



**GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN
AZ91 TOZUNUN SICAK PRESLENMESİ VE
AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Kağan Hazar ŞİMŞİR

**2020
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa BOZ**

**GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN AZ91 TOZUNUN SICAK
PRESLENMESİ VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Kağan Hazar ŞİMŞİR

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa BOZ**

**KARABÜK
Temmuz 2020**

Kağan Hazar ŞİMŞİR tarafından hazırlanan “GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN AZ91 TOZUNUN SICAK PRESLENMESİ VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

.....

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 24/07/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Yunus TÜREN (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet AKKAŞ (KÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“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.”

Kağan Hazar ŞİMŞİR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN AZ91 TOZUNUN SICAK PRESLENMESİ VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Kağan Hazar ŞİMŞİR

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Temmuz 2020, 134 sayfa

Bu çalışmada, ticari olarak en çok kullanılan AZ91 magnezyum alaşım tozunun (-325 mesh) sıcak preslenebilirliği ve üretilen malzemelerin mekanik ve mikroyapısı üzerine sıcak presleme parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, ticari olarak temin edilen AZ91 tozu 500-600 °C sıcaklıklar arasında ve 25-45 MPa basınç değerlerinde sıcak preslenmiştir. Sıcak presleme sonrasında numunelerin bağıl yoğunlukları hesaplanmış, X-Işını Difraktometresi (XRD) ve X-Işını Flüoresans (XRF) ile mikroyapıları incelenmiştir. Üretilen numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile, numunelerin yüzeylerinden mikro ve makro sertlik değerleri alınmış ve sürtünme-aşınma özelliklerini belirlemek amacıyla da tüm numuneler sırasıyla 0,5-1-1,5 m/s kayma hızlarında, 10-25-40 N yükler altında ve 500-1500-3000 metre mesafelerde pin-on-disk aşınma cihazıyla aşınma karakteristikleri incelenmiştir. Buna ilaveten sürtünme sonucu meydana gelen aşınma ürünlerinin

SEM görüntüleri alınmış ve bu ürünlerin parçacık boyut analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda belirlenen değer aralıklarındaki basınç ve sıcaklık değişiminin mikro ve makro sertlik üzerine az etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanısıra mikroyapılar incelendiğinde sıcaklık ve basınç artışlarının malzemelerdeki gözenekliliği giderdiği tespit edilmiştir.

600 °C'de yapılan sıcak presleme işlemi sırasında AZ91 alaşımında kısmen erime meydana geldiği gözlenmiş ve dolayısı ile bu parametre çalışmadan çıkarılmıştır. XRD ve XRF analizleri sonucunda mikroyapının α (Mg'ca zengin) ve β ($Mg_{17}Al_{12}$) fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Sıcaklık ve basıncın artması ile α fazının arttığı ve β fazının kısmen azaldığı görülmüştür.

Sıcak presleme ile üretilen malzemelerin artan presleme basıncı ve sıcaklığıyla aşınma miktarlarının azaldığı belirlenmiştir.

Sürtünme deneylerine tabii tutulan numunelerden alınan debrislerin SEM görüntüleri alınmış ve bu debrislerin boyut analizleri yapılmıştır.

Diğer taraftan aşınma mesafesinin artmasına bağlı olarak aşınma miktarı doğrusal olarak artarken, kayma hızının artması ile aşınma miktarında azalma olduğu ve normal kuvvetin artması ile de aşınma miktarlarının azaldığı görüşmüştür. Ayrıca aşınma ile oluşan partiküllerin SEM görüntülerinden ve toz boyut analizlerinden sıcak presleme basınç ve sıcaklığının artmasına bağlı olarak toz boyutlarının küçüldüğü görülmüştür. Yapılan toz boyut analizleri sonucunda en düşük partikül boyutları 45 MPa basınç ile preslenen numunelerde görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Toz metalürjisi, magnezyum alaşımları, sıcak presleme, triboloji.

Bilim Kodu : 91528

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

HOT PRESSING OF AZ91 POWDER PRODUCED BY GAS ATOMIZATION METHOD AND INVESTIGATION OF WEAR PROPERTIES

Kağan Hazar ŞİMŞİR

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Manufacturing Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa BOZ

July 2020, 134 pages

In this study, the effects of hot pressing parameters on the hot pressability of the commercially used AZ91 magnesium alloy powder (-325 mesh) and the mechanical and microstructure of the materials produced were investigated. For this purpose, commercially available AZ91 powder is hot pressed at temperatures between 500-600 °C and at pressures of 25-45 MPa. After hot pressing, the relative densities of the samples were calculated and their microstructures were examined by X-Ray Diffractometer (XRD) and x-Ray Fluorescence (XRF). In order to determine the mechanical properties of the produced samples, micro and macro hardness values were taken from the surfaces of the samples and all samples were taken under the loads of 10-25-40 N at shear rates of 0.5-1-1.5 m / s respectively to determine the friction-wear properties and wear characteristics were investigated with pin-on-disc wear device at distances of 500-1500-3000 meters. In addition, SEM images of

friction products resulting from friction were taken and particle size analyzes of these products were performed.

As a result of the study, it was observed that the pressure and temperature change in the determined value ranges had little effect on micro and macro hardness. In addition, when microstructures are examined, it was found that temperature and pressure increases eliminate porosity in materials.

During the hot pressing process at 600 ° C, it was observed that partly melting occurred in the alloy AZ91 and therefore this parameter was excluded. As a result of XRD and XRF analysis, it is determined that the microstructure consists of α (Mg rich) and β ($Mg_{17}Al_{12}$) phases. It was observed that α phase increased and β phase decreased partially with increasing temperature and pressure.

It has been determined that the amount of wear decreases with increasing pressing pressure and temperature of the materials produced by hot pressing.

SEM images of debris taken from samples subjected to friction tests were taken and dimensional analyzes of these debris were made.

On the other hand, while the amount of wear increased linearly due to the increase of wear distance, it was discussed that the amount of wear decreased with the increase in sliding speed and the amount of wear decreased with the increase of normal force. In addition, it was observed that the powder sizes decreased due to the increase in hot pressing pressure and temperature from SEM images and powder size analysis of the particles formed by abrasion. As a result of the powder size analysis, the lowest particle sizes were seen in samples pressed with a pressure of 45 MPa.

Key Word : Powder metallurgy, magnesium alloys, hot pressing, tribology.

Science Code : 91528

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu tez alışmasında ilk olarak her zaman yol ve anlayış gösteren saygıdeğer Prof. Dr. Mustafa BOZ hocama, kıymetli jüri hocalarım Doç. Dr. Yunus TÜREN ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet AKKAŞ’a, daima yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Halil DEMİR hocama, fikirleriyle ve desteğiyle benim yanımda olan arkadaşım Atakan Oğuz OCAK’a ve son olarak da maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teőekkürü bir borç bilirim.

Yapılmış olan alışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Koordinatörlüğü tarafından oluşturulan KBÜ-BAP-17-YL-193 no’lu proje desteği ile gerçekleştirilmiştir. Verdikleri desteklerden dolayı Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Koordinatörlüğü’ne teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
BÖLÜM 3	12
TOZ METALURJİSİ	12
3.1. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	13
3.1.1. Mekanik Üretim Yöntemleri.....	14
3.1.1.1. Talaşlı Üretim Yöntemi	14
3.1.1.2. Öğütme.....	14
3.1.1.3. Mekanik Alaşım Yöntemi	15
3.1.2. Kimyasal Üretim Yöntemleri	16
3.1.3. Elektroliz ile Üretim Yöntemi	17
3.1.4. Atomizasyon ile Üretim Yöntemleri	18
3.1.4.1. Döner Disk ile Atomizasyon Yöntemi.....	18
3.1.4.2. Döner Elektrot ile Atomizasyon Yöntemi	19
3.1.4.3. Su Atomizasyonu Yöntemi	19

	<u>Sayfa</u>
3.1.4.4. Gaz Atomizasyonu Yöntemi.....	21
3.2. TOZ METALURJİSİ İLE PARÇA İMALATI.....	25
3.2.1. Karıştırma ve Harmanlama.....	25
3.2.2. Tozların Şekillendirilmesi.....	26
3.2.2.1. Sıcak ve Soğuk Presleme.....	26
3.2.2.2. Sıcak ve Soğuk İzostatik Presleme.....	29
3.2.2.3. Ekstrüzyon.....	31
3.2.3. Tozların Sinterlenmesi.....	32
3.2.3.1. Katı Faz Sinterleme.....	35
3.2.3.2. Sıvı Faz Sinterleme.....	36
BÖLÜM 4.....	38
MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	38
4.1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.....	39
4.2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	41
4.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI.....	41
4.3.1. AZ91 Magnezyum Alaşımının Özellikleri.....	42
4.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ.....	44
4.4.1. Alüminyumun Etkisi.....	45
4.4.2. Demirin Etkisi.....	46
4.4.3. Manganın Etkisi.....	46
4.4.4. Çinkonun Etkisi.....	47
4.4.5. Zirkonyumun Etkisi.....	47
4.4.6. Nadir Toprak Elementlerinin Etkisi.....	47
BÖLÜM 5.....	48
TRİBOLOJİ.....	48
5.1. SÜRTÜNME.....	48
5.2. AŞINMA.....	49
5.2.1. Adhesiv Aşınma.....	49
5.2.2. Abrasif Aşınma.....	51

	<u>Sayfa</u>
5.2.3. Erozyon Aşınma	52
5.2.4. Yorulma Aşınma.....	53
5.2.5. Korozyon Aşınma.....	53
5.3. YAĞLAYICI MADDELER.....	54
5.3.1. Sıvı Yağlar	54
5.3.2. Gres Yağlar	54
5.3.3. Katı Yağlar.....	54
5.3.4. Gazlar.....	55
5.4. AŞINMANIN EKONOMİK ÖNEMİ	55
5.5. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	56
5.6. AŞINMA DENEY CİHAZLARI	57
5.6.1. Pim-Disk Cihazı	57
5.6.2. Levha-Kayış Cihazı	57
5.6.3. Dört Bilya Düzeneği	58
5.6.4. Çapraz Silindir Deney Cihazı	59
5.6.5. Top Krater Testi.....	60
5.7. AŞINMA ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....	61
5.7.1. Ağırlık Farkı Metodu.....	61
5.7.2. Kalınlık Farkı Metodu	62
5.7.3. İz Değişim metodu.....	62
BÖLÜM 6	63
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	63
6.1. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI	64
6.1.1. Tozların Harmanlanması	64
6.1.2. Tozların Sıcak Preslenmesi.....	66
6.2. NUMUNELERİN KARAKTERİZASYONU	68
6.2.1. XRF ve XRD Analizi	68
6.2.2. Yoğunluk Ölçümü	69
6.2.3. Mikroyapı Görüntüleme Analizleri	69
6.2.4. Mikro ve Makro Sertlik Ölçümleri.....	71
6.3. NUMUNELERİN AŞINMA DENEYLERİ	72

6.4. NUMUNELERİN AŞINMA DENEYİ SONRASI SEM GÖRÜNTÜLERİ..	73
BÖLÜM 7	76
DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRİLMESİ	76
7.1. NUMUNELERİN XRF VE XRD ANALİZLERİ	76
7.2. NUMUNELERİN BAĞIL YOĞUNLUKLARI	80
7.3. NUMUNELERİN MİKROYAPILARININ İNCELENMESİ.....	81
7.4. NUMUNELERİN MİKRO VE MAKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	87
7.5. NUMUNELERİN AŞINMA DENEYLERİ	90
7.6. AŞINMA SONRASI YÜZEY PARTİKÜLLERİNİN SEM GÖRÜNTÜLERİ	116
BÖLÜM 8	123
GENEL SONUÇLAR	123
KAYNAKLAR	125
ÖZGEÇMİŞ	134

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Toz metalürjisindeki üretim aşamaları.....	13
Şekil 3.2. Bilyalı öğütme.....	15
Şekil 3.3. Mekanik alaşımlama	15
Şekil 3.4. Kimyasal yöntemle sünger demir tozu üretimi	16
Şekil 3.5. Elektroliz ile toz üretimi.....	17
Şekil 3.6. Döner disk ile atomizasyon yöntemi.....	18
Şekil 3.7. Döner elektrot ile atomizasyon yöntemi	19
Şekil 3.8. Su atomizasyonu yöntemi.	20
Şekil 3.9. Düşey olarak tasarlanmış gaz atomizasyon sistemi.	22
Şekil 3.10. Ligamentlerin bölünmesiyle toz oluşumu.....	23
Şekil 3.11. Gaz atomizasyon sisteminde üç safhanın şematik gösterimi.	24
Şekil 3.12. Metal tozu oluşum aşamaları.	24
Şekil 3.13. Toz karıştırma turbulası.	25
Şekil 3.14. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve tek yönlü kalıbın şematik gösterimi.....	27
Şekil 3.15. Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve çift yönlü kalıbın şematik gösterimi.....	27
Şekil 3.16. Sıcak presleme şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.17. Soğuk izostatik preslemenin şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.18. Sıcak izostatik preslemenin şematik olarak gösterimi.....	31
Şekil 3.19. Toz metaller için ekstrüzyon işlemi şeması.	32
Şekil 3.20. Sinterleme işleminin aşamaları.	33
Şekil 3.21. Toz tanelerinin sinterleme profili.....	34
Şekil 3.22. İki tanenin sinterleme modeli.....	34
Şekil 3.23. Sinterleme işlemi sırasında taneler arası gözeneklerin değişimi ve tane sınırlarının oluşması.	35
Şekil 3.24. Sinterleme faz diyagramı.	36
Şekil 3.25. Sıvı faz sinterlemenin şematik gösterimi.	37
Şekil 3.26. Sıvı faz sinterleme işleminde çökeltme ve tane büyümesi.....	37
Şekil 4.1. Mg-Al denge faz diyagramı.	46

Sayfa

Şekil 5.1. Adhesiv aşınması meydana gelişi	50
Şekil 5.2. Abrasif aşınması.....	51
Şekil 5.3. Erozyon aşınması türleri	52
Şekil 5.4. Yorulma aşınması.....	53
Şekil 5.5. Pim disk cihazının şematik görünüşü.....	57
Şekil 5.6. Levha-Kayış cihazının şematik görünüşü.	58
Şekil 5.7. Dört bilya deney düzeneği.	59
Şekil 5.8. Çapraz Silindir deney düzeneği	60
Şekil 5.9. Mikro abrazyon aşınma testi şeması.	61
Şekil 6.1. AZ91 Alaşım tozu.	64
Şekil 6.2. RIGAKU ZSX Primus II XRF analiz cihazı.....	65
Şekil 6.3. RİGAKU Ultima IV XRD analiz cihazı.	65
Şekil 6.4. T2F4 marka 3 boyutlu turbüla cihazı.	66
Şekil 6.5. MSE marka sıcak presleme cihazı.	66
Şekil 6.6. Sıcak presleme sonrası üretilen numunelerin görünümü.	67
Şekil 6.7. 600 ⁰ C'deki numunelerde oluşan kısmi ergime.	68
Şekil 6.8. KERN 2216 markalı hasas terazi.	69
Şekil 6.9. Dağlama işleminde kullanılan pikral çözeltisi.	70
Şekil 6.10. OLYMPUS SC30 marka ters metalürjik mikroskop.	70
Şekil 6.11. HVM-G21D marka mikro sertlik ölçüm sistemi.	71
Şekil 6.12. HBD 3000Z1 marka Brinell sertlik cihazı.	71
Şekil 6.13. Turkyus marka Pin-on-disk tipi aşınma test cihazı.	72
Şekil 6.14. TESCAN MAIA3 XMU marka taramalı elektron mikroskobu.	74
Şekil 6.15. Malvern Marka Mastersizer 3000 Modeli Partikül Boyut Analizi cihazı.	74
Şekil 7.1. S1 numunesinin XRD grafiği.....	77
Şekil 7.2. S3 numunesinin XRD grafiği.....	78
Şekil 7.3. S7 numunesinin XRD grafiği.....	78
Şekil 7.4. S9 numunesinin XRD grafiği.....	79
Şekil 7.5. S13 numunesinin XRD grafiği.....	79
Şekil 7.6. S15 numunesinin XRD grafiği.....	80
Şekil 7.7. Numunelerin bağıl yoğunluk değerleri	80
Şekil 7.8. S2 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	81
Şekil 7.9. S2 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	82

Sayfa

Şekil 7.10. S4 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	82
Şekil 7.11. S4 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	83
Şekil 7.12. S8 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	83
Şekil 7.13. S8 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	84
Şekil 7.14. S10 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	84
Şekil 7.15. S10 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	85
Şekil 7.16. S14 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	85
Şekil 7.17. S14 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	86
Şekil 7.18. S16 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	86
Şekil 7.19. S16 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.....	87
Şekil 7.20. Mikro Sertlik değerleri grafiği.	88
Şekil 7.21. Makro Sertlik değerleri grafiği.....	89
Şekil 7.22. S1 Numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	97
Şekil 7.23. S3 Numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	98
Şekil 7.24. S7 Numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	98
Şekil 7.25. S9 Numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	99
Şekil 7.26. S13 Numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	99
Şekil 7.27. S15 Numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	100
Şekil 7.28. Tüm numunelerin kayma mesafelerine göre özgül aşınmalarının karşılaştırılması.	100
Şekil 7.29. Tüm numunelerin kayma hızına göre özgül aşınmalarının karşılaştırılması.	101
Şekil 7.30. S1 Numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.	111
Şekil 7.31. S3 Numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.	112
Şekil 7.32. S7 Numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.	112
Şekil 7.33. S9 Numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.	113
Şekil 7.34. S13 Numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri. ..	113
Şekil 7.35. S15 Numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri. ..	114
Şekil 7.36. Tüm numunelerin sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.....	114

Şekil 7.37. S1 no'lu Numunenin 1.5m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000x büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.	116
Şekil 7.38. S3 no'lu Numunenin 1.5m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000x büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.	117
Şekil 7.39. S7 no'lu Numunenin 1.5m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000x büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.	117
Şekil 7.40. S9 no'lu Numunenin 1.5m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000x büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.	118
Şekil 7.41. S13 no'lu Numunenin 1.5m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000x büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.	118
Şekil 7.42. S15 no'lu Numunenin 1.5m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000x büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.	119
Şekil 7.43. 40 N yük altında ve 1.5m/s kayma hızında numunelerdeki aşınma miktarları.	120
Şekil 7.44. S1 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.....	120
Şekil 7.45. S3 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.....	120
Şekil 7.46. S7 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.....	121
Şekil 7.47. S9 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.....	121
Şekil 7.48. S13 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.....	121
Şekil 7.49. S15 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.....	122
Şekil 7.50. Numunelerden alınan partiküllerin Dv boyut değerlerinin karşılaştırılması	123

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Magnezyumun özellikleri.....	39
Çizelge 4.2. Magnezyum alaşımlarının standartlarla gösterimi	42
Çizelge 4.3. AZ91 alaşımının mekanik özellikleri.....	43
Çizelge 4.4. AZ91 alaşımının kimyasal bileşimi.	44
Çizelge 6.1. Çalışmada kullanılan AZ91 alaşım tozunun literatürdeki oranlarla kıyaslanması.....	63
Çizelge 6.2. AZ91 Alaşım tozlarının sıcak preslenme parametreleri.....	67
Çizelge 6.3. Aşınma deneyleri için uygulanan parametreler.....	73
Çizelge 6.4. Debrisleri analiz edilen numuneler ve alınan debrisin parametreleri... 75	
Çizelge 7.1. Numunelerin XRF analizleri	76
Çizelge 7.2. Numunelerden alınan mikro sertlik değerleri.	88
Çizelge 7.3. Numunelerden alınan makro sertlik değerleri.....	89
Çizelge 7.4. S1 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	71
Çizelge 7.5. S3 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	92
Çizelge 7.6. S7 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	93
Çizelge 7.7. S9 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	94
Çizelge 7.8. S13 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	95
Çizelge 7.9. S15 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.	96
Çizelge 7.10. Kopan parçaların kırıldıkları deneyler ve ağırlıkları.	103
Çizelge 7.11. S1 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri..	105
Çizelge 7.12. S3 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri..	106
Çizelge 7.13. S7 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri..	107
Çizelge 7.14. S9 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri..	108
Çizelge 7.15. S13 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri..	109
Çizelge 7.16. S15 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri..	110

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Mg	: magnezyum
Al	: alüminyum
Si	: silisyum
Ca	: kalsiyum
β	: beta, beta fazı
C	: karbon
α	: alfa, alfa fazı
Fe	: demir
Ti	: titanyum
Zn	: çinko
Cu	: bakır
Zr	: zirkonyum
Mn	: mangan
Ag	: gümüş
Be	: berilyum
Y	: itriyum
γ	: gama, gama fazı
H	: hidrojen
Sn	: kalay
Ln	: lantanit
Li	: lityum

KISALTMALAR

- AZ91 : %9 Alüminyum ve %1 çinko içerikli magnezyum alaşımı
EDX : Energy-dispersive X-ray spectroscopy (Enerji yayımlı X-ışını analizi)
SEM : Scanning Electrone Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
XRD : X-ray diffraction (X-ışını kırınım analizi)
XRF : X-ray fluorescence (X-ışını floresan analizi)
SPS : Spark plazma sintering (Kıvılcım plazma sinterleme)
EDS : Energy-dispersive X-ray spectroscopy (Enerji yayımlı X-ışını analizi)
AZ31B : %3 Alüminyum ve %1 çinko içerikli magnezyum alaşımı
Al6351 : 6 serisi yapı alüminyumu

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Magnezyum alaşımları sahip oldukları yüksek mukavemet/yoğunluk özellikleri, korozyon dirençleri, iyi şekillendirilebilirliği sayesinde havacılık, taşımacılık, savunma ve diğer birçok sanayide gün geçtikçe artan bir kullanım oranına sahiptir. Magnezyumun diğer iyi olduğu özelliklere yüksek ısı iletkenliği, boyutsal kararlılığı, sönümlene kabiliyeti gibi örnekler de ekleyebiliriz. 1.74 g/cm^3 yoğunluğa sahip magnezyum alüminyum elementinden %35, demir elementinden ise %77 daha hafiftir. Fakat saf magnezyum çok yumuşak bir yapıya sahiptir. Dayanım ve sertliğini artırmak amacıyla Mg elementi içerisine Al, Mn, Zn gibi diğer yaygın metaller ve nadir toprak elementleri ilave edilmektedir. Özellikle Mg-Al-Zn üçlü alaşım grubu sahip olduğu mukavemet nedeniyle oldukça sık kullanılmaktadır ve bu sınıfta kullanılan en yaygın alaşım AZ91'dir [1,2].

Toz metalürjisi; metal tozlarının üretimini ve sonrasında bu tozların birleştirilerek mamul haline getirilmesini içeren bir imalat yöntemidir. Bu imalat yönteminin prosesleri genellikle tozların üretilmesi, üretilen tozların karıştırılması ve gerekirse mekanik alaşımlandırılması, sonrasında ise bu tozların soğuk preslenip sinterlenmesi veya doğrudan sıcak preslenerek hem sinterlenip hem de şekillendirilmesi şeklinde gerçekleşir. Ayrıca günümüzde klasik sinterleme yönteminin yanı sıra mikrodalga sinterleme, lazerle sinterleme gibi yöntemler de kullanılmaktadır. İsteğe bağlı olarak yağ emdirme işlemiyle de kendinden yağlamalı parçalar üretilebilir. Toz metalürjisi ile karmaşık şekiller ekonomik bir biçimde üretilebilir. Malzeme kayıpları azdır ve genellikle talaşlı işlemlere ihtiyaç duyulmaz. Hemen hemen her malzemenin tozları üretilebilir ve genellikle makul ergime derecesine sahip olan metaller atomizasyon yöntemleri ile toz haline getirilir. Atomizasyon yöntemleri arasında en yaygın kullanılan yöntem gaz atomizasyon tekniğidir. Bu teknik sayesinde küresel ve homojen tozlar istenilen boyutlarda elde edilebilmektedir [3].

Avantajlarına rağmen yapısal ürünlerde magnezyum kullanımı yüksek sıcaklıklardaki düşük sertlikleri, yetersiz sürünme dayanımları ve düşük elektrik potansiyelleri yüzünden sınırlıdır. Bu tür sınırlamalar genellikle alaşım ilaveleri veya film kaplamalar ile giderilmeye çalışılmaktadır. Mg alaşımlarındaki ilaveler sertliği ve dayanımı etkilediği kadar sürtünme ve aşınma karakteristiklerini de etkilemektedir. Daha önceki yapılan çalışmalarda Mg alaşımlarının kuru sürtünme özelliklerinin incelenmesine rağmen gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen AZ91 tozlarının sıcak preslenmesinin aşınma özelliklerine olan etkisinin yeterli derecede çalışmadığı görülmüştür. Bu boşluğu doldurmak ve yeni bilimsel bulgular elde etmek amacıyla bu tez çalışması gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Nguyen vd. [4] yaptıkları çalışmada ayırık ergitme tekniği ile üretilen AZ31B magnezyum alaşımı ve AZ31B/nano- Al_2O_3 nano kompozitlerinin aşınma karakteristiklerini incelemiştir. Yapılan çalışmalar pin-on-disk yöntemiyle çelik disk üzerinde 10N'luk normal yük altında 1, 3, 5, 7 ve 10 m/s çevresel hızlarında ve 30 N yük altında 1, 3 ve 5 m/s kayma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Aşınmış numuneler ve aşınma kalıntısı enerji dağılım spektrometresi ile alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu altında incelenmiştir. Aşınma testi sonuçları göstermiştir ki 10N'luk normal yük ve 30N'luk normal yük altında da kompozitlerin aşınma oranları kademeli bir şekilde çevre hızlarına bağlı olarak düşmüştür. Hem alaşımın hem de kompozitin sürtünme katsayıları 0.25-0.45 aralığında çıkmıştır ve en küçük değerler 10 N yük altında 5 m/s hızda, 30N'luk normal yük altında ise 3 m/s hızda elde edilmiştir. Mikroyapısal karakterizasyon sonuçları farklı çevresel hızlarda aşınma, katmanlaşma, oksidasyon, adhezyon, termal yumuşama ve erime şeklinde isimlendirilen farklı baskın mekanizmaları ortaya çıkarmıştır.

Mondet vd. [5] yaptıkları çalışmada kıvılcım plazma sinterleme (KPS) yöntemi ile geliştirilen AZ91 magnezyum alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş olan AZ91 tozu, 310 °C – 500 °C aralığındaki farklı sıcaklıklarda KPS yöntemi ile birleştirilmiştir. $Al_{12}Mg_{17}$ 'nin sinterleme sıcaklığının çökeltme ve tane büyüklüğü üzerindeki etkisi XRD, SEM, EDX analizleri ile incelenmiştir. KPS' nin yarı kararlı bir toz üzerinde kullanılması, bir yandan ince taneli yapıyı muhafaza ederken diğer yandan da çökeltme işlemini kontrol altında tutabilmek için etkili bir işleme yöntemi olduğunu göstermiştir. Hall-Petch ve Orowan güçlendirme tahminleri sayesinde, bu ince mikroyapının faydası nitelendirilmiş ve Hall-Petch tahminlerinin katkısının baskın

olduğu ortaya çıkmıştır. Tüm bu sinterleme koşullarının bir sonucu olarak, ortaya çıkan sertlik (70-90MPa) ve akma dayanımı (148-230MPa) değerleri, yaşlanmış T6 durumundaki konvansiyonel döküm ile üretilen AZ91 alaşımı değerlerine eşit veya üstün olduğu görülmüştür. 380⁰C sinterleme sıcaklığı için optimum mikroyapı elde edilmiştir ve bunun için de maksimum basma dayanımı ile maksimum basma dayanımındaki gerilim değerleri ölçülmüştür (sırasıyla 327MPa ve %13,7). Isıl işlem görmüş AZ91-T6 alaşımına kıyasla bu değerlerde %16 ve %11'lik bir artış elde edilmiştir.

Straffelini vd. [6] yaptıkları çalışmada kıvılcım plazma sinterleme (KPS) yöntemini kullanarak AZ91 Mg alaşımının mikro yapısal karakteristiklerini ve bununla birlikte sıcak sıkıştırma davranışlarını incelemişlerdir. Başlangıçtaki tozların birbirinden farklı taramalı kalorimetre analizlerine dayanarak, 400 ⁰C, 450 ⁰C ve 450 ⁰C'de 420 ⁰C ye batırılmış olan önceki çözündürme ile üç farklı KPS döngüsü araştırılmıştır. Farklı mikro yapı ve sertlik karakteristiklerine rağmen,  alaşımda birbiriyle benzer sıcak sıkıştırma davranışı göstermiştir. 200 ⁰C'de maksimum yükün oluşmasından sonra, yükleme eksenine göre 45⁰ aı ile yayılan dengesiz bir çatlak oluşumu gözlenmiştir. Daha yüksek test sıcaklıklarında, maksimum gerilime ulaştıktan sonra, akış gerilimi ~ 0.51 artarak yavaşça azalmaktadır. Bu davranış, partiküller arası bölgelerde ayrılmaların yayılmasından dolayı hızlanarak devam eden bir çatlamanın gözlenmesine yol açmıştır. Sonuç olarak SPS ile yüksek bağlı yoğunluk eldesi sağlanmıştır; Ancak, malzemelerin sinterleme derecelerinde yüksek miktarda düşüş gözlemlenmiştir.

Straffelini vd. [7] yaptıkları çalışmada kıvılcım plazma sinterleme (KPS) yöntemi ve ekstrüzyon ile üretilen AZ91 alaşımının özelliklerini incelemişlerdir. Magnezyum alaşımları, iyi bir biyoyumluluk da dhil olmak üzere birçok gelecek vaat eden özellikler ile karakterize edilir. Bu alışmada, KPS yöntemi ile silindirik numuneler üretmek için ticari bir AZ91 tozu kullanmış olup, sıcak ekstrüzyon yardımıyla da numuneleri daha dayanıklı hale getirmiştir. KPS malzemelerinin, orijinal tozların arasındaki oluşan düşük bağ kuvvetleri nedeniyle oldukça gevrek olduğunu bulmuştur. Bununla birlikte, sıcak ekstrüzyon işleminin akabinde yapılan oda sıcaklığındaki çekme testlerinde ortaya sünek bir davranış sergiledikleri saptanmıştır.

Metalografik incelemede ise, ekstrüzyonun, tane küçültme ile dinamik bir yeniden kristalleşmeye neden olduğunu ve aynı zamanda da malzemelerin β fazı içeriğinde bir artışa sebep olarak korozyon dirençlerinin azalmasına da yol açmıştır.

Botelho vd. [8] yaptıkları çalışmada, kıvılcım plazma sinterleme (KPS) ile işlenen saf Mg ve AZ91 Mg alaşımının sıcak sıkıştırma altındaki davranışlarını incelemişlerdir. SPS saf magnezyuma 400 °C de uygulanmıştır. AZ91'i ise önce 420 °C de 50 dakika homojenleştirilmiş ve sonrasında 470 °C de sinterlemiştir. Üretilen numuneler, ekstrüzyon prosesi ile önceden şekillendirilecek katı bir silindir haline getirilmiştir. Aynı numuneler 330 °C ve 380 °C de sıcak bir sıkıştırma testine tabi tutularak 0,5 gerilimi geçmemesi için de desteklenmiştir. Akma noktasından sonra her iki malzemenin davranışında da bir fark olduğu bildirilmiştir. Saf Mg için, deformasyon sertleşmesi sözde dinamik yumuşamadan daha büyüktür ve akma noktasından sonra da eğri yükselmeye başlamaktadır. AZ91 de ise etki tam tersi olarak görülmüştür.

Jiang vd. [9] bu çalışmada, toz metalürjisi ile üretilen AZ91'in sinterleme sıcaklığının, mikro yapı ve özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Sinterleme sıcaklığının bağıl yoğunluk, sertlik ve çekme dayanımı üzerinde oluşan etkileri incelemişlerdir. Malzemenin mikro yapısı SEM ve EDS kullanılarak gözlemlenmiştir. Sıcak vakum presleme ile yapılan araştırmalarda en iyi sinterleme sıcaklığının 550 °C'nin altında olması gerektiği ve bu sinterleme işlemi sırasında bağıl yoğunluğunda %98,3 değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Alaşımın sinterleme mikro yapısı ise α -Mg katı çözeltilisi ile ikinci faz olan β -Mg₁₇Al₁₂'den oluşmaktadır. Sinterleme sıcaklığı 550 °C olduğunda ana sinterleme formu yayılım mekanizması olurken tane sınırlarında dağınık olarak bulunan β -Mg₁₇Al₁₂ fazı ve bu ikinci fazın kuvveti ile de alaşımın sertliğinde artış gözlemlenmiştir.

Aung vd. [10] bu çalışmada AZ91D alaşımının düşük kayma hızlarındaki aşınma davranışını araştırmışlardır. AZ91D magnezyum alaşımının aşınma davranışı, pin-on-disk yapılandırması ile kuru kayma koşulları altında düşük kayma hızları (0,01-1,0ms⁻¹) kullanarak incelenmiştir. Aşınma oranları iki farklı mesafe kullanılarak (1 ve 10km) 10N'luk sabit bir kuvvet altında ölçülmüştür. Aşınma izleri, aşınmış

yüzeyle ve aşınma kalıntılarının analizleri, SEM ve XRD kullanılarak yapılmıştır. Aşınma kalıntısının oksidasyon davranışını incelemek için de termogravimetrik analizler yapılmıştır. Sürtünme katsayısı değerinin de, üç farklı aşınma geçişine yol açan kayma hızındaki artış ile birlikte dalgalandığı bulunmuştur. $0,01\text{ms}^{-1}$ hızındaki kayma esnasında abrasif aşınma meydana gelmiştir. $0,1\text{ms}^{-1}$ hızındaki kayma esnasında ise oksidasyon aşınması baskın gelmiştir. Yüksek kayma hızı olan $1,0\text{ms}^{-1}$ 'de ise katmanlar halinde aşınma görülmüştür. Aşınma oranı, abrasif aşınmada en yüksek iken oksidasyonel aşınmada ise en düşüktür. Oksidasyonel aşınmadaki aşınma kalıntıları çoğunlukla, MgO ve MgAl_2O_4 formundaki Mg ve Al oksitleridir. Katmanlar halinde aşınmanın aşınma kalıntısında ise en çok birleşmemiş Mg olduğu görülmüştür.

Wolff vd. [11] magnezyumun sinterlenmesi hakkında bir araştırma yapmışlardır. Mg tozu sinterlenirken hava ile temasından hemen sonra kuvvetli bir oksit tabakasıyla kaplanır. Titanyuma zıt olarak, katı magnezyumda oksijen çözünürlüğü rapor edilmemiştir; bu nedenle, oksit tabakası sinterleme esnasında çözünmemektedir. Bu çalışmada, bu sorunun üstesinden gelebilmek için farklı yöntemler incelenmiştir. Sinterlenen parçalar magnezyum alıcı bir malzeme ile sarıldıysa, magnezyumun sinterlenebileceğini göstermiştir. Kalsiyum ilavelerinin sinterlenebilirliği arttırdığı saptanmıştır. Optimum kalsiyum içeriği de kütlece %0,6'ya kadardır.

Burke vd. [12] magnezyum tozlarının sinterlenme esaslarını incelemişlerdir. Magnezyum ve alaşımları, düşük yoğunluk ve iyi mekanik özelliklere sahip olmalarından dolayı otomotiv ile havacılık uygulamalarında kullanımı tercih edilen malzemelerdir. Bununla birlikte, magnezyuma şekil vermenin zorluğu ve sınırlı sayıda olan mevcut ticari alaşımların kullanımını sınırlamaktadır. Bu çalışmada, toz metalürjisi ile magnezyum alaşımlarını üretmek ve geleneksel olmayan proseslerle magnezyumun çekiciliğini arttırmak için mevcut sonuçları sunmak amaçlanmıştır. Toz metalürjisi, şekillendirilebilirlik problemini nerdeyse net bir şekilde yakın olarak işleyerek sorunu giderebilmekte ve ayrıyeten yeni özelliklere sahip alaşımların eldesine de izin vermektedir.

Tozların preslenmesi, tek eksenli kalıp sıkıştırma ile izostatik presleme kullanılarak yapılmıştır ve endüstriyel olarak yoğun bir şekilde kullanılan karışık toz harmanlamayla kontrollü atmosfer altında sinterleme işlemi gerçekleştirerek sonuçların incelenmiştir. İki tip saf magnezyum kullanılmıştır, bunlardan biri mekanik öğütme ile diğeri ise santrifüj atomizasyonu ile üretilmiştir. Optimum işleme koşullarının (toz büyüklüğü, sıkıştırma basıncı, sinterleme süresi ve sıcaklık) sinterlenmiş yoğunluğu ve mekanik özellikleri en üst düzeye çıkardığı bulunmuştur.

Zulkoffli vd. [13] bu çalışmada önceden alaşımlandırılan AZ61 magnezyum alaşımının toz metalürjisi ile üretilmesini araştırmışlardır. AZ61 magnezyum tozunu önceden alaşımlandırılarak, 200 MPa basınç altında 20 dakika süreyle, 200⁰C, 250⁰C, 300⁰C ve 350⁰C olan farklı sıcaklıklarda imal etmişlerdir. Bazı sıkıştırılan numuneler, 500⁰C'de argon koruma atmosferi altında sinterleme işleminden geçirilmişlerdir. Tüm numunelerin mikro yapı ve sertlikleri araştırılmıştır. Sinterlenen ve sıkıştırılan numuneler mikro yapı ve sertlik açısından karşılaştırılarak incelenmiştir. Sıkıştırılan numuneler, sıkıştırma sıcaklığının yükselmesinin geri kazanım karakterizasyonuna, yeniden kristalleşmeye ve tane büyümesine yol açtığını göstermiştir. Sinterlenmiş numunelerde, sıkıştırma sonrası oluşan iç gerilimlerin serbest bırakılmasına, süreçte oluşan kusurların giderilmesine ve malzemenin yumuşamasına sebep olduğu görülmüştür. Sıcak sıkıştırılan numunelerdeki sertlik sonuçlarına bakıldığında ise, sıkıştırma sıcaklığının yükselmesiyle sertliğin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, sinterlenmiş numunelerin genel sertliği sıcak sıkıştırılmış numunelere kıyasla daha düşük sertlik göstermiştir.

Chen vd. [14] sıcak haddelenmiş bir AZ91 alaşımı üzerine eşit kanallı açısız presleme (ECAP) uygulayarak, mikro yapı ve mekanik özelliklerine olan etkilerini araştırmışlardır. İki aşamalı ECAP işleminden sonra yaklaşık 2µm büyüklüğünde homojen olarak rafine edilmiş taneler gözlemlenmiştir. ECAP sırasında, birçok iyi kalitede Mg₁₇Al₁₂ fazı tane sınırlarında çökeltmiştir. AZ91'in iki aşamalı ECAP ile, 225⁰C de dört geçiş ve 180⁰C de iki geçiş yaptırılarak akma dayanımı, maksimum gerilme dayanımı ve uzaması sırasıyla 290, 417MPa ve %8,45'e yükselmiştir. ECAP ile işlenen alaşımın yüksek mukavemete sahip olması, tane inceltmesi ve ECAP sırasında Mg₁₇Al₁₂ fazının çökmesinden kaynaklanır. Ayrıca ECAP ile

işlenmiş alaşımın, $Mg_{17}Al_{12}$ 'nin morfolojisi sayesinde mekanik davranışı güçlü bir şekilde etkilediği gösterilmiştir.

Alias vd. [15] bu makalede, toz metalürjisi (TM) tekniği ile hazırlanan magnezyum esaslı alaşımların imalatını ve geliştirilen mikro yapı, doku ve mekanik özellik parametrelerinin TM üzerindeki etkilerinin analizlerini gözden geçirmişlerdir. Magnezyum ürününün, daha az karmaşık şekil, daha ince tane yapısı ve gelişmiş özelliklere sahip olması için TM tekniği ile üretilmesinin daha geçerli olacağı düşünülmektedir. TM yolunun seçilmesi, özellikle sinterleme esnasında tam yoğunlaşmaya sebep olmakta ve parçacıklar arası bağların oluşması için iyi bir difüzyona yol açmaktadır. Bu makalede, TM rotasındaki her bir prosesin hazırlanması ve parametreleri, kristalografik dokusu ve magnezyum esaslı alaşım ürünlerinin mekanik özellikleri de dahil olmak üzere geliştirilmiş mikro yapı ele alınmaktadır.

Xie vd. [16] TM tekniği ile üretilen alaşım ve kompozitlerin, farklı sinterleme yolları kullanılarak magnezyumun mekanik özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Mg-9Al ve hacmen %15SiCp/Mg-9Al üretimi için sıvı faz sinterleme (SS) ile katı faz sinterleme (KS) yollarını kullanmışlardır. Üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri ve matris alaşımı iki farklı sinterleme yoluyla incelenmiştir. Sonuçlar ise SS'nin gerilme ve akma dayanımının %15 SiCp/Mg9-Al-1'in matrisinkinden %11,1 ve %22,8 daha yüksek olduğunu göstermiştir. KS işlemi ile üretilen matris alaşımı (Mg9-Al-2) ve kompozit (%15SiCp/Mg9Al-2) bu yöntemle daha düşük mukavemet ve daha yüksek sünekliğe sahip olmaktadır. %15SiCp/Mg9Al-1' in akma dayanımı SS işlemi ile %25,1'den daha yüksek olarak 339MPa bulunmuş olup, bu durumun matris içerisinde düzgün olarak dağılan γ fazının ($Mg_{17}Al_{12}$), rafine edilmiş matris alaşımı olan %15SiCp/Mg9Al-2 ile homojen bir biçimde birleşmesinin oluşturduğu etkiden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Iwasaki vd. [17] toz metalürjisi tekniği ile üretilen magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada toz metalürjisi (TM) ile üretilen ZK61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının, mekanik ve oda sıcaklığındaki süper plastik özellikleri külçe metalürjisi (KM) ile üretilen ZK61 ve AZ91 alaşımlarına

kıyasla incelemiştir. TM Mg alaşımları KM Mg alaşımlarına kıyasla oda sıcaklığında 0,2 oranında daha fazla zorlama gerilimi ve daha yüksek mukavemet göstermiştir. TM Mg alaşımları KM Mg alaşımlarına göre 1 derecelik daha yüksek gerilme oranı göstererek süper plastik davranış sergilemiştir. TM Mg alaşımlarındaki çok küçük tanecik boyutları mükemmel mekanik özelliklere yol açması muhtemeldir.

Chen vd. [18] AZ91 magnezyum alaşımı için kaymalı aşınma haritası üzerinde çalışmışlardır. AZ91 alaşımına kuru kayma ile aşınma testleri block on-ring (AISI 52100 çelik) konfigürasyonu kullanılarak yapılmıştır. Aşınma oranları, 1-350N yük aralığı ile 0,1-2,0m/s kayma hızları aralığında ölçülmüştür. Kompozisyonlar, morfolojiler ve aşınma kalıntısı yüzeylerinin mikro yapısı SEM ile EDS kullanılarak karakterize edilmiştir. Haritalama yaklaşımı, uygulanabilirlik aralığının bulunabilmesi için yük ile hız etmenleri kabul edilerek, gevşek kalıntılarla yüzey hasarlı bölgelerin incelenmesi ise EDS ve XRD yardımıyla yapılmıştır. Bunun sonucunda hafif aşınma direnci ile ağır aşınma direnci olan iki ana direnç rejimi gözlemlenmiştir. Temas yüzeylerindeki sıcaklığın hafiften şiddetli aşınmaya geçiş sürecindeki rolü incelenmiştir. Hafif ile şiddetli aşınma alaşımının temas yüzey sıcaklığı ile kontrol edilmiş olup, şiddetli aşınmanın başlangıcı 347K'lik bir değer olarak ölçülmüştür. Hafif aşınma rejiminde iki farklı mikro mekanizma işletilmektedir ve iki alt hizmet rejimi olan oksidasyonel aşınma ile delaminasyon aşınma rejimi olarak da tanımlanabilmektedir. Şiddetli aşınma rejiminde ise yine iki farklı aşınma mekanizması, yüzey hasarları ve kalıntı oluşumundan sorumlu tutulmuştur. Bu iki farklı aşınma rejimi ise aşınma ve eriyik aşınma olup plastik deformasyonla gerçekleşmişlerdir. Aşınan yüzeylerde yapılan aşınma testleri ve metalografik incelemelerde aşınma mekanizmasının haritası olarak özetlenmiştir. Şiddetli aşınan yüzeylerdeki, kritik yüzey sıcaklığının tahmin etmeye yarayan model geliştirilmiştir.

Kumar vd. [19] bu makalede en yüksek yaştaki ve çözelti ile muamele edilmiş AZ91 Mg alaşımının, yağlanmış şartlar altında aksenal olarak gidip gelme hareketi yapan pistonlu kaydırıcı kullanarak temas yüzeylerinde tribolojik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. AZ91 Mg alaşımının yük, kayma hızı ve mikro yapının aşınma tepkisi üzerine olan etkisi incelenmiştir. Aşınma sonuçları optik mikroskop, SEM ve

EDX kullanarak karakterize edilmiştir. En yüksek yaştaki alaşım, çözelti ile muamele edilen alaşım ile Al6351 Al alaşımına kıyasla mükemmel bir sürtünme dayanımı göstermiştir. Yaşlandırılmış numunenin içerisine çökelmiş halde bulunan γ -Mg₁₇Al₁₂'nin oluşumundan dolayı sürtünme dayanımı yükselmiştir. En yüksek yaştaki alaşımın çözelti ile muamele edilmiş alaşıma kıyasta üç' te bir oranında daha yüksek özgül sürtünme dayanımı olduğu görülmüştür. İki numune de, düşük yük ile artan kayma hızında düşük sürtünme katsayısı göstermiş olup, en yüksek yaştaki numune yüksek yük altında tam tersi bir davranış sergilemiştir. Yüksek yaştaki numunenin aşınma davranışı düşük yükse oksidatif aşınma iken, daha yüksek yüklerde abrasif aşınmaya dönüşmektedir.

Shanthi vd. [20] bu çalışmada AZ91 Mg alaşımında tane büyüklüğünün aşınmaya olan etkilerini incelemişlerdir. AZ91 Mg alaşımı talaşları, ince tane büyüklüğü eldesi için mekanik öğütme kullanılarak geri dönüştürülmüştür. Aynı alaşımdan dökülerek yapılan numuneler, 10N normal yük altında, 1 ila 10m/s⁻¹ aralığındaki hızlarda pin-on-disk yöntemi kullanılarak aşınma davranışları incelenmiştir. Tane büyüklüğündeki (0,6-28,9µm) farklılıklara ve mekanik özelliklere rağmen numunelerin aşınma performanslarında kayda değer bir fark görülmemiştir. Düşük kayma hızlarında abrasif aşınma baskın olurken, kayma hızı arttırıldıkça mekanik olarak karıştırılmış koruyucu bir tabaka oluşumuna geçiş yapması SEM ile gözlemlenmiştir.

Xiu vd. [21] bu makalede TiC_p/AZ91 magnezyum matrisli kompozitlerin kayma aşınması davranışlarını araştırmışlardır. AZ91 metal matrisli kompozitler, ağırlıkça 5,10 ve %15TiC partikülleriyle güçlendirilmiş olup, mekanik karıştırma yöntemiyle üretilmişlerdir. MM-200 sürtünme testi aparatı kullanılarak, TiC partiküllü yapının, uygulanan yük, aşınma zamanı ve kayma aşınması davranışının etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, TiC partiküllü yapının içeriğinin azalıp artmasıyla aşınma dayanımının ve sürtünme katsayısının doğru orantılı olarak değiştirdiği görülmüştür. Güçlendirilen kompozitlerde oluşan aşınma hacim kaybı ve sürtünme katsayısının, güçlendirilmiş AZ91 matris alaşımı gibi uygulanan yükün ve sürenin artmasıyla yükseldiği görülmekte fakat bu iki parametre ile güçlendirilen kompozitin güçlendirilmemiş AZ91 matris alaşımına kıyasla daha düşük değerde olduğu

saptanmıştır. Ayrıca kompozitlerin ve güçlendirilmiş AZ91 matris alaşımının aşınma davranışları, oyuklanma, adhezyon ve oksidatif abrazyon ile karakterize edilmiştir.

Li vd. [22] bu çalışmada, AZ91 magnezyum alaşımına yüksek akım darbeleri elektron ışını (YADEI) ile yüzey modifikasyonu yapılmasını incelemişlerdir. YADEI ile ışınlandıktan sonra, ışın sayısının artışıyla krater şeklinde olan çatlamların yoğunluğunun, modifiye edilmiş yüzeyde saçılmaya uğradığı ve keskin bir şekilde düşüş yaşadığı tespit edilmiştir. XRD analizlerinden sonra YADEI ile birkaç ışın kullanılarak, sert intermetalik faz olan $Mg_{17}Al_{12}$ 'nin oluşmasına sebep olması sürtünme dayanımını yükselttiği gibi daha fazla ışın kullanımının $Mg_{17}Al_{12}$ solüsyonunun oluşmasına yol açtığı da gözlemlenmiştir. Modifiye tabakanın en kalın derinliğine uygulanan 30 ışın ve artan 27kV güçle en iyi sürtünme dayanımının eldesine yol açmakta, aşınma izinin derinliğinde de $12,75\mu m$ den $7,82\mu m$ ye düşüş gözlemlenmektedir.

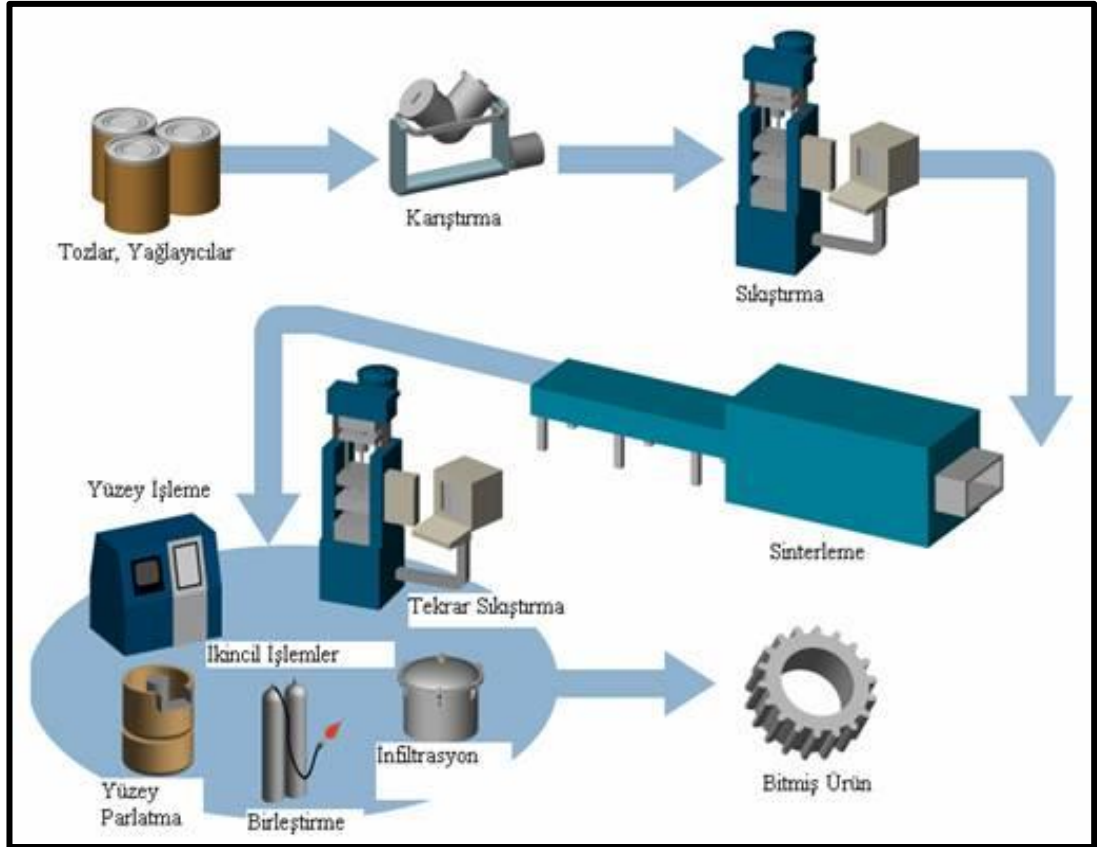
Asl vd. [23] bu makalede AZ91 magnezyum alaşımına derin kriyojenik işlemin ($-196^{\circ}C$) uygulanmasıyla, mikro yapı ve mekanik özelliklere olan etkilerini incelemişlerdir. Numunelerde derin kriyojenik işlemin uygulanması β çökeltilerinin dağılımını değiştirmiştir. Mikro yapının içerisinde küçük lamelli β partikülleri neredeyse çözülmüş halde olurken, kaba ayrık ötektik faz matrisin içine saplanmıştır. Bu mikro yapısal modifikasyonun sonuçları, mekanik özelliklerde muazzam bir şekilde artışa yol açmıştır. Tanecik sınırındaki mikro yapının kararlı olması, alaşımın sürünme davranışına istikrarlı bir oran vermesi derin kriyojenik işlemlerle sağlanmıştır. AZ91 alaşımı için sonuçlar, bazı tane sınırı etkilerinin genel davranışı etkilediği ve karmaşık tipte bir sürünme davranışı sergilediği şeklindedir. Bununla birlikte, derin kriyojenik numunelerde, en baskın deformasyon mekanizmasının dislokasyon tırmanması ile sürünme davranışının kontrol edildiği görülmüştür. Derin kriyojenik işleminden sonra, tane sınırı kayması morfolojik değişimlere yol açmıştır. Sonuç olarak derin kriyojenik işleminden sonra, tane sınırları yüksek sıcaklıklarda tane sınırı kaymasına daha az yatkındır. Ayrıca derin kriyojenik işleminden sonra yapılan kuru kayma aşınması testleri ile aşınma dayanımında kayda değer bir şekilde artış elde edilmiştir.

BÖLÜM 3

TOZ METALURJİSİ

Toz metalürjisi (T/M), metal tozları kullanılarak imal edilmesi ile yapılan bir çeşit metal işleme teknolojisidir. T/M toz halindeki metallerin istenilen parça boyutunda preslenmesi veya sıkıştırılması işleminin sonrasında sinterlenerek parça dayanımı ve rijitliğinin artırılması işlemidir. Toz metalürjisinin üretim aşamaları Şekil 3.1’de detaylı olarak verilmiştir. T/M yirminci yüzyılın başlarında teknolojik anlamdaki önemini giderek arttırmış olup, günümüzde seramikler, seramik-metal kompozitler ve polimerleri de bünyesine katmakla birlikte birçok uygulama alanında tercih edilen bir üretim yöntemi olmuştur [24]. T/M, teknoloji, tıp, enerji, sağlık, savunma, uzay, havacılık, elektronik, iletişim, tekstil, hayvancılık, gıda gibi birçok alanda ihtiyaç duyulan parçaların üretiminde de kullanılmaktadır. Elde edilen parçaların, homojen olması, içeriğinin kontrol edilebilmesi, ergime sıcaklıkları ve özgül kütle farklılıkları yüksek miktarda olan malzemelerin kompozit yapı içerisinde bir araya getirilmesi, birim maliyetinin düşük olması gibi birçok özelliklerden dolayı, T/M imalat sektöründe kendine geniş bir uygulama alanı bulmaktadır [25].

T/M, kalıp boşlukları sayesinde aynı parçanın defalarca üretilmesine imkân tanımaktadır. Serbest şekillerde olan parçalarda tek bir parçanın üretimi de yapılmaktadır. Üretimde maliyet daima en önemli faktörlerden birisi olmaktadır. TM yöntemi bu faktörden dolayı karmaşık şekilli parçaların son halini alabilmesi ve şekil verebilme özelliği ile ekonomik olarak fayda sağlamaktadır. Ayrıca TM yöntemlerindeki toz üretimi sırasında fazla malzeme kullanımı ile izafi olarak daha düşük enerji gereksinimine sebep olmasıyla da ekonomik kazanç sağlamaktadır [26].



Şekil 3.1. Toz metalürjisindeki üretim aşamaları [27].

3.1. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Metal tozlarının üretilmesinde kullanılan yöntemler, tozların birçok özelliklerini belirlemektedir. Üretim yönteminin değişmesiyle tozların geometrik şekilleri, küresel şekle sahip tozlardan karmaşık şekilli tozlara kadar birçok tipte toz eldesi sağlanmaktadır. Tozların yüzeysel durumları da üretim yöntemine göre farklılık göstermektedir. Ticari olarak kullanılan toz üretim yöntemleri 4 farklı başlık altında kategorize edilmektedir [28,29].

1. Mekanik üretim yöntemleri
2. Kimyasal üretim yöntemleri
3. Elektroliz ile üretim yöntemi
4. Atomizasyon ile üretim yöntemleri

Malzemelerin çoğu kendine uygun olan üretim yönteminin kullanılmasıyla toz haline getirilebilmektedir. Toz üretme işlemi; kimyasal, elektrolitik ve atomizasyon yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerin arasında en çok kullanılanı ise atomizasyon yöntemi ile toz üretilmesidir [30].

Toz üretim yönteminin seçilmesi; ekonomiklik, elde edilen tozların özellikleri ve bu özelliklerin kullanım yerlerinde ihtiyaçları karşılayabilmesi gibi durumlarla bağlıdır [31].

3.1.1. Mekanik Üretim Yöntemleri

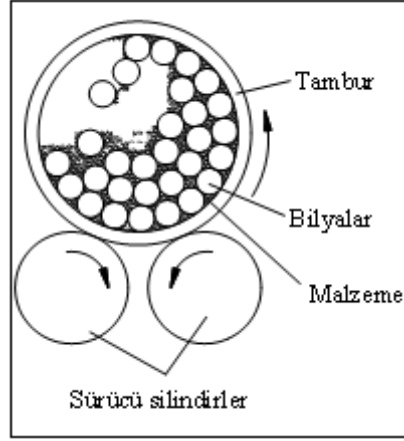
Mekanik üretim yöntemleri; talaşlı üretim, öğütme ve mekanik alaşımlama olarak 3 farklı grupta incelenmektedir [32].

3.1.1.1. Talaşlı Üretim Yöntemi

Tornalama, frezeleme ve taşlama gibi yöntemler kullanılarak, çok iri ve karmaşık şekilli tozların eldesi sağlanmaktadır. Bu elde edilen tozlar öğütme işlemi ile daha ince hale getirilmektedirler. Bu yöntemde toz özelliklerinin kontrol edilebilmesi zordur. Oksitlenme, yağlanma, kirlenme ve başka metallerin hurdalarıyla karışabilme ihtimali yöntemin dezavantajları arasındadır. Yüksek karbonlu çelik tozlarının imali bu yöntem ile yapılmaktadır [32].

3.1.1.2. Öğütme

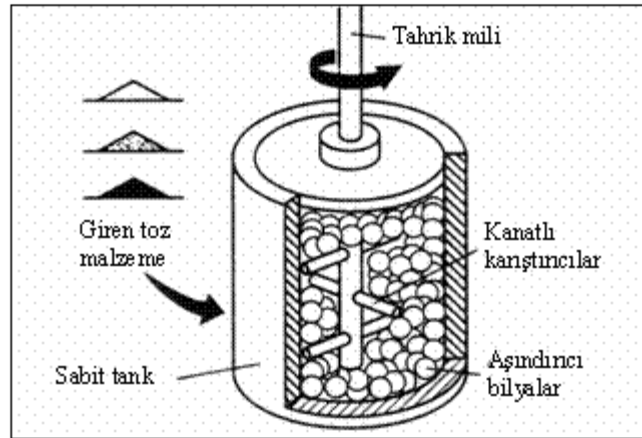
Öğütme bir metal tozu üretim yöntemi olmanın yanı sıra başka metal tozlarının kırılarak inceltilmesi için de kullanılmaktadır. En çok tercih edilen yöntemi bilyalı değirmenlerdir (Şekil 3.2). Öğütme yöntemiyle kırılğan yapıya sahip malzemelerin tozlarının üretimi de yapılmaktadır. Bu yöntemdeki ana prensip öğütülecek malzeme ile sert bir cisim arasında bir darbe etkisi meydana gelmesini sağlamaktır. Demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum gibi malzemelerin toz haline getirilmesi için bilyalı değirmenler kullanılmaktadır [32].



Şekil 3.2. Bilyalı öğütme [33].

3.1.1.3. Mekanik Alaşımlama Yöntemi

Mekanik alaşımlama yöntemi, mekanik üretim yöntemleri arasındaki en başarılı yöntemlerden birisidir. Burada ana mantık, bir miktar bilya ile elementel tozun bir karıştırıcı yardımıyla karıştırılmasıdır (Şekil 3.3). Bu karıştırma işlemi esnasında tozların mikroskobik boyutlarda tekrarlanan çarpışması, soğuk kaynama ve kırılma ile istenilen tozun üretilmesini sağlar [34].

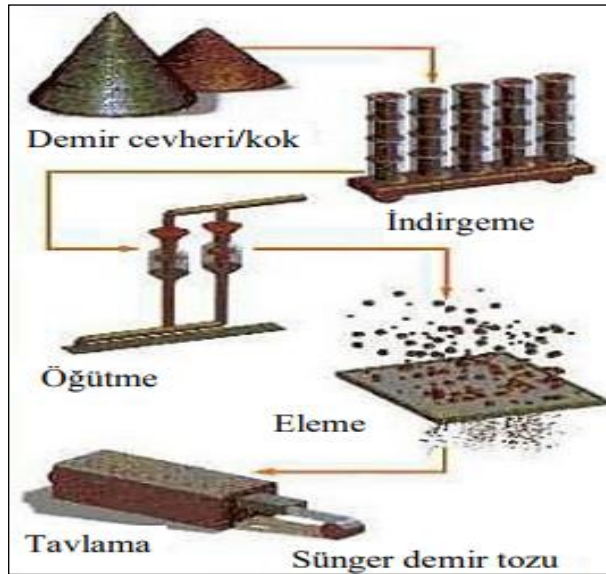


Şekil 3.3. Mekanik alaşımlama [32].

3.1.2. Kimyasal Üretim Yöntemleri

Genel olarak metal tozlarının kimyasal yöntemle üretimi; metal oksitlerinin (demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobalt) karbondioksit veya hidrojen gibi indirgeyici gazlarla oksitlerinden kimyasal olarak indirgenmesi ile yapılmaktadır [29].

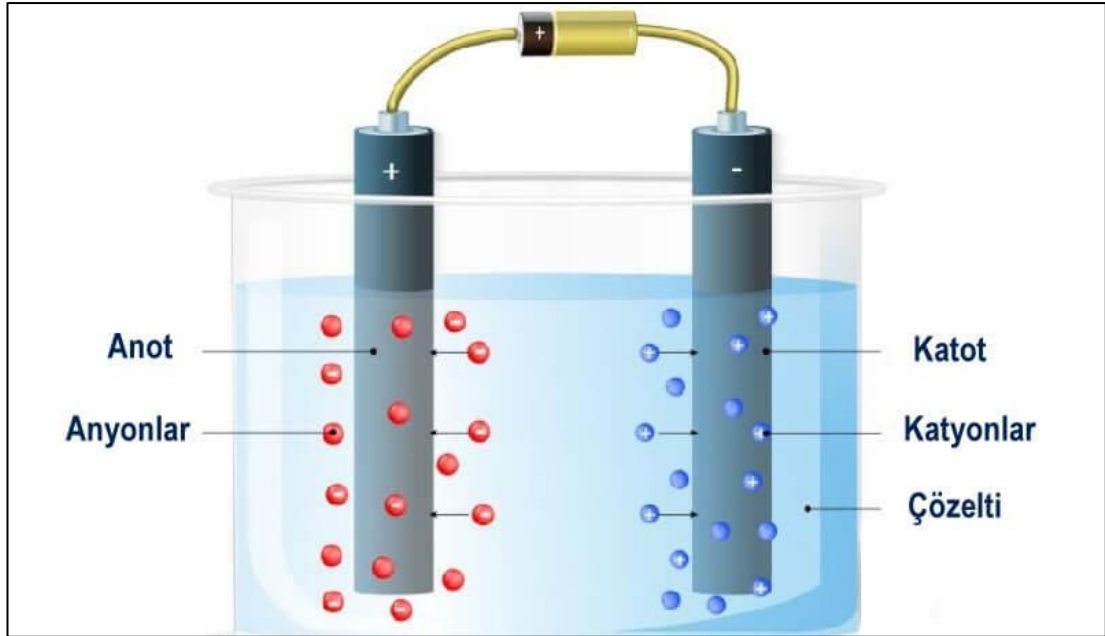
Bu yöntemle üretilmekte olan sünger demir tozu kimyasal üretim yönteminin önemli bir örneği olmaktadır. Sünger demir tozu, demir oksit cevherinin uygun özellikteki indirgeyici elemanlarla indirgenerek süngerimsi bir kütle haline gelmesiyle elde edilmektedir. Fe_3O_4 , önce kok ve kireç taşıyla karıştırılır sonrasında ise seramik kaplara doldurulur. Seramik kapların içerisindeki Fe_3O_4 , $1260^{\circ}C$ de 68 saat bekletilir [35]. Bu indirgenme işleminin tamamlanmasıyla sünger demir eldesi sağlanmaktadır. Bu elde edilen sünger demir $1260^{\circ}C$ de birbirine kaynayan tozlardan oluştuğu için öğütme işlemiyle istenilen tane büyüklüğüne getirilmektedir. Öğütme işleminin akabinde $870^{\circ}C$ de hidrojen gazı altında tavlanaarak oksijen ve karbondan mümkün seviyede arıtılır ve sonrasında da elekten geçirilir [36]. Sünger demir tozu eldesinin prosesi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Kimyasal yöntemle sünger demir tozu üretimi [37].

3.1.3. Elektroliz ile Üretim Yöntemi

Elektroliz ile üretim yönteminde, oksitlerden oluşan tozların elektrolitik banyoda katoda akım vererek çökertilmesi ile yapılmaktadır. Bu yöntemin gösterilişi Şekil 3.5'te verilmiştir. Elektroliz işleminde kullanılacak olan kap sülfürik asit kullanıldığından dolayı kurşun ile kaplanmış olması gerekmektedir. Bu yöntemle genellikle bakır tozlarının üretimi sağlanmaktadır. Sülfürik asit ile bakır sülfat elektrolitik görevini almaktadır. Katot antimon içerikli kurşundan anot ise bakırdan oluşması gerekmektedir.



Şekil 3.5. Elektroliz ile toz üretimi [38].

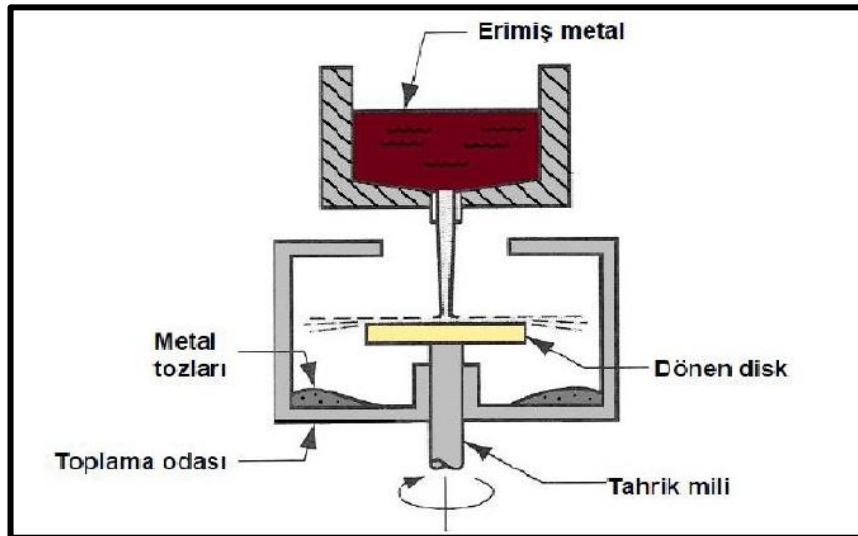
Elektroliz yöntemiyle, elektrolitik banyoda çökertilen veya katoda toplanan metaller, ince toz haline gelebilmesi için önce öğütülür sonra da yıkanarak elektrolitten arındırılır. Oksitlenme olmaması için asal gaz atmosferi altında kurutma işlemi yapılır. Elektroliz ile üretilen tozlarda dentritik yapı görülmektedir. Fakat daha sonraki uygulamalarda bu yapı değiştirilebilmektedir. Bu yöntemle yüksek saflıkta toz eldesi sağlanmasından dolayı sıkıştırılabilir özellikleri iyidir [39].

3.1.4. Atomizasyon ile Üretim Yöntemleri

Atomizasyon ile toz üretim yöntemleri; döner disk ile atomizasyon, döner elektrot ile atomizasyon, su ve gaz atomizasyon yöntemi olarak 4 farklı başlık altında incelenebilir [40].

3.1.4.1. Döner Disk ile Atomizasyon Yöntemi

Döner disk ile atomizasyon yöntemi genel prensip olarak merkez kaç kuvvetinin kullanılmasıyla toz üretimini sağlamaktadır. Döner disk atomizasyonunda birbirinden farklı iki üretim yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerden birincisinde; belirli miktardaki sıvı metalin toz oluşturabilecek kadar merkezkaç kuvvetine maruz bırakılmasıyla olurken, ikincisinde ise; ergimiş haldeki metalin sürekli olarak dönen bir disk veya koni üzerine akıtılmasıyla metalin saçılarak toz haline gelmesini sağlamasıyla yapılmaktadır. Bu yöntem Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



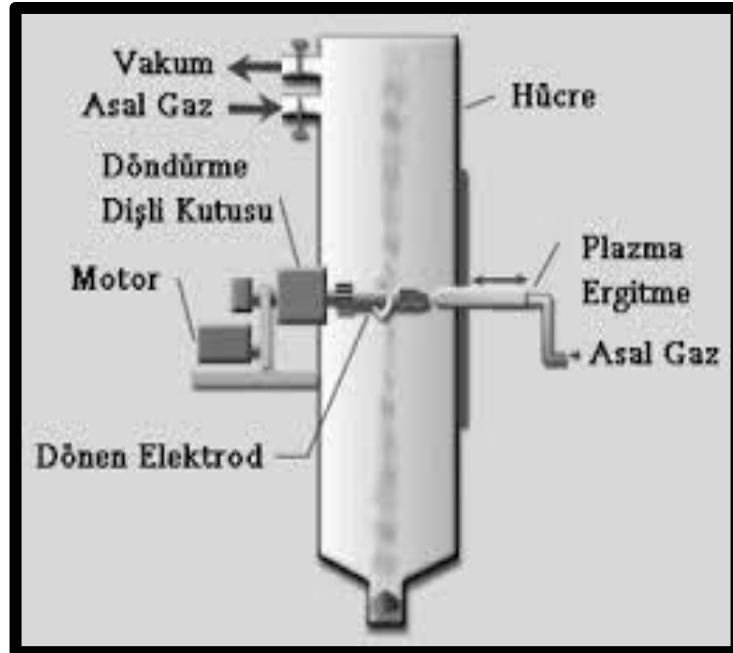
Şekil 3.6. Döner disk ile atomizasyon yöntemi [41].

Potada ergitilen metal sıvı halde tandişe aktarılır ve oradan da bir meme yardımı ile dönen bir disk üzerine akıtılır. Döner diske akıtılan sıvı metal disk üzerindeki set ve yarıklara çarparak parçalanır ve saçılır. Parçalanmış sıvı metal parçacıkları bazen nozuldan çıkmadan su ile soğutulmuş bir birine yapışmadan katılaşması sağlanır. Sıvı

haldeki metali mekanik olarak parçalamakta kullanılan bir yöntem de katılaşma esnasında karıştırmaktır [40].

3.1.4.2. Döner Elektrot ile Atomizasyon Yöntemi

Döner elektrot ile atomizasyon yönteminde genel prensip olarak tozu elde edilmek istenen metalden yapılmış bir elektrot ile ergimeyen tungsten elektrot arasında bir ark oluşturulmasıyla yapılmaktadır. Yöntem Şekil 3.7’de verilmiştir. Ergiyen elektrotun döndürülmesiyle elektrik arkı oluşmakta ve bu arkla birlikte ergiyen elektrotun ucunda oluşan metal damlacıkları dönme hızının etkisiyle savrulur ve parçalanır ve bir tankta toplanır. Toplama tankı oksidasyonu önlemek amacıyla argon, helyum gibi asal gazlarla doldurulur. Bu toz üretme yönteminde küresel şekilli ve oldukça eşit tane büyüklüğüne sahip metal tozu üretimi sağlanmaktadır [40].

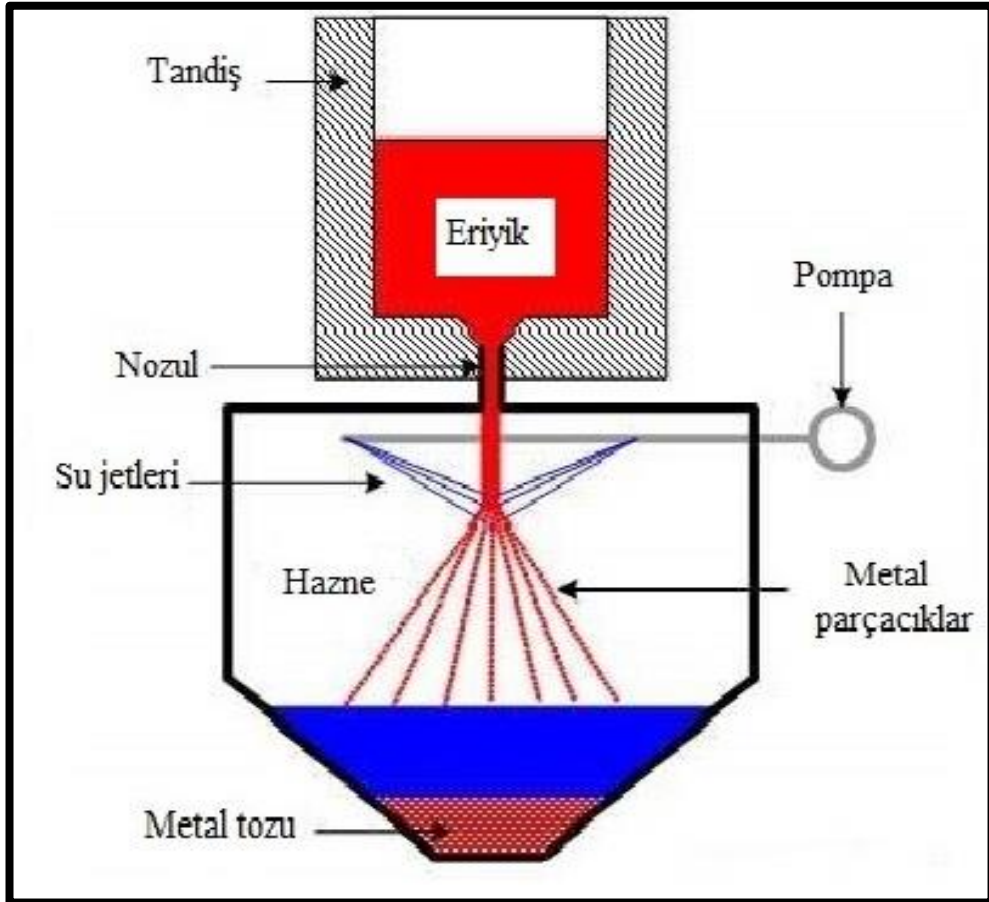


Şekil 3.7. Döner elektrot ile atomizasyonu yöntemi [40].

3.1.4.3. Su Atomizasyonu Yöntemi

1600⁰C den düşük ergime sıcaklığına sahip ve az reaktivite gösteren metallerin tozunun üretimi için su atomizasyonu yöntemi tercih edilmektedir. Yüksek basınca

sahip su jetleriyle yönlendirilen su ergimiş haldeki sıvı metale çarptırılarak parçalanmasını ve katılaşmasını sağlamaktadır. Genellikle su birden fazla su jeti kullanılarak yönlendirilmektedir. Bu yöntem Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Su atomizasyonu yöntemi [42].

Su atomizasyonu yönteminde ana kontrol değişkeni su basıncıdır. Yüksek su basıncının kullanımı yüksek su akış hızına yol açarak küçük tane eldesi sağlamaktadır. Suyun gaza oranla çok az sıkıştırılabilmesi ve yüksek yoğunluğa sahip olmasından dolayı ergiyik metal demetiyle nozul arasındaki mesafe çok önemli bir etken değildir. Su atomizasyonu yöntemiyle üretilen tozların ortalama tane boyutu ve dağılımına, suyun basıncı ve hızı, viskozitesi, yüzey gerilimi, yoğunluğu, sıvı metal akış hızının soğutma suyu akış hızına oranı gibi parametreler etki etmektedir [42].

3.1.4.4. Gaz Atomizasyonu Yöntemi

Toz metalürjisinde atomizasyon çeşitleri arasında en çok kullanılan yöntem gaz atomizasyon yöntemidir. Fırın içerisinde ergitilen metalin belirli bir sıcaklıkta nozul aracılığıyla dökülerek, akan metal üzerine azot veya helyum gibi basınçlı gazların verilmesiyle akan metal ergiyiğinin parçalanması ve sonrasında hızlı soğuyarak toz tanelerini oluşturması işlemine gaz atomizasyon yöntemi denir.

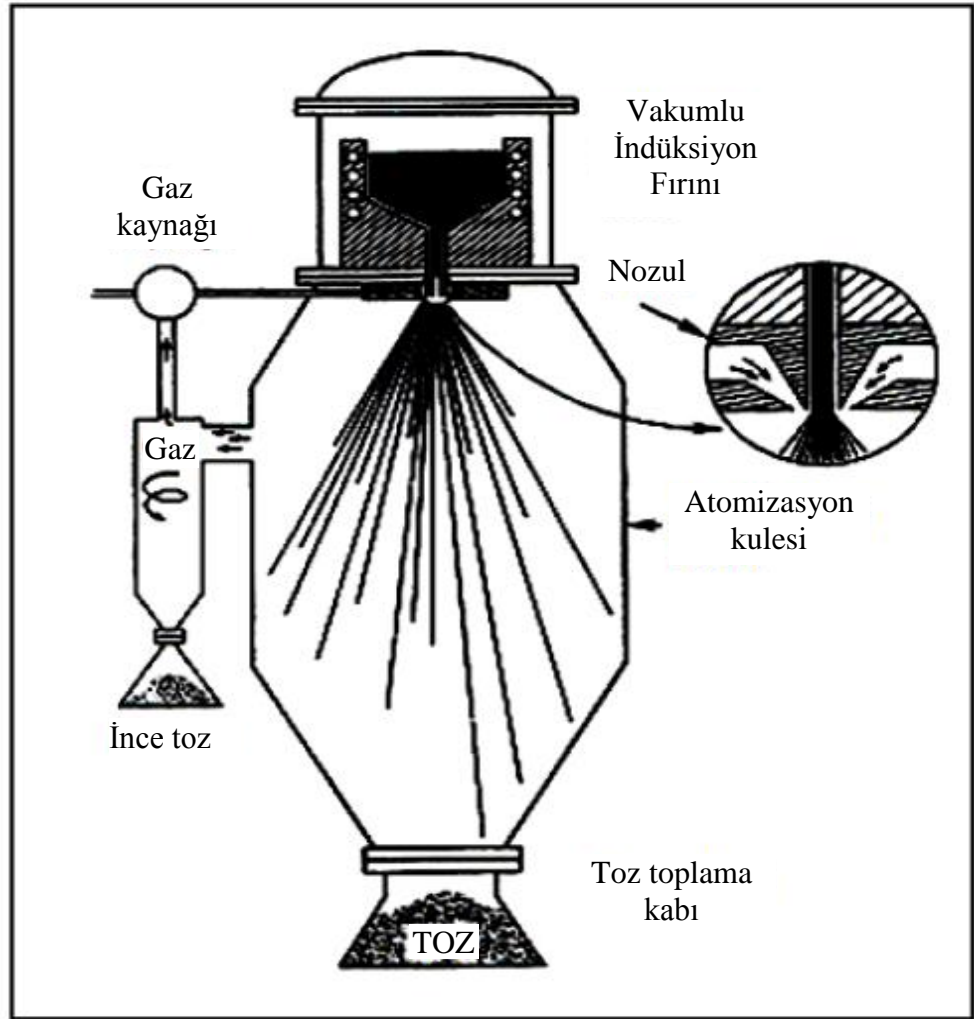
Gazın atomizasyonda üç farklı görevi vardır. Birincisi, kinetik enerjiyi erimiş metal malzemeyi kesmek ve parçalamak için gerekli olan damlacıklara iletmektir. Daha sonra atomizasyon kulesinde oluşan damlacıkların hızının ve yönünün belirlenmesine izin verir. En son olarak oluşan damlacıkların hızlı katılaşmasını sağlayarak tozu meydana getirir[43]. Bu yöntemde azot ve karbondioksit gibi aktif gazların yanı sıra helyum ve argon gibi soygazlar kullanılır. Soygazlar oluşturdukları küresel tozlar sayesinde en çok tercih edilen gaz çeşididir [44]

Gerçekleştirilen gaz atomizasyon sonucu imal edilen tozlarda genellikle aşağıdaki özellikler görünür [45];

1. Düzgün küresel toz geometrisi
2. Soğuma hızının yüksek olması sonucu hızlı katılaşma
3. Seri imalat için elverişli
4. Kimyasal kompozisyonun korunması

Gaz atomizasyon ile toz metal üretim sistemleri malzemenin beslenme mekanizmaları, erimiş malzemenin akışkanlık özelliği ve toz toplama haznesi gibi parametrelere göre farklı tasarımlarda bulunurlar. Bununla birlikte, genellikle malzemelerin gaz atomizasyonunda, soygaz doldurulmuş kapalı bir atomizasyon kulesine sahip dikey olarak monte edilmiş bir gaz atomizasyon sistemi kullanılır, böylece üretilen tozların oksidasyonu önlenir. Düşey olarak tasarlanmış gaz atomizasyon sisteminin resmi Şekil 3.9'da verilmiştir. Bu tür sistemlerde, malzemeler bir fırın içindeki eritme kabından belirli bir °C'nin üzerindeki bir sıcaklığa çıkarılır ve erimiş metal bir nozuldan boşaltılır. Atomizasyon kulesi, hazne

duvarına çarpmadan önce atomizasyon sırasında oluşan damlacıkların katılaşmasına izin verecek kadar büyük olmalıdır. Paslanmaz çelik malzeme genellikle bu kulelerin üretiminde kullanılır. Dikey olarak tasarlanmış gaz atomizasyon sistemlerinde, üretilen küçük boyutlu tozları topladığı ve gazın çıkmasına izin verildiği siklon adı verilen bir malzeme kullanılır. Bu şekilde siklon, atomizasyon kulesindeki gazın yarattığı basıncın yükselmesini önler ve tahliye edilmesini sağlar [46].



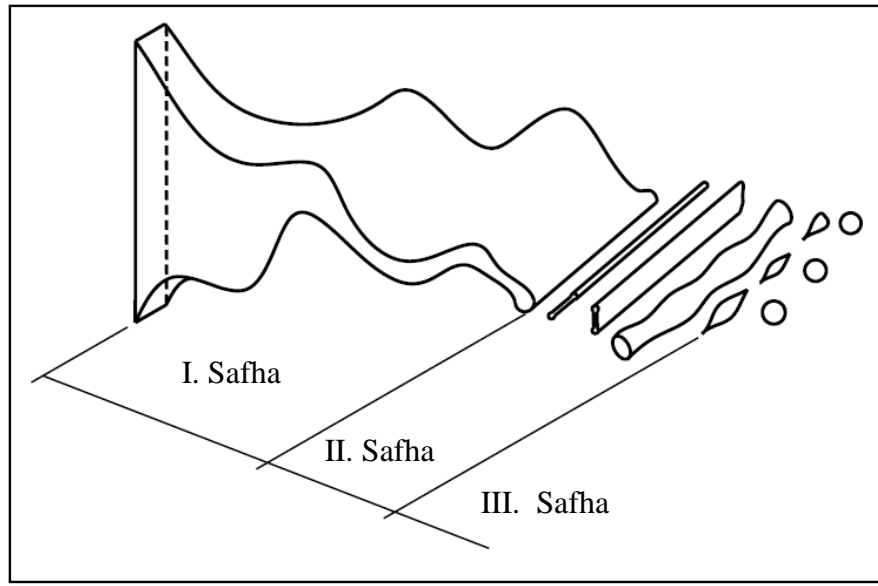
Şekil 3.9. Düşey olarak tasarlanmış gaz atomizasyon sistemi [46].

Nozuldan atomizasyon kulesine akan erimiş sıvı metal aniden metali çevreleyen gazın fiziksel özelliklerine, atomize edici gazın basıncına, memeye bağlı bir silindir, koni, plaka, ligament ve küresel toz şekli oluşturur. Bu düzenlemenin işleyişi üç aşamada gerçekleşir. Bunlar [47];

1. Gazın ani genişmesiyle sinüs dalgasının oluşumu
2. Oluşumun büyümesiyle ligamentlerin meydana gelmesi
3. Ligamentlerin bölünmesiyle küresel tozların oluşması

Gaz atomizasyon partiküllerinin katılaşması ve soğutulması, toz partikülleri atomizasyon odaları arasında uçurken meydana gelir.

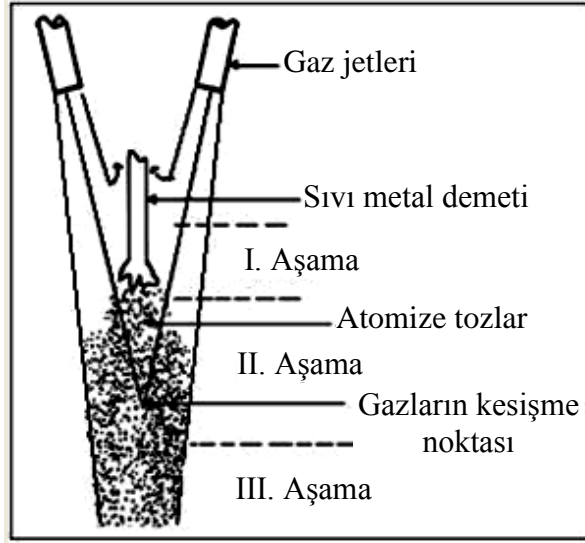
Dombrowski ve Johns [48] ligamentlerin bölünmesiyle tozların oluşma tasarımını Şekil 3.10'daki gibi göstermişlerdir.



Şekil 3.10. Ligamentlerin bölünmesiyle toz oluşumu [48].

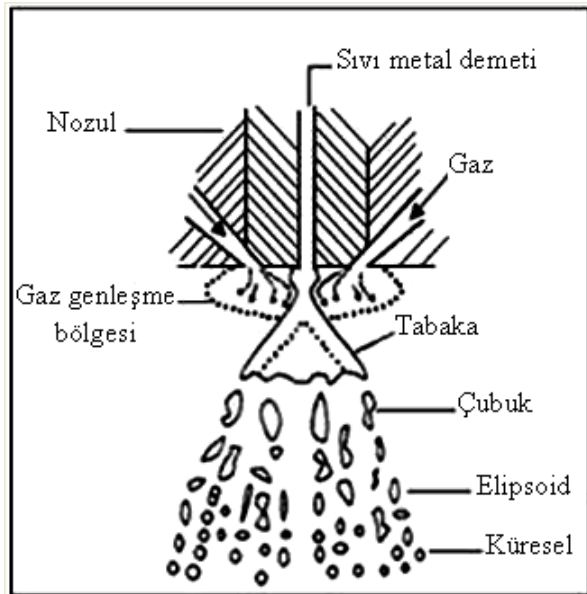
Gaz atomizasyon yöntemi mekanizmalarının modellenmesi Şekil 3.11'de belirtildiği gibi üç farklı safhada meydana gelmektedir. Bunlar;

1. Birincil safha
2. İkincil safha
3. Katılaşma



Şekil 3.11. Gaz atomizasyon sisteminde üç safhanın şematik gösterimi.

İlk aşamada, erimiş sıvı metal, basıncın değiştiği yüksek hızlı gaz akış bölgesine girer. Artan basınç, sıvı metal demetinden kopmalara neden olur. Basınç, yüzey enerjisi nedeniyle yeniden yapılandırma enerjisini aşarsa, ikincil aşama meydana gelir ve üçüncü aşamada, katılaşma ve zaman nedeniyle küresel metal parçacıkları oluşmaya başlar. German [46] See ve Johnston'un gaz atomizasyonunun aşamalarını ve metal tozu oluşumunu açıkça göstermektedir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Metal tozu oluşum aşamaları [48].

3.2. TOZ METALURJİSİ İLE PARÇA İMALATI

3.2.1. Karıştırma ve Harmanlama

Tozların karıştırılması, çok bileşenli tozlar için uygulanan işlemdir. Harmanlama ise genellikle tek bileşenli tozlar için uygulanan bir işlemdir. En iyi karıştırma, tozun hacmi karıştırıcının hacminin % 50 ila 60'ı olduğunda meydana gelir. Genellikle karıştırma süresi genellikle 5 ila 30 dakika arasında olduğunda başarı elde edilmiştir [49].

Metal tozlarının karıştırılması genellikle çift borulu ve çift konili karıştırıcılarda V veya Y tipi karıştırıcılar vasıtasıyla gerçekleştirilir (Şekil 3.13). Karıştırma süresinin daha uzun tutulması, granüllerin parçalanmasına, küreselleşmesine ve plastik deformasyona uğramasına neden olur. Bu nedenler tozun sıkışabilirliğini azaltır. Karıştırmanın en önemli kısmı, tozun her bölmesinde homojenliği sağlamak için bileşimi iyi ayarlamaktır [50].



Şekil 3.13. Toz karıştırma turbulası.

