

**KENDİNDEN YAĞLAMALI GRAFİT KATKILI BRONZ
YATAKLARIN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YUSUF ATAĞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2009
ANKARA**

Yusuf ATAĞ tarafından hazırlanan “KENDİNDEN YAĞLAMALI GRAFİT KATKILI BRONZ YATAKLARIN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. İbrahim USLAN
Ortak Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, TOBB ETÜ

Tarih: 09/02/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Yusuf ATAĞ

**KENDİNDEN YAĞLAMALI GRAFİT KATKILI BRONZ
YATAKLARIN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Yusuf ATAĞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Şubat 2009

ÖZET

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş kendinden yağlamalı bronz yataklara grafit katkısının sürtünme ve aşınma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlk olarak, ortalama toz boyutu 60 µm olan ön alaşımlı CuSn10 bronz tozlarına ağırlıkça % 1-2-3 oranında grafit tozları ilave edilerek homojen karışımlar oluşturmak için Turbula tipi karıştırıcıda 20 dakika süre ile karıştırılmıştır. Hazırlanan toz karışımları 100 MPa ile 250 MPa arasında 50 MPa aralıklarla sıkıştırılmıştır. Sinterleme işlemi azot kontrollü atmosfer içinde 800°C’de 20 dak. süre ile yapılmıştır. Sinterlenmiş yatak malzemelerinin yoğunluğu ve gözenekliliği Arşimet ilkesi uygulanarak hesaplanmıştır. Sinterlenmiş numunelerin gözenek dağılımı ışık mikroskobu ile incelenmiştir. Sonrasında yatak numunelerine 0,2 atm basınç altında 80°C’de 1 saat süre ile SAE 30 makine yağı emdirilmiş ve yağ emme kapasiteleri hesaplanmıştır. Grafit katkı ve katkısız bronz yatakların sürtünme ve aşınma başarımlarının karşılaştırılması için grafit katkısız bronz yataklar aynı yöntemlerle üretilmiştir. Hazırlanan disk-çubuk test düzeneğinde 1 m/s kayma hızında, 15 N yük altında, 2000 m yol aldırılarak dışarıdan yağlama yağılmaksızın üretilen yatak malzemeleri test edilerek aşınma değerleri ve sürtünme katsayıları hesaplanmıştır.

Kendinden yağlamalı grafit katkılı bronz yatakların sürtünme ve aşınma başarımının; grafit katkısının miktarına, sıkıştırma basıncına ve yağ içeriğine bağlı olduğu görülmüştür. Sıkıştırma basıncı arttıkça, yatak malzemesinin yoğunluğu artarken, gözeneklilik ve yağ içeriği azalmıştır. Sürtünme ve aşınma testlerinin sonuçları incelendiğinde, grafit ilave edilmesi ve sıkıştırma basıncının artırılmasıyla aşınma değerinde azalma olduğu, sürtünme katsayısının ise daha kararlı hale geldiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 914.1.093

Anahtar Kelimeler : T/M, kendinden yağlamalı, yatak, bronz, grafit, yağ emdirme, sürtünme, aşınma, gözeneklilik.

Sayfa Adeti : 112

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN
Doç. Dr. İbrahim USLAN

**INVESTIGATION OF WEAR PROPERTIES OF GRAPHITE
ADDED SELF-LUBRICATED BRONZE BEARINGS**

(M. Sc. Thesis)

Yusuf ATAK

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

February 2009

ABSTRACT

In this study, the effects of graphite addition on wear and friction performance of self lubricated bronze bearings produced by P/M technology were investigated. The content of graphite in the prealloyed CuSn10 bronze powder with a mean diameter of 60 μm was varied from 1 to 3 in steps of 1 wt pct, and blended for 20 minutes in the Turbula to homogenize the powder mixture. The powder mixtures were compacted in a die under pressures from 100 MPa to 250 MPa with 50 MPa intervals. Sintering was carried out in a nitrogen controlled atmosphere at 800°C for 20 minutes. Density and porosity of the sintered bearing materials were calculated by applying Archimedes' Principle. Porosity distribution at various pressures after sintering was recorded using optical microscope. Then, sintered samples were impregnated with SAE 30 engine oil under 0.2 atm and 80°C for an hour, and retention capabilities were calculated. Later, bronze bearing materials without graphite were produced with the same technique to compare wear performance with graphite added self-lubricated bronze bearing materials. Using pin-on-disc test apparatus produced by means of thesis, self-lubricated bearing materials were tested at 1 m/s sliding velocity, 15 N load, and 2000 m distance in laboratory conditions. Wear rates and friction coefficients were calculated.

The results indicated that the friction and wear performance of self-lubricated bronze bearing materials were dependent on amount of graphite addition, compacting pressure and oil content. When the pressing pressure was increased, the density of the bearing materials increased, but percentage of porosity and percentage of oil content decreased. Results of friction and wear tests showed that with adding graphite and increasing pressing pressure there was a decrease in wear rate and the friction coefficient became more stable.

Science Code : 914.1.093
Key Words : P/M, self-lubricated, bearing, bronze, graphite, oil impregnation, friction, wear, porosity.
Page Number : 112
Adviser : Assist. Prof. Dr. Nihat GEMALMAYAN
Assoc. Prof. Dr. İbrahim USLAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Yrd. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN'a, bilgisini ve imkânlarını benden esirgemeyen hocam Doç. Dr. İbrahim USLAN'a, tecrübelerinden yararlandığım meslektaşlarım Arş. Gör. Ali ÖZGEDİK'e, Öğr. Gör. Asım GENÇ'e, Arş. Gör. Tayfun Çağlar DENİZ'e, Uzman Alpay ÖZER'e, laboratuvar çalışmalarımda yardımcı olan Teknisyen Kadir YILMAZ'a, Arş. Gör. Teyfik DEMİR'e, Arş. Gör. Volkan KILIÇLI'ya, Mak. Müh. Yasin SARIKAVAK'a ve manevi destekleri ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan babam ve anneme teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
RESİMLER LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
3. TOZ METALURJİSİ	9
3.1. Toz Üretim Teknikleri	12
3.2. Toz Özellikleri ve Ölçülmesi	13
3.3. Tozların Karıştırılması.....	18
3.3.1. Kuru toz karıştırma	18
3.3.2. Yağlayıcılarla karıştırma	19
3.4. Toz Sıkıştırma Teknikleri	20
3.4.1. Sıkıştırma yöntemleri.....	20
3.4.2. Sıkıştırma hataları.....	28
3.5. Sinterleme	29
3.5.1. Sinterleme öncesi işlemler	30

Sayfa

3.5.2. Sinterleme teorisi.....	30
3.5.3. Taşınım mekanizmaları.....	32
3.6. T/M Malzemelerinin Mekanik Özellikleri.....	33
3.6.1. Sertlik.....	33
3.6.2. T/M parçaların çekme, yorulma ve darbe mukavemetleri.....	35
4. KENDİNDEN YAĞLAMALI YATAKLAR.....	37
4.1. Kendinden Yağlamalı Yatak Nedir?	37
4.2. Kendinden Yağlama Mekanizması	38
4.3. Kendinden Yağlamalı Yatakların Avantajları.....	39
4.4. Kendinden Yağlamalı Yatakların Dezavantajları	39
4.5. Kendinden Yağlamalı Yatakların Kullanım Alanları.....	40
4.6. Kendinden Yağlamalı Yatakların Üretimi.....	40
5. SÜRTÜNME VE AŞINMA	45
5.1. Yüzeylerin Sürtünme Özellikleri	45
5.2. Aşınma.....	46
5.3. Aşınma Olayını Oluşturan Unsurlar.....	46
5.4. Aşınmayı Etkileyen Faktörler	47
5.4.1. Esas sürtünme elemanına bağlı faktörler	48
5.4.2. Karşı elemana bağlı faktörler (tane büyüklüğü, şekli ve dağılımı)	50
5.4.3. Ortama bağlı faktörler (sıcaklık, nem atmosfer)	50
5.4.4. İşletme koşulları	50
5.5. Aşınma Mekanizmaları.....	51
5.5.1. Adezyon aşınması.....	51

	Sayfa
5.5.2. Abrasyon aşınması	52
5.5.3. Difüzyon aşınması	53
5.5.4. Oksitlenme aşınması	53
5.5.5. Yorulma ve tabakalaşma aşınması	53
6. YATAK MALZEMELERİ	54
6.1. Metalik Yatak Malzemeleri	55
6.1.1. Beyaz metal	55
6.1.2. Bakır alaşımları	56
6.1.3. Alüminyum alaşımları	56
6.1.4. Kadmiyum ve gümüş alaşımları	56
6.1.5. Sinterlenmiş malzemeler	57
6.2. Metal Olmayan Yatak Malzemeleri	57
6.2.1. Plastik malzemeler	57
6.2.2. Diğer malzemeler	58
7. YAĞLAMA VE YAĞLAYICILAR	59
7.1. Katı Yağlayıcılar	59
7.2. Gaz Yağlayıcılar	60
7.3. Yarı Katı (Gresler) Yağlayıcılar	60
7.4. Sıvı Yağlayıcılar (Yağlar)	61
7.5. Organik Yağlayıcılar	61
7.6. Sentetik Yağlar	62
8. DENEYSEL ÇALIŞMA	63
8.1. Malzeme	64

Sayfa

8.2. Deneysel Yöntem	65
8.2.1. Toz karışımlarının hazırlanması	65
8.2.2. Sıkıştırma	66
8.2.3. Sinterleme	68
8.2.4. Arşimet prensibi ile hacim hesaplaması	69
8.2.5. Yağ emdirme işlemi.....	71
8.2.6. Gözenek yapısı ve sertlik ölçümü.....	73
8.2.7. Sürtünme ve aşınma deneyleri	75
8.3. Hesaplamalar Ve Deneysel Veriler	79
8.4. Deneysel Bulgular ve Tartışma.....	82
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	99
9.1. Sonuçlar	99
9.2. Öneriler	101
KAYNAKLAR.....	103
EKLER.....	108
EK-1 Deneysel sonuçlar	109
ÖZGEÇMİŞ.....	112

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Farklı tane büyüklüğü ve farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş bakır tozunun sertlikleri.....	35
Çizelge 3.2. Hadde ve T/M çeliklerin özelliklerinin mukayesesi	35
Çizelge 4.1. T/M bronz yatakların kimyasal bileşenleri.....	42
Çizelge 4.2. T/M bronz yatakların yoğunlukları ve yağ miktarları	42
Çizelge 4.3. T/M gözenekli yatakların özellikleri	43
Çizelge 8.1. Numunelere ait kodlamalar.....	63
Çizelge 8.2. Bronz ve grafit tozlarının boyut dağılımı	65
Çizelge 8.3. SAE 30 yağ özellikleri.....	72
Çizelge 8.4. Hesaplamalarda kullanılan semboller ve anlamları.....	79

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Toz metalurjisinin pazar payları	11
Şekil 3.2. Toz metalurjisi yöntemi ile parça üretim aşamaları.....	12
Şekil 3.3. Döner numune bölücü	13
Şekil 3.4. Olası parçacık şekilleri	15
Şekil 3.5. Endüstriyel alanda kullanılan toz karıştırma metotları.....	18
Şekil 3.6. Kalıpta sıkıştırma	21
Şekil 3.7. Kalıpta sıkıştırmanın işlem sırası	22
Şekil 3.8. Çift yönlü sıkıştırma.....	23
Şekil 3.9. Yüzer kalıp.....	23
Şekil 3.10. Tek ve çift yönlü preslemede basınç dağılımı	25
Şekil 3.11. İzostatik sıkıştırma	26
Şekil 3.12. Geri yaylanma hatası	29
Şekil 3.13. Sinterleme teorisi	
a) Sinterleme başlangıcında temas halindeki parçacıklar	
b) X yarıçapında bir boyun ile küresel parçacık sinterleme kesiti	30
Şekil 3.14. Bir nokta teması başlangıcı ile sinterleme esnasındaki parçacıklar arası bağların gelişimi	31
Şekil 3.15. Kürelerin sinterlenmesinde oluşan iki tür sinterleme mekanizması	32
Şekil 3.16. Altın ve bakırın sıkıştırma basıncına bağlı sertlik değişimi	34
Şekil 3.17. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak değişik basınçlar altında sıkıştırıldıktan sonra sinterlenen kaba bakır tozu numunelerinin sertlik değişimi	34
Şekil 3.18. Çekiçle dövme ve T/M biyel kollarının yorulma özelliklerinin mukayesesi	36

Şekil	Sayfa
Şekil 3.19. Kalıcı gözeneğin mekanik özelliklere etkisi.....	36
Şekil 4.1. Kendinden yağlama mekanizması.....	39
Şekil 4.2. Kendinden yağlamalı yatakların üretimi	44
Şekil 5.1. Sürtünme yüzeylerindeki tabakalar.....	46
Şekil 5.2. Sürtünme öncesi temas noktaları	46
Şekil 5.3. Aşınmayı oluşturan unsurlar	47
Şekil 5.4. Temel aşınma mekanizmaları; 1-Yapışma, 2-Çizilme, 3- Yayınım, 4- Oksitlenme, 5- Yorulma	51
Şekil 5.5. Çizilme aşınması, a) iki kısımlı çizilme, b) üç kısımlı çizilme, c) erozyon aşınma farkların gösterilmesi	52
Şekil 8.1. Bakır-kalay faz diyagramı	69
Şekil 8.2. Toz karışımlarının yoğunlukları.....	82
Şekil 8.3. Toz karışımlarının akış hızları	83
Şekil 8.4. Toz karışımlarının görünür yoğunlukları	84
Şekil 8.5. Sinterlenmiş yoğunluğun sıkıştırma basıncı ile değişimi.....	85
Şekil 8.6. Sıkıştırma basıncı ile % gözenekliliğin değişimi.....	86
Şekil 8.7. Sıkıştırma basıncı ile % yağ emme kapasitesinin değişimi.....	86
Şekil 8.8. % Gözeneklilik ile % yağ emme kapasitesinin değişimi.....	87
Şekil 8.9. K97-3 kodlu numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri	91
Şekil 8.10. K98-2 kodlu numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri	92
Şekil 8.11. K99-1 kodlu numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri	92
Şekil 8.12. 100 MPa altında sıkıştırılmış grafitli ve grafitsiz numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri	93
Şekil 8.13. 150 MPa altında sıkıştırılmış grafitli ve grafitsiz numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri	94

Şekil	Sayfa
Şekil 8.14. 200MPa altında sıkıştırılmış grafitli ve grafitsiz numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri	95
Şekil 8.15. 250MPa altında sıkıştırılmış grafitli ve grafitsiz numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri,.....	95
Şekil 8.16. K99-1*250 kodlu numunenin 1 m/s, 15 N yük altında sürtünme katsayısı	97
Şekil 8.17. K98-2*250 kodlu numunenin 1 m/s, 15 N yük altında sürtünme katsayısı	97
Şekil 8.18. K97-3*250 kodlu numunenin 1 m/s, 15 N yük altında sürtünme katsayısı	97
Şekil 8.19. K100-0*250 kodlu numunenin 1 m/s, 15 N yük altında sürtünme katsayısı	98

RESİMLER LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Hall akış hunisi.....	16
Resim 4.1. Kendinden yağlamalı bronz yatak.....	38
Resim 8.1. Üretilen yatak numuneleri	64
Resim 8.2. Malvern Sizer E Tipi laserli toz boyut ölçme cihazı.....	65
Resim 8.3. Turbula cihazı	66
Resim 8.4. Kalıp seti ve teknik resmi	67
Resim 8.5. Instron Marka 50 kN kapasiteli basma çekme cihazı.....	68
Resim 8.6. Sinterlemede kullanılan fırın ve düzeneç	69
Resim 8.7. Arşimet düzeneği	70
Resim 8.8. Etüv fırın ve desikatör	70
Resim 8.9. Yağ emdirme ünitesi	71
Resim 8.10. Yağ emdirilmiş numuneler	73
Resim 8.11. Soxhlet düzeneği ve ekstraktör	74
Resim 8.12. Gözenek yapısı incelenen numuneler	75
Resim 8.13. Sertlik cihazı	75
Resim 8.14. Hazırlanan sürtünme aşınma düzeneği.....	77
Resim 8.15. ESİT-6kg SPA yük hücresi ve TDG marka Ai8b model 8 kanallı veri toplama sistemi.....	77
Resim 8.16. Numunelerin gözenek yapısı, x50 büyütme; a) K98-2*100, b) K98-2*150, c) K98-2*200, d) K98-2*250	89
Resim 8.17. En düşük ve en yüksek sıkıştırma basıncına göre numunelerin gözenek yapısı, x50 büyütme; a)K99-1*100, b)K98-2*100, c)K97-3*100, d)K99-1*250, e)K98-2*250, f)K97-3*250.....	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Numunenin üst yüzey alanı, mm ²
Al	Alüminyum
Al₂O₃	Alüminyum oksit
C_R	Sıkıştırma oranı
CO₂	Karbondioksit
Cr	Krom
CuSn10	Bronz
d	Tambur çapı, mm
F	Numuneye uygulanan presleme kuvveti, kN
H/D	Narinlik oranı, boy / çap
Mg	Magnezyum
MoS₂	Molibdendisülfid
N	Azot
N₀	Dönüş hızı, d/d
m₁	Kuru ağırlık, g
m₂	Parafinli ağırlık, g
m₃	Yağ emdirilmiş ağırlık, g
m_s	Sudaki ağırlık, g
m_{k@25cm³}	Karışım tozlarının 25cm ³ 'deki ağırlığı, g

Simgeler	Açıklama
m_y	Numunelere emdirilen yağ miktarı, g
P	Numuneye uygulanan presleme basıncı, MPa
PA	Poliamid
Pb	Kurşun
POM	Poliasetal
$PTFE$	Polietilentetraflorür
$p.v$	Basınç $\times$ Hız
SiC	Silisyum karbür
Sn	Kalay
St	Çelik
V	Gerçek hacim, cm^3
V_a	Ağırlığına Göre Olması Gereken Hacim, cm^3
V_g	Gözenek Hacmi, cm^3
V_y	Yağ Hacmi, cm^3
z	Eksenel / radyal basınç oranı
Zn	Çinko
μ	Sürtünme katsayısı
ρ_b	Bronzun yoğunluğu, g/cm^3
ρ_k	Karışımın yoğunluğu, g/cm^3
ρ_g	Görünür yoğunluk, g/cm^3
ρ_s	Suyun yoğunluğu, g/cm^3
ρ_y	Yağın yoğunluğu, g/cm^3

Kısaltmalar**ASTM****EP****G.Ü.****HRC****HV****ISO****SAE****T/M****TOBB ETÜ****Açıklama**

Amerikan Test ve Malzeme Derneği

Aşırı basınç

Gazi Üniversitesi

Rockwell C sertliği

Vickers sertliği

Uluslararası Standart Örgütü

Otomotiv Mühendisleri Derneği

Toz Metalurjisi

Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği
Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

1. GİRİŞ

İnsanoğlu var olduğu günden itibaren yaşamını devam ettirebilmek için çeşitli aletler ihtiyaç duymuştur. İlk çağlarda bu aletler basit ve daha çok kas gücüyle çalışsa da; daha sonrasında karmaşık ve işlevsel hale gelmiştir. Sanayi devriminden sonra ise makineleşme hız kazanmış ve insan gücüyle yapılan birçok iş, makineler aracılığıyla yapılmaya başlamıştır. Makinelerin öneminin artması ile yeni tasarımlara gidilmiş ve bunun sonucunda makine elemanlarının önemi artmıştır.

Makine elemanlarının en önemlilerinden biri de yataklardır. Yataklar iki eleman arasındaki bir veya birkaç yönde izafi harekete en düşük bir sürtünme ile izin veren fakat kuvvet doğrultusundaki harekete engel olan elemanlar olarak tarif edilirler [1]. Yatak malzemesi olarak ilk zamanlar tahta, deri, demir gibi malzemeler kullanılsa da, ilerleyen zaman ve teknoloji ile birlikte bunların yerini pirinç, bronz ve beyaz metal almıştır. Günümüzde ise, devamlı yağlama imkânı olmayan yerlerde Toz Metalurjisi (T/M) ürünü kendinden yağlamalı sinter yataklar kullanılmaktadır. T/M tekniği ile üretilmiş yataklar toplam yatak üretiminin önemli bir kısmını teşkil etmektedir.

T/M yöntemi ile üretilen yağ emdirilmiş sinter yataktaki gözenekler yağ deposu görevi yapar. Mil dönmeye başladığı zaman mil ile yatağın iç yüzeylerinin sürtünmesi sonucu sistemde sıcaklık yükselir. Yağın genleşme katsayısı metalinkinden büyük olduğundan; yatak ile mil arasındaki yağ filminin hidrodinamik basınçtaki değişikliğin etkisiyle, yağ gözeneklerden mile doğru emilir ve yağlama sağlanmış olur. Dönme işlemi durduğunda yatak soğur ve kılcallık etkisiyle yağ tekrar gözenekler tarafından emilir. Bu sayede yatak dışarıdan yağlama gereksinimi duymadan kendi kendini yağlamış olur.

Üretilen T/M yatakların malzemesi, toz şekli ve boyutu, presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı, gözenek miktarı ve dağılımı, yağ emme miktarı yatakların kendi kendini yağlama şartlarını iyileştirilmek ve emdirilen yağ miktarını düzenlemek üzere kontrol edilmektedir.

Yatakların kullanım yerlerine göre kendinden beklenen özellikleri sağlayan malzemelerin seçimi ya da üretilen yatakların kullanım yerlerinin belirlenmesi önemlidir. Aşınmanın zamana bağlı olarak geliştiği göz önüne alındığında basınç $\times$ hız ($p.v$) değeri, aşınma miktarı analizinde dikkate alınması gereken önemli bir değişkendir. Yatakların uygun $p.v$ değerleri arasında kullanılması durumunda aşınma değerleri azalmakta ve yatak ömrü uzamaktadır [2].

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, T/M üretim teknikleri kullanılarak kendinden yağlamalı grafit katkılı bronz yatak malzemeleri üretilip, bu malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ortalama toz boyutu 60 μm olan ön alaşımlı CuSn10 bronz tozlarına ağırlıkça % 1-2-3 oranlarında grafit tozu ilave edilerek homojen karışımlar oluşturulmuş ve hazırlanan toz karışımları 100 MPa ile 250 MPa arası basınçlarda sıkıştırılmıştır. Elde edilen ham mukavemete sahip yatak malzemeleri sinterlendikten sonra yoğunlukları ve gözeneklilikleri hesaplanmıştır. Sinterlenen yatak malzemelerine yağ emdirilerek yağ emme kapasiteleri hesaplanmıştır. Daha sonra, grafit katkılı ve katkısız bronz yatakların aşınma performanslarının karşılaştırılması için grafit katkısız bronz yataklar aynı yöntemlerle üretilmiştir. Hazırlanan disk-çubuk (pin-on-disk) test düzeneğinde yatak malzemeleri test edilerek aşınma değerleri ve sürtünme katsayıları belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Yong-Xin ve ark., sinterlenmiş bronz yatakların yüksek hız ve düşük yük altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Sabit devir ve farklı yükler altında, yağlı ve yağsız ortamlarda yatakların; sıcaklık artışı, sürtünme katsayısı, yağlayıcı kaybı ve aşınma miktarı belirlenmiştir. Devir sabit tutulmak şartı ile düşük yüklerde yağlı ortamda yapılan deneyde aşınma ve sürtünme başarımının daha iyi olduğunu ve sıcaklık artışının başarımı etkileyecek seviyede olmadığını belirtmişlerdir [3].

Cho ve ark., üç farklı katı yağlayıcının (grafit, Sb_2S_3 ve MoS_2) otomobil fren balatalarının sürtünme performansına etkilerini araştırmışlardır. Hacimsel olarak % 10 grafit, % 7 grafit + % 3 Sb_2S_3 , % 7 grafit + % 3 MoS_2 içeren sürtünme malzemeleri üretmişler ve tribolojik özelliklerini fren dinamometresi kullanarak ölçmüşlerdir. Sonuç olarak, Sb_2S_3 ve grafitin sürtünme katsayısını kararlı hale getirdiğini ancak Sb_2S_3 ve MoS_2 ilavesinin aşınma direncini azalttığını belirtmişlerdir [4].

Akhlaghi and Zare-Bidaki, alüminyuma grafit ilavesinin kuru ve yağlı ortamlarda aşınma başarımına etkisini pin-on-disk cihazı kullanarak araştırmışlardır. Alüminyum tozuna ağırlıkça % 5 ila % 20 oranında grafit tozu ilave ederek toz metalurjisi yöntemleri ile kompozit malzemeler üretmişlerdir. Sonuç olarak grafit ilavesinin her iki ortamda da sürtünme katsayısını azalttığını ancak kuru ortamda daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ağırlıkça % 5 grafit içeren numunelerin grafitsiz numunelere göre daha iyi aşınma performansı gösterdiğini, ancak grafit miktarının % 5'den fazla olan numunelerde aşınma başarımının büyük ölçüde gerilediğinden bahsetmişlerdir [5].

Bagchi, farklı hız, basınç ve çalışma sürelerinde grafit ve MoS_2 emdirilmiş bronz yatakların performansı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yatakların çalışma koşullarıyla ilgili bir tablo oluşturulmuştur. Grafit ve MoS_2 emdirilmesi bronz yatağın aşınma başarımını olumlu yönde etkilemiştir; ancak grafitin MoS_2 'e göre aşınma başarımına daha fazla katkı sağladığı belirtilmiştir [6].

Gawarkiewicz ve Wasilczuk, yaptıkları çalışma kapsamında, bir enerji santralının vanalarında bulunan yatakları incelemişlerdir. Bu yatakların işletim koşulları olan aşırı yükleme ve küçük salınımlı hareketler altında kendinden yağlamalı yatakların aşınma davranışlarını tasarladıkları test cihazında incelemişlerdir. Salınım yapan bir yatakta ölçülen aşınma değerleri, tek yönlü hareket yapan bir yataktan daha fazla olduğu tespit edilmiştir [7].

Gnanaraj ve Raman, yağ emdirilmiş sinterlenmiş bronz yatakların farklı yük, hız ve yağ altında aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Aşınma testlerini, sarkaç dinamometresi kullanarak 100 saat süreyle gerçekleştirmişlerdir. Deneyler neticesinde sinterlenmiş yataklarda sadece yağ kaybı olduğu ve metal kaybı olmadığı belirtmişlerdir [8].

Boz ve Kurt, farklı miktarlarda grafit içeren numunelerin mekanik özellikleri ve sinterlenebilirlikleri araştırmışlardır. Demir tozlarına ağırlıkça % 1 ila % 15 oranında grafit tozu ilave ederek toz karışımları elde edilip karıştırıcıda 20 dakika süreyle karıştırılmışlardır. Karışımları 500 MPa altında sıkıştırmışlardır. Sinterleme işlemini ayrık amonyak atmosferinde gerçekleştirmişlerdir. Üretilen malzemeleri, ASTM B-312 çapraz kırılma dayanımı standardı kaynak alınarak, 0,050 kN/s yükleme hızı ile 100 g yük altında test etmişlerdir. Ağırlıkça % 2'ye kadar grafit katkısının, parçacıkların temas alanını artırmakta olduğunu ve grafitin yağlayıcı olarak görev yaparak sinterleme davranışlarını olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde, ağırlıkça % 5'e kadar grafit içeren numunelerin iyi sinterleme davranışı gösterdiklerini ve perlit miktarındaki artıştan dolayı sertliklerinin de arttığını belirtmişlerdir. Ancak, serbest grafitin demir tozlarının etrafına yerleşmesinden dolayı ağırlıkça % 5'den daha fazla grafit ilavesinin sinterlemeyi olumsuz etkilediğinden ve bunun neticesinin ise sertlikte ve çapraz kırılma dayanımında azalma olduğundan bahsetmişlerdir [9].

Ünlü ve ark., kendinden yağlamalı bakır, Fe-Grafit, FeCu-Grafit ve bronz-demir esaslı CuSnFe-Grafit yatakların aşınmalarını belirlemek için radyal kaymalı yatak

test cihazı tasarlamışlardır. Numuneleri farklı $p.v$ değerlerinde test ederek sürtünme katsayılarını ve aşınma miktarlarını belirlemişlerdir. T/M bronz yatakları, T/M demir yataklara göre daha düşük mekanik özelliklere sahip olduklarını, en düşük sürtünme katsayısının CuSn10 bronzunda elde edildiğini belirtmişlerdir [10].

Ünlü ve ark., T/M yöntemiyle CuSn10 bronzu ile CuZn30 pirincinden ürettikleri kaymalı yatakları sürtünme ve aşınma özelliklerini belirlemişlerdir. Deneyleri radyal kaymalı yatak aşınma test cihazında 20 N yük, 1500 d/d ve 2,5 saatte yapmışlardır. Karşı aşındırıcı malzeme olarak SAE 1050 çelik mil kullanmışlardır. Yağlı ortamda CuZn30 yatağın sürtünme katsayısı ve aşınma kayıpları bronz yataklara göre daha düşük elde edilmiştir. Buna karşın CuSn10 yatağın mili daha fazla aşındırdığı gözlenmiştir [11].

Ünlü ve ark. başka bir çalışmada, CuSn10 bronzunda ürettikleri kaymalı yatakları farklı $p.v$ değerlerindeki sürtünme ve aşınma performanslarını incelemişlerdir. Aşındırıcı olarak SAE 1050 çeliğinden yapılmış mil kullanmışlardır. Deneyleri 0,0125, 0,025 ve 0,05 (N/mm.s) $p.v$ değerlerinde gerçekleştirmişlerdir. Kuru ortamda en yüksek sürtünme katsayısı $p.v = 0,05$ değerinde 0,8 olarak, yağlı ortamda ise en düşük sürtünme katsayısı $p.v = 0,0125$ değerinde 0,05 olarak ölçülmüştür [12].

Ünlü ve ark., bronz yatakları fiziksel, ısı ve tribolojik özelliklerinden dolayı, kaymalı yatak malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanıldığını ve bu malzemenin tribolojik başarımlar açısından iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, CuSn10 bronzundan üretilen kaymalı yatakları farklı yük ve hızlarda, kuru ve yağlı ortamlarda sürtünme ve aşınma özellikleri incelenerek, birbirleriyle kıyaslanmıştır. Karşı aşındırıcı malzeme olarak burada da SAE 1050 çelik mil kullanılmış ve deneyler radyal kaymalı yatak aşınma test cihazında, 10 ve 20 N yük, 750 ve 1500 d/dak hızları kullanılarak, kuru ve yağlı ortamlarda aşınma deneyleri yapılmıştır. Kuru ortamda sürtünme katsayısı ve ağırlık kaybı değerlerinin yağlı ortamdakilere göre daha yüksek olduğunu ve yüksek yük, düşük devir altında her iki ortamda da aşınma kaybının ve sürtünme katsayısının arttığından bahsetmişlerdir [13].

Karadere, ürettiği kendinden yağlamalı kaymalı bronz yatakları farklı hız ve basınçlarda yatağa ilave yağın gönderildiği ve gönderilmediği durumlar için deneylere tabi tutarak sürtünme katsayısının değişimini incelemiştir. Düşük basınç, yüksek hız ve yağlı ortamda daha iyi sonuçlar elde etmiştir [14].

Ünlü ve Atik, kalay kurşun esaslı SnPbAlZn alaşımı ve bu malzemelerin esasını oluşturan saf Sn, saf Pb ve alaşım elementlerini oluşturan saf Al ve saf Zn'dan ürettikleri kaymalı yatakların sürtünme ve aşınma özelliklerini belirlemişlerdir. Deneyler radyal kaymalı yatak aşınma deney cihazında 20 N yük, 1500 d/dak ve 2,5 saatte yapılmıştır. Karşı aşındırıcı malzeme olarak SAE 1050 çelik mil kullanılmıştır. SnPbAlZn malzemesinin, saf durumda üretilen numunelere göre daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu belirlenmiştir [15].

Tüfekçi ve ark., % 85 yoğunluktaki bronz ve demir esaslı kendinden yağlamalı gözenekli yatakların aşınma ve sürtünme başarımlarını kıyaslamışlardır. Deneylerde yükü, kayma hızını ve sıcaklığı değiştirerek yatakların aşınma değerlerini ve sürtünme katsayılarını belirlemişler, bronz yatakların daha iyi sürtünme ve aşınma değerleri verdiği sonucuna ulaşmışlardır [16].

Durak ve Duran, bakır esaslı gözenekli yatak malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerini dinamik yükleme koşulları altında farklı $p.v$ değerlerinde araştırmışlardır. Deneylerde oluşan çatlakların malzeme içindeki gözeneklerin birleşmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir [17].

Kurt ve ark., T/M metodu ile bakır tozlarından ASTM B-438 standardına göre grafitli ve grafitsiz olmak üzere iki çeşit yatak üretmişlerdir. Grafitsiz yataklar, saf bakır tozlarından 250 ila 500 MPa arasında farklı basınçlarda üretilmiştir. Grafitli tür yatakların üretiminde ise bakır tozlarına ağırlıkça % 1,75 grafit ilave edilmiş, aynı basınç değerleri kullanılmıştır. Sinterleme işlemi 830°C'de 30 dakika süre ile azot kontrollü fırında gerçekleştirildikten sonra bütün numunelere atmosfer basıncı altında oda sıcaklığında yağ emdirilmiştir. Aşındırıcı olarak St50 çeliğinden yapılmış, 24 HRC sertliğinde ve 1 μ m yüzey pürüzlülüğüne sahip mil, bir torna

tezgahına bağlanmıştır. T/M bakır yataklar, bu mile geçirilip üzerine yük uygulanmış ve gerçek çalışma şartlarına benzer bir ortam oluşturulmuştur. Sonuç olarak, yağ emdirilmiş ve grafitli olarak üretilen yatakların aşınma miktarının grafitsiz tipe oranla daha az olduğunu ifade edilmiştir [18].

Mutlu ve Koç, fren balatalarının sürtünme katsayısının tespiti için test cihazı tasarlamışlardır. Bu cihazda değerler istenilen aralıklarda algılanarak bilgisayara kaydedilebilmekte ve sürtünme katsayısı-sıcaklık, sürtünme katsayısı-zaman, sıcaklık-zaman grafikleri oluşturulabilmektedir. Devir değişimi ve basınç mekanik olarak ayarlanmaktadır. Benzerleri ile kıyaslandığında kontrolü oldukça kolay ve kullanılan elektronik donanım sayesinde amaca uygun olduğu belirlenmiştir [19].

Savaşkan ve Pürçek, çalışmalarında çinko-alüminyum-bakır ile çinko-alüminyum-bakır-silisyum alaşımını kokil döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Ürettikleri alaşımların aşınma özelliklerini imal ettikleri disk-çubuk tipinde bir aşınma düzeneği yardımıyla, bu alaşımlardan imal ettikleri kaymalı yatakların aşınma özelliklerini ise bir yatak deney düzeneği yardımıyla incelemişlerdir. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların geleneksel bir yatak malzemesi olan CuSn12 bronzundan daha az aşındıkları gözlenmiştir. Benzer şekilde çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan üretilen yatakların da CuSn12 bronzundan üretilen yataklardan daha üstün aşınma direncine sahip oldukları belirlenmiştir. En az aşınmanın ZnAl40Cu2Si1 alaşımında ve bu alaşımdan üretilen yatakta meydana geldiği ifade edilmiştir. Alaşımların aşınma özellikleri hakkında disk-çubuk düzeneğinden elde edilen bulguların, bu alaşımlardan üretilen yatakların aşınma davranışları için de geçerli olduğu belirlenmiştir [20].

Boz ve Kurt, demir tozlarına ağırlıkça % 1 ile % 15 arasında grafit tozları ilave edip homojen bir dağılım sağlamak için bu tozları üç boyutlu bir karıştırıcıda 20 dakika süre ile karıştırmışlardır. Hazırlanan toz karışımları 500 MPa basınç altında tek yönlü pres kullanılarak kalıpta sıkıştırdıktan sonra farklı oranlarda grafit içeren numunelerin sıkıştırılabilirlikleri ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sinterleme işlemi kırılmış amonyak atmosferinde gerçekleştirilmiştir. ASTM B-312 çapraz kırılma dayanımı standardına uygun olarak üretilen numuneler 0,050 kN/s yükleme

hızında 100 gram yük altında test edilmiştir. Ağırlıkça % 2'ye kadar olan grafit miktarının toz parçalarının temas alanını arttırdığı ve katı yağlayıcı olarak görev yaparak sinterlemeyi olumlu yönde etkilediğini belirtilmiştir [21].

Arslan ve ark., ana element olan saf bakır tozuna, saf kalay ve ön alaşımlı kalay (Cu_3Sn - ϵ fazı) tozu katarak iki farklı karışım hazırlamışlardır. Her iki karışıma % 0,5 grafit tozu katmışlardır. Karşılaştırma yapmak amacıyla piyasada hazır karışım olarak satılan tozdan da numuneler hazırlamışlardır. Çalışmalarında presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresinin hazırladıkları karışımlardan ürettikleri yatakların özelliklerine etkilerini incelenmişlerdir. Beklendiği gibi presleme basıncı arttıkça ham yoğunluk, sinterlenmiş yoğunluk ve radyal kırılma dayanımı belirli değere kadar arttığını ancak metaller arası bileşik tozu kullanılan karışımda radyal kırılma dayanımının önemli ölçüde yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Presleme basıncı arttıkça sinterleme sonrası boyut değişimi azalmıştır. Sinterleme sıcaklığı 780 ile 830°C arasında arttıkça yaklaşık 810°C civarında bütün numunelerde ani boyut değişimi (artma) gözlenmiştir. Metaller arası bileşik tozu kullanılan numunelerde diğer iki numunede gözlenen yerel iri gözeneklere rastlanmamıştır. Yüksek basınçlarda preslenerek nispeten yüksek sıcaklıklarda sinterlenen metaller arası bileşik içeren numunelerde tane büyümesinin daha büyük olduğu ifade etmişlerdir [22].

3. TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisi, metal işleme teknikleri arasında sıra dışı yöntemlerden biri olup metal tozlarından parçalar üretme teknoloji ve sanatıdır [23].

Toz metalurjisinde amaç, metal ve alaşımlarının tozlarını tamamen ergitmeden basınç ve sıcaklık yardımıyla hemen hemen istenilen geometriye sahip dayanıklı parçalar üretmektir. Bunun için ilk olarak tozlar hazırlanan bir kalıp içersinde sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi oda sıcaklığında ya da daha yüksek sıcaklıklarda yapılabilir. Daha sonra üretilen parçaya dayanıklılık kazandırmak amacıyla sinterleme adı verilen pişirme işlemi yapılır. Sinterlemede sıcaklık kullanılan metal tozunun ergime sıcaklığının altında tutulur. Eğer sinterlenecek parça farklı toz karışımlarından oluşuyorsa, sinterleme sıcaklığı en yüksek eğrime sıcaklığına sahip metal tozunun ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta yapılır. Sinterleme sonrasında elde edilen parçaya son şeklini vermek için bazen ikincil işlemler de uygulanabilmektedir.

Toz metalurjisinde ilk aşama toz üretimidir. Toz, boyutu 1 mm'den küçük, ince olarak bölünmüş katı olarak tanımlanmaktadır. Tozun en önemli özelliği, yüzey alanının hacmine oranının göreceli olarak yüksek olmasıdır. Tozlar katı ile sıvı arasında bir davranış gösterirler. Tozlar sıkıştırılabilirler fakat bu olay tersinmezdir [24].

Toz metalurjisinin avantajları ve dezavantajları

Bazı metallerin ergime sıcaklıklarının çok yüksek olması ve bu sıcaklıklara ulaşamaması (tungsten, molibden gibi), bazı özelliklerin ancak T/M ile sağlanabilmesi (kendinden yağlamalı yataklar gibi), süper alaşım ve sert metaller gibi önemli malzemelerin bu yöntem ile üretilmesi toz metalurjisini zorunlu kılar [24, 25]. Çoğu zaman talaşlı imalat gerektirