise, en yüksek yoğunluk değerinin ($9,351 \text{ g/cm}^3$) %0,06 Zr ilave edilen alaşımda elde edildiği görülmektedir. En düşük yoğunluk değeri ($9,174 \text{ g/cm}^3$) ise %0,09 Zr ilave edilen TZM alaşımında ölçülmüştür. TZM alaşımlarına ilave edilen Zr miktarı arttıkça, alaşımların yoğunluğu azalmaktadır. Özellikle bu azalma %0,09 Zr ilave edilen TZM alaşımında daha belirgindir. İlave edilen Zr miktarı ile yoğunlukta oluşan bu değişim, Zr’un yoğunluk değerinin alaşımın yoğunluk değerinden küçük olmasına bağlanmaktadır.

6.4. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

6.4.1. TZM Alaşımında Titanyum Miktarının Aşınma Davranışları Üzerindeki Etkileri

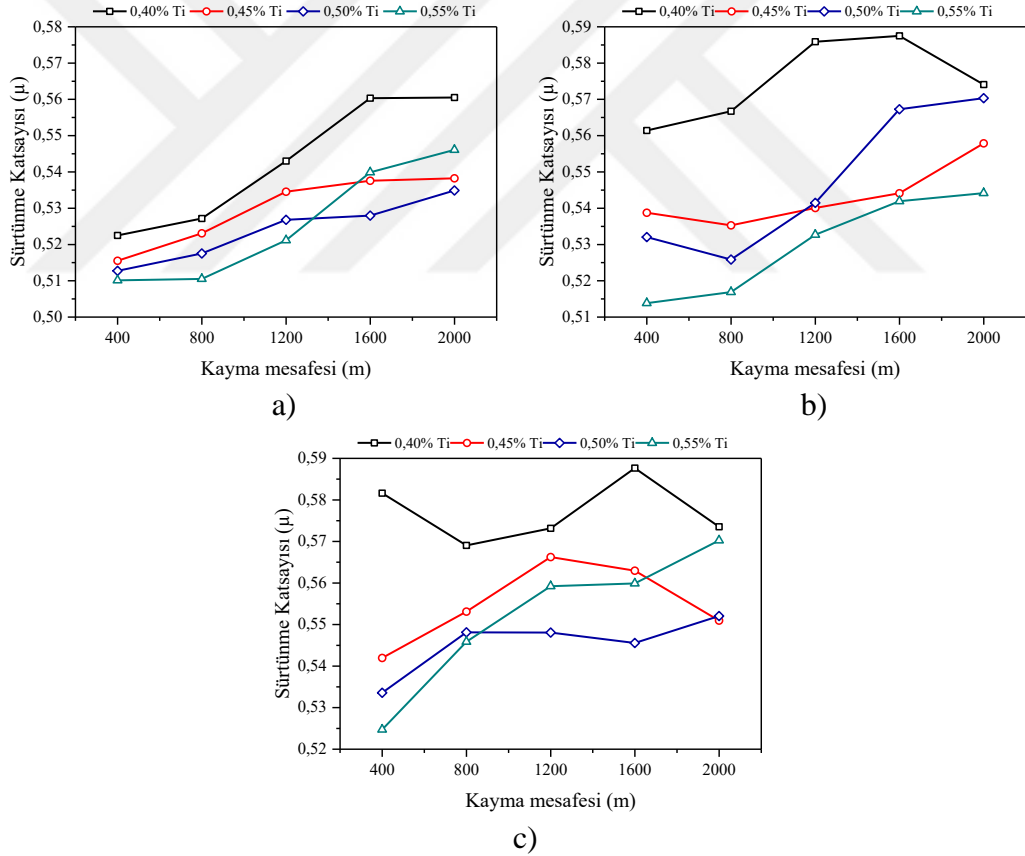
Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının 10, 20 ve 30 N yükler altında 400, 800, 1200, 1600 ve 2000 m kayma mesafelerinde 1 ms^{-1} sabit kayma hızında yapılan aşınma testlerinin sonucunda elde edilen ağırlık kayıpları ve aşınma oranları, Şekil 6.9’da verilmektedir.



Şekil 6.9. Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının ağırlık kaybı ve aşınma oranları a) 10 N, a) 20 N ve c) 30 N.

Şekil 6.9'da MA/MÖ ile üretilen ve farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının farklı yükler altındaki aşınma testleri sonunda bütün numunelerde uygulanan yük ve kayma mesafesindeki artışa bağlı olarak, ağırlık kayıplarının arttığı görülebilmektedir. En düşük ağırlık kaybı beklendiği gibi 10 N yük uygulanan TZM alaşımlarında elde edilmiştir. Bununla birlikte, 10 N yük altında test edilen alaşımların ağırlık kaybı sonuçlarında, 1200 m kayma mesafesinden itibaren yapısında %0,45 Ti bulunduran numunenin ağırlık kaybında belirgin bir artış olduğu, ağırlık kaybı grafiklerinden görülebilmektedir. Ayrıca 10 N yük altında yapısında %0,55 Ti bulunduran numune 800 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı sonuçlarında belirgin bir artma olmaktadır. Belirli mesafelerden itibaren gözlenen bu ani ağırlık kaybı artışları pin/disk temas yüzeyinde meydana gelen sürtünme etkisi ile numune yüzeyinde meydana gelen kırılmalar sonucu kopan parçacıklardan kaynaklanmaktadır. Numuneden kopan bu parçacıklar ile ağırlık kaybı ile birlikte aşınma oranı da artmaktadır. Uygulanan yükünde artması ile birlikte, ağırlık kaybı ve

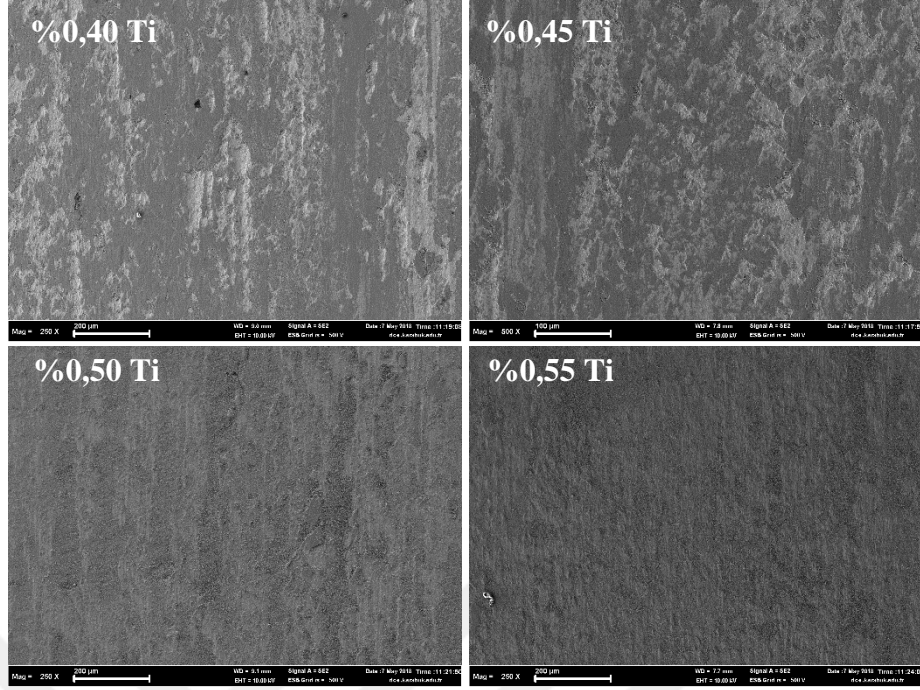
aşınma oranları artmaktadır [44]. 10 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testlerinde, en yüksek ağırlık kaybı %0,40 Ti içeren alaşımda elde edilirken, en düşük ağırlık kaybı ise kimyasal bileşiminde %0,55 Ti içeren alaşımda elde edilmiştir. Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının aşınma testleri sonunda elde edilen ağırlık kaybı ve aşınma oranları sonuçları ile, Şekil 6.7 de verilen sertlik sonuçları karşılaştırıldığında, sonuçların birbirlerini desteklediği görülebilmektedir. Bu sonuçlara göre alaşımların sertlikleri arttıkça, elde edilen ağırlık kaybı ve aşınma oranları azalmaktadır. Şekil 6.9’da farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının 10, 20 ve 30 N yükler altında 400, 800, 1200, 1600 ve 2000 m kayma mesafelerinde 1 ms^{-1} sabit kayma hızında yapılan aşınma testlerinin sonucunda elde edilen sürtünme katsayıları verilmektedir.



Şekil 6.10. Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının sürtünme katsayıları: a) 10 N, b) 20 N ve c) 30 N.

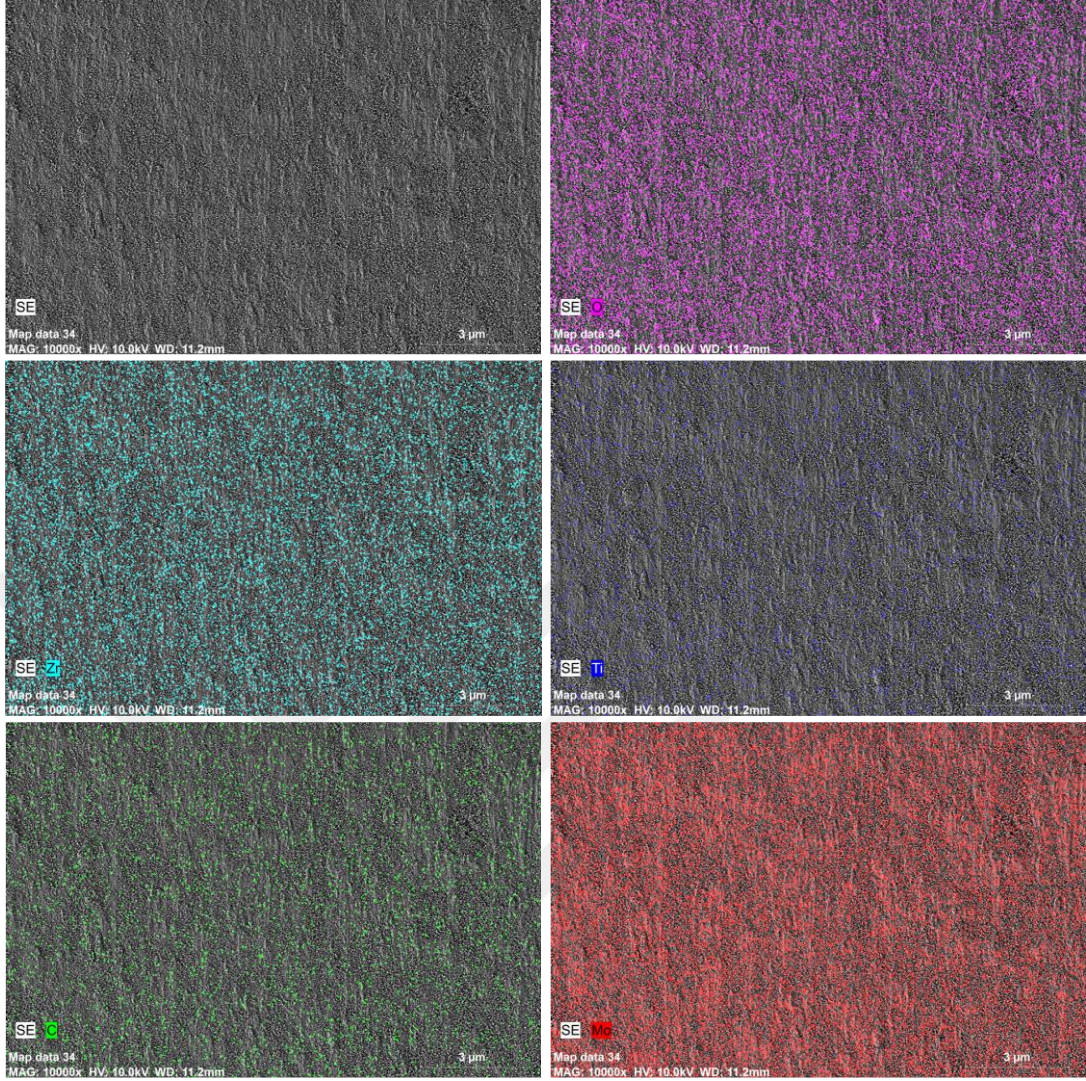
Şekil 6.10’da verilen sürtünme katsayıları incelendiğinde, yine Şekil 6.8’de verilen sertlik sonuçları ile uyumlu oldukları görülebilmektedir. Özellikle 10 N yük uygulanan ve sertliği en yüksek olan %0.55 Ti içeren TZM alaşımında, 1600 m kayma mesafesinde

sürtünme katsayısında hızlı bir artış olduğu gözlenmektedir. Fakat aynı numuneden elde edilen ağırlık kaybı ve aşınma oranı grafiklerinde bu sonucu destekleyen bir değişim olmadığı da görülmektedir. Sürtünme katsayısındaki bu ani yükselişin nedeninin, kuru kayma şartlarında pin/disk sürtünmesi sırasında oluşan ve oldukça sert olan mikro talaşların yüzeye saplanarak sürtünme katsayısını arttırdığı düşünülmektedir [27]. 20 N yük uygulanan TZM alaşımların sürtünme katsayıları incelendiğinde ise, 1200 m kayma mesafesinden itibaren ani bir artışın olduğu gözlenmektedir. Burada da yine aynı durumun oluşması söz konusudur. Özellikle 30 N yük uygulanan numunelerde ise sonuçların daha karmaşık bir hal aldığı net olarak görülebilmektedir. Sürtünme katsayısı ile ağırlık kaybı sonuçları karşılaştırıldıklarında, sonuçların birbirini tam olarak desteklemediği anlaşılmaktadır. Genellikle metal ve alaşımlarının aşınmaya karşı direncini belirleyen ana faktör sertliktir. Bu çok bilinen temel metalürjik bir kuraldır. Bu çalışma kapsamında yapılan aşınma testlerinde 10 N, 20 N ve 30 N yüklerde elde edilen sonuçlar bu kuralı doğrulamaktadır. Fakat sürtünme katsayıları göz önüne alındığında, elde edilen sonuçlarla istenilen ölçüde bir düzen söz konusu olmamaktadır. 10 N ve 20 N gibi düşük sayılabilen yüklerde elde edilen sonuçlar bu metalürjik kural ile uyumlu iken, tribolojik sisteme etkiyen yük arttırıldığında (örneğin 30 N gibi), beklenen sürtünme katsayısı değerleri elde edilememektedir. Daha önce yapılan bazı çalışmalarda da düşük yüklerde geçerli olan bu olay desteklenmektedir [44]. Uygulanan yük arttırıldığında ise, sürtünme katsayısı olarak elde edilen değerlerde tutarsızlar görülmektedir. Bu nedenle, özellik arttırılmış yüklerde aşınma katsayısının, metal ve alaşımlarının sertliği ile ilişkili olmadığı düşünülmektedir. Bu anlamda, metal ve alaşımlarının sürtünme katsayısında sertliğin değil, alaşımın ısıya nasıl tepki verdiği ön plana çıkmaktadır. Çünkü tribolojik sisteme uygulanan yük arttırıldıkça, pin/disk temas yüzeyinde sürtünmeden kaynaklanan sıcaklık da artmaktadır. Pin/disk temas yüzeyinde meydana gelen sıcaklık artışı nedeniyle sürtünme katsayısı değerleri tahmin edilemeyecek şekilde farklılıklar sergilemektedir. Şekil 6.11’de farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımların aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.11. Farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının aşınma yüzey SEM görüntüleri.

Şekil 6.11’de verilen ve farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, titanyum miktarının artması ile numenin aşınmaya karşı gösterdiği direncin arttığı ve aşınma miktarının azaldığı görülmektedir. Özellikle, en yüksek ağırlık kaybının ve aşınma oranının elde edildiği 30 N yük uygulanan %0,40 Ti içeren grupta, plastik deformasyon ve adhezif aşınma meydana geldiği anlaşılmaktadır. Aşınma testleri sonunda en fazla ağırlık kaybı, 30 N yük uygulanan yapısında %0,40 titanyum bulduran numunede elde edilmiştir. Bu sonuç, aşınma yüzeyi SEM görüntüleri ile de desteklenmektedir.



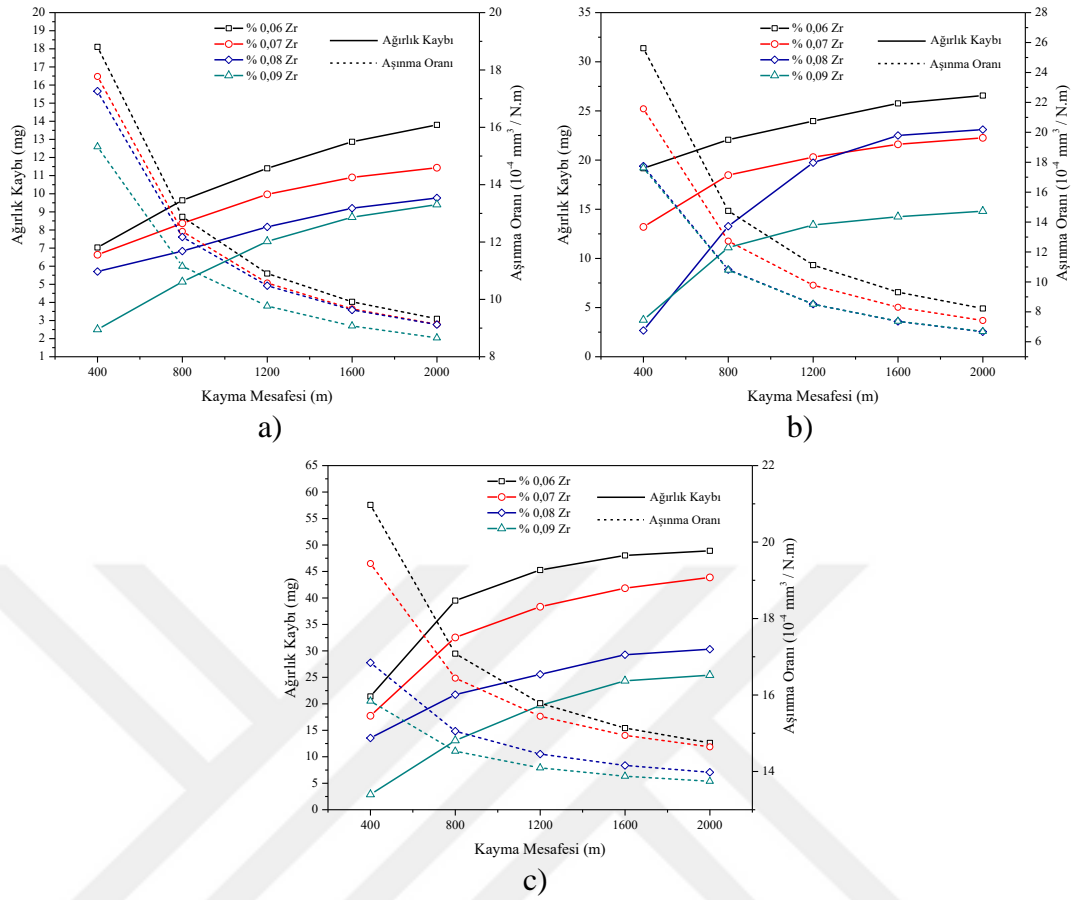
Şekil 6.12. %0,55 Ti bulunduran TZM alaşımının 2000 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonuçları.

Şekil 6.12’de verilen farklı miktarlarda Ti içeren TZM alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, kayma yönüne paralel olarak çok belirgin olmayan çiziklerin olduğu anlaşılmaktadır. Bu çizikler, aşınma testi sırasında aşındırılan numune yüzeyleri ve aşındırın disk yüzeylerinden kopan parçacıklardan kaynaklanmaktadır. Sürtünmenin de etkisi ile alaşımın yüzeyinde meydana gelen ve plastik deformasyon, kayma mesafesinin artmasıyla alaşım ve disk ara yüzeylerinde kalan parçalardan dolayı olmaktadır. Bu sebeple çalışmada, aşınma yüzeyi SEM görüntülerinde adhezif aşınma mekanizmasının baskın olduğu görülmektedir. Ayrıca kayma mesafesi arttıkça, alaşım ile disk arasında sıcaklık artmaktadır. Bu artan sıcaklık ile birlikte alaşımın yüzeyinde oksit film tabakası oluşmaktadır. Bu film

tabakası katı yağlayıcı etkisi göstermekte ve daha önce yapılan çalışmalarda ifade edilmektedir [45]. Aşınmada sırasında yüzeyden kopan oksit parçaları alaşımın yüzeyinde plastik deformasyona sebep olmaktadır. Titanyum miktarının aşınmaya etkisi incelendiğinde, Ti miktarı arttığında numunelerin aşınmaya karşı gösterdiği direncin arttığı ve aşınma miktarının azaldığı görülmektedir. Sertlik değerleri ile karşılaştırıldığında en yüksek ağırlık kaybının ve aşınma oranının elde edildiği 30 N yük uygulanan %0,40 Ti içeren grupta, plastik deformasyon ve adhezif aşınma meydana geldiği görülmektedir. Sertlikteki artışa oranla aşınma miktarındaki azalma daha önceki yapılan çalışmalarda görülmektedir [44].

6.4.2. TZM Alaşımında Zirkonyum Miktarının Aşınma Davranışları Üzerindeki Etkileri

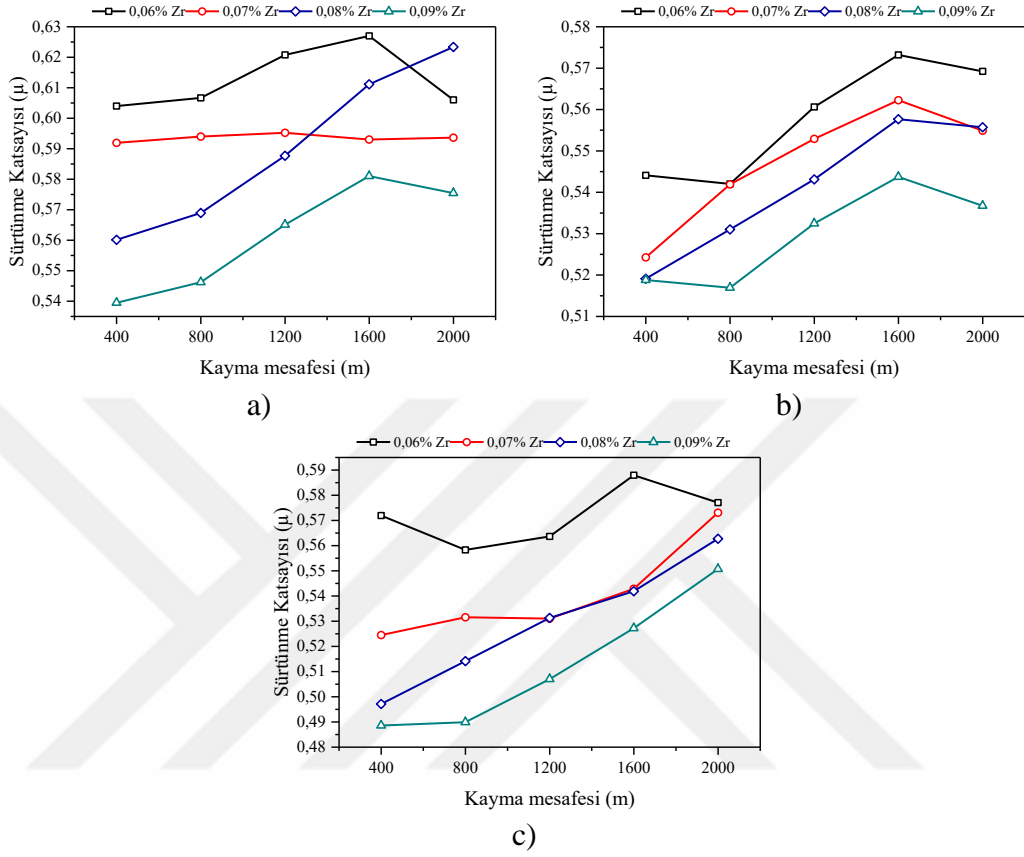
Farklı miktarlarda Zr içeren TZM alaşımlarının 10, 20 ve 30 N yükler altında 400, 800, 1200, 1600 ve 2000 m kayma mesafelerinde 1 ms^{-1} sabit kayma hızında yapılan aşınma testlerinin sonucunda elde edilen ağırlık kayıpları ve aşınma oranları Şekil 6.11'de verilmektedir.



Şekil 6.13. Farklı miktarlarda Zr içeren TZM alaşımının aşınma ağırlık kaybı ve aşınma oranları a) 10 N, a) 20 N ve c) 30 N.

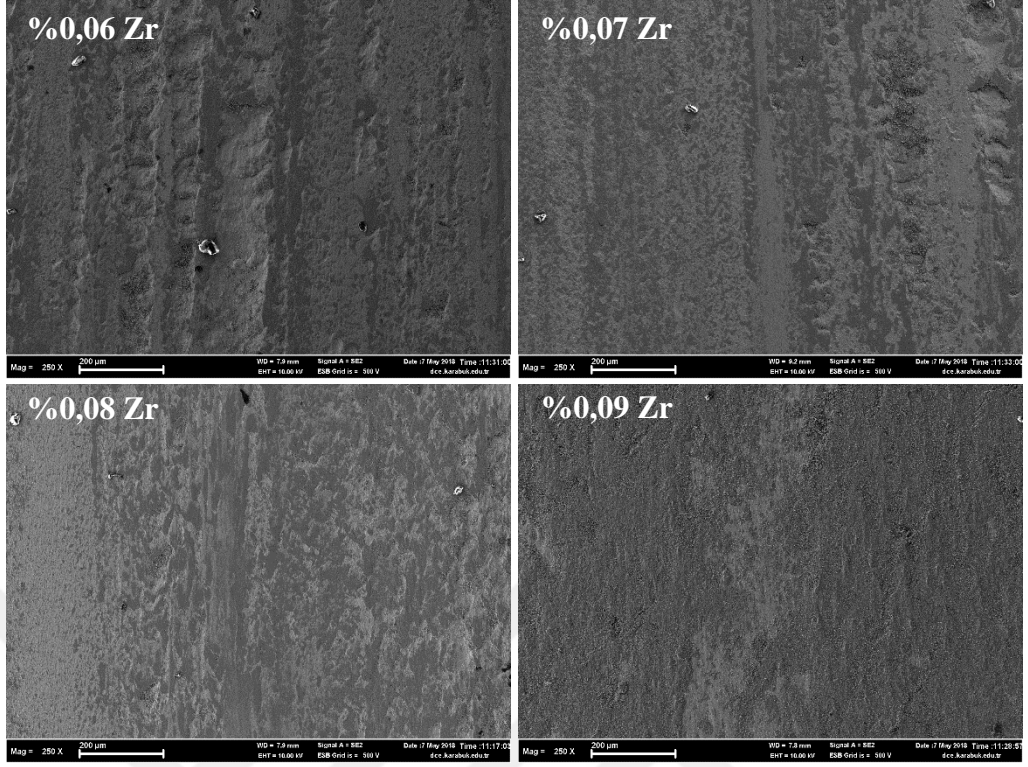
Aşınma testleri sonucunda ağırlık kaybı, kayma mesafesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Aşınma oranı da kayma mesafesi arttıkça artmaktadır. En fazla ağırlık kaybı, 30 N yük uygulanan numunelerde gerçekleşmiştir. 20 N yük altında test edilen alaşımların ağırlık kaybı sonuçlarında, 800 m kayma mesafesinden itibaren yapısında %0,08 ve %0,09 Zr bulunduran numunelerin ağırlık kaybında belirgin bir artış olduğu, ağırlık kaybı grafiklerinden görülebilmektedir. Bu durum, kayma mesafesi arttıkça aşındırıcı disk ve numune arasında meydana gelen sürtünme ve temas yüzeylerinde oluşan ısının etkisiyle, numune yüzeyinden kopan parçacıkların yüzeye tekrar yapışmasından kaynaklanmaktadır. Zr ilave edilen TZM alaşımlarında da ağırlık kaybı, yapısında en az zirkonyum bulunan %0,06 Zr grubunda olurken, en düşük ağırlık kaybı %0,09 Zr ilave edilen TZM alaşımında elde edilmiştir. Ağırlık kayıpları sürtünme katsayıları ile karşılaştırıldığında, birbirlerini destekledikleri görülmektedir. Aşınma deneylerinde numuneden kopan parçacıklar, numunenin yüzeyine yapışmakta ve sürtünme katsayılarında artışa neden olmaktadır. Kimyasal

bileşiminde farklı miktarda Zr bulundurulmuş mekanik alaşımlanmış TZM alaşımlarının sürtünme katsayıları, Şekil 6.12’de verilmektedir.

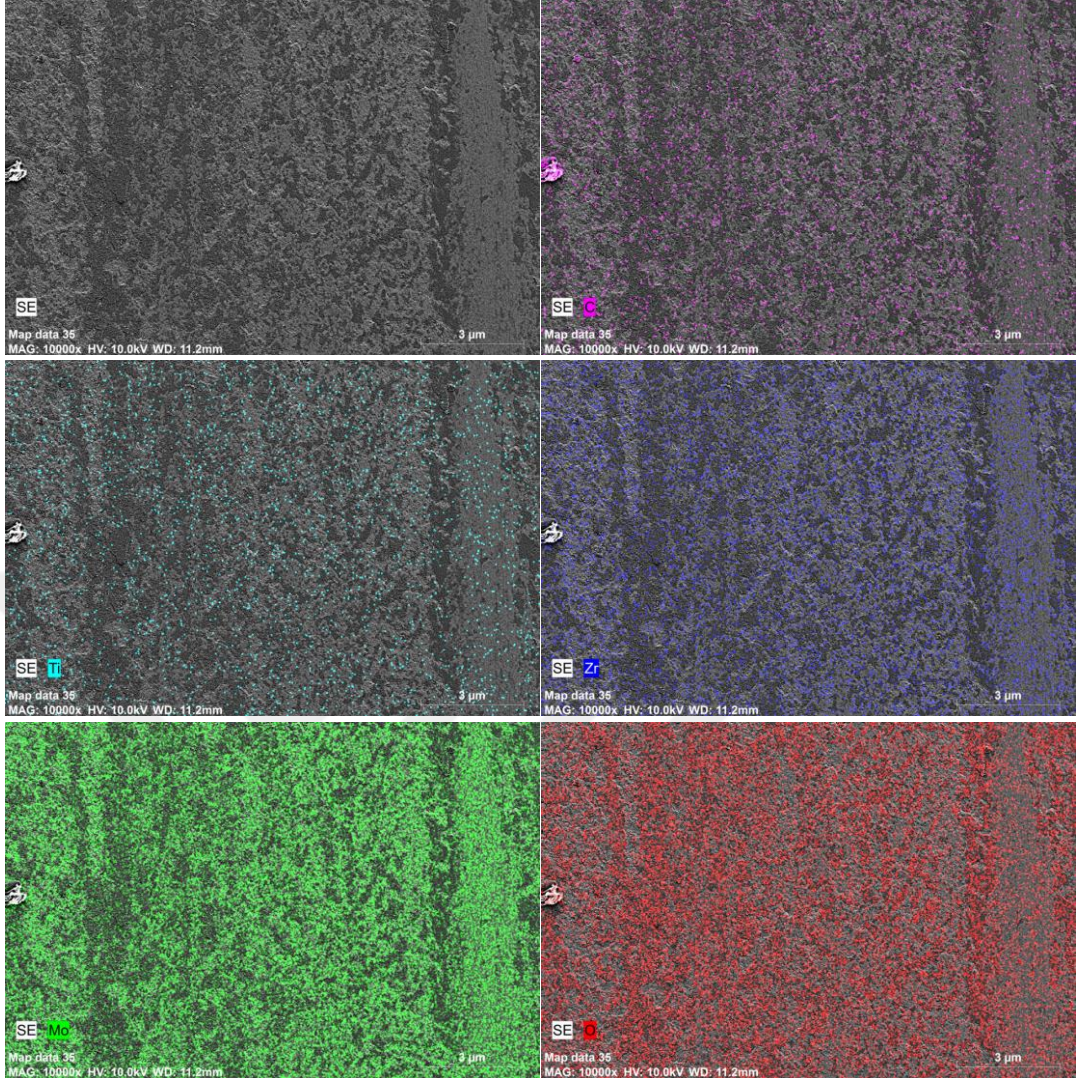


Şekil 6.14. Farklı Zr miktarlarına sahip mekanik alaşımlanmış TZM alaşımlarının sürtünme katsayıları: a) 10 N, b) 20 N ve c) 30 N.

Farklı miktarlarda Zr içeren TZM alaşımlarının sürtünme katsayıları incelendiğinde, 10, 20 ve 30 N yük altında en yüksek sürtünme katsayısı, %0,06 Zr içeren alaşımda elde edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı ise, %0,09 Zr (en fazla zirkonyum ilave edilen) içeren alaşımda elde edilmiştir. Ağırlık kaybı ile sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçlar birbirlerini destekler niteliktedir. Farklı miktarlarda Zr ilave edilen TZM alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri, Şekil 6.15’de ve aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonucu ise Şekil 6.16’da verilmektedir.



Şekil 6.15. Farklı Zr miktarlarına sahip TZM alaşımının farklı yüklerdeki aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.



Şekil 6.16. 120 dak mekanik öğütülen %0,09 Zr bulunduran TZM alaşımının 2000 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonuçları.

Şekil 6.15’de verilen aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, kayma yönleri belirgin şekilde gözükmemektedir. Alaşımların yüzeylerinde tepeler ve çukurlar şeklinde aşınma meydana geldiği görülmektedir. Aşınma testleri sırasında açığa çıkan ısı, disk ve alaşım arasındaki sürtünmenin etkisi ile aşınan yüzeylerde plastik deformasyon meydana geldiğini göstermektedir. Aşınma sırasında kayma mesafesi artışı ile aşındırılan alaşım ve disk arasında biriken parçaların sürekli olarak parçaya yapışması ile yüzeylerde adhesif aşınmanın olduğunu göstermektedir. Ayrıca kayma mesafesi artışı ile aşındırılan alaşım ve disk arasındaki yüzeyde sıcaklık artışına sebep olmaktadır. Bu sıcaklık artışına bağlı olarak oluşan oksit film tabakası katı yağlayıcı olarak görev yapmaktadır. Farklı miktarlarda Zr ilave edilen TZM

alaşımının aşınma yüzeyi SEM yüzey görüntüleri incelendiğinde, alaşımın bileşimindeki zirkonyum miktarı arttıkça, aşınmaya karşı gösterdiği direnç de artarak, aşınma miktarı azalmaktadır. 30N yük altında %0,06 Zr içeren alaşımın aşınma yüzeyi SEM görüntüsünde yapıda plastik deformasyonun olduğu görülmektedir. Aşınma testleri sonuçlarına göre en fazla ağırlık kaybı 30N yük altında %0,06 Zr içeren alaşımda elde edilmiştir.



BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

“Toz metalurjisi ile üretilen TZM alaşımının karakterizasyonu ve aşınma performansının incelenmesi” başlıklı bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Sertlik ölçüm sonuçlarına göre; 1300 °C sıcaklıkta 4 saat boyunca sinterlenen TZM alaşımlarının Ti gruplarında en düşük sertlik değeri (284 HV) %0,40 Ti içeren alaşımda, en yüksek sertlik değeri (353 HV) ise %0,55 Ti içeren alaşımda ölçülmüştür. Alaşımın yapısında Ti miktarı arttıkça alaşımın sertliği artmaktadır.
- TZM alaşımlarının Zr gruplarında en düşük sertlik değeri (284 HV) %0,06 Zr içeren alaşımda, en yüksek sertlik değeri (370 HV) ise %0,09 Zr içeren alaşımda ölçülmüştür. Ti gruplarında olduğu gibi Zr gruplarında da ilave edilen alaşım miktarı arttıkça sertlik artmaktadır.
- 120 dak mekanik alaşımlar üretilen TZM alaşımlarının yoğunluk sonuçlarına göre; Ti gruplarında en düşük yoğunluk değeri (9,228 g/cm³) %0,55 Ti içeren alaşımda, en yüksek yoğunluk değeri (9,347 g/cm³) ise %0,40 Ti içeren alaşımda ölçülmüştür. Alaşımın yapısında Ti miktarı arttıkça alaşımın yoğunluğu azalmaktadır.
- TZM alaşımlarının Zr gruplarında ise en düşük yoğunluk değeri (9,174 g/cm³) %0,09 Zr içeren alaşımda, en yüksek yoğunluk değeri (9,351 g/cm³) ise %0,06 Zr içeren alaşımda ölçülmüştür. Ti gruplarında olduğu gibi Zr gruplarında da ilave edilen alaşım miktarı arttıkça yoğunluğun azalmaktadır.

- Mekanik alaşımlanmış TZM alaşımlarında yapılan aşınma testleri sonucunda, yük miktarı arttıka ağırlık kaybı artmaktadır. Her iki alaşımda en yüksek ağırlık kaybının 30 N yük uygulanan numunelerde grlmştir.
- Farklı miktarlarda Ti ve Zr içeren TZM alaşımlarının aşınma testleri sonunda alaşımların sertlikleri arttıka, elde edilen ağırlık kaybı ve aşınma oranları azalmaktadır.
- TZM alaşımlarının Ti gruplarında sürtünme katsayıları incelendiğinde 10 ve 20N yük uygulanan alaşımların aşınmaya karşı direncini belirleyen ana faktör sertlik olduğu görülürken 30N yük uygulanan numunelerde, alaşımların ısıya verdiği tepki ve Pin/disk temas yüzeyinde meydana gelen sıcaklık artışı nedeniyle sürtünme katsayısı değerleri tahmin edilemeyecek şekilde farklılıklar görülmektedir.
- Farklı miktarlarda Zr içeren TZM alaşımlarının sürtünme katsayıları incelendiğinde, 10, 20 ve 30 N yük altında en yüksek sürtünme katsayısı, %0,06 Zr içeren alaşımda elde edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı ise, %0,09 Zr (en fazla zirkonyum ilave edilen) içeren alaşımda elde edilmiştir.
- Aşınma yüzeyi SEM görüntüleri ve EDS (mapping) analizleri incelendiğinde oluşan aşınma mekanizmalarının hem adhesif hem de abrasif aşınma mekanizmasının olduğu görülmektedir.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler;

- MA/MÖ işlemleri sırasında farklı öğütme süreleri kullanılarak toz boyutunun etkisi incelenebilir.
- MA/MÖ işleminde kullanılan bilye toz oranı, değiştirilerek bilye toz oranının mekanik özelliklere etkisi incelenebilir.
- MA/MÖ işlemleri sırasında kullanılan farklı işlem kontrol kimyasalları kullanılarak aglomerasyona etkisi incelenebilir.
- Farklı sinterleme süresi ve sinterleme sıcaklıkları kullanılarak sertlik ve yoğunluğa olan etkisi incelenebilir. Farklı sertlik ve yoğunlukta üretilen alaşımların aşınma performansı incelenebilir.
- İlave alaşım elementleri eklenerek alaşımın oksidasyona olan etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. International ASM, “Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials”, *ASM International*, HandBook Vol. 2 (1992).
2. Ozan, U., Çalığülü, M., Taşkın, “Sıcak Presleme Yöntemiyle imal edilmiş SiC Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Difüzyon Kaynağında Sıcaklığın Birleşme Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi” *11. Denizli Malzeme Sempozyumu*, 233-236 (2006).
3. Sharma, I., Chakraborty, S. and Suri A., “Preparation Of TZM Alloy By Aluminothermic Smelting And Its Characterization”, *J Alloys*, 393(1-2):122-128 (2005).
4. Öveçoğlu, L. M., “Toz Metalurjisi:Tarihsel Gelişim,Üretim Aşamaları ve Son Eğilimler”, *9.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi* (1997).
5. German, R. M., “Powder Metallurgy Science”, *Metal Powder Industries Federation*, New Jersey, (1994).
6. Sarıtaş, S., Doğan, C., “Metal Powder Production By Centrifugal Atomization”, *Int. J. Powder Metallurgy*, 419-427 (1994).
7. Wu, G. Q., Huang, Z. and Ruan, Z. J., “In Situ Hot-Stage Observations of Structural Transformation in a Laser Surface-Melted Tial İntermetallic Alloy”, *Materials Characterization*, 52:81-84 (2004).
8. Özgün, Ö., “Toz Metalurjisi İle Üretilen Alaşımli Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2007).
9. Çiğdem, M., “İmal Usulleri”, *Çağlayan Kitapevi*, İstanbul (2006).
10. International ASM, “Powder Metallurgy”, *ASM International* (1998).
11. Sarıtaş, S., “Makine Müh. El Kitabı”, *MMO*, Ankara (1994).
12. Lu, L., Lai, M., O. and Ng, C. W., “Enhanced Mechanical Properties of An Al Based Metal Matrix Composite Prepared Using Mechanical Alloying”, *Mater. Sci. Eng. A.*, 2:203-211 (1998).
13. Cambroner, C. G., Sanchez, E., Ruiz-Romen, J. M. and Ruiz-prieto, T. M., “Mechanical Characteizastion Of AA7015 Aluminium Alloy Reinforced With Ceramics”, *Journal of Materials Processing Technology*, 378-383 (2003).

14. Turan, İ., “Toz Metalurjisi İle Üretilen Demir Esaslı Yapısal Parçalar İçerisine Katılan B Ve NiB İlavelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2005).
15. Gozzi, M. F., Radovanovic, E., Yoshida, I. P., “Si₃N₄/SiC Nanocomposite Powder From A Pre-ceramic Polymeric Network Based On Poly (Methylsilane) As the Sic Precursor”, *Materials Research*, 4: 13-17 (2001).
16. Suryanarayana, C., “Mechanical Alloying and Milling”, *Progress in materials science*, 46 (1): 1-184 (2001).
17. Lewandowski, J. J., “Fracture and fatigue of particulate MMCs, in: T.W. Clyne (Ed.), *Comprehensive Composite Materials, Metal Matrix Composites*”, *Elsevier*, 3:51-187 (2000).
18. Evans, C., “Green Strength of Compacted Metal Powders”, *Pyron Corporation*, 288-289 (1993).
19. German, R. M., Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, N., “Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Ankara (2007).
20. Ersümer, A., “Toz metalurjisi sert metal sinterleme”, *İstanbul Teknik Üniversite Matbaası*, İstanbul (1970).
21. Kurt, A., “Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerinin Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (1992).
22. Baksan, B., Gürler, R., “Toz Metalurjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması”, *Osmangazi Üniversitesi Metalurji Enstitüsü*, Eskişehir (2003).
23. Özdemirler, D., “Niyobyum (Nb) İle Güçlendirilmiş Demir (Fe) Matrisli Alaşımların Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2017)
24. Söyler, M., “Toz Metalurjisi Uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, Sakarya (2007).
25. Sarıtaş, M., Türker, M. ve Durlu, N., “Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, *Türk Toz Metalurjisi Yayınları*, Ankara (2007).
26. Ay, H., “Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen AA7075 Alüminyum Alaşımına Ti ve B₄c İlavesinin Aşınma Davranışı Üzerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2014).

27. Sağlam, İ., “Mekanik Alaşım Yolu İle Üretilen Alüminyum Bazlı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi”, Lisans Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Metal Eğitimi Bölümü Döküm Eğitimi Anabilim Dalı**, Zonguldak (2006).
28. Çelik, H., “Kaynak Edilebilen Kobalt Ve Demir Esaslı Alaşımalarının Yüksek Sıcaklıktaki Aşınma Davranışları”, Doktora Tezi, **İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (1991).
29. Richardson, E., “The wear of metal shoes in agricultural soils”, Ph. D. Thesis, **Great Britain University Press**, London (1969).
30. Date, S. W. ve Malkin, S., “Effect of Grid Size on Abrasion With Contact Abresives”, **Wear**, (40): 252-264, (1976).
31. Gürleyik, M. Y., “Soğuk deformasyonla aşınma direnci artırılabilir”, **2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, Ankara (1986).
32. Rabinowicz, E., “Friction and Wear of Materials”, **John Wilwy and Sons**, USA (1995).
33. Koç, R., “Vagon Boji Bagalarına Alternatif Polimer Malzemelerin Deneysel İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya (2004).
34. Sevim, İ., “Çeliklerin Abrasif Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi”, Doktora Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (1998).
35. Çetin, M., “Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2005).
36. Işık, E., “SiC Takviyeli Al-12Si Matrisli Kompozitin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2014).
37. Afacan, S., “Mevcut Aşınma Deney Düzeneginin Denenip Optimize Edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir (1997).
38. Ertan, G., “İş Makinelerinde Aşınma Ömrü Kriterlerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (1999).
39. Majumdar, S., Sharma, I., Raveendra, S., Samajdar, I., Bhargava P. and Tewari, R., “A Study on Preparation of Mo-0.6Ti-0.2Zr-0.02C Alloy by Mechanical Alloying and Hot İsostatic Pressing, and Its Characterization”, **Mater Chem Phys**, 113-562 (2009).

40. Bakunov, V. S., “High temperature creep of refractory ceramics, distinctive features of the process”, *Refract Ind Ceram*, 392-394 (1994).
41. Ahmadi, E., Malekzadeh, M. and Sadrnezhad, S., “Preparation of Nanostructured High-Temperature TZM Alloy by Mechanical Alloying”, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, (29):141–145 (2011).
42. Yıldırım, M., “Mekanik Alaşım Yöntemi İle AA7075-Karbon Nanotüp Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Üretimi Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2016).
43. Danışman, B., “TZM Alaşımının Spark Plazma Sinterleme (SPS) Yöntemi İle Üretimi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2016).
44. Tekeli, S., Güral, A., and Özyürek, D., “Microstructure and dry sliding wear properties of 3Si–2Ni and 3Si–2Mn powder metallurgy steels with different graphite content”, *Journal of Engineering Tribology*, 8 (225): 814-820 (2011).
45. Sağlam, İ., Özyürek, D., and Çetinkaya, K., “Effect of ageing treatment on wear properties and electrical conductivity of Cu-Cr-Zr alloy”, *Bulletin of Materials Science*, 34(7): 1465–1470 (2011).
46. Kalaycıoğlu, A. S., “SiC Tane Katkılı Alüminyum Kompozitlerin Toz Metalurjisi ile Üretimi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi*, İzmir (2010).
47. International ASM, “Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials”, *ASM International*, HandBook Vol 2, (1992).
48. Yılmaz, N. F., “Production of Metal Powders by Gas Atomization”, Yüksek Lisans Tezi, *Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1996).
49. Ogurtsow, S. V., “State and Prospects of The Development of Industrial Methods for The Pproduction of Metallic Titanium, Titanium and Titanium Alloys”, *Plenum Press*, New York (1976).
50. Matik, U., “Akımsız Nikel Kaplamalarda Isıl İşlemin Sertlik ve Aşınma Özelliklerine Etkisi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2010).
51. Yılmaz, M., “Alüminyum Alaşımının Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (1996).

ÖZGEÇMİŞ

Haktan SIRALI 1991 yılında Tekirdağ ilinde doğup, ilkokul öğrenimini Şanlıurfa Özel Çağlayan İlköğretim (1998-2001), Şanlıurfa Bahçelievler İlköğretim (2001-2002), Ordu Utku Acun İlköğretim (2002-2003), Ordu Altıncıdık İlköğretim (2003-2005) okullarında başarıyla tamamlamıştır. Lise öğrenimini Ordu Başöğretmen Anadolu Lisesinde (2005-2009) başarıyla tamamlamıştır. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümüne başlayıp 2016 yılında mezun oldu. 2016 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim dalında başladığı yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : İzmit Sanayii Sitesi Sanayi Mah. 1. Cad. 201 Blok No: 2 PK:41040
İzmit/KOCAELİ

Tel : 0 (536) 279 81 41

E-posta : haktan.sirali@gmail.com