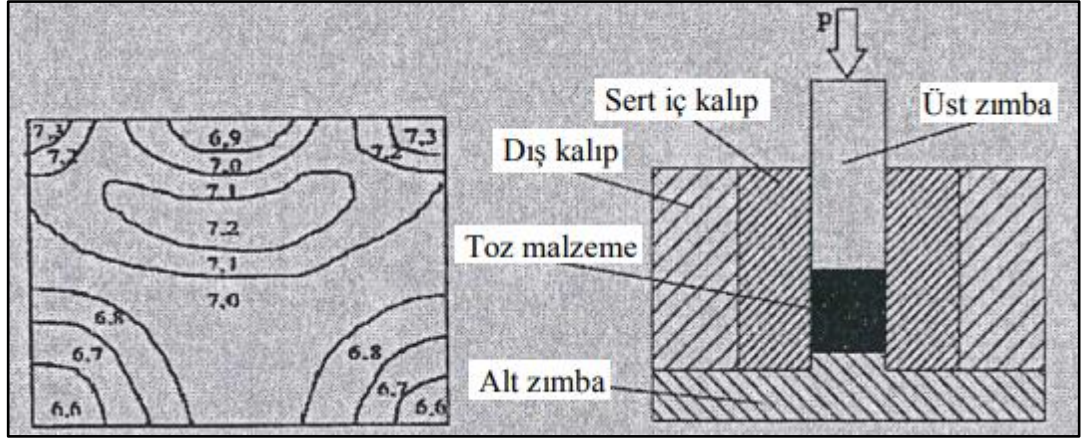
3.2.2. Tozların Şekillendirilmesi

Tozların şekillendirilmesinde, tozların yoğunluğunun görünen yoğunluğa yaklaşık olarak eşit olduğu kabul edilir. Tozlara uygulanan basıncı arttırarak, toz parçacıkları arasındaki nokta teması bozulur ve basınçtaki artışa bağlı olarak gözeneklilik miktarı azalır. Ayrıca, artan basınç nedeniyle plastik deformasyon ve yoğunluk artar [51]. Tozların kısmi şekillendirilmesi genellikle soğuk presleme, sıcak presleme ve ekstrüzyon işlemleri ile gerçekleştirilir.

3.2.2.1. Sıcak ve Soğuk Presleme

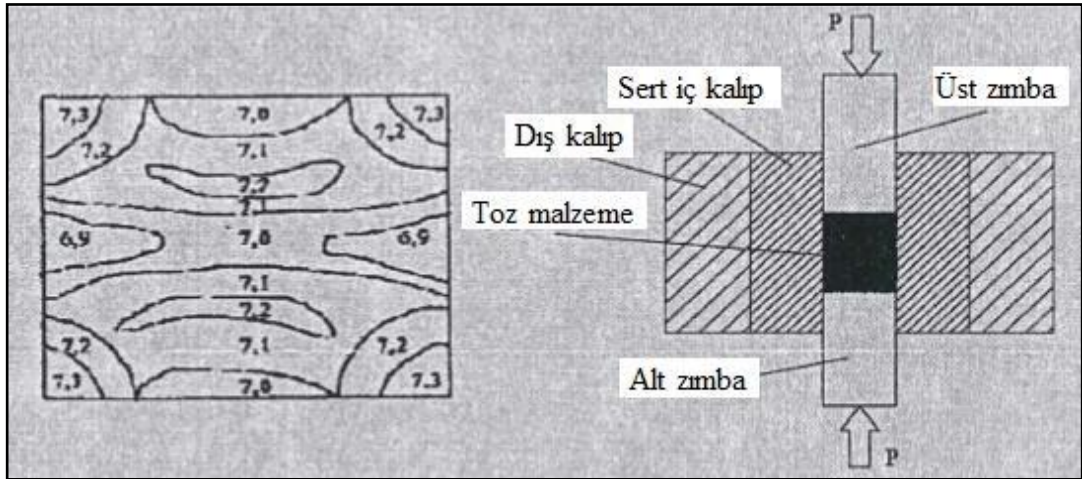
Genel olarak presleme işlemi; İki zımba kalıbın içine yerleştirilen tozların iki eksenine üzerine yüksek basınç uygulanmasıyla tanımlanır. Presleme, basit parçaların seri üretiminde yaygın olarak kullanılır. Basınç uygulanarak elde edilen kısma “Bulk” denir. Bulk terimi, henüz yeterince sıkıştırılmadığı anlamına gelir. Bulk malzemenin mukavemeti çok düşüktür, ancak sinterlemeden sonra nihai ürünün mukavemeti çok yüksektir [52].

Tek yönlü presleme işleminde, deformasyon işleminin başlamasıyla birlikte, tozlar arasında ve toz kalıbın içinde oluşan sürtünme kuvveti dağılımında düzensizliğe neden olur. Bu düzensizlik, uygulanan basıncın dağılımını önemli ölçüde etkiler. Tozun yoğunluğu hareketli zımbanın bölgelerinde yüksektir, ancak sabit zımbanın bölgelerinde düşüktür. Tek yönlü preslemede, yoğunluk dağılımı Şekil 3.14'te gösterildiği gibi dağıtılır. Yoğunluk miktarındaki bu azalma, üretilen parçanın uzunluk / çap oranına bağlıdır. Tek yönlü preslemede, presleme işleminden önce kalıba doldurulan toz yüksekliğinin kalıp çapına oranı, presleme işleminden sonra yoğunluk dağılımını önemli ölçüde etkiler. Bu sebeplerden dolayı; yükseklik/çap ≤ 4 olması tavsiye edilmektedir [53].



Şekil 3.14. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve tek yönlü kalıbın şematik gösterimi [53].

Tozun iki yönlü preslenmesi, alttan ve üstten üst üste aynı anda iki zımba ile çalışma işlemidir (Şekil 3.15). Her iki yönde de eşit miktarda basınç uygulanır. İki yönlü presleme ile kalıpta düzenli bir sıkıştırma oluşur. Yoğunluk dağılımı, tek yönlü presleme ile üretilen parçaların yoğunluk dağılımından daha homojendir [53].



Şekil 3.15. Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve çift yönlü kalıbın şematik gösterimi [53].

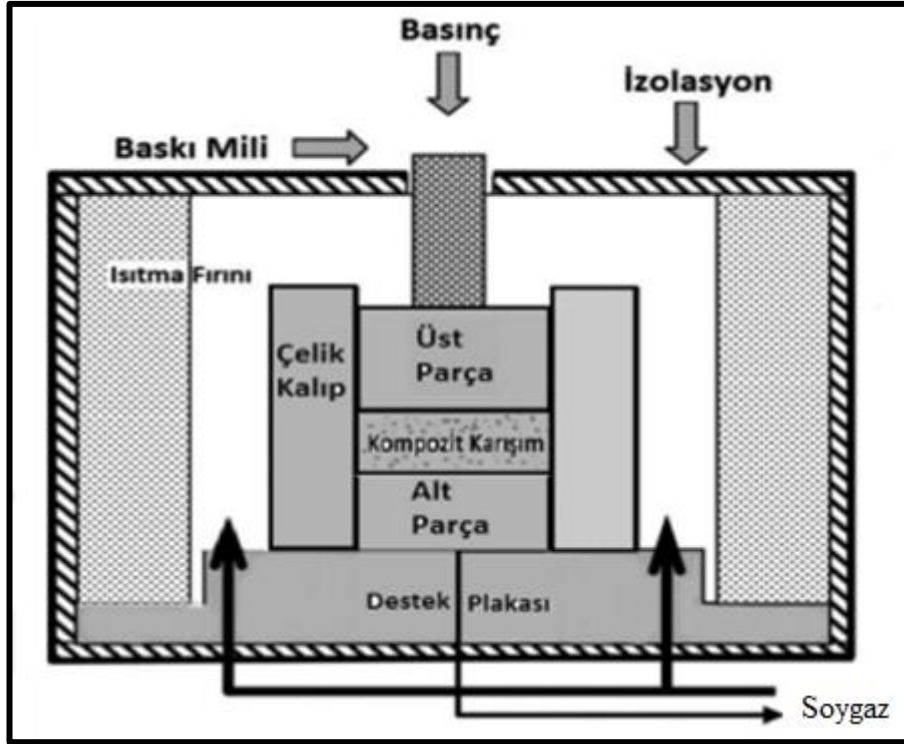
Sıcak presleme presleme ve sinterlemeyi tek bir işlemde birleştirir ve yüksek mukavemet özelliklerine sahip pratik gözeneksiz parçaların üretimine izin verir. Bununla birlikte, bu yöntem esas olarak düşük süneklikten ve karbürler, boridler, nitrürler ve diğer malzemeler gibi refrakter bileşiklerden parçalar yapmak için kullanılır. Mevcut toz metalurjik üretim tekniklerini (sinterleme ve sıcak presleme ile

sıkıştırma) geliştirmeye ek olarak, düşük gözenekli malzemelerin üretilmesi için diğer yöntemleri incelemek giderek daha önemli hale gelmektedir, çünkü son özellik sinterlenmiş parçaların özelliklerinin çoğunu yönetmektedir [54].

Sıcak presleme yöntemleri tek eksenli veya çift eksenli yürütülebilir. Oksidasyonu önlemek amacıyla presleme işlemi sinterlemede olduğu gibi atmosfer kontrollü ortamda gerçekleştirilir. Bu sebeple sıcak pres kalıplarının çalışma ömürleri yüksek olur. Kalıp malzemesi olarak en çok grafit tercih edilir. Grafit malzemesinin yanı sıra tungsten karbür ya da bor nitrür gibi sert malzemeler de tercih edilir. Sıcak preslemenin avantajlarından bazıları şunlardır;

1. Düşük maliyetli imalat
2. Sıkıştırma ve sertleştirme işlemlerinin aynı anda yapılması ile zamanda ve maliyette tasarruf
3. Düşük basınçlarda çalışılabilmesi
4. Yüksek bağıl yoğunluk [55]

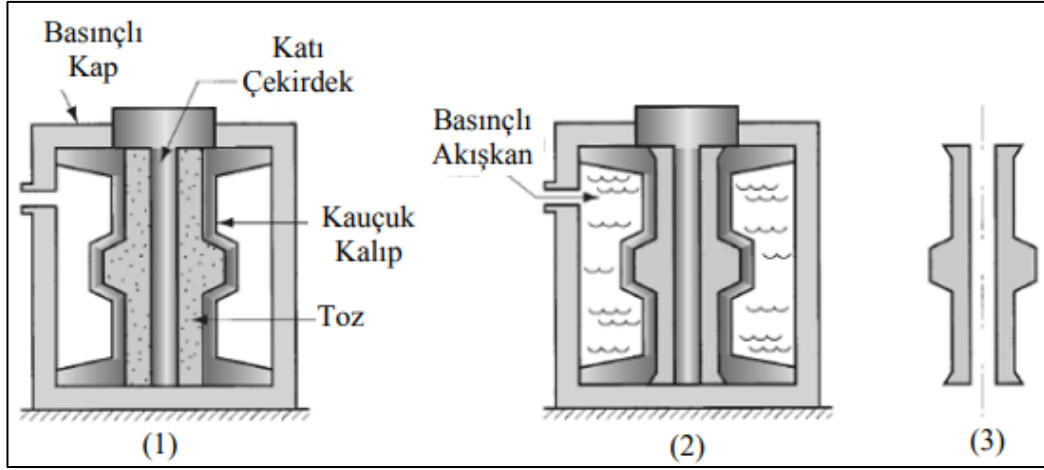
Sıcak presleme yöntemi başta havacılık ve savunma sanayiide kullanılmak üzere aşınma direnci yüksek, hafif ve yüksek bağıl yoğunlukta parçaların üretiminde geniş yer kaplamaktadır [56]. Sıcak pres yönteminin genel şeması Şekil 3.16'da verilmektedir.



Şekil 3.16. Sıcak presleme şematik gösterimi [57].

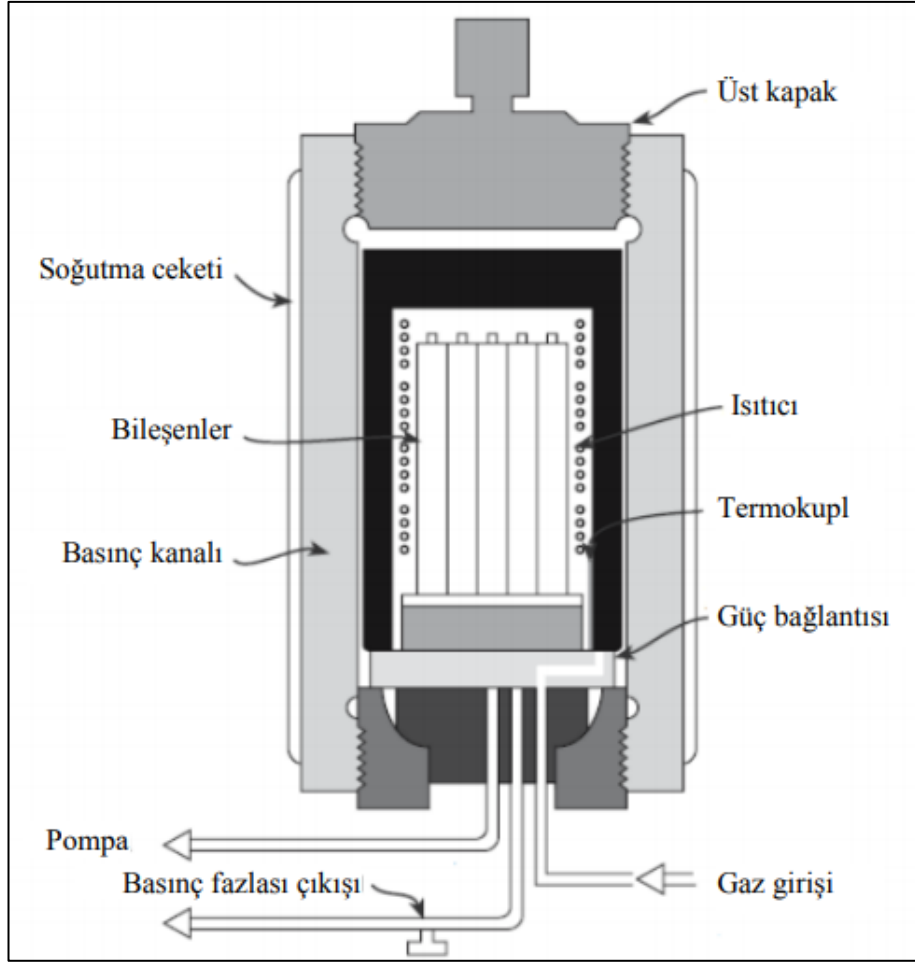
3.2.2.2. Sıcak ve Soğuk İzostatik Presleme

İzostatik presleme yöntemi, toz presleme sırasında uygulanan basınçların her yöne eşit olarak uygulandığı bir yöntemdir (Şekil 3.17). Soğuk izostatik presleme genellikle uzunluk ve çap oranının büyük olduğu karmaşık aşamalara sahip parçalara uygulanır. Toz, kalıp olarak kullanılan kapalı elastik bir kaba yerleştirilir ve kapatılır. Kalıptaki hava kalıptan önceden boşaltılır çünkü presleme sırasında serbest bırakılacaktır. Boşaltmadan sonra kalıp sıvı banyosundaki bir basınçlı kaptadır bırakılır. Kalıp, sıvıya yüksek basınç uygulanarak hidrostatik basınca maruz bırakılır. Kalıp sıvı banyosundan çıkarılır ve parçadaki yumuşak kalıp çıkarılır. Bu yöntem preslenmiş parçaların homojen yoğunluk dağılımına yol açar [58].



Şekil 3.17. Soğuk izostatik preslemenin şematik gösterimi [53].

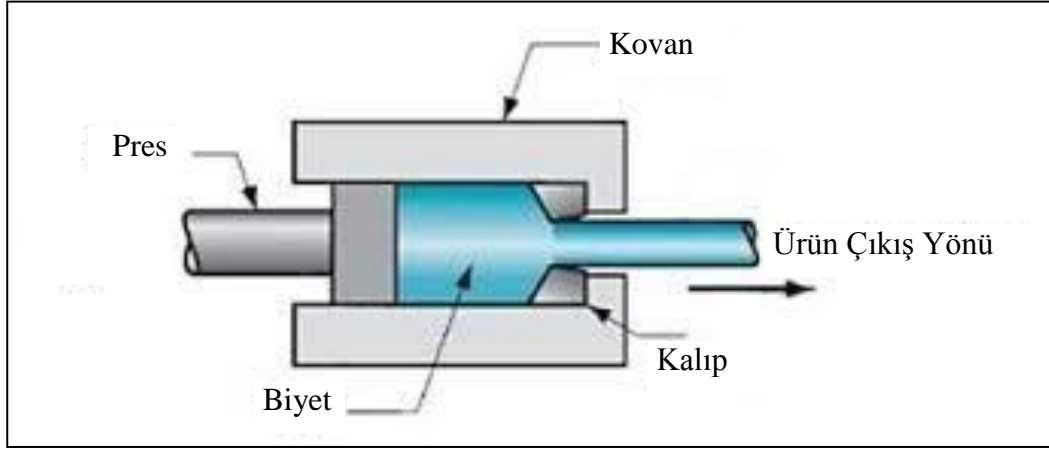
Sıcak izostatik presleme, sadece aksel basıncı uygulanan sıcak presleme yöntemine kıyasla her yönden basıncın uygulandığı ve esnek kalıpların kullanıldığı bir yöntemdir (Şekil 3.18). Bu yöntemde, tozu içeren kalıba üç eksenden aksel olarak gaz basıncı uygulanırken aynı anda sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemin soğuk izostatik presleme ile tek farkı, basınçlı bölmenin ek bir sistem tarafından ısıtılmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda basınç uygulandığında, olumsuz reaksiyonları önlemek için argon veya helyum gazı kullanılır. Sıcak izostatik preslemede, işlem sıcaklığı 2000 °C'ye kadar ulaşabilir, basınç 30 ila 400 MPa arasındadır. Sıcak izostatik presin en önemli avantajı, yüksek yoğunluklu malzemelerin tane büyümesi olmadan üretilmesidir. Bu yöntemle mikro yapının istenen özellikleri kontrol etmesi zordur, ancak parça şekli tutarlılığı çok yüksektir [58].



Şekil 3.18. Sıcak izostatik preslemenin şematik olarak gösterimi [59].

3.2.2.3. Ekstrüzyon

Toz karışımlar yüksek kuvvetlerde dar kalıp içerisinde sıkıştırma işleminin sonucunda basılarak şekillendirilme işlemine ekstrüzyon denir (Şekil 3.19). Genel olarak, boru veya uzun çubuk olarak imal edilmesi gereken parçaların periyodik olarak kesilmesi ile seri üretimin gerekli olduğu yerlerde uygulanan bir işlemdir [60,61]. Bununla birlikte; Toz karışımlar, kalıplar farklı şekillerde preslenerek enjeksiyon kalıplama tekniği ile işlenebilir.



Şekil 3.19. Toz metaller için ekstrüzyon işlemi şeması.

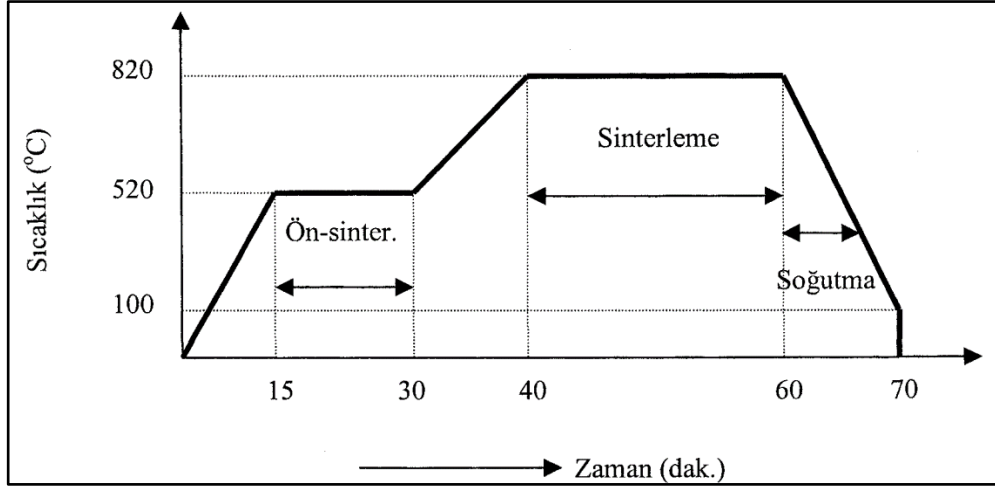
3.2.3. Tozların Sinterlenmesi

Sinterleme, oluşan toz metal parçaların birbirine bağlanmasını sağlayan, önemli mukavemet artışı ve geliştirilmiş özellikler ile sonuçlanan bir tür ısıl işlemdir. Sinterlemenin etkili olması için en önemli faktör tozların birbirleriyle sıkı temasta olmasıdır. Bu bağlamda preslenmiş veya kalıplanmış tozlara sinterleme uygulanır [60].

Sinterleme, preslenen parçaların kontrollü bir atmosferde ve yüksek sıcaklıkta istenen nihai özellikleri elde etmek için gerekli olan ısıl işlemidir. Sinterleme sıcaklığında; Metallerin erime sıcaklığının %70-80'i alınır, bazı refrakter malzemeler, erime sıcaklığının %90'ı ulaşır. Birden fazla malzeme ile karıştırılan ve preslenen parçalarda, sinterleme sıcaklığı bazı bileşenlerin erime sıcaklığının üzerinde olabilir. Bu gibi durumlarda, düşük erime noktalı malzemeler erir ve yüksek erime sıcaklıklı tozlar arasındaki boşlukları doldurur.

Sinterleme işlemi genellikle 3 aşamada meydana gelmektedir (Şekil 3.20). Bunlar;

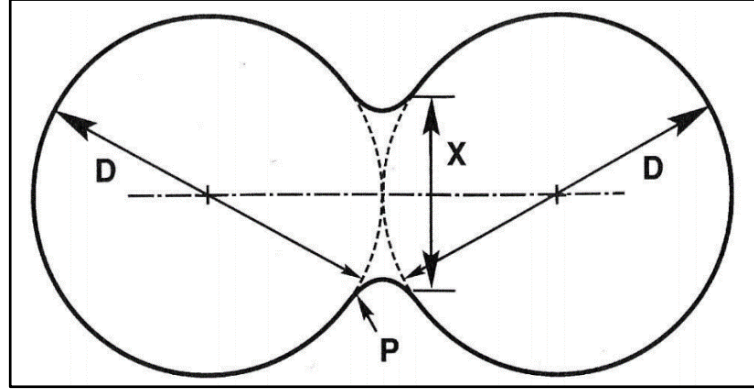
1. Yanma veya temizlenme bölgesi
2. Yüksek sıcaklık bölgesi
3. Soğutma bölgesi



Şekil 3.20. Sinterleme işleminin aşamaları [61].

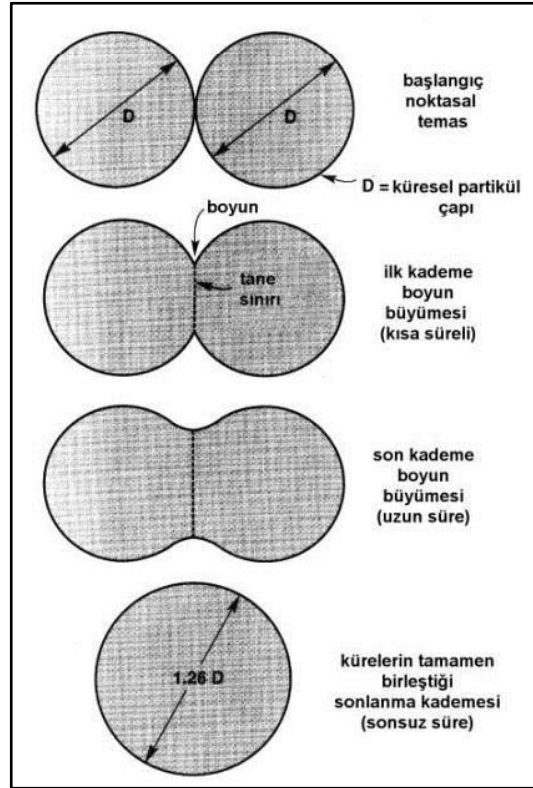
İlk yanma ve temizleme bölgesi, hava ve yanma ile yağ ve bağlayıcıların uzaklaştırıldığı bölgedir. Malzemedeki yağlayıcıların ve bağlayıcıların temizlenmesi düşük ısıtma hızlarında gerçekleşir. Yüksek ısıtma hızlarında; genellikle, gözeneklerdeki bağlayıcı ve hava yanması iç basıncı yaratarak parçanın parçalanmasına yol açar. Yüksek sıcaklık bölgesinde, parçacıklar arasında bağlar oluşmaya başlar. Bu katı hal difüzyonu ile gerçekleşir. Metaller arası fazların ve katı çözeltilerin oluşumu, katı hal difüzyonu ile gerçekleşir. Yüksek sıcaklıkta, birbirleriyle temas eden parçalar arasında bir bağ oluşur ve bağ, atomların karşılıklı transferi ile güçlendirilir. Bu bölgede kalma süresi, istenen yoğunluk ve özelliklere göre değişir. Bekleme süresi genellikle 10 dakikadır, birkaç saat arasında. Soğutma bölgesi atmosfer altında kontrol edildiğinden oksidasyon önlenir. İnce toz parçacıkları sinterlemeden önce tam temas sağlamadığı ve artık gözeneklilik içerdiğinden, atmosferik kontrol her üç aşamada da gereklidir [52].

Sinterlemenin başka bir ölçüsü, boyun çapının küre çapına oranıdır. (X/D) ve Şekil 3.21'de gösterildiği gibi boyun çapı, küre çapının bölünmesiyle belirlenir. Şekilde P ile gösterilen bölgeye boyun dairesel profilinin yarıçapı denir. Gerçek boyun büyümesine ek olarak, sinterlenmiş bir kütle kasılır (yani gözenekler atılır), yoğunlaşır ve gücü artırır.



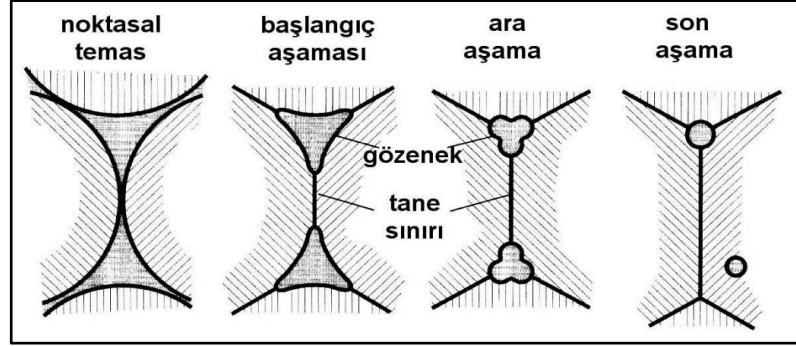
Şekil 3.21. Toz tanelerinin sinterleme profili [62].

Şekil 3.21'de gösterilen iki birleştirme parçası göz önüne alındığında, sıkıştırılmış bir toz istifinde benzer birçok birleştirme bölgesi vardır. Sinterleme işlemi ilerledikçe, temas eden parçacıklar arasındaki bağlar genişler ve birleşir. Her birleşme ile bir sınır büyür. Şekil 3.22'de gösterildiği gibi, uzun bir sinterleme süresi, başlangıç çapının 1,26 katı olan tek bir kürenin oluşması ile sonuçlanır.



Şekil 3.22. İki tanenin sinterleme modeli [63].

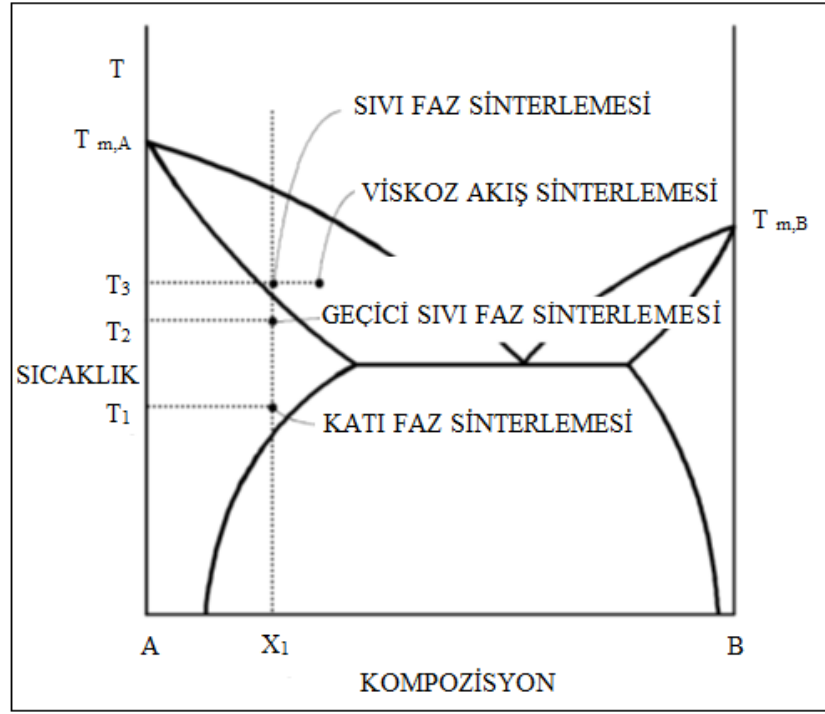
Şekil 3.23'te gösterildiği gibi, sinterleme sırasında gözenek yapısının değişimini gösteren şematik resim parçacıkların nokta teması ile başlar. Boşluk hacmi yavaş yavaş azalır ve boşluklar daha küresel hale gelir. Boşluk küreselleşmesi gerçekleşirken boşlukların yerini tane sınırları aldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3.23. Sinterleme işlemi sırasında taneler arası gözeneklerin değişimi ve tane sınırlarının oluşması [63].

3.2.3.1. Katı Faz Sinterleme

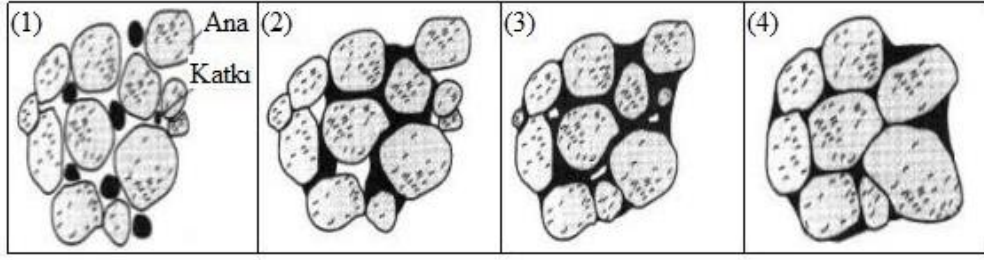
Sinterleme işlemi sırasında toz taneciklerinin tamamının katı halde bulunması ve ergime işleminin hiçbir element için gerçekleşmemesi sonucu oluşan sinterleme işlemine "Katı faz sinterleme" adı verilir. Katı faz sinterleme işlemi Şekil 3.24'de verilen diyagramda gösterilmektedir. Diyagramda T1 sıcaklığında A ile B arasında X1 bileşiminde katı hal sinterlemesi meydana gelmektedir.



Şekil 3.24. Sinterleme faz diyagramı [64].

3.2.3.2. Sıvı Faz Sinterleme

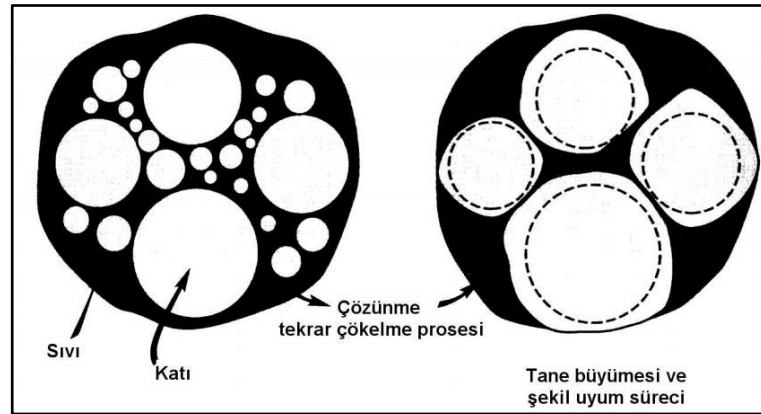
Sıvı faz sinterleme, preslenmiş toz karışımı sıvı fazın olduğu sıcaklıkta sinterlenir. Sıvı fazın oluşumu ile ani bir büzülme meydana gelir. Bu büzülme sırasında katı partiküller sıvı fazda yeni bir düzene girer. Sıvı faz sinterlemesi, sinterleme sırasında toz içinde bir sıvı faz oluştuğunda meydana gelir. Sıvı faz sinterlemesini gösteren diyagram Şekil 4.23'te verilmektedir. Diyagramda, sıvı faz sinterlemesi T₃ sıcaklığında X₁ bileşiminde meydana gelir. Sıvı faz sinterlemesinde sıvı faz miktarı yüzde 20'yi aşamaz. Sıvı faz sinterlemesinde seramik tozlarını düşük sıcaklıkta ve kısa sürede sinterlemek mümkündür. Ancak, sıvı faz sinterlemesi ile üretilen parçalar yüksek sıcaklıklarda kullanım için uygun değildir [64].



Şekil 3.25. Sıvı faz sinterlemenin şematik gösterimi [64].

Ana toz sinterleme sırasında katı kalırken, ilave toz sıvı faz oluşumunu sağlar. Şekil 3.25 4 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, tozlar ham gözükmetedir. İkinci bölümde, sıvı faz difüzyonu meydana gelir. Üçüncü bölümde, eriyik çökeltme işlemi meydana gelir. Son olarak, dördüncü bölümde, sıvı faz sinterleme işlemi tamamlanmış ve malzemenin katı iskeleti görülmüştür.

Şekil 3.26’da küçük boyutlu tanelerin büyük boyutlu taneler üzerinde çökelmeleri ile oluşan katı ergiyikten tekrar çökmesi ile tane büyümesi gerçekleşir. Tane büyümesinin yanında sinterleme işlemi tane şekil uyum sürecini de verir. Böylece katı daha iyi paketlenir ve kalan herhangi bir gözenek sıvı ile daha iyi dolduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.26. Sıvı faz sinterleme işleminde çökeltme ve tane büyümesi [64].

BÖLÜM 4

MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

Son yıllarda, magnezyum ve alaşımlarının önemi, performans iyileştirmede ağırlık tasarrufunun önemli olduğu mühendislik uygulamalarında hafif malzeme kullanımı ile otomotiv, havacılık, iletişim ve iletişim endüstrilerinde artmıştır.

Magnezyum alaşımlarının kullanımına yönelik artan talep ile, toz metalurjisi tarafından üretilen kompozit malzemelere olan talepte büyük bir artış bulunmaktadır. Al, Ti, Zn ve Fe gibi metallerle karşılaştırıldığında, 1.74 g/cm^3 düşük yoğunluğa sahip magnezyum, alüminyum alaşımlardan yaklaşık %35 daha hafif ve titanyum alaşımlardan %65 daha hafiftir [65,66]. Magnezyum, oda sıcaklığında yüksek mukavemet/yoğunluk ve yüksek elastikiyet/yoğunluk oranı modülü ile alüminyum ve titanyum gibi malzemelerden daha avantajlıdır. Ayrıca, mükemmel dökülebilirlik, kaynaklanabilirlik ve yüksek termal iletkenlik gibi avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, magnezyum kristali, sadece 3 kayma sistemi, sınırlı süneklik ve tokluk ile sıkı paket hegzagonal (sph) kafes yapısına neden olur. Magnezyum soğuk şekillendirme işlemlerinin gerçekleştirilmesi zordur ve bu nedenle şekillendirme işlemlerinin yüksek sıcaklıklarda yapılması gerekmektedir [67,68].

Magnezyum düşük bir erime sıcaklığına sahiptir ve bu nedenle yüksek sıcaklıklarda kullanımı çok zordur. Sürünme direnci yaklaşık $100 - 200 \text{ }^\circ \text{C}$ 'nin üzerinde düşer. Buna ek olarak, yükseltilmiş sıcaklıklarda oksidasyon direnci azalır ve ortaya çıkan oksit tabakası oksidasyonu hızlandırır [69,70]. Bununla birlikte, magnezyum alaşımlarının mekanik özellikleri, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda sünme ve oksidasyon direncini arttırmak için geliştirilir. Magnezyum esaslı kompozit malzeme ürünleri, sağladığı birçok avantajla birlikte kullanım alanları giderek artmaktadır.

Ticari saflıkta magnezyum ve magnezyum alaşımları daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda daha kullanışlıdır. Bu nedenle, mühendislik uygulamalarında magnezyum ve magnezyum esaslı kompozit malzemelerin kullanımı günden güne genişlemektedir [71].

4.1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Magnezyum hegzagonal kristal kafes (hsp) yapıya sahiptir ve kenar uzunlukları $a = 0.320$ nm, $c = 0.520$ c/a = 1.624 nm'dir. Magnezyum 1.74 g / cm³ yoğunluğa sahiptir ve bu da onu tüm mühendislik malzemelerinin en hafifi yapmaktadır. Tablo 5.1 saf magnezyumun özelliklerini vermektedir. Alüminyumdan (2.7 g / cm³) yaklaşık iki kat, çelikten (7.86 g / cm³) dört kat daha hafiftir [72, 73]. Genel özellikleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Magnezyumun özellikleri.

Atomik numara	12
Atomik kütle	24.31 g/g.mol
Renk	Gümüşümsü gri metal
Yoğunluk	20 °C'de 1.738 g.cm ⁻³ 650 °C'de 1.58 g.cm ⁻³
Ergime sıcaklığı	650 °C
Kaynama derecesi	1103 °C
Kristal yapısı	Sıkı paket hegzagonal
Yanma ısısı	25020 kJ.kg ⁻¹
Parlama sıcaklığı	2800 °C
Buharlaşma ısısı	5272 kJ.kg ⁻¹
Özgül ısısı	20 °C'de 1025 J.K ⁻¹ .kg
Buhar basıncı	527 °C'de 20 Pa 650 °C'de 360 Pa 1727 °C'de 400 Pa

Magnezyum reaktif bir metal olduğu için, doğada metalik olarak bulunmaz. Doğada, kalsiyum bileşikleri ve oksit silikat veya karbonat formunda bulunur. Magnezyum yüksek bir reaktiviteye sahip olduğundan, üretim sırasında yüksek enerjiye ihtiyaç

vardır. Bu sebepten magnezyum ucuz bir metal değildir. [74]. Magnezyumun avantajlarına aşağıdaki gibi örnekler verilebilir;

1. Mühendislik metalleri içinde en hafifi olması,
2. Elektromanyetik koruma özelliğinin güçlü olması
3. Mukavemet/yoğunluk oranının yüksekliği
4. Titreşim ve darbe absorbe kabiliyeti,
5. Yüksek dökülebilirlik,
6. Uygun atmosfer şartları altında kaynak edilebilirlik,
7. İyi korozyon direnci,

Polimer malzemelere göre değerlendirildiğinde;

1. Daha iyi mekanik özellikler,
2. Daha iyi yaşlanma süresi,
3. Termal elektrik iletkenliğinin yüksek olması,
4. Tekrar kullanılabilme özelliği,

Diğer mühendislik malzemeleri gibi magnezyum alaşımlarının bazı sınırlayıcı dezavantajları vardır [75]. Bu özellikler aşağıda verilmiştir;

1. Elastisite modülünün düşük olması,
2. Sınırlı soğuk şekil değiştirme kabiliyeti ve tokluk,
3. Yüksek sıcaklıklarda sürünme direncinin düşük olması,
4. Katılaşma esnasında çekme oranının yüksek olması,
5. Kimyasal reaktivite özelliğinin yüksek olması,
6. Düşük korozyon direnci.

Magnezyum alaşımlarının düşük erime sıcaklığı (650 °C), uygulamasını sınırlayan başka bir dezavantajdır. Magnezyumun alüminyum, çinko, manganez, nadir toprak elementleri, toryum ve zirkonyum gibi elementlerle alaşımı, yüksek sıcaklıklarda kayma direnci, mukavemet, ağırlık azaltma ve atalet kuvvetleri azaltımı sağlar [76, 77]. Bu alaşım özelliğinden dolayı çelik, bakır bazlı alaşımların, dökme demirlerin

ve hatta alüminyum alaşımlarının yerini almıştır [74]. Magnezyum ve magnezyum alaşımları, yapısal uygulamalar olarak otomotiv, endüstriyel, malzeme taşıma, ticari ve uzay ekipmanlarını içerir. Organik kimyada yapısal olmayan uygulamalarda kullanılır [78]. Son yıllarda magnezyum, çift, üçlü ve çoklu magnezyum esaslı alaşımlar incelenmiş ve farklı alaşım sistemleri elde edilmiştir. Diğer alaşım sistemlerine kıyasla, bu alaşım sistemleri yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve düşük fiyatlar gibi nedenlerle tartışılmıştır. Magnezyum, düşük yoğunluğu, yüksek özgül ısı kapasitesi, yüksek ses emilimi ve termal iletkenliği nedeniyle birçok sektörde kullanılabilen bir metaldir [79].

4.2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Magnezyum alaşımları, 160-300 N/mm² çekme dayanımı, %0.2 verim kuvveti 80-190 N/mm² ve kopma uzaması %2-15 gibi mekanik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, sıcaklık arttıkça, magnezyum alaşımlarının mukavemeti azalır ve oda sıcaklığında süneklikleri düşüktür. Yüksek sıcaklıklarda akma ve çekme dayanımı arasındaki fark azalır. Hegzagonal kristal kafes yapısı ve 3 kayma düzlemi olan magnezyumun yüzey merkezli kübik yapısı ve 12 kayma düzlemi ile alüminyumdan soğuk şekillendirilmesi daha zordur. Bir kristaldeki kesme sistemlerinin sayısı arttıkça, malzemenin deformasyonu kolaylaşır, yani süneklik artar. Magnezyumda, etkisiz kesme düzlemleri 210 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda aktive olur, bu nedenle sıcaklık arttıkça magnezyumun sünekliği de artar [80].

4.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Magnezyum alaşımları genellikle döküm alaşımlarına ve dövme alaşımlarına ayrılabilir. Magnezyum döküm alaşımları kum ve kalıp döküm alaşımları ve dövme alaşımları şeritler, plakalar, ekstrüzyonlar ve dövme alaşımlar halinde alt gruplara ayrılabilir. Bazı magnezyum alaşımlı ürünler ısı işlem görmezken, diğerleri ısı işleminden geçirilebilir. [81, 82].

Magnezyum alaşımları genellikle iki büyük harf ve ardından iki veya üç basamak ile tanımlanır. Harfler, magnezyum alaşımındaki iki temel alaşım elementi hakkında

bilgi verir. İlk harf en yüksek konsantrasyon ögesini ve ikinci harf ikinci en yüksek konsantrasyon ögesini temsil eder. Harfleri izleyen ilk sayı, ilk harfle gösterilen ögenin ağırlıkça yüzdesini temsil eder (yalnızca iki basamak varsa) ve ikinci sayı, ikinci harfle gösterilen ögenin ağırlıkça yüzdesini temsil eder. A ve B gibi harfler bu sayıları takip ederse, bu genellikle safsızlık seviyelerinde alaşım için bir değişikliği gösterir. Bu harfler ve sayılar standart olarak gruplandırılmıştır (Çizelge 4.2). Örneğin, AZ91D gösterimi. Bu tanım, magnezyum alaşımının ağırlıkça %9 alüminyum, %1 çinko içerdiğini ve AZ91 alaşımının bir D modifikasyonu olduğunu gösterir [83].

Çizelge 4.2. Magnezyum alaşımlarının standartlarla gösterimi [83].

AE Serisi	Magnezyum, alüminyum ve nadir toprak alaşımları-Örn:AE42
AJ Serisi	Magnezyum, alüminyum ve stronsiyum alaşımları- Örn:AJ52 HP (Yüksek Basınç)
AM Serisi	Magnezyum, alüminyum ve mangan alaşımları-Örn:AM60B
AS Serisi	Magnezyum, alüminyum ve silisyum alaşımları-Örn:AS31
AZ Serisi	Magnezyum, alüminyum ve çinko alaşımları-Örn:AZ91D
EQ Serisi	Magnezyum, nadir toprakgümüş ve bakır alaşımları-Örn:EQ21
EZ Serisi	Magnezyum, nadir toprak ve çinko alaşımları-Örn:EZ33A
HM Serisi	Magnezyum, toryum ve mangan alaşımları-Örn:HM21A
HZ Serisi	Magnezyum, toryum ve zirkonyum alaşımları-Örn:HZ32A
QE Serisi	Magnezyum, gümüş ve nadir toprak alaşımları-Örn:QE22A
QH Serisi	Magnezyum, gümüş ve toryum alaşımları-Örn:QH21
WE Serisi	Magnezyum, itriyum ve nadir toprak alaşımları-Örn:WE43
ZC Serisi	Magnezyum, çinko ve bakır alaşımları-Örn:ZC71
ZK Serisi	Magnezyum, çinko ve zirkonyum alaşımları-Örn:ZK11
ZT Serisi	Magnezyum, çinko ve toryum alaşımları-Örn:ZT32

4.3.1. AZ91 Magnezyum Alaşımının Özellikleri

Magnezyum alaşımları arasında en yaygın kullanılan alaşım AZ91'dir. AZ91 alaşımı, iyi mekanik ve fiziksel özelliklere sahip, tuzlu suda mükemmel dökülebilirlik ve

yüksek korozyon direncine sahip bir alaşımdır. AZ91 alaşımının mekanik özellikleri Çizelge 4.3'te verilmektedir. Mg-Al-Zn alaşımlarının herhangi birinde artan alüminyum içeriği ile akma mukavemeti artar, ancak süneklik azalır [84]. Yüksek mukavemet istenmediğinde, Mg-Al-Zn serisi alaşımlar kullanılır. Bu alaşımların mukavemeti, artan alüminyum içeriği ile artar.

Çizelge 4.3. AZ91 alaşımının mekanik özellikleri.

Özellik	AZ91
Çekme Dayanımı	200 MPa
Akma Dayanımı	140 MPa
Basma Akma Dayanımı	160 MPa
Kırılma Uzaması	%5
Elastiklik Modülü (Çekme)	45 MPa
Elastiklik Modülü (Kayma)	17 MPa
Brinell Sertlik	70
Darbe Dayanımı, (Çentiksiz)	6 J

Magnezyum, bilhassa Al, Zn ve Mn olmak üzere, toprak alkali metaller ve çok az miktarlardaki Si, Sn, Pb, Y, Ba, Sb, Ca, Sr ve Bi gibi elementlerle alaşım işlemi yapılarak, mekanik özellikleri iyileştirilmekte ve gösterdiği iyileştirme performansı ile kullanım alanını her geçen gün genişletmektedir. AZ91 (Mg-Al-Zn) alaşımları (Çizelge 4.4), genellikle otomobil parçalarının üretiminde kullanılır ve bu alaşımının dökülebilirlik özelliği oldukça iyidir [85]. Yüksek eğme direnci gerektiren kapı, kaput ve bagaj kapağı gibi dış yüzeyi geniş otomobil saclarında magnezyum alaşımlarının kullanımı çeliğe nazaran %50, alüminyuma nazaran %20 ağırlık avantajı sağlamaktadır. Magnezyum alaşımlarından Mg-Al-Zn alaşımları dayanım, hafiflik ve kısmen iyi korozyon direnci gibi özelliklerinden ötürü endüstriyel öneme sahip bir malzemedir.

Çizelge 4.4. AZ91 alaşımının kimyasal bileşimi.

Element	Mg	Al	Zn	Mn	Fe	Ni
(%)	90,30	8,74	0,67	0,18	0,01	0,0062

Mg-Al alaşımlarına Zn ilavesi, katı eriyik mukavemeti ve çökeltme sertleşmesi ile mukavemeti artırır. Magnezyum Al-Zn ile yaklaşık %10'dan fazla alaşımlanamaz çünkü alaşımın sünekliği kırılma metaller arası bileşiklerin oluşumu nedeniyle azalır [86]. Magnezyum alaşımlarına Zn ilavesi, çökeltme sertleşmesi ve dolayısıyla eriyiğin akışkanlığı nedeniyle oda sıcaklığında mukavemeti artırır, bu da sıcak yırtılmaya neden olan tane sınırlarına çökeldiğinden %2 ile sınırlıdır. Malzeme ayrışmanın meydana geldiği erime noktasına yakın sıcaklıklarda deforme olduğunda, malzeme tane sınırları boyunca ayrışır [87]. Mg alaşımlarına Al ilavesi, magnezyumun katı tortu mukavemetini ve eriyiğin dökülebilirliğini artırır. Sünekliği azaltırken, alaşımın mukavemetini, sertliğini ve katılaşıma süresini artırır. Düşük sıcaklıklarda (≤ 120 ° C), katı eriyik sertleştirilmesi ve çökeltme sertleştirilmesiyle oluşan intermetalik bileşik $Mg_{17}Al_{12}$, alaşımın mukavemetini azaltır [87]. Magnezyum, diğer metaller gibi, saf halde nadiren kullanılan bir elementtir. Malzemenin mekanik özelliklerinde istenen gelişmeleri yapmak için, magnezyuma alaşım elementleri eklenerek toz metalurjisi ile yeni ürünler elde edilir [81]. Hegzagonal sıkı paket (hsp) kafes yapısına sahip olan magnezyum, tane çapı nedeniyle çok sayıda elementle katı çözümlülük oluşturabilir. Magnezyum esas olarak Al, Zn, Mn, Be, Si, Ca, Cu, Fe, Ag, Sn ve Zr ve K, Na, Li alkali ve Y, Ce, Ln, Nd gibi toprak elementleri ekleyerek alaşımlanabilir. Magnezyum bu elementlerden bir veya daha fazlası ile alaşımlandığında oluşan alaşımlar genellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranını artırır [85].

4.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

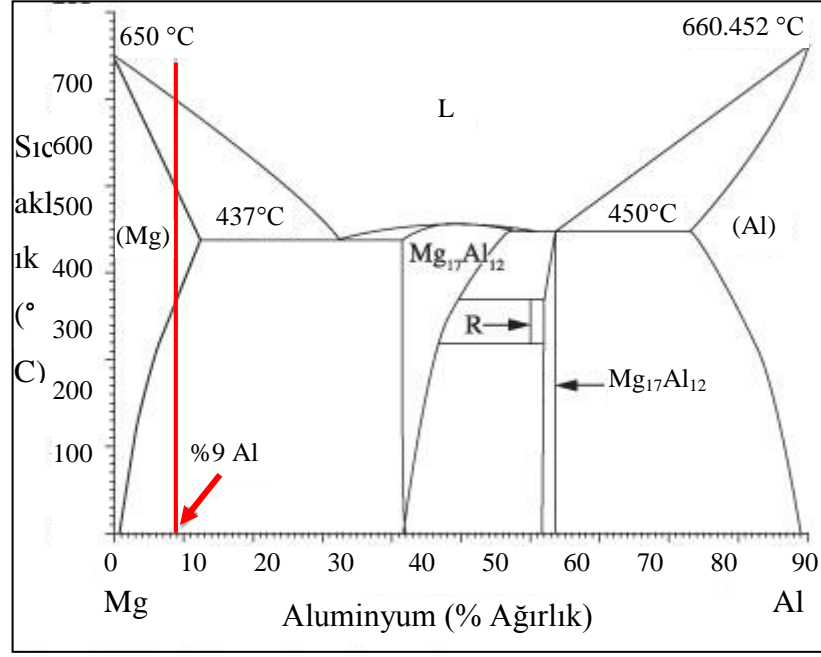
Magnezyum alaşımlarına mukavemet kazandırmak için farklı alaşım elementleri ile katı alaşım ve çöktürme sertleştirilmesi uygulanır. Genellikle alüminyum eleman gerilme mukavemetini ve sertliğini artırır, dökülebilirliği artırır, ancak gözeneklilik

eğilimini arttırır. Kalsiyum, tane yapısını seyreltir, sürünme direncini arttırır ve yapışma ve sıcak yırtılma gibi dökülebilirliği olumsuz yönde etkiler. Manganez çekme mukavemetini arttırır, tane incelmeye izin verir, kaynaklanabilirliği arttırır [81, 82]. Nadir topraklar sürünme direnci, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık direnci gibi özellikleri iyileştirir, ancak bu pozitif özelliklerle maliyeti arttırır. Silisyum dökülebilirliği olumsuz etkiler, fakat sürünme direncini arttırır. Ayrıca silisyum ve antimon birlikte ilave edildiğinde sertlik artar [88]. Çinko, gerilme mukavemetini ve dökülebilirliğini arttırır, ancak mikro gözenekliliği ve sıcak yırtılma eğilimini arttırır. Son olarak zirkonyum gerilme mukavemetini arttırır ve taneciklerin artırılması için çok etkilidir, ancak alüminyum veya silisyum içeren alaşımlarda tercih edilmez [89].

4.4.1. Alüminyumun Etkisi

Alüminyum, alaşım elementlerinin en etkili elemanlarından biridir. Alüminyumun magnezyuma eklenmesi alaşımın sertliğini ve gerilme mukavemetini arttırır ve ayrıca katılma aralığını genişletir. Alaşıma ağırlıkça %6'dan fazla alüminyum eklendiğinde, ısıl işlem uygulanabilir hale gelir, ancak endüstriyel alaşımlarda alüminyum ağırlıkça %10'un altında tutulur. Ağırlıkça %6 alüminyum içeren magnezyum alaşımlarında optimum mukavemet ve süneklik özellikleri görülür [89].

Şekil 4.1'deki Mg-Al denge faz diyagramında gösterildiği gibi, alüminyumun ötektik sıcaklıkta (437 ° C) maksimum çözünürlüğü ağırlıkça yaklaşık %33'tür.



Şekil 4.1. Mg-Al denge faz diyagramı [90].

Ağırlıkça %2'den fazla alüminyum içeren alaşımlarda, soğutma oranlarına bağlı olarak genellikle belirli bir ötektik faz oluşur. Bu nedenle, AM50, AM60 ve AZ91 gibi magnezyum alaşımlarında önemli miktarda ötektik faz oluşumu gözlenir. Ötektik magnezyum-alüminyum alaşımları, bileşime ve ağırlıkça soğutma oranına bağlı olarak geniş bir aralığa sahiptir [91].

4.4.2. Demirin Etkisi

Küçük miktarlarda magnezyum alaşımlarının varlığı bile korozyon direncini önemli ölçüde azaltan unsurlardan biridir. Ticari öneme sahip magnezyum alaşımlarında, demir içeriği genellikle ağırlıkça %0.01 ila 0.03 arasında olmalıdır. Optimal korozyon direnci için, alaşımdaki demir içeriğinin üst sınırı %0.005 olmalıdır. [84].

4.4.3. Manganın Etkisi

Manganez, magnezyum alaşımlarının gerilme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir, aynı zamanda akma mukavemetini kısmen artırır. Alaşımdaki manganezin en önemli özelliği, demir içeriğini azaltan ve mikroyapı saflaştırması

nedeniyle korozyon direncini artıran Al ve Fe ve AlMnFe gibi ikinci faz parçacıklarının oluşmasıdır. Ticari öneme sahip magnezyum alaşımları nadiren ağırlıkça %1,5'ten fazla manganez içerir. Mg-Al alaşımlarında, manganezin çözünürlüğü ağırlıkça %0,3'e düşürülebilir[89].

4.4.4. Çinkonun Etkisi

Çinko, magnezyum alaşımlarında alüminyum ile birlikte bir alaşım elementi olarak kullanıldığında etkisi yüksektir. Alüminyum ile birlikte kullanıldığında çinko, düşük sıcaklıklarda (oda sıcaklığı) mukavemet artışı sağlar. Ek olarak, süneklikte azalma olmadan mukavemeti arttırmak için alüminyum ile çinko birlikte kullanılır. Ağırlıkça %7 ila %10 arasında alüminyum içeren magnezyum alaşımlarına ağırlıkça %1'den fazla çinko eklemek, yüksek sıcaklıklarda çekme mukavemetini artırır. Çinko ayrıca nikel ve demir yeralanlarının zararlı korozyon etkisini önlemek için de kullanılır [90].

4.4.5. Zirkonyumun Etkisi

Magnezyumun kafes parametresi ($a = 0.320$ nm, $c = 0.520$ nm) bir zirkonyumun kafes parametresine ($a = 0.323$ nm, $c = 0.514$ nm) çok yakın olduğundan, zirkonyum magnezyum alaşımlarında önemli bir tane inceltme etkisine sahiptir. Katılaşma başlangıcında, katı zirkonyum parçacıkları magnezyum taneciklerinin katılaştırılması sırasında heterojen çekirdeklenme sağlar. Zirkonyum genellikle alüminyum veya manganez alaşımlarında kullanılmaz, çünkü zirkonyum bu elementlerle kararlı bir bileşik oluşturmak için katı eriyikten çıkarılır [91].

4.4.6. Nadir Toprak Elementlerinin Etkisi

Magnezyum alaşımlarına, nadir toprak elementleri sürünme ve korozyon direnci ile yüksek sıcaklıklarda mukavemetini arttırmak amacıyla ilave edilmektedir. Fakat bu elementler olabildiğince pahalı olduğundan dolayı genellikle ileri teknoloji alaşımları için kullanılmaktadır [90].

BÖLÜM 5

TRIBOLOJİ

Triboloji, ilk defa 1966 yılında İngiltere’de Jost tarafından sürtünme, aşınma ve yağlama olaylarını tanımlamak için kullanılmıştır. Triboloji sözcüğü eski Yunan dilindeki Tribos (Sürtünme) sözcüğünden gelmektedir. Triboloji, uzay analizinden ev aletlerine kadar değişen teknik ekipmanların güvenilirliği, bakımı ve aşınması gibi büyük ekonomik anlamdaki problemlere operasyonel analiz uygulama sanatıdır [92].

Tribolojik bir ara yüzeyde yüzey etkileşimleri oldukça karmaşıktır ve anlaşılmaları fizik, kimya, uygulamalı matematik, katı mekanik, sıvı mekaniği, termodinamik, ısı transferi, malzeme bilimi, yağlama, makine tasarımı, performans ve güvenilirlik gibi çeşitli disiplinler hakkında bilgiye ihtiyaç duyulur [92].

Triboloji bilimi, sürtünme çeşitlerini araştırmanın yanında bunları nasıl en aza indirebileceğimizi (Örneğin: metal sürtünmeleri) yâda bazı durumlarda nasıl arttırabileceğimizi (Örneğin: fren sistemleri) araştırarak günlük yaşantımızın ve sanayi sektörünün daha verimli ve performanslı sürdürülmesine yardımcı olmaktadır. Triboloji sürtünme, aşınma ve yağlama olarak üç alt başlıktan oluşmaktadır [93].

5.1. SÜRTÜNME

Birbiri ile temas halinde bulunan ve izafi kayma veya yuvarlanma hareketi yapan iki fonksiyon yüzeyi arasında genel olarak bir sürtünme hali mevcuttur. Birçok halde sürtünmenin sayısal değeri çok küçük olabilir, fakat pratik olarak daima mevcuttur. Hipotetik olarak fonksiyon yüzeyleri arasında hiçbir kuvvet alanının bulunmaması ve kesin olarak aralarında mutlak vakumdan başka bir ortam bulunmaması halinde

sürtünmenin olmadığı söylenebilir. Sürtünme ve aşınma çok eski tarihlerden beri gözlenen ve azaltılması için tedbirler alınan konulardır [92,96].

5.2. AŞINMA

Makinalardaki arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının fonksiyon dışı kalmalarının en büyük nedenini aşınma teşkil etmektedir. Sürtünme nasıl bir enerji kaybı nedeni ise aşınmada tekrar geriye kazanılamayan bir madde kaybı nedenidir. Bu dolaylı olarak yeni malzemenin temini için gerekli olan ek bir enerji gereksinimini de beraberinde getirir. Sürtünme ve aşınma arasında doğrudan bir ilişki kurmakta mümkün değildir. Farklı malzeme çiftleri arasında sürtünme direnci aynı olabilir, ancak bunlar arasındaki aşınma miktarı farklılığı 100 veya daha fazla kata çıkabilir. Genel olarak aşınma problemi sürtünme probleminden daha karmaşık bir yapıdadır. Eş çalışan fonksiyon yüzeyleri arasında çok değişik türde aşınma şekillerine rastlanır ve çok kerede aynı bir koşulda bu değişik şekillerin birkaçı aynı zamanda kendini gösterir. Bu nedenlerle bütün aşınma hallerini veya bir kısmını kapsayan ve genel geçerliliği olan bir aşınma kanununu tanımlamak mümkün olmamıştır [96,97].

5.2.1. Adhesiv Aşınma

Birbiriyle temasta olan iki cismin gerçek temas yüzeyleri yüzey pürüzlüğü sebebiyle aslında çok çok küçük olduğundan, gerçek temas yüzeyine normal kuvvet sebebiyle etkileyen basınç oldukça değerler alır. Bu noktadaki gerilmeler çok küçük yük durumlarında dahi akma gerilmesi sınırına erişirler ve akarak plastik deformasyona uğrarlar. Plastik deformasyona uğrayan bu yüzeyler üzerinden cisimler, birbirine mikro kaynaklar ile bağlanırlar. Bu sırada iki cisim arasında devam eden izafi hareket nedeni kaynak bağı kopar. Bu kopma sonucu diğer cisme göre yumuşak olan malzemedan imal edilmiş cismin yüzeyinde boşluklar oluşur, diğer yüzeydeyse çıkıntılar meydana gelir ve iki yüzey arasına adhezif parçacıklar dökülür.

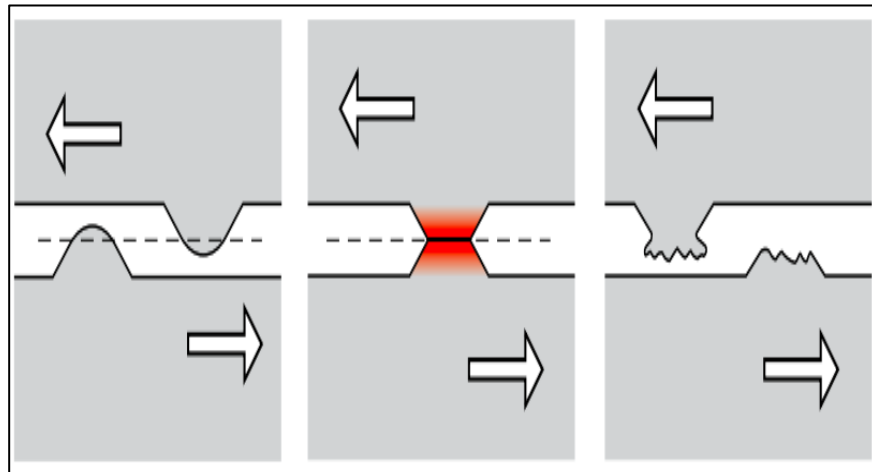
Adhezyon aşınması, benzer ve kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmekte ve tüm temas noktalarında meydana gelmemekte, yalnızca bir kısmında oluşmaktadır. Adhezyon aşınması yüzey pürüzlüğünü bozduğu ve adhezif

parçacıklara sebep olduğu için abrazyon aşınması aynı anda zemin hazırlar. Adhezyon aşınması ile abrazyon aşınması aynı anda görülmez. İki yüzey arasına çevre etkisiyle sert partiküller girdiğinde veya adhezif parçacıklar oluştuğunda yani abrazyon aşınması için gerekli koşullar sağlandığında adhezyon aşınması oluşmaz.

Kohezyon ve adhezyon ister katı ister sıvı, isterse gaz hâli olsun bir maddenin atomları arasında birbirlerine karşı kuvvet etkileşimleri vardır. Aralarında uygun bir mesafe bulunan iki atom arasında çekme kuvveti tesirlidir. Eğer iki atom, bu çekme kuvvetinin tesiri ile birbirine çok fazla yaklaşırsa bu defa birbirlerini itmeye başlarlar. İtme ve çekme kuvvetlerinin dengelendiği mesafede atomlar en kararlı konumlarında bulunur.

Bir atomu kararlı konumundan ayırmak, yani diğer atoma yaklaştırmak veya uzaklaştırmak için enerjiye ihtiyaç vardır. Gereken bu enerji miktarı katı madde atomları için büyük sıvılar için küçük gazlar için ise ihmal edilebilecek kadar azdır. Böylece katı madde katılığını muhafaza eder, akışkan bir özellik kazanırlar. Bir maddenin atomları arasındaki bu çekme kuvvetlerine kohezyon adı verilir.

Şekil 5.1'de gösterildiği gibi adhezyon aşınması; yüklemeye uygun yağ filminin kullanılmayışı, aşırı yüklemeye ve yağ filminin zamanla özelliğini yitirmesi sonucu ortaya çıkan yetersiz yağlama koşullarında metal-metal temasıyla oluşan bir aşınma şeklidir [96,97].

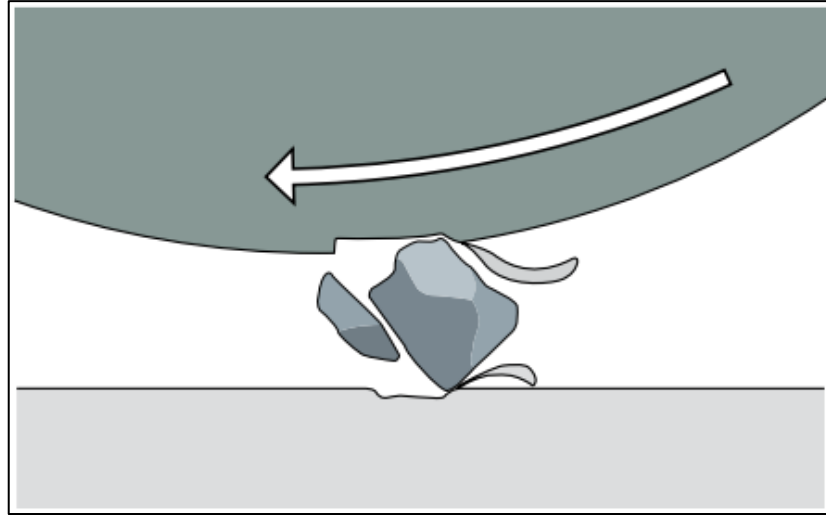


Şekil 5.1. Adhesiv aşınması meydana gelişini [108].

5.2.2. Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma iki cisimli ve üç cisimli olmak üzere iki şekilde meydana gelir. İki cisimli abrasif aşınma olayı sert ve pürüzlü bir yüzeyin kendinden daha yumuşak bir malzeme ile temas ettiği durumda, kuvvet ve basıncın etkisiyle yumuşak malzeme yüzeyinde oluşan çizilme ve küçük parçacıkların kaldırılması suretiyle meydana gelen deformasyon türüdür (Şekil 5.2).

İki cisimli abrasif aşınmaya örnek olarak kazı makineleri, toprak işleme aletleri, eğeleme ve zıMPara işlemi verilebilir. Sert ve pürüzlü bir yüzey daha yumuşak bir yüzey üzerinde kaydığında yumuşak yüzeyi oyduğunda ve bir grup oluk açtığında abrasif aşınma ortaya çıkar. Ayrıca abrasif aşınma biraz farklı bir durumda da sert abrasif partiküller kayma yüzeyleri arasına girdiğinde ve malzemeyi aşındırdığından da meydana gelebilir.



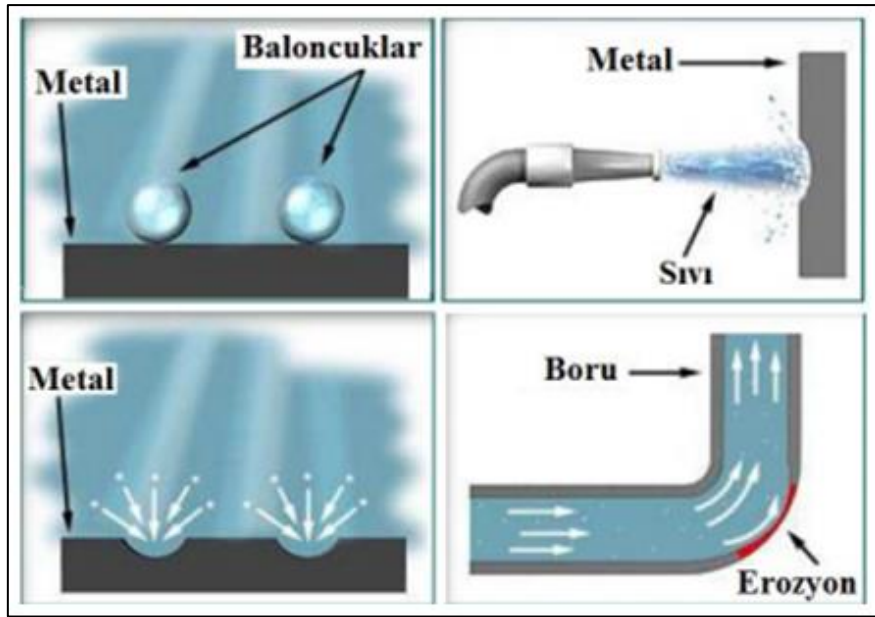
Şekil 5.2. Abrasif aşınması [108].

İki ve üç boyutlu abrasif aşınma olarak iki tür abrasif aşınma vardır. Aşınma dış yüzey üzerindeki sert tümseklerden kaynaklanıyorsa buna "iki boyutlu abrasif aşınma" denir. Üç boyutlu abrasif aşınmada ise sert abrasif partiküller vardır ve iki farklı kayma yüzeyi arasında yuvarlanıp aşınırlar. İki boyutlu aşınmada aşınma hızları üç boyutlu aşınmaya göre daha hızlıdır. Sertliğin metallerin abrasif aşınmasına etkisi Şekil 5.3'te verilmiştir. Abrasif aşınma olayında aşındırıcı partikül

ile aşınma izi arasında bir bağıntı vardır. Yuvarlatılmış aşındırıcı partiküller kullanıldığında, kayma hızı çok yüksek değildir. Abrasif olarak kullanılacak malzemelerde sertlik çok önemlidir. Abrasif malzeme aşındıracağı malzemenin sert olmalıdır. Yumuşak malzemenin sertliği sert malzemenin sertliğinin en az 1/3'ü olmalıdır [92,96].

5.2.3. Erozyon Aşınma

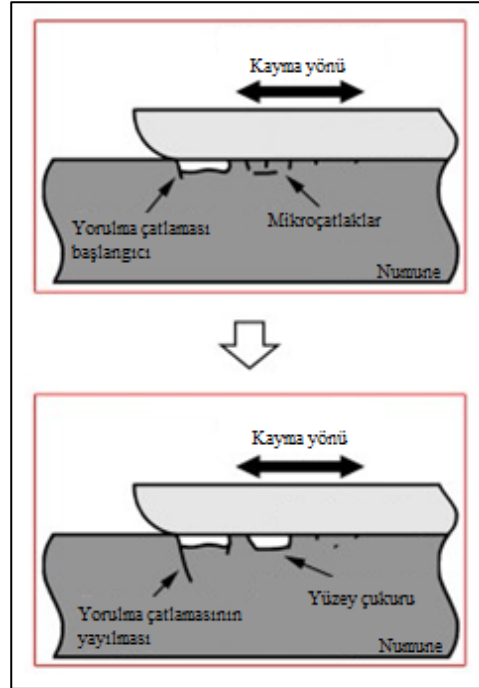
Erozyon aşınması, akışkan içerisinde bulunan aşındırıcı partiküller, yüksek hızla hareket eden sıvı damlacıkları ve yüksek hızdaki gaz kabarcıkları tarafından oluşturulan bir aşınma türüdür (Şekil 5.3). Sıvılar ve gazlar akış esnasında temas halinde oldukları parçanın sınır yüzeylerine çarpma etkisi yaparak yüzeyden parçacıklar koparılır ve girdaplar etkisiyle dalgalı yüzey meydana getirirler. Böylece aşınma daha da hızlanır. Genellikle pompalarda, pervanelerde, fanlarda, nozullarda ve boru ve tüplerin dirsek kısımlarında görülmektedir [94,98].



Şekil 5.3. Erozyon aşınması türleri [94].

5.2.4. Yorulma Aşınma

Yorulma (pitting) aşınması, dişli çarklar, rulmanlı yataklar ve kam mekanizmaları gibi birbirleriyle sürekli temas halinde olan yüzeylerde yaygın olarak görülen bir aşınma türüdür (Şekil 5.4.). Bu tür makine elemanlarında temas alanları çok küçük olduğundan temas yüzeylerinde Hertz basınçları oluşmaktadır. Bu basınçların etkisinde yüzeyin hemen altında kayma gerilmeleri meydana gelmektedir. Kayma gerilmelerinin maksimum olduğu noktada plastik deformasyon oluşmakta ve bu deformasyon zamanla yüzeye ilerleyerek yüzeyde çukurcuklar meydana gelmektedir [99].



Şekil 5.4. Yorulma aşınması [100].

5.2.5. Korozyon Aşınma

Korozyon aşınması düşük ve yüksek sıcaklık korozyon aşınması olmak üzere iki şekilde gerçekleşir. Metalik malzemeler içerdikleri alaşım elementlerinin cinsine ve miktarına bağlı olarak yüzeylerinde 0.1 mikron kadar doğal bir oksit tabakası bulundurulur. Bu tabaka sayesinde de korozif ortamlara karşı direnç gösterirler. Aşındırıcı ortam tarafından metal yüzeyine uygulanan tekrarlı darbeler esnasında

yüzeyden malzeme ile beraber oksit tabakası da kalkar. Tekrarlı darbelerin sıklığından veya koruyucu tabakayı oluşturan elementin alaşım içinde zamanla tükenmesinden dolayı oksit tabakası tekrar şekillenemez duruma gelir ve metal yüzeyi korozif saldırılara karşı savunmasız kalır. Aşınma ile korozyonun beraber geliştiği ve korozyonun aşınma hasarına katkıda bulunduğu bu olaya düşük sıcaklık korozyon aşınması denir [95,97].

5.3. YAĞLAYICI MADDELER

Sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı kısmen ya da tamamen önlemek ve sıcaklığın yükselmemesini temin etmek gayeleriyle birbirlerine temas eden makine elemanları arasında yağlayıcılar kullanılır. Bu yüzden doğru yağlayıcının uygun yağlayıcı viskozitesinin seçilmesi çok önemlidir. Yağlayıcılar kati, sıvı, yarı kati (gresler) ve gaz yağlayıcılar olmak üzere dört gruba ayrılırlar [96,97].

5.3.1. Sıvı Yağlar

İsteklerimize genelde en iyi cevap veren yağlayıcılardır. Kullandığımız sıvı yağlar petrol ürünlerin işlenmesinden elde edilirler. Bugün teknik açıdan pek önemi olmayan hayvani ve nebati yağlar da bu sınıfa dahil edilirler [101].

5.3.2. Gres Yağlar

Krem kıvamında, madeni sabun yapılı organik kökenli veya sentetik yöntemle, örneğin gliserinin bir yağ asidiyle esterleştirilmesiyle elde edilirler [101].

5.3.3. Katı Yağlar

Grafit, molibdendisülfid, talk gibi toz şeklindeki yağlayıcıdır, yüzeye iyi yapışıp kayganlaştırır. Ayrıca toz şeklindeki katı yağlayıcıların sıvı yağlarla veya greslerle karışımından elde edilen pastamsı yağlayıcılar da mevcuttur. Polyamid PA, poliasetal POM, politetrafioretillen PTFE ve Floretillenpropilen PFEP gibi yağlardır [101].

5.3.4. Gazlar

Küçük boyutlu, çok yüksek devirle dönen kaymalı yataklarda hava yağlayıcı olarak kullanılır. Pratikte sıvı yağ gres veya katı yağlayıcılara oksitlenmeye karşı dayanım, sıcaklığa bağı viskozite değişimini küçültme, yüzeye daha iyi yayılıp yapışma yüksek yükleri taşıyabilme ve köpürmemesi amacıyla katkı maddeleri ilave edilerek kaliteleri arttırılır [101].

5.4. AŞINMANIN EKONOMİK ÖNEMİ

Sürtünmeden dolayı oluşan aşınma, tüm endüstri kollarında "sinsi" bir tehlike olarak nitelendirilir ve zamanında önlem alınmadığı takdirde çok pahalıya mal olabilecek sonuçlara götürebilir. Almanya'da aşınmanın 2 milyarı metalürji 1,5 milyarı madencilik, 500 milyonu plastik imalât sanayi ve 1 milyarı da öbür sanayi koruma olmak üzere 5 milyar Euro'luk bir maliyet yüklenmektedir [96].

Herhangi bir nesnenin faydasız hale gelmesi üç yolu vardır: kullanılmaz hale gelmesi (modasının geçmesi), kırılma ve aşınma. Şüphesiz farklı nesne sınıflarında bu nedenlerin etkileri de farklı olur. Örneğin, bir kadın şapkasının modasının geçmesi ve nihayet bir gramofon (pick-up) iğnesinin ucunun aşınması, bunların terk edilmelerine neden olur. Aslında bu terkedilmeye götüren olguların çoğu kez birlikte etki yaptıklarını görürüz. Böyle bir otomobil, eskimiş modeli (stilini kaybetmiş) veya bir kazada hasar görmüş olmasıyla ya da artık iyi çalışmaması sebebiyle satışa çıkarılır, işte bu üçüncü sebep, aşınma sonucu faydalılığını kaybetmeyi teşkil eder [96].

Aşınma, mekanik etki sonucu katı yüzeylerden malzeme kalkması, azalmasıdır. Aşınmanın görünümü, kalkan-eksilen malzeme miktarının çok küçük olması şeklindedir. Böylece de bir otomobilde modasının geçmişliği ve hasar kolaylıkla görülebilirse de aşınma, rastgele bir tetkikle tamamen görünmez halde olabilir. Gerçekten bir iki tonluk arabada tamamen hurdaya çıktığında, kayma temasında olan yüzeylerden sadece birkaç gram eksilmiştir. Her ne kadar kayan sistemlerde aşınma genellikle çok yavaş bir süreç olmasına rağmen, çok kararlı ve süreklidir [96].

Konunun günümüze kadar ihmal edilmiş olmalı üç nedenden bahsedebiliriz. Bunlardan ilki: önceki zamanlarda aşınma bugüne göre, makine ve sair mekanizmaların faydalı ömürlerinin saptanmasında çok daha az önemli bir etken olmuş olmasıydı. Nitekim 1760'ların bir buhar silindirini günümüz otomobilinin silindiriyle kıyasladığımızda, her ne kadar her iki makinenin beygir kuvveti aynı mertebelerde ise de tasarımının tamamen farklı olduğu görülür. 1760'ın silindiri hayli ılımlı buhar basıncı ile çalışıyordu ve her zaman en azından 6-7mm işleme hatasıyla çalışıyordu: böyle olunca da 5-6mm'lik bir aşınma, performansta kendini fazlaca göstermiyordu. Oysaki bildiğimiz gibi günümüz otomobilinde bu koşullar tamamen farklıdır. Günümüz koşullarında müsaade edilebilecek olan aşınma, çok dar sınırlar içinde belirlenmektedir [96].

İkinci olarak, aşınma oranlarının çoğunlukla çok düşük olması ve yakın zamanlara kadar bunları uygun şekilde ölçecek olanağın bulunmaması zikredilebilir. Bütün yapılabilen, deneylerden önce ve sonra, parçaların tartılmalarından ibaretti. Ancak sıradan mühendislik metallerinin radyo-isotoplarının ortaya çıkmalarıyla (1940'lar), araştırmacıların eline yeni bir olanak verilmiştir [96].

Üçüncü olarak, birçok mühendis ve bilim adamının bu konudaki tutumu zikredilebilir. Aşınma o denli çapraşık ve hataya götürebilecek bir olgudur ki bunun üzerine eğilmek zaman kaybından başka bir şey olmayıp yeni bir tasarımda yapılacak en iyi şey, bundan önceki denemelerden faydalanıp bir ömür deneyine girişmek ve gerisini tarihe bırakmaktır [96].

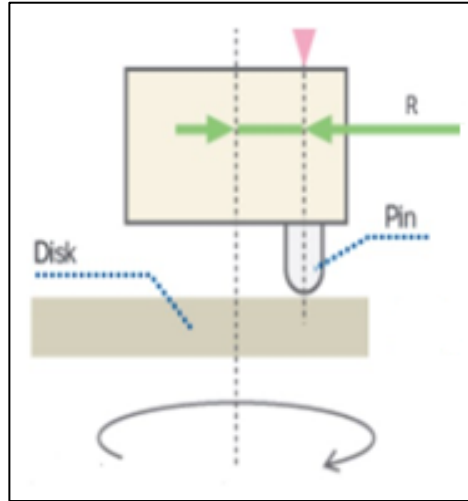
5.5. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Aşınmayı etkileyen faktörleri dört ana grup halinde toplayabiliriz. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler; malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü, malzemenin boyutu şeklide belirtilir. Diğer bir faktör ise karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisidir. Aşındırmaya etkileyen diğer faktörler ise ortam şartları; sıcaklık nem atmosfer ve servis şartları, basınç, hız, kayma yoludur [92-96].

5.6. AŞINMA DENEY CİHAZLARI

5.6.1. Pim-Disk Cihazı

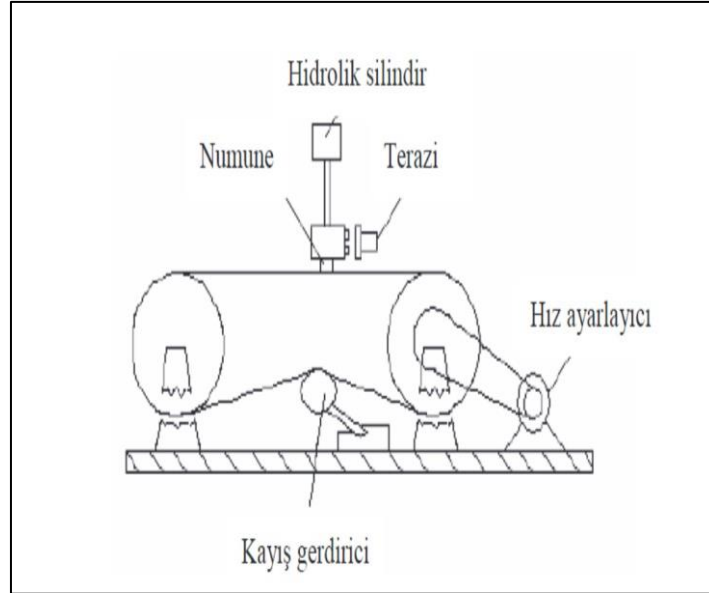
En yaygın kullanılan ve en basit model deney yöntemlerinden birisi Pim-disk yöntemidir. Bu deneyde metal bileşenlerden oluşan bir döner disk kullanılmaktadır. Aşınma özelliği incelenecek numune koni, küre veya silindir şeklinde olan bir pimdir. Nispi kayma hızı, diskin merkezi ile pimin temas noktası arasındaki mesafe değiştirilerek ayarlanabilir. Pim üzerinden diske uygulanacak yük mekanik, pnömatik veya bir hidrolik silindir vasıtasıyla uygulanabilir. Bu test tekniği ile kuru kayma halindeki sürtünme ve aşma davranışı araştırılır [96]. Şekil 5.5' de pim-disk cihazı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Pim disk cihazının şematik görünüşü [96].

5.6.2. Levha-Kayış Cihazı

İki geniş silindir ve bu silindirlerin etrafından geçen bir kayış bu sistemi oluşturmaktadır. Sistemde kayış silindirlerin etrafından geçmektedir ve silindirleri birbirine bağlamaktadır. Silindirlerin etrafından dönen kayışın gerginliği bir gerdirme mekanizması ile ayarlanabilmektedir, Silindirlerden bir tanesi bir motora bağlıdır ve devri değiştirilerek kayışın hızı da değiştirilebilir. Şekil 5.6'da levha-kayış cihazı şematik olarak gösterilmektedir.

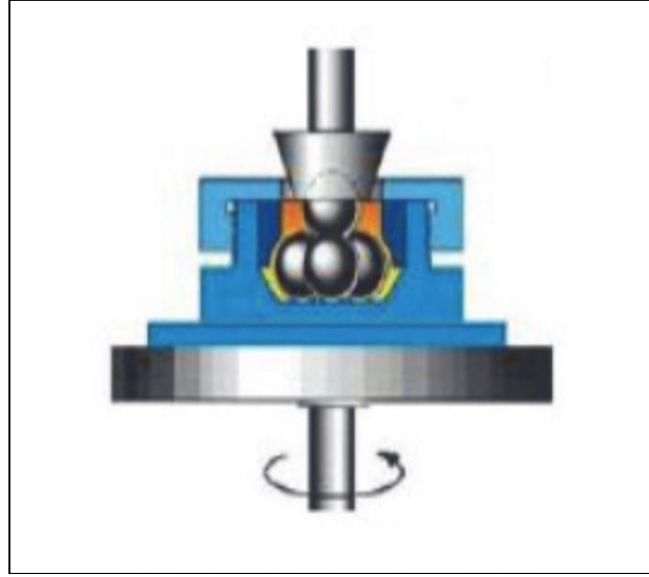


Şekil 5.6. Levha-Kayış cihazının şematik görünüşü [96].

Kayış lastik malzemeden olabileceği gibi çelik şerit ve kompozit malzemeden de oluşabilir. Deneyde aşınmayı kayış yüzeyine yapıştırılan zıMPara kâğıdı veya kayış yüzeyine kaplanan aşındırıcı sağlamaktadır. Deneyde aşındırılacak numune bir hidrolik sistem vasıtasıyla kayış üzerine bir kuvvetle bastırılır ve yük meydana getirilir. Kayış ve numune arasında oluşan sürtünme ile numune üzerinde aşınma meydana getirilir [96].

5.6.3. Dört Bilya Düzeneği

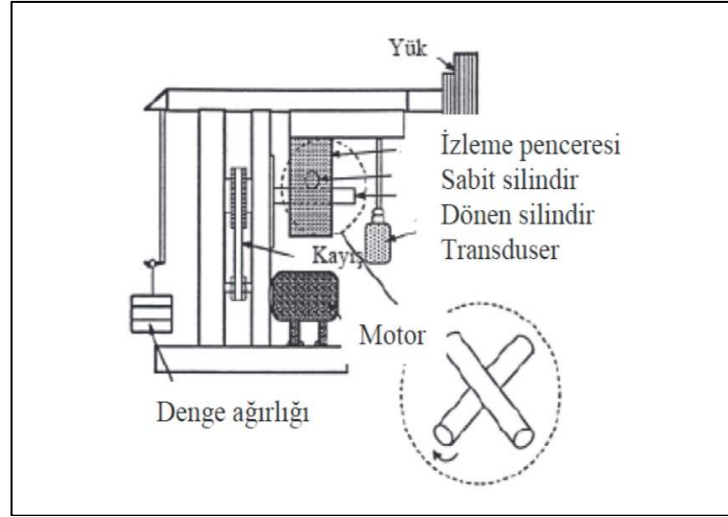
Bu test yönteminde eşit çaplara sahip dört adet bilya numune kullanılmaktadır. Bu bilyaların üç tanesi deney sırasındaki şartlarda rahatça hareket edebilecekleri bir taşıyıcı içine yerleştirilirler ve üst taraftaki bilyaya göre izafi olarak hareket eder. Dördüncü bilya ise bir milin ağzında açılan bir yuvaya yerleşecek şekilde diğer bilyaların üzerindedir ve aşağıya doğru normal bir yük ile bastırılmaktadır. Alttaki taşıyıcı döndürülerek milin ağzındaki bilyanın dönmesi sağlanır ve böylece bilyalar birbirine göre izafi hareket ederek aşınma oluşturulur. Bu test daha çok yağlama performansının değerlendirilmesinde kullanılır [102]. Deney düzeneği Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Dört bilya deney düzeneği [102].

5.6.4. Çapraz Silindir Deney Cihazı

Kâğıt kesme, kumaş kesme, saç metal kesme işlemlerinde bıçakla metal arasında çok küçük temas alanı ve yırtılmalar meydana gelir. Saç metal kesme işlemi buna iyi bir örnek olarak verilebilir. Bu tür aşınmaların ölçümünde ASTM G78 Çapraz Silindir deney cihazı kullanılır. Bu deneyde daha çok takım çeliklerinde ve kaplanmış yüzeylerde meydana gelen aşınmalar incelenmektedir. Cihaz kendi eksen etrafında dönen bir silindir ve bu silindire çizgisel temas eden çarpı şeklinde konulmuş sabit bir silindirden meydana gelir. Dönen parçanın dış çapında meydana gelen yivin hacmi ölçülür. Sonra sabit parça üzerinde meydana gelen aşınma lekeleri ölçülür ve bunla birlikte sistemdeki toplam aşınma bulunur [102]. Deney düzeneği Şekil 5.8 de verilmiştir.



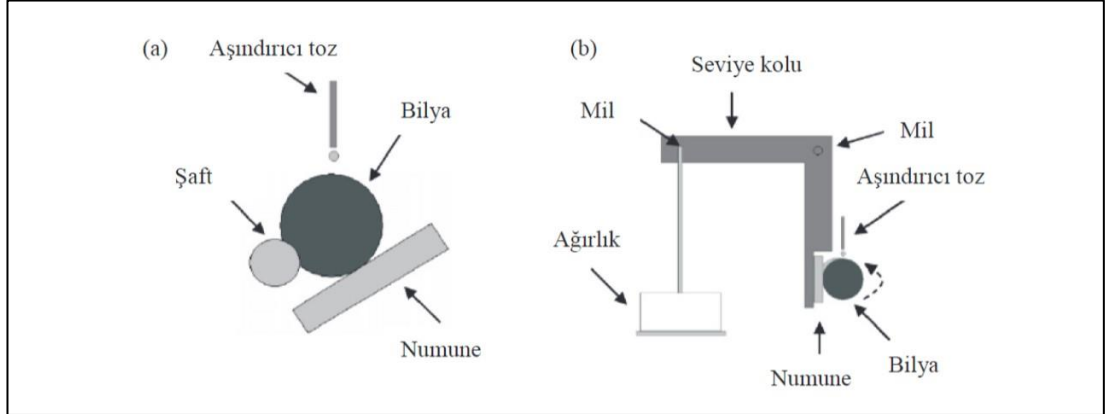
Şekil 5.8. Çapraz Silindir deney düzeneği [109].

5.6.5. Top Krater Testi

Son yıllarda top konfigürasyonu kullanılarak yapılan mikro abrazyon aşınma testi ince sert kaplamaların aşınma davranışlarını karakterize etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu test hızlı, uygun, küçük parçalar üzerine uygulanabilir ve nispeten ucuz ekipman kullanır. Eğer test şartları aynı şekilde kullanılırsa bu test konfigürasyon araştırmacıların aradıklarını karşılar. Bunun dışında güvenilir ve tekrarlanabilir ölçümleri garantiler. Bununla beraber aşınma oranları yüklemeye ve aşınma mekanizması test şartları değiştikçe (yük, kayma hızı) önemli ölçüde değişebilir.

Mikroabrazyon aşınma testi sırasında iki aşınma modu elde edilebilir. Bunlar "three body abrazyon" ve "Two body abrazyon" modlarıdır. Aşınma modu ayarlanan yüke, seçilen abrasife, top yüzey şartlarına göre değişebilir. Bu test yönteminde dönen bir top (genellikle sertleştirilmiş çelik) abrasif süspansiyon varlığında numune yüzeyine bir yük ile basınç uygular. Aşınma izi kullanılan kürenin yüzeyini tamamlayıcı şekilde olur. Bu iz optik mikroskop ya da profilometre yardımıyla ölçülür. İki farklı mikro abrazyon test tezgâhı vardır. Bunlar yükün uygulanma yöntemine göre değişiklik gösterir. Eğer top dönen bir mil üzerinde serbestçe dönüyorsa ve test parçasına kendi ağırlığını yüklüyorsa bu yöntem "free ball" yöntemi denir. Eğer top

bir motor yardımıyla döndürülüyorsa ve yük bir teçhizat yardımıyla uygulanıyorsa bu yönteme "fixed ball" yöntemi denir [104].



Şekil 5.9. Mikro abrazyon aşınma testi şeması [104].

5.7. AŞINMA ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

5.7.1. Ağırlık Farkı Metodu

Aşınma kaybı ölçüm yöntemleri arasında en ekonomik yöntem olan ağırlık farkı metodu hassas sonuçlar elde edilmesi sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Ağırlık kaybı genellikle 10^3 veya 10^4 hassasiyete sahip teraziler kullanılarak belirlenmektedir. Bu yöntemde aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybı; aşınma miktarı gram veya miligram olarak ifade edildiğinde sürtünme mesafesine karşılık olarak gr/km veya mgr/km cinsinden, birim alan için hesap edilecekse gr/cm^2 cinsinden ifade edilmektedir. Aşınma miktarı hacimsel olarak hesaplanmak istendiğinde malzemenin yoğunluğu ve numune üzerine uygulanan yük dikkate alınarak, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybı kullanılarak ağırlık kaybı belirlenebilir. Özgül aşınma miktarı aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir [99,103];

$$W_s = \Delta m / dFnS = \Delta v / FnS$$

Burada;

WS: Özgül aşınma miktarı (mm^3/Nm), Δm : Ağırlık kaybı (mgr)

5.7.2. Kalınlık Farkı Metodu

Bu yöntemde aşınma miktarı, aşınma sonucunda oluşan boyut değişikliğinin ölçülmesi ve ilk değerler ile karşılaştırılması suretiyle ölçülmektedir. Elde edilen kalınlık farkı değerlerinden gidilerek hacimsel kayıp değeri ve dolayısıyla birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanabilir. Bu yöntemde hassasiyeti arttırmak için hassas kalınlık ölçü aletleri (+1 μm duyarlıkta) kullanılarak ölçüm yapılmalıdır. Kalınlık farkı metoduna dayanan ölçümler çoğu zaman aşınmanın nasıl olduğu hakkında net bir bilgi veremediği için daha çok hacimce meydana gelen değişimler dikkate alınmaktadır [96].

5.7.3. İz Değişim metodu

Bu yöntemde aşınma yüzeyinde plastik deformasyon ile geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Bu izin oluşumu için en çok Vickers veya Brinell sertlik ölçme uçları kullanılır. Deney boyunca oluşturulan bu izin bir boyutunun değişimi izlenir ve mikroskop vasıtasıyla ölçülerek değerlendirilir [99,104].

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada kullanılmış olan AZ91 alaşım tozu, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü'nün sağlamış olduğu ödenekten kullanılarak Nanografi firmasından temin edilmiştir. Temin edilen AZ91 alaşım tozu 325 mesh ve ortalama büyüklüğü 44µm dur. AZ91 alaşım tozunun kimyasal analizi XRF testi ile yapılmıştır ve sonuç raporu Çizelge 6.1. de verilmiştir. Tozlar, oluşabilecek topaklanmayı engellemek için 3 boyutlu turbulada 20 dakika harmanlama işlemine tabi tutulmuştur. Çizelge 6.1. de verilen AZ91 alaşım tozu, tek bir numune için 15gr olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 3 farklı basınç (25, 35 ve 45MPa) ve 3 farklı sıcaklık (500, 550, 600 °C) parametresi ile aşınma numunesi ebatlarında sıcak preslenmiştir. Sıcak presleme işleminin akabinde yoğunluk testleriyle yoğunlukları ölçülmüştür. Mikroyapı görüntüleri (200X, 500X), sıcak presleme işleminin ardından yapılan XRF testi ve mikro sertlik testleri 0,1 kgf yükleme kuvveti ile 10 saniye yükleme süresi parametreleriyle yapılmıştır.

Çizelge 6.1. Çalışmada kullanılan AZ91 alaşım tozunun literatürdeki oranlarla kıyaslanması.

İçerik	Al	Mn	Zn	Si	Cu	Fe	Mg
Literatürdeki Oran (%)	8.3-9.7	0.15-0.5	0.35-1	0.1	0.03	0.005	Kalan
Kullanılan Oran (%)	7.72	0.19	1.07	0.04	0.02	0.062	90.89

6.1. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

6.1.1. Tozların Harmanlanması

Yapılan bu çalışmada, Nanografi firmasından temin edilen 325 mesh ve 45µm altı AZ91 alaşım tozu (Şekil 6.1.), RIGAKU ZSX Primus II analiz cihazında (Şekil 6.2.) XRF ve RIGAKU - Ultima IV XRD (Şekil 6.3.) testleriyle incelenerek literatürdeki malzeme içerik oranlarıyla kıyaslanmıştır (Çizelge 6.1.). Bu kıyaslama sonucunda oranların birbirlerine benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Akabinde T2F4 marka 3 boyutlu türbula cihazında 40dev/dak hızda 20 dakika süre ile harmanlanmıştır (Şekil 6.4.). Harmanlama işlemi tamamlandıktan sonra her biri 12 gr olacak şekilde 18 adet numune tek tek vakumlu ambalajlarda muhafaza edilmiştir.



Şekil 6.1. AZ91 Alaşım tozu.



Şekil 6.2. RIGAKU ZSX Primus II XRF analiz cihazı.



Şekil 6.3. RIGAKU Ultima IV XRD analiz cihazı.



Şekil 6.4. T2F4 marka 3 boyutlu türbula cihazı.

6.1.2. Tozların Sıcak Preslenmesi

Harmanlama işleminin sonucunda hazırlanan tozlar, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde bulunan MSE marka sıcak presleme cihazı (Şekil 6.5.) ile önceden belirlenmiş olan 3 farklı basınç (25, 35, 45 MPa) ve 3 farklı sıcaklık (500, 550, 600°C) parametreleri kullanılarak preslenmiştir (Çizelge 6.2.).

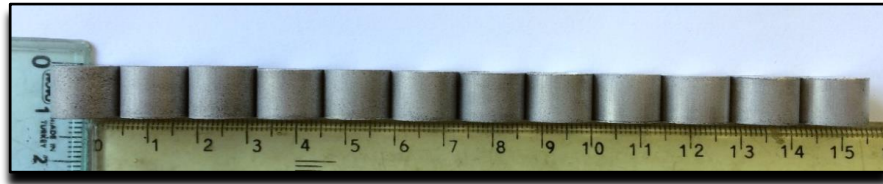


Şekil 6.5. MSE marka sıcak presleme cihazı.

Çizelge 6.2.AZ91 Alaşım tozlarının sıcak preslenme parametreleri.

Numune Numarası	Basınç (MPa)	Sıcaklık(C ⁰)
S1	25	500
S2		
S3		550
S4		
S5		600
S6		
S7	35	500
S8		
S9		550
S10		
S11		600
S12		
S13	45	500
S14		
S15		550
S16		
S17		600
S18		

Tozlar grafit bir kalıp içerisinde, 15mm çap ve 25mm yüksekliğe sahip olacak şekilde 1 saat süre ile sıcak presleme işlemine tabi tutulmuştur. Sıcak presleme işleminin akabinde malzeme yüzeyinde oluşan oksit ve grafit kalıntılarını gidermek için 80'lik ve 180'lik zıMParalarla temizlenerek yapılacak olan deneylere hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.6.).



Şekil 6.6. Sıcak presleme sonrası üretilen numunelerin görünümü.

Üretilen numunelerden S5, S6, S11, S12, S17, S18 numunelerinde Şekil 6.7’de görüldüğü gibi kısmi ergime gözlemlenmiş olup, sıcak presleme işleminden 600 °C de verim alınamamıştır.



Şekil 6.7. 600C⁰ deki numunelerde oluşan kısmi ergime.

6.2. NUMUNELERİN KARAKTERİZASYONU

6.2.1. XRF ve XRD Analizi

Sıcak presleme işleminin akabinde üretilen numunelerin temel bileşimlerini belirlemek ve, sıcak presleme öncesi ve sonrası temel bileşenlerde değişim olup olmadığını görebilmek amacıyla Şekil 6.2.’deki RIGAKU ZSX Primus II XRF cihazı ile tüm numuneler analiz edilmiş ve de üretilen numunelerin kristallografik özelliklerinin ve içerdikleri fazların belirlenmesi amacıyla da Şekil 6.3.’teki

RİGAKU Ultima IV XRD analiz cihazı kullanılmıştır. XRF analizleri bakalit kalıba veya başka bir aracı kalıba ihtiyaç duyulmadan doğrudan malzemeler üzerine uygulanmıştır.

6.2.2. Yoğunluk Ölçümü

XRF analizini takiben malzemelerin yoğunlukları ölçülmüştür ve bu değerlerle bağlı yoğunlukları hesaplanmıştır. Yoğunluk hesaplamaları yapılırken öncelikle numunelerin kütleleri Şekil 6.8.'deki KERN 2216 markalı hassas terazi ile ölçülmüş, hacimleri kuMPas yardımıyla ve $d=m/v$ formülünden bulunmuştur. Sonuç olarak hesaplanan değerler AZ91 malzemesinin yoğunluğuna bölünerek bağlı yoğunluk değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 6.8. KERN 2216 markalı hassas terazi.

6.2.3. Mikroyapı Görüntüleme Analizleri

Mikroyapı görüntülerinin alınabilmesi için malzemelerin yüzeylerine, Karabük Üniversitesi Laboratuvarlarında sırasıyla 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zıMParalar kullanılarak zıMParalama işlemi yapılmıştır. ZıMParalama işleminin akabinde malzeme yüzeylerinin parlatılması için 1µm boyutunda elmas partikül

içeren süspansiyon uygulanmıştır. Numuneler parlatıldıktan sonra Şekil 6.9’da resmi verilen pikral reaktif çözelti içerisinde 5 saniye bekletilerek dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlama reaktifi 5ml asetik asit, 6g pikrik asit, 10ml su ve 100ml etanolden oluşturulmuştur..



Şekil 6.9. Dağlama işleminde kullanılan pikral çözeltisi.

Dağlama işleminden sonra Kastamonu Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında bulunan OLYMPUS SC30 marka ters metalürjik mikroskop (Şekil 6.10.) kullanılarak numunelerin dağlanmış yüzeylerinden, 200 ve 500 büyütme görüntüleri alınmıştır.



Şekil 6.10. OLYMPUS SC30 marka ters metalürjik mikroskop.

6.2.4. Mikro ve Makro Sertlik Ölçümleri

Mikro sertlik deneyi için Kastamonu Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında bulunan HMV-G21D marka mikro sertlik ölçüm sistemi (Şekil 6.11.) kullanılmıştır. Mikro sertlikler Vickers yöntemi ile belirlenmiştir. Sertlikler her bir numuneden 3'er adet alınmış olup ortalamaları hesaplanmıştır. Tüm bu mikrosertlik ölçümleri 0,1kg yük altında 10 saniye yükleme süresi olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.11. HMV-G21D marka mikro sertlik ölçüm sistemi.

Mikrosertlik değerleri alındıktan sonra tüm numuneler HBD 3000Z1 marka Brinell sertlik cihazında makro sertlik testlerine tabii tutulmuşlardır (Şekil 6.12). Uygulanan yük değeri 100 kg'dır ve yükleme süresi 15 saniyedir. Brinell sertlik ölçümlerinde 5 mm çelik bilya ucu tercih edilmiş ve her bir yüzeyden üçer adet sertlik ölçümü yapılmıştır



Şekil 6.12. HBD 3000Z1 marka Brinell sertlik cihazı.

6.3. NUMUNELERİN AŞINMA DENEYLERİ

Sıcak presleme sonrası karakteristik ve mekanik özellikleri incelenen tüm numuneler aşınma testlerine tabii tutulmuştur. Bu testler için Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Bölümü Metal Atölyesi'nde mevcut olan TURKYUS marka Pin on disk tipi aşınma cihazı (Şekil 6.13) kullanılmıştır. Karşı yüzey (aşındırıcı) diski olarak AISI 5190 (DIN 105 MnCr4) soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır ve 58 HRC sertlik değerine sahiptir. Cihazdan alınan tüm veriler bilgisayara kaydedilmiş olup alınan değerlere göre ortalama sürtünme kuvvetleri ve sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Sürtünme deneyleri Çizelge 6.3.'teki parametrelere göre gerçekleştirilmiştir. Aşınma kayıplarının hesabı için Şekil 6.8.'deki hassas ölçüm terazisi kullanılmıştır.



Şekil 6.13. TURKYUS marka Pin-on-disk tipi aşınma test cihazı.

Çizelge 6.3. Aşınma deneyleri için uygulanan parametreler.

Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Alınan Mesafe (m)
0,5	10	500
		1500
		3000
	25	500
		1500
		3000
	40	500
		1500
		3000
Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Alınan Mesafe (m)
1	10	500
		1500
		3000
	25	500
		1500
		3000
	40	500
		1500
		3000
Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Alınan Mesafe (m)
1,50	10	500
		1500
		3000
	25	500
		1500
		3000
	40	500
		1500
		3000

6.4. NUMUNELERİN AŞINMA DENEYİ SONRASI SEM GÖRÜNTÜLERİ

Aşınma deneyine tabii tutulan tüm numunelerin, yüzeylerindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgi almak ve yüzeylerinin incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri Bartın Üniversitesi Taramalı Elektron Mikroskobu Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 6.14'te verilen TESCAN MAIA3 XMU marka SEM cihazında çekilmiştir.



Şekil 6.14. TESCAN MAIA3 XMU marka taramalı elektron mikroskobu.

S1, S3, S7, S9, S13 ve S15 numunelerinin 1.5 m/s hızda ve 40 N yük altında 500, 1500 ve 3000 metre kayma mesafelerinde gerçekleştirilen aşınma deneylerinden toplanan aşınma partikülleri üzerinden SEM görüntüleri alınmış, sonrasında ise aynı partikül üzerinden partikül boyut analizi gerçekleştirilmiştir. Aşınma partiküllerinin boyut analizleri Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Malvern Marka Mastersizer 3000 Modeli Partikül Boyut Analizi cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.15). Partikül boyu analizine tabii tutulan numunelerin listesi Çizelge 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.15. Malvern Marka Mastersizer 3000 Modeli Partikül Boyut Analizi cihazı.

Çizelge 6.4. Debrisleri analiz edilen numuneler ve alınan debrisin parametreleri.

Numune No	Kayma Hızı (m/s)	Kuvvet (N)	Aşınma Mesafesi (m)
1	1.5	40	1500
3	1.5	40	1500
7	1.5	40	1500
9	1.5	40	1500
13	1.5	40	1500
15A	0.5	40	1500
15B	1	10	1500
15C	1	25	1500
15D	1	40	1500
15E	1.5	40	500
15F	1.5	40	1000
15G	1.5	40	1500

Çizelge 6.4 incelendiğinde 1'den 13'e kadar tüm numunelerde tek parametre değerinden partikül örnekleri incelenirken, 15 no'lu numuneden 7 farklı örnek alındığı görülmektedir. Bunun sebebi mekanik dayanım, aşınma direnci ve sürtünme katsayısı kararlılığı gibi özelliklerde en optimum özellikleri 45 MPa presleme basıncı ve 550 °C sıcaklıkta üretilen 15 no'lu numunenin optimum özellikler göstermesindedir. Bu numune üzerinden kayma hızı, aşınma yükü ve aşınma mesafesi gibi özelliklerin partikül şekli ve boyutuna etkisi incelenmiştir.

BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde; AZ91 alaşım tozlarından sıcak presleme yöntemi ile üretilen numunelerin verilen parametrelere bağlı olarak XRF, XRD, yoğunluk, mikroyapı, aşınma, makro sertlik, mikrosertlik, aşınma sonrası SEM ve parçacık boyut analiz sonuçları incelenmiş ve sonuçları tartışılmıştır.

7.1. NUMUNELERİN XRF VE XRD ANALİZLERİ

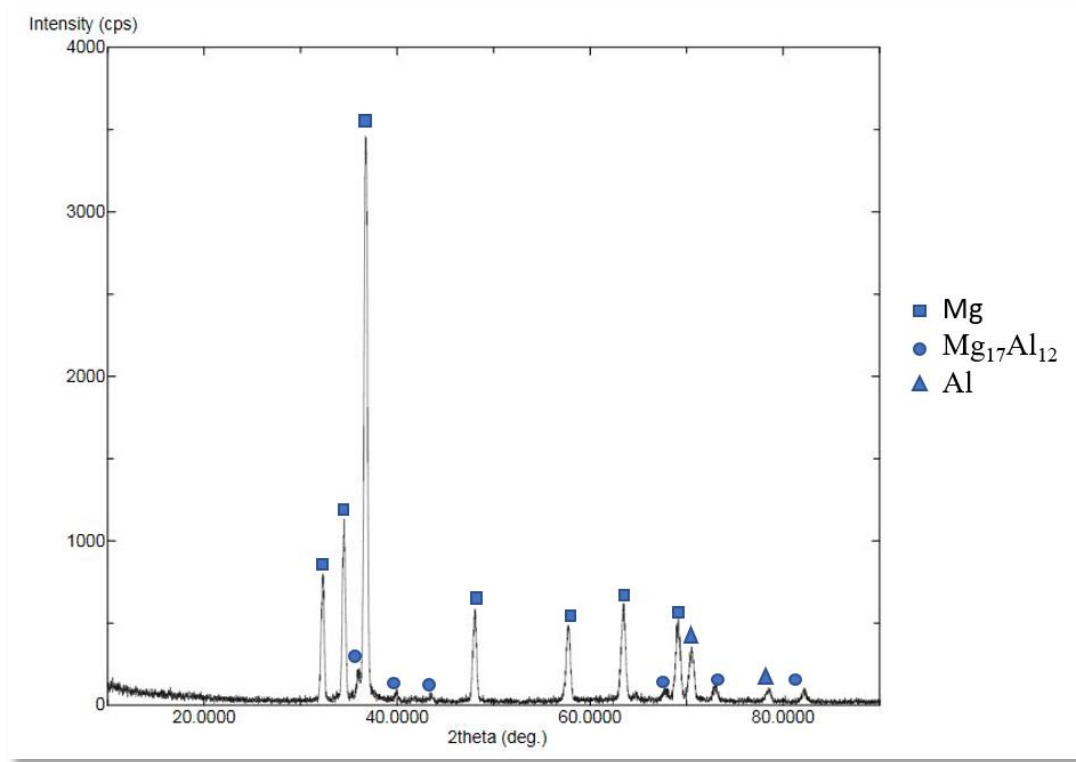
Sıcak presleme sonrasında yapılan XRF analizlerinin sonuçları Çizelge 7.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. Numunelerin XRF analizleri.

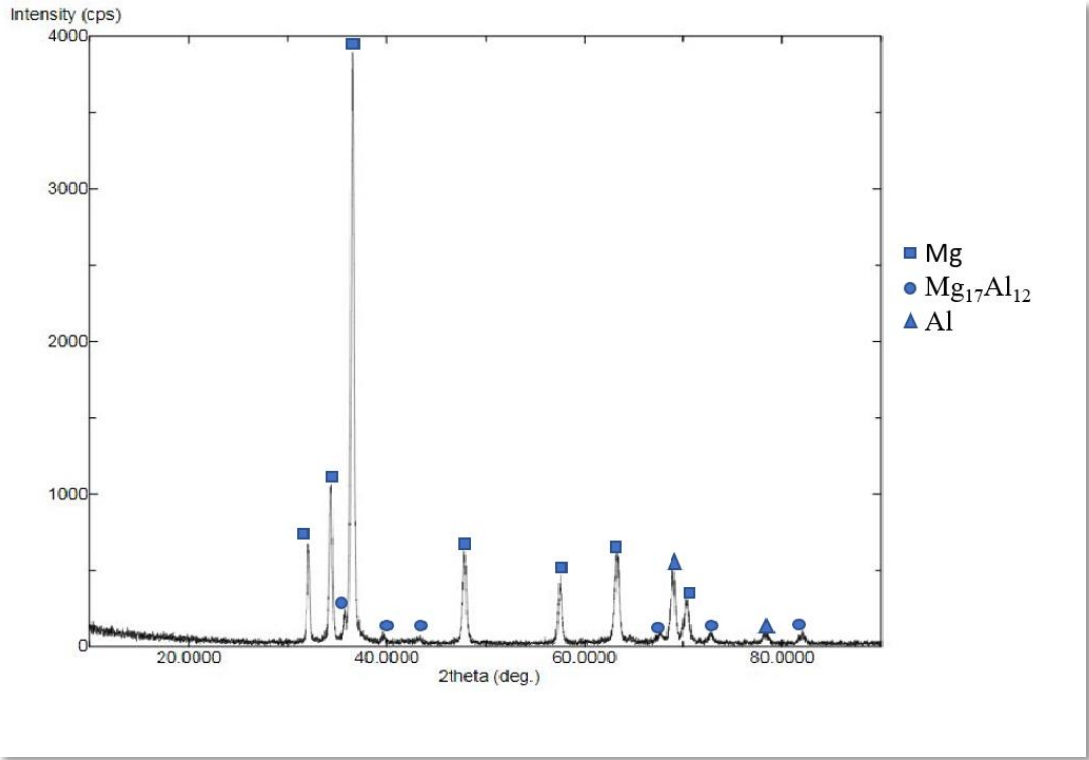
İçerik	Al	Mn	Zn	Mg
AZ91	7.72	0.19	1.07	90.89
S1(25MPa-500 °C)	7.55	0.20	1.04	91.19
S3(25MPa-550 °C)	7.50	0.18	1.01	91.25
S7(35MPa-500 °C)	7.53	0.22	1.00	91.23
S9(35MPa-550 °C)	7.34	0.13	0.99	91.52
S13(45MPa-500 °C)	6.66	0.32	0.73	92.27
S15(45MPa-550 °C)	6.37	0.30	0.68	92.63

Çizelge 7.1.'deki sonuçlar incelendiğinde basınç ve sıcaklığın artmasıyla Mg oranında artış, Al ve Zn oranlarında da düşüş gözlemlenmektedir. Mn oranlarında ise basınç artışıyla %Mn oranında artış, sıcaklık artışında ise düşüş gözlemlenmektedir. Sıcaklık ve basınç parametrelerinin alaşım içerisindeki kimyasal oranlara etki ettiği

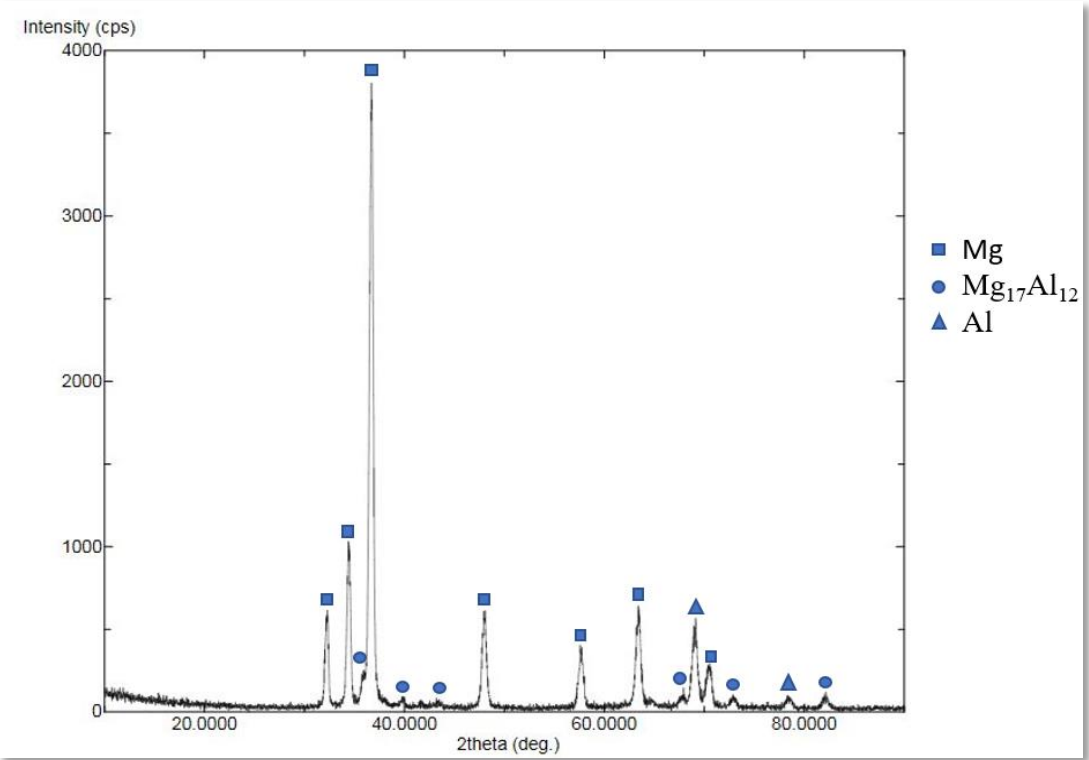
sonucuna ulaşılmıştır. Alaşım elementlerindeki kütleye % değişimlerin sebebinin arafaz oluşumlarıyla alakalı olduğu tahmin edilmektedir. Malzemelerdeki daha ileri malzeme değerlendirmesi Şekil 7.1.-7.6. arasındaki grafiklerde görülebilir. Grafiklerde değişen Mg, Al, Mg₁₇Al₁₂ fazları görülmektedir. Grafiklerdeki tepe noktaları incelendiğinde sıcaklık ve basınç artışıyla birlikte Al fazlarının da azaldığı görülmektedir. XRF değerlerindeki sonuçlarla örtüşen bu bulgunun yanısıra parçada β -Mg₁₇Al₁₂ fazlarının oluştuğu ve bu fazların da sıcaklık ve basınç artışıyla düştüğü gözlemlenmektedir.



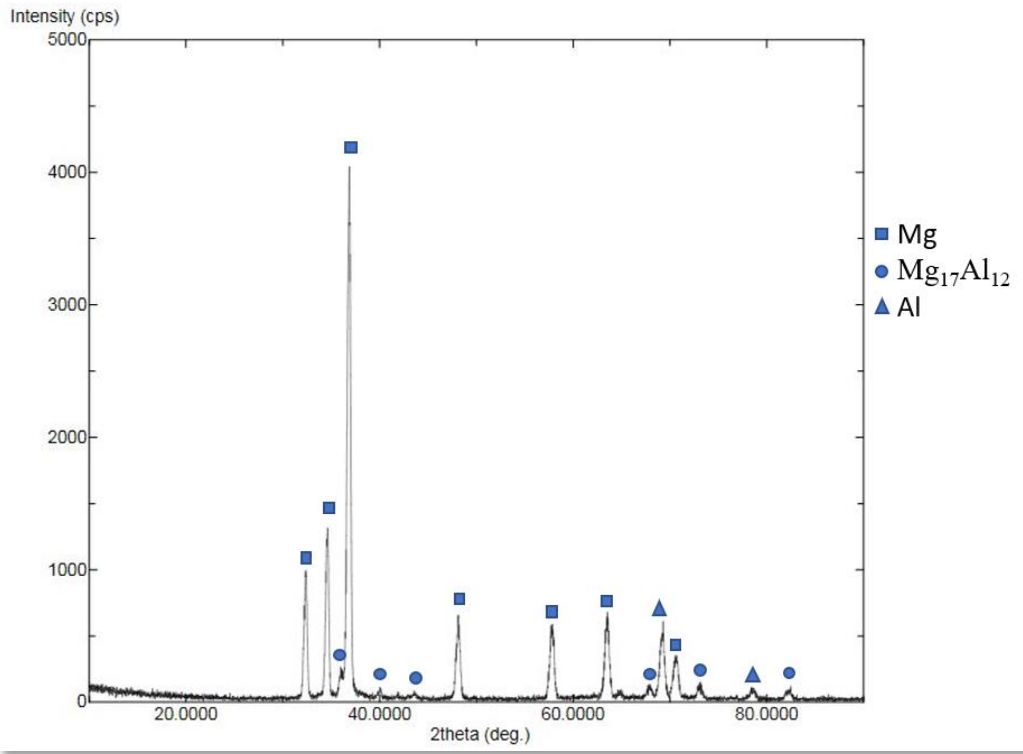
Şekil 7.1. S1 numunesinin XRD grafiği.



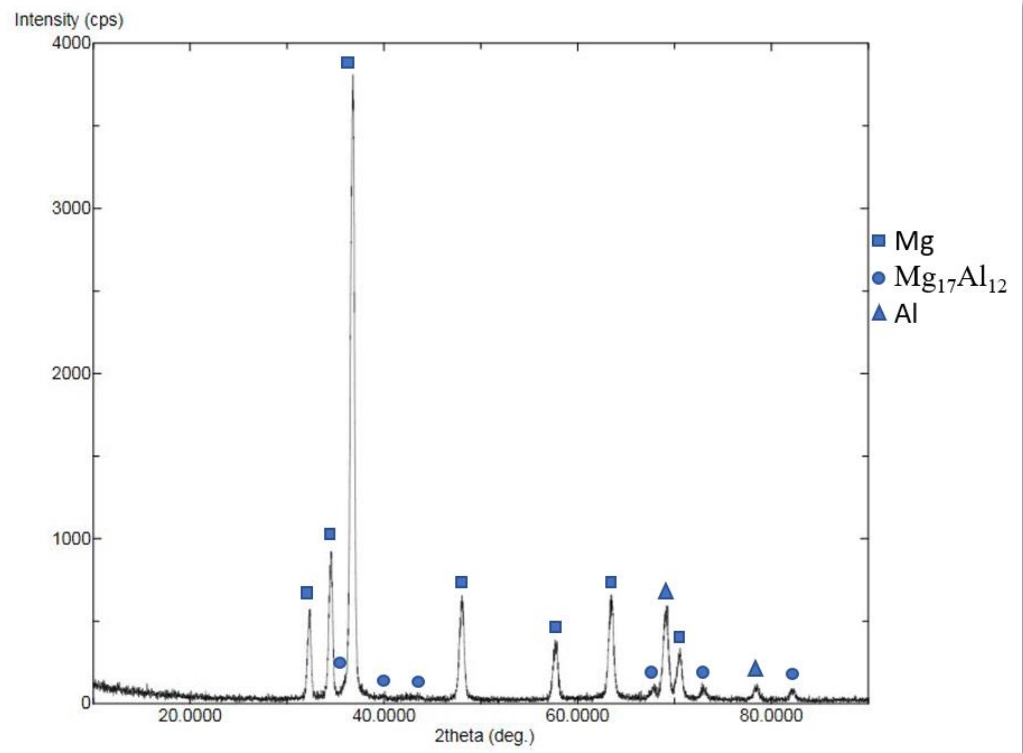
Şekil 7.2. S3 numunesinin XRD grafiği.



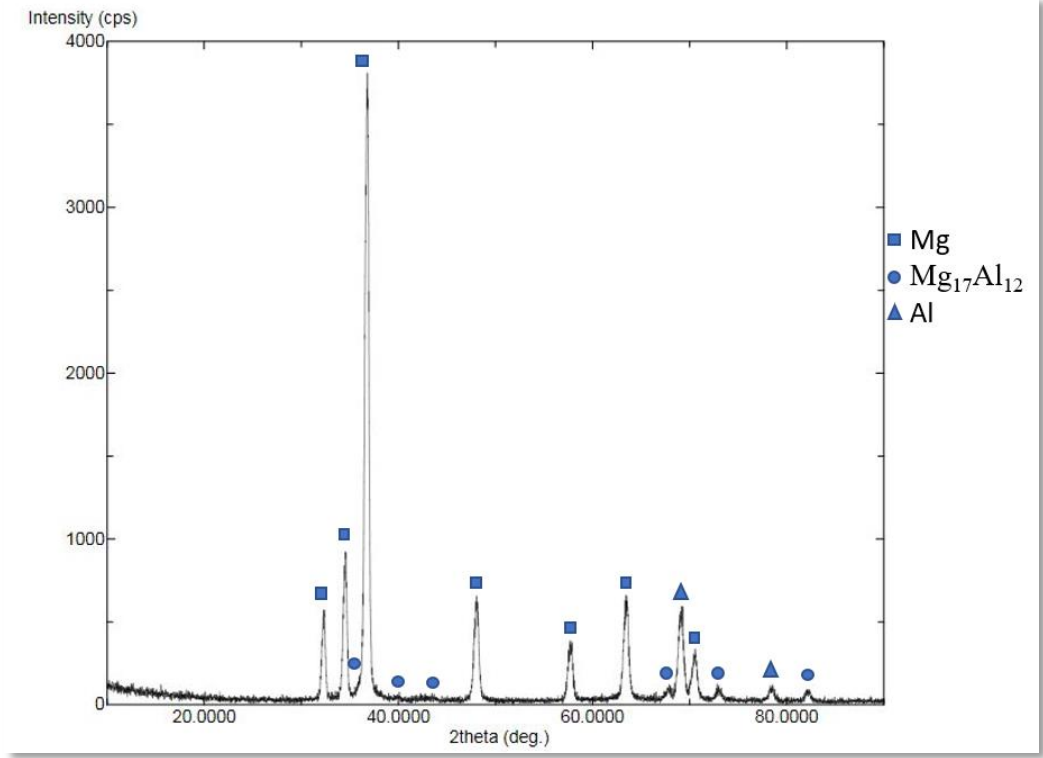
Şekil 7.3. S7 numunesinin XRD grafiği.



Şekil 7.4. S9 numunesinin XRD grafiği.



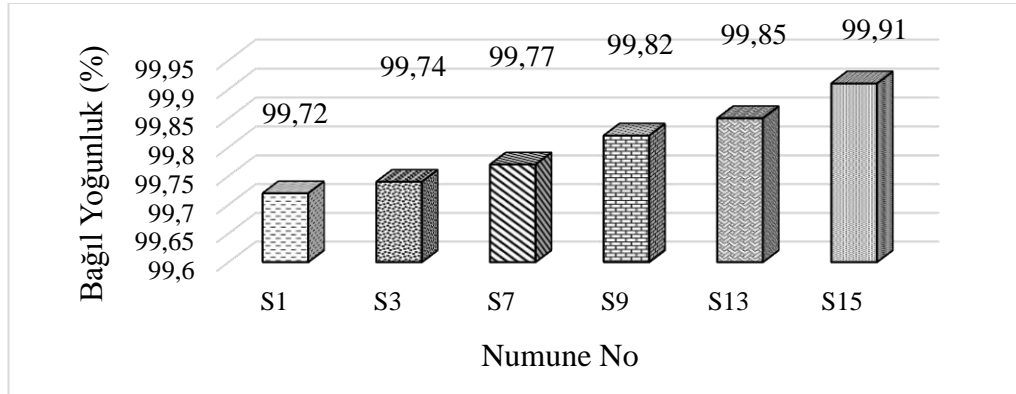
Şekil 7.5. S13 numunesinin XRD grafiği.



Şekil 7.6. S15 numunesinin XRD grafiği.

7.2. NUMUNELERİN BAĞIL YOĞUNLUKLARI

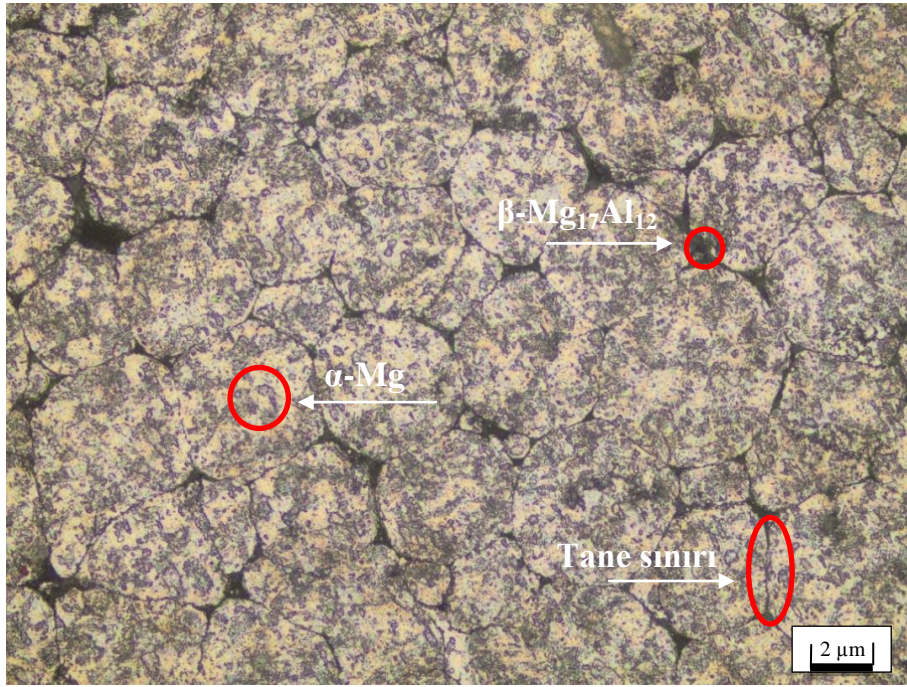
Sıcak presleme işlemin sonucunda elde edilen numunelerin yoğunluklarının yüksek olduğu (%99 seviyelerinde) gözlemlenmiştir (Şekil 7.7). Bu konuda yapılan çalışmalarda ve ders notlarında, sıcak presleme ile üretilen malzemelerin bağıl yoğunluklarının oldukça yüksek olduğu vurgulanmıştır [105].



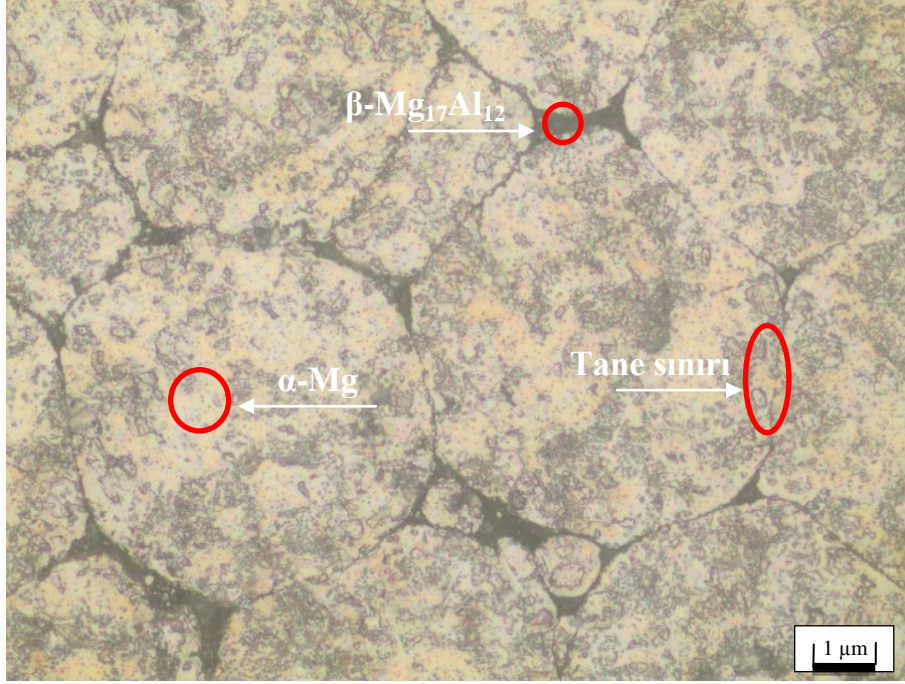
Şekil 7.7. Numunelerin bağıl yoğunluk değerleri.

7.3. NUMUNELERİN MİKROYAPILARININ İNCELENMESİ

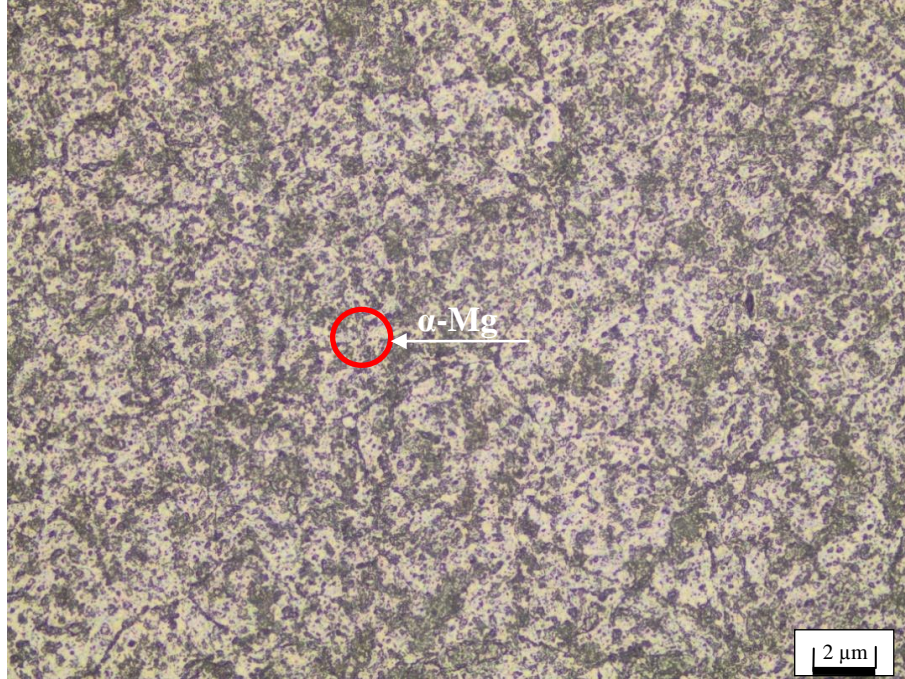
Sıcak presleme işlemi sonrasında numunelerin tane yapılarını, tane sınırlarını, oluşan arafazları ve taneler arasındaki bağları incelemek amacıyla alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 7.8 - 7.19. arasında verilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde tane sınırları ve tane içlerinde oluşan arafazlar gözlemlenmektedir. Tüm numunelerin parametreleri değerlendirildiğinde sıcaklık ve basınç artışı ile birlikte taneler arasındaki bağların sıkılaştığı ve gözenekliliğin azaldığı görülmüştür. Taneler arasındaki bağların artmasında presleme sıcaklığının artmasının, presleme basıncının artmasından daha çok rol aldığı gözükmemektedir. Bunun yanısıra sıcaklık ve basınç artışı sonucunda tanelerin ve arafazların daha homojen bir yapı aldığı görülmektedir.



Şekil 7.8. S2 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.



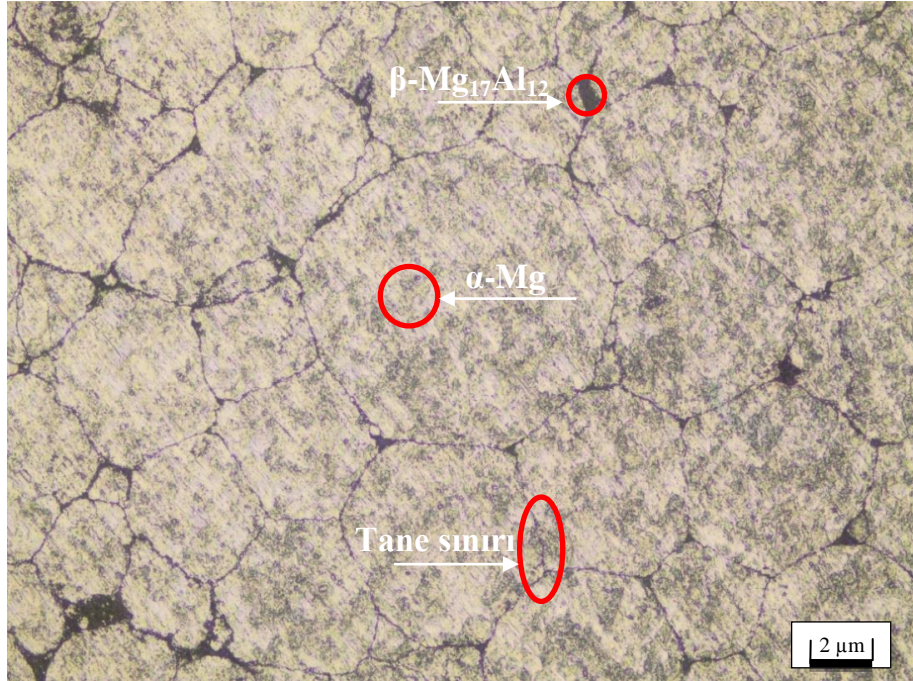
Şekil 7.9. S2 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.



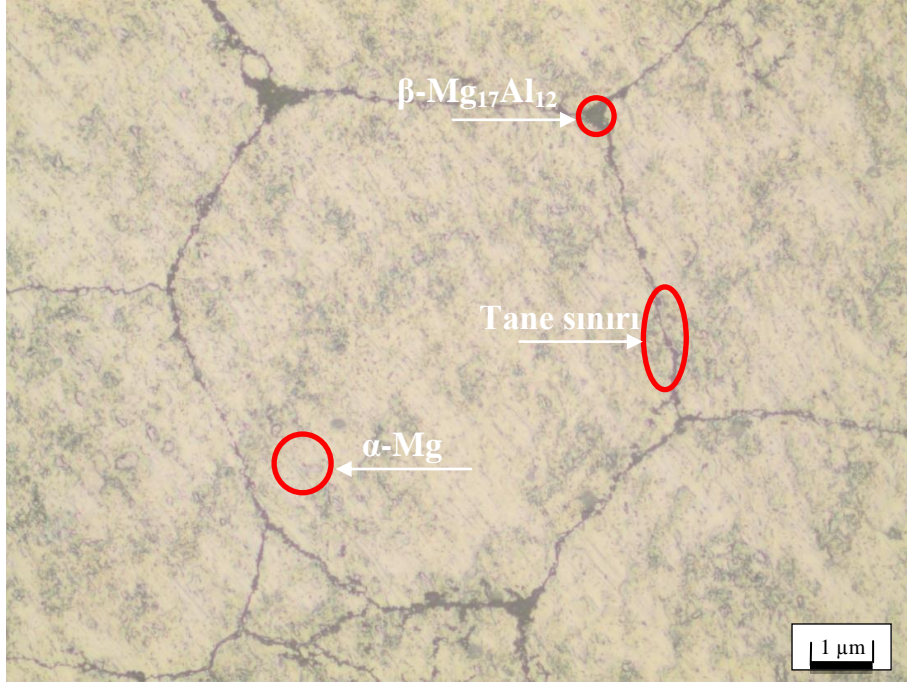
Şekil 7.10. S4 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.



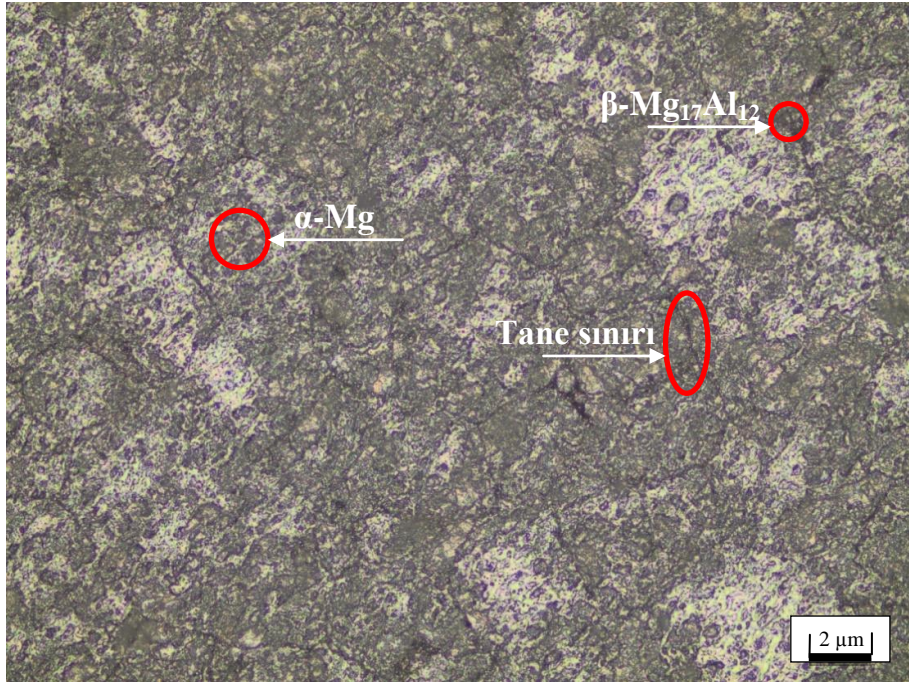
Şekil 7.11. S4 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.



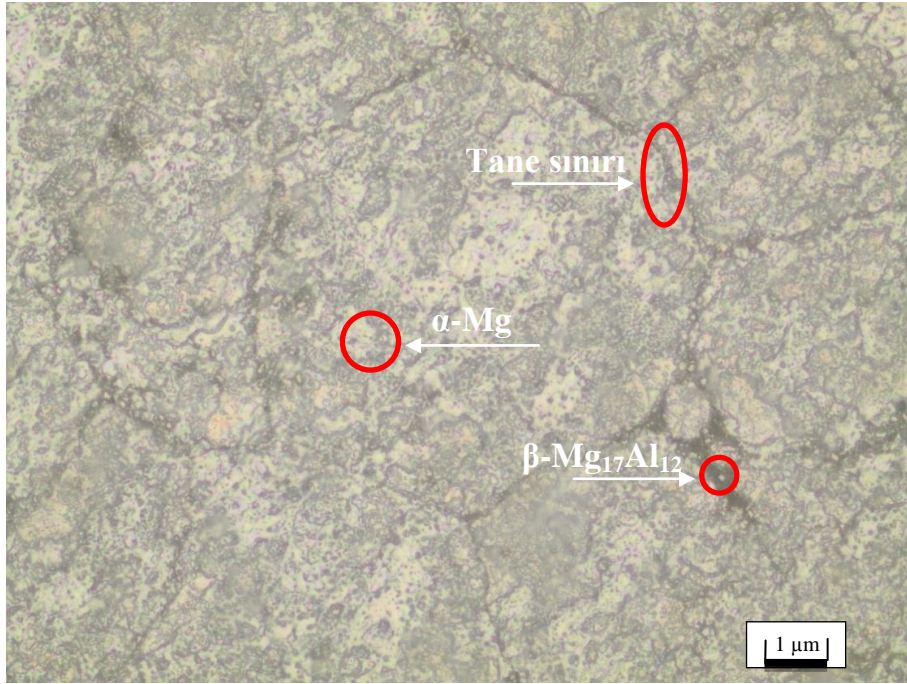
Şekil 7.12. S8 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.



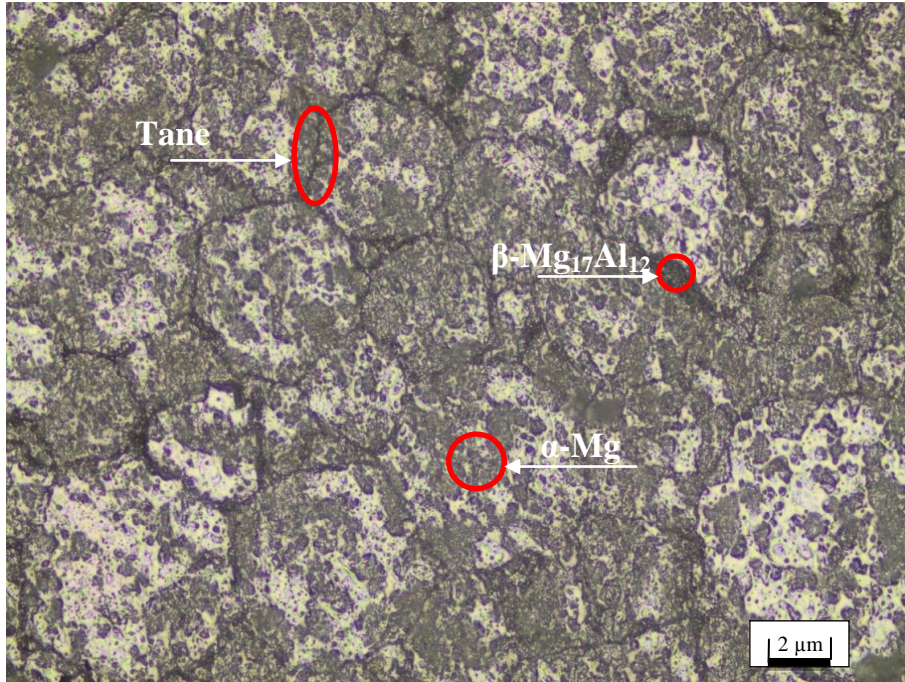
Şekil 7.13. S8 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.



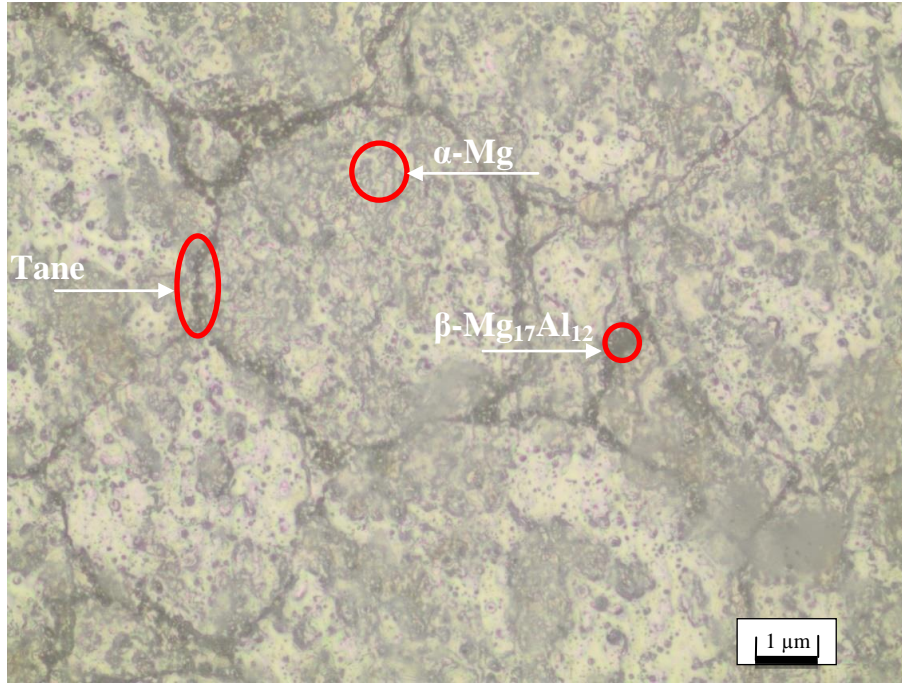
Şekil 7.14. S10 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.



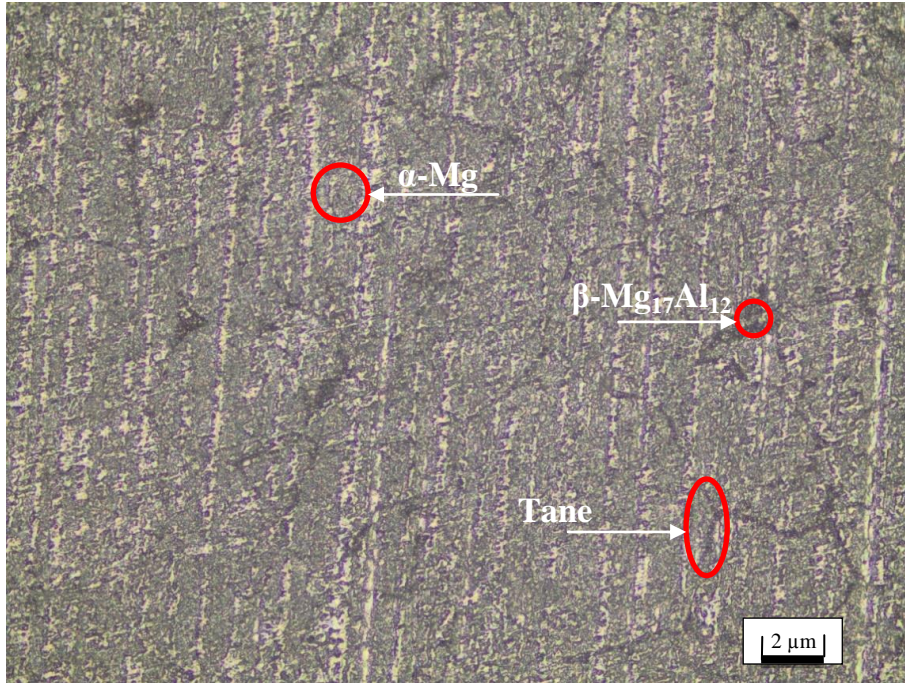
Şekil 7.15. S10 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.



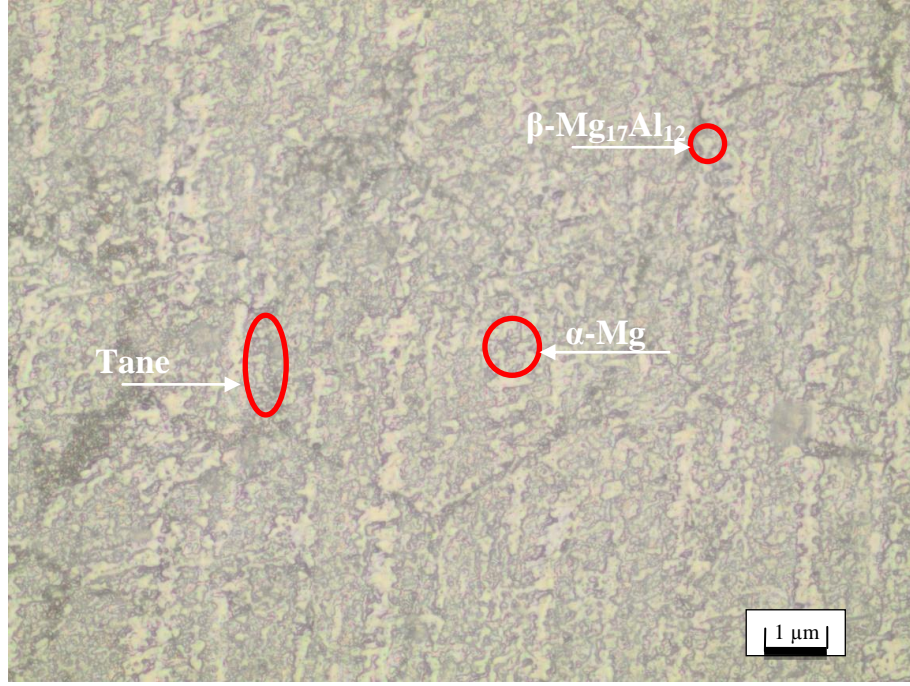
Şekil 7.16. S14 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 7.17. S14 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 7.18. S16 numunesinin 200x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 7.19. S16 numunesinin 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü.

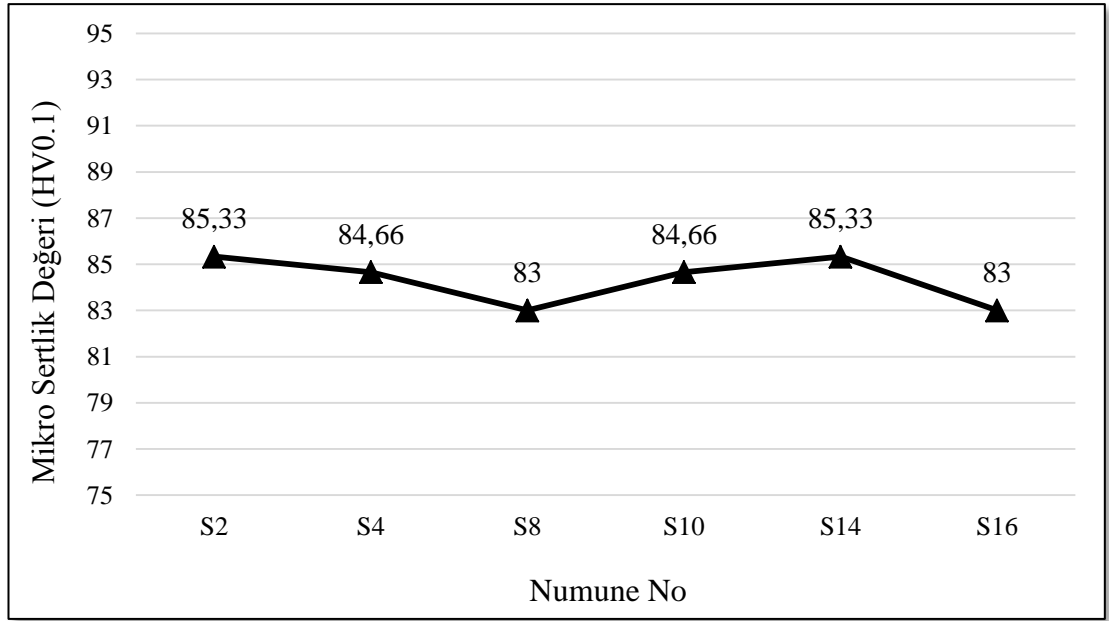
Şekil 7.8-7.19'daki mikroyapılar incelendiğinde basınç ve sıcaklığın artmasına bağlı olarak tane sınırlarının incelendiği ve özellikle tane sınırlarına konumlanan Mg₁₇Al₁₂ arafazının incelendiği ve azaldığı görülmektedir.

7.4. NUMUNELERİN MİKRO VE MAKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

AZ91 alaşım tozlarının sıcak pres ile üretilmesinin sonucunda yapılan mikro sertlik deneyi sonuçları Çizelge 7.2'de görülmektedir. Değerler incelendiğinde numunelerin mikro sertliklerinde kayda değer bir fark görülmemektedir (Şekil 7.20). Mg alaşımları için mikrosertlik sonuçlarının doğruyu yansıtmadığına karar verilmiş ve aynı numulardan makro sertlikler alınmıştır.

Çizelge 7.2. Numunelerden alınan mikro sertlik değerleri.

Numune No	1.Sertlik (HV0,1)	2.Sertlik (HV0,1)	3.Sertlik (HV0,1)	Ortalama Sertlik(HV0,1)
S1	85	81	90	85,33
S3	84	87	83	84,66
S7	82	83	84	83
S9	84	87	83	84,66
S13	88	84	84	85,33
S15	80	84	85	83

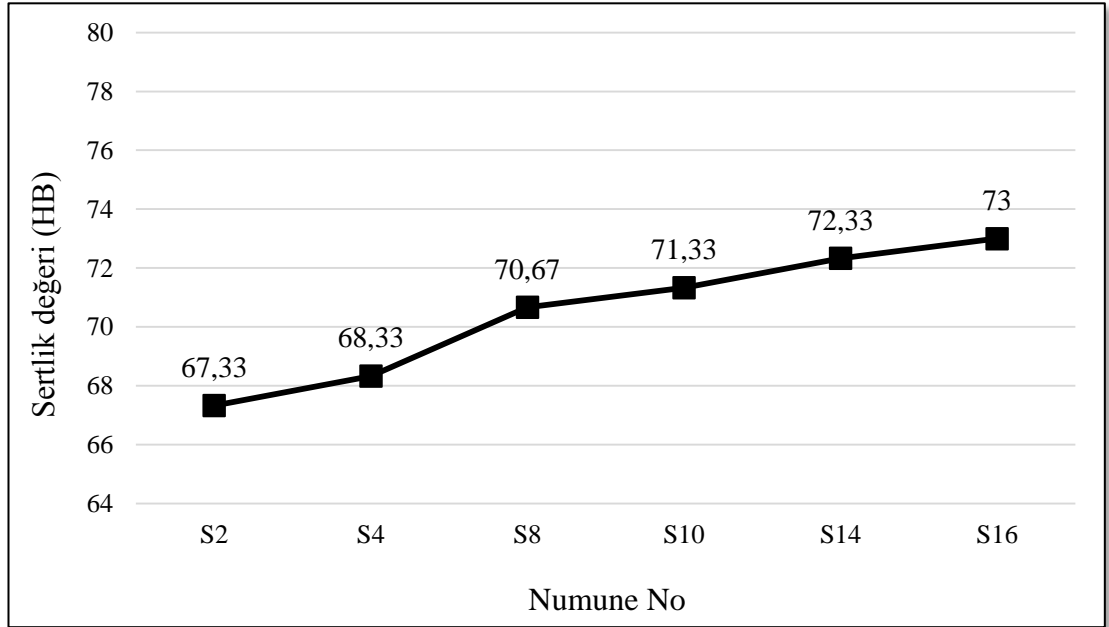


Şekil 7.20. Mikrosertlik değerleri grafiği.

Mikrosertlikleri alınan parçalara sonrasında yapılan makrosertlik deneylerinin sonuçları Çizelge 7.3'te görülmektedir. Mikrosertlik değerlerinin aksine makrosertlik değerlerinde sıcaklık ve basınç artışıyla beraber bir artış gözlemlenmektedir (Şekil 7.21).

Çizelge 7.3. Numunelerden alınan makro sertlik değerleri.

Numune No	1.Sertlik (HB)	2.Sertlik (HB)	3.Sertlik (HB)	Ortalama Sertlik (HB)
S1	67	68	67	67,33
S3	68	67	70	68,33
S7	69	72	71	70,67
S9	70	73	71	71,33
S13	73	71	73	72,33
S15	75	70	74	73,00



Şekil 7.21. Makrosertlik değerleri grafiği.

Şekil 7.21’de verilen sertlik sonuçları incelendiğinde, presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak numunelerin sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Dynacast adlı firmanın verdiği bilgilere göre döküm yöntemi ile üretilen AZ91 alaşımının sertliği 63 HB’dir [109]. Sıcak preslenen tüm numunelerin sertlikleri bu değerden daha yüksek çıkmıştır. Ortaya çıkan en yüksek sertlik değeri 73 HB ile 45 MPa presleme basıncı ve 550 °C sinterleme sıcaklığında ölçülürken, 25 MPa presleme basıncı ve 500 °C sinterleme sıcaklığında 67,33 HB ile en düşük sertlik

değeri elde edilmiştir. Sertlik artışının tozların arasındaki gözenekliliğin azalması ve arafazların dağılımının homojenleşmesi sonucu arttığı düşünülmektedir.

7.5. NUMUNELERİN AŞINMA DENEYLERİ

Aşınma deneyleri S1, S3, S7, S9, S13 ve S15 numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında aşınma kayıpları 10^{-4} hassasiyetli analitik terazi yardımı ile ölçülmüştür. Aşınma esnasındaki sürtünme kuvveti değerleri elektronik dinamometre yardımı ile bilgisayara aktarılmıştır.

($\mu = F_s / F_N$ F_s : Sürtünme Kuvveti, F_N : Normal kuvvet),

Aşınma oranı: $W_a = \Delta G (\text{mm}^3 / \text{Nm})$

Burada;

$W_a = a$; kuvvet), $A_s (\text{mm}^3 / \text{Nm})$

$\Delta G = A_s$ aşınma kuvveti (N)

$S =$ kayma mesafesi (m),

$M =$ yayma mesafesi (m),

$d = A_s$ aşınma mesafesi (m)

aşınma kuvveti sonuçlarından da sürtünme kuvveti hesaplanmıştır. Çizelge 7.4.-7.9. arasında tüm numunelerin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri çizelge olarak, Şekil 7.22.-7.27. de ise tüm numunelerin sonrası özgül aşınma miktarları oransal olarak verilmiştir. Sonrasında tüm numunelerin Şekil 7.28.'de kayma mesafesine göre, Şekil 7.29.'da ise kayma hızlarına göre özgül aşınmalarının karşılaştırılması verilmiştir. Parçalardaki aşınma kayıplarının karşılaştırılması Şekil 7.30.'da karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.4. S1 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.

Kayma Hızı (m/s)	Uygulanan Kuvvet (N)	Alınan Mesafe (m)	Toplam Mesafe (m)	Aşınma Öncesi (g)	Aşınma Sonrası (g)	Aşınma Miktarı (g)	Özgül Aşınma Miktarı (mm ³ /Nm)
0,5	10	500	500	3,969	3,953	0,016	0,00177
		1000	1500	3,953	3,907	0,062	0,00228
		1500	3000	3,907	3,87	0,099	0,00182
	25	500	500	3,868	3,85	0,018	0,00080
		1000	1500	3,848	3,81	0,056	0,00083
		1500	3000	3,81	3,752	0,114	0,00084
	40	500	500	3,751	3,711	0,04	0,00110
		1000	1500	3,711	3,633	0,118	0,00109
		1500	3000	3,633	3,486	0,265	0,00122
1,0	10	500	500	3,485	3,462	0,023	0,00254
		1000	1500	3,462	3,436	0,049	0,00180
		1500	3000	3,436	3,38	0,105	0,00193
	25	500	500	3,378	3,35	0,028	0,00124
		1000	1500	3,35	3,292	0,086	0,00127
		1500	3000	3,292	3,185	0,193	0,00142
	40	500	500	3,184	3,15	0,034	0,00094
		1000	1500	3,15	3,073	0,111	0,00102
		1500	3000	3,073	2,94	0,244	0,00112
1,50	10	500	500	2,938	2,915	0,023	0,00254
		1000	1500	2,915	2,88	0,058	0,00214
		1500	3000	2,88	2,81	0,128	0,00236
	25	500	500	2,807	2,75	0,057	0,00252
		1000	1500	2,75	2,657	0,15	0,00221
		1500	3000	2,657	2,547	0,26	0,00192
	40	500	500	2,545	2,507	0,038	0,00105
		1000	1500	2,507	2,434	0,111	0,00102
		1500	3000	2,434	2,269	0,276	0,00127

Çizelge 7.5. S3 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.

Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Alınan Mesafe(m)	Toplam Mesafe (m)	Aşınma Öncesi (g)	Aşınma Sonrası (g)	Aşınma Miktarı (g)	Özgül Aşınma Miktarı(mm ³ /Nm)
0,5	10	500	500	5,768	5,716	0,052	0,00575
		1000	1500	5,716	5,682	0,086	0,00317
		1500	3000	5,682	5,476	0,292	0,00172
	25	500	500	5,475	5,452	0,023	0,00102
		1000	1500	5,452	5,384	0,091	0,00134
		1500	3000	5,384	5,332	0,143	0,00105
	40	500	500	5,33	5,306	0,024	0,00066
		1000	1500	5,306	5,209	0,121	0,00122
		1500	3000	5,209	5,049	0,281	0,00089
1,0	10	500	500	5,048	5,029	0,019	0,00210
		1000	1500	5,029	4,99	0,058	0,00214
		1500	3000	4,99	4,917	0,131	0,00175
	25	500	500	4,916	4,888	0,028	0,00124
		1000	1500	4,888	4,832	0,084	0,00124
		1500	3000	4,832	4,731	0,185	0,00136
	40	500	500	4,73	4,654	0,076	0,00210
		1000	1500	4,654	4,582	0,148	0,00136
		1500	3000	4,582	4,408	0,322	0,00148
1,50	10	500	500	4,407	4,39	0,017	0,00188
		1000	1500	4,39	4,363	0,044	0,00162
		1500	3000	4,363	4,326	0,081	0,00149
	25	500	500	4,325	4,305	0,02	0,00088
		1000	1500	4,305	4,265	0,06	0,00088
		1500	3000	4,265	4,205	0,12	0,00088
	40	500	500	4,204	4,171	0,033	0,00091
		1000	1500	4,171	4,109	0,095	0,00087
		1500	3000	4,109	4,036	0,168	0,00077

Çizelge 7.6. S7 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.

Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Alınan Mesafe (m)	Toplam Mesafe (m)	Aşınma Öncesi (g)	Aşınma Sonrası (g)	Aşınma Miktarı (g)	Özgül Aşınma Miktarı(mm ³ /Nm)
0,5	10	500	500	4,36	4,346	0,014	0,00155
		1000	1500	4,346	4,316	0,044	0,00162
		1500	3000	4,316	4,279	0,081	0,00149
	25	500	500	4,278	4,259	0,019	0,00084
		1000	1500	4,259	4,229	0,049	0,00072
		1500	3000	4,229	4,175	0,103	0,00076
	40	500	500	4,174	4,151	0,023	0,00064
		1000	1500	4,151	4,101	0,073	0,00067
		1500	3000	4,101	4,018	0,156	0,00072
1,0	10	500	500	4,017	3,999	0,018	0,00199
		1000	1500	3,999	3,969	0,048	0,00177
		1500	3000	3,969	3,928	0,089	0,00164
	25	500	500	3,927	3,909	0,018	0,00080
		1000	1500	3,909	3,87	0,057	0,00084
		1500	3000	3,87	3,804	0,123	0,00091
	40	500	500	3,803	3,788	0,015	0,00041
		1000	1500	3,788	3,755	0,048	0,00044
		1500	3000	3,755	3,681	0,122	0,00056
1,50	10	500	500	3,68	3,668	0,012	0,00133
		1000	1500	3,668	3,646	0,034	0,00125
		1500	3000	3,646	3,609	0,071	0,00131
	25	500	500	3,608	3,593	0,015	0,00066
		1000	1500	3,593	3,562	0,046	0,00068
		1500	3000	3,562	3,524	0,084	0,00062
	40	500	500	3,523	3,501	0,022	0,00061
		1000	1500	3,501	3,464	0,059	0,00054
		1500	3000	3,464	3,402	0,121	0,00056

Çizelge 7.7. S9 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.

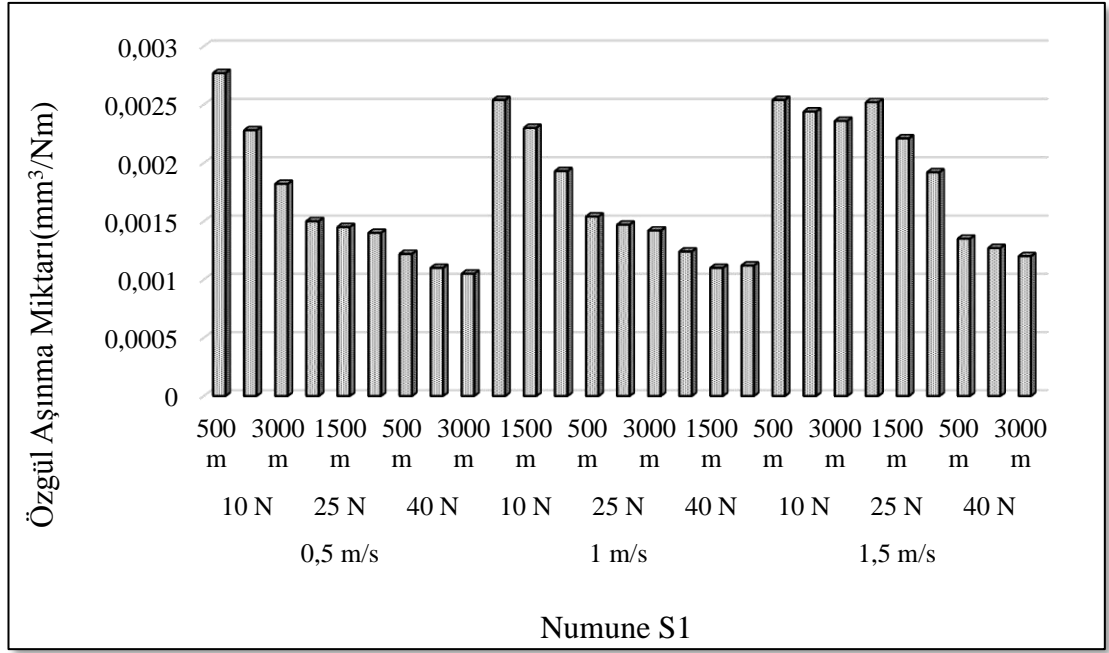
Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Alınan Mesafe (m)	Toplam Mesafe (m)	Aşınma Öncesi (g)	Aşınma Sonrası (g)	Aşınma Miktarı (g)	Özgül Aşınma Miktarı(mm ³ /Nm)
0,5	10	500	500	4,49	4,472	0,018	0,00199
		1000	1500	4,472	4,439	0,051	0,00188
		1500	3000	4,439	4,391	0,099	0,00152
	25	500	500	4,39	4,362	0,028	0,00124
		1000	1500	4,362	4,334	0,056	0,00083
		1500	3000	4,334	4,274	0,116	0,00085
	40	500	500	4,273	4,248	0,025	0,00069
		1000	1500	4,248	4,223	0,05	0,00046
		1500	3000	4,223	4,119	0,154	0,00071
1,0	10	500	500	4,118	4,091	0,027	0,00298
		1000	1500	4,091	4,072	0,046	0,00169
		1500	3000	4,072	4,042	0,076	0,00140
	25	500	500	4,041	4,035	0,006	0,00027
		1000	1500	4,035	4,016	0,025	0,00037
		1500	3000	4,016	3,988	0,053	0,00039
	40	500	500	3,987	3,98	0,007	0,00019
		1000	1500	3,98	3,912	0,075	0,00069
		1500	3000	3,912	3,882	0,105	0,00048
1,50	10	500	500	3,881	3,869	0,012	0,00102
		1000	1500	3,869	3,855	0,026	0,00096
		1500	3000	3,855	3,832	0,049	0,00090
	25	500	500	3,831	3,825	0,006	0,00051
		1000	1500	3,825	3,812	0,019	0,00041
		1500	3000	3,812	3,8	0,031	0,00034
	40	500	500	3,799	3,79	0,009	0,00043
		1000	1500	3,79	3,78	0,019	0,00037
		1500	3000	3,78	3,741	0,058	0,00027

Çizelge 7.8. S13 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.

Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Alınan Mesafe (m)	Toplam Mesafe (m)	Aşınma Öncesi (g)	Aşınma Sonrası (g)	Aşınma Miktarı (g)	Özgül Aşınma Miktarı(mm ³ /Nm)
0,5	10	500	500	4,011	3,994	0,017	0,00188
		1000	1500	3,994	3,983	0,028	0,00103
		1500	3000	3,983	3,935	0,076	0,00140
	25	500	500	3,933	3,925	0,008	0,00035
		1000	1500	3,925	3,902	0,031	0,00046
		1500	3000	3,902	3,863	0,07	0,00082
	40	500	500	3,862	3,848	0,014	0,00039
		1000	1500	3,848	3,832	0,03	0,00028
		1500	3000	3,832	3,801	0,061	0,00058
1,0	10	500	500	3,8	3,788	0,012	0,00133
		1000	1500	3,788	3,779	0,021	0,00077
		1500	3000	3,799	3,767	0,053	0,00098
	25	500	500	3,756	3,748	0,008	0,00035
		1000	1500	3,748	3,737	0,019	0,00028
		1500	3000	3,737	3,72	0,036	0,00027
	40	500	500	3,719	3,713	0,006	0,00017
		1000	1500	3,713	3,697	0,022	0,00020
		1500	3000	3,697	3,678	0,041	0,00019
1,50	10	500	500	3,677	3,671	0,006	0,00066
		1000	1500	3,671	3,662	0,015	0,00055
		1500	3000	3,662	3,652	0,025	0,00056
	25	500	500	3,651	3,647	0,004	0,00034
		1000	1500	3,647	3,64	0,011	0,00026
		1500	3000	3,64	3,629	0,022	0,00021
	40	500	500	3,628	3,623	0,005	0,00031
		1000	1500	3,623	3,613	0,015	0,00023
		1500	3000	3,613	3,581	0,047	0,00022

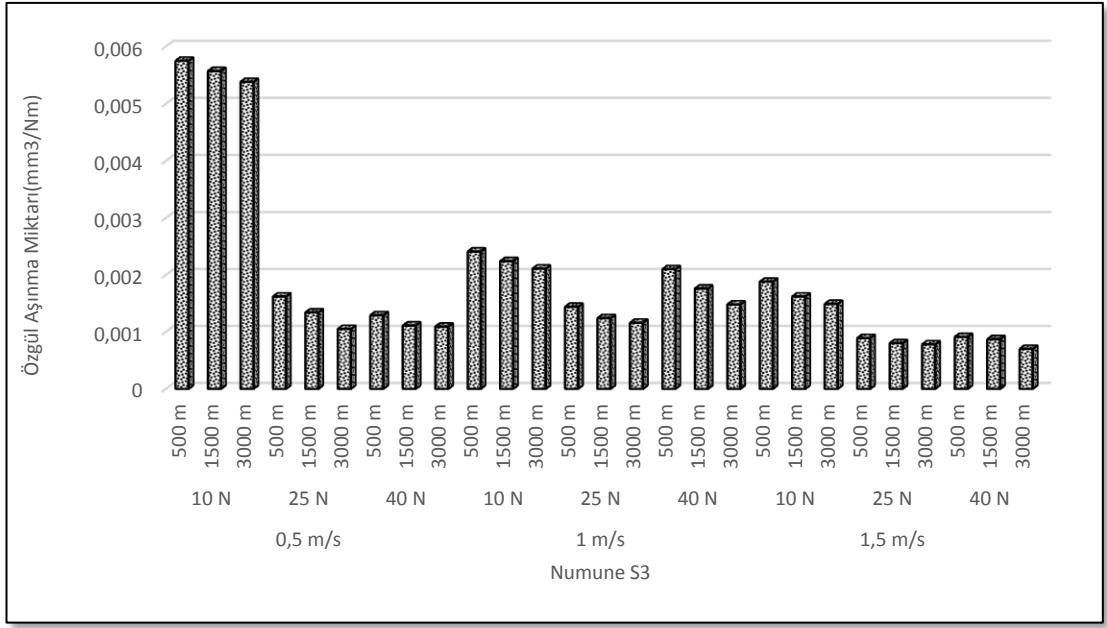
Çizelge 7.9. S15 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.

Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Alınan Mesafe (m)	Toplam Mesafe (m)	Aşınma Öncesi (g)	Aşınma Sonrası (g)	Aşınma Miktarı (g)	Özgül Aşınma Miktarı(mm ³ /Nm)
0,5	10	500	500	2,923	2,914	0,009	0,00099
		1000	1500	2,914	2,896	0,027	0,00099
		1500	3000	2,896	2,853	0,07	0,00129
	25	500	500	2,852	2,835	0,017	0,00075
		1000	1500	2,835	2,791	0,061	0,00090
		1500	3000	2,791	2,735	0,117	0,00062
	40	500	500	2,734	2,704	0,03	0,00083
		1000	1500	2,704	2,667	0,067	0,00062
		1500	3000	2,667	2,602	0,132	0,00061
1,0	10	500	500	2,6	2,589	0,011	0,00122
		1000	1500	2,589	2,578	0,022	0,00081
		1500	3000	2,578	2,563	0,037	0,00068
	25	500	500	2,562	2,551	0,011	0,00049
		1000	1500	2,551	2,529	0,033	0,00049
		1500	3000	2,529	2,499	0,063	0,00032
	40	500	500	2,498	2,488	0,01	0,00028
		1000	1500	2,488	2,474	0,024	0,00022
		1500	3000	2,474	2,455	0,043	0,00020
1,50	10	500	500	2,454	2,448	0,006	0,00044
		1000	1500	2,448	2,435	0,019	0,00045
		1500	3000	2,435	2,417	0,037	0,00038
	25	500	500	2,416	2,412	0,004	0,00026
		1000	1500	2,412	2,407	0,009	0,00021
		1500	3000	2,407	2,396	0,02	0,00018
	40	500	500	2,395	2,386	0,009	0,00025
		1000	1500	2,386	2,374	0,021	0,00019
		1500	3000	2,374	2,355	0,04	0,00018

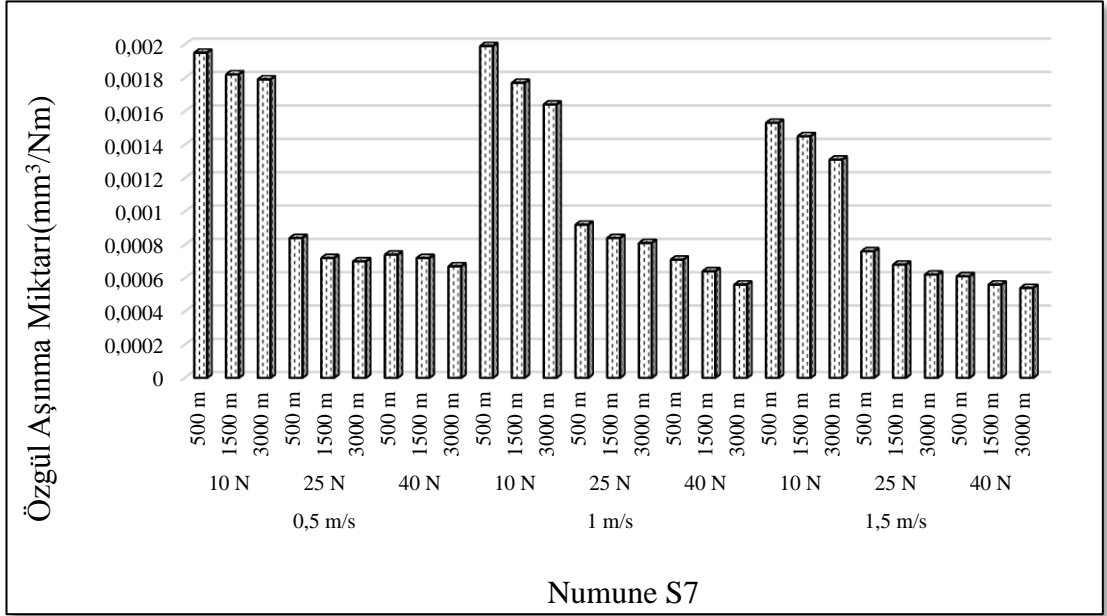


Şekil 7.22. S1 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.

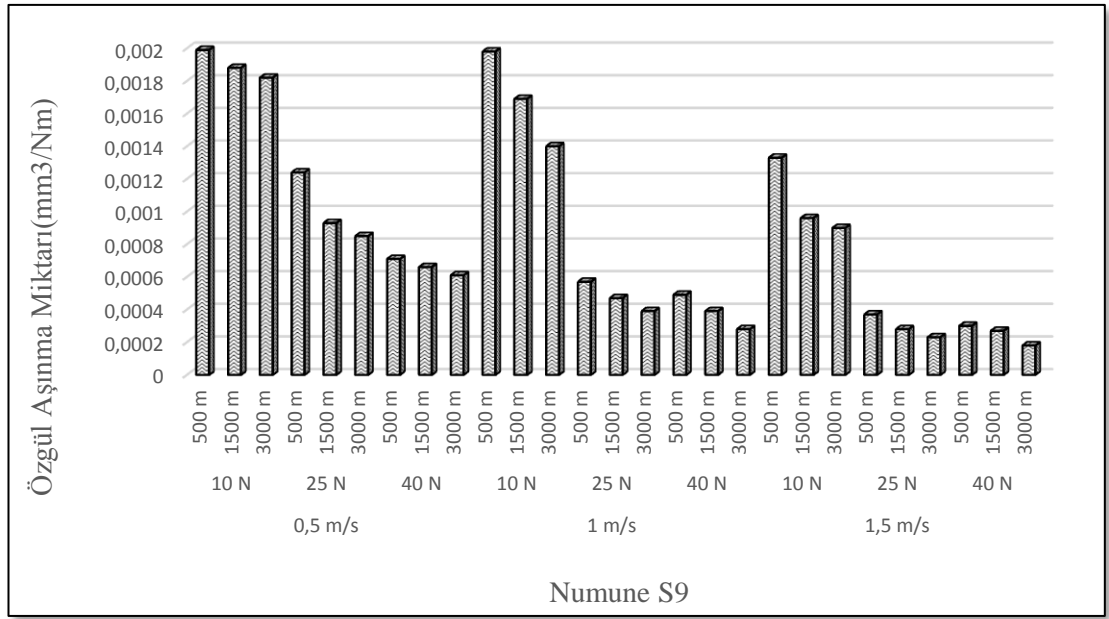
Şekil 7.22 incelendiğinde aşınma mesafesinin artmasına bağlı olarak (500 mm-3000 m) özgül aşınma miktarının azaldığı görülmektedir. Ayrıca numune üzerine uygulanan normal kuvvetin artması (10N-40N) ile de özgül aşınma miktarları azalmıştır. Normal kuvvetin artmasına bağlı olarak özgül aşınma miktarının azalmasının sebebi, normal kuvvetin artması ile numune ve karşı disk yüzey arasındaki sıcaklığın artması sonucu arayüzeyde aşınma ürünü olarak meydana gelen partiküllerin yeniden yüzeye kaynaklanması ve yüzeye sıvanması olarak düşünülmektedir. Ayrıca benzer durum aşınma mesafesinin artmasında görülmektedir. Sürtünme mesafesinin artması ile arayüzey sıcaklığının artması sonucu partiküllerin yüzeye sıvanması sonucu olduğu düşünülebilir. Benzer durum diğer aşınma numunelerinde de görülmektedir.



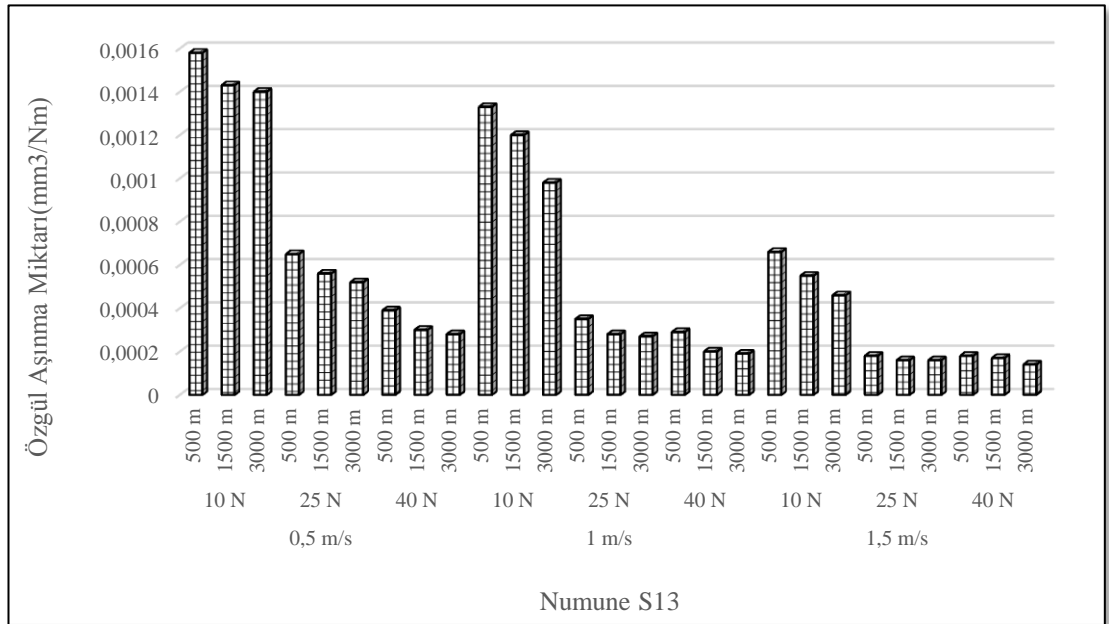
Şekil 7.23. S3 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.



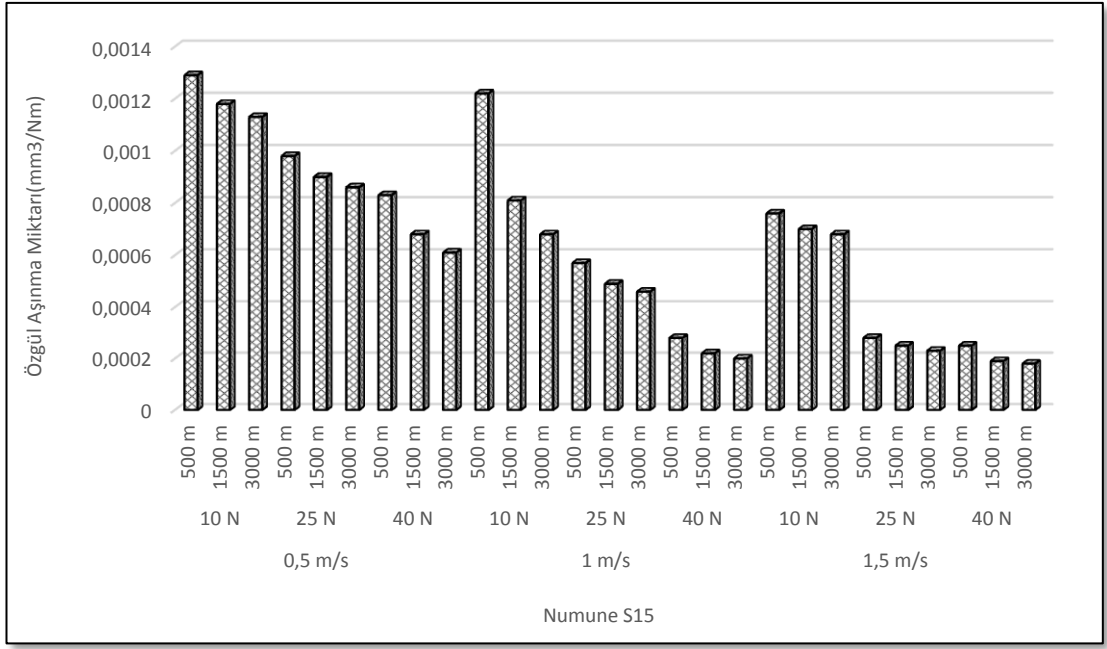
Şekil 7.24. S7 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.



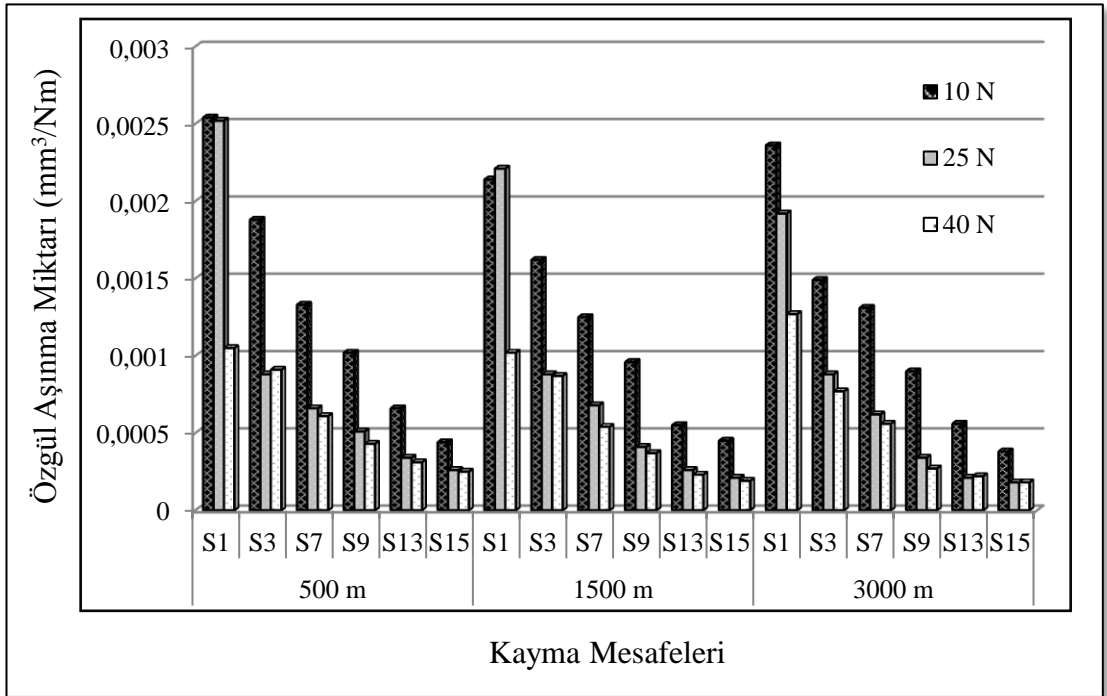
Şekil 7.25. S9 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.



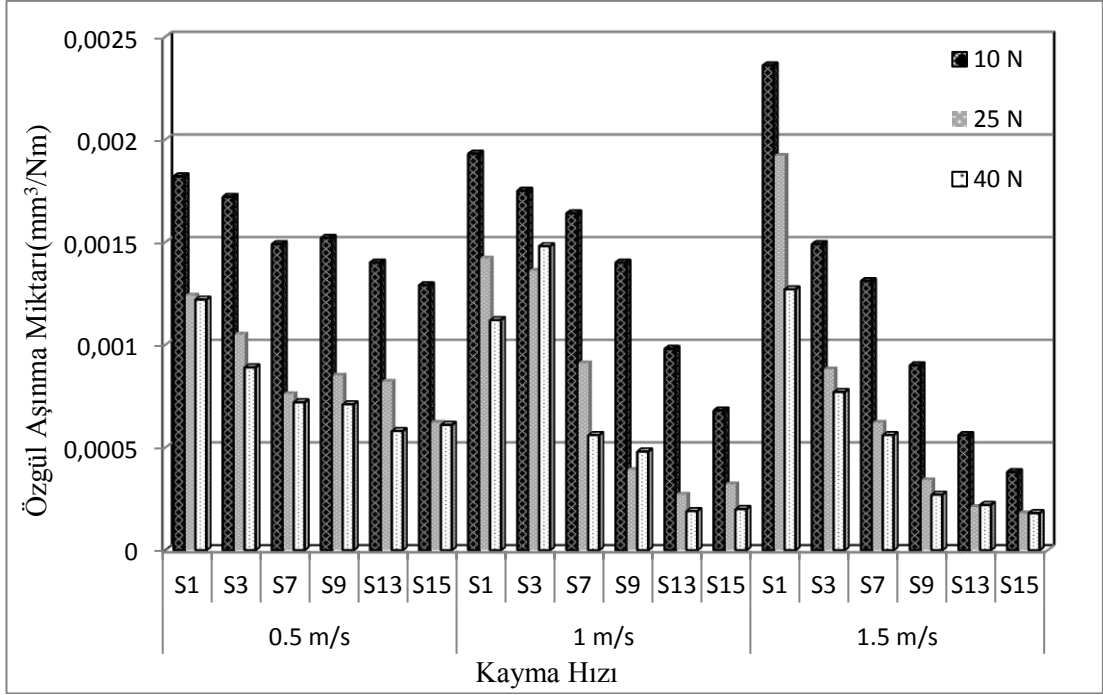
Şekil 7.26. S13 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.



Şekil 7.27. S15 numunesinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri, özgül aşınma oranı.



Şekil 7.28. Tüm numunelerin kayma mesafelerine göre özgül aşınmalarının karşılaştırılması.



Şekil 7.29. Tüm numunelerin kayma hızına göre özgül aşınmalarının karşılaştırılması.

Çizelge 7.4.-7.9. ve Şekil 7.22.-7.29 incelendiğinde en yüksek aşınmanın S1 ve S3 numaralı numunelere gerçekleştiği görülmektedir. Bu numunelerin ortak özelliği 25 MPa basınç değerinde sıcak preslenmiş olmalarıdır. Buradan 25 MPa basıncın tozlar arasında yeter düzeyde sıkı bağ oluşturamadığı ve bu yüzden büyük kırılmalar yaşandığı sonucu çıkarılmaktadır.

Yapılan deneylerin genelinde aşınmaya karşı en yüksek direnci S15 numunesi, sonrasında ise S13 numunesinin gösterdiği görülmektedir. Bu numunelerin her ikisi de 45 MPa basınç altında sıcak preslenmiştir. Tüm numunelerin aşınma mesafesine bağlı aşınma miktarları Şekil 7.20-7.29'de verilen grafiklerde karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerden S13 ve S15 no'lu numunelerin aşınma dirençleri açıkça görülmektedir. Normal kuvvetlere bağlı aşınma kayıpları incelendiğinde kuvvet artışının çok yüksek bir etkisinin olmadığı gözükmemektedir. Tüm aşınma kayıpları hafif aşınma olarak nitelendirilebilir. Chen vd. [18] yaptıkları çalışmada 50 N sonrasındaki yüklemelerde aşınma kayıplarının çok yükseldiğini ve hafif aşınma davranışının yerini şiddetli aşınmaya bıraktığını gözlemlemişlerdir. Yapılan bu çalışmada en yüksek kuvvet 40 N olduğundan dolayı şiddetli aşınmalara rastlanılmamıştır. Öncesinde hesaplanan sertlik değerleri özgül aşınma oranlarıyla mukayese edildiğinde daha sert olan S13 ve

S15 numunelerinin daha düşük özgül aşınma oranlarına, dolayısıyla daha fazla aşınma dirençlerine sahip olduğu görülmüştür. Presleme basıncı ve sıcaklığı arttıkça sıkılaştıran tozların ve taneciklerin arasındaki bağlar malzemelerin aşınma direncini de gözle görülür şekilde yükseltmiştir.

Parçaların aşınma esnasındaki davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi ve aşınma dirençleri hakkında fikir sahibi olunabilmesi için numunelerin 3000 metrelik aşınma mesafesi sonundaki özgül aşınma miktarları hesaplanmıştır. S1 ve S3 numunelerinin yüzeylerinde oluşan büyük kırılmalar sonucu özgül aşınma oranları diğer numunelere göre yüksek çıkmıştır. Yine aşınma miktarlarındaki değerlere paralel bir şekilde 45 MPa basınç altında ve sırasıyla 500 ° C ve 550 ° C’de sıcak preslenen S13 ve S15 no’lu numunelerde en düşük özgül aşınma miktarları görülmüştür.

Çizelge 7.10. Kopan parçaların kırıldıkları deneyler ve ağırlıkları.

Kırılan parçanın numarası	Parçanın kırıldığı deney	Kırılan parçanın ağırlığı(gr)
S1 Numunesi		
1	0,5 m/s kayma hızında 40 N yük altında 1500-3000 metre arasında	0,018
2	1 m/s kayma hızında 25 N yük altında 500-1500 metre arasında	0,012
S3 Numunesi		
1	0,5 m/s kayma hızında 10 N yük altında 1500-3000 metre arasında	0,055
2	0,5 m/s kayma hızında 25 N yük altında 500-1500 metre arasında	0,018
3	0,5 m/s kayma hızında 40 N yük altında 500-1500 metre arasında	0,018
4	1 m/s kayma hızında 40 N yük altında 1500-3000 metre arasında	0,048
5	1,5 m/s kayma hızında 40 N yük altında 0-500 metre arasında	0,008

Bu sonuçlar doğrultusunda 45 MPa basınç altında sıcak preslenen numunelerin toz taneleri arasında oluşan bağların daha kuvvetli olduğu aşıkardır. Ayrıca bahsi geçen bu her iki numune karşılaştırıldığında hızlara bağlı daha az değişen ve daha stabil bir özgül aşınma oranına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Tüm numunelerin özgül aşınma miktarları Şekil 7.22-7.27 arasında verilen sonuçlarda karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Shanti vd. [20] yaptıkları çalışmada AZ91 alaşımlarında tane boyutunun aşınma özelliklerine çok büyük bir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir. Bu tez çalışmasında yapılan deneyler sonucunda ise presleme sıcaklığının ve basıncının etkisi çok açık görülmektedir. Bu bilgiler ışığında aşınma direncinin artmasında tane küçültmeye göre sıcaklık ve presleme basıncının çok daha önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Numunelerin aşınma mekaniklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için deneyler esnasında oluşan disk ve numune arasındaki sürtünme kuvvetleri elektronik dinamometre ile ölçülmüştür. Tüm süreç boyunca not edilen değerlerin ortalamaları alınmış ve bu şekilde sürtünme kuvvetleri belirlenmiştir. Hesaplanan sürtünme kuvvetleri uygulanan normal kuvvete bölünerek sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Tüm numunelerin sürtünme kuvvetleri ve sürtünme katsayıları Çizelge 7.11-7.16'de ve Şekil 7.30-7.36 arasında verilmiştir.

Çizelge 7.11. S1 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.

Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Gidilen Mesafe (m)	Toplam Mesafe (m)	Sürtünme Kuvveti(N)	Sürtünme Katsayısı(μ)
0,5	10	500	500	1,602	0,1602
		1000	1500	1,604	0,1604
		1500	3000	1,593	0,1593
	25	500	500	3,049	0,1220
		1000	1500	3,078	0,1231
		1500	3000	3,154	0,1261
	40	500	500	4,742	0,1186
		1000	1500	4,535	0,1134
		1500	3000	4,658	0,1164
1,0	10	500	500	1,545	0,1545
		1000	1500	1,470	0,1470
		1500	3000	1,561	0,1561
	25	500	500	2,954	0,1181
		1000	1500	2,945	0,1178
		1500	3000	2,983	0,1193
	40	500	500	4,189	0,1047
		1000	1500	4,294	0,1073
		1500	3000	4,351	0,1088
1,50	10	500	500	1,443	0,1443
		1000	1500	1,436	0,1436
		1500	3000	1,499	0,1499
	25	500	500	2,812	0,1125
		1000	1500	2,876	0,1150
		1500	3000	2,808	0,1123
	40	500	500	4,029	0,1008
		1000	1500	3,707	0,0930
		1500	3000	3,878	0,0970

Çizelge 7.12. S3 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.

Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Gidilen Mesafe (m)	Toplam Mesafe (m)	Sürtünme Kuvveti(N)	Sürtünme Katsayısı(μ)
0,5	10	500	500	1,758	0,1758
		1000	1500	1,672	0,1672
		1500	3000	1,820	0,1820
	25	500	500	3,432	0,1373
		1000	1500	3,437	0,1375
		1500	3000	3,499	0,1399
	40	500	500	4,480	0,1120
		1000	1500	4,524	0,1131
		1500	3000	4,581	0,1145
1,0	10	500	500	1,502	0,1502
		1000	1500	1,562	0,1562
		1500	3000	1,528	0,1528
	25	500	500	2,683	0,1073
		1000	1500	2,815	0,1126
		1500	3000	2,772	0,1109
	40	500	500	3,868	0,0967
		1000	1500	3,659	0,0915
		1500	3000	3,632	0,0908
1,50	10	500	500	1,236	0,1236
		1000	1500	1,199	0,1199
		1500	3000	1,162	0,1162
	25	500	500	2,078	0,0831
		1000	1500	2,068	0,0827
		1500	3000	2,040	0,0816
	40	500	500	2,862	0,0715
		1000	1500	2,836	0,0709
		1500	3000	2,814	0,0703

Çizelge 7.13. S7 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.

Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Gidilen Mesafe (m)	Toplam Mesafe (m)	Sürtünme Kuvveti(N)	Sürtünme Katsayısı(μ)
0,5	10	500	500	1,519	0,1519
		1000	1500	1,530	0,1530
		1500	3000	1,526	0,1526
	25	500	500	2,719	0,1087
		1000	1500	2,631	0,1053
		1500	3000	2,749	0,1100
	40	500	500	3,897	0,0974
		1000	1500	3,907	0,0977
		1500	3000	3,982	0,0995
1,0	10	500	500	1,123	0,1123
		1000	1500	1,070	0,1070
		1500	3000	1,101	0,1101
	25	500	500	1,877	0,0751
		1000	1500	1,891	0,0756
		1500	3000	1,975	0,0790
	40	500	500	2,761	0,0690
		1000	1500	2,663	0,0666
		1500	3000	2,707	0,0677
1,50	10	500	500	1,014	0,1014
		1000	1500	1,043	0,1043
		1500	3000	1,105	0,1105
	25	500	500	2,069	0,0828
		1000	1500	1,944	0,0778
		1500	3000	2,010	0,0804
	40	500	500	2,759	0,0690
		1000	1500	2,695	0,0674
		1500	3000	2,661	0,0665

Çizelge 7.14. S9 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.

Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Gidilen Mesafe (m)	Toplam Mesafe (m)	Sürtünme Kuvveti(N)	Sürtünme Katsayısı(μ)
0,5	10	500	500	1,334	0,1334
		1000	1500	1,321	0,1321
		1500	3000	1,291	0,1291
	25	500	500	2,399	0,0959
		1000	1500	2,341	0,0936
		1500	3000	2,351	0,0940
	40	500	500	3,395	0,0848
		1000	1500	3,419	0,0854
		1500	3000	3,244	0,0811
1,0	10	500	500	1,085	0,1085
		1000	1500	1,068	0,1068
		1500	3000	1,131	0,1131
	25	500	500	1,972	0,0789
		1000	1500	1,893	0,0757
		1500	3000	1,817	0,0727
	40	500	500	2,640	0,0660
		1000	1500	2,630	0,0658
		1500	3000	2,637	0,0659
1,50	10	500	500	0,991	0,0991
		1000	1500	1,049	0,1049
		1500	3000	1,081	0,1081
	25	500	500	1,996	0,0799
		1000	1500	1,947	0,0779
		1500	3000	1,912	0,0765
	40	500	500	2,737	0,0684
		1000	1500	2,691	0,0673
		1500	3000	2,687	0,0672

Çizelge 7.15. S13 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.

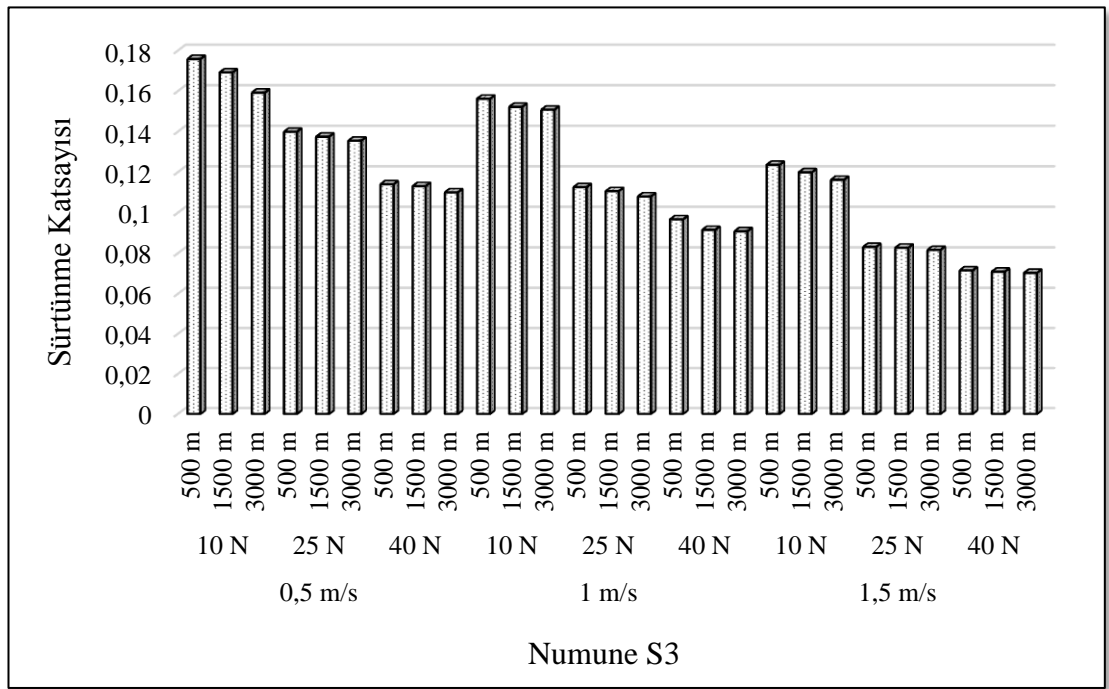
Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Gidilen Mesafe (m)	Toplam Mesafe (m)	Sürtünme Kuvveti(N)	Sürtünme Katsayısı(μ)
0,5	10	500	500	1,454	0,1454
		1000	1500	1,449	0,1449
		1500	3000	1,436	0,1436
	25	500	500	2,457	0,0983
		1000	1500	2,508	0,1003
		1500	3000	2,504	0,1002
	40	500	500	3,687	0,0922
		1000	1500	3,630	0,0907
		1500	3000	3,726	0,0931
1,0	10	500	500	1,365	0,1365
		1000	1500	1,390	0,1390
		1500	3000	1,417	0,1417
	25	500	500	2,602	0,1041
		1000	1500	2,606	0,1042
		1500	3000	2,570	0,1028
	40	500	500	3,674	0,0919
		1000	1500	3,786	0,0946
		1500	3000	3,785	0,0946
1,50	10	500	500	1,420	0,1420
		1000	1500	1,432	0,1432
		1500	3000	1,422	0,1422
	25	500	500	2,501	0,1000
		1000	1500	2,513	0,1005
		1500	3000	2,520	0,1008
	40	500	500	3,526	0,0881
		1000	1500	3,581	0,0895
		1500	3000	3,560	0,0890

Çizelge 7.16. S15 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.

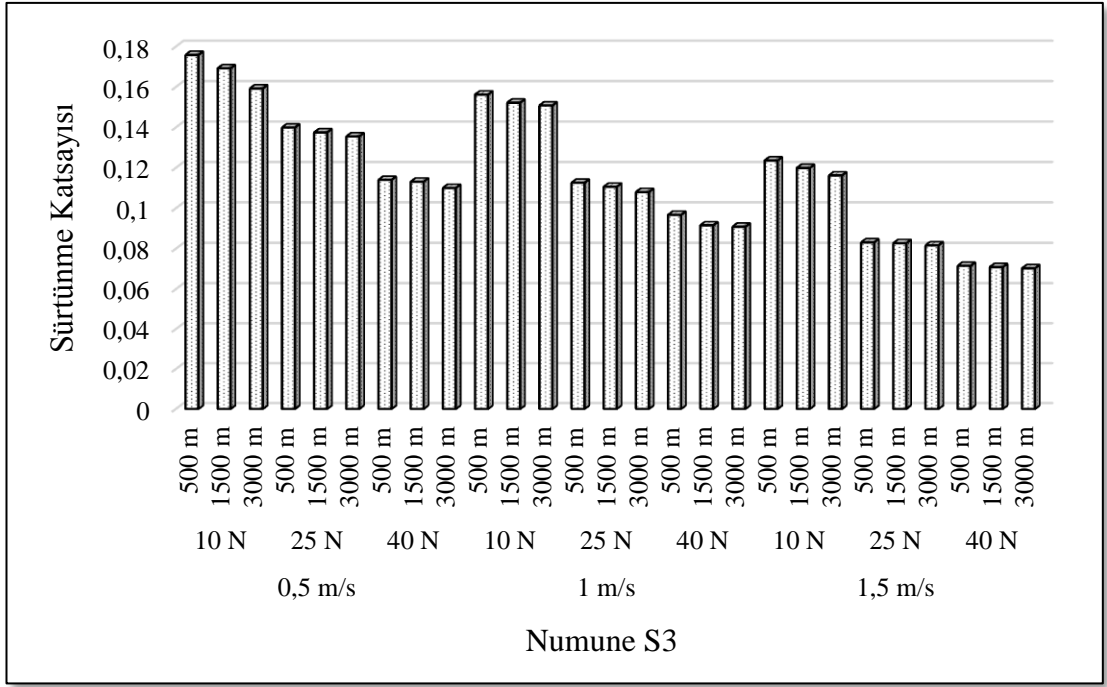
Kayma Hızı(m/s)	Uygulanan Kuvvet(N)	Gidilen Mesafe (m)	Toplam Mesafe (m)	Sürtünme Kuvveti(N)	Sürtünme Katsayısı(μ)
0,5	10	500	500	1,275	0,1275
		1000	1500	1,254	0,1254
		1500	3000	1,264	0,1264
	25	500	500	2,280	0,0912
		1000	1500	2,247	0,0899
		1500	3000	2,274	0,0910
	40	500	500	3,352	0,0838
		1000	1500	3,229	0,0807
		1500	3000	3,225	0,0806
1,0	10	500	500	1,222	0,1222
		1000	1500	1,239	0,1239
		1500	3000	1,269	0,1269
	25	500	500	2,180	0,0872
		1000	1500	2,210	0,0884
		1500	3000	2,274	0,0910
	40	500	500	3,136	0,0784
		1000	1500	3,202	0,0801
		1500	3000	3,229	0,0807
1,50	10	500	500	1,211	0,1211
		1000	1500	1,273	0,1273
		1500	3000	1,284	0,1284
	25	500	500	2,151	0,0860
		1000	1500	2,171	0,0868
		1500	3000	2,204	0,0882
	40	500	500	3,040	0,0760
		1000	1500	3,174	0,0794
		1500	3000	3,203	0,0801

Sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde en yüksek sürtünme katsayısı S3 no'lu numunede 1500-3000 mesafesi arasında 10 N'luk yük altında, 0,182 olarak hesaplanmıştır. S1 numunesinin sürtünme katsayı değerleri de S3'e yakın ve diğer numunelere göre fazla çıkmıştır. Sürtünme katsayılarının yüksek çıkma sebebinin bu iki numunede gerçekleşen yüksek malzeme kaybindan kaynaklanan aşırı pürüzlü ortam olduğu düşünülmektedir. Tüm numunelerin sürtünme katsayıları kayma hızı 0,5 m/s'den 1 m/s'ye düştüğünde azalırken, S13 ve S15 no'lu numunelerde kayda değer bir değişim görülmemiştir. Ayrıca S3 no'lu numune haricindeki tüm

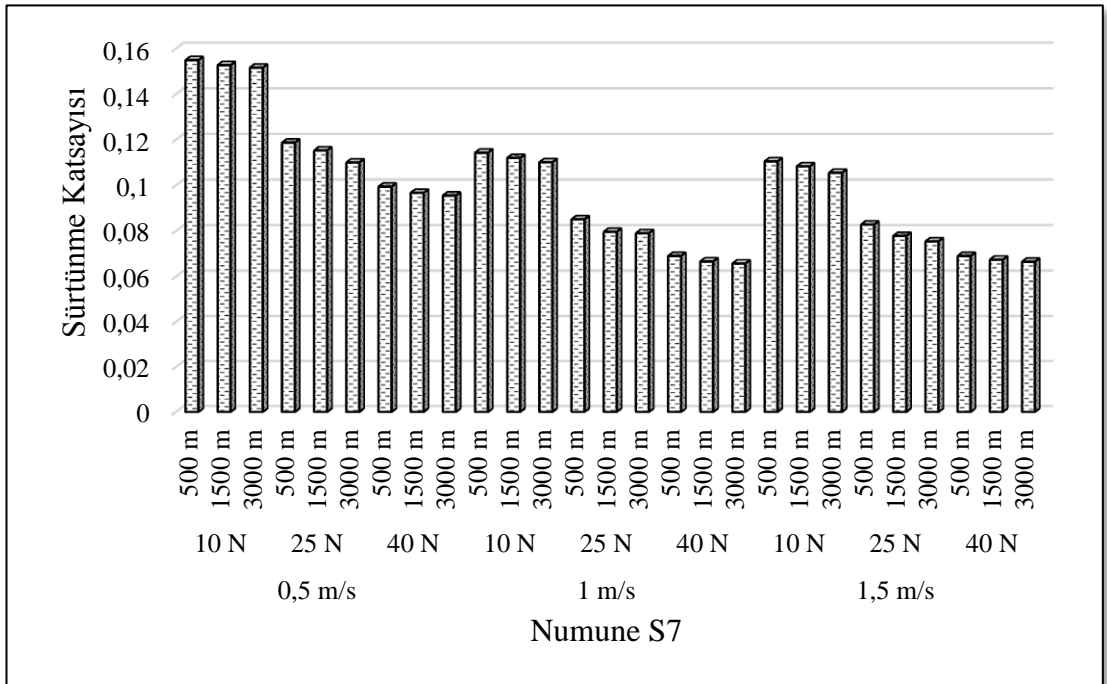
numuneler kayma hızı 1,5 m/s'ye ulaştığında daha stabil bir sürtünme katsayısına sahip olmuşlardır. S3 no'lu numunedeki gerçekleşen diğer malzemelere göre yüksek malzeme kaybı aşınma direncini olumsuz etkilediği gibi sürtünme katsayısı sabitliğini de olumsuz etkilemiştir. S13 ve S15 numunelerindeki sürtünme katsayı değerleri neredeyse tüm hızlarda sabit çıkmıştır. Tüm bu değerlerin karşılaştırmalı grafikleri Şekil 7.30-7.36 arasında görülmektedir. Şekil 7.36.'da ise tüm numunelerin kayma hızına ve uygulanan normal kuvvete göre karşılaştırmalı sürtünme katsayıları verilmiştir.



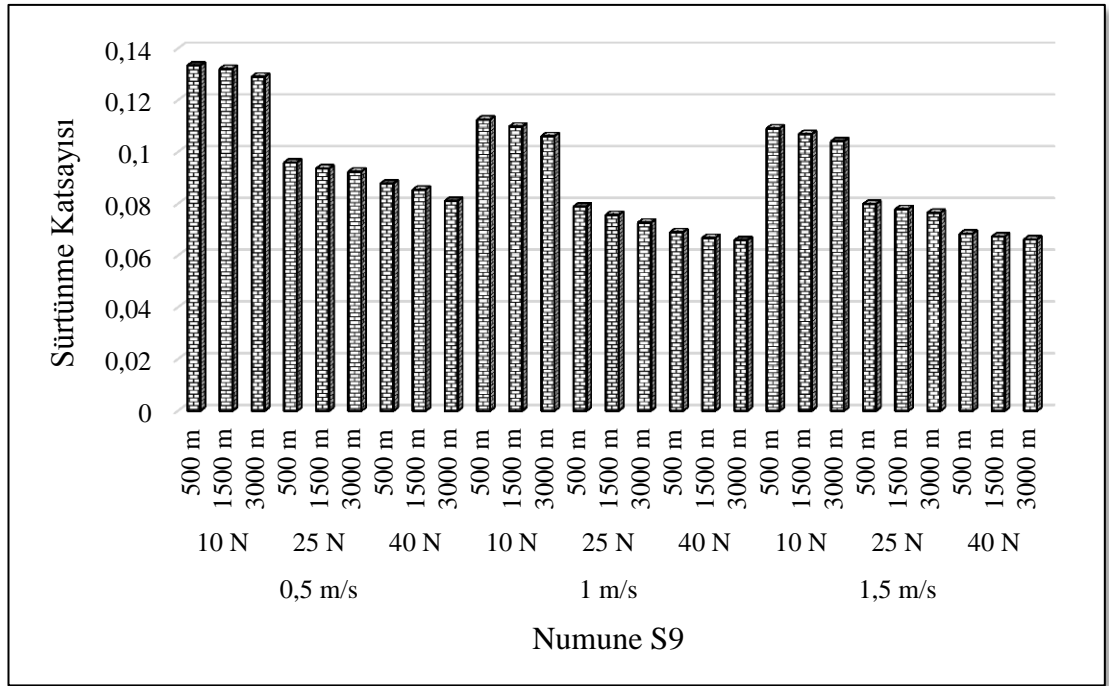
Şekil 7.30. S1 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.



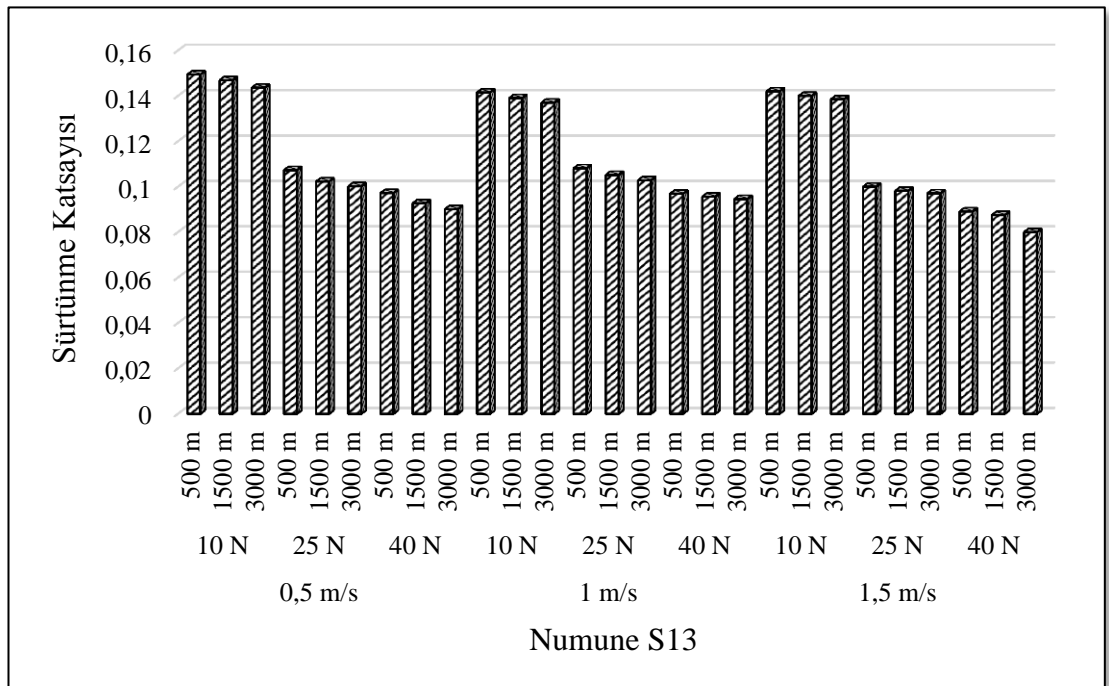
Şekil 7.31. S3 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.



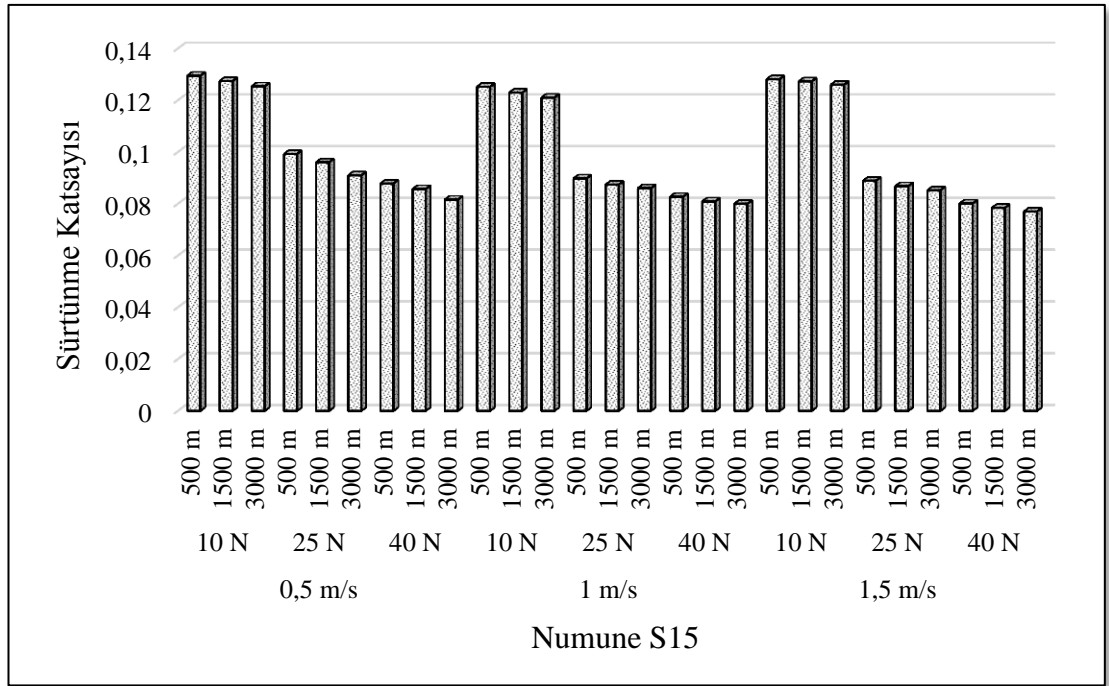
Şekil 7.32. S7 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.



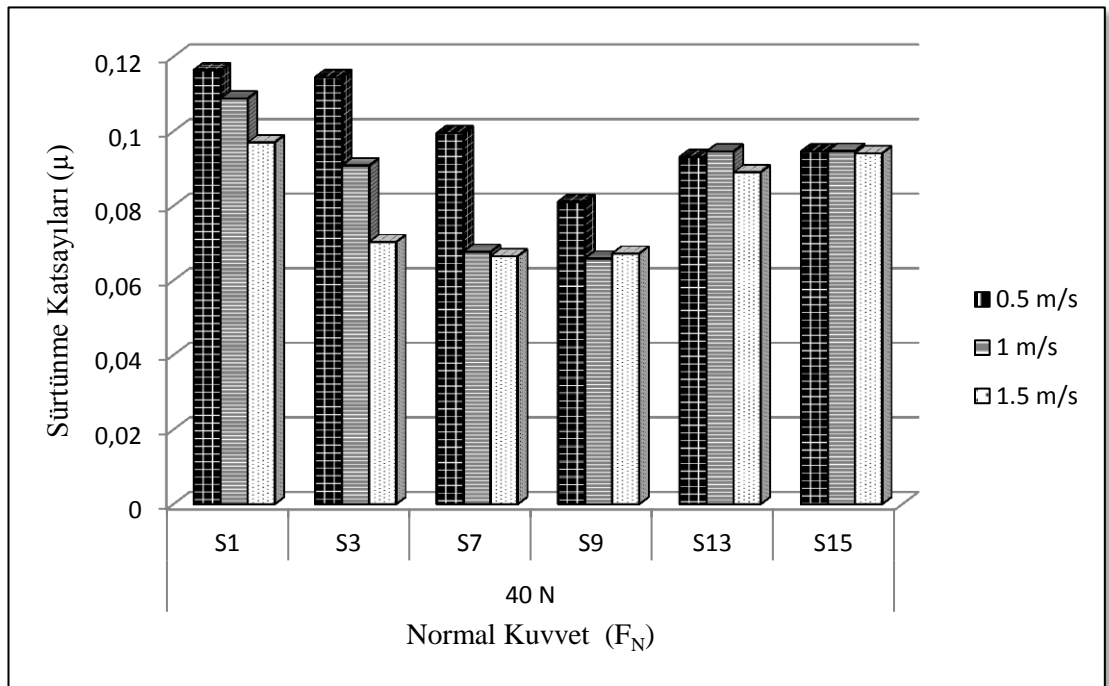
Şekil 7.33. S9 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.



Şekil 7.34. S13 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.



Şekil 7.35. S15 numunesinin sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri.



Şekil 7.36. Tüm numunelerin sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.

Şekil 7.30-7.36 incelendiğinde tüm numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin benzer özellik sergilediği görülmektedir. Kayma hızının, normal kuvvetin ve

sürtünme mesafesinin artması ile sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar Şekil 7.22-7.27’de verilen özgül aşınma oranlarıyla kıyaslandığında sonuçların doğruluğunu ortaya koymaktadır. Kayma hızının artmasına bağlı olarak sürtünme malzemesi ve karşı malzeme arayüzeyinde meydana gelen sıcaklığın artması ile sürtünme katsayısının azaldığı şeklinde düşünülebilir. Ali Paşa Hekimoğlu ve Murat Hacıosmanoğlu [107] Bakır ve Magnezyum Katkılarının Al-17Si Alaşımının Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisi ile ilgili yaptıkları çalışmalarında Sürtünme katsayısı değerlerinin kayma mesafesinin artmasına bağlı olarak azalacağını vurgulamışlardır. Bunun sebebini ise aşınma parçacıklarının veya plastik deformasyon sonucu yüzeylerde oluşan plastik deformasyonun sürtünme kuvvetinde yol açtığı değişimlerden kaynaklanmış olabileceğini belirtmişlerdir.

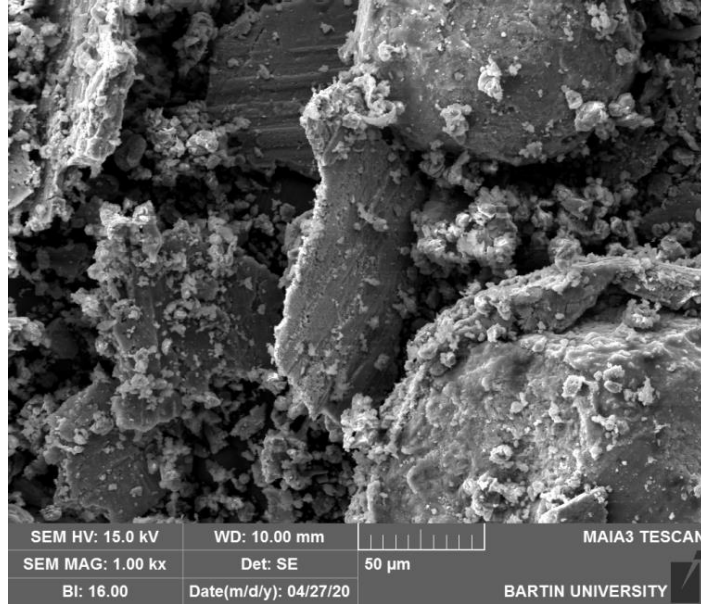
Benzer sonuçlar bu çalışmada da görülmüştür. Tüm numunelerin sürtünme katsayıları, kayma hızı 0,5 m/s’den 1,5 m/s’ye arttığında azalırken, S13 ve S15 no’lu numunelerde kayda değer bir değişim görülmemiştir. Ayrıca S3 no’lu numune haricindeki tüm numuneler kayma hızı 1,5 m/s’ye ulaştığında daha stabil bir sürtünme katsayısına sahip olmuşlardır. S3 no’lu numunedeki gerçekleşen diğer malzemelere göre yüksek malzeme kaybı aşınma direncini olumsuz etkilediği gibi sürtünme katsayısı sabitliğini de olumsuz etkilemiştir. S13 ve S15 numunelerindeki sürtünme katsayı değerleri neredeyse tüm hızlarda sabit çıkmıştır.

Numunelerin tamamının sürtünme katsayılarının artan normal kuvvetle birlikte azaldıkları görülmüştür. Artan aşınma hızlarıyla birlikte normal kuvvet 10 N’dan 25 N’a yükseldiğinde, sürtünme katsayılarının da hızlı bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. An vd. [106] yaptığı çalışmada benzer sonuçlar almış ve kuvvetle birlikte sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca sonuçlarda sürtünme katsayısının artan hızla birlikte düştüğü görülmektedir. Aung vd. [10] yaptıkları çalışmada AZ91 alaşımının sürtünme katsayısının, aşınma hızlarıyla beraber azaldığından bahsetmişlerdir. Alınan sonuçlar literatürdeki sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

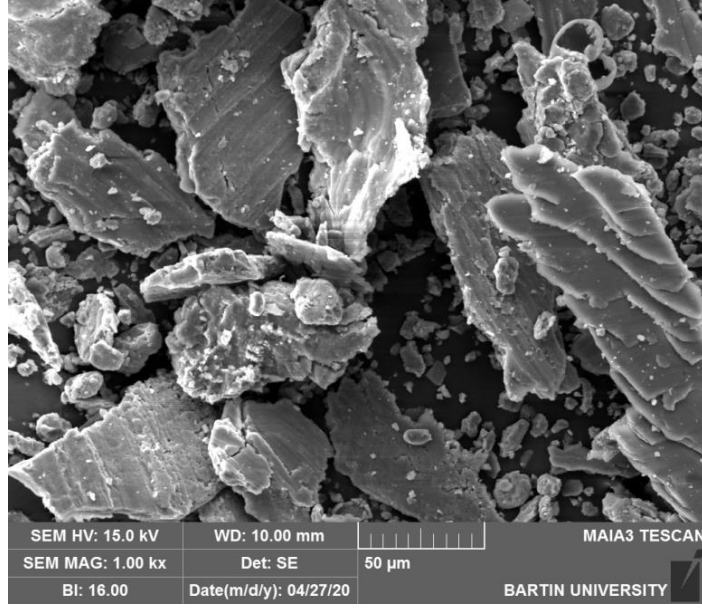
Numunelerin 40 N normal kuvvet altındaki 3000 metre kayma mesafesi sonrası sürtünme katsayıları incelendiğinde sürtünme katsayısının S1 numunesinden S9 numunesine kadar azaldığı, sonrasında ise S13 numunesi ile yeniden arttığı gözlemlenmektedir. Bu değişimin sebebinin anlaşılması için aşınma sonrası partiküllerin elektron taramalı mikroskop (SEM) ile görüntüleri alınmış, sonrasında ise boyut analizine tabii tutulmuşlardır.

7.6. AŞINMA SONRASI YÜZEY PARTİKÜLLERİNİN SEM GÖRÜNTÜLERİ

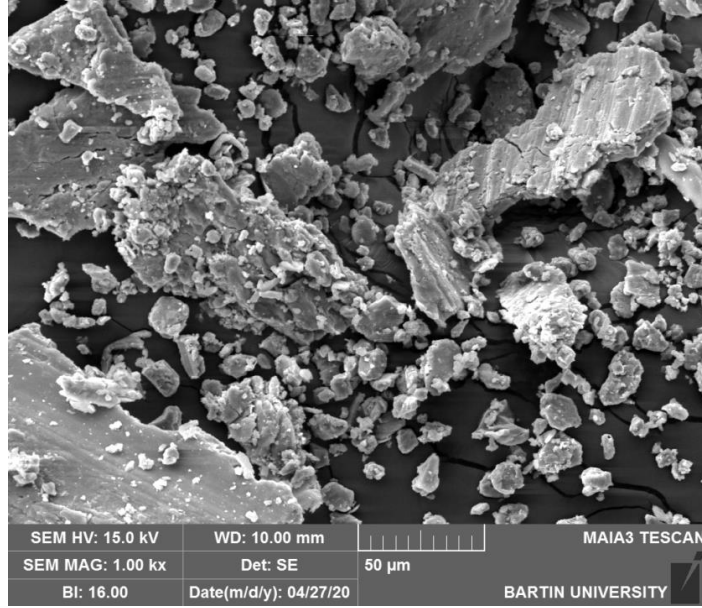
Üretilen numunelerin aşınma deneyleri sonrasında, aşınarak numunelerden kopan parçacıkların SEM görüntüleri Şekil 7.37-7.42’da verilmiştir.



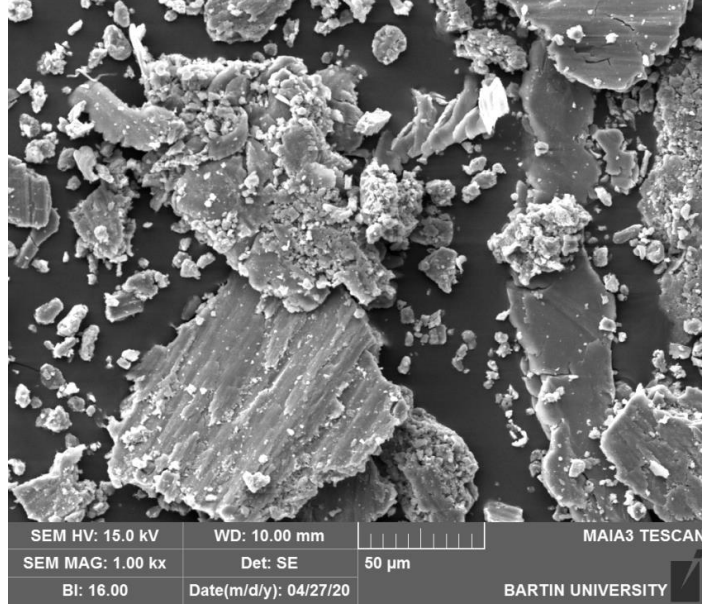
Şekil 7.37. S1 no’lu numunenin 1.5 m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000X büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.



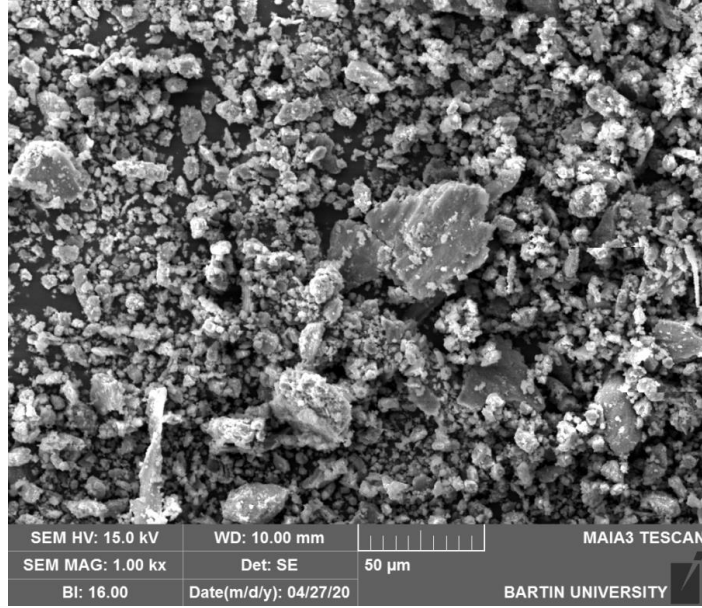
Şekil 7.38. S3 no'lu numunenin 1.5 m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000X büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.



Şekil 7.39. S7 no'lu numunenin 1.5 m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000X büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.



Şekil 7.40. S9 no'lu numunenin 1.5 m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000X büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.

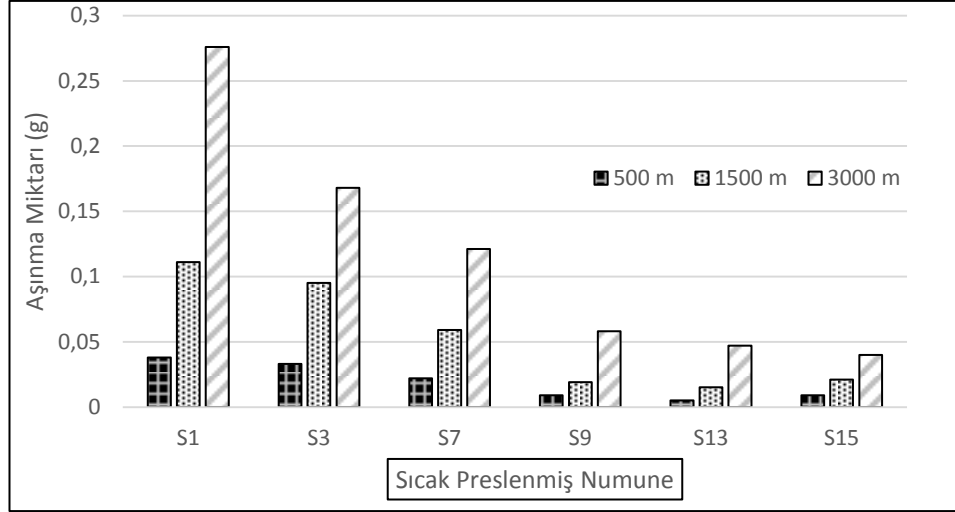


Şekil 7.41. S13 no'lu numunenin 1.5 m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000X büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.

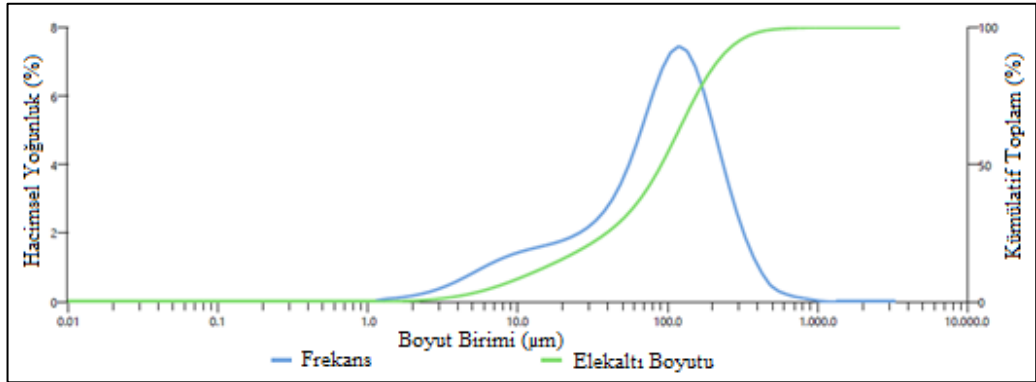


Şekil 7.42. S15 no'lu numunenin 1.5 m/s kayma hızında 40 N yük altında gerçekleştirdiği deney sonrasında yüzeyinden kopan debrisin 1000X büyütme altında çekilen SEM görüntüsü.

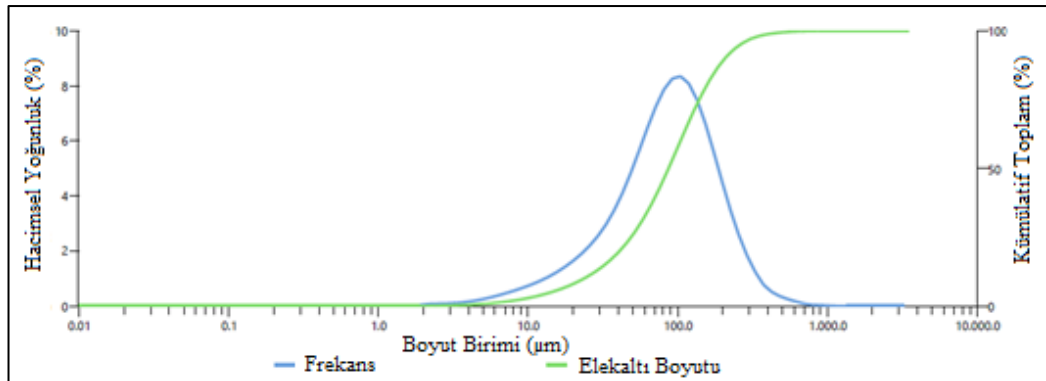
Şekil 7.34-7.39'da verilen numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, presleme basıncının ve sıcaklığının artışıyla aşınma ürünü olan partiküllerin boyutlarındaki küçülme açıkça görülmektedir. Partikül boyutlarının neden küçüldüğünü anlamak amacıyla Şekil 7.43'ta verilen 40 N yük altında ve 1,5 m/s kayma hızında numunelerdeki aşınma miktarları incelendiğinde preslemede sıcaklık ve basıncın artmasına bağlı olarak aşınma miktarlarının azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak sıcaklık ve basıncın artması ile numunelerin daha yoğun (Şekil 7.7.) ve sertliklerinin artması (Şekil 7.21.) ayrıca tane sınırlarında oluşan ara fazının (Şekil 7.8-7.19.) malzemenin tüm yüzeyine homojen olarak dağılması etkili olduğu söylenebilir. Buna ek olarak, bu aşınma ile oluşan partiküllerin parçacık boyut analizleri yapılmıştır ve parçacık boyut analiz sonuçları Şekil 7.44 ve 7.49 arasında şekil olarak verilmiştir.



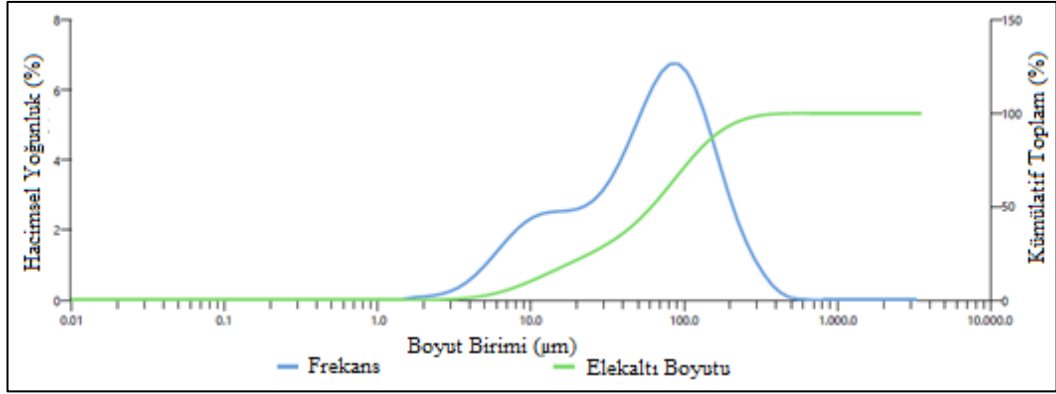
Şekil 7.43. 40 N yük altında ve 1.5 m/s kayma hızında numunelerdeki aşınma miktarları.



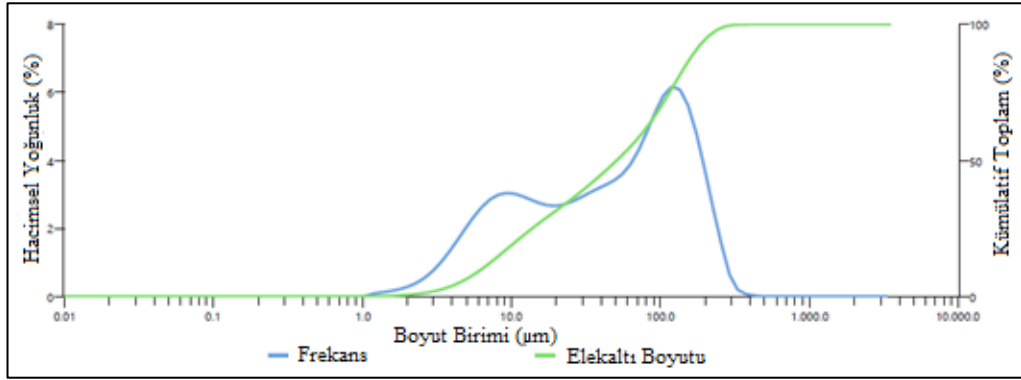
Şekil 7.44. S1 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.



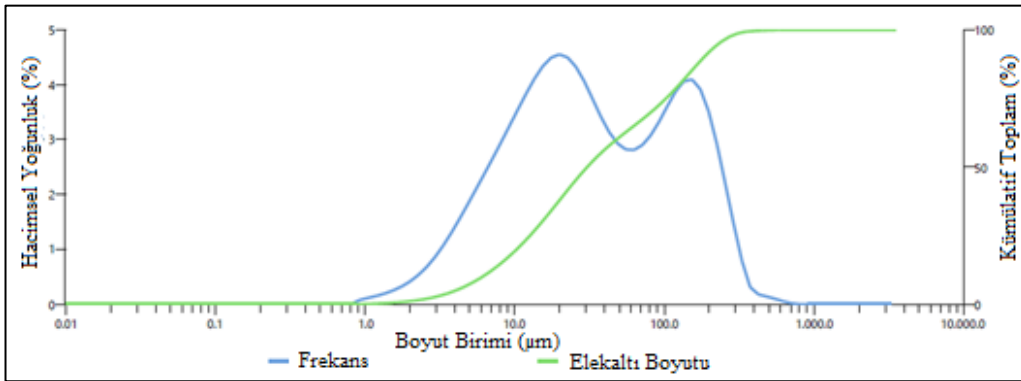
Şekil 7.45. S3 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.



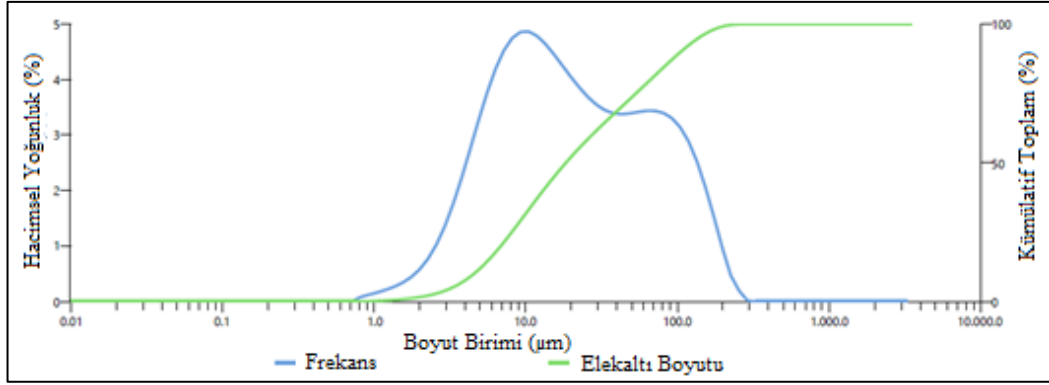
Şekil 7.46. S7 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.



Şekil 7.47. S9 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.



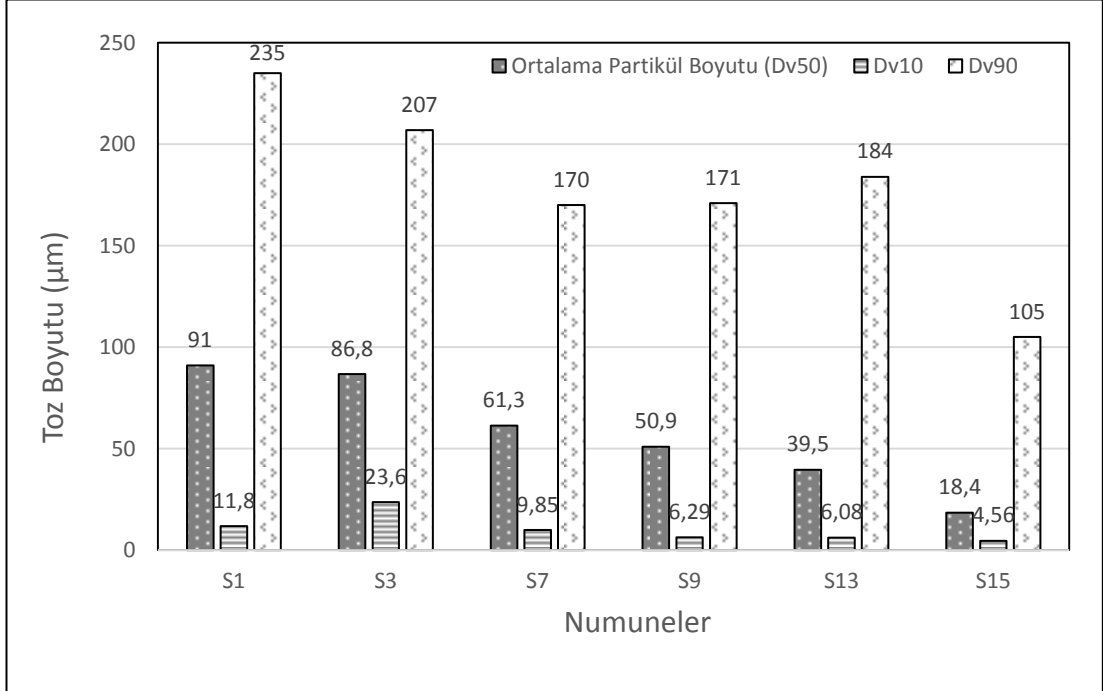
Şekil 7.48. S13 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.



Şekil 7.49. S15 no'lu numunenin parçacık boyut analiz sonucu.

Şekil 7.44 ve 7.49 arasında verilen parçacık boyut analiz sonuçları incelendiğinde presleme basıncının artışıyla beraber parçacık boyutlarındaki küçülme açıkça görülmektedir. Aşınma deneyi sonrasında aşınma ürünü partiküllerin ortalama parçacık boyut analiz sonuçları sırasıyla S1 numunesi için $D_v(50)$: 91.0 µm, S3 numunesi için $D_v(50)$: 86.8 µm, S7 numunesi için $D_v(50)$: 61.3 µm, S9 numunesi için $D_v(50)$: 61.3 µm, S13 numunesi için $D_v(50)$: 30.5 µm ve S15 numunesi için $D_v(50)$: 18.4 µm'dir. Tüm numuneler için D_v değerlerinin karşılaştırması Şekil 7.50.'de verilmiştir. Alfred Zmitrowicz yaptığı çalışmada [110] sürtünmeden dolayı oluşan partiküllerin küresel ya da silindirik olmaları durumunda kayma hareketi kolaylaşacağı için sürtünme katsayısının azalacağından söz etmiştir. Özellikle yumuşak malzemelerin debrislerinin bir katı yağlayıcı gibi hareket edeceği de vurgulanmıştır. Aynı çalışmada partikül yoğunluklarının artmasıyla da sürtünme katsayısının artacağından bahsedilmiştir. Şekil 7.37. ve Şekil 7.38. incelendiğinde 25 MPa basınçla sıcak preslenen numunelerde oluşan aşınma partiküllerinin iri ve şekilsiz oldukları, 35 MPa ve üstü basınçta preslenen numunelerin partiküllerinin ise daha küresel, üniform ve ince oldukları görülmektedir. Şekil 7.48. ve Şekil 7.49.'daki boyut analizleri incelendiğinde ise partikül yoğunluklarının arttığı görülmektedir. Yapılan bu analiz sonuçları doğrultusunda Şekil 7.36.'daki S1 ve S9 numuneleri arasındaki sürtünme katsayısının düşmesi partiküllerin daha küresel hale gelmesiyle ve S13'ten sonraki sürtünme katsayısının yükselmesi küresel hale gelen partiküllerin yoğunluğunun artmasına bağlı olmasıyla ilişkilendirilebilir. Zmitrowicz'in yapmış olduğu çalışma, öne sürülen bu ilişkiyi destekler niteliktedir. Bu sonuçlar da göstermektedir ki AZ91 malzemesinin aşınmaya dayanıklı bir malzeme olarak

kullanılabilmesi için sıcak presleme basıncının 45 MPa ve presleme sıcaklığının ise 550 °C olması gerekmektedir.



Şekil 7.50. Numunelerden alınan partiküllerin Dv boyut değerlerinin karşılaştırılması.

BÖLÜM 8

GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında AZ91 magnezyum toz metal alaşımının farklı sıcaklık ve basınç değerlerinde sıcak preslenmesinin mekanik özelliklere ve mikroyapıya olan etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneyler ve analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Sıcak presleme işlemi ile elde edilen AZ91 silindirik numunelerinin kimyasal içeriğini tayin etmek amacıyla XRF analizleri yapılmış ve malzemelerin içeriklerinde Al ve Zn'de azalma, Mg içeriğinde ise artış kaydedilmiştir. Bunların dışında Mn oranlarının basınçla beraber arttığı, sıcaklık artışı ile beraber azaldığı tespit edilmiştir.
2. AZ91 toz malzemesinin sıcak presleme ile %99 bağıl yoğunluk seviyelerine ulaştığı görülmüştür.
3. Mikroyapıları incelenen malzemelerde sıcaklığın ve basıncın artması ile taneler arası gözeneklerin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun dışında gözeneklerin azalmasında sıcaklık artışının basınç artışına göre daha etkin bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Düşük presleme basını ve düşük sıcaklıklarda tane sınırlarında meydana gelen $Mg_{17}Al_{12}$ arafazının yüksek basınç ve yüksek sıcaklıklarda malzemenin bütün yüzeyine homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir.
4. Brinell sertlik deneyi sonrasında makro sertliklerde presleme sıcaklığının artışı ve basıncı ile artışlar gözlemlenmiştir. En yüksek makro sertlik sonucu 45 MPa basınçta ve 550 °C sıcaklıkta üretilen parçada gözlemlenmiştir.

5. Aşınma testine tabii tutulan numune sonuçları aşınma kaybı ağırlığı ve sürtünme kuvveti değişimi olacak şekilde sınıflandırılmıştır. Aşınma kayıpları incelendiğinde 25 MPa basınç altında sıcak preslenen S1 ve S3 numunelerinin tozlar arası bağlantılarının zayıflıklarından dolayı yüksek malzeme kaybına sahip olduğu, 45 MPa ve 550 °C’de preslenen S15 no’lu numunenin ise en düşük malzeme kaybına sahip olduğu görülmüştür.
6. S1 ve S3 no’lu numunelerin 0,5 m/s kayma hızında oluşturdukları debrisler sonucunda sürtünme katsayıları diğer numunelere göre yüksek çıkmıştır. Bunun yanı sıra tüm numunelerin sürtünme katsayıları kayma hızı 0,5 m/s’den 1,5 m/s’ye yükseldikçe düşerken, 45 MPa’da preslenen S13 ve sonrasında S15 numunelerinin sürtünme katsayısı kayda değer bir değişim göstermemiştir.
7. Aşınma deneylerine tabii tutulan tüm numunelerin sürtünme katsayıları artan normal kuvvetle birlikte gözle görülür bir derecede düşmüştür.
8. SEM analizlerine bakıldığında artan sıcaklık ve basınç parametrelerinde numunelerden kopan debrislerinin boyutlarında gözle görülür bir azalma gözlemlenmiştir. Debrislerdeki tane boyutlarının azalması alınan toz boyutu analizi sonuçlarında daha açık bir şekilde görülmektedir. En düşük toz boyutları 45 MPa basınç altında ve 550 °C sıcaklıkta üretilen numunelerde ortalama toz boyutu 18 µm olarak sonuçlandırılmıştır.
9. Yapılan tez çalışması sonucunda AZ91 tozlarının sıcak preslenmesi için en uygun (optimum) parametrelerin 45 MPa basınç ve 550 °C sıcaklık olduğu görülmektedir. Bu değerlerde sıcak preslenen tozlar en iyi sertlik değerleriyle birlikte en kararlı sürtünme katsayısı ve en yüksek sürtünme aşınması değerlerini vermektedir.

KAYNAKLAR

1. Öztürk, F. ve Kaçar, İ., “Magnezyum alaşımlarının ve kullanım alanlarının incelenmesi”, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 1, Sayı 1, 12-20, (2012).
2. Mert, F. ve Özdemir, A., “Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü ve otomotivdeki uygulamaları”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, 50-55, (2011).
3. Köksal, S., “Toz Metalurjisi Ders Notları” *Celal Bayar Üniversitesi Kırkağaç Meslek Yüksekokulu*, Manisa, (2015).
4. Nguyen, Q.B., Sim, Y.H.M., Gupta, M., Lim, C.Y.H., “Tribology characteristics of magnesium alloy AZ31B and its composites”, *Tribology International*, Volume 82, Part B, 464-471, (2015).
5. Mondet, M., Barraud, E., Lemonnier S., Guyon J., Allain N., Grosdidier T., “Microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy developed by spark plazma sintering”, *Acta Materialia*, Volume 119, 55-67, (2016).
6. Straffelini, G., Nogueira A.P., Muterlle P., Menapace C., “Spark plazma sintering and hot compression behaviour of AZ91 Mg alloy”, *Materials Science and Technology*, Volume 27, issue 10, (2011).
7. Straffelini, G., Costa L.D., Menapace C., Zanella C., Torralba J.M., “Properties of AZ91 alloy produced by spark plazma sintering and extrusion”, *Powder Metallurgy*, Volume 56, issue 5, (2013).
8. Botelho, P.A.O., Straffelini, G., Menapace, C., “Spark plazma sintering and hot compression analysis of pure Mg and AZ91 alloy”, *Materials Science Forum*, Volume 802, 467-471, (2014).
9. Jiang, Y., He, F., “The effect of sintering teMParature to the microstructure and properties of AZ91 magnesium alloy by powder metallurgy”, *Applied Mechanics and Metarials*, Volume 377, 250-254, (2013).
10. Aung, N., Zhou, W., Lim, L.E.N., “Wear behavior of AZ91D alloy at low sliding speeds”, *Wear*, Volume 265, issues 5-6, 780-786, (2008).
11. Wolff, M., Ebel, T., Dahms, M., “Sintering of magnesium”, *Advanced Engineering Materials*, Volume 12, issue 9, 829-836, (2010).

12. Burke, P., Kipouros, G.J., Laverdiere, V., “Sintering fundamentals of magnesium powders”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Volume 48, issue 2, 123-132, (2009).
13. Zulkoffli, Z., Syarif, J., Sajuri, Z., “Fabrication of AZ61 magnesium alloy from a prealloyed powder using pm process”, *Engineering Post Graduate Conference (EPC)*, (2008).
14. Chen, B., Lin, D.L., Jin, L., Zeng, X.Q., Lu, C., “Equal channel angular pressing of magnesium alloy AZ91 and its effects on microstructure and mechanical properties”, *Materials Science and Engineering*, Volumes 483-484, 113-116, (2008).
15. Alias, J., Harun, W.S.W., Ayu, H.M., “A review on the preparation of magnesium based alloys prepared by powder metallurgy and the evolution of microstructure and mechanical properties”, *Advances on Manufacturing and Material Sciences II*, Volume 796, 3-10, (2019).
16. Xie, W., Liu, Y., Li, D.S., Zhang, J., Zhang, Z.W., Bi, J., “Influence of sintering routes to the mechanical properties of magnesium”, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 431, 162-166, (2007).
17. Iwasaki, H., Yanese, K., Mori, T., Mabuchi, M., Higashi, K., “Mechanical properties of magnesium alloys produced by powder metallurgy method”, *Conference (EPC)* (1996).
18. Chen, H., Alpas, A.T., “Sliding wear map of the magnesium alloy Mg-9Al-0.9 ZN (AZ91)”, *Wear*, Volume 246, 106-116, (2000).
19. Kumar, S., Kumar, D., Jain, J., Hirwani, J.K., “Influence of load, sliding speed and microstructure on wear response of AZ91 Mg alloy”, *Journal of Engineering Tribology*, Volume 230, Part J, Issue 12, (2016).
20. Shanti, M., Lim, C.Y.H., Lu, L., “Effects on the grain size on the wear of recycled AZ91 Mg”, *Tribology International*, Volume 40, 335-338, (2007).
21. Xiu, K., Wang, H.Y., Sui H.L., Wang, Y., Xu, C.L., Wang, J.G., Jiang, Q.C., “The sliding wear behavior of the SiC_p/AZ91 magnesium matrix composites”, (2007).
22. Li, M., Hao, S., Dong, C., “Improved wear resistance of magnesium alloys AZ91 by high current pulsed electron beam treatment”, *Transactions of The Indian Institute of Metals*, Volume 62, Issue 4-5, 485-487, (2009).
23. Asl, K.M., Tari, A., Khomamizadeh, F., “Effect of deep cryogenic treatment on microstructure, creep and wear behaviors of AZ91 magnesium alloy”, *Materials Science and Engineering:A*, Volume 523, Issue 1-2, 27-31, (2009).

24. Durmuş, H., “Toz Metalurjisi Deney Föyü”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi*, Manisa, (2010).
25. Alp, A., “Toz Metalürjisi Deney Föyü”, *Sakarya Üniversitesi*, Sakarya, (2012).
26. Cerit, A., A., “Toz Metalurjisi”, *Erciyes Üniversitesi*, Kayseri, (2014).
27. İnternet: Çınar, S., “Toz Metalurjisi Nedir? Malzeme Nasıl Üretilir?”, <http://www.muhendisalemi.com/toz-metalurjisi-nedir-malzeme-nasil-uretilir/> (2017).
28. Lawley, A., “Atomization: The production of metal powders”, *Metal Powder Industries Federation*, Princeton, New Jersey, USA (1992).
29. German, R., M., “Powder Metallurgy Science”, *Metal Powder Industries Federation*, USA 217-234 (1994).
30. Clyne, T., W., “Metal Matrix Composites: Matrices and Processing, in Encyclopaedia of Materials: Science and Technology”, *Elsevier*, USA (2001).
31. Yıldız, E., S., “Gaz Atomizasyonu İle Metal Tozu Üretiminde Nozul Geometrisinin Toz Boyutuna Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 5-14 (2007).
32. İnternet: Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü “Toz Metalurjisi”, <http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66717>, (2014).
33. İnternet: Namık Kemal Üniversitesi “Toz Metalurjisine Giriş”, http://acikerisim.nku.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/20.500.11776/2537/0/052113_pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y, (2016).
34. German, R., M., “Powder Metallurgy Science”, *Metal Powder Industries Federation*, USA, 110-113 (1994).
35. Sarıtaş, S., “Toz Metalurjisi, Makine Mühendisliği El Kitabı”, *MMO*, 2. Baskı, 1. Cilt, 456-462 (1994).
36. Turan, H., “Gaz Atomizasyonu ile Metal Tozu Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi*, Ankara, 25-31 (1993).
37. İnternet: Gazi Üniversitesi, “Türk Toz Gazi Üniversitesi” <http://www.turktoz.gazi.edu.tr>. (2011).
38. İnternet: Mühendis Beyinler, “Elektroliz Nedir?” <https://www.muhendisbeyinler.net/elektroliz-nedir/>, (2017).
39. Bölükbaşı, E., “Toz Metalurjisi T/M”, *Erciyes Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği*, Kayseri (2015).

40. Evcin, A., “Toz Üretim Teknikleri”, *Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü*, Afyonkarahisar (2007).
41. Gokmese, H., Ozdemir, M. and Bostan, B., “The Characterization and Production by Gas Atomization Method of Pre-alloyed AA 2014 Powder Metal Aluminum” *International Journal of Scientific and Technological Research*, 1 (1) 26-38 (2015).
42. Akpınar, İ., Ş., “Atomizasyon Yöntemiyle Toz Metal Üretimi ve Tozların Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir (2011).
43. Singh, S.N. and Ojha, S.N., “Microstructural investigation on rapidly solidified cast iron powders”, *Int.J. Rapid Solidification*, 7, 201 – 217 (1992).
44. Gerking, L., “Powder from metal and ceramic melts by laminar gas streams at supersonic speeds”, *Powder Metallurgy Int.*, 25(2), 59 – 65 (1993).
45. Ünal, R., Aydın, M., “Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemi ile gaz atomizasyon nozulu modellenmesi”, *TÜBİTAK Destekli Proje*, Dumlupınar Üniv. Mühendislik Fak. Makina Mühendisliği Bl, Kütahya, Türkiye (2008).
46. German, R. M., “Powder metallurgy science” ,2nd edition, *Metal Powder Industries Federation*, USA 373-377 (1994).
47. Lawley, A., “Atomization: The production of metal powders”, *Metal Powder Industries Federation*, Princeton, New Jersey, USA (1992).
48. Dombrowski, N., and Johns, W.R., “The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets”, *Chemical Engineering Science*, 18, 203 – 214 (1963).
49. Upadhyaya, G. S., “Powder Metallurgy Technology”, *Cambridge Ambridge International Science Publishing*, Hindistan, 31 (2002).
50. Koch, C.C., “Milling of brittle and ductile materials”. In ASM Handbook, *ASM International Publishers*, 53 – 66 (1998).
51. Kurt, A., “Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (1992).
52. German, R. M. “Powder Metallurgy&Particule Metaterials Processin” Çeviri Editörleri, Süleyman SARITAŞ, Mehmet TÜRKER, Nuri DURLU, *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Temmuz, (2007).
53. Ekşi, A. ve Kurt, A.O., “Metal ve seramik tozlarının bilgisayar kontrollü tek eksenli kalıpta preslenmesi”, *Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, ODTÜ, Ankara, 557-563 (1999).

54. Dorofeev, Yu., G., Zherditskii, N., T., “Application of dynamic hot pressing in powder metallurgy”, *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Volume 5, Issue 7, 534-540 (1966).
55. Güneş, S., “Sıcak Preslemenin Metal Matris Kompozitlerde SiC Katkısının Malzeme Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği*, Tunceli (2019).
56. Serkan, I., “Karbür katkılı mermer kesici takımların çalışma performansına sinterleme parametrelerinin etkisi”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi FBE*, Elazığ (2012).
57. Bedir, F., “Characteristic Properties of Al - Cu - B4Cp and Al - Cu – SiCp Composites Produced By Hot Pressing Method Under Nitrogen Atmosphere”, *Materials and Design*, 1238-1244 (2007).
58. Matik, U., “Akımsız nikel kaplamalarda ısıl işlemin sertlik ve aşınma özelliklerine etkisi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-50 (2010).
59. Bahçeci, E., “Al matrisli Si3N4 takviyeli kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin karakterizasyonu”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 18-20 (2006).
60. Internet: SubTech, Graphite Manufacturing Process, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=graphite_manufacturing_process, (2016).
61. Boz, M., 'Toz Metalurjisi İle Üretilmiş Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (1999).
62. Göktaş, A.A., “Al2O3-B4C kompozit seramiklerin sinterlenmesi ve karakterizasyonu”, *8.Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 1317-1321 (1995).
63. Bahçeci, E., “Al matrisli Si3N4 takviyeli kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin karakterizasyonu”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 18-20 (2006).
64. Avedesian, M.M., Baker, H., “Grades and alloys, in: ASM Speciality Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys”, *International ASM*, 12-25 (1999).
65. Cho, K., Sano, T., Doherty, K., Yen, C., Gazonas, G., Montgomery, J., Moy, P., Davis, B. And DeLorne, R., “Magnesium Technology and Manufacturing for Ultra Lightweight Armored Ground Vehicles”, *Army Research Laboratory (ARL)*, (2009).

66. Deng, K.K., Li, J.C., Nie, K.B., Wang, X.J. and Fan, J.F. “High temperature damping behavior of as-deformed Mg matrix influenced by micron and submicron SiCp”, *Mater. Sci. Eng. A* 624, 62-70 (2015).
67. Mordike, B.L. and Luka, P., “Chapter 3-Physical metallurgy, in: Magnesium Technology”, *Springer*, 63 (2006).
68. Czerwinski, F., “Controlling the ignition and flammability of magnesium for aerospace applications”, *Corros. Sci.* 86, 1-16 (2014).
69. Yıldırım, M., and Özyürek, D., "The effects of Mg amount on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloys." *Materials & Design* 51, 767-774 (2013).
70. Neite, G., Kubota, K., Higashi, K. and Hehmann, F., Chapter 4-Magnesium-Based alloys, in: R.W. Cahn, P. Haasen, E.J. Kramer (Eds.), *Structure and Properties of Nonferrous Alloys*, vol. 8, pp. 113e212 (1996).
71. Qian, M. and Das, A., “Advances in Powder Metallurgy” *Scripta Mater.*, 54, 881 (2006).
72. Vinotha, D., et al. "Grain refining mechanisms in magnesium alloys—An overview." *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 62.6, 521-532 (2009).
73. StJohn, D.H., Qian, M., Easton, M.A., Cao, P. and Hildebrand, Z., *Metall. Mater. Trans. A*, 36A, 1669 (2005).
74. Kulekci, M. K., “Magnesium and its alloys applications in automotive industry”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39, 851-865 (2008).
75. Colombié, M., “Chapitre 13-Magnésium et alliages de magnésium.” *Matériaux Métalliques*, Dunod, Paris, 679-726 (2000).
76. Cizek, L., Greger, M., Pawlica, L., Dobrzanski, L.A. and Tanski, T., “Study of selected properties of magnesium alloy AZ91 after heat treatment and forming”. *J. Mater. Process. Technol.*, 157-158, 466-471 (2004).
77. Mordike, B. L., Ebert, T., “Magnesium properties-applications-potential”, *Materials Science and Engineering*, A 302, 37-45 (2001).
78. ASM Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 2, *ASM International*, Materials Park, USA (1990).
79. İnternet: Akdoğan, Eker, A., “Malzeme 1 Dersi Notları” <http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme> (2011).

80. Mendis, C.L., "Chapter 4-Understanding precipitation processes in magnesium alloys", *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy*, **Publishing W**, pp. 125-151 (2013).
81. Avedesian, M.M., Baker, H., "Grades and alloys, in: ASM Speciality Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys", **International ASM**, pp. 12-25 (1999).
82. Trajonova, Z., and Lukac, P., "Compressive deformation behaviour of magnesium alloys", **Achievements in Mechanical and Materials Engineering**, 681-684 (2005).
83. İnternet: Akdoğan, E. A., "Magnezyum ve alaşımları". **Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü** (2008).
84. Tzamtzis, S., Solidification Behaviour and Mechanical Properties of Cast Mg-alloys and Al-based Particulate Metal Matrix Composites Under Intensive Shearing, PhD thesis, Brunel University, **Brunel Centre for Advanced Solidification Technology** (2011).
85. Erçayan Y., İrizalp S. G. Ve Saklakoğlu N., "A380 Alaşımında Yarı-Katı Şekillendirmenin Kompozit Yapılara Etkisinin İncelenmesi". **I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu**, İzmir (2011).
86. Akdoğan, E. A., "Korozyon ve Korozyondan Korunma." <http://www.yildiz.edu.tr>, (2008).
87. Barber, L.P., "Characterization of the Solidification Behavior and Resultant Microstructures of Magnesium-Aluminum Alloys. A Thesis of Master", **Worcester Polytechnic Institute**, Worcester, 10-46 (2004).
88. Ocak, A., O., "Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen AZ91 alaşımının mekanik özellikleri üzerine alaşım elementlerinin etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2019).
89. Tzamtzis, S., "Solidification Behaviour and Mechanical Properties of Cast Mg-alloys and Al-based Particulate Metal Matrix Composites Under Intensive Shearing", Doktora Tezi, Brunel University, **Brunel Centre for Advanced Solidification Technology** (2011).
90. Dahle, A.K., Lee, Y.C., Nave, M.D., Schaffer, P.L. and St.John, D.H., "Development of as the cast microstructure in magnesium-aluminium alloys", **Journal of Light Metals**, 1, 61-72 (2001).
91. Baram, J., "Pressure Characteristics at The Pour- Tube Orifice in Ultrasonic Gas Atomization", **Materials Science And Engineering**, 98: 65-69 (1988).
92. Bhushan, B., "Introduction to Tribology", **John Wiley & Sons, Ltd. Second Edition**, ISBN 978-1-119-94453-9, USA 1-2, (2013).

93. "Automotive Handbook", **Robert Bosch GmbH**, 329, (2002).
94. Kato, K., Adachi, K., "Wear Mechanism", **Modern Tribology Handbook**, 2001.
95. Yıldız, T., Gür, A.K., "Aşınma Sistemleri", **Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları**, 86-91, (2006).
96. Fındıklı, F., "Malzeme Seçimi ve Uygulamaları", **Seçkin Yayınevi**, Ankara 167-190 (2016).
97. Soydan, Y., Ulukan, L., "Temel TRİBOLOJİ ", **Kopisan**, Sakarya 107-134 (2013).
98. Friedrich, H., Schumann, S., "Research for a new age of magnesium in the automotive industry", **Journal of Materials processing Technology**, 117:276-281 (2001).
99. Yıldız T., Gür, A.K., "Aşınma Sistemleri", **Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları**, 86-91, (2006).
100. Song, Y., Wang, H., Xu, B., Xing, Z., "Effect of fretting wear on very high cycle bending fatigue behaviors of FV520B steel", **Tribology International**, Vol 103 Pages 132-138 November (2016).
101. Babalık, F.C., "Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri", **Triboloji**, 393 Bursa (2019).
102. M. Karabaşoğlu, "Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı", Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi A.B.D** Sakarya, 88, (2008).
103. PJ. Blau, KG. Budinski, "Development and use of astm standards for wear testing" **Wear**, 225: 1159-1170, (1999).
104. MJ. Ibanez, J. Gilabert, M.Vicent, P. Gomez, D. Munoz, "Determination of the wear resistance of traditional ceranic materials by means of micro- abrasion technique", **Wear**, 267, (2009).
105. Boz, M., "Toz Metalurjisi Ders Notları", **Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Bölümü**, Karabük (2015).
106. An, J., Li, R. G., Lu, Y., Chen, C. M., Xu, Y., Chen, X., Wang, L. M., "Dry Sliding Behavior Of Magnesium Alloys", **Wear**, Volume 265, 97-104 (2008).
107. Hekimoğlu, A.P., Hacıosmanoğlu, M, "Bakır ve Magnezyum Katkılarının Al-17Si Alaşımının Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisi",

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, Cilt 11, Sayı 2, 685-694 (2019)

108. İnternet: Weldwolf, “Aşınma nedir ve aşınma tipleri nelerdir?”
<https://weldwolf.com/asinma-nedir-asinma-tipleri-nelerdir/> (2018)
109. İnternet: Dynacast “AZ91D Properties”
<https://www.dynacast.com/en/knowledge-center/material-information/die-cast-metals/magnesium-casting-metals/az91d>
110. Zmitrowicz, A., “Wear Debris: A Review Of Properties And Constitutive Models”, *Journal Of Theoretical And Applied Mechanics*, 43, 3-35 (2005)

ÖZGEÇMİŞ

Kağan Hazar ŞİMŞİR 1988 yılında Sakarya’da doğdu. İlk ve orta öğretimini Konuralp İlköğretim Okulu’nda tamamladı. 2006 yılında Akyazı Şehit Yüzbaşı Halil İbrahim Sert Süper Lisesi’nden mezun oldu. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği’nden mezun oldu. 2016 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden onur öğrencisi olarak mezun oldu. 2015 yılında başladığı Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Yüksek Lisans Eğitimi’ne halen devam etmektedir.

İLETİŞİM BİLGİLERİ

Adres : Yunus Emre Mah. Pazarköy Cad. no:6
Akyazı/Sakarya

E- mail : kaganhazarsimsir@hotmail.com.tr