

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

**BRONZ BALATALARIN ÜRETİMİ VE
PERFORMANS TESTLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bayram ALBAYRAK

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Adem DEMİR

Şubat 2009

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

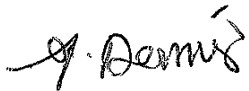
**BRONZ BALATALARIN ÜRETİMİ VE
PERFORMANS TESTLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bayram ALBAYRAK

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Bu tez 10 / 2 /2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Adem DEMİR
Jüri Başkanı



Yrd.Doç.Dr. Zafer TATLI
Üye



Doç.Dr. Ahmet TÜRK
Üye

TEŞEKKÜR

Tez çalışmaları sırasında beni yönlendiren, çalışmaların sonuçlanması için benimle yakından ilgilenen ve her türlü desteği veren değerli hocam Doç. Dr. Adem DEMİR'e çok teşekkür ediyorum.

Deneysel çalışmalar esnasında yardımlarını gördüğüm başta Yrd. Doç. Dr. Zafer TATLI'ya, ve Arş. Gör. Fatih ÇALIŞKAN'a, Arş. Gör. Azim GÖKÇE'ye, teşekkür ediyorum. Tozların temininde yardımcı olan Gürel Makine A.Ş. ve Marmara Metal AŞ. yetkililerine teşekkür ediyorum. Aşınma deneylerinin yapılmasında yardımcı olan Arş.Gör. S. Hakan YETGİN'e, teşekkür ediyorum. Özellikle desteklerinden dolayı çok sevdiğim Ömer'e Aykan'a ve Yalçın'a sonsuz minnetdarlığımı sunuyorum.

Ayrıca bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan anne ve babama, tezin hazırlanması sırasında gösterdikleri sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı teyzeme ve enişteme özellikle teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
TOZ METALURJİSİ TEKNİĞİ.....	4
2.1. Toz Metalurjisine Giriş.....	4
2.2. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları.....	4
2.3. Toz Metalurjisinin Avantajları ve Dezavantajları.....	6
2.4. Metalik Toz Üretim Yöntemleri.....	7
2.5. Toz Metal Parça Üretim Prosesinin Aşamaları.....	9
2.5.1. Tozların harmanlanması ve karıştırılması.....	9
2.5.2. Presleme.....	10
2.5.2.1. Presleme teknikleri.....	12
2.5.3. Sinterleme.....	13
2.5.3.1. Sinterleme teknikleri.....	17
2.6. T/M’de Kullanılan Tozların Özelliklerinin Belirlenmesi.....	20
2.6.1 Tozların fiziksel özellikleri.....	21
2.6.2. Tozların kimyasal özellikleri.....	25

BÖLÜM 3.	
TRİBOLOJİ.....	27
3.1. Sürtünme ve Aşınmanın Önemi.....	27
3.2. Sürtünme.....	27
3.2.1. Sürtünme kanunları.....	28
3.2.2. Sürtünme teorileri.....	29
3.2.3. Sürtünme katsayısı.....	30
3.3. Aşınma.....	32
3.3.1. Aşınmanın temel unsurları.....	33
3.3.2. Aşınma mekanizmaları.....	34
3.3.2.1. Yapışkan aşınması(Adhesiv).....	34
3.3.2.2. Kazınma aşınması(Abrasiv).....	37
3.3.2.3. Erozyon aşınması(Erozif) veya tribo-oksidasyon... ..	39
3.3.2.4. Yorulma aşınması.....	39
3.3.2.5. Fretaj aşınması.....	40
3.4. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri.....	40
3.4.1. Ağırlık farkı metodu.....	41
3.4.2. Kalınlık farkı metodu.....	42
3.4.3. İz değişimi metodu.....	43
3.4.4. Radyoizotop metodu.....	43
BÖLÜM 4.	
SÜRTÜNME ÇİFTLERİ VE BALATALAR.....	44
4.1. Sürtünme Malzemeleri.....	44
4.1.1. Polimer bağlı asbest esaslı malzemeler.....	46
4.1.2. Yağda çalışan balata malzemeleri.....	47
4.1.3. Sinterlenmiş sürtünme malzemeleri.....	47
4.1.3.1. Bakır esaslı balata malzemeleri.....	48
4.1.3.2. Demir esaslı balata malzemeleri.....	50
4.1.3.3. Seramik katkılı sinter balata malzemeleri.....	53
4.2. Karşı Malzeme-Disk ve Kampana Malzemeleri.....	53
4.3. T/M Yöntemi ile Demir ve Bronz Esaslı Fren Balataların Üretimi	54

BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	56
5.1. Kullanılan Toz Malzemelerin ve Fren Balata Numunelerinin Hazırlanması.....	56
5.1.1. Tozların harmanlanması(karıştırılması).....	57
5.1.2. Presleme.....	58
5.1.3. Sinterleme.....	58
5.2. Performans Deneyleri.....	60
5.3. Optik Mikroskop Analizi.....	62
5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu Çalışmaları.....	63
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ.....	65
6.1.Malzemelerin mikroyapıları.....	65
6.2. Performans Deneyleri.....	75
6.2.1.%0 Grafitli A1 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları	75
6.2.2.%2 Grafitli A2 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları	78
6.2.3.%4 Grafitli A3 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları	79
6.2.4.%6 Grafitli A4 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları	81
6.2.5.%8 Grafitli A5 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları	82
6.2.6.%0 Grafitli B1 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları	83
6.2.7.%2 Grafitli B2 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları	84
6.2.8.%4 Grafitli B3 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları	85
6.2.9.%6 Grafitli B4 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları	86
6.2.10.%8 Grafitli B5 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları	87
BÖLÜM 7.	
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	88
7.1. Sürtünme Katsayısı-Grafit Oranı-Yük Sonuçları.....	88
7.2. Genel Sonuçlar ve Öneriler.....	93
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	99

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

T/M	: Toz metalurjisi
PŞV	: Plastik şekil verme
SEM	: Taramalı electron mikroskobu
F _s	: Kaymayı başlatan kuvvet
F _n	: Temas yüzeyine etki eden normal kuvvet
μ _s	: Statik sürtünme katsayısı
F _k	: Kaymayı devam ettiren kuvvet
μ _k	: Kinetik sürtünme katsayısı
μ	: Sürtünme katsayısı
W _a	: Aşınma oranı
ΔG	: Ağırlık kaybı(mg)
S ₁	: Kayma mesafesi (m)
M	: Yükleme ağırlığı (N)
d	: Aşınan malzemenin yoğunluğu (g/cm ⁻³)
W _r	: Aşınma direnci
B	: Numunenin kalınlığı (cm)
S	: Numunenin temas ettiği ara mesafe (cm)
P	: Uygulanan maksimum yük (kN)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	T/M ile üretilmiş çeşitli ürünler	5
Şekil 2.2.	Toz metalurjisinin kullanım alanları	5
Şekil 2.3.	Partikül paketlenmesinde basınç ile teorik yoğunluk değişiminin gösterilmesi.....	11
Şekil 2.4.	Partiküllerde presleme basıncına bağlı olarak porozite, temas sayısı ve temas alanının.....	11
Şekil 2.5.	Sinterleme sıcaklığının toz biriket özelliklerine etkisi.....	14
Şekil 2.6.	Sinterleme esnasında nokta teması bağlarının gelişimi.....	14
Şekil 2.7.	Küreden-küreye sinterlemede; iki tür sinterleme mekanizmasında boyun büyümesi için yüzeyden malzeme taşıma mekanizması, yüzey kaynaklarından sağlanması.....	15
Şekil 2.8.	Sinterlemenin ilk aşamasında tanecikler arası boyun oluşumu	16
Şekil 2.9.	Orta devre sinterlemede, iki muhtemel gözenek tane sınırı görünümü: a) tane sınırlarındaki gözenekler yoğunlaşır. b) izole gözenekler yoğunlaşmaz.....	16
Şekil 2.10.	Sıvı faz sinterlemesinde mikroyapısal değişimler.....	19
Şekil 2.11.	Sıvı faz sinterlemesindeki aşamaların şematik olarak gelişimi.....	20
Şekil 2.12.	Toz üretim yöntemine göre tane şekillerinin değişimi	22
Şekil 2.13.	Demir tozları için basınç-yoğunluk eğrileri.....	23
Şekil 2.14.	Demir tozları için görünür yoğunluğa bağlı ham mukavemet	25
Şekil 3.1.	Kuru kayma boyunca kristal kafesin elastik deformasyonu	28
Şekil 3.2.	Statik ve dinamik sürtünme katsayıları	30
Şekil 3.3.	Kuru balatada basınç ve hızın sürtünme katsayısına etkisi.....	31
Şekil 3.4.	Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi.....	33
Şekil 3.5.	Adhesiv aşınma.....	35
Şekil 3.6.	Ahesiv aşınmada aşınma bölgeleri.....	37

Şekil 3.7.	Abrasiv aşınma.....	38
Şekil 3.8.	Tribo oksidasyon aşınması	39
Şekil 3.9.	Yorulma aşınması.....	40
Şekil 3.10.	Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi.....	41
Şekil 4.1.	Kuru balatada sıcaklığın dinamik sürtünme katsayısına etkisi.....	45
Şekil 4.2.	Sinterlenmiş bronz-grafit balata malzemesinin sürtünme ve aşınma özelliği.....	50
Şekil 5.1.	Bilyalı döner değirmen.....	57
Şekil 5.2.	Presleme kalıbı ve kesiti.....	58
Şekil 5.3.	Sinterleme fırını.....	59
Şekil 5.4.	Sinterleme sıcaklığının zamana göre gösterimi.....	60
Şekil 5.5.	a)Aşınma test cihazı b)şematik gösterimi.....	61
Şekil 5.6.	a) Balata yuvaları, b) Diskli fren sisteminin şematik görünüşü....	62
Şekil 5.7.	Nikon Eclipse L 150 marka optik mikroskop cihazının fotoğrafı..	63
Şekil 5.8.	Jeol JSM 6060 LV marka SEM cihazının fotoğrafı.....	64
Şekil 6.1.	a) A1 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) A1 numunesinin SEM görünümü.....	65
Şekil 6.2.	a) A1 numunesinin EDS pikleri b)1 nolu noktasının analizi c) 2 nolu noktanın analizi d) 3 nolu noktanın analizi e) Numunenin genel analizi.....	66
Şekil 6.3.	A2 numunesinin SEM görünümü.....	67
Şekil 6.4.	a) A2 numunesinin EDS resmi, b) 1 nolu noktanın analizi, c) 2 nolu noktanın analizi, d) 3 nolu noktanın analizi, e) 4 nolu noktanın analizi, f) Numunenin genel analizi.....	68
Şekil 6.5.	a) A3 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) A3 numunesinin SEM görünümü.....	69
Şekil 6.6.	a) A4 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) A4 numunesinin SEM görünümü.....	69
Şekil 6.7.	a) A5 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) A5 numunesinin SEM görünümü.....	70
Şekil 6.8.	a) B1 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) B1 numunesinin SEM görünümü.....	71

Şekil 6.9.	a) B2 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) B2 numunesinin SEM görünümü.....	71
Şekil 6.10.	a) B2 numunesinin EDS resmi, b) 1 nolu noktanın analizi, c) 2 nolu noktanın analizi, d) 3 nolu noktanın analizi, e) 4 nolu noktanın analizi, f) Numunenin genel analizi.....	72
Şekil 6.11	a) B3 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) B3 numunesinin SEM görünümü.....	73
Şekil 6.12.	a) B4 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) B4 numunesinin SEM görünümü.....	74
Şekil 6.13.	a) B5 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) B5 numunesinin SEM görünümü.....	74
Şekil 6.14.	%0 Grafitli A1 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	76
Şekil 6.15.	%0 Grafit'li A1 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.....	76
Şekil 6.16.	a) %0 Grafit'li A1 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüsü b) Abrasiv aşınma mekanizmasının şematik gösterimi.....	77
Şekil 6.17.	%2 Grafitli A2 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	78
Şekil 6.18.	%2 Grafitli A2 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.....	78
Şekil 6.19.	%4 Grafitli A3 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	79
Şekil 6.20.	%4 Grafitli A3 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.....	80
Şekil 6.21.	%6 Grafitli A4 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	81
Şekil 6.22.	%6 Grafitli A4 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.....	81
Şekil 6.23.	%8 Grafitli A5 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	82
Şekil 6.24.	%8 Grafitli A5 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında	

	SEM görüntüleri.....	82
Şekil 6.25.	%0 Grafitli B1 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	83
Şekil 6.26.	%0 Grafitli B1 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.....	83
Şekil 6.27.	%2 Grafitli B2 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	84
Şekil 6.28.	%2 Grafitli B2 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.....	84
Şekil 6.29.	%4 Grafitli B3 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	85
Şekil 6.30.	%4 Grafitli B3 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.....	85
Şekil 6.31.	%6 Grafitli B4 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	86
Şekil 6.32.	%6 Grafitli B4 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.....	86
Şekil 6.33.	%8 Grafitli B5 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	87
Şekil 6.34.	%8 Grafitli B5 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.....	87
Şekil 7.1.	A grubu balata numunelerinin % Grafit miktarı-Sürtünme katsayısı(μ) grafiği.....	89
Şekil 7.2.	A grubu balata numunelerin aşınma oranı grafiği.....	90
Şekil 7.3.	B grubu balata numuneleri % Grafit miktarı-Sürtünme katsayısı(μ) grafiği.....	91
Şekil 7.4.	B grubu balata numunelerinin aşınma oranı grafiği.....	91
Şekil 7.5.	Sürtünme katsayısı-Zaman grafiği genel görünümü.....	92

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Metallerin yapışmasını etkileyen faktörler.....	36
Tablo 4.1.	Tipik ıslak ve kuru balata bileşimleri	45
Tablo 4.2.	Bazı ülkelerde kullanılan kuru ve yağlı sürtünme için bronz esaslı malzemelerinin bileşimleri.....	49
Tablo 4.3.	Bronz esaslı sinter balata malzemelerin kullanım karakteristikleri ve özellikleri.....	49
Tablo 4.4.	Kuru sürtünme için demir esaslı malzemeler ve bileşimleri.....	51
Tablo 4.5.	Demir esas balata malzemelerinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri.....	52
Tablo 4.6.	Sinterlenmiş demirin mekanik özelliklerine fosfor'un etkisi.....	52
Tablo 4.7.	Disk ve kampana için kullanılan dökme demir analizi.....	54
Tablo 5.1.	Bronz esaslı toz metal fren balata numunelerinin bileşimleri	56
Tablo 5.2.	Ön alaşımlanmış (80-10-10) bronz tozlarına demir ve grafit ilavesi.....	57

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Bronz, fren balatası, toz metalurjisi, sinterleme, sürtünme ve aşınma

Bu çalışmada bronz esaslı balataların başlangıç tozlarının içerisinde farklı oranlarda grafit tozları ilave edilmiş ve toz metalurjisi (T/M) yöntemi ile bronz esaslı balata malzemesi üretilmiştir. Farklı kompozisyonlarda hazırlanan balata numuneleri 500 MPa basınç altında sıkıştırılarak şekillendirilmiştir. Sinterleme argon ortamında 530 °C'de 15 dakikada ön-sinterleme ve 800 °C'de sinterleme 60 dakikada gerçekleştirilmiştir. Toz kompozisyonların içinde kalay, kurşun gibi düşük sıcaklıkta ötektik yapıcı elementlerin olması numunelerin sıvı faz sinterleme mekanizması ile sinterlenmesini sağlamıştır. Grafit ilavesi ile gözenekli yapı artırılmış ve grafitin katı yağlayıcı etkisinden faydalanılmıştır. Performans testleri laboratuvar şartlarında tasarlanmış ve yapılmış aşınma test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bronz balataların sürtünme katsayıları ve aşınma oranları, 157, 236, 314 N yük altında, 0.1 m/s kayma hızında tespit edilmiştir. Bronz esaslı grafit ilaveli toz malzemelerin sürtünme katsayıları ve aşınma oranları incelendiğinde, grafit ilavesi ile oluşan gözenekler ve katı yağlayıcının sürtünme katsayısına olumlu sonuçlar gösterdiği fakat belli düzeyden sonra olumsuz sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Mikro yapı çalışmaları, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Mekanik deneylerde elde edilen aşınma yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde artan grafit oranları ile aşınma mekanizmasının değiştiği gözlenmiştir.

PRODUCTION OF BRONZE LININGS AND PERFORMANCE TESTS

SUMMARY

Key Words: Bronze, brake lining, powder metallurgy, sintering, friction and wear

In this study, different rates of the graphite powders were added in starting powders of bronze based brake linings and produced by powder Metallurgy (P/ M) method with a different alloy composition. Bronze based linings were sintered under argon atmosphere in an alumina tube furnace. Pre-sintering conditions were 530°C for 15 min and sintering conditions were 800 °C for 60 min. Liquid phase sintering mechanism was dominant during sintering since the bronze based lining compositions contain low eutectic compositions such as tin and lead. Graphite was added to give extra porosity and arrange wear behaviors. Dry sliding tests were carried out with home-made lining wear test device under 157, 236 and 314 N loads with constant 0.1 m/s sliding speed. Wear test results showed that graphite addition increased porosity of the lining samples and changed wear properties. During wear test, graphite within the samples behaved as solid lubricant and affected wear loss significantly, coefficient of friction slightly. Therefore productions of low wear loss and high coefficient of friction bronze based brake linings were achieved. SEM examinations and optical microscope were carried out for polished and wear scars of bronze based linings. SEM images showed that wear mechanism of the lining was changed with graphite addition.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bu çalışmada, taşıtların fren sistemlerinde sürünme malzemesi olarak kullanılan fren balatalarının Toz Metalurjisi (T/M) yöntemleri ile üretiminin yapılabilirliğini araştırılmıştır. Bronz esaslı olarak üretilen balata malzemelerinin aşınma ve sürtünme özelliklerini geliştirebilmeye çalışılmıştır.

Son yıllarda otomobil sektöründe meydana gelen değişimler gün geçtikçe çok daha iyi sonuçlar meydana getirmektedir. Otomobil firmaları kendi ürettikleri araçların sürtünme malzemelerinin verimliliğinin çok iyi performans göstermesi için çok farklı çalışmalar içerisine girmişlerdir. Otomobil icat edilene kadar sürtünme malzemeleri ve sürtünme mekanizmaları konusunda çok az gelişme olmuştur. İlk otomobillerde çok farklı sürtünme malzemeleri (balatalar) kullanılmıştır. Uzun yıllar kullanılan asbest esaslı sürtünme malzemeleri sağlık gerekçesiyle asbest kullanımının yasaklanması sonucu yerini asbest içermeyen elyaf takviyeli kompozit balatalara bırakmaktadır[1].

Frenlerin birinci fonksiyonu, hareketli bir sistemi durdurmaktır. İkinci fonksiyonu ise hareket enerjisini absorbe ederek, ısıya çevirmek ve bu ısıyı da atmosfere yaymaktır. Eğer frenlere çıkabileceğinden daha fazla bir ısı verilirse fren balatalarındaki sürtünme katsayısının düştüğü görülecektir ve bu da frenlerin durdurma kabiliyetlerinin azalmasına neden olacaktır. Fren balatalarının etkisindeki bu azalmaya “balata aşınması” denir. Balatalar bu aşınma noktası sıcaklığının altına soğudukça normal görevlerini yaparlar. Fren balataları sürekli olarak veya uzun süreli aşırı sıcaklıklara maruz kaldıklarında, balataların daimi olarak zarar görmesine neden olacaktır. Bu zarar kendini frenlerin performansındaki azalma, hatalı çalışma, hızlı balata aşınması ve ses olarak gösterir [2,3].

Fren balatalarındaki aşınma noktasının giderilmesi için araştırmacılar iki yol izlemişlerdir. Birincisi; Fren balatalarının daha yeterli soğutulması, İkincisi ise; Fren balata malzemesini ısıya duyarlı olmayan bir sürtünme malzemesinden imal etmek.

Delko-Moraine araştırmacıları çözüme ulaşabilmek için ikinci yaklaşımı seçmişlerdir. Bu yaklaşım; hiç sıcaklıktan etkilenmeden görevini yapabilecek bir balata malzemesi geliştirmektir. Fakat fren balatalarında aranan en önemli özellik, zor çevre ve şartlar altında bile güvenli kullanım ve rahatlık için; yüksek mukavemet, sabit sürtünme katsayısı, düşük aşınma oranı, düşük gürültü ve anti-titreşim özellikleri gibi çok sayıdaki özellikler gerektirmektedir [4,5].

Asbest esaslı sürtünme malzemelerinin yüksek sıcaklıklara dayanamadığı ve kısmen yapıları bozulduğu için istenen bu özellikleri yerine getirememektedirler Asbest esaslı sürtünme malzemelerinin bu zararlı etkileri ve yüksek sıcaklıklara çok duyarlı olmaları sebebi ile, bilim adamları yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı ve insan sağlığını tehdit etmeyen, toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş sürtünme malzemelerine yönelmiştir [6,7].

Toz metalurjisi üretim tekniğinin temel avantajlarından birisi, istenen homojenikte karışmayan malzemeleri toz halinde karıştırabilmektir [8]. Bu avantaj, debriyaj ve fren balataları üretimini mümkün kılmıştır [9].

Metalik balataların, asbest esaslı balata türlerine göre avantajları, daha büyük hızda enerji absorbe etmeleri ve daha fazla aşınma mukavemetine sahip olmalarıdır, Bunlar daha yüksek sıcaklıklara dayanabildikleri gibi aynı zamanda daha fazla ısı iletirler. Sürtünme katsayıları sıcaklık ve basınçla daha az değişir. Dinamometre testleri, metalik sürtünme malzemelerinin 230°C'nin üstündeki sıcaklıklarda asbest esaslı sürtünme malzemelerinden daha yüksek aşınma direncine sahip olduğuna göstermiştir. Bu sıcaklığın altında ise, metallerin sürtünmesi eşdeğerdir, ya da organiklerinkinden daha yüksektir [10,11].

Daha yüksek güçler için, metalik olmayan katkı içeren metalik bağlantılı balata malzemeleri kullanılır. Metalik olanlar; bakır alaşımları, demir ve demir alaşımları. metalik olmayanlar ise tercihen. (SiO₂, Al₂O₃ veya mullit) ve silikatlardır. İlave katkı olarak düşük sıcaklıkta eriyen metaller, sülfür ve sülfat, karbür, grafit ve sinler metalik tozlar kullanılabilir. Metalik olmayan miktar, hacim olarak % 50 veya daha fazla

olabilir. Metal seramik balata malzemelerinin sürtünme katsayısı 0,3 - 0,7 arasındadır. Bunlar 1000 °C sıcaklığa kadar kullanılabilirler [35].

BÖLÜM 2. TOZ METALURJİSİ TEKNİĞİ

2.1. Toz Metalurjisine Giriş

Toz metalurjisi, metal ve seramik tozlarının basınç ve sıcaklık yardımıyla katı ve dayanıklı parça haline getirilmesi tekniği olarak ifade edilebilir. Kısaca çeşitli toz malzemelerden istenilen şekil ve özelliklere sahip parçaların üretilmesi tekniğidir.

T/M sayesinde döküm, kaynak, talaşlı imalat ve plastik şekil verme (PŞV) gibi yöntemlerle üretilmesi oldukça zor veya imkânsız olan çeşitli alaşımlar kolaylıkla ürün haline getirilebilmektedir. Ergime sıcaklığı çok yüksek olan molibden, tungsten, platin gibi metallere parça üretiminde tercih edilmektedir. Aynı zamanda bu yöntemin kullanılmasıyla dökümde (yolluk ve besleyiciden kaynaklanan kayıplar) ve talaşlı imalatta meydana gelen kayıplar önlenebilmektedir. T/M, bahsedilen kayıpları önlemesi ve işçiliğin az olması bakımından ekonomik bir üretim sağlamaktadır. T/M ile malzeme üretimi uzun yıllardır uygulanan bir yöntemdir.

2.2. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları

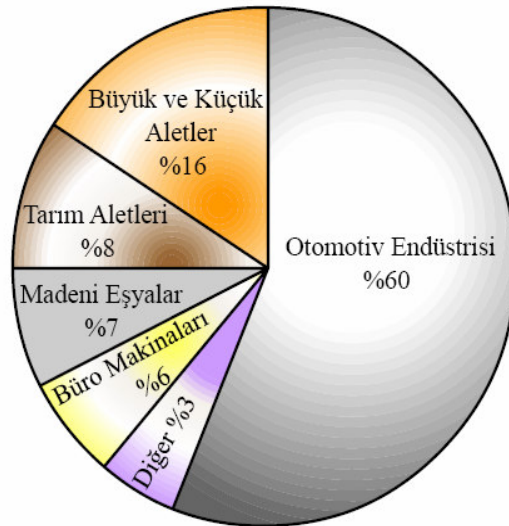
Toz metalurjisi çok değişik alanlarda kullanılmaktadır. Bunlar takım çelikleri, paslanmaz çelikler, süper alaşımlar, refrakter olan tungsten ve molibden gibi malzemelerin kullanılmasıyla üretilen aşınmaya dayanıklı parçaların imalatı, magnetik alaşımlar, bakır, alüminyum ve titanyum alaşımları, nükleer malzemeler, sermetler ve değerli metallerdir [12].

Toz metalurjisi, otomotiv endüstrisi başta olmak üzere pek çok alanda kullanılmaktadır. Tungsten lamba filamentleri, dişli çarklar, ortopedik gereçler, yağlamasız yataklar, elektrik kontakları, ofis makina parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balataları, jet motor parçaları, kaynak elektrotları, katalizörler, lehimleme aletleri, yüksek sıcaklık filtreleri, nükleer güç yakıt elemanları, devre levhaları, dişçilik gibi uygulama alanları vardır [13]. Bu uygulamalardan bazıları Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. T/M ile üretilmiş çeşitli ürünler [14].

Toz metalurjisi üretim yöntemi tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de hızla gelişmektedir. 1991 yılı verilerine göre ülkemizin toplam demir esaslı sinter üretimi 3000 ton civarında olup, bu üretim, başta otomotiv sektörü olmak üzere, beyaz eşya ve dayanıklı tüketim malları sektörüne, elektronik sektörüne, savunma sanayisine ve diğer birçok sektöre yönelik yapılmaktadır [15].



Şekil 2.2. Toz metalurjisinin kullanım alanları [16].

2.3. Toz Metalurjisinin Avantaj ve Dezavantajları

Toz metalurjisinin önemi döküm, talaşlı imalat ve PŞV ile şekillendirilmesi oldukça zor olan çeşitli alaşımların kolaylıkla ve ekonomik bir şekilde ürün haline getirilebilmesinden kaynaklanmaktadır. Toz metalurjisi diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında aşağıda sayılan avantajları ortaya çıkmaktadır [17]:

- Üretim hızı oldukça yüksek olup, işgücü ihtiyacı azdır.
- Karmaşık şekilli ve hassasiyet gerektiren parçalar kolaylıkla üretilebilir.
- Birbiri içinde çözünmeyen farklı karakterdeki malzemeler bir araya getirilerek üretim yapılabilir.
- Üretilen malzemeler üstün fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Üretilen parçaların tane boyutu küçük, çekme mukavemeti yüksek ve işlenebilirlik kabiliyeti yüksektir.
- Toz metalurjisiyle üretimde malzeme kaybı oldukça azdır. Döküm ve talaşlı imalatta meydana gelen malzeme kaybı düşünüldüğünde büyük ölçüde malzeme tasarrufu sağlar.
- Toz metalurjisi ile üretilen parçalara genellikle talaşlı imalat gibi ek işlemler gerekmez.
- Üretimin hızlılığı, malzeme israfının az olması ve işçiliğin az olması nedeniyle ekonomik bir üretim sağlar.

T/M yukarda bahsedilen avantajların yanında aşağıda belirtilen bazı dezavantajlara da sahiptir [17]:

- Mikroyapı içerisinde gözeneklerin bulunmasından dolayı bazı yöntemlere göre zaman zaman düşük mekanik özellikler elde edilebilir.
- Üretim için gerekli olan kalıpların maliyeti yüksektir.
- Kalınlık/çap oranı çok büyük olan parçaların üretiminde zorluklar yaşanmaktadır. Parça boyutları, pres kapasitesinin belirlediği sınırlarda olmak zorundadır. Aynı zamanda homojen yoğunlukların elde edilebilmesi için parça boyutlarında sınırlamalar olmaktadır. Genellikle 20 kg'a kadar T/M parça üretimi yapılabilmektedir.

- Preslenen parçaların geometrisinin kalıptan bozulmadan çıkabilecek şekilde olması gerekmektedir.
- Presleme aşamasında heterojen basınç dağılımı nedeniyle parça kesiti boyunca yoğunluk ve özelliklerde farklılıklar görülebilmektedir [17].

2.4. Metalik Toz Üretim Yöntemleri

Toz metalurjisi ile üretim yapılırken farklı yöntemlerle hazırlanan tozlar kullanılmaktadır. Metal tozlarının üretiminde kullanılan teknikler, tozların birçok özelliğini belirlediğinden toz hazırlama yöntemi oldukça önemlidir. Tozun sahip olduğu özellikler direkt olarak preslenme davranışını, sinterleme davranışını ve son ürün özelliklerini etkilemektedir [18].

Temel olarak dört değişik toz üretim tekniği vardır. Bunlar: mekanik yöntem, atomizasyon yöntemi, kimyasal yöntem, elektrolitik yöntemdir.

Ekonomik olarak üretim sağlanabildiğinden bazı tozların üretimi mekanik öğütme ile gerçekleştirilmektedir. Mekanik yöntemde katı hal malzemeye öğütme uygulanarak toz oluşturulur. Öğütme işlemi kırıcı, girdaplı, taraklı ve bilyalı değirmenler ile yapılmaktadır. Öğütmede en çok bilyalı silindirik değirmenler kullanılmakta ve içerisinde büyük çaplı, sert ve aşınmaya dayanıklı bilyalar bulunmaktadır. Değirmenin içine konulacak malzeme miktarı, öğütücü bilyalar dâhil değirmen hacminin yarısını geçmemelidir. Değirmen dönerek ve titreştirilerek malzeme ile bilyalar arasında çarpmalar sonucu, malzeme ve daha sert olan bilyalar arasında darbe, oğuşturma, burulma ve sıkıştırma etkilerinden birisi veya birkaçı beraber uygulanarak öğütülen malzeme parçalara ayrılır; hareketin devamı ile küçük toz tanecikleri şeklini alır [19].

Diğer bir metalik toz üretim yöntemi olan atomizasyon yönteminde; bir potada ergitilmiş metal, alt taraftan küçük bir delikten sızdırılarak bir nozülde püskürtülen gaz veya sıvı jetlerinin etkisiyle küçük damlacıklara parçalanır ve damlacıklar birbirleri ile veya katı yüzeylerle temasa geçmeden hızlıca soğutulur. Ana fikir, ergimiş metali yüksek enerjili gaz veya sıvı çarpmasına maruz bırakarak daha küçük parçalara ayırmaktır. Hava, azot ve argon en çok kullanılan gazlardır. Sıvılar içinde en çok su

kullanılır. Nozülün tasarım ve geometrisi, atomize eden akışkanın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış çapı gibi parametreler değiştirilerek toz boyutu dağılımı kontrol edilebilir. Tanecik şekli ise katılaşma hızıyla belirlenir. Katılaşma hızının yavaş olması ile küresel şekilli tanecikler elde edilirken, katılaşma hızının artmasıyla daha karmaşık şekiller elde edilir. Ticari olarak demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, alüminyum, kalay, kurşun, çinko ve kadmiyum tozlarının üretilmesinde kullanılır.

Krom içeren alaşımlar gibi kolayca oksitlenen metallerde atomizasyon, argon gibi asal gazlar yardımıyla gerçekleştirilir. Atomizasyon, alaşımı oluşturan tüm metaller ergimiş durumda tamamen alaşımlandığı için, alaşımların toz halinde üretilmesinde faydalı bir yöntem olup; hemen hemen aynı kimyasal bileşime sahip toz taneciklerinin elde edilmesini sağlar [19]. Ergitilebilen bütün malzemeler atomize edilebilir. Atomizasyon işlemi farklı yöntemlerle gerçekleştirilir. Bunlar; gaz atomizasyonu, su atomizasyonu, santrifüj atomizasyonu, döner elektrot atomizasyonudur [20].

Bir başka toz üretim yöntemi olan kimyasal toz üretim yönteminde katı, sıvı veya buhar fazı tepkimeleriyle toz üretimi yapılmaktadır. Bu yöntemle üretilen tozların boyutları 5–10 µm ile 100–500 µm arasında ve değişik geometrik şekillerde olabilmektedir. Genel olarak kimyasal yöntemle toz üretiminin avantajları şöyle sıralanabilir [21]:

- Katı redüktif olarak kullanılan karbonun ucuz olması
- Metal oksitlerin kolaylıkla bulunabilmesi
- Gözenekli toz üretilmesi
- Metal ve oksitlerin boyut kontrolünün yapılabilirliği

Yüksek iletkenliğe sahip metal tozlarının üretiminde kullanılan elektrolitik yöntemde, ana fikir elektrolitik bir hücrenin katot çubuğunda metal tozlarının çöktürülmesidir. Bu yöntem ile %94'e varan saflıkta Cu, Fe, Zn, Mn ve Ag tozları üretilmektedir. Elektrolitik yöntemle üretilen tozlar, genellikle süngerimsi biçimlerde ve dendritik yapıdadırlar. Maliyetinin yüksek olması nedeniyle elektrolitik toz üretim yöntemi pek kullanılmamaktadır [22].

2.5. Toz Metal Parça Üretim Prosesinin Aşamaları

İstenilen özelliklere sahip tozların üretilmesiyle başlayan toz metalurjisi yönteminin işlem basamakları bu kısımda ele alınmıştır.

2.5.1. Tozların harmanlanması ve karıştırılması

Toz metalurjisinde genellikle toz karışımları kullanıldığından, tozların kompaktlama işlemine tabi tutulmadan önce etkin bir şekilde karıştırılması gereklidir. Karıştırma işleminin temel amacı toz karışımının homojen olmasını sağlamaktır. Değişik boyut, şekil ve yoğunluktaki tozların homojen olarak karışmaları üretilen parçanın performansını arttırmaktadır [18,23].

Toz kütleleri içerisinde standart dağılımlar bulunmadığı zaman karıştırma işlemi öncesinde harmanlama yapılmalıdır. Düzenli boyut dağılımı elde etmek ve presleme ve sinterleme özelliklerini iyileştirmek için harmanlama işlemi önerilmektedir. Karıştırma ve harmanlamayı bazı faktörler etkilemektedir. Bunlar;

- Tozların fiziksel karakteristikleri
- Nemlilik ve atmosfer koşulları
- Karıştırıcıdaki toz hacmi
- Karışma hızıdır.
- Karışma süresi
- Karıştırıcı boyutları
- Dönme hızı

Toz karışımları hazırlanırken içerisine belli oranlarda yağlayıcı ilavesi yapılır. Yağlayıcı ilavesinin temel amacı, rijit kalıp içerisinde gerçekleştirilen presleme işleminde, toz karışımı ile kalıp yüzeyi ve toz taneciklerinin birbiri arasındaki sürtünmeyi azaltmaktır. Yağlayıcı kullanılmadığı zaman toz karışımı ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünme nedeniyle basınç dağılımındaki homojensizlik artar, dolayısıyla preslenen kompakt bünyesinde gerilme farklılıkları oluşur. Kompakt bünyesinde oluşan bu gerilme farklılıkları ise sinterleme esnasında distorsiyonlara yol açar ve kompakt kalıptan çıkarmak zorlaşır. Kullanılan yağlayıcı miktarı arttıkça parçayı kalıptan çıkarmak için gerekli kuvvet azalacaktır. Ancak fazla miktarda yağlayıcı madde kullanıldığında, sinterleme esnasında kompakt yüzeylerinde kabarcıklar oluşur. Buna bağlı olarak yüzey kalitesi azaltmaktadır.

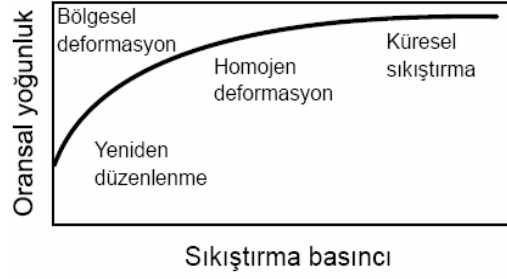
Karışıma ilave edilen yağlayıcılar genellikle kuru toz şeklindedir. Zira sıvı şekildeki yağlayıcılar tozun akma kabiliyetini düşürmektedir. Metal tozları için en çok kullanılan yağlayıcılar stearik asit, çinko stereat, lityum stereat, kalsiyum stereat gibi metal stereatları ile sentetik mumlardır. Organik stereatlar, sinterlemeden sonra kalıntı bırakmadıklarından geniş kullanım alanına sahiptirler. Karışımdaki tüm toz partiküllerinin yağlayıcı ile temas etmeleri için yağlayıcı tozun mümkün olduğu kadar ince olması istenir. Yağlayıcı miktarı preslenen parçanın şekline bağlı olarak %0,5–1,5 oranlarında tutulmalıdır. Karmaşık şekilli parçaların düşük basınçlarla kalıptan çıkartılabilmeleri için yağlayıcı miktarı fazla olmalıdır. Yağlayıcıların yoğunluğu toz yoğunluklarından daha düşük olduğundan, kompaktlanan parçanın yoğunluğundaki artış sadece düşük yağlayıcı ilavelerinde görülür. Bu yüzden yağlayıcı ilavesi optimum düzeyde tutulmalıdır. Yağlayıcıyı metal toz karışımına ilave etmenin yanı sıra diğer bir seçenek de kalıp yüzeylerinin yağlanmasıdır [23].

2.5.2. Presleme

Metal tozları kalıpla şekillendirildiğinde tozun serbest olarak kalıp boşluğunu çok iyi ve tam olarak doldurması arzu edilmektedir. Tozlar kalıp içinde soğuk olarak preslendiğinde, teorik yoğunluğa mümkün olduğunca yaklaşılması arzu edilir. Eşit presleme basıncına rağmen her metal tozunda presleme sonucunda ulaşılan yoğunluk, o malzemenin teorik yoğunluğuna göre çok farklıdır. Bu durum;

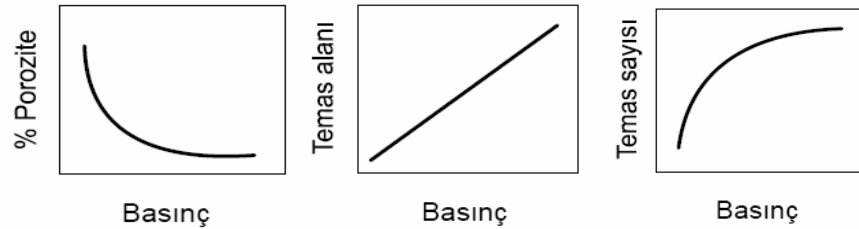
- Tozun malzeme cinsine (özellik yüzey, üretim yöntemleri)
- Tozun tane iriliği, şekli ve yüzey durumuna
- Tozun görmüş olduğu ön işlemler gibi önemli faktörlere bağlıdır.

Malzeme ne kadar yumuşaksa, preslenebilirliği o derece yüksektir. Preslenebilirlik, toz tanelerinin preslemede kendi aralarındaki ve tanelerle kalıp arasındaki sürtünmeyle de yakından ilişkilidir. Aşağıda presleme anında uygulanan basınç ile yoğunluk değişiminin basitleştirilmiş bir diyagramı verilmiştir. Bu diyagram birbirinden açıkça ayrılamayan dört bölgeden oluşmaktadır. Yoğunlaşma hızı, kompakt yoğunluğu arttıkça sürekli olarak azalmaktadır. Gözenek miktarı, koordinasyon sayısı ve temas alanı uygulanan basınç ile değişmektedir.



Şekil 2.3. Partikül paketlenmesinde basınç ile teorik yoğunluk değişiminin gösterilmesi [24].

Partiküller üzerine basınç uygulanmasıyla birlikte ilk anda noktasal temaslarda elastik deformasyon meydana gelir. Basıncın artmasıyla partiküller yeniden düzenlenir ve kayma ile temas eden partikül sayısı artar. Eş zamanlı olarak, temas alanları genişler ve her temas noktasının etrafındaki plastik deformasyon bölgesi genişleyerek yayılır. Temas noktalarında basıncın yoğunlaşmasıyla, gözenek boyutunu küçültecek ve gözenekliliği azaltacak şekilde komşu gözeneklere kütle akışı meydana gelir. Genişleyen temas noktalarıyla beraber deformasyon sertleşmesi meydana gelir. Her iki etken de ileriki seviyelerde yoğunlaşma için gerekli olan gerilme miktarını arttırmaktadır. Yüksek yoğunluklarda etkili bir deformasyon ve gerçek partikül karakterleri kaybolur. Küresel şekilli bronz partiküllerin kompaktlanması sırasındaki porozite, temas alanı ve temas sayısının kompaktlama basıncı ile değişimi Şekil 2.4’de gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Partiküllerde presleme basıncına bağlı olarak porozite, temas sayısı ve temas alanının değişimi [25].

Sıkıştırma esnasında basınç arttıkça bölgesel deformasyon, pürüzleri yassılaştırır ve deformasyon temas bölgelerine yayılır. Temas bölgelerinde gerilme dağılımları değişkenlik

göstermektedir. En büyük basma gerilmesi temas noktalarının merkezindeyken, en küçük basma gerilmesi temas noktalarının kenarlarındadır. Düşük basınçlarda gerilme temas noktalarında yoğunlaşır. Daha yüksek basınçlarda kompakt boyunca homojen deformasyon meydana gelir. Üçüncü aşamada kütle boyunca deformasyon sonucu sertlik değerlerinde artış sağlanır. Çok yüksek sıkıştırma basınçlarında üç ya da daha fazla parçacığın birleşme noktalarında küçük gözenekler bırakacak şekilde küresel deformasyon meydana gelir. Bu durum 1GPa'lık gerilme ve %95 teorik yoğunluk değerinde başlar. Sıkıştırmanın bu aşaması pratikte çok ender görülür. Sıkıştırma sonrasında basıncın azalmasıyla kompakt elastik olarak rahatlamakta ve bu durum geriye doğru yaylanma olarak nitelendirilmektedir [25].

2.5.2.1. Presleme teknikleri

Presleme işlemi genel olarak soğuk ve sıcak presleme şeklinde iki ana gruba ayrılabilir. Soğuk presleme yöntemlerinde, preslemeden sonra sıcaklık uygulanırken, sıcak presleme yöntemlerinde basınç ve sıcaklık aynı anda uygulanır. Soğuk veya sıcak izostatik presleme teknikleri, rijit kalıplarla presleme tekniğine göre üründe ölçü hassasiyeti ve iyi mekanik özellikler sağlamak bakımından çok daha üstündür. Bu presleme tekniklerinde, toz yığınları üzerine uygulanan basınç homojen olarak dağıldığı için düşük basınçlar altında bile yüksek yaş mukavemet ve yüksek yaş yoğunluk değerleri elde edilebilir. Sıcak izostatik presleme tekniğiyle üretilen parçaların çekme mukavemeti ve yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri diğer tekniklerle üretilen parçalara göre çok daha üstündür [26].

Dinamik presleme yöntemlerinde toz sıkıştırma hızı klasik yöntemlere nazaran çok yüksektir. Preslenecek toz, yumuşak çelikten yapılmış bir kapsül içine doldurulduktan sonra vakumla kapsülün içindeki hava alınarak kapsülün ağzı kaynakla kapatılır ve kapsülün çevresine gömlek şeklinde patlayıcı madde doldurulur. Patlayıcı maddenin patlaması sonucu meydana gelen yüksek basınç dalgalarının, parça yüzeyinde iç bölgelere doğru ilerlemesiyle presleme sağlanır. Yüksek basınç sonucu meydana gelen şok dalgaları, parça üzerine, parçanın etrafındaki patlayıcı maddenin infilak ettirilmesi ile aktarıldığında direkt presleme; patlama ile tahrik edilen yüksek hızlı bir piston tarafından aktarıldığında ise indirekt presleme gerçekleşmektedir.

Son yıllarda geliştirilmiş olan bu yöntemle, klasik yöntemlerle preslenmesi güç ya da mümkün olmayan veya sinterleme esnasında kimyasal reaksiyona giren alaşımlar ve metal tozu karışımları preslenebilmektedir.

Triaxial presleme yönteminde parça hem çevre yüzeyinden izostatik olarak hem de bir pistonla aksel yönde sıkıştırılmaktadır. Böylece yalnız izostatik sıkıştırma yöntemine göre çok daha yüksek homojen bir presleme elde edilmektedir [26]. T/M parçaların üretiminde dövme, ekstrüzyon ve vibrasyonla presleme yöntemleri de kullanılmaktadır. Bunların yanında çubuk, levha, şerit ve tüp gibi basit geometrik şekillere sahip parçaların üretiminde kullanılan sürekli presleme yöntemi de kullanılmaktadır[26].

Sıcaklık ve basıncın aynı anda uygulandığı sıcak presleme yöntemleri de T/M parçaların üretiminde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemde şekillendirme ve sinterleme işlemleri birlikte gerçekleştirildiğinden yüksek bir yoğunluk ve hızlı bir üretim sağlanır. Presleme ve sinterlemenin birlikte yapılması soğuk yoğunlaştırmaya göre yüksek dayanım, sertlik ve yoğunluk yanında parçada gaz miktarı ve büzülmenin daha düşük olması gibi üstünlükler sağlamaktadır.

Sıcak presleme yöntemlerini, sıcak presleme, sıcak ekstrüzyon ve sıcak izostatik presleme, sıcak dövme şeklinde gruplandırmak mümkündür. Sıcak presleme, sıcak ekstrüzyon ve sıcak dövmeğe göre daha sınırlı uygulanan bir yöntemdir[26].

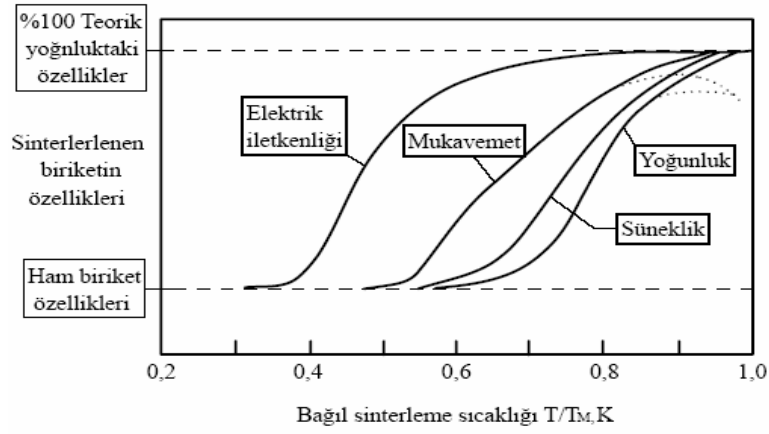
2.5.3. Sinterleme

Sinterleme, preslenmiş yaşı birikmelere mukavemet kazandırmak amacıyla kontrollü bir atmosferde ve yüksek sıcaklıklarda uygulanan pişirme işlemi olarak ifade edilmektedir. Parçaların kalıp içersinde sıkıştırılarak şekillendirilmesi sonucunda parçada meydana gelen mekanik bağlar, sinterleme işlemi sayesinde metalik bağlara dönüşerek bu sayede parçaya mukavemet kazandırılmış olur. Sinterleme öncesi ve sonrasındaki mukavemetler arasında yüz kat kadar bir fark bulunmaktadır.

Sinterleme işlemi, tek bileşenli sistemlerde metalin mutlak ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta yapılırken; birden fazla bileşenli sistemlerde genellikle ergime sıcaklığı en düşük olan bileşenlerin ergime sıcaklığının üstünde yapılmaktadır. Sinterleme

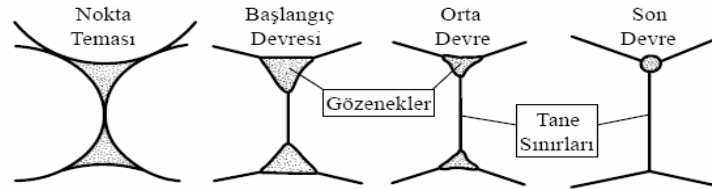
sıcaklığı kompaktı oluşturan ana malzemenin ergime sıcaklığının %70- 80'i arasında olurken; bazı refrakter malzemeler için ergime sıcaklığının %90'ına çıkılabilir [13].

Fe esaslı malzemeler için sinterleme sıcaklığı 1100–1200°C arasındadır. Sinterleme sıcaklığı ile sinterleme süresi arasında önemli bir ilişki olup süre kısaltılmak isteniyorsa sinterleme sıcaklığının artırılması gerekmektedir. Sinterleme sıcaklığının 1150°C 'yi aşması sinterleme maliyetini yükseltir. Sinterleme sıcaklığının artması ile malzemenin elektrik iletkenliği, mukavemet, yoğunluk ve süneklik gibi özellikleri artmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Sinterleme sıcaklığının toz biriket özelliklerine etkisi [23].

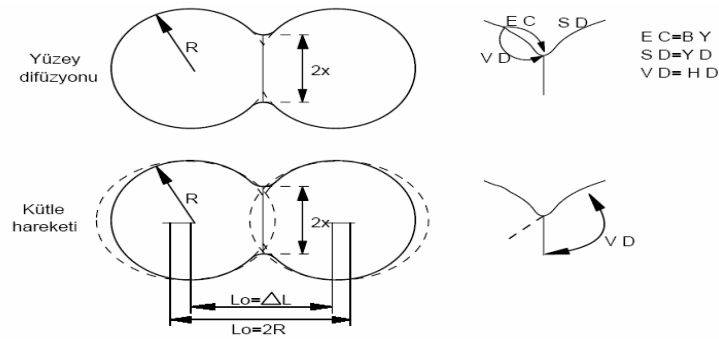
Sinterlemenin başlangıcında toz tanecikleri nokta teması halindedir. Malzemelere uygulanan sinterleme işlemi başlangıç, orta ve son aşama olmak üzere üç aşamada gerçekleşmektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Sinterleme esnasında nokta teması bağlarının gelişimi [27].

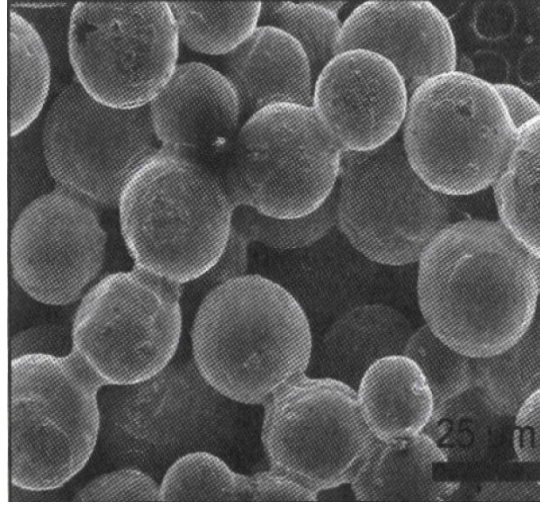
Sinterlemeyi gerçekleştiren itici güç sistemin iç enerjisindeki azalmadır. Bu azalmayı sağlayan faktörler, partikül temas alanlarının büyümesi sonucu yüzey alanının azalması, gözenek hacminde azalma veya gözeneklerin küreselleşmesi, çok bileşenli sistemlerde katı fazın sıvı faz içinde çözünmesi sonucu oluşan konsantrasyon farkının giderilmesidir [27].

Sinterleme sırasında meydana gelen boyutsal değişimler, gözeneklerin şekil ve boyut değişimi ve tane büyümesi gibi olaylar, mikro yapı içerisinde sıcaklıkla meydana gelen bazı atomsal taşınım mekanizmalarıyla gerçekleşir. Atomal taşınım mekanizmaları, hacim difüzyonu, yüzey difüzyonu, tane sınırları difüzyonu, buharlaşma, yoğunlaşma ve plastik akıştır. Yüzey difüzyonu ile boyutsal değişim olmaz. Ancak Şekil 2.7’de görüldüğü gibi sinterleme esnasında hacim difüzyonu boyutsal değişmeye neden olmaktadır. Bu mekanizma hacim difüzyonunu, tane sınırı difüzyonunu, plastik ve viskoz akışı kapsamaktadır. Şekilde, BY = buğulanma-yoğunlaşma, YD = yüzey difüzyonu, VD = gözenek difüzyonu, HD = hacim difüzyonudur.



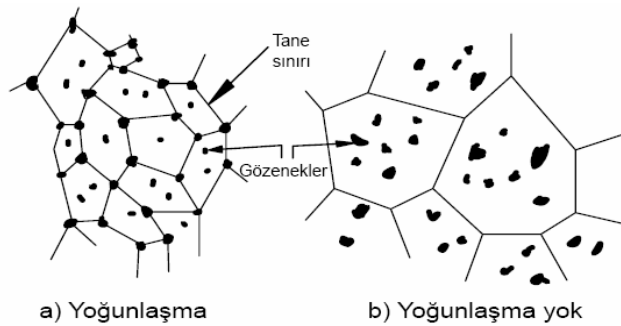
Şekil 2.7. Küreden-küreye sinterlemede; iki tür sinterleme mekanizmasında boyun büyümesi için yüzeyden malzeme taşıma mekanizması, yüzey kaynaklarından sağlanması [22].

Sinterleme işlemi üç devrede gerçekleşmektedir. Bunlar; ilk devre sinterlemesi, orta devre sinterlemesi ve son devre sinterlemesi olarak ifade edilmektedir. Sinterlemenin ilk devresinde kütle taşınım mekanizmasına bağlı olarak tanecikler arasındaki temas noktalarında boyun büyümesi başlar. Bu durum Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil.2.8. Sinterlemenin ilk aşamasında tanecikler arası boyun oluşumu [22].

Orta devre sinterlemesi, sinterlenen birikelerin özelliklerinin belirlenmesinde önemli olup, bu devrede yoğunluk artışı ve tane büyümesi görülmektedir. Gözeneklerin yapısı düzelmekte, ancak açık gözenekler son sinterleme devresine kadar kalmaktadır. Bu devrede tane sınırı ve gözenek geometrisi sinterlenme oranını kontrol etmektedir. Sıcaklık artışı ile tane sınırı hareket oranı artmakta, gözenekler daha yavaş hareket ettiğinden gözeneklerden tane sınırı ayrılması meydana gelmektedir. Gözenekler toplam tane sınırını azaltmaktadır. Gözeneklerin tane kenarında tutulmaları için gerekli enerji düşük olup gözenek ve tane sınırı ayrı olursa sistem enerjisi yeni oluşan ara yüzey alanı miktarı oranında artmaktadır. Şekil 2.9'da tane kenarındaki ve tane içerisindeki gözenek dağılımının yoğunlaşmaya etkisi verilmektedir.



Şekil 2.9. Orta devre sinterlemede, iki muhtemel gözenek tane sınırı görünümü: a) tane sınırlarındaki gözenekler yoğunlaşır. b) izole gözenekler yoğunlaşmaz [22].

Son sinterleme devresi, içerisinde gözenek izolasyonu, hacim difüzyonu ve bunlara bağlı olarak büzülmenin olduğu yavaş bir işlemdir. Bu devrede düşük yayınma ve yüksek tane boyutu büyüme oranı, gözenek sayısını azaltmakta; buna karşılık gözenek büyümesine neden olmaktadır. Son sinterleme devresinde gözenek giderme oranı gözenek yoğunluğuna, gözenek yarıçapına, hacim difüzyonuna, tane boyutuna ve gerilme etkilerine bağlıdır [22].

Sinterlemede değişik atmosferler kullanılmaktadır:

- Oksitleyici atmosferler: Hava, CO₂ ve H₂O
- Redükleyici atmosferler: H, Metan CH₄ ve amonyak, CO
- Vakum, helyum, argon ve azot içeren atmosferler
- Nitrürleyici atmosferler: Amonyak [28].

2.5.3.1. Sinterleme teknikleri

Sinterleme işlemi, genel olarak 3 farklı şekilde yapılmakta olup bu teknikler aşağıda açıklanacaktır.

Katı hal sinterlemesi:

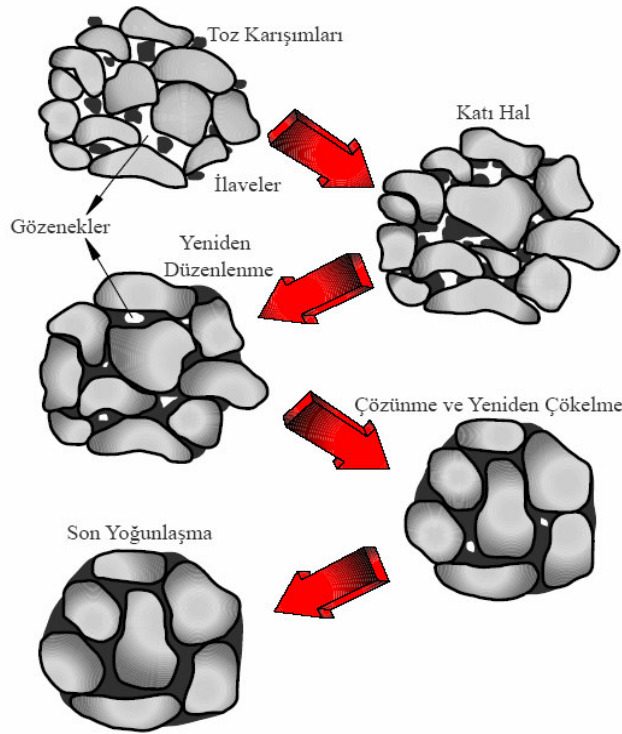
Tek bir elemandan oluşan malzemelerin sinterlenmesinde katı hal sinterlemesi kullanılmakta olup; tek fazlı partiküllerden oluşan kompaktların sinterlenmesi sırasında mikroyapıda meydana gelen değişimler, parçanın boyutu ile beraber fiziksel ve mekanik özelliklerinde de değişimler meydana getirmektedir. Sinterleme için itici güç sistemin serbest enerjisinin düşürülmesidir. Partiküllerin ve tanelerin büyümesi, toplam tane sınırı alanının azalması, serbest enerjide düşmeye neden olmaktadır. Tane sınırlarının eğrilik derecesi büyüdükçe sınırın hareket hızı artmaktadır. Atomların ve sınırın hareketine etki eden en önemli faktör sıcaklık olup, sıcaklığın artışı ile atom yayınımları hızla artmaktadır. Tane sınırının bu şekildeki hareketi küçük tanelerin kaybolmasını, büyük tanelerin oluşmasını sağlamaktadır[29].

Sıvı faz sinterlemesi:

Sıvı faz sinterlemesi esnasında sıvı faz ve katı bir toz kümesi aynı anda bulunmaktadır. Genellikle sıvı faz sinterlemesi parçacıklar arasında bağ oluşumunu arttırmakta ve sinterleme hızına katkıda bulunmaktadır. Sıvı fazın oluşturduğu kılcal çekim kuvvetleri sayesinde partiküller birbirlerini çekmekte ve herhangi bir basınç olmaksızın hızlı bir yoğunlaşma meydana gelmektedir. Oluşan sıvı faz, partiküller arasındaki sürtünmeyi azaltarak yeniden düzenlenmeyi hızlandırmaktadır. Parçacıklar arası bağlanmaya, mukavemet, süneklik, iletkenlik, manyetik geçirgenlik ve korozyon direnci gibi, gözenek yapısında ve parça özelliklerinde meydana gelen önemli değişiklikler eşlik eder.

Sıvı faz sinterlemesi esnasında sıvı faz elde etmek için kimyasal yapıları farklı tozlar kullanılmaktadır. İki tozun birbirleriyle etkileşimi sıvı faz oluşturmaktadır. Sıvı faz oluşturmak için diğer bir yöntem, ön alaşımlandırılmış bir metal tozunu sıvılaştırma ve katılaşma eğrileri arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtmaktır. Sonuçta oluşan katı ve sıvı fazların karışımı süpersolidüs sinterlemesine yol açar [30].

Geleneksel sıvı faz sinterlemesinde süreçler birbiri üzerine binen üç aşamada gerçekleşmektedir. Sıvı faz sinterlemesinin temel aşamaları ve mikroyapı değişimleri Şekil 2.10'da şematik olarak verilmiştir. İlk aşamada toz karışımları sıvının olduğu sıcaklıklara kadar ısıtılmakta, sıvının oluşumu ile sıvının katı parçacıklar üzerinde ortaya koyduğu kuvvete bağlı olarak hızlı bir şekilde başlangıç yoğunlaşması olmaktadır. Sistem yüzey enerjisi en düşük duruma indirilmeye çalışılırken, gözenekler giderilir. Yeniden düzenleme boyunca mikroyapı, kılcal hareketler doğrultusunda viskoz bir katı olarak davranır. Gözeneklerin giderilmesi, sinterlenen kompaktın viskozitesi ile ters orantılı artmakta ve yoğunlaşma hızı sürekli olarak azalmaktadır.

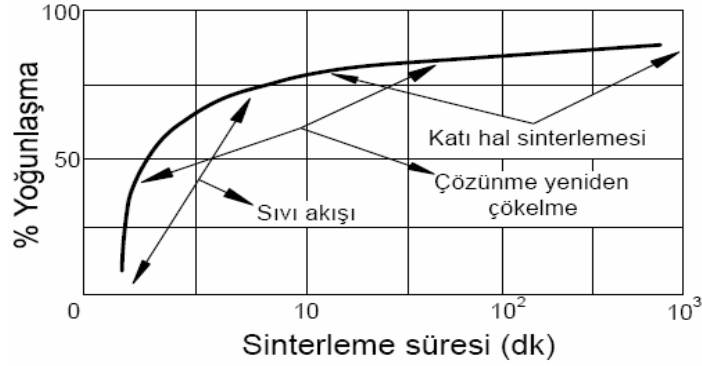


Şekil 2.10. Sıvı faz sinterlemede mikroyapısal değişimler [27].

Yeniden düzenlenme ile yoğunlaşma yavaşladıkça çözünürlük ve yayınma etkileri baskın hale gelmektedir. Çözünme ve yeniden çökme aşamasında mikroyapıdaki taneler irileşmektedir. Bir tane onu çevreleyen sıvı içerisindeki tane boyutu ile ters orantılı davranış göstermekte olup; küçük taneler büyük tanelere göre daha yüksek çözünürlüğe sahiptir. Malzeme, yayınma yoluyla küçük tanelerden büyük tanelere iletilir. Bu süreç irileşme olarak adlandırılmaktadır.

Geleneksel sıvı faz sinterlemede üç kademesi ve sinterleme süresine bağlı olarak %yoğunlaşma miktarının değişimi Şekil 2.11’de verilmiştir. Sıvı faz sinterlemede ilk aşamasında düşük ergime sıcaklığına sahip olan bileşenler sıvı hale geçmekte, sıkıştırma sonucunda aralarında bulunan kılcal boşluklar nedeniyle oluşan kuvvetler, oluşan sıvı fazın boşluklara ilerlemesini sağlamaktadır. Islatıcı sıvıya bağlı olarak kapiler kuvvetler, sıvıyı parçacıklar üzerine ve parçacıklara yakın bir çevreye çekecek şekilde rol oynamaktadır. Oluşan sıvı faz katı parçacıklar arasına sızarken katı parçaların birbirleri üzerine kaynamalarına neden olmaktadır. Böylece mikroyapı

yeniden düzenlenmeye başlamakta; parçacıklar, birbirini izleyen ve bir arada büyüyen parçacıklar gibi yakın olarak yeniden paketlenmektedir. Bu işleme paralel olarak meydana gelen viskoz akış ile mikroyapıda bulunan gözenekler giderilmektedir [24,30].



Şekil 2.11. Sıvı faz sinterlemedeki aşamaların şematik olarak gelişimi [22,27].

Sıvı faz sinterlemesinin son aşaması katı hal kontrollü sinterlemedir. Katı hal iskelet yapının varlığı nedeniyle bu aşamada yoğunlaşma yavaşlamaktadır.

Geçici sıvı faz sinterlemesi:

Sıvı faz sinterlemesinin iki farklı alternatifinden biri geçici sıvı faz sinterlemesidir. Yüksek ergime sıcaklığına sahip katı faz çözünme oranının yüksek olduğu durumlarda geçerli olan bu mekanizmada preslenmiş kompakt sinterleme sıcaklığına çıkartılırken sıvı faz oluşur ve oluşan sıvı faz, iç yayınmayla katı ergiyiğe geçerek yok olur. Kompakt sinterleme sıcaklığında bekletilirken sürecin sonunda oluşan homojen bir katı ergiyik veya iki veya daha fazla katı fazdan oluşan heterojen bir alaşım olabilir.

2.6. T/M'de Kullanılan Tozların Özelliklerinin Belirlenmesi

Toz metalurjisi ile üretilen parçalar, endüstrinin çok değişik alanlarında kullanıldığı için, tozların özelliklerinin uygulama alanının gereksinimlerine göre dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Tozların özelliklerinin birçoğunu üretim teknikleri belirlemektedir. Tozların özelliklerinin araştırılmasında tozun tane büyüklüğü, tane şekli, yüzey alanı, içyapısı ve kimyasal analizi gibi değişkenler dikkate alınmaktadır.

Bu parametrelere bağılı olarak görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik, toz akış hızı ve ham mukavemet değerleri farklılıklar göstermektedir.

Tozların özelliklerinin tespitinde nasıl numune alınacağı ASTM standartlarında belirtilmiştir. Alınan numunenin miktarı çok az olduğundan tüm tozu temsil etmesine dikkat edilmelidir. Numune alma statik ve hareketli olmak üzere iki farklı şekilde yapılır. Statik numune almada, sabit bir toz varilinin farklı birkaç noktasından numune alınır. Hareketli numune almada ise toz kütlesi hareket halindeyken numune alınmaktadır. Deneyler için genellikle 100 g toz yetmektedir. Toz metalurjisinde kullanılan tozların özellikleri, fiziksel özellikler ve kimyasal özellikler olmak üzere başlıca iki ana gruba ayrılabilir.

2.6.1. Tozların fiziksel özellikleri

Tozların fiziksel özellikleri; tane şekli ve boyutu, yoğunluk, akıcılık ve sıkıştırılabilirlik olarak sıralanabilir. Metal tozlarının tane büyüklüğü genellikle elek analizi ile belirlenmektedir. Tane boyutunda esas olan parçacık boyutlarının belirlenmesidir. Tozun tamamının aynı boyutta olduğu söylenemez, ancak ortalama boyuttan söz edilebilir. Boyut analizleri ile her bir aralıktaki tozun %miktarı ve ortalama tane boyutu belirlenir. Tozun şekli, tane boyutunun tespitinde çok önemlidir. Küresel tozlarda sadece çapın bilinmesi yeterli iken pul şeklindeki toz parçacıklarının pul kalınlığı ile düzlem yönündeki boyutun ölçülmesi gerekir. Alanı değişik şekilli tozlarda yüzey alanından gidilerek tane boyutu tespit edilir. Yüzey küreye denkleştirilerek tane boyutu bulunur [16].

Tozlarının en önemli özelliklerinden biri olan tane şekli, tozların, akıcılık, görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik ve ham mukavemet gibi özelliklerini etkileyen önemli bir etkidir. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi tozların tane şekilleri, tozların üretim metoduna göre değişik şekillerde olabilmektedir. Genellikle küresel şekilli toz taneleri gaz atomizasyonu ile elde edilirken, gaza oranla daha hızlı soğutucu olan su atomizasyonu ile karmaşık tane şekillerine sahip tozlar elde edilmektedir.



Şekil 2.12. Toz üretim yöntemine göre tane şekillerinin değişimi [31].

Herhangi bir tozun görünür yoğunluğu, tozların preslenmesi için dizayn edilen kalıptaki boşlukların boyutlarını belirleyen en önemli faktördür. Görünür yoğunluğun tespiti için gevşek, birbirine yapışık olmayan belirli miktardaki metalik toz hacmi bilinen bir kaba tam olarak doldurulur ve kütlesi ölçülür. Daha sonra kütlenin hacme oranıyla görünür yoğunluk tespit edilir. Kabin gevşek olarak doldurulması tozun eğimli plaklar üzerine düşürülmesi ile sağlanır. Demir tozlarının görünür yoğunlukları gözlemlenebilir farklılıklar gösterirler [32].

Yüksek görünür yoğunluğa sahip tozların kullanılmasıyla, kalıp konstrüksiyonu için gerekli malzeme ve zamandan tasarruf etmek, kalıp ömrünü arttırmak ve kırılma riskini azaltmak mümkündür. Bu, yüksek basınç gerektiren yüksek yoğunluklu parçalar üretildiğinde özel bir avantajdır. Bununla birlikte genellikle yüksek görünür yoğunluğa sahip tozlar, kaba tanelere sahip olduğundan, iyi sinterlenebilme özelliğine sahip değildirler. Bunun sonucu olarak bu tozlardan yapılan parçaların çekme mukavemeti ve uzama değerleri, özellikle tek sinterleme uygulandığında düşük olmaktadır.

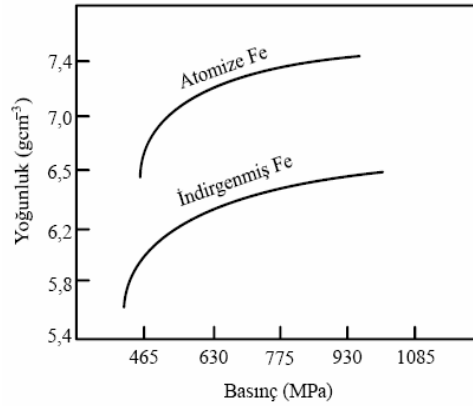
Bir tozun akıcılık özelliği, o tozun doldurma davranışı ile belirlenir. Akıcılık, toz ile kalıbı doldurmak için gerekli zamana ve özellikle tozun dar aralıklara dolmuş derecesine bakılarak tayin edilir. Bu nedenle en iyi akış özelliğine sahip tozları seçmek çok önemlidir. İyi derecede bir akma oranı, kalıba dolmuş için gerekli zamanı azaltarak üretim hızının artmasını sağlar. Fakat istisnai olarak ince taneli tozlar, kalıpla zımba arasındaki boşluklara girebilir. Bu olumsuzluk akma oranını azaltan yağlayıcıların tozlara karıştırılması ile giderilebilir.

Bir tozun basınç altında sıkılaşabileceği miktar veya başka bir deyişle yoğunlaşma miktarı sıkıştırılabilirlik olarak ifade edilmektedir.

Sıkıştırılabilirliği tanımlamak için diğer bir yöntemde aşağıdaki değişkenlerden yararlanılmaktadır.

$$\text{Yoğunluk parametresi} = \frac{\text{Parça yoğunluğu} - \text{Görünür yoğunluk}}{\text{Teorik yoğunluk} - \text{Görünür yoğunluk}} \quad (2.1)$$

Buradaki parça yoğunluğu herhangi bir parça için olabilir. Yapılan ölçümler, görünür yoğunluğun artmasıyla sıkıştırılabilirliğin arttığını, düşük basınçlarla bile oldukça yüksek yoğunlaşma sağlanabildiğini, yüksek basınçlarda yoğunluk artışının fazla olmadığını ve sıkıştırılabilirliği değerlendirebilmek için yoğunluk-basınç eğrilerine bakmak gerektiğini göstermiştir. Şekil 2.13'de iki tip demir tozunun basınç ve yoğunluk ilişkisi verilmiştir. Burada, normal demir tozu ile yüksek sıkıştırılabilirliğe sahip demir tozu arasındaki fark görülmektedir.



Şekil 2.13. Demir tozları için basınç-yoğunluk eğrileri [26].

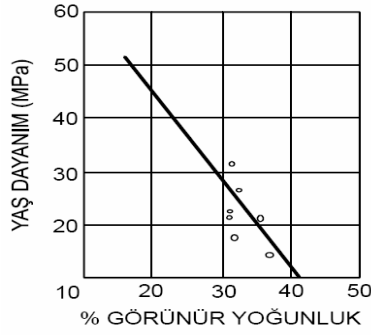
Toz metalurjisiyle parça üretiminde, görünür yoğunluğu yüksek tozların kullanılması ile daha yüksek parça yoğunluğu elde edilebilir. Sıkıştırma oranı, gevşek toz hacminin, bu tozdan yapılan parça hacmine oranıdır. Çoğu kez düşük sıkıştırma oranı tercih edilmektedir. Böylece kalıp boşluğu ve takım boyutları küçülmekte, takımın kırılma ve aşınma riski azalmakta, pres hareketi azalmakta ve kalıbın daha hızlı doldurulmasıyla

hızlı üretim sağlanmaktadır [26]. Sıkıştırmaya etki eden bazı faktörler şu şekilde sıralanabilir:

- a) Metal veya alaşımların tabii sertlikleri: Bazı metaller fazla miktarda soğuk işlem sertleşmesi eğilimindedirler. Presleme sırasında tozlarda deformasyon meydana geldiğinden tozun işlemle sertleşme özelliği sıkışabilmeye çok etki eder.
- b) Tane şekli genellikle ne kadar düzensiz olursa onun sıkıştırılabilmesi de o kadar düşük olur
- c) İç gözeneklilik: Bir toz içindeki küçük iç gözeneklilik presleme esnasında kapalı gözeneklerin olmasına sebep olur ve taneler içinde hava hapseder. Bu nedenle taneleri gözenekli olmayan tozlar daha yüksek sıkışabilme özelliğine sahiptir.
- d) Tane boyutu dağılımı: Eşit boyut dağılımlı tozlar nispeten düşük sıkışma özelliği gösterirler. En fazla boşluğu elde eden tane boyut karışımları yüksek sıkıştırma özelliğine sahiptir.
- e) Ametallerin varlığı: İndirgenmemiş oksitler gibi ametaller sert ve düşük özgül ağırlıkta olduklarından sıkıştırılabilmeyi azaltırlar.
- f) Katı yağlayıcıların kullanımı: Metal tozlarının preslenmesine yardım etmesi için karıştırılan katı yağlayıcılar hafif ve fazla yer kaplamalarından dolayı sıkışabilmeye etki ederler [26].

Toz metalurjisi biriketleri için önemli özelliklerden biri de yaş dayanımlarıdır. Gözenekler biriketlerin kesit alanını azalttığı için mukavemeti düşürmektedir. Ayrıca gözenekler, stres yoğunlaşmasına ve çatlak oluşmasına neden olurlar. Bu nedenle toz biriketlerin mukavemetleri %100 yoğun biriketlerden çok düşüktür. Biriketleme tane boyutu şekli ve taneler arası sürtünme gibi değişik toz karakterlerine bağlıdır. Yağlayıcı ve biriket boyutları da biriketlemeye etki eder. Parçaların ham mukavemeti tanecik yüzeylerindeki düzensizliklerin mekanik bağlanması ile meydana gelir. Sıkıştırma esnasındaki plastik deformasyon mukavemeti arttırmaktadır.

Genellikle toz yüzey alanının artışıyla ham mukavemet de artar. Bu, tane yüzey pürüzlülüğünün arttırılması ve tane boyutunun azaltılması ile gerçekleştirilebilir. Bu özellikler aynı zamanda görünür yoğunluğu azaltmaktadır. Şekil 2.14, demir tozları için görünür yoğunluğa bağlı ham mukavemetin değişimini göstermektedir [33].



Şekil 2.14. Demir tozları için görünür yoğunluğa bağlı ham mukavemet [33].

Oksitlerin ve diğer yabancı maddelerin azaltılmasıyla da ham mukavemet artar. Ham mukavemete, ham yoğunluk ve sıkışabilirlik gibi değişkenler de etki etmektedir. Ham yoğunluk veya sıkıştırma basıncı, mekanik iç bağlanmanın esası olan tane hareketi ve deformasyonuna yardım eder. Sıkıştırma basıncı arttırıldıkça buna bağlı olarak ham mukavemet de artar [33].

2.6.2. Tozların kimyasal özellikleri

Metal tozların en önemli kimyasal özellikleri bileşim ve saflıklarıdır. Saflıkları, kimyasal analizle tayin edilebilir. Sinterlenmiş cisimlerin üretimine ve özelliklerine birinci derecede tesir eder. Metal tozlarının saflığı büyük ölçüde maddelerin saflığına bağlıdır. Örneğin, kendi oksitlerinin hidrojenle redüklenmesiyle elde edilen volfram, kobalt ve demir tozlarının saflığı, pratik olarak kullanılan oksitin saflığındandır. Oksijen ve karbon gibi gayri safiyetlerin malzeme içinde ne şekilde buldukları da önemlidir. Örneğin oksijen, oksit levhaları, erimiş oksit ve absorbe edilmiş gazlar halinde bulunabilir. Oksitlerin redüklenmesi ile hazırlanan metalsel tozlar genellikle muntazam oksit kalıntıları ihtiva ederler. Elektroliz, granülizasyon veya pülverizasyonla elde edilen tozlardan oksijen genellikle oksit kalıntıları halinde bulunur. Karbon ise serbest karbon (grafit), karbür veya katı solüsyon hallerinde bulunur.

Mekanik olarak hazırlanmış metal tozları öğütücülerden ileri gelen gayri safiyetler ihtiva ederler (Fe, Mn, C gibi). Elektrolizle hazırlanmış metalsel tozlar çok saftırlar.

Toplam gayri safiyetleri %2'yi geçmez. Karbonil tozların ihtiva ettikleri oksijen ve karbon miktarı %1,5 kadar yüksek olabilir. Bu gayri safiyetler tozun bir ön ısıtma işleminden sonra sinterlenmesi ile ortadan kaldırılabilir. Demirde bulunan kükürt, fosfor, manganez, silisyum gibi gayri safiyetler tozlarda bulunmazlar. Birçok hallerde tozlarda bazı gayri safiyetlerin bulunmasına müsaade edildiği gibi; sinterlenen malzemenin tozlarına yabancı maddeler de katılabilmektedir. Örnek olarak elektrik ampullerinde kullanılan volfram tozuna toryum veya alüminyum oksit katılması gösterilebilir. Bütün kimyasal özelliklerin tozların sinterlenmesinde önemli tesirleri vardır. Bu nedenle etkilerinin göz önünde bulundurulması gerekir.

İlave olarak katılan malzemelerin miktarının artmasıyla da ham mukavemet azalır. Demire grafit veya yağlayıcı ilavesi gibi bazı alaşım elementleri biriketlerin ham mukavemetlerini azaltabilir. Metal tozuna yağlayıcı katılarak yapılan biriketlerin ham mukavemetleri, yağlayıcı katılmadan yapılan biriketlerden epeyce düşüktür [16].

BÖLÜM 3. TRİBOLOJİ

3.1. Sürtünme ve Aşınmanın Önemi

Triboloji, birbirine göre izafi hareket yapan ve temasta olan yüzeylerde sürtünme aşınma ve yağlama konularını inceleyen bilim dalıdır. Yeni bir bilim dalı olup 1967 'de ortaya çıkmıştır. Esas olarak Yunanca bir terim olan "TRIBOS" kelimesinden türetilmiş olup (ovalama, kaydırma), disiplinler arası bir bilim dalıdır [34].

Çok sayıda yapı elemanı sürtünmeli ya da kaymalı zorlamaya maruz kalır. Bu sırada meydana gelen aşınma, parçaların ömrünü ve güvenilirliğini sınırlar. Tekniğin ne: sahasında malzemelerin sürtünme özelliklerinden ve sürtünme kuvvetlerinden faydalanılarak çeşitli konstrüksiyonların gerçekleştirildiği ve çok çeşitli görevlerin yerine getirildiği görülmektedir. Bu görev, kavramalarda olduğu gibi bir güç nakli frenlerde olduğu gibi hareke; halinde bulunan bir makina'nın kinetik enerjisinin alınarak durdurulması yani bir gücün yutulması veya sevk ve hareke; silindirlerinde olduğu gibi bir hareketin iletilmesi gibi çok çeşitli hareketlerde olabilir [35].

Aşınma çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı esnasında kırılma kadar tehlikeli bir problem olmasa bile, çok büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Sanayileşmiş ülkelerde aşınma nedeniyle gayri safı milli hasılanın (GSMİI) % 7'sine eşdeğer bir harcamanın yapıldığı tahmin edilmektedir [35,36].

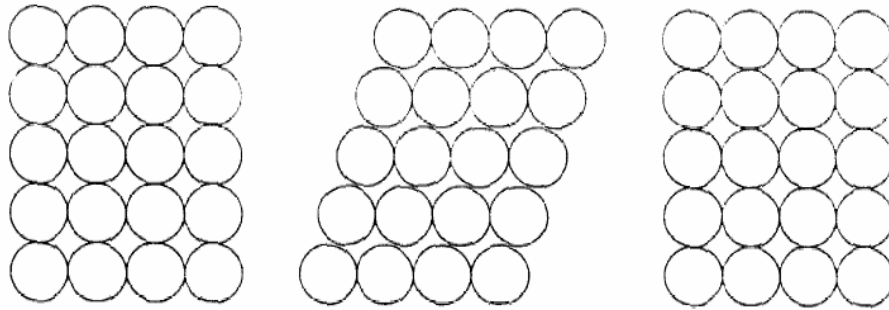
3.2. Sürtünme

Genel anlamda sürtünme: temas halindeki yüzeylerin ve birbiri üzerinde hareket eden ya da, hareket ihtimaline karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır [36,37].

Hareketin cinsine göre sürtünme; kayma, yuvarlanma veya kayma yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olabilir. Birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasında yağlayıcı madde konulur, konulmaması bakımından da, temas yüzeylerinin durumu göre, kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme olarak üç halde de incelenebilir [7,34,38].

Leonardo da Vinci gibi bir çok bilim adamı, kuru sürtünme ile ilgilenmişlerdir. Çoğu araştırmacılar yüzey pürüzlülüğü, adhezyon, elastisite veya kuru sürtünme boyunca yüzey geçişleri gibi kuru sürtünmenin bir tek parametresi ile ilgilenmişlerdir [39]. Son zamanlarda sürtünmenin meydana gelme nedenleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Sürtünmenin sebebi; bir yüzeydeki atomların diğer yüzeydeki atomlar üzerinde hareket ettiği zaman katı yüzeyin kayması esnasında meydana gelen kafes hareketidir. Çünkü bir yüzeyin diğer bir yüzey üzerinde hareketi sonucunda mekanik enerjinin bir bölümü ses dalgaları ve ısıya dönüşür. Birbirleri ile temastaki her katı malzemenin kristal kafesi atomik düzeyde denge durumundadır. Sürtünen çiftlerden birine kavına gerilmesi uygulandığında her kafes elastik olarak deforme olur [40]. Eğer kayma daha da artarsa ve kararsız duruma gelirse atomlar yeni bir denge durumuna geri döner. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi bütün deformasyon enerjisi yok olana kadar kristal kafes hareket eder [41].



Şekil 3.1. Kuru kayma boyunca kristal kafesin elastik deformasyonu.

3.2.1. Sürtünme kanunları

Sürtünme kanunlarının belirlenmesinde iki temel esas vardır. Bunlar büyük oranda uyumluluk gösterirler. Birinci kanun; temas eden yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvveti, görünür temas alanında bağımsızdır. İkinci kanun: sürtünme kuvveti, cisimler

arasındaki normal yük ile doğru orantılıdır. Böylece bir cisim diğeri üzerinde kayarken, eğer normal yük iki katına çıkarılırsa, sürtünme kuvveti de iki katına çıkar. Bu kural daha çok "Amontos" kuralı olarak bilinir ve ilk kez 1699 yılında Fransız bilim adamı Amontos tarafından çıkarılmıştır. Üçüncü kural olarak da kinetik sürtünme kayma hızından yaklaşık olarak bağımsızdır. Bu kuralın ilk ikisine göre uygulanabilirliği daha düşük değerdedir. Üçüncü kural Coulomb tarafından 1785 yılında açıklanmıştır [36].

3.2.2.Sürtünme teorileri

a) Mekanik kilitleme teorisi; 1699'da Amontos tarafından bulunan bu teoriye göre yüzeylerdeki girintiler ve çıkıntılar bir biri içerisine geçerler. Yüzeyleri hareket ettirmek için uygulanan kuvvetin pürüzleri kesecek büyüklükte olması gerekir.

Kesmeyi gerçekleştiren bu kuvvete sürtünme kuvveti denir. Bu teori sürtünmedeki enerji kaybını açıklayamamaktadır.

b) Moleküler çekim teorisi ; Tomlinson tarafından ortaya atılan bu teoriye göre temas eden yüzeylerin molekülleri arasında bir bağ oluşur ve sürtünme kuvveti moleküller arası bağı yenen kuvvettir. Bu teori yapışkan aşınmanın anlaşılmasına yardımcı olan bir teoridir.

c) Elektrostatik kuvvetler; bu teoriye göre sürtünme iki karşı yüzeyde zıt elektrostatik yük birikmesine sebep olur. Bu şekilde meydana gelen zıt yükler arasındaki çekme kuvveti yüzeyleri birlikte tutar.

d) Kaynaklaşma, kesme-kazıma; 1950'de Bowder ve Tabor tarafından ortaya atılan bu teori deneysel yolla elde edilen değerlerle uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu teoride birbiri üzerine bastırılan yüzeylerin temasta olan pürüzleri (asperitileri) yüksek basınçlar nedeni ile bölgesel olarak kaynaşır. Hareketi başlatabilmek için kaynaşan noktaları kesmek gerekir. Eğer iki yüzeyden biri diğere göre sert ise sert yüzeyin asperitileri yumuşak yüzeye gömülür. O halde de hareketi başlatabilmek için sert yüzeyin yumuşak yüzeyi kazınması gerekir.

Yapılan ölçümlerde taslanmış iki yüzeyin gerçek temas alanının görünen toplam yüzeyin çok küçük bir miktarı olduğu görülmüştür. Teorik olarak ilk değme halinde en yüksek üç noktaca oturma olur. Bu noktaların elastik ve plastik deformasyonu sonucu değme alanı genişler ve diğere tepelikler birbiri ile temas eder. Yüzeyleri bastırılan

kuvvetin büyüklüğü kuvvete bağlı olarak, yüzey teması gittikçe genişler ve sonunda bir denge oluşur [42].

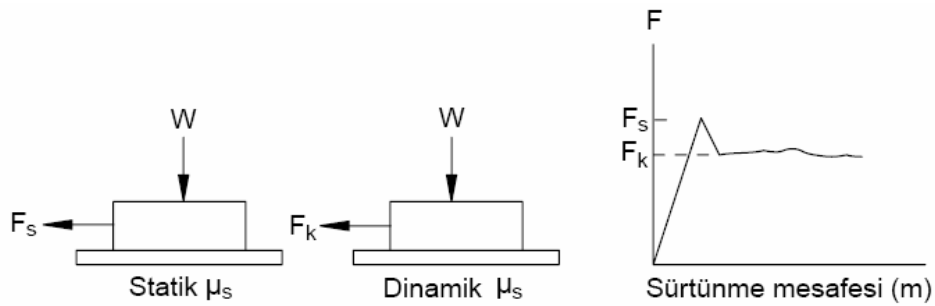
3.2.3. Sürtünme katsayısı

Sürtünme katsayısı TS 555'e göre, disk veya kampana ile disk veya kampana fren balatası arasındaki sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranıdır. Yine TS 555'e göre sürtünme katsayısı, sıcak ve soğuk sürtünme katsayısı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Soğuk sürtünme katsayısı, aşınma deneyi esnasında 100, 150 ve 200 °C'de ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır. Sıcak sürtünme katsayısı ise, 300, 350 ve 400 °C sıcaklıkta ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır.

Bilindiği gibi iki malzeme birbiri ile temas edecek şekilde yerleştirilirse, malzemelerin birbiri üzerinde kaymasını sağlamak için uygulanan kuvvete dik yönde olacak şekilde bir sürtünme kuvveti (direnç) oluşur.

Kaymayı başlatan kuvvet (F_s) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (F_n) arasında; $F_s = \mu_s \times F_n$ bağıntısı mevcuttur. Burada, μ_s statik sürtünme katsayısıdır. Kayma başladıktan sonra, sürtünme kuvvetinde bir azalma olur (F_k). Bu durumda; $F_k = \mu_k \times F_n$ ilişkisi geçerlidir. Burada $\mu_k < \mu_s$ kinetik sürtünme katsayısıdır.

Şekil 3.2' de statik ve dinamik sürtünme katsayıları görülmektedir[31,32,38]



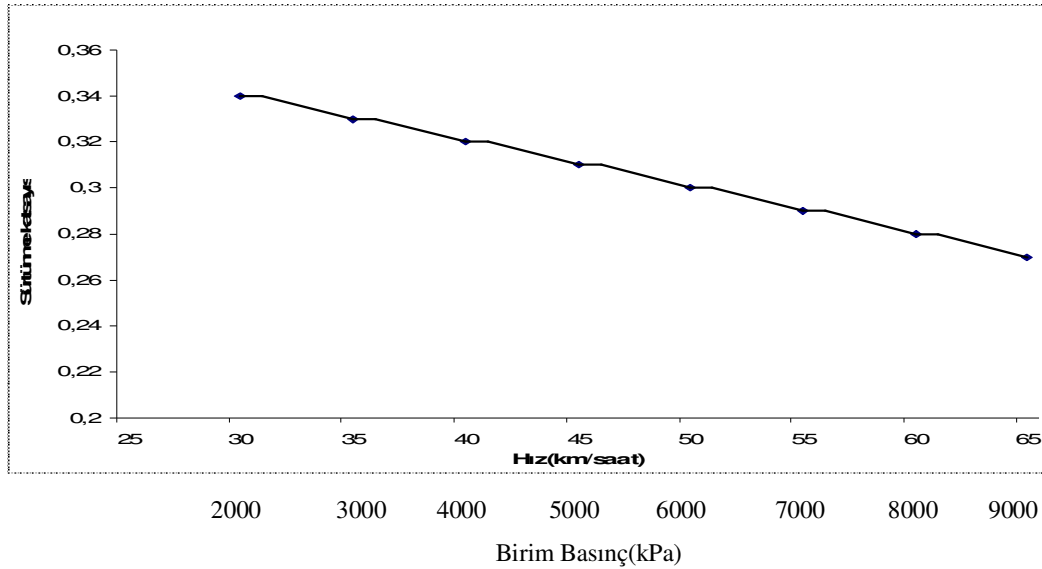
Şekil 3.2. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları [43].

Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, sürtünme statik veya dinamik olarak tanımlanabilir. Statik sürtünme katsayısı, sıfır hızındaki iki yüzeyin sürtünme değeridir. Dinamik sürtünme katsayısı ise, sıfırdan büyük hızlarda ölçülen sürtünme değeridir. Sürtünme

katsayısı, sürtünme hızı, basınç ve sıcaklık gibi değişkenlere bağlıdır [9]. İki yüzey arasındaki sürtünme hızının artmasıyla sürtünme katsayısı düşmektedir. Uygulanan basınçta sürtünme katsayısı üzerinde benzer bir etki gösterir.

Islak balatalarda yüzey sıcaklığının 150 °C üzerine çıkmasıyla sürtünme katsayısında önemli miktarda düşme olacaktır. Bu sıcaklık genelde “bozunum sıcaklığı” olarak anılır. Islak balatalarda genellikle aşınma hızları düşüktür [9,44,45].

Kuru balatalar, ıslak olanlara göre daha basit ve hafiftir. Şekil 3.3 basınç ve hızın, otomobil disk freni dinamik sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Islak balatalarda olduğu gibi dinamik sürtünme katsayısında artan basınçla sürtünme katsayısında düşme meydana gelmektedir.



Şekil 3.3. Kuru balatada basınç ve hızın sürtünme katsayısına etkisi.

Pratikte sürtünme denilince akla gelen kinetik sürtünmedir. Aşınmada, enerji kaybı ve sıcaklık artışı gibi olaylar sürtünme sebebiyle oluşmaktadır. Bu duruma göre, uygulama alanlarını göz önünde bulundurarak sürtünmenin hem istenen hem de istenmeyen bir olay olduğu söylenebilir. Fren, kavrama ve sürtünmeli çarklar gibi makine elemanlarında istenilen bir olay olduğu için, sürtünme artırılmaya çalışılır. Oysa, diğer

izafi hareket yapar bütün sistemlerde sürtünme islenmeyen bir olaydır ve azaltılması istenilir [36].

Buna göre sürtünme katsayısı (μ) sürtünme kuvvetinin değerini belirler. Sürtünme katsayısı, $0.001 < \mu \leq 1.0$ değerleri arasında değişir. Vakumda çok temiz yüzeyli metallerin birbirleri üzerinde kaydırılması sırasında sürtünme katsayısı $\mu > 1.0$ değerindedir. Çok hafif yüklü bir rulmanda ise $\mu = 0.001$ değerindedir. Birçok malzemenin havada birbiri üzerinde kayması durumunda sürtünme katsayısı ($0.1 < \mu < 1.0$) arasındaki değerlerde, yani daha dar bir aralıktaki değerlerdedir [43].

3.3. Aşınma

Birbirine göre bağıl hareket yapan ve aynı zamanda temasta olan iki yüzeyden küçük parçacıklar kalkar. Kalkan bu parçacıkların gitmesi ile aşınma meydana gelir. Mühendislik malzemelerinin ve makine elemanlarının ömürlerine bu aşınmanın büyük etkisi vardır. DIN 50320'de aşınma cisimlerin yüzeylerinden mekanik etkenlerle mikro taneciklerin koparak ayrılması nedeni ile istenmeyen bir değişikliğin meydana gelmesidir şeklinde tarif edilir [46].

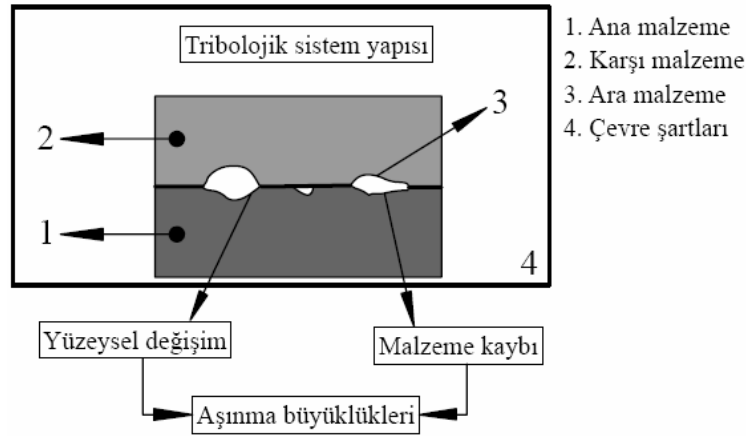
Aşınma mekanik, kimyasal veya elektro-kimyasal etkenlerin tribo-sistem içinde etkileşimleri ile meydana gelir. Aşınma iş sertleşmesi, oksitlenme, metal transferi, faz değişikliği, yağ ve kir filmleri gibi çok sayıda olaya bağlıdır. Pek çok malzeme çiftinin sürtünme katsayısı 0.1 ile 1 (μ) arasında değiştiği halde aşınma hızları çok farklı değerlerde olmaktadır. Mühendislik malzemelerindeki yıpranmanın aşınma sayılması için ;

- a) Mekanik bir etkinin olması,
- b) Sürtünmenin olması,
- c) Yavaş fakat devamlı olması,
- d) Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- e) İsteğimiz dışında meydana gelmesi gerekir.

Bu şartlardan biri sağlanmıyorsa meydana gelen yıpranma aşınma değildir [47].

Tribolojik sistem, karşılıklı etkileşen elemanlarda hız, ısı şartlar ve yükün etkisi ile sonuçlanan aşınma olayını inceler. Tribolojik sistemi, Şekil 3.4.'de görüldüğü gibi :

- ana malzeme (aşınan)
- karşı malzeme (aşındıran)
- ara malzeme
- yük, hareket (çevre şartları) elemanlarından meydana gelir [43,48,49].



Şekil 3.4. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi [36,43].

Aşınmanın incelendiği eleman esas sürtünme elemanıdır. Karşı eleman katı, sıvı veya gaz halinde olabilir. Eğer ortam vakumlu ise iyi temizlenmeyen yüzeylerde yağlayıcı özellik gösteren ara maddeler olabilir. Bu haldeki sürtünmeye teknik kuru sürtünme denir. Vakumsuz ortamda ise çevre devreye girer ve sistem elemanları sayısı üç tanedir. Eğer yağlama da var ise eleman sayısı dördür [42].

3.3.1. Aşınmanın temel unsurları

Aşınmanın başlaması ve devam etmesi için sürtünmenin olması gerekir. Sürtünen iki yüzeyin temas alanına mekanik etkileşim alanı denir. Bu alanın aşınmaya etkisi büyüktür. Yüzeylerin gerçek temas alanı görünen temas alanından çok küçüktür. Çok hassas işlenen yüzeylerde dahi yüzeylerde pürüzler bulunur. Yüzeylerin etkileşimi bu pürüzlerde olur. Pürüzler arası girintilerde ise etkileşim yoktur ve temas alanı dışında kalır. Yüklemin şekli ve değeri temas alanını, dolayısıyla aşınmayı etkileyen iki

önemli faktördür. Yükün değeri arttıkça gerçek temas alanı artar. İki cisim birbirine göre kayma, yuvarlanma ve kaymalı-yuvarlanma hareketi veya çarpma hareketi yapabilir. Hareketin yönü ve hareketin miktarı aşınma miktarına ve aşınma cinsine tesir eder. Ayrıca sıcaklığın da aşınma üzerinde büyük etkisi vardır [52].

3.3.2. Aşınma mekanizmaları

Bir tribolojik sistemin elemanları arasındaki karşılıklı zorlamalar neticesinde meydana gelen aşınmanın değişik türleri ve bundan dolayı da farklı sınıflandırılmaları gerekmektedir [43,49]. Aşınma yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürünün yüzey bitirme işlemi ve sertlik gibi özelliklerin değiştirilmesinden etkilenmektedir [36]. Genelde üç tür aşınma vardır. Bunlar: adhesiv, abrasiv ve tribo oksidasyon aşınma olarak bilinen erozif aşınma türleridir [51]. Bunlardan başka fretaj aşınması ve yorulma aşınması da aşınma türü olarak söylenebilir [42].

Evrensel bir aşınma türü olmadığı için, aşınmayı test edecek makine ve metot yoktur. Laboratuvar testleri, servis şartlarını taklit etmeyi amaçlar [52].

3.3.2.1. Yapışkan aşınma (Adhesiv)

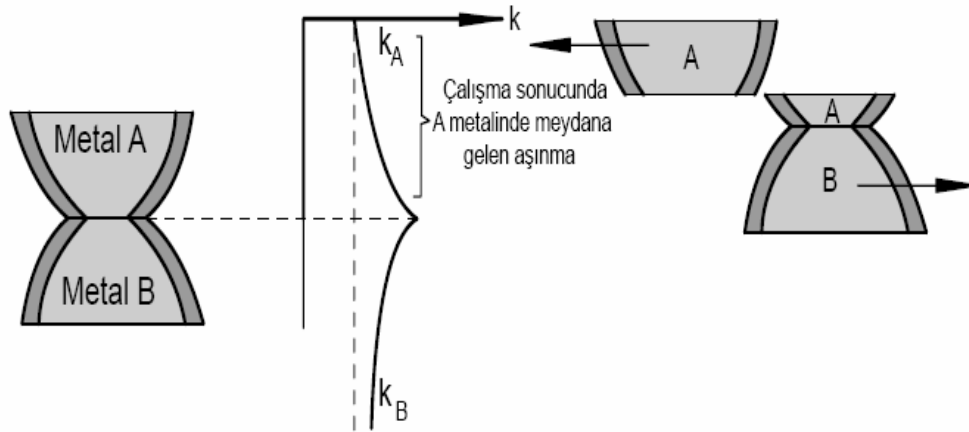
Yapışma aşınma olarak ta bilinen adhesiv aşınma en yaygın olarak rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle adhesiv aşınma hasarlarının hazırlayıcı etkisi bulunmaz [36].

Bu aşınma çok düşük hızlarda da meydana gelmekte olup, uygulamada daha çok yüksek hız ve yüklerde görülen bir aşınma tipidir. Temasta olan yüzeyler birbirlerini pürüzlü noktalarda etkilerler. Gerçek temas alanı çok küçük olduğundan yüzeylere uygulanan yükün etkisi ile temas eden yüzeylerde temas artar. Temastaki pürüzler basıncı taşıyamayacak duruma geldiğinde akma sınırı aşılar ve plastik deformasyon meydana gelir [53].

Eğer malzemenin plastik olma kabiliyeti yüksek ise mikro adhezyon alanları hızlı bir şekilde temas yüzeyine tamamen yayılır. Malzeme molekülleri birbiri ile temasa

geçerek temas noktalarında kaynak bağları meydana gelir. Yatay bir kuvvet ile yüzeyler birbirine göre hareket ettirilmek istenirse kaynak olan noktalar kesilebilir. Eğer kesilme tam ara yüzeyde gerçekleşir ise aşınma meydana gelmez. Eğer kopma yüzeylerden birinde gerçekleşir ise diğer yüzeye malzeme transferi olur. Sürtünmenin devam etmesi halinde transfer olan malzeme kopmak sureti ile aşınma ürününü meydana getirir [38,42].

Şekil 3.5'de görüldüğü gibi A ve B atomları arasındaki yapışma yeteri kadar iyi ise, yumuşak olan A metalinden kopan parçacıklar taşınacaktır. Eğer, A ve B malzemeleri aynı ise, aşınma her iki yüzeyde de meydana gelecektir. Tablo 3.1.'de metallerin yapışmasını (adhezyonu) etkileyen faktörler gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Adhesiv aşınma [37].

Tablo 3.1. Metallerin yapışmasını etkileyen faktörler [36].

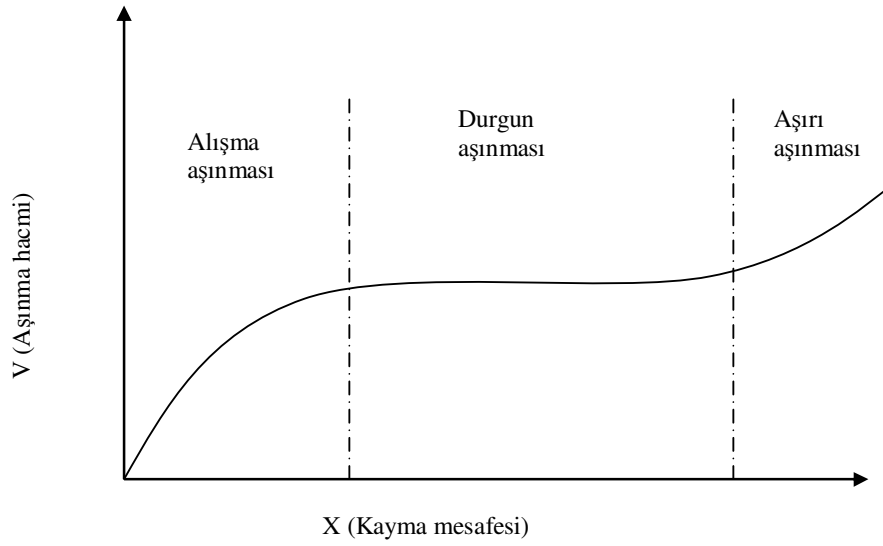
Özellik	Tür ve Büyüklük	Adhezyon Katsayısı
1. Yüzeğe yardımcı bir madde sürme	Yüksek	Düşük
2. Kristal sistemi	Kübik	Yüksek
	Hegzegonal	Düşük
3. Deformasyon sertleşmesi katsayısı	Yüksek	Yüksek
4. Safılık	Yüksek	a
5. Sertlik	Yüksek	Düşük
6. Elastik Modül	Yüksek	Düşük
7. Ergime sıcaklığı	Yüksek	Düşük
8. Yeniden Kristalleşme sıcaklığı	Yüksek	Düşük
9. Atomik yarıçap	Düşük	Düşük
10. Yüzeğe enerjisi	Yüksek	b

a) Hegzahonal sıkı paket yapıda olan Zn metali üzerinde çalışılmıştır. Büyük oranlarda bir değişimin olmadığı görülmüştür. Aksine yüzeğe merkezli yapıda olan Cu üzerindeki çalışmalar büyük ölçüde etkinin var olduğunu göstermiştir.

b) Fiziko-kimyasal olarak yapılan araştırmalara bağlı olarak yüksek yüzeğe enerjisinin yüksek adhezyona sebep olacağı söylenmektedir. Mekanik açıdan yüksek yüzeğe enerjili malzemeler oldukça serttir ve düşük adhezyon katsayısına sahip malzemelerdir.

Alışma aşınması;

Şekil 3.6' de görüldüğü gibi üç aşınma bölgesinden meydana gelmektedir [42].



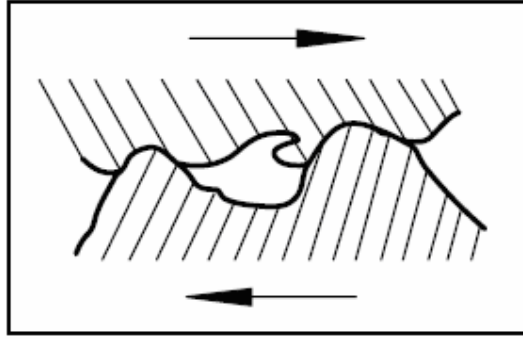
Şekil 3.6. Adhesiv aşınmada aşınma bölgeleri.

Yüzeyler hareket ettirildiğinde başlangıçta yüzeylerin teması sivri tepeliklerde olduğundan yüksek gerilmeler meydana gelir ve aşınma hızla artar. Sivri noktaların düzleşmesi ile ve kopan partiküllerin yağlar tarafından uzaklaştırılması ile yüzey teması çok geniş bir alana yayılır. Dolayısıyla gerilme düşer ve aşınma miktarı azalır. Aşınmanın başlangıcına alışma aşınması (rodaj) denir. Bu aşınma halinde yüklerin yüksek olması tehlikelidir. Tüm yağlamak sistemlerde alışma aşınması uygun şartlarda gerçekleşir ise faydalıdır. Alışma aşınması ile aşınma miktarı atılarak yüzeyler düzgünleşir. Dolayısıyla temas alanı artarak yük düşer. İkinci bölgedeki aşınmaya durgun aşınma denir ve uzun süre önemli bir aşınma meydana gelmez. Tezgah ve makinelerin ömrünü bu aşınma tayin eder. Durgun aşınma sonunda aşırı aşınma meydana gelir. Bu aşınma durumunda malzeme çiftleri birbirine tamamen yapışabilir [34].

3.3.2.2. Kazıma aşınma (Abrasiv)

Sürtünen iki yüzey arasına dışarıdan giren ya da iki yüzey arasında oksitlenmeden dolayı meydana gelen daha sen bir maddenin yüzeylerde yaptığı hasar olarak tanımlanır. Bu sert maddeler, yüzeylerde taşlama işleminde olduğu gibi bir malzemeden parça kopartılması olayı ile benzer işlem gösterirler [37].

Yüzeyle baskı kuvveti uygulandığı zaman sert yüzey üzerindeki asperitiler yumuşak yüzeye gömülür Dolayısıyla yüzeyleri hareket ettirmek için bir kuvvet uygulandığı zaman asperitiler yumuşak yüzeyi kazırlar. Aşınma yumuşak ve sert iki yüzey arasında olduğu gibi sert taneciklerin yüzey üzerinde akması ile de gerçekleşir. Şekil 3.7.'de tipik bir abrasiv aşınma görülmektedir. Üç cisimli aşınmada yüzeyler arasındaki sert tanecikler tam bir kayma hareketi yapmaz, bazen de yuvarlanırlar. Bu nedenle aşınma daha yavaş olur. Metalin (aşınan malzeme) sertliği (H_m) ve aşındırıcının sertliği (H_a) olmak üzere H_m/H_a bir kriter olarak kullanılır. $H_m/H_a < 0.8$ ise metalde çok aşırı kazıma aşınması meydana gelir. Talaşlı imalatta işlenen durum budur. $H_m/H_a > 0.8$ ise kazıma aşınması düşüktür. $H_m/H_a \geq 1$ ise metalde kazıma aşınması meydana gelmediği kabul edilir [54].

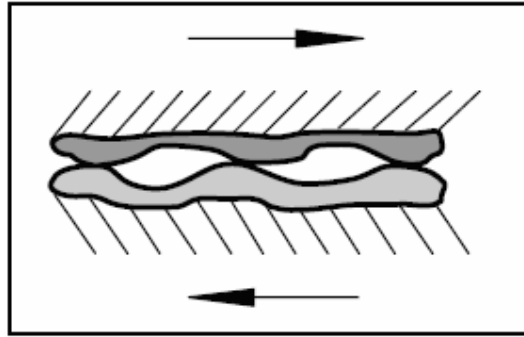


Şekil 3.7. Abrasiv aşınma.

Kayma ve abrasiv aşınma arasındaki fark çok belirgin değildir. Her ikisi de temiz yüzeylerde partikül (talaş) oluşmadan önce, meydana gelen deformasyona bağlı olarak bir aşınma alanı halkasının parçalarıdır [55]. Kayma aşınmasının ilerlemesine bağlı olarak abrasiv duruma göre değişik bir aşınma boyutuna geçebilir. Örneğin. Kaymanın ilk aşamalarında oluşan partiküller her iki kayma bileşenini de aşındırabilir. Sert partiküllerin boyutunun kritik bir değerin altına düşmesine göre abrasiv aşınmadan kayma aşınmasına bir geçiş olduğu belirtilmiştir [56].

3.3.2.3. Erozyon aşınma (Erozif) veya tribo oksidasyon

Temas yüzeylerinden en az birinin çalışma ortamında korozyon'a uğraması ve izafi hareket sebebiyle meydana gelen korozyon tabakasının silinerek alınması ve bunun devamlı olarak tekrarı ile meydana gelen aşınmadır. Sert olan ve koparak sürtünme yüzeyleri arasına giren parçacıklar abrasiv bir tesir yaparak aşınmayı artırıcı rol oynarlar [38]. Şekil 3.8.'de tribo oksidasyon aşınma görülmektedir.



Şekil 3.8. Tribo oksidasyon aşınması (38).

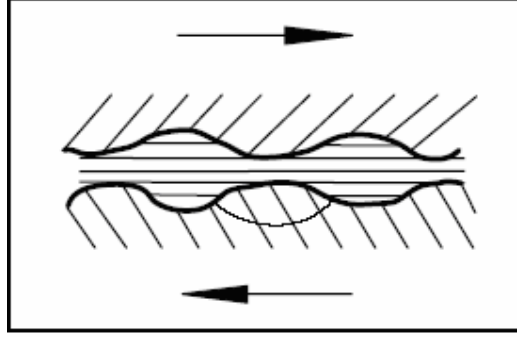
Katı tanecik erozyonunda: katı bir cisim bir yüzeye dik olarak çarparsa ikinci yüzeyde plastik deformasyon veya kırılma meydana gelir. Çarpılan yüzey sünek ve çarpan cisim çok sert ise yüzeyde çukur oluşur. Malzeme kaybı meydana gelmeyebilir. Darbeler devam ettiği takdirde yorulmadan dolayı malzeme kaybı başlar. Erozyon aşınması tanecik darbe hızı arttıkça aşınmada lineer bir değişim gösterir. Sıvı tanecik erozyonunda ise; basınçlı sıvı jetleri katı cisim gibi davranır. Sıvı jetleri yüzeye çarptığı zaman ses dalgaları oluşur ve bunlar çekme-basma şeklinde yüzeyde yayılır. Sonuçta yüzeylerde plastik deformasyon ve pürüzler oluşur [46].

3.3.2.4. Yorulma aşınması

Temas yüzeylerinde oluşan küçük çukurcuklar halinde kendini gösterir. Genellikle dişli çarklar, kamlar, rulmanlar gibi makine elemanlarında yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde oluşur ve zamanla yorulma sonucu zararlı hale gelirler [7]. Bu elastik ve plastik olayların devam etmesi sonucu mikro çatlaklar oluşur çatlak

büyümesi olur ve aşınma parçacıkları kopar. Burada harcanan enerji, malzemede belirli ölçüde tahribat yapar. Mesela, fazla zorlanan balata malzemelerindeki sürtünme ısını almak için endotermik işlem kullanımı (balata soğutma işlemi) gereklidir [35].

Şekil 3.9'da yorulma aşınması görülmektedir.



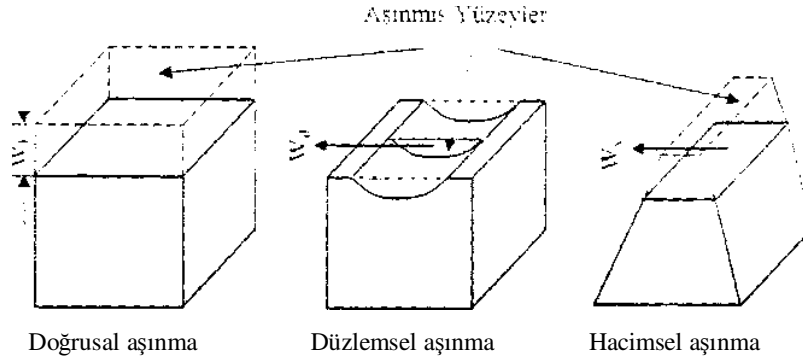
Şekil 3.9. Yorulma aşınması.

3.3.2.5. Fretaj aşınması

Küçük genlikli izafi hareket yapan iki yüzey arasında meydana gelen aşınmadır. İzafi hareket gel-git şeklinde olup genliği 20-400 μm olmalıdır. Fretaj aşınma kaybı çok azdır. Fakat yorulma çatlaklarının başlangıç yerlerini oluşturur. Hareket etmeyen makinelerde (kamyon ile taşınan otomobil), bilyeli yataklarda titreşim var ise fretaj meydana gelir. Titreşim çok sert kuvvetler oluşturursa yüzeylerden birinde izler meydana gelir [47].

3.4. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri

Malzeme kaybı olarak tanımlanan aşınmanın ölçümü, temas eden parçalardan birinde veya her ikisindeki hacim veya ağırlık kaybı esas alınarak yapılır. Aşınma doğrudan veya dolaylı ölçümlerle verilebilir. Aşınma deneyinde kullanılan deney sistemine bağlı olarak şekil 3.10'da doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınma söz konusudur [43].



Şekil 3.10. Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi [43].

Endüstride kullanılan alet ve ekipmanlarda aranan özelliklerden biri de servis ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyeti artırdığı gibi, onarım için geçen sürede üretimin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışılır. Bu model, basit geometrik şekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilir [36].

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür.

- a) Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin adhesiv (metal-metal) aşınmanın değerlerinin ölçüldüğü deneylerdir.
- b) Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma deneylerinin ölçüldüğü deneyler.

ASLE (American Society of Lubrication Engineers, 1976) tarafından yüz kadar deney sistemi belirtilmiştir. Ölçüm yöntemlerinden; ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişim ve radyo izotop metotları aşağıda sırayla açıklanmıştır.

3.4.1. Ağırlık farkı metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçümü için

numunenin yerinden çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınmaması, bu yöntemin dezavantajıdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} gr, hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı, (gr / km), (mg / m) ile ifade gibi bir birim alan için hesap edilecekse, hacimsel aşınma miktarı olarak belirtmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle, kullanılan malzemenin yoğunluğu ve dene} numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek de bulunabilir. Bu tanımlara göre, en çok kullanılan ağırlık kaybı ölçme metodunda kullanılan bağıntı şudur [36].

$$W_a = \frac{\Delta G}{d \cdot M \cdot S} \quad (\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$$

Burada:

W_a = aşınma oranı ($\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$),

ΔG = ağırlık kaybı (mg),

S = kayma mesafesi (m),

M = yükleme ağırlığı (N),

d = aşınan malzemenin yoğunluğu (gr / cm^3),

olarak verilmiştir. Aşınma oranının (W_a) ters değeri de aşınma direnci (W_r) olarak gösterilir. $W_r = \frac{1}{W_a}$ ($\text{N} \cdot \text{m} / \text{mm}^3$)

W_a

3.4.2. Kalınlık farkı metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeri ile karşılaştırması suretiyle elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımı ile $\pm \mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülmelidir [36].

3.4.3. İz değişimi metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile, geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (Çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet vickers veya brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas pramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutundaki değişme mikroskop vasıtasıyla Ölçülerek belirlenir [36].

3.4.4. Radyoizotop metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya α -parçacıklarıyla bombardıman edilerek, radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi yöntemin avantajıdır. Fakat ekonomik olmaması nedeni ile ancak özel amaçlarda kullanılabilir. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metod değildir [36].

BÖLÜM 4. SÜRTÜNME ÇİFTLERİ VE BALATALAR

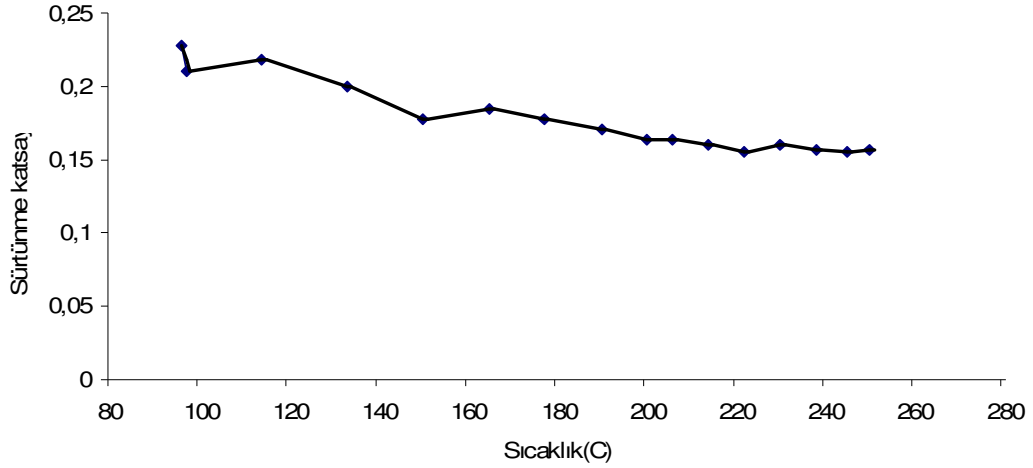
4.1. Sürtünme Malzemeleri

Sinterlenmiş sürtünme malzemeleri mühendislikte yaygın olarak kullanılır. Bunlar ya sürtünme hareketinin iletimi, ya da frenleme ve yavaşlatma için kullanılır [9,45].

Sürtünme malzemelerinin kullanım sebepleri özellikle sürtünme katsayılarının yüksek ve kayma özelliklerinin iyi olmasındandır. Ancak sürtünme malzemelerinin fonksiyonlarını beklendiği gibi yapabilmeleri için, yalnız sürtünme katsayısının yüksek olması yetmez. Çok defa sürtünme katsayısının yüksek olmasından ziyade zorlanmalar altında ve özellikle yüksek sıcaklıklarda mümkün olduğu kadar sabit bir değeri muhafaza etmesi ve az bir dağılma göstermesi esas özelliği teşkil eder. Bundan başka aşınma miktarının az olması, karşı malzemenin çizilip hasara uğratılmaması, mekanik mukavemetin de maruz kalınan zorlamalara dayanabilecek değerde olması gerekir [2,38].

Türk standartlarında (TS). sürtünme malzemeleri (balatalar) için üç değişik standart hazırlanmıştır. TS 864 nolu standart debriyaj balataları için. TS 925 sürtünme kaplamaları adı altında, debriyaj balataları için kaplama malzemelerini sınıflandırmakta, TS 555 ise taşıtların fren balatalarını sınıflandırmaya yöneliktir [57]. Bilindiği gibi sürtünme esnasında yüzeylerin pürüzlülüğü ve enerji absorpsiyonu sonucu meydana gelen sıcaklık, sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkiler, ısınan malzeme de sürtünme katsayısının düşmesine neden olur ve sistem görev yapamaz hale gelir.

Şekil 4.1. sıcaklığın kum balata üzerindeki etkisini göstermektedir. Fren sırasında sıcaklık artmakta ve sürtünme katsayısı düşmektedir [58].



Şekil 4.1. Kuru balatada sıcaklığın dinamik sürtünme katsayısına etkisi[58].

Metal esaslı sürtünme malzemelerinin (balataların) aşınma dayanımı ve yüksek ısı dayanımı. organik esaslı sürtünme malzemelerine (balatalarına) göre daha yüksektir. Hatta daha yüksek enerji absorbe edebilme kapasitesine sahiptir. Örneğin bazı boyutlardaki kavrama ve frenler için daha çok enerji absorbe edebilirler [59].

Sinterlenmiş sürtünme malzemeleri uygulama alanlarına göre kuru ve ıslak olmak üzere ikiye ayrılabilirler [35,36].

Islak şartlarda, güç değişimleri ve otomatik iletimleri sağlayan kavramalar şeklindeki sürtünme elemanları yağ içine daldırılır. Kum şartlar altındaki sürtünme elemanları ise, (uçak frenleri ve standart kavramalar şeklindeki sürtünme elemanları) yağsız olarak direk kontak halindedir [59]. Islak balatalarda Tablo 4.1’de görüldüğü gibi ana madde bakır, kuru balatalarda ise, daha az bakır ve daha fazla demir kullanılır [9].

Tablo 4.1. Tipik ıslak ve kuru balata bileşimleri.

	Cu	Fe	Pb	Sn	Zn	SiO ₂	Grafit
Islak	65-75	-	2-5	2-5	5-8	2-5	10-20
Kuru	10-15	50-60	2-4	2-4	-	8-10	10-15

Fren balatalarında kullanılan sinter malzemeleri ayrıca bakır (bronz) asıllı ve demir asıllı olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Çoğunlukla performansı geliştirmek için organik ilavesi ile katı durum sinterlemesi olur. Bu durum istenen çok yüksek güçler için geliştirilmiştir. Örneğin, sinterlenmiş bronz ve mullit balatalar yarış arabalarında kullanılır. Grafit ile sinterlenmiş demir ağır iş makinelerinde, hem disk hem de kampana fren balataları için kullanılır [60].

Bu gruplar da ayrıca karışimsız, grafit karışımlı, seramik karışımlı olmak üzere aralarında sınıflandırılabilir. Genellikle seramik karışımlı malzemeler, daha yüksek sıcaklıklarda yumuşarlar, fakat ısı iletkenlikleri biraz daha azdır. Büyük uçaklarda demir asıllı veya özel balata alaşımları tercih edilir. Çünkü bronz asıllı malzemelerin 850 °C civarında yumuşamalarına karşılık, demir asıllılar 1100 °C'nin üzerine çıkabilirler [9]. Sürtünme malzemelerini (balataları) dört başlık altında toplamak mümkündür.

4.1.1. Polimer bağlı asbest esaslı malzemeler

Asbest esaslı malzemelerin kullanımı, hareketli sistemden ısı formunda enerji dağıtım problemlerinde ilk önemli ilerlemeyi temsil etmiştir. Gelişme, asbestin dayanımını ya da sürtünme özelliklerini artıran geliştirilmiş reçinelerle ilerlemiştir [4].

Asbest çeşitlerinin kimyasal bileşimi ve yapısı ayrı ayrıdır. Bunlardan tanınmış olanları, chrysotil, antophyllit, tremolit, actinolit ve krokydolittir. Bunlar çeşitli renklindedirler. İlk yapılan balatalar, örülmüş asbest malzemelerden olup asfalt ve reçine emdirilmişlerdir. Balatanın sürtünme katsayısı kullanılan asbest miktarına, ona karıştırılan dolgu maddelerine ve bağlayıcı maddelere bağlıdır. Balatanın ana maddesi, asbest ; prinç, çinko veya demir olmayan bir maddeden yapılmış ve tel örgü ile donatılmıştır. Prinç ve çinko tellerin kullanılması ile balataların sürtünme katsayıları her durumda sabit olan bir özellik gösterir duruma sokulmuştur [61].

Klasik üretim tarzı olarak kısa lifli asbest, diğer gerekli maddelerle karıştırılmakta, soğuk olarak preslenmekte ve ayrıca sıcak sıkıştırma yapılmaktadır. Normal şartlarda üretim sonrası 150 ila 250 °C sıcaklıklar arasında, sürtünme özelliklerini ve form

dayanımını iyileştirmek için, sertleştirme (özel kalitelere 24 saate kadar) yapılır. Bu işlem yapılmadığında, kullanım esnasında parçalanma meydana gelir [35].

4.1.2. Yağda çalışan balata malzemeleri

Yağ altında çalışan sürtünme kavramaları, giderek artan oranda kullanılmaktadır. Bunların sürtünme özellikleri, malzemenin bileşimi dışında gözeneğine, sürtünme yüzeyinin pürüzlülüğüne ve yağın kalitesine yakından bağlıdır. Kavrama olayında karışık sürtünmeye ulaşabilmek için, yağ filminin çok çabuk yırtılması gerekir. Bunun için, balata malzemesinin yapısı dışında, kanal, çıkıntı, sinüsoidal formda oyuklar açılması mümkündür [62].

Ayrıca yağ akışını sağlayacak ve teşekkül edecek ısının % 50 ila 70'ini yağla dışarı atacak soğutma kanalları yapılabilir. Yağda çalışan aşınma malzemeleri; çelik plakeler, kağıt malzemeler, asbest esaslı polimer bağlantılı malzemeler ve bakır esaslı siner malzemeler diye ayırmak mümkündür. Yağda çalışan balata malzemeleri yumuşak olması nedeni ile daha çok otomatik vitesli otomobillerde debriyaj balatası olarak kullanılırlar. Sürtünme katsayıları 0,002 ila 0,008 arasındadır ve çalışma sıcaklığı 120 °C'yi aşarsa aşınma hızla yükselir [35].

Yağda çalışmanın en büyük avantajı, malzemedeki çizilmeleri önlemesidir. Mesela: küçük soğuk kaynak alanlarını sert partiküller aşındırırken, katı yağlamaların uygulamaları çizilme eğilimini azaltacaktır [3].

4.1.3. Sinterlenmiş sürtünme malzemeleri

Organik esaslı sürtünme malzemelerinin kullanılmaları, dayanabilecekleri maksimum sıcaklık ile sınırlıdır. 400-450 °C de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sebebi ile organik maddeleri ihtiva eden (asbest vb.) yapı bozulmaya ve çok çabuk aşınmaya başlar. Özellikle sürtünme katsayısının değeri çok küçük değerlere düşer. Bu yüzden sinterlenmiş balatalara ihtiyaç duyulmaktadır [38].

Metalik balataların diğerlerine olan avantajları, daha büyük hızda enerji absorbe etmeleri ve daha fazla aşınma mukavemetine sahip olmalarıdır. Bunlar daha yüksek sıcaklıklara dayanabildikleri gibi, daha fazla ısı iletirler. Sürtünme katsayıları, sıcaklık ve basınçla daha az değişir ve sıcak, soğuk, yağ, tuzlu su gibi etkenlerden daha az etkilenirler [9].

Fren balatalarında kullanılan sinter malzemeleri genellikle bakır-kalay (bronz) asıllı ve demir asıllı olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir [45,59]. Bu gruplarda ayrıca karışimsız, grafit karışımı ve seramik karışımı olmak üzere aralarında sınıflandırılabilirler [2,9].

4.1.3.1. Bakır esaslı balata malzemeleri

Bakır esaslı malzemeler genellikle sıvı veya yarı sıvı sürtünmenin olduğu yerlerde kullanılır. Kuru sürtünmede ise ancak ısı etkisinin daha hafif olduğu yerlerde kullanılır [35,45].

Servis sıcaklığının 1000 °C den yüksek olduğu yerlerde demir matrikslerin kullanılmasına rağmen, yüksek sürtünme şartlarında yaygın olarak kullanılan malzemeler bakır ve bronzdur [3]. Tablo 4.2' de bazı ülkelerde kullanılan kuru ve yağlı sürtünme için bronz esaslı malzemelerinin bileşimleri görülmektedir [35].

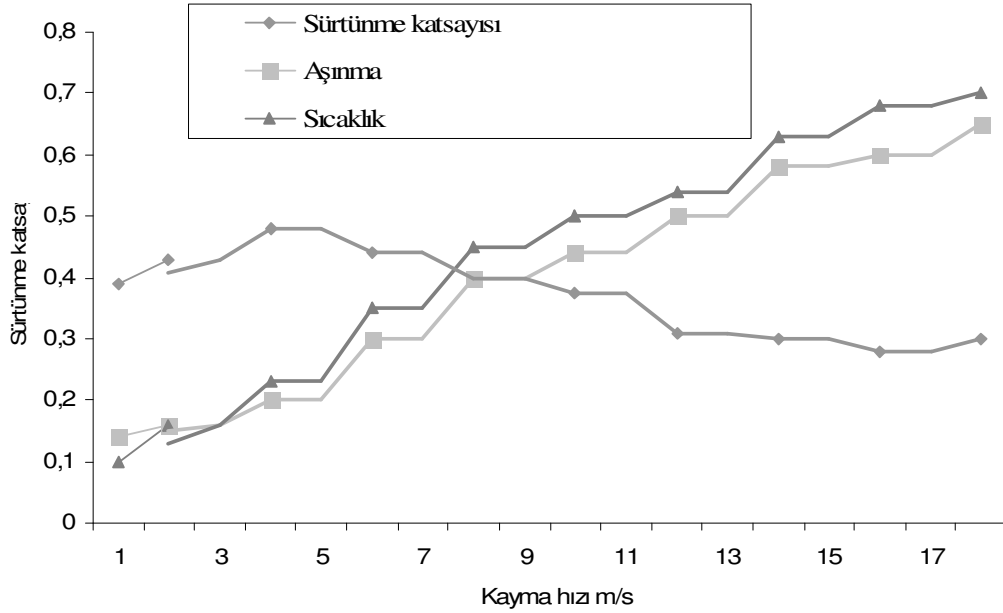
Tablo 4.2 Bazı ülkelerde kullanılan kuru ve yağlı sürtünme için bronz esaslı malzemelerinin bileşimleri [35].

Ülke	Fe %	Cu %	Sn %	Grafit %	Pb %	SiO ₂ %	MoS ₂ %	Diğer %
A.B.D.	5-10	60-75	4-10	3-10	7,5	2-7	3-12	
Almanya	7,9	67,8	5,2	6,5	1,8	3,3	<4	%3Al ₂ O ₃
Avustralya	8	68	5	6,2	1,5	2,5	<3	%3Al ₂ O ₃
B.D.T.	4-7	65-80	7-9	3-8	5-10	2-4		
İngilere	5-10	Kalan	3-10	0,8	1-10	1,5-5	<4	
İsveç	4,5	68,5	8	6	3	4	6	
İtalya	7	68	5,5	6	9	45		

Bakır esaslı (bronz) balata imali için bronz madenininde elde edilmesinde, bakır-çinko alaşımı oranı 9:1 olarak alınmaktadır. Bazı durumlarda çinkonun yerini kalay almakla beraber, bu sürtünme katsayısına hiçte iyi tesir etmez. Sinter bronz balataların imalinde, kayma özelliğini verecek olan grafit tozu, molibden-sülfid, kalay, bismut ve sürtünme özelliğini meydana getirecek olan silisyum, demir tozu ve korund tozu gibi dolgu maddeler; kullanılmaktadır [61]. Tablo 4.3' te bronz esaslı balata malzemelerinin kullanım ve özellikleri ve Şekil 4.2'de ise %17 grafit, %5 kursun, %5 mullit, %5 kalay ve % 63 bakır içeren malzemenin sürtünme ve aşınma özellikleri görülmektedir.

Tablo 4.3. Bronz esaslı sinter balata malzemelerin kullanım karakteristikleri ve özellikleri [35].

Kullanım şartları	Baskı basıncı $p \leq 5$ MPa Kayma hızı $v \leq 40$ m / s $p \cdot v \leq 1,5$ kW / cm ²
Sürtünme katsayısı μ	0,15 0,50
Aşınma	$P \cdot v = 0,8 \dots 1,0$ kW / cm ² olan orta yüklerde, 0,5 cm ² / kWh
Sıcaklığa dayanıklılık	Sürekli çalışmada max. 450 °C Kısa süreli çalışmada max. 650 °C
Özgül ağırlık	5 ... 7 gr. / cm ³
Isı iletme kabiliyeti	6 ... 35 W / m.k
Sertlik	10 ... 50 BSD



Şekil 4.2. Sinterlenmiş bronz-grafit balata malzemesinin sürtünme ve aşınma özelliği [35].

Aşınma miktarı, kayma hızı ve sıcaklığın fonksiyonu olarak değişir. Ayrıca kullanım için bir fikir vermek üzere Örnek olarak alınabilir. Bu arşısında dökme demir, alaşımsız ve düşük alaşımlı ıslah çelikleri sinterlenmiş malzemenin avantajları literatürde geniş olarak yer fakat avantajları yanında dezavantajları da vardır (39).

4.1.3.2. Demir esaslı balata malzemeleri

Sinter demir balataları, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya karşı dayanıklı olup. sadece eğilmeye karşı dayanıklı değildirler. Bu problemi ortadan kaldırmak için sinter demir balatalar, bir sac levha üzerinde sinterlenerek kullanılırlar. Sinter demir balataların ısıyı çok iyi iletme özelliklerinden dolayı yüksek sürtünme sıcaklıklarının meydana geldiği yerlerde kullanılmaktadırlar. Sinter demir balataların bu ısıyı iletme özelliği, balatanın soğuk kalmasını temin etmekte ve bu durum balatanın ömrünü artırır. Sinter demir balataları, yüksek sıcaklıklarda perlit bünyenin meydana gelmesi ile iyi bir sürtünme özelliği sağlar. Fakat aşırı yüksek sıcaklıklar, madeni toz taneciklerinin yanması ve kömürleşmesi ile arzu edilmeyen bir sert sementit bünye meydana getirebilir [61].

Demir esaslı balata malzemeleri, özellikle kuru çalışan kavramalarda tercih edilir. Bronz esaslı malzemelere göre daha ucuzdur. Belirli kullanım alanları için, değişik bileşimlerde imal edilirler. Tablo 4.4’de bazı ülkelerde kullanılan kuru sürtünme için demir esaslı malzemelerin bileşimleri görülmektedir.

Tablo 4.4. Kuru sürtünme için demir esaslı malzemeler ve bileşimleri [35].

Ülke	Fe	Cu	Sn	Grafit	Pb	SiO ₂	MoS ₂	Diğer
A.B.D.	60	-	5	15	-	-	-	%3Bi,%14Mullit
	67,5	-	-		-	-	-	%5Si,%7,5Bi,%20Mullit
	60-77	-	-	20-30	-	-	-	%3-10 Bi
	80	-	-	4	2	-	2	%3 Al ₂ O ₃
Almanya	70-90	16	-	15-20	<5	-	-	Max. %0,8 P
B.D.T.	60-72	<15	-	9	<13	3	-	BaSO ₄ , %Asbest
İtalya	62	16	-	13,4	8	0,6	-	-

Sürtünme olayı esnasında şekillenmeyle, yapı elemanları ve atmosfer arasında değişik etkiler meydana gelerek, sürtünme çiftlerinin yüzeyinde metal elemanlar oksit karbür ve grafitten oluşan karmaşık yapılı bir tabaka oluşur ve böylece aşınma direnci önemli ölçüde yükselebilir. Bundan dolayı malzemenin bileşimi öyle seçilmelidir ki, karmaşık tabaka geniş zorlanma sahasında dayanıklı olsun [35].

Tablo 4.5. Demir esas balata malzemelerinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri[35].

Kullanım şartları	Baskı basıncı $p \leq 6$ MPa Kayma hızı $v \leq 60$ m / s $p \cdot v \leq 3$ kW / cm ²
Sürtünme katsayısı (μ)	0,25 0,65
Aşınma	$P \cdot v = 1,5 \dots 2,0$ kW / cm ² olan orta yüklerde, 0,5 cm ² / kWh
Sıcaklığa dayanıklılık	Sürekli çalışmada max. 660 °C Kısa süreli çalışmada max. 880 °C
Özgül ağırlık	5 ... 7 gr. / cm ³
Isı iletme kabiliyeti	1,2 ... 35 W / m.k
Sertlik	15 ... 40 BSD

Son yıllarda yabancı literatürde çok az bilgi bulunmakta, üretim metotları veya kompozisyonları hakkında bilgi vermeden sinterlenmiş demir asıllı sürtünme malzemelerini geliştirme amacıyla araştırmalar yapılmıştır. Genel olarak demir-grafit kompozisyonları % 50 üzerinde grafit içerir. Sonuç olarak bu malzemelerin avantajları hakkında fazla bilgi edinilememiştir. Aynı zamanda, literatür verilerinden bilindiği gibi (Tablo 4.6) fosfor, metallerin ve demir esaslı alaşımların sürtünme özellikleri ve mekanik özellikleri üzerine olumlu etkiler sağlar [63].

Tablo 4.6. Sinterlenmiş demirin mekanik özelliklerine fosfor'un etkisi[48].

Fosfor % Ağırlık	Akma muk. kgf / mm ²	% Uzama	Brinel Sertlik (BSD)	Darbe muk. kgf / cm ²
0	13,14	6,7	30	0,28
0,4	33,3	14,7	76	0,5
0,8	56,9	18	146	0,1

Fosfor eklemek, demir tozunun sinterleme özelliğine oldukça iyi bir şekilde etki eder. Bu durum, demir tozunun oluşumuna göre, partiküllerin yüzeyinde görülür ve demir

tozu 1050 °C'de erir. Bu durum dökme demirlerin sürtünme özelliklerinde fosforun etkisi ile ilgili çalışmaların sonucudur [63].

4.1.3.3. Seramik katkı sinter balata malzemeleri

Daha yüksek güçler için, metalik olmayan katkı içeren metalik bağlantılı balata malzemeleri kullanılır. Metalik olanlar; bakır alaşımları, demir ve demir alaşımları, metalik olmayanlar ise; tercihen (SiO_2 , Al_2O_3 veya mullit) ve silikatlardır. İlave katkı olarak düşük sıcaklıkta ergiyen metaller, sülfür ve sülfat, karbür, grafit ve sinter metalik tozlar kullanılabilir. Metalik olmayan miktar, hacim olarak % 50 veya daha fazla olabilir. Metal seramik balata malzemelerinin sürtünme katsayısı 0.3-0.7 arasındadır. Bunlar 1000 °C sıcaklığa kadar kullanılabilirler. Yüksek miktarda metalik olmayan eleman içerdiklerinden dolayı kırılgandır ve çok az dayanıma sahiptirler. Bu nedenle, düz bir metal üzerine pres edilirler ve balata taşıyıcıya perçinle bağlanırlar [35].

4.2. Karşı Malzeme - Disk ve Kampana Malzemesi

Karşı malzemenin, sürtünme özellikleri ile verimli bir şekilde çalışabilmesi için. sistemin mekanik ve ısıl zorlamalarına karşı dayanıklı olması gerekir. Balata ve karşı malzemede (diskte) sürtünmeden dolayı kısa zamanda meydana gelen sıcaklık artışının, biran önce sistemden uzaklaştırılması istenir. Bunun için disk ve kampana malzemesinin yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması gerekmektedir.

Sürtünmeye bağlı sıcaklık artışı nedeni ile disk veya kampananın bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısıl genişleme katsayısının küçük olması istenir. Ayrıca fren esnasında kısa zamanda meydana gelen yüksek ısı miktarları, kampana veya disk tarafından alınıp iletilerek dışarıya verileceğinden, disk ve kampana malzemesinin yüksek ısı iletim kabiliyeti ve üst yüzeyin de yüksek radyasyon katsayısına sahip olması gerekir [38].

Genelde disk ve kampana imalinde perlitik dökme demir kullanılır. Dökme demir için % 3.40 dolaylarında karbon kullanılır ve bu dökme demirin senliği 170 - 255 HB (kg / mm^2) arasında değişir [7]. Diğer alaşım yüzdeleri ise: Tablo 4.7.'de görülmektedir.

Tablo 4.7. Disk ve kampana için kullanılan dökme demir analizi [7].

% Cu	% Si	% Mn	% S	% P (max)
3,40	2,00-2,40	0,60-0,90	0,15	2

Ol'shevski ve Larin'in çalışmalarına göre [35], dökme demirlere eklenen fosfor, (ağırlıkça) % 0,118 ve % 2,01 arasında bir değere yükseltirse, bu malzemenin sürtünme katsayısı yükselir. Fren sistemi üzerinde bu katsayının kararlılığı ve bunlara ilaveten aşınma dirençleri de düzelir. Sürtünen dökme demirlerin en iyi fosfor bileşeni Ol'shevskiye göre % 1.5-2 arasında. Larin'e göre ise % 1.4' tür.

4.3. T/M Yöntemi ile Demir ve Bronz Esaslı Fren Balataların Üretimi

Metalik bağlantılı balata malzemeleri, toz metalurjisi yöntemi ile üretilirler. Yapı elemanları çok farklı yoğunlukta olacaklarından, bu yöntemin tarzı ve ayrıca işlem sırası büyük önem taşır [35]. Metal tozlar genellikle atomizasyon yöntemi ile üretilirken, bronz esaslı tozlar elektroliz ve atomizasyon yöntemleriyle üretilirler [59].

Karıştırma işleminden önce tozların birbirine yapışmalarını önlemek için, tozlar bir fırça yardımı ile elekten geçirilir. Karıştırma olayını güçlendirmek için sık sık iç karıştırıcılar, çarpma düzeneklerinin ilavesi ile çifte-konili veya Y-konili karıştırıcılar ya da şerit tip karıştırıcılar şeklindeki geleneksel tipteki karıştırıcılarla karıştırma tamamlanır. Tozların özgül ağırlıkları birbirinden çok farklı olduklarından depolama esnasında karışımın segregasyonunu önlemek için ağırlığın % 0,5' i kadar hafif yağ ilave edilebilir. Bu yağ, karışımı oksitlenmeye karşı koruduğu gibi sinterleme safhasının hemen başlangıcında buharlaşarak karışımın özelliklerini değiştirmez, Toz karışımları, genellikle soğuk olarak 200 - 600 MPa basınçta mekanik preslerle preslenirler [35].

Balatanın çap ve yüzey paralelliğinin $\pm 0,02$ mm toleransında sağlanması gerekmektedir. Bu toleransı sağlamak için, pres piston yüzeylerinin hassas olarak ayarlanmasına, hassas takımlara ihtiyaç vardır. Sinterleme öncesinde balata malzemesi, henüz iç yapısında difüzyon yoluyla kuvvetli bir bağlama olamadığından oldukça

zayıftır [3,9]. Parçalar sinterlenmek üzere yapışmayı önleyici bir tutkalla kaplanarak üst üste dikey olarak dizilirler ve koruyucu gaz atmosferini muhafaza eden bir silindir içine yerleştirilerek, fırın silindirin üzerine indirilir. Sinterleme sıcaklığı bronz asıllı malzemeler için 700-850 °C, demir asıllı malzemeler için 900-1100 oC dir. Sinterleme süresi 4 ila 6 saat arasında değişir [3,4].

Bronz esaslı malzemelerin sinterlenmesi sırasında, kalay ve kurşun eriyerek sıvı bir faz meydana getirir. Kalay, bakır tarafından yavaş yavaş emilir. Metalik olmayan kalk; elemanları, sinterleme sırasında değişmeyip sadece matriks içerisine gömülürler. Demir asıllı malzemeler ise. yüksek sıcaklıkta grafit demir tanelerine nüfuz ederler [9].

Balata malzemelerinde sinterleme esnasında az da olsa meydana gelmesi mümkün olan deformasyonu (büzülme, çarpılma) sinterlemeden sonra gidermek ve balata yüzeylerinin paralelliğini istenilen toleransa getirebilmek amacıyla taşlama (yassılaştırma) işlemi yapılır [9].

Taşlamadan sonraki işlem temizlemedir. Bu işlem hem görünüm güzelliğini sağlar ve hem de varsa gevşek kısımları döker. Gerektiği taktirde iç gerilmeleri azaltmak için bir ısı işlem de yapılabilir [9].

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, otomotiv sektöründe kullanılan toz metalurjisi ile üretilmiş bronz esaslı fren balatalarının performanslarının incelenmesi amacı ile yapılmıştır. Çalışmada değişik oranlarda bulunan Grafit'in, değişik yüklerde balataların göstermiş performans ölçülmüştür.

5.1. Kullanılan Toz Malzemelerin ve Fren Balata Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmamızda; bronz balatalarda grafitin sürtünme katsayısına olan etkileri araştırılmıştır. Marmara Metal A.Ş.'den temin edilen ve yağlandırıcı özelliğiyle sürtünme katsayısının minimum derecede sabitlemeye çalışılmıştır. Balata malzemesi olarak Tablo 5.1 ve 2'de bileşimi verilen iki farklı yöntemle hazırlanmış metal tozlarının boyutları 2-40 μm ve 150 μm arasında değişmektedir. Her elementin tozunun Baran Makine A.Ş.'den ayrı ayrı temin edildiği toz kompozisyonu A grubu olarak adlandırılmıştır. Çalışmanın başlarında bu A grubu karışımlar kullanılmış daha sonra kurşun elementinin ayrı ilave edilmesinin sağlık açısından zararlı olabileceği düşünülerek kurşunun bakır- kalay- kurşun alaşımı bünyesinde olduğu Gürel Makine A.Ş.'den temin edilen B grubu tozları kullanılmıştır (Tablo 5.2).

Tablo 5.1. Bronz esaslı toz metal fren balata numunelerinin bileşimleri.

Numune ismi	Grafit Oranı,%	Ağırlık, %			
		Cu	Sn	Pb	Fe
A1	0	73,45	8,17	8,17	10,21
A2	2	72	8	8	10
A3	4	70,512	7,8432	7,8432	9,8016
A4	6	69,045	7,6798	7,6798	9,5974
A5	8	67,574	7,5164	7,5164	9,3932

Tablo 5.2. Ön alaşımlanmış (80-10-10) bronz tozlarına demir ve grafit ilavesi.

Numune ismi	% Grafit Oranı	% Ağırlık	
		Cu-Sn-Pb	Fe
B1	% 0	90	10
B2	% 2	88,2	9,8
B3	% 4	86,4	9,6
B4	% 6	84,6	9,4
B5	% 8	82,8	9,2

5.1.1. Tozların harmanlanması (Karıştırılması)

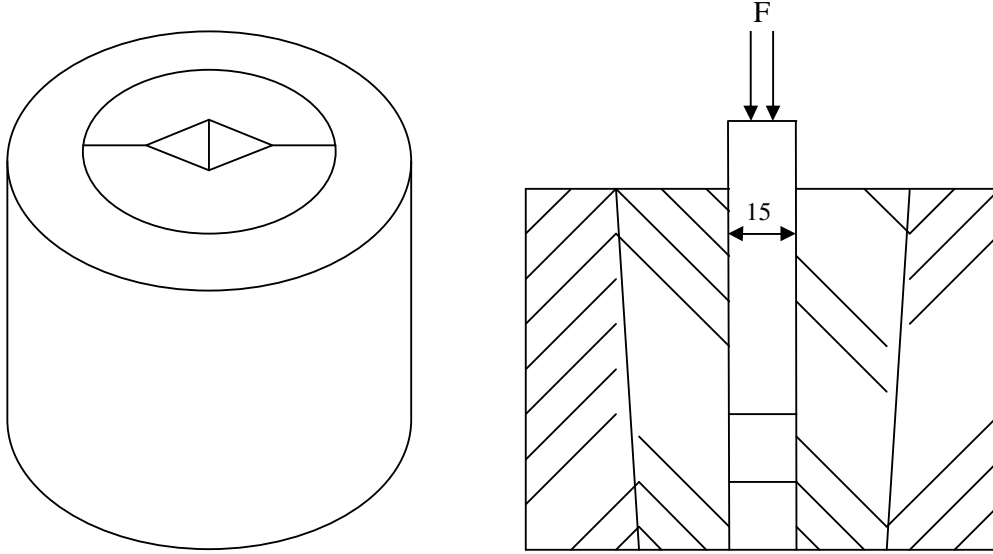
Bronz esaslı balata numunelerinin hazırlanmasında, Tablo 5.1. ve Tablo 5.2.'de bileşimi verilen 2-40 μm ve 150 μm boyutları arasındaki tozlar ile homojen bir karışım elde edebilmek için bilyalı döner değirmende 30 dakika karıştırılmışlardır.



Şekil 5.1. Bilyalı döner değirmen.

5.1.2. Presleme

Boyutları 15 x 15 x 9 mm ebatlarında olan balata numunelerinin preslenmesi için Şekil 5.2.'de göstermiş olduğumuz metalik kalıp kullanılmıştır. Kalıp içerisine yerleştirilen tozlar hidrolik pres yardımı ile saniyede 2.40 MPa hızda 500 MPa basınç da tek yönlü soğuk olarak preslenmiştir.



Şekil 5.2. Presleme kalıbı ve kesiti.

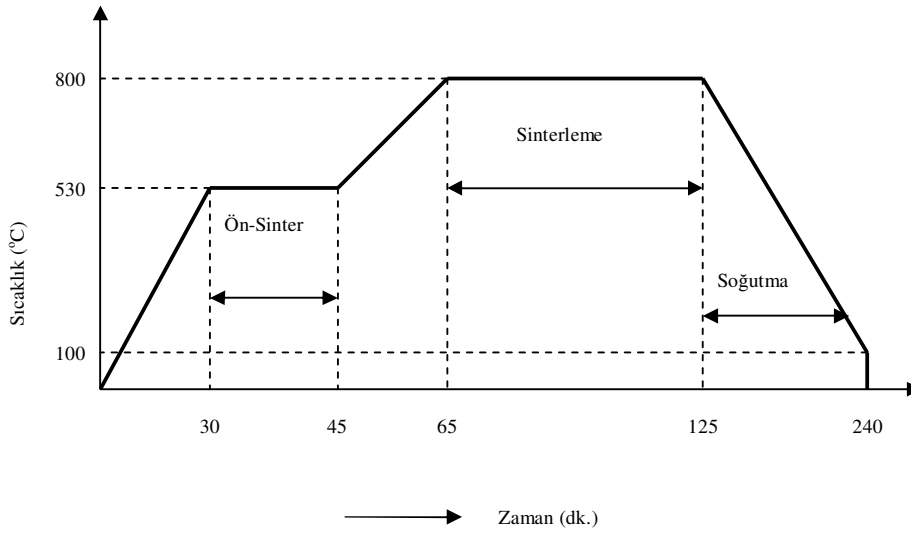
5.1.3. Sinterleme

Preslenmiş numunelerde toz parçacıklarının yüksek yüzey enerjilerinin ortadan kaldırılarak parçacıklar arasında difüzyon yoluyla tam ve mükemmel bağlar oluşturulması amacı ile sinterleme yapılmıştır.



Şekil 5.3. Sinterleme fırını.

Sinterleme çalışmaları için Şekil 5.3 de görülen gaz akışına uygun mulit seramik tüp fırın kullanılmıştır. Sinterleme sırasında da koruyucu atmosfer olarak argon gazı kullanılmıştır. Bu çalışmada kati hal sinterlemesi yerine elementel tozların çok farklı erime sıcaklıklarından faydalanılarak sıvı faz sinterlemesi kullanılmıştır. Sıvı faz sinterlemesi için üç farklı sıcaklık bölgesi oluşturulmuştur. Bunlar; ön sinterleme, sinterleme ve soğutma bölgeleridir. Cu-Sn denge diyagramından faydalanılarak belirlenen sinterleme işlemi Şekil 5.4.'de şematik olarak görülmektedir. Sinterleme sıcaklığı olarak numuneleri önce 30 dakikada 530 °C'ye çıkarılmış ve 15 dakika süre ile ön-sinterleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Daha, sonra numuneler 20 dakikada 800 °C' ye çıkarılmış ve 60 dakika 800 °C'de sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi toplam 75 dakika sürmektedir.



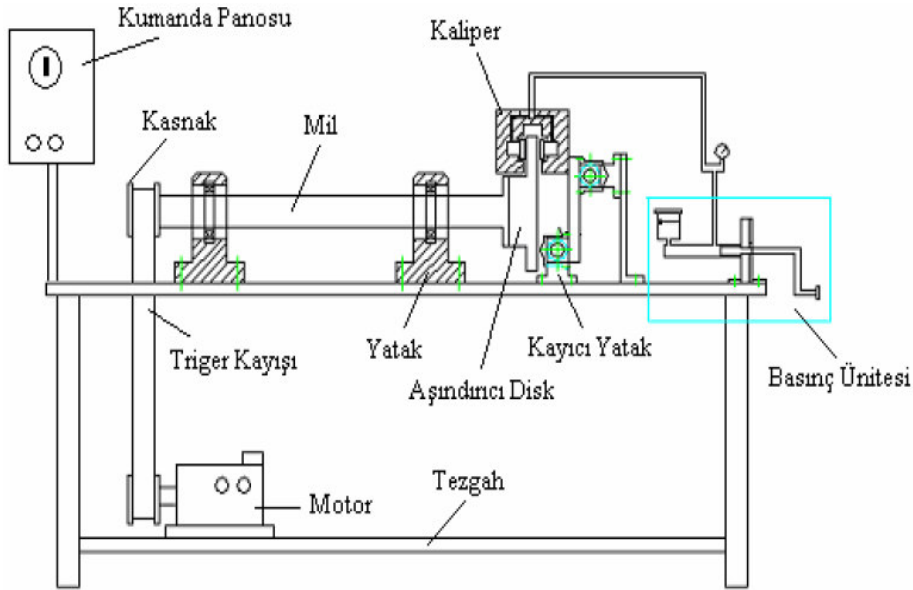
Şekil 5.4. Sinterleme sıcaklığının zamana göre gösterimi.

5.2. Performans Deneyleeri

Performans deneyleeri laboratuarda bulunan balata aşınma cihazı ile yapılmıştır (Şekil 5.4.). Cihaz laboratuvar şartlarında önceki çalışmalar sırasında tasarlanmış ve monte edilmiştir [64]. Bu cihazda hareketi veren 5.5 KW lık elektrik motoru, frekansı değiştirerek devir ayarı yapan inventör, araçlarda kullanılan fren diski ve balataları tutan semer bulunmaktadır. Bu semer sürtünme kuvvetine göre sürtünmesiz olarak doğrusal hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. Semerin bu hareketi bir transducer yardımıyla çok hassa olarak ölçülerek bilgisayara aktarılabilir. Sürtünme kuvveti ile hareket edebilen balata numunelerinin takılı olduğu semer bir yay tarafından tutulur. Bu yaylanma miktarı biline yüklerle kalibre edilerek transducerden alınan hareket miktarı ile ortaya çıkan sürtünmeden kaynaklanan yük arasında bir bağıntı kurulur. Bu bağıntı ya göre ölçülen hareket miktarı sürtünme kuvvetinin bulunmasını sağlar. Sürtünme kuvveti elde edilince uygulanan yüke orantılanarak sürtünme katsayısı bulunur ve bilgisayar yardımıyla sürtünme aşınma grafikleri çizilir.



a.

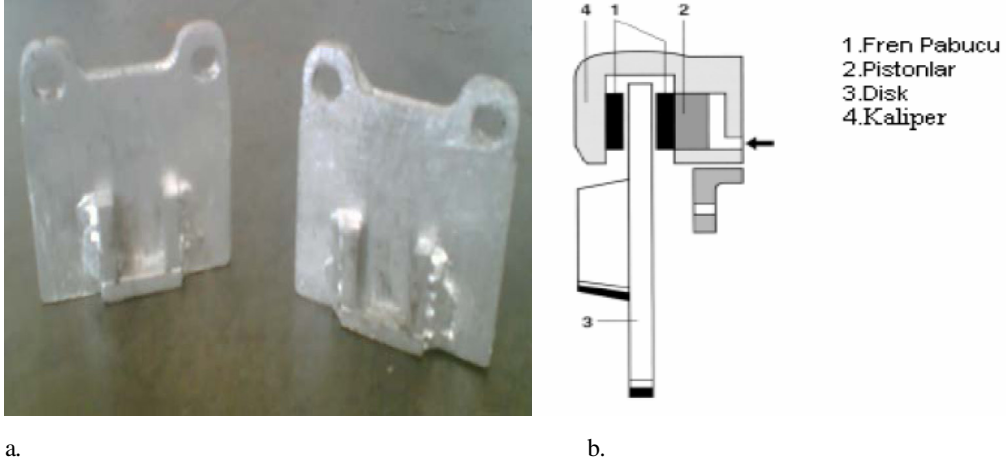


b.

Şekil 5.5. a)Aşınma test cihazı b)şematik gösterimi.

Aşınma cihazının çalışma prensibi Şekil 5.5.'te gösterilen balata tutuculara yerleştirilen balata malzemeleri 110.5 HRB sertliğinde dökme demirden üretilmiş 600 devir/saat hızla dönen 240 mm çapındaki diskin her iki tarafına 191 mm sürtünme çapında iki adet balata deney numunesi 1.0, 1.5 ve 2.0 barlık sabit basınç altında aşındırılmıştır. Bu basınçlar fren

hidroliği sayesinde 45 mm çapında pistonlara uygulanmış ve bu pistonlar uygulanan basınçlarla doğru orantılı olarak 157 , 236 ve 314 N yükle balata numunelerini sıkıştırmıştır.

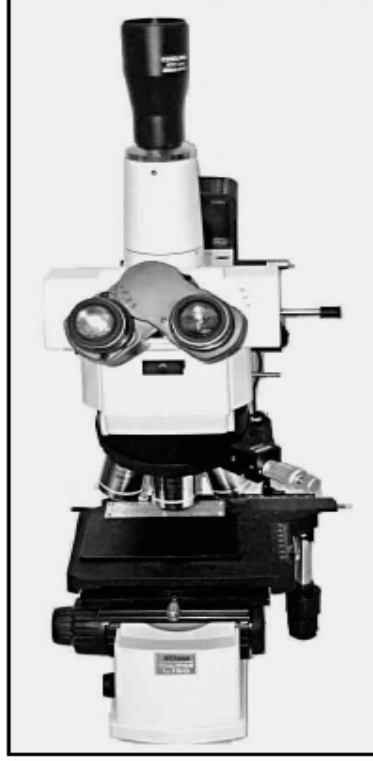


şekil 5.6. a) Balata yuvaları, b) Diskli fren sisteminin şematik görünüşü.

5.3. Optik Mikroskop Analizi

Üretilen Bronz esaslı balata malzemelerinin optik mikroskop incelemesi

şekil 5.7.'da gösterilen “Nikon Eclipse L 150” marka cihaz ile yapılmıştır.



Şekil 5.7. Nikon Eclipse L 150 marka optik mikroskop cihazının fotoğrafı.

Üretilen Bronz esaslı balata numuneler metalografik numune hazırlama teknikleri ile Sırasıyla 120, 240, 320, 600, 800, ve 1200 mesh zımpara kağıtları kullanılarak kaba ve ince olarak zımparalanmıştır. Daha sonra 1 μ m'lik elmas pasta yardımıyla parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Metalografik olarak hazırlanan parlatılan numuneler %10 oranında HCl asit ile dağlama işleminden sonra farklı büyütmelerde mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu Çalışmaları

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ve EDS analizleri "Jeol JSM 6060 LV" marka cihazla yapılmıştır (Şekil 5.7.).

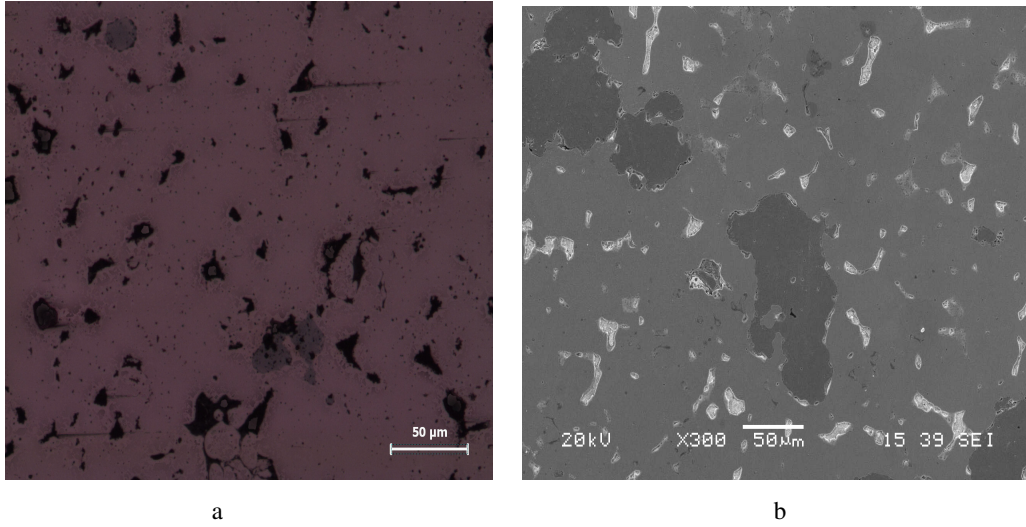


Şekil 6.8. Jeol JSM 6060 LV marka SEM cihazının fotoğrafı.

BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

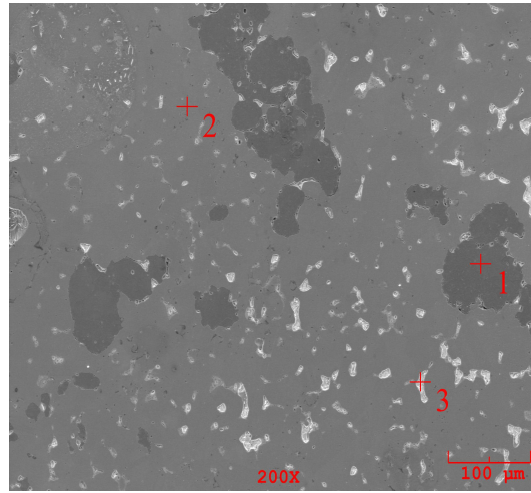
6.1. Malzemelerin mikroyapıları

Grafit'in numuneler içindeki dağılımı, oranı balatanın tribolojik ve termal özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Aşağıda toz metalurjisi yöntemi ile üretilen değişik oranlarda Grafit ihtiva eden bronz esaslı kompozit balataların mikroyapı fotoğrafları verilmektedir.

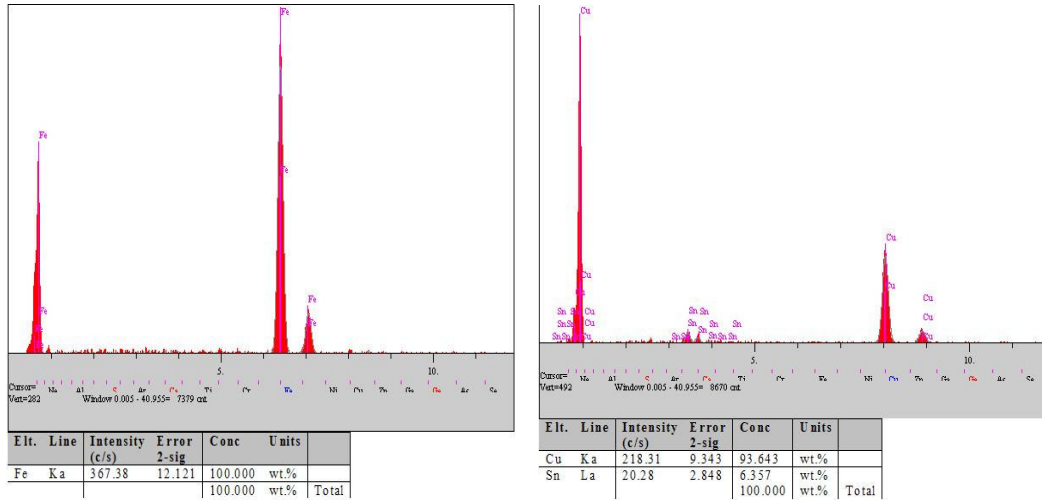


Şekil 6.1. a) A1 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) A1 numunesinin SEM görünümü.

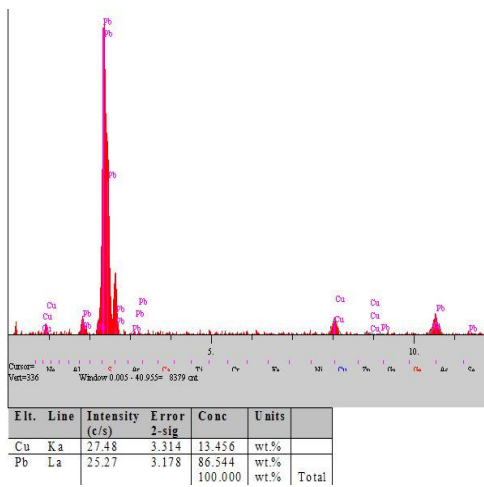
Şekil 6.1 de grafit içermeyen bronz esaslı balataların optik SEM mikro yapıları görülmektedir. Optik mikroskopta siyah görülen kalıntı gözenekler SEM mikroskobunda beyaz olarak görülmektedir. EDS analizlerine göre, bu beyaz bölgelerin kurşunca zengin olduğu tespit edilmiştir. Bunun da sebebi bakır içinde çözünmeyen veya soğuma sırasında tane dışına çıkarılan kurşun gözenek duvarlarında katılaşmış kalmıştır.



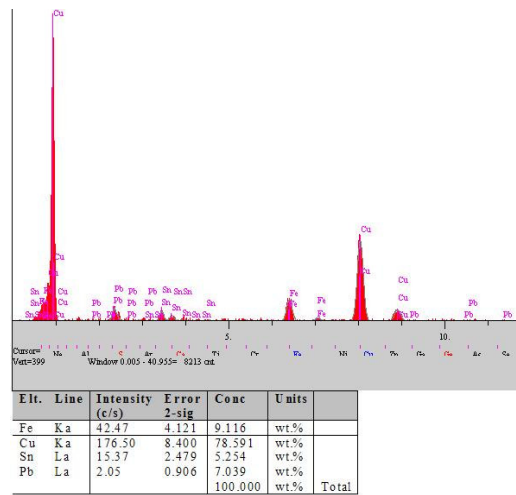
a.



b.



c.

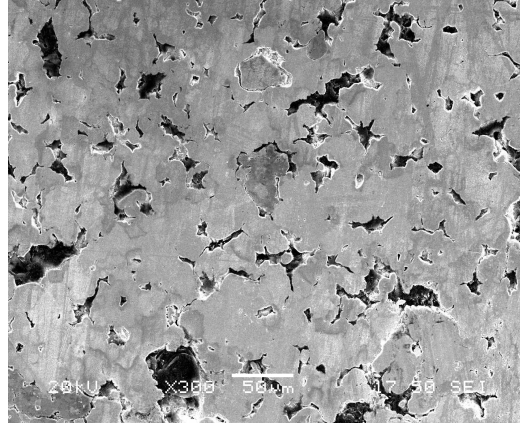


d.

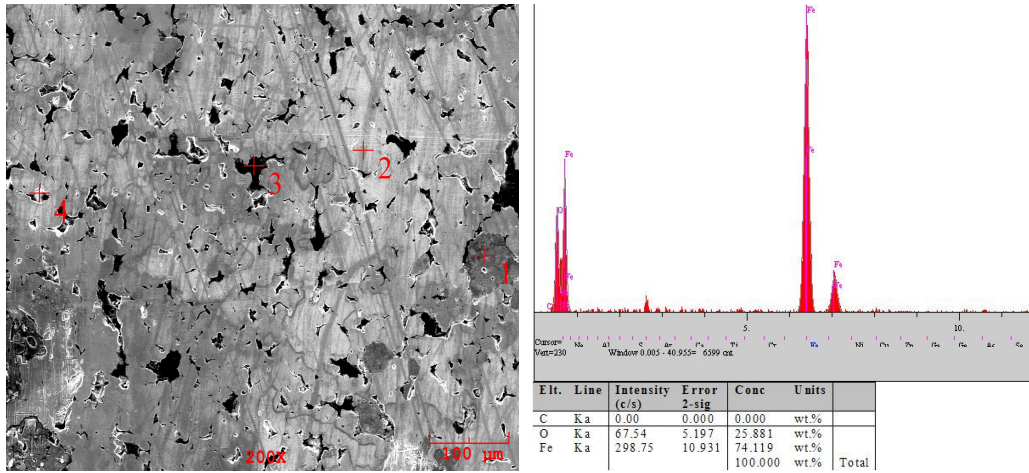
e.

Şekil 6.2. a) A1 numunesinin EDS pikleri b) 1 nolu noktasının analizi c) 2 nolu noktanın analizi d) 3 nolu noktanın analizi e) Numunenin genel analizi.

Şekil 6.2.'de 1 nolu noktanın analizinde Fe tanesi görülmektedir. 2 nolu noktanın analizinde Cu-Sn alaşımlı tane görülmektedir. 3 nolu noktanın analizinde Pb elementi görülmektedir. Bu numunede malzemenin içerisinde grafit bulunmadığı için EDS analizinde karbon görülmemektedir. Pb'nin Cu-Sn alaşımlı tanelerinin sınır bölgelerinde ve içerisinde çökelediği gözlenmiştir.

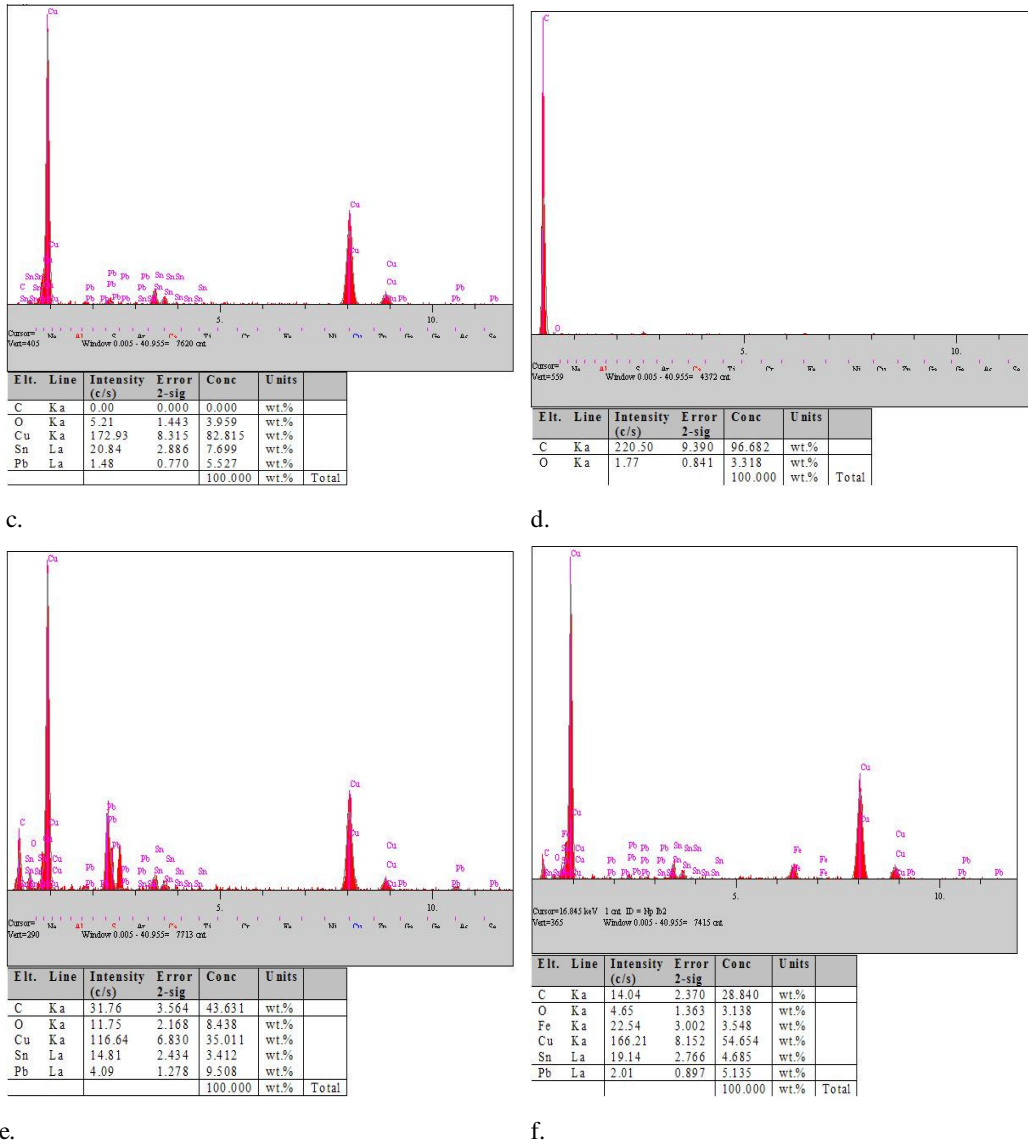


Şekil 6.3. A2 numunesinin SEM görüntüsü.



a.

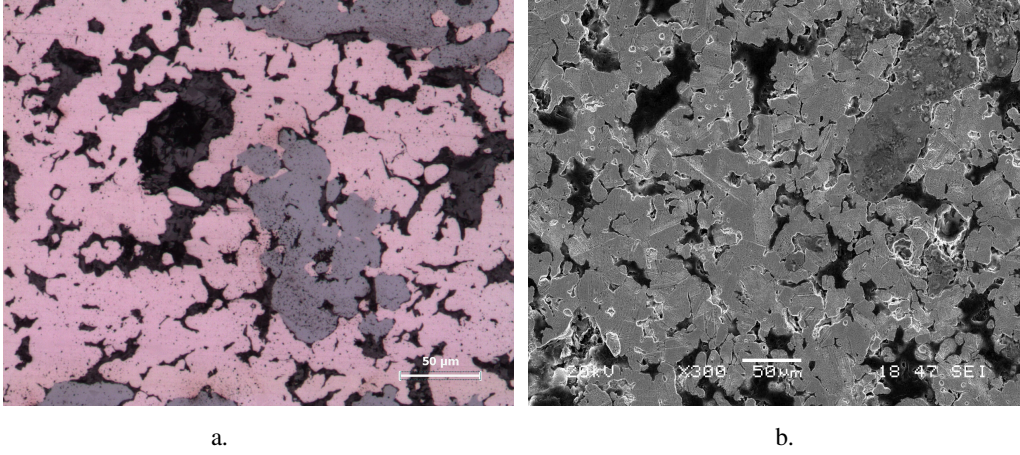
b.



Şekil 6.4. a) A2 numunesinin EDS resmi, b) 1 nolu noktanın analizi, c) 2 nolu noktanın analizi, d) 3 nolu noktanın analizi, e) 4 nolu noktanın analizi, f) Numunenin genel analizi.

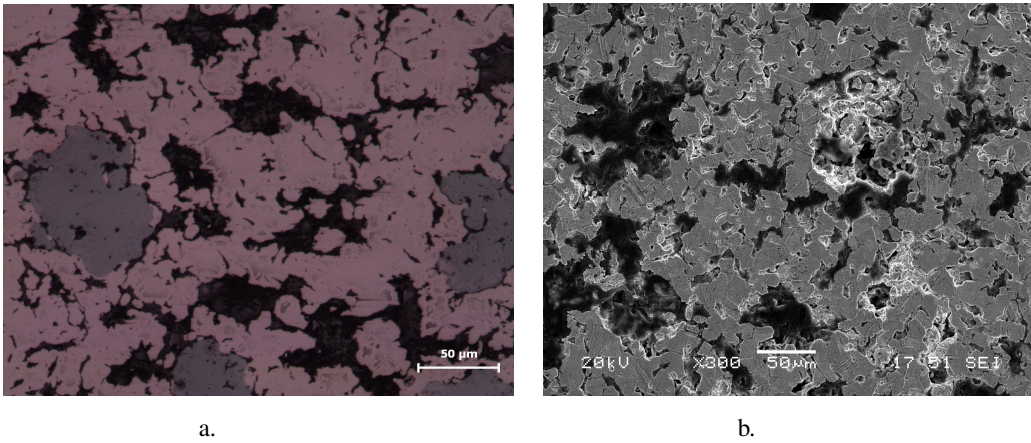
Şekil 6.4.'de 1 nolu nokta daki koyu renkli tanenin analizinde demir yoğunlukta sonuç verdiği için bu tanelerin çözünmeden malzeme içinde buluna demir taneleri olduğuna karar verilmiştir. 2 nolu noktanın analizinde Cu ve Sn çıkması bakır ve kalayın sıvı faz sinterlemesi sırasında kalay bronzu oluşturacak şekilde alaşımlandığını göstermektedir. Ayrıca alaşım içinde çözünen kurşun da bu noktanın analizinde görülmektedir. 3 nolu noktanın analizinde Grafit tanesinin içerisindeki C ve O atomlarının oranları görülmektedir. 4 nolu noktanın analizinde Pb tanesi görülmekte ama daha önce de

bahsettiğimiz gibi Pb, soğuma sırasında Cu-Sn alaşımından tane sınırlarına doğru ayrılmıştır. Resmin genel analizinde ise oranlara bakıldığında Grafit hariç doğru sonuçlar vermektedir. Karbon atom çapı küçük olduğundan EDS sonuçları oransal hesaplamaları yanlış olmaktadır.



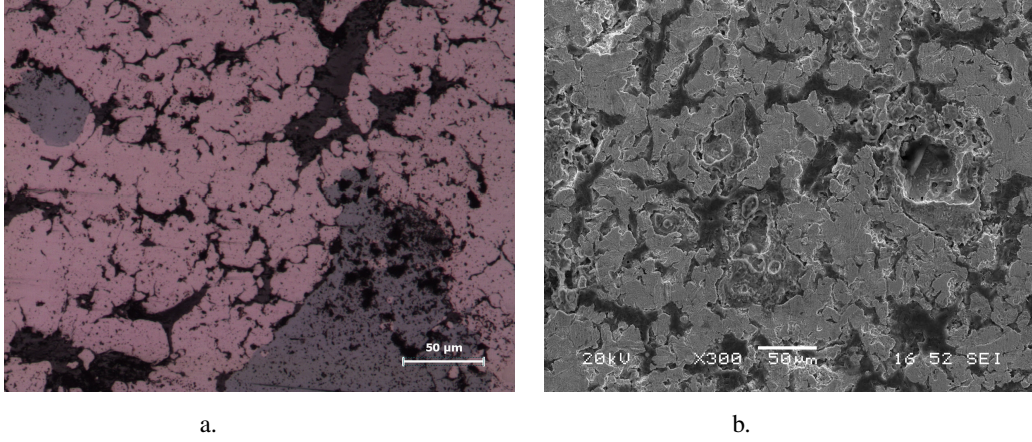
Şekil 6.5. a) A3 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) A3 numunesinin SEM görünümü.

Şekil 6.5.'te %4 oranında Grafit bulunan malzemenin mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Numunenin 300x büyütme ile çekilmiş SEM görüntüsüne bakıldığında Grafit'in ve Pb'nin taneler arasında tane sınırında veya gözenek içinde bulunduğu görülmektedir.



Şekil 6.6. a) A4 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) A4 numunesinin SEM görünümü.

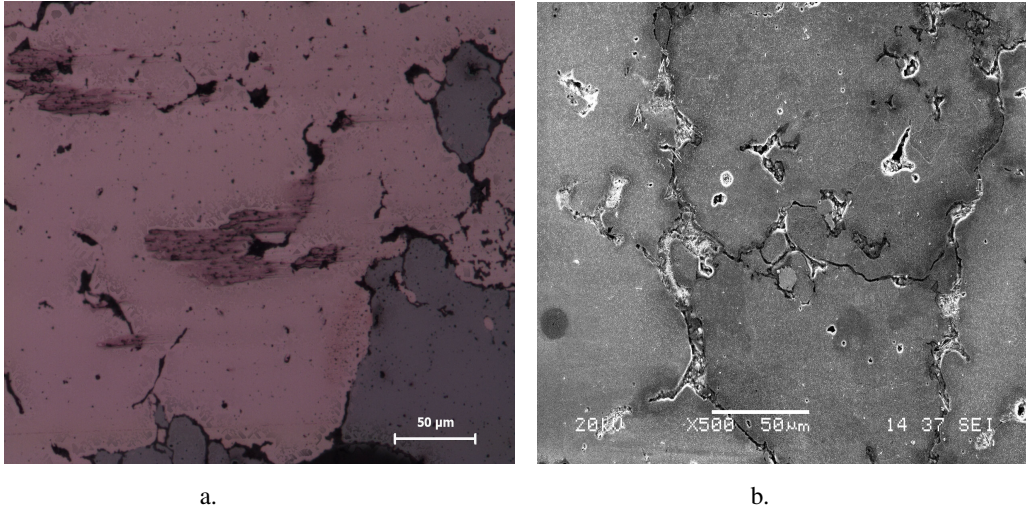
İçerisinde %6 oranında Grafit bulunan A4 numunesinin Şekil 6.6.'te verilen SEM ve optik mikroskop görüntülerine bakıldığında Grafit'in kısmi olarak dağılmadan daha çok geniş alanları kapladığı görülmektedir. Pb'nin ise küçük taneler oluşturmuş olan Cu-Sn alaşımının tane sınırlarında çökelindiği gözlenmektedir.



Şekil 6.7. a) A5 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) A5 numunesinin SEM görünümü.

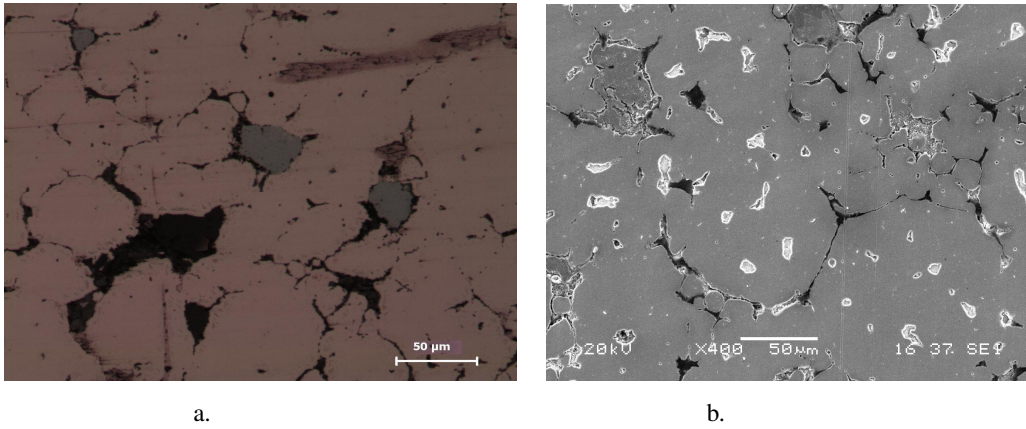
Şekil 6.7.'de ise Grafit %8 oranındadır. A5 numunesinin mikro yapı görüntülerine bakıldığında ise Grafit'in hacimsel olarak numunenin her yerine dağıldığı görülmektedir.

Aşağıdaki numuneler B grubuna dahil olan ve Cu-Sn-Pb alaşımlı tozlardan üretilmiş balata numuneleridir. A grubundaki numunelerde sisteme giren her bir toz ayrı ayrı katılmış, sıkıştırılmış ve sinterlenmiştir. B grubu numunelerde ise bakır- kalay -kurşun tozları önceden alaşımlanmış atomizasyon tekniği ile toz haline getirilmiş olarak üretici firmadan temin edilmiştir. Böylelikle kurşuna doğrudan temas olmadığından zararlı etkisinin önlenmesi amaçlanmıştır. Bu alaşımlı tozlara demir ve grafit tozları katılarak presleme ve sinterleme işlemleri yapılmış ve aşağıdaki mikro yapı görüntüleri elde edilmiştir.



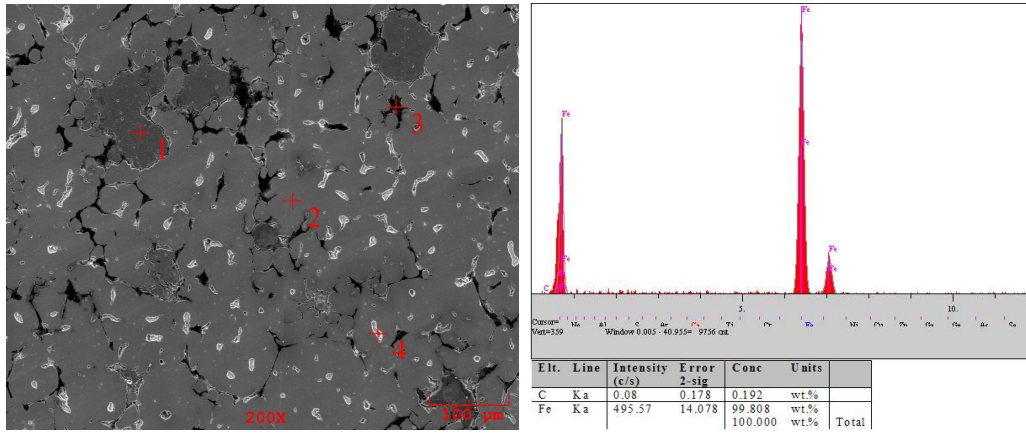
Şekil 6.8. a) B1 numunesinin optik mikroskop görüntüsü, b) B1 numunesinin SEM görüntüsü.

Şekil 6.8.'de içerisinde %0 Grafit bulunan B1 numunesinin mikroyapı görünümüne bakıldığında içerisinde Grafit bulunmadığından tane sınırlarında ve gözenek duvarlarında Pb'nin çökelediğini görmekteyiz.



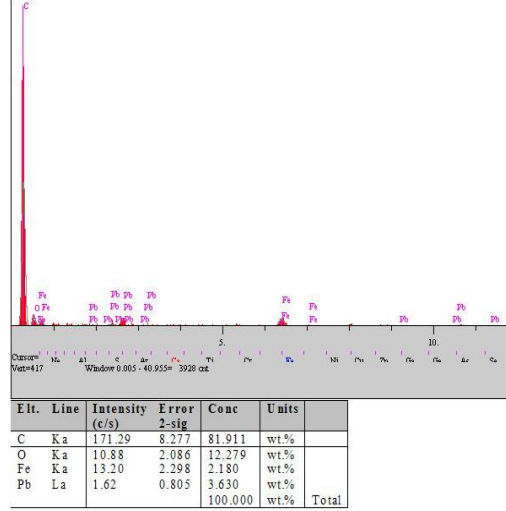
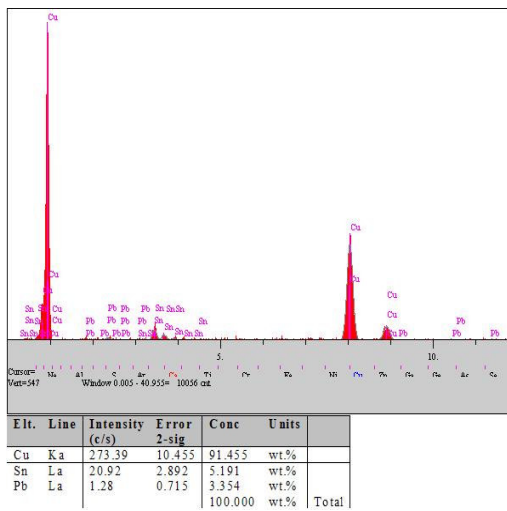
Şekil 6.9. a) B2 numunesinin optik mikroskop görüntüsü, b) B2 numunesinin SEM görüntüsü.

Şekil 6.9.'de Cu-Sn-Pb tozlarından üretilmiş malzemenin içerisinde %2 oranında Grafit bulunmaktadır. Malzemenin SEM görünümünde taneler belirgin bir şekilde gözükmektedir.



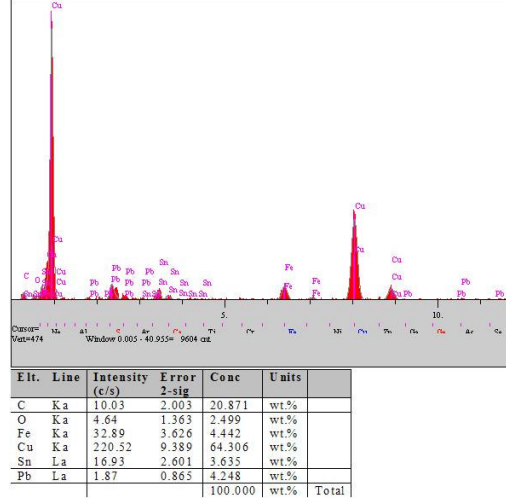
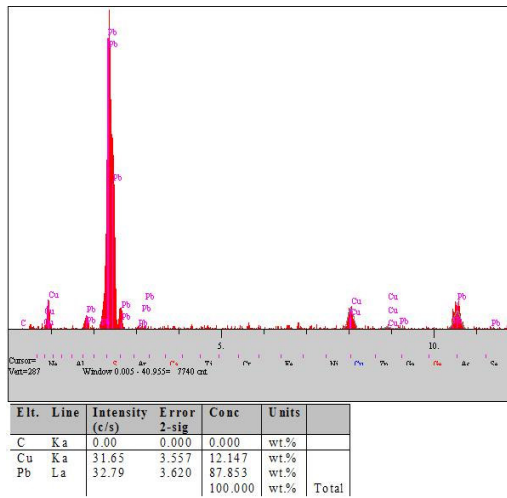
a.

b.



c.

d.

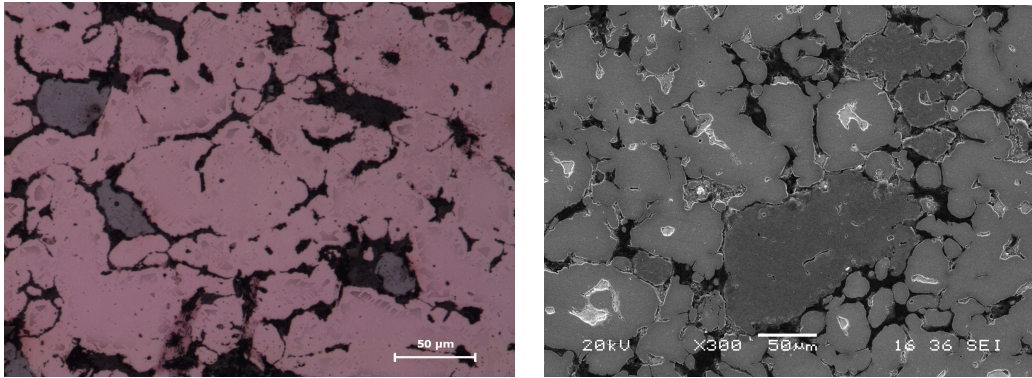


e.

f.

Şekil 6.10. a) B2 numunesinin EDS resmi, b) 1 nolu noktanın analizi, c) 2 nolu noktanın analizi, d) 3 nolu noktanın analizi, e) 4 nolu noktanın analizi, f) Numunenin genel analizi.

Şekil 6.10.'da görülen B2 numunesinin EDS analizi incelendiğinde 1 nolu noktada Fe tanesinin tane sınırlarında az miktarda Grafit bulunduğu görülmektedir. Fakat Pb'nin mevcudiyetide göz ardı edilmemesi gerekmektedir. 2 nolu noktanın analizine bakıldığında Cu'nun Sn ile alaşım içerisinde olduğu buna karşın Pb'nin ise tane sınırlarına yakın bölgelerde bulunduğu gözlenmektedir. 3 nolu noktanın analizine bakıldığında Grafit'in Cu-Sn alaşım tanelerin tane sınırlarında istenen bir şekilde bulunduğu görülmektedir. 4 nolu noktanın analizine bakıldığında Pb'nin Cu-Sn alaşımına katıldığı buna karşın yapısını bozmayıp tane sınırlarına yakın bölgelerde çökeldiğini daha öncede ifade edilmişti, burada da net bir şekilde görülmektedir. Resmin genel analizi incelendiğinde ise Grafit'in resim içerisindeki oranıyla da anlaşılacağı gibi istenen bir dağılım gerçekleşmektedir.



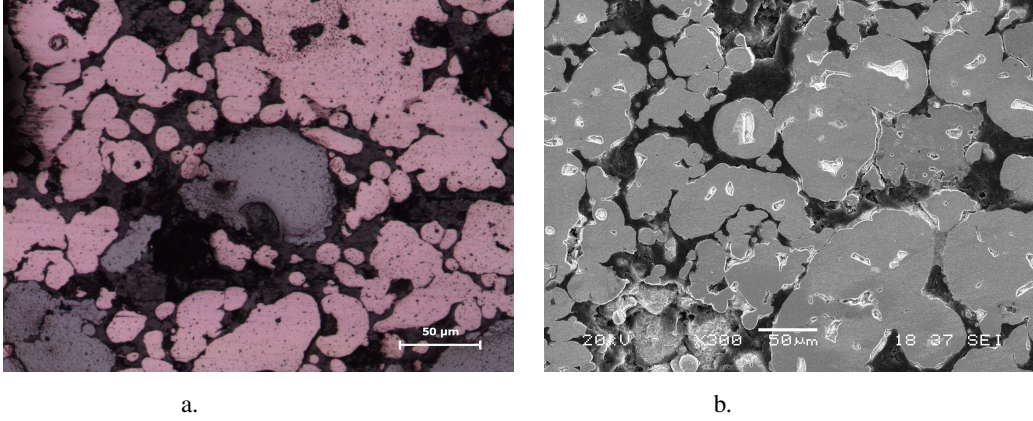
a.

b.

Şekil 6.11. a) B3 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) B3 numunesinin SEM görünümü.

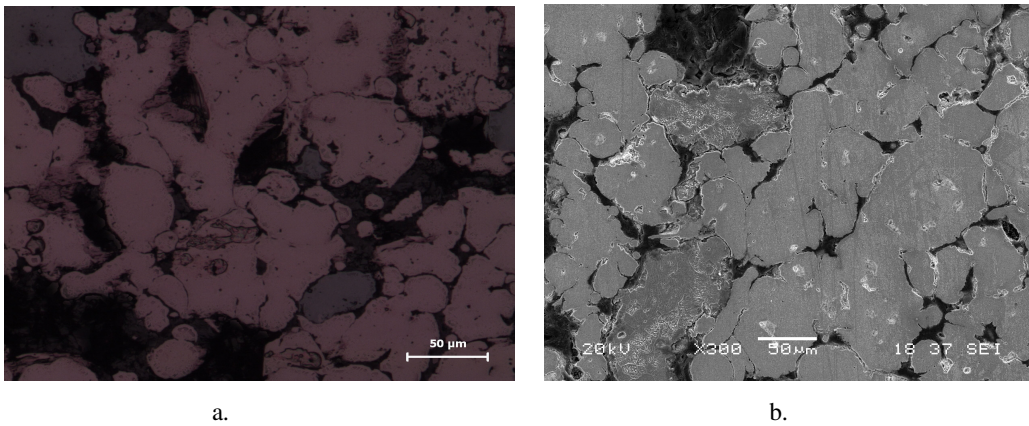
Şekil 6.11.'da B3 numunesinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri görülmektedir. Numunenin içerisinde %4 oranında Grafit bulunmaktadır. Fe atomlarında kısmi olarak iri taneler görülmektedir. Bununla birlikte Cu-Sn ile alaşım halinde ve hem iri hem de küçük tanelerin varlığı gözlenmektedir. Grafit ilavesi ile balata numunelerinin mikro yapısını ve sürtünme özelliklerinin değiştirilmesi amaçlanmıştır. Sürtünme elemanlarının da yüzey pürüzlülüğünü koruyabilmek için hem gözenek bulunması hem de farklı sürtünme davranışları sergileyen partiküllerin bir arada bulunması istenir. Katılan grafit gözenekliliği artırırken sürtünme sırasında da sürtünme özelliklerini dengeleyici olarak düşünülmüştür. Demir tozları ise bakırdan daha sert olduğundan

yumuşak ve sert fazları bir arada tutarak yüzey pürüzlülüğünün muhafazası sağlamıştır.



Şekil 6.12. a) B4 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) B4 numunesinin SEM görünümü.

Şekil 6.12.'da görülen B4 numunesinin içerisindeki Grafit miktarı % 6'dır. Grafit artışı ile siyah bölgelerin oranı mikro yapı içerisinde arttığı gözlenmiştir. Grafit toz tanecikleri metal tozlarından daha küçük olduğundan toz taneleri arasında kalan gözeneklerde ve tane sınırlarında birikerek gözenekliliği artırmıştır. Bu durum sinterleşmeyi azaltarak taneler arasında zayıf bağların oluşmasına yol açmaktadır. Daha zayıf bağları olan taneler sürtünme sırasında daha kolay koparak sürtünme özelliklerinin değişmesine yol açar.



Şekil 6.13. a) B5 numunesinin optik mikroskop görünümü, b) B5 numunesinin SEM görünümü.

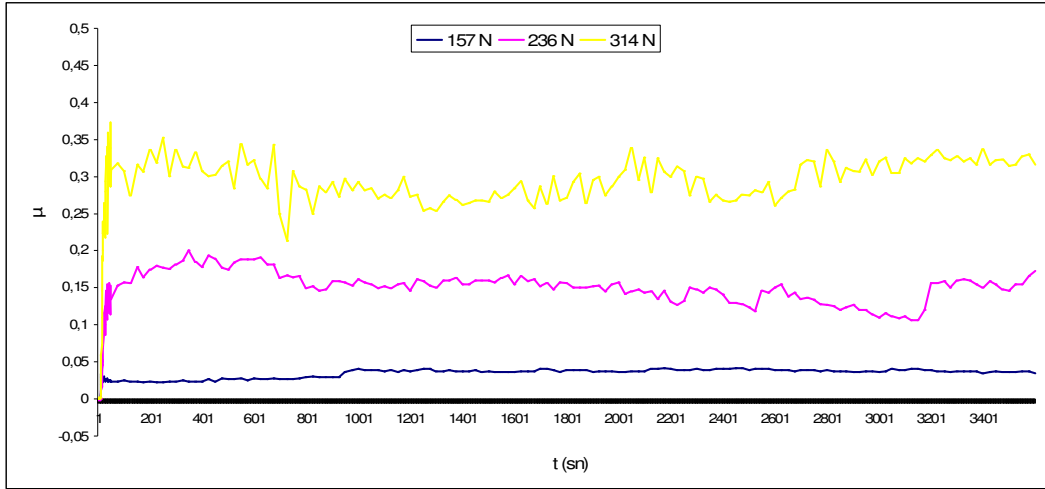
Şekil 6.13.'de B5 numunesinin içerisinde %8 oranında Grafit bulunmaktadır. Bu oranda katılan grafit aşırı boşluk oluşturmaktadır. Bu aşırı grafit bölgelerinin sürtünme sırasında olumlu etkilerinden çok olumsuz etkileri olacağı düşünülmektedir. Aşırı boşluk olacağı için sinterlemeye bariyer oluşturabilir bu baltanın aşınma kaybını artırabilir. Ya da grafitin katı yağlayıcı özelliği sürtünme sırasında baskın gelerek sürtünme kuvvetini aşırı düşürerek frenleme etkisini azaltabilir.

6.2. Performans Test Sonuçları

Performans deneyleri 0,1 m/sn hızla 157 N, 236 N ve 314 N olmak üzere üç farklı yük ile balata aşınma test cihazında yapılmıştır. Cihaz çalıştıktan sonra yük artırılarak uygulanmış ve anılan yüklerde sabitlenmiştir. Daha büyük yükler uygulandığında frenleme etkisi göstererek motoru durdurduğundan yüksek yüklerde sonuç alınamamıştır.

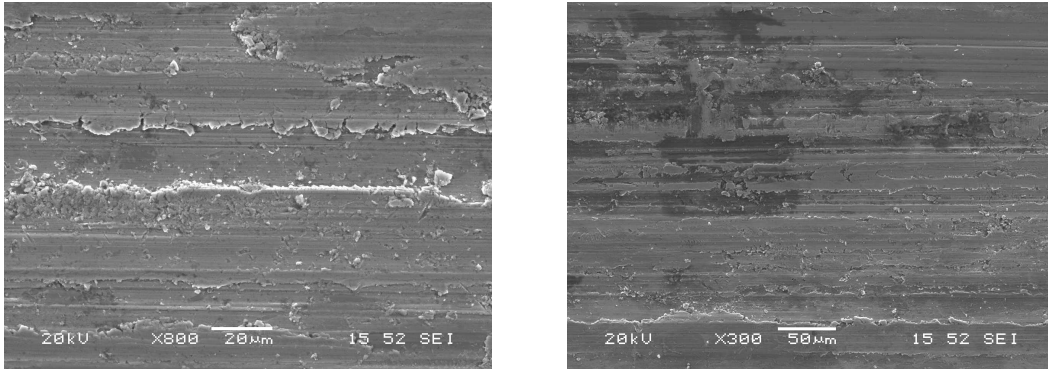
6.2.1. %0 Grafit'li A1 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları

%0 Grafit'li A1 balata malzemesi için farklı yükler altında katsayı sonuçları Şekil 6.14.'te görülmektedir. Grafik incelendiğinde, sürtünme katsayısı ilk zamanlarda en yüksek değerleri verirken ilerleyen süre içerisinde ideal değerlerine ulaşıyor. Yük artışı ile sürtünme katsayısı değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. A1 balata malzemesinin içerisinde katı yağlayıcı olarak ilave edilen Grafit bulunmadığından yük arttıkça sürtünme katsayısı değerlerinde sıklıkla minimum ve maksimum pikler görülmektedir. Literatür kısmında da bahsedildiği üzere plastik temastaki iki yüzey arasındaki temas ara yüzeyi kaymaya direnç gösterecek kadar adhesiv bağ mukavemetine sahiptir.

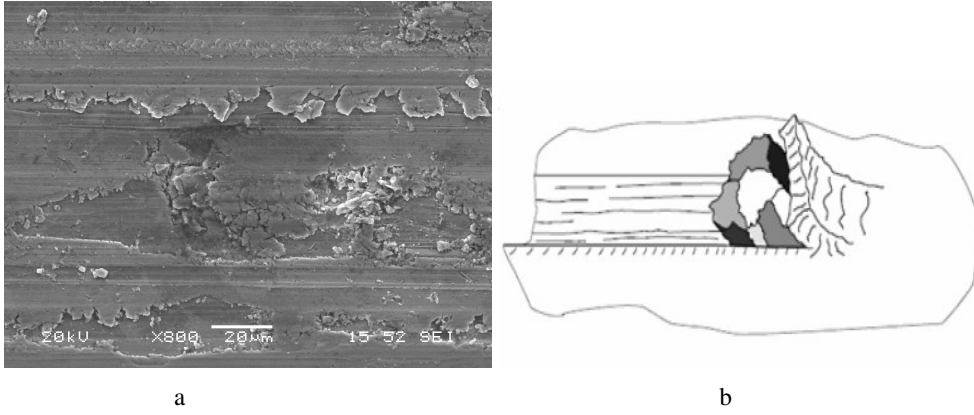


Şekil 6.14. %0 Grafit'li A1 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.

Temas alanlarında meydana gelen plastik deformasyon, basma ve kayma gerilmeleri ile deformasyon sertleşmesine yol açar. Temas alanındaki böyle deformasyonların sonucu olarak çatlak başlangıcı ve ilerlemesi teşvik edilir. Çatlak temas ara yüzeyine ulaştığı zaman aşınma partikülleri meydana gelir ve adhesiv transfer tamamlanır. Şekil 6.15.'de bu transfer görülmektedir[65].



Şekil 6.15. %0 Grafit'li A1 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.

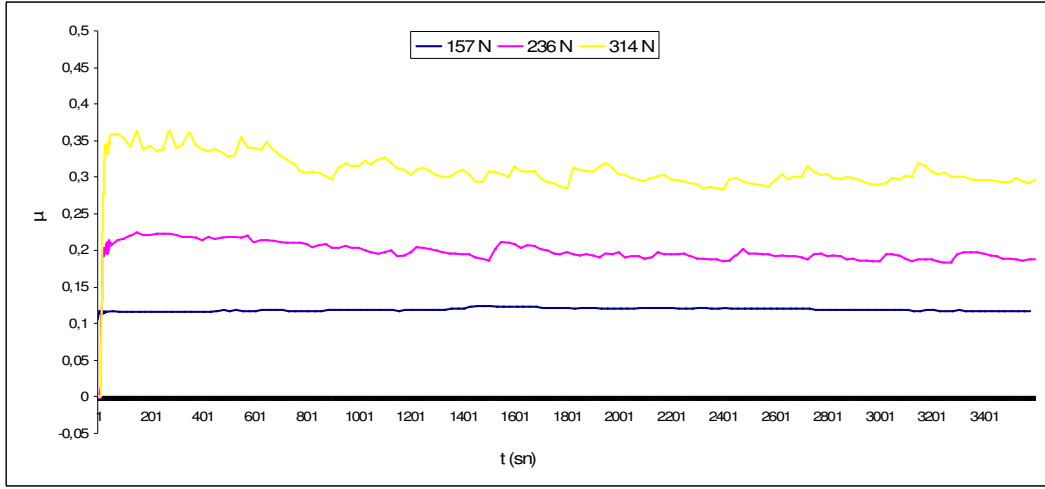


Şekil 6.16. a) %0 Grafit'li A1 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüsü
b) Abrasiv aşınma mekanizmasının şematik gösterimi [54].

Zhang ve çalışma arkadaşlarının [66] yaptığı çalışmaya göre yüzeyde oluşan plastik deformasyonlar çatlakların oluşumuna sebep olmakta, bu çatlakların büyümesi ve birbirleriyle bağlanmaları sonucunda malzeme ince plakalar ya da delaminasyon tabakaları halinde yüzeyden kalkmakta ve uzaklaşmaktadır.

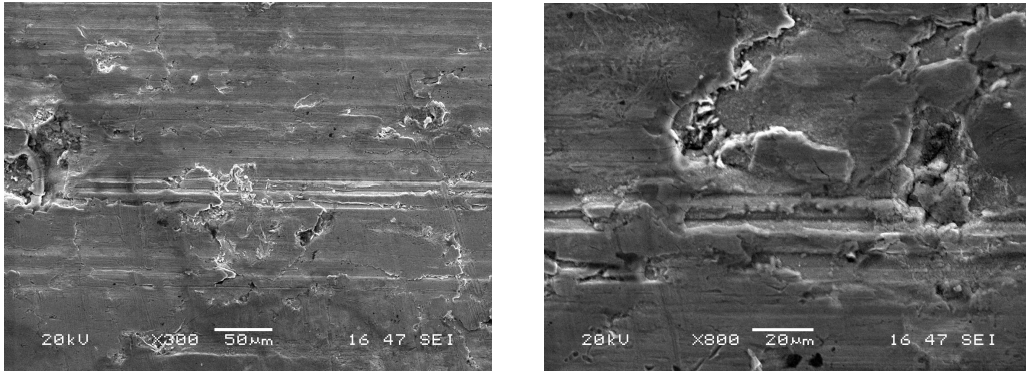
Şekil 6.16.'te görülen daha yüksek büyütmelelerdeki SEM görüntüleri incelendiğinde, yüklerde malzeme yüzeyinde artan yüke göre adhesiv aşınmadan abrasiv aşınmaya geçildiği izlenimi edinilmektedir. Düşük yüklerde, yerel bazı adhesiv hasar bölgeleri ile kızıklama türü abrasiv aşınmanın sebep olduğu aşınma çizgileri meydana gelmiştir. Yük arttıkça abrasiv aşınma ile kayma yüzeylerinden kopan aşınma partiküllerinin balata yüzeyinde toplandığı görülmektedir.

6.2.2. %2 Grafit'li A2 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları



Şekil 6.17. %2 Grafit'li A2 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.

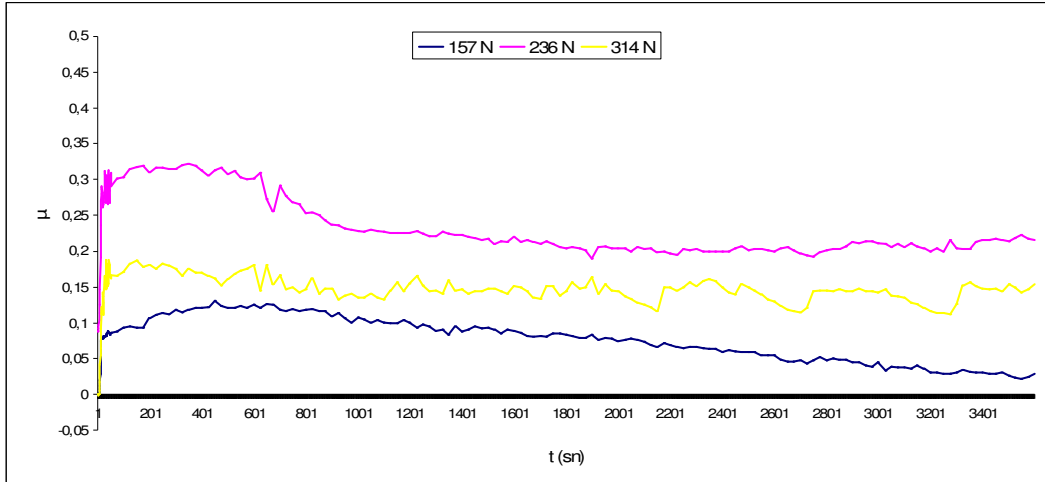
Adhezyon ile yüzeyden kopan aşınma ürünlerinin deforme olarak tekrar yüzeye yapışması sonucu abrasiv aşınma meydana gelmiştir. Nakanishi ve arkadaşlarının [67] yaptıkları çalışmada, tekrarlı frenlemelerin sürtünme katsayısının düşmesine ve fren balatasının aşınmasının artmasına sebep olduğunu, fren diskinin kalınlığının, balata yüzeyinden kopup disk yüzeyine sıvayan aşınma ürünleri sebebiyle arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 6.18. %2 Grafit'li A2 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.

Şekil 6.18.'de, Şekil 6.17.'de yorumu yapılan abrasiv aşınma SEM görüntülerinde görülmektedir.

6.2.3. %4 Grafit'li A3 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları



Şekil 6.19. %4 Grafit'li A3 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.

Şekil 6.19 da % 4 grafit ilaveli A3 numunesinin aşınma davranışları görülmektedir. Genel olarak her yük için sürtünme katsayısı ilk dakikalarda yükselmiş daha sonra diskin ve balatanın ısınmasıyla belli bir değere düşerek sabit devam etmiştir. Uyyuru ve arkadaşlarının [68] yaptıkları çalışmalara benzer şekilde normal yükün artmasıyla sürtünme katsayısında düşüş gözlemlediklerini, yükün artmasıyla kayma ara yüzeyinde tribooksit tabaka oluşumunun desteklendiğini ve bu tabakanın yağlayıcı olarak davranarak, sürtünme katsayısı ile aşınma hızında düşüğe sebep olduğunu vurgulamışlardır.

Benzer şekilde, 314 N yükte elde edilen değerlerin, 157 N ve 236 N'da kaydedilen değerlerin ortasında bulunması, yükün artmasıyla yüzeyde bir tribooksit filmi oluştuğu fikrini desteklemektedir.

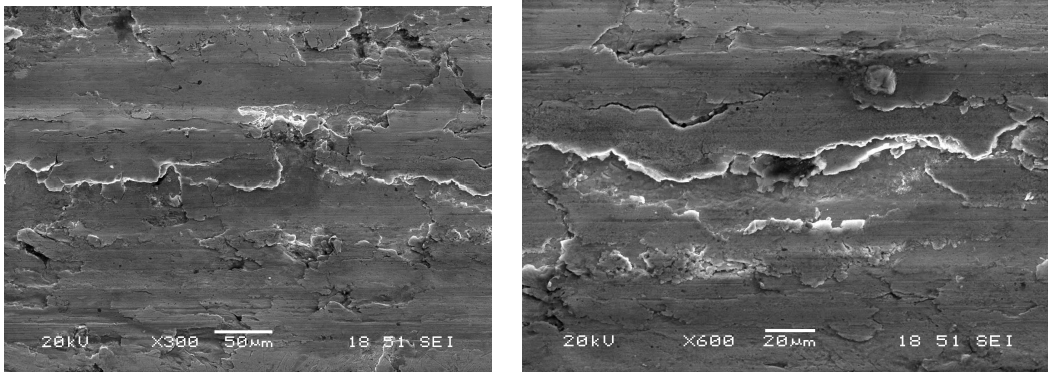
Yine aynı çalışmada[68], bu tribooksit tabakasının, disk-balata-hava etkileşimleri ile ve sürtünme sonucu ortaya çıkan sıcaklığın aktivasyonu ile kayma yüzeyinde meydana

gelmesinin desteklendiği belirtilmektedir. Oluşan bu oksit tabakasının, koruyucu bir tabaka gibi davranarak sürtünme katsayısı ve aşınma değerlerini düşürdüğü bildirilmektedir.

Deneyde kullanılan yükün 314 N'a arttırılmasıyla grafikte görüldüğü gibi μ değerinde bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu da 236 N'da muhtemelen etkin bir şekilde oluşamayan oksit tabakasının, 314 N ile etkinliğinin artması sonucu sürtünme değerlerini düşürdüğü anlamına gelebilir.

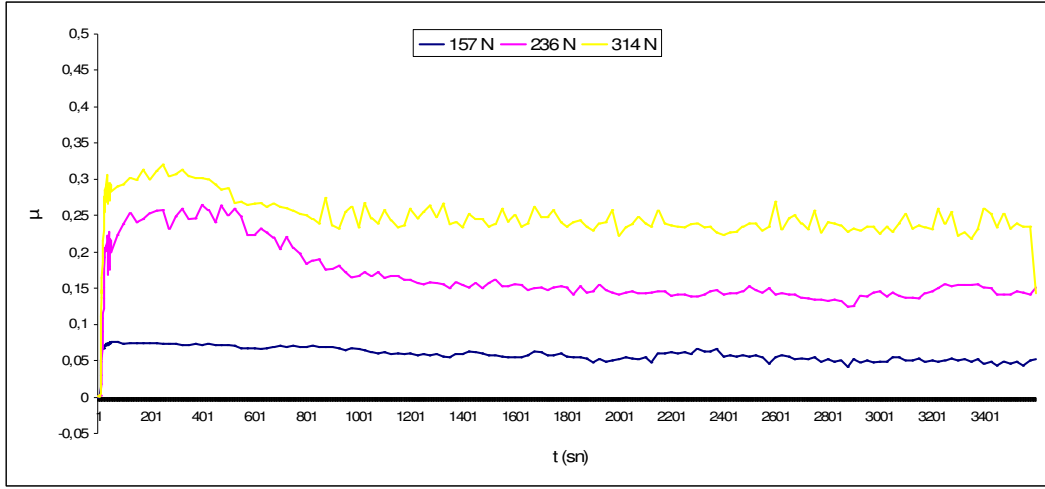
Uyyuru[68], yaptığı çalışmada oluşan tribo tabakanın yağlayıcı gibi davranmasına karşılık kritik bir kalınlık ya da kritik bir yükten sonra sürtünme kuvvetleri ile kalkan bu tabakanın aşındırıcı partikül kaynağı gibi davranabileceğini belirtmiştir

Yapılan deneylerde, yükün 314 N'a arttırılması sonucu yüzeydeki tribooksit tabakasının muhtemelen bozulduğu düşünülmektedir. Şekil 6.20.'de aşınan yüzeyler farklı büyütmeyle görülmektedir.



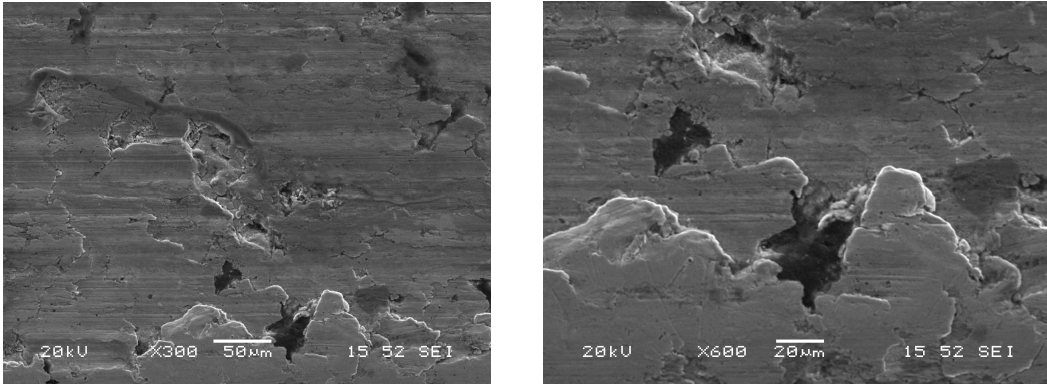
Şekil 6.20. %4 Grafit'li A3 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.

6.2.4. %6 Grafit'li A4 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları



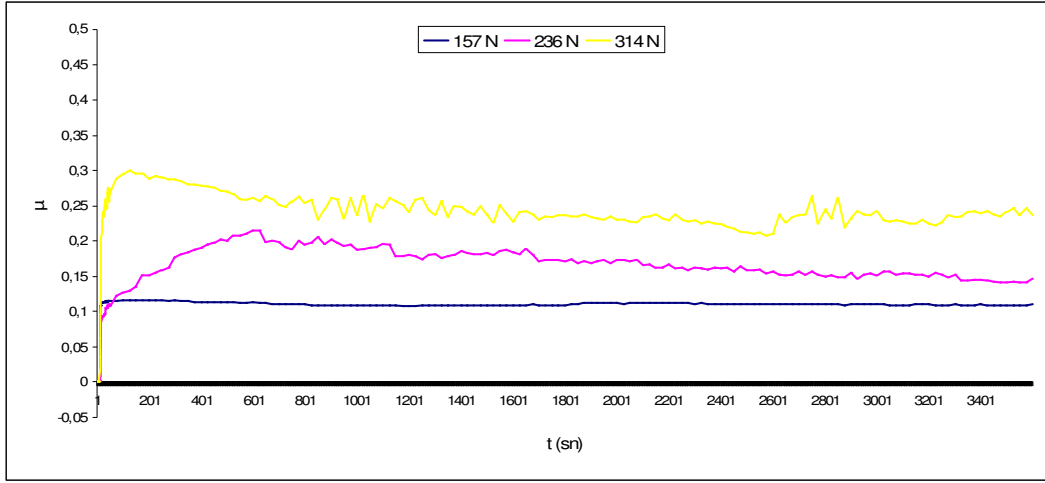
Şekil 6.21. %6 Grafit'li A4 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.

Şekil 6.21.'de %6 Grafitli balata numunesinin sürtünme katsayısı grafiğine bakıldığında A1, A2 ve A3 balata numunelerinden kopan partiküllerin yaptığı aşınma mekanizması gibi olmadığı, Grafitin numuneden ayrılarak numune ve disk arasında yüzey oluşturduğu gözlenmektedir(Şekil 6.22).



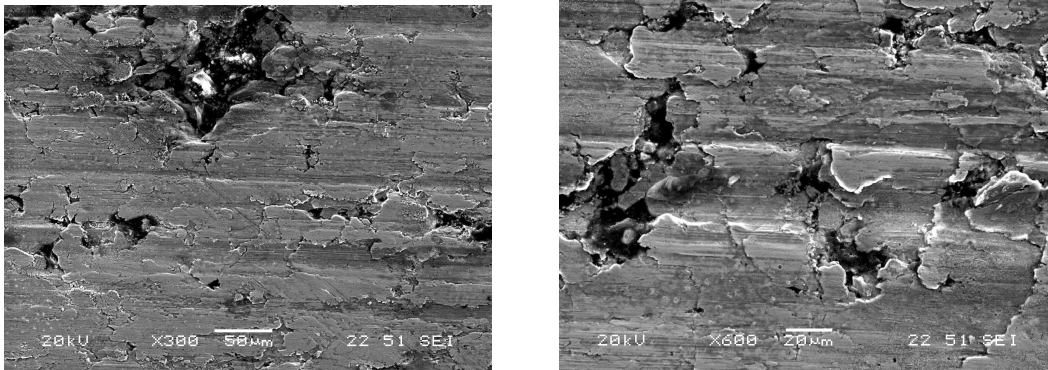
Şekil 6.22. %6 Grafit'li A4 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.

6.2.5. %8 Grafit'li A5 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları



Şekil 6.23. %8 Grafit'li A5 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.

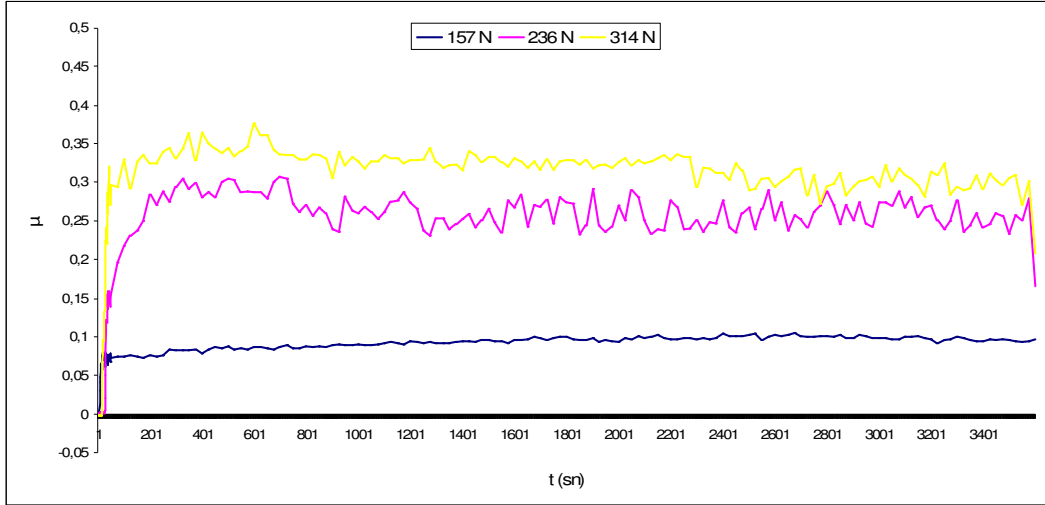
Şekil 6.23.'te Grafitin etkisiyle sürtünme katsayısında düşmeler görülmektedir. %8 oranında bulunan Grafit yağlandırıcı etkisi ve oluşturduğu gözenekler etkili olmuştur. Bu etkiler Şekil 6.24.'te farklı büyütmelerde görülmektedir. Bu numunelerde grafitin sinterlemeye olan zararlı etkisi meydana gelmiş ve aşınma ilerine yansımıştır. İyi derecede sinterlenmeyen numunelerde taneler kolayca kopabilmekte ve sürtünme yüzeyinde abrasiv aşınmaya yol açmaktadır.



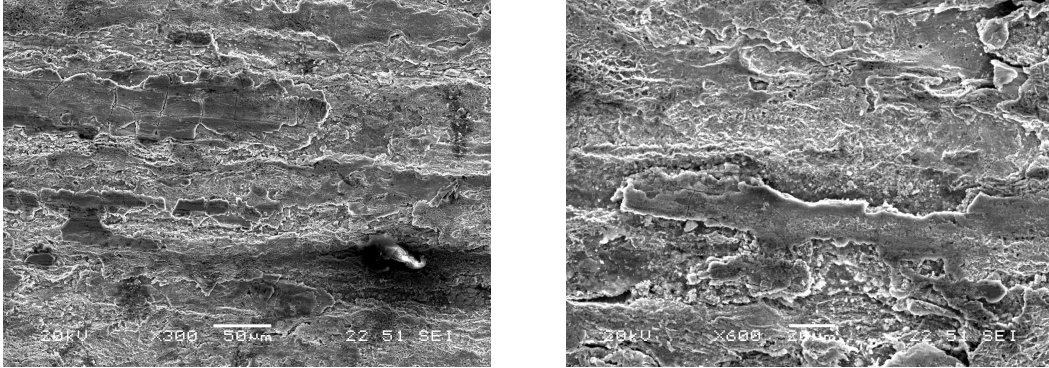
Şekil 6.24. %8 Grafit'li A5 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.

6.2.6. %0 Grafit'li B1 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları

Şekil 6. 25 de B1 balata malzemesinin zaman bağılı değişen sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Grafitin katılmadığı bu numunede katı yağlayıcı olmadığı için sürtünme katsayısı değerleri özellikle yüksek yükler için büyük bulunmuştur.



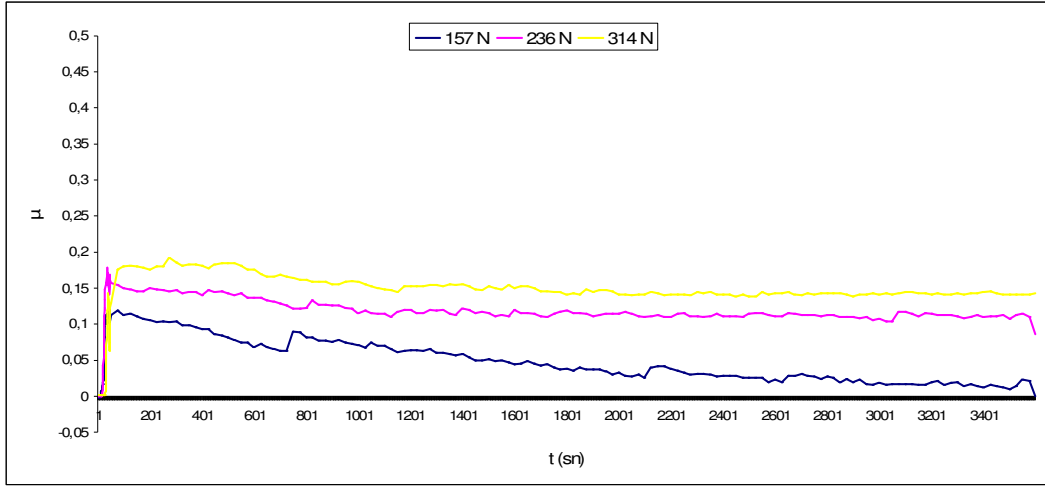
Şekil 6.25. %0 Grafit'li B1 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.



Şekil 6.26. %0 Grafit'li B1 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.

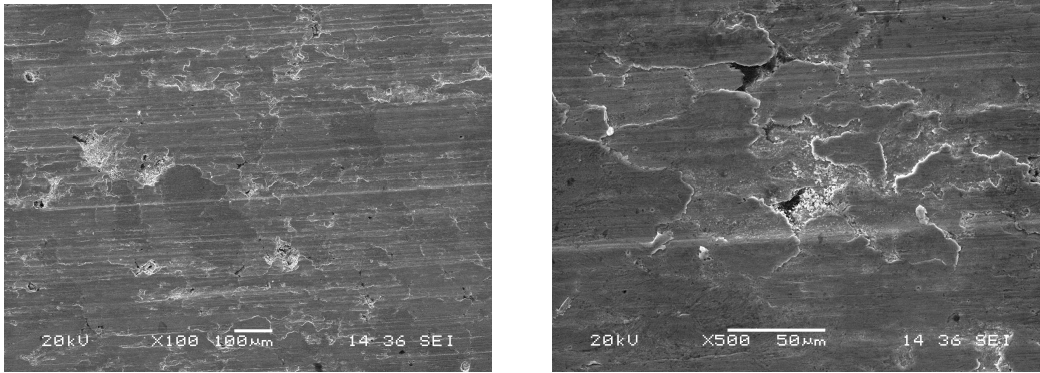
Şekil 6.26.'da aşınan yüzeyler incelendiğinde yoğun abrasiv aşınma olduğu görülmektedir.

6.2.7. %2 Grafit'li B2 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları



Şekil 6.27. %2 Grafit'li B2 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.

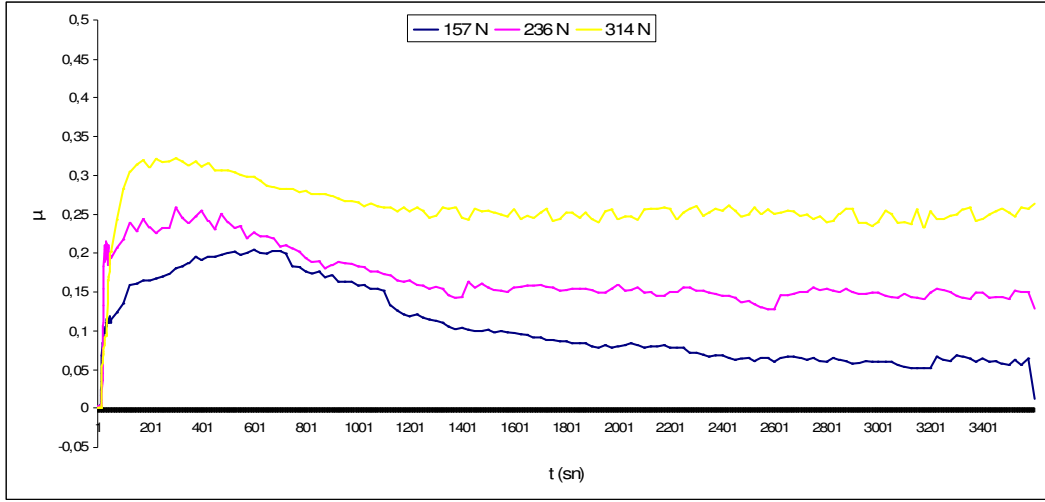
Şekil 6.27. incelendiğinde Cu-Sn-Pb alaşımli tozların etkileri daha belirgin görülmektedir. Daha önce bahsettiğimiz gibi triooksit tabakası oluşumunun neden olduğu ve neticede sürtünme katsayısında ciddi düşüşlerin olduğu görülmektedir.



Şekil 6.28. %2 Grafit'li B2 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.

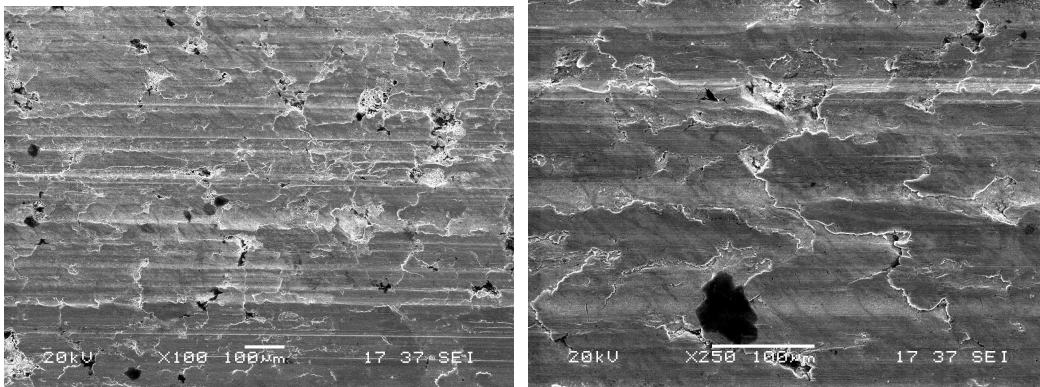
Şekil 6.28.'de görüldüğü gibi aşınan yüzeylerde A grubu numunelerindeki gibi adhesiv aşınma değil abrasiv aşınma olduğu görülmektedir.

6.2.8. %4 Grafit'li B3 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları



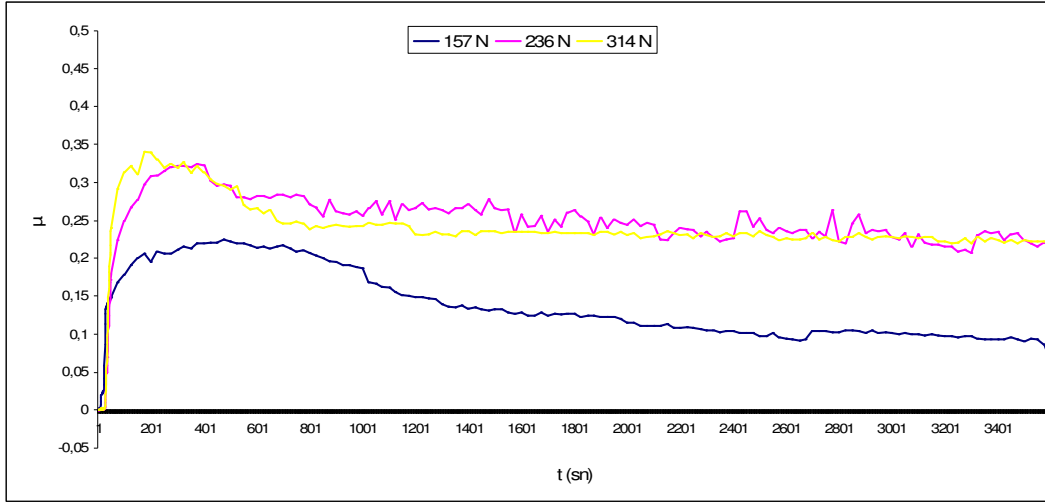
Şekil 6.29. %4 Grafit'li B3 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.

Şekil 6.29.'ü incelediğimiz de sürtünme katsayısı değerleri grafit tabakasının belli bir aşınma yüzeyinden sonra dengelenerek malzemenin gerçek sürtünme katsayısına indiği görülmektedir. Grafit ilavesinin artışı Şekil 6.30 da ki SEM aşınma izlerine etkisi görülmektedir. Grafit yine gözenekliliği gözeneklilik de aşınma mekanizmasını değiştirerek farklı pürüzlülükte yüzeyler oluşturmuştur.



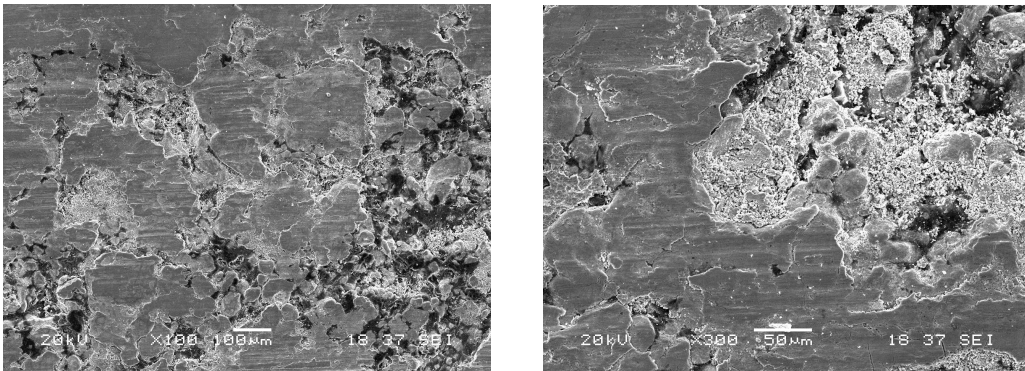
Şekil 6.30. %4 Grafit'li B3 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.

6.2.9. %6 Grafit'li B4 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları



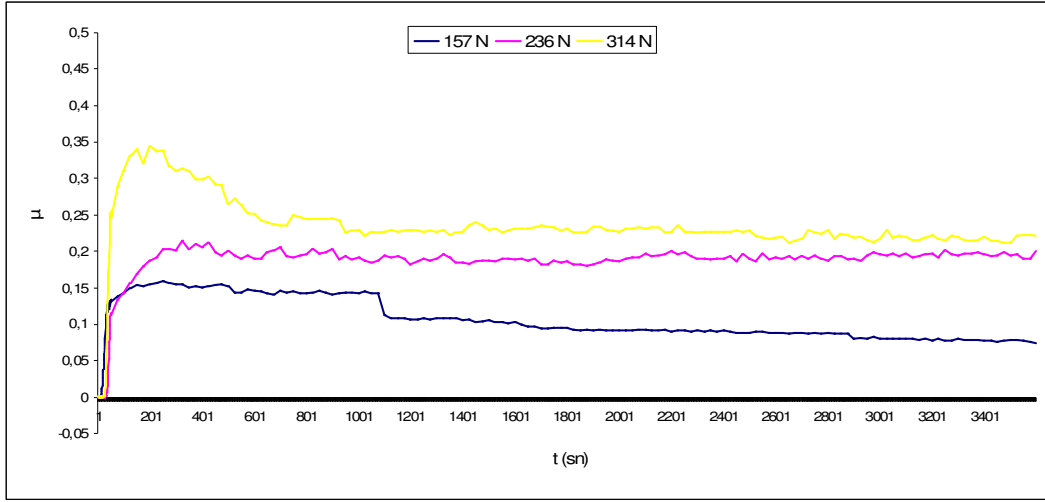
Şekil 6.31. %6 Grafit'li B4 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.

B4 balata malzemesinin sürtünme katsayısı grafiği Şekil 6.31.'de görülmektedir. A3 malzemesine benzer bir karakter sergilemiştir. Sürtünme katsayısındaki düşüşün içerisindeki Grafitin yağlandırıcı tabaka oluşturduğu meydana geldiği görülmektedir. Şekil 6.32.'de mikro yapı görüntülerinde Grafitin etkisi çok büyük gözenekler ve zayıf sinterlenmeler gözlenmiş adhesiv aşınmaya fırsat vermeden aşınma mekanizması abrasiv aşınmaya geçmiştir.



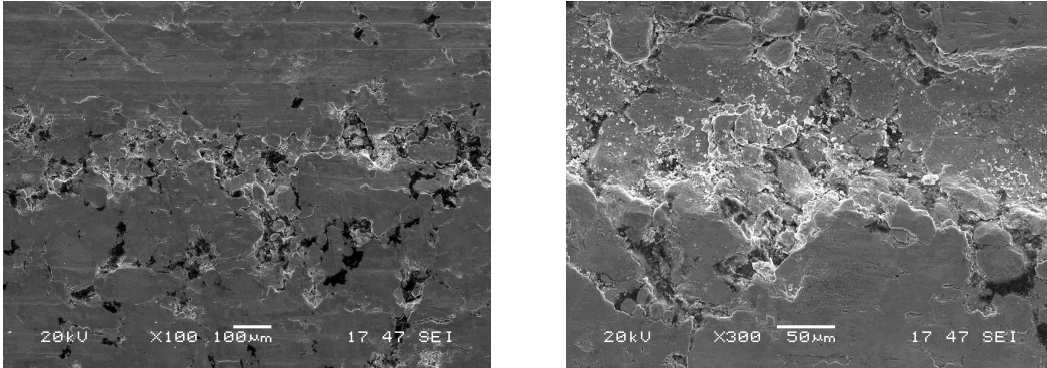
Şekil 6.32. %6 Grafit'li B4 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.

6.2.10. %8 Grafit'li B5 balata malzemesinin aşınma deney sonuçları



Şekil 6.33. %8 Grafit'li B5 balata malzemesinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği.

Şekil 6.33.'te Grafitin sürtünme katsayısında belli sabiteye ulaşmasında yardımcı olduğu görülmektedir. Aşınan yüzeylerin mikro yapıları incelendiğinde Grafitin yağlandırıcı etkisi ve gözenek oluşturarak aşınmaya abrasiv karakter kazandırdığı görülmektedir(Şekil 6.34.). Bununla birlikte katı yağlayıcı etkisinden dolayı abrasiv aşınma mekanizması olmasına karşın aşınma kaybında düşüş gözlenmiştir.



Şekil 6.34. %8 Grafit'li B5 balata malzemesinin aşınma deneyleri sonrasında SEM görüntüleri.

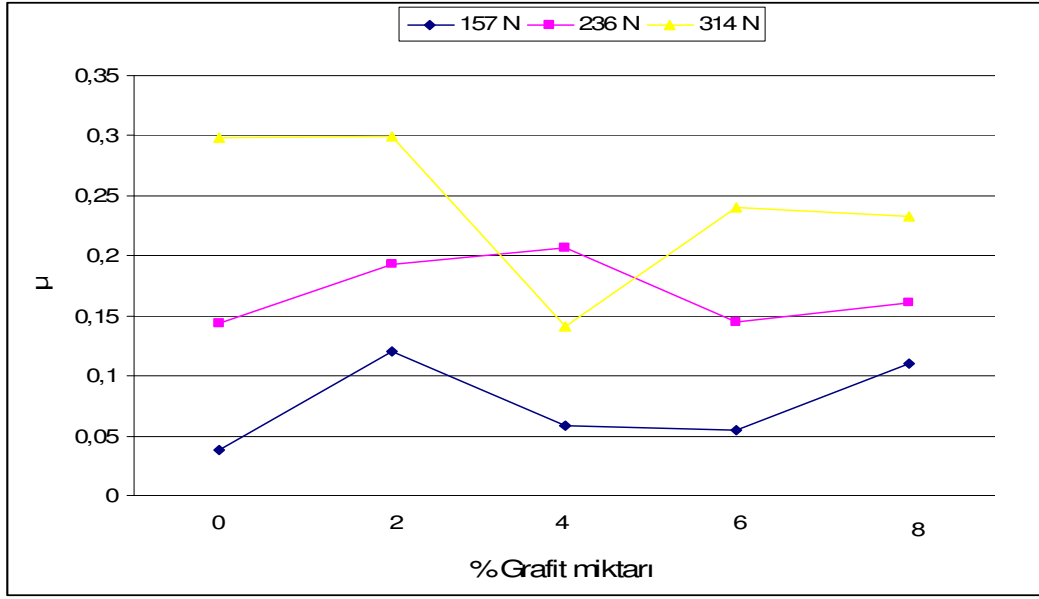
BÖLÜM 7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sürtünme Katsayısı-Grafit Oranı-Yük Sonuçları

Bu çalışmada geleneksel olarak kullanılan fren balataları yerine bronz esaslı fren balataları üretilmiştir. Bronz balataların içerisine %0, 2, 4, 6 ve 8 oranlarında grafit kullanılmıştır. Bununla birlikte Cu-Sn-Pb ön alaşımlı tozlar kullanılarak farklı numunelerin performansı test edilmiştir. Bakır-Grafit kompozit balataların sürtünme deneyi sonuçları farklı grafit oranları ve yük ilişkileri ile birlikte bir önceki bölümde analiz edilmişti. Bu bölümde ise sayılan parametrelerin sürtünme özelliklerine etkileri önemli genel sonuçları ile birlikte verilecektir.

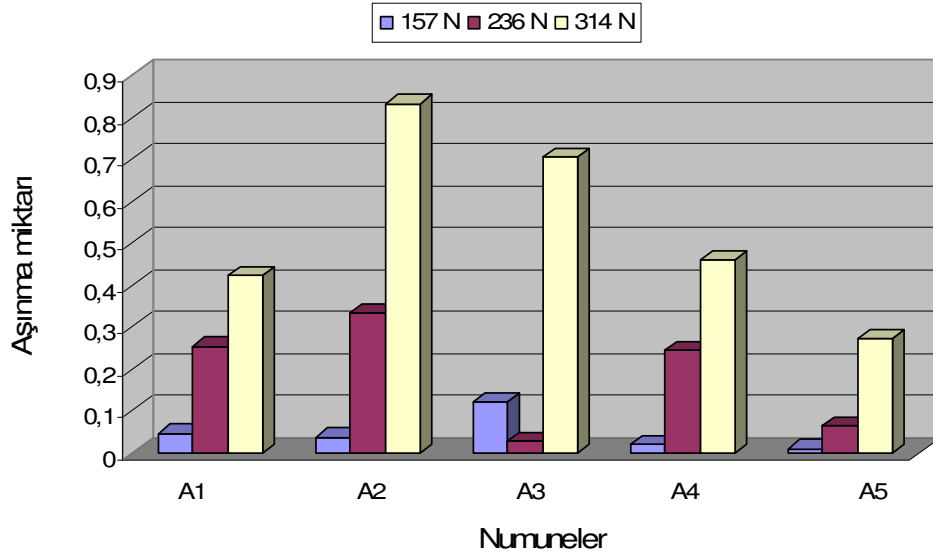
Şekil 7.1.'de ilk deneyden itibaren balata numunelerinin alışma süreci hariç kalan kısımlarının sürtünme katsayısının ortalaması alınmıştır. 0,1 m/sn aşınma hızı uygulanmıştır. % Grafit miktarı ve yüke göre sürtünme katsayısı değerleri şekilde sunulmaktadır. Grafiğe bakıldığında 157 N kuvvet karşısında sergilemiş olduğu tavrı %2 grafitli numunede yükselen eğri görülüyor. Daha sonra hızla alçalan bir tavrı sergilemekte ama %8 grafitli numunede yine %2 seviyesine çıkmaktadır.

236 N yükte sürtünme kuvveti %4 grafit oranına kadar yükselmekte, %4 grafit oranından sonra alçalmaktadır. Bunun sebebi olarak 236 N yükte %2 ve 4 oranında grafit bulunan numunelerde grafit ve gözeneğin etkisiyle balatanın diski çok iyi kavradığı sonucu çıkmaktadır. 314 N yükte ise genel olarak düşen sürtünme katsayısı görülmektedir. Grafitin yüksek yüklerde daha iyi yağlayıcı etkisi olduğu görülmektedir.



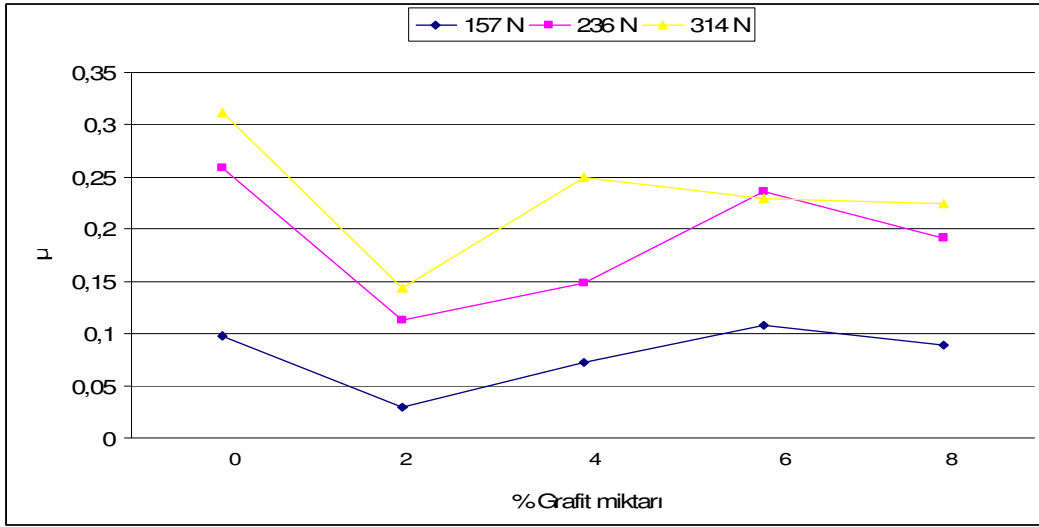
Şekil 7.1. A grubu balata numunelerinin % Grafit miktarı-Sürtünme katsayısı(μ) grafiği.

Şekil 7.2.'de 157 N yükte en çok aşınan %4 balata numunesidir. 236 N yük uygulandığında genel olarak aşınma miktarı düşmektedir. Ama %4 grafitli numunede çok az aşınma miktarı olmuştur. 314 N yük uygulandığında grafit oranı arttıkça aşınma miktarının düştüğü görülmektedir. Buda grafitin yağlandırıcı etkisi görülmektedir. Sonuç olarak, grafit ilavesiyle bronz balataların aşınma kaybı önce artmış daha sonra azalmıştır. Düşük grafit oranlarında grafitin gözenek oluşturması etkin olurken yüksek grafit oranlarında yağlayıcı etkisi öne çıkmıştır.



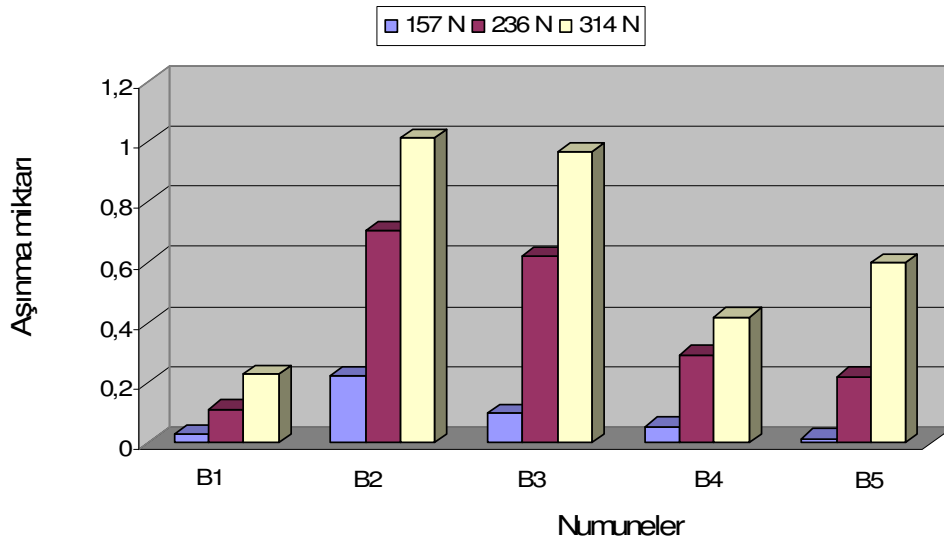
Şekil 7.2. A grubu balata numunelerin aşınma oranı grafiği.

Şekil 7.3.'de Cu-Sn-Pb ön alaşımli tozlarından oluşan B grubu malzemelerin grafit miktarının değişimi ile sürtünme katsayısı değerlerinin değişimi verilmektedir. 157 N yük altında grafitsiz numunede yüksek çıkmıştır. Grafit oranı arttıkça sürtünme katsayısında da artış gözlenmektedir. 236 N yük uygulandığında %0 oranında sürtünme katsayısı yüksek olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısı %2 oranındaki düşmüştür. Grafit miktarının artmasıyla sürtünme katsayısında artışlar olmaktadır. 314 N yük uygulandığında sürtünme katsayısı en yüksek değerlere ulaşmıştır. Grafit miktarının artmasıyla önce düşmekte daha sonra artış olduğu gözlenmiştir. Bu durum muhtemelen Grafit'in yağlayıcı görevinin tüm grafit oranlarında etkin olduğunu göstermektedir.



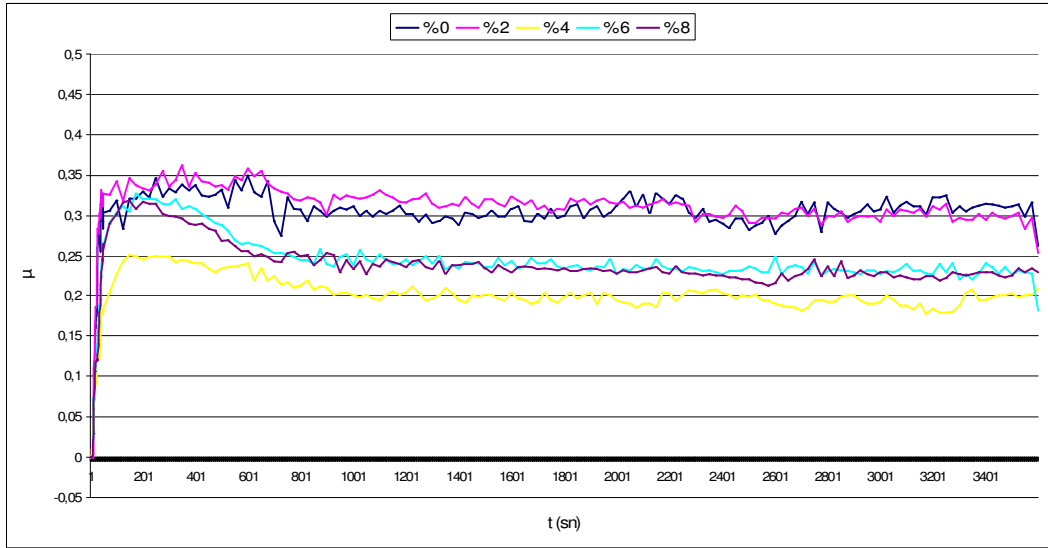
Şekil 7.3. B grubu balata numuneleri % Grafit miktarı-Sürtünme katsayısı(μ) grafiği.

Şekil 7.4.'te balata numunelerinin aşınma miktarları verilmiştir. İdeal bir balada da aşınma kaybını düşük sürtünme katsayısının yüksek olması beklenir. Şekil 7.3 ve Şekil 7.4 birlikte incelendiğinde bu şartları sağlayan numunenin B4 numunesi olduğu görülür.



Şekil 7.4. B grubu balata numunelerinin aşınma oranı grafiği.

Şekil 7.5.'te balata numunelerinin genel sürtünme katsayısı-zaman grafiği görülmektedir. Bu grafikte yük 314 N da sabit tutulmuş ve artan grafit oranlarına göre sürtünme katsayıları kıyaslamalı olarak bir grafikte A ve B grubu numunelerin ortalama değerleri alınarak toplanmıştır. % 2 grafit ilave edildiğinde sürtünme katsayısı değerinde önemli bir değişiklik gözlenmezken % 4 grafitli balatanın sürtünme katsayısı değeri minimumda elde edilmiştir. Grafit oranı % 4 den % 6 ya çıkarıldığında ise sürtünme katsayısında tekrar bir artış gözlenmiştir.



Şekil 7.5. Sürtünme katsayısı-Zaman grafiği genel görünümü.

Konforlu bir duruş için araçlarda sürtünme katsayısının 0,3–0,5 arasında olması gerektiği belirlenmesine rağmen son yıllarda kullanılan elektronik balans sistemleri ile sürtünme katsayısı değerlerinin 0,3'ten daha da düşük olabileceği de bilinmektedir. Bronz esaslı balata numunelerinde sürtünme katsayısının 0,3'ten daha düşük veriler alınmıştır.

7.2. Genel Sonuçlar ve neriler

1. Fren balatası olarak üretilen numunelerin optimum sürtünme-aşınma zellikleri 500 MPa presleme basıncında ve sinterleme sıcaklığının 800°C olduğu tespit edilmiştir.
2. Optik mikro yapılar kompozit fren disk ve balata malzemelerinin üretimlerinin başarı ile gerçekleştirildiğini göstermiştir.
3. Her balata malzemesi için elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları, 157 N, 236 N ve 314 N uygulanan kuvvet olarak ayrılarak tablolar halinde incelenmiştir.
4. Grafit miktarının artışı ile sürtünme katsayısı değerlerinde kk miktarlarda düşüşler olmuştur.
5. Tüm deneyler boyunca ortalama sürtünme katsayısı 0,05–0,35 arasında olduğu bulunmuştur.
6. Tüm aşınma deneyleri sonucunda;
 - a) 157 N kuvvet altında sürtünme katsayısının en fazla olduğu balata malzemesinin A2 numunesi %2 grafitli balata olduğu,
 - b) 236 N kuvvet altında sürtünme katsayısının en fazla olduğu balata malzemesinin B1 numunesi %0 grafitli balata olduğu,
 - c) 314 N kuvvet altında sürtünme katsayısının en fazla olduğu balata malzemesinin B1 numunesi %0 grafitli balata olduğu görülmüştür.
7. Yapılan bu çalışmalara ilaveten grafitin yanı sıra sert partiküller de ilave edilerek farklı aşınma özellikleri geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] BİJWE, J., 1997, "Composites as a friction material recent developmets in non-sbestosfiber reinforced friction materials a reveiw", Polimer Composites, 18, 3, 378-396.
- [2] REİNSCH, E. W., "Sinterede metal brake linings for automotive applications, Delco-Moraine dicsion", General motors corp dayton, Ohio, 2:9-21(1970).
- [3] SANDS, R.L., "Sintered friction materials", Powder metallurgy practice and application, George Newnes Ltd, London, 9:198-203(1966).
- [4] CLAYTON, A., "Sintered metal friction mateerials" Powder metalurgy for engineerings, 10: 166-187(1970).
- [5] HANDA, Y., KATO, T., "Effects of Cu powder, BaSO₄ and Cashew Dust on the wear and friction characteristics of automotive Brake pads", Tribology Transactipns 39: 346-353(1996).
- [6] GEMALMAYAN, N., "Hava kirliliğinde gizli tehlike asbest", Tubitak Bilim ve Teknik Dergisi, 16: 32-33(1983).
- [7] GEMALMAYAN, N., "Sürtünme malzemelerinin özelliklerinin deneysel incelenmesi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara, 30-83 (1984).
- [8] TSUKEMAN, S.A., ROBERT, E.H., MASSEY, H.S.H., "Powder metallurgy, lecturer in Metallurgy", Universty of Sheffield, England, 1-9(1965).
- [9] UYGUR, M. E., "Balata üretim teknolojisi", I. Ulusal Toz metalurjisi kongresi, Bildiriler kitapçığı, Gazi Üniversitesi, Ankara,6-17(1996).
- [10] LİBSCH, T. A., RHEE, S. K., "Microstructural changes in semimatalic disc brake pads created by low temperture dynamometer testing", Wear, 46:208-212(1978).
- [11] LİU, T., RHEE, S.K., "High temperature wear of semimetallic disc brake pads", Wear, 46:213-218(1978).
- [12] ÖZAKÇA, M., "Mechanical Properties of Compacted and Sintered Powder Metallurgy Blanks", Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi F.B.E.,1989.

- [13] ATAŞ, A., “Alaşımli Demir Tozu Peletlerinin Sinterleme Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., F.B.E.,2003,İstanbul.
- [14] FUJİKİ, A., “Present State and Future prospects of Powder Metallurgy Parts For Automotive Applications”, Materials Chemistry and Physics, 67, 298-306, 2001.
- [15] SARITAŞ, S., “Yayınlanmamış Rapor”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 1991.
- [16] BOCCHINI, G.F., LINDSKOG, P.F., “Applications and Developments of Sintered Ferrous Materials” Powder Metallurgy-An overview”, The Institute of Metals Series on Power Metallurgy, 287,(ed: I. Jenkins and J.V. Wood), 1991.
- [17] DEMİR, A., “Toz Metal Bir Çeliğin Mekanik Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, F.B.E., 1992, Ankara.
- [18] GERMAN, R. M., “Powder Metallurgy of Iron and Steel”, Jhon Willey and Sons, U.S.A., 1998.
- [19] HÖGANAS, A. B., 1996, “Production of Iron and Steel Powders”, chapter 2, s:3-21, Höganäs PM School.
- [20] OKUMUŞ, C., ÖVEÇOĞLU, M. L., “Toz Metalurjisinde Atomizasyon Yöntemi ve Bu Yöntemle Üretilen Fe Esaslı Mlazemeler”, Metal Dünyası, 1(8), 26-39, 1993.
- [21] LENEL, V. F., “Production of Iron Powder by Reduction of Iron Oxide”, Metals Handbook, Volume 7, p: 79-82, 1993, USA.
- [22] GERMAN, R. M., “Powder Metallurgy, 8. Particulate Materials Processing”, MPIF, 2005, USA.
- [23] UPADHYAYA, G. S., “Sintered Metallic and Ceramic Materials-Sintered Low-Anlloy Ferrous Materials”, John Wiley & Sons LTD., West Sussex, England,2000.
- [24] ÖZKAL, B., “Wolfram Ağır Alaşımlarında Başlangıç Toz Özelliklerinin Sıvı Faz Sinterlemesi Yoluyla Yoğunlaşma Süreçlerine Olan Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., F.B.E., 2002, İstanbul.
- [25] BRADBURY, S., “Powder Metallurgy Equipment Manual”, 1986, U.S.A.
- [26] ALPUGAN, Z., “T/M’de Presleme Tekniği ve Nükleer Yakıt (UO₂) Üretimine Uygulanması”, Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, 1981, TÜBİTAK.
- [27] GERMAN, M., R., “Sintering Theory and Practice”, Wiley-Interscience, 1996, Newyork, USA.

- [28] WILYAM, P. R., "Sintering with Nitrogen Based Atmospheres", Powder Metallurgy, 28. 85-87,1985.
- [29] YILMAZ, S. B., "Toz Metalurjisi ile Üretilen Bağlı Grafit'li Demir Parçalarda Kullanılan Farklı Demir Tozu Cinslerinin Parçalardaki Mekanik Özelliklere Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, F.B.E., 1999, İstanbul.
- [30] JAMES, B. A., "Liquid Phase Sintering in Ferrous Powder Metallurgy", Powder Metallurgy, Volume 28, Number 3, 1985.
- [31] GERMAN, R. M., "Powder Injection Molding", MPIF, 1990, Newyork.
- [32] TÜRK STANDARTLARI, "Metalik Tozların Görünür Yoğunluğunun Scatt Hacim Ölçme ile Tayini", TS 4481, Nisan, 1985.
- [33] Metals Handbook, 9th edition, Volume 7, Powder Metallurgy, ASM, U.S.A., 1984.
- [34] SZERİ, A.Z., MCGRAW, Hill, "Tribology (Friction, Wear, Lubrication)", Hemispherepub.i Washington, 1: 30-75, 1980.
- [35] TOPBAŞ, M. A., "Endüstri malzemeleri", cilt 2, Yıldız Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 219-264(1993).
- [36] YILMAZ , F., "Sürtünme ve aşınma", 9. Ulusal Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, Türkiye, 229-247, 1997.
- [37] ASHBY, M.F. and JONES, D.R.H. "Engineering materials 1, 2nd edition", Butterworth, Hineman 1: 295, 1996.
- [38] GEDİKTAŞ, M., "Sürtünme malzemelerinin deneysel tayini", İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul, 10-80, 1968.
- [39] HOLİNSKİ, R., "Fundamentals of dry friction and some practical examples", Industrial Lubtication and tribology, 53:61-65, 2001.
- [40] PERSSON, B.N.J., "theory of Friction", The ,American Physical Society, 50:47-71, 1994.
- [41] TABOR, D., "Frictionas a dissipated process. Friction of organic polymers in fundamentals of friction", 220:3, 1996.
- [42] MOORE, D.F., "Principless and Application Tribology", Pergamon Press, Oxfort, 109-156, 1975.
- [43] KAYALI, E.S., "Aşınma ve kaplı takımların aşınması", Nato-TU PVD kaplamaları projesi, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul, 5-18, 1996.

- [44] UYGUR, M.E., "Toz metalurjisi ekonomik bir üretim tekniği", 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Gazi Üniversitesi, Ankara, 477-484(1996).
- [45] FEDORCHESCO, I.M., KIRYACHEK, V.M., "New sitered friction materials", Friction and Aantifricition Materials. 4:139-142, 1970.
- [46] ALİSİON, V.V., KROGELSKY, I.V., "Tribology Handbook", Pergamon Press, Oxford, 2:35-56, 1981.
- [47] TUÇ, B., "Tribology", Basılmamış Ders Notları, Gazi Üniversitesi, Ankara,2003.
- [48] KJELDSTEEN, P., TRİLK, N., "Wear map prodution on P/M materials and the defination of transition", The Danish for Powder Metallurgy, Nordborg, Denmark, 50-110, 1995.
- [49] TRİKL, N.C., EYRE, T.S., "Tribology Methodology", Brunal University, Kingston Lane, Uxbridge, U.K., 114-145, 1993.
- [50] HALLİNG, J., "Principplless og Tribology", The Macmillian Press Ltd. America, 83-89, 1983.
- [51] THİMLER, F., OBERACKER, R., "Introduction to powder metallurgy", Printed and Bound in Great Britain at the University Press, Cambridge, 99-126, 1993.
- [52] Testing for materials selection, "Advanced materials and processes", International Journal of Fatigue, 13:99-191, 1991.
- [53] BEDGE, D., STARCEVİC, J., Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes, Wear, 254:195-202, 2003.
- [54] STACHOWİAK, G.W., BATCHELOR, A.W., "Engineering Tribology", Heineman, Boston, 1:36-44, 2001.
- [55] RİGNEY, D.A., "Sliding wear of metals", Ann. Rev. Mater. Sci., 18:141-163, 1988.
- [56] GODET, M., "The trird-body approach: A mechanical view of wear", Wear, 100:437-452, 1984.
- [57] TSE-555, "Automotive brake lining for road vehicles", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 6-33, 1992.
- [58] BOZ, M., "Toz metalurjisi ile üretilmiş bronz esaslı fren balata malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 60-85, 1999.

- [59] KLAR, E., "Powder metallurgy, Metals Handbook 9th edition", by the American Society for Metals, USA., 25:1-14, 1983.
- [60] ARNOLD, E., ANDERSON, "Friction, Lubrication and Wear Technology" ASM Handbook, 18:569-577, 1983.
- [61] DEMİRSOY, M., "Balatalar", Mühendis ve Makine, Ankara, 17(189):157-170,173.
- [62] YASUSHI, M., YOSHIAKI, K., RYOUKOU, A., "A Study on the Friction Characteristics and Durability of Band Brakes", JSAE Review, 16:245-249, 1995.
- [63] FEDORCHESCO, I.M., PAMAİOTI, I.I., DERKACHEVA, G.M., DZYKOVICH, I.Y., GORDON, G.N., "Studies of friction materials", Friction and Antifriction Materials, N.Y., London, 139-150, 1970.
- [64] KARAOĞLU, Y., "Bir aşınma test cihazının tasarımı ve imalatı" Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 47-63, 2006.
- [65] BASAVARAJAPPA, S., CHANDRAMOHAN, G., Dry sliding wear behaviour of hybrid metal matrix composites. Department of Mechanical Engineering, PSG College of Technology, MATERIALS SCIENCE, Vol.11, No. 3., 2005, 1392–1320.
- [66] KENNEDY, F.E., BALBAHADUR, A.C., LASHMORE, D.S., The Friction and wear of Cu-based silicon carbide particulate metal matrix composites for brake applications. Wear 1997, 715-721.
- [67] NAKANISHI, H., NAKAYAMA, A., MURAYAMA, T., Development of aluminum metal matrix composites (Al-MMC) brake rotor and pad. JSAE Review 23, 2002, 365–370.
- [68] UYYURU, R.K., SURAPPA, M.K., BRUSETHAUG S., Tribological behavior of AISi–SiCp composites/automobile brake pad system under dry sliding conditions, Tribology International 40, 2007, 365–373.

ÖZGEÇMİŞ

Bayram ALBAYRAK, Trabzon aykara'lı olup 28.09.1982'de İstanbul' da doğdu. İlk ve orta eğitimini Maltepe'de tamamladı. 1999 yılında HaydarPaşa Endüstri Meslek Lisesi, Metalurji Bölümünden mezun oldu. Gazi Üniversitesi Metal Eğitimi Bölümünden 2006-Ocak ayında mezun oldu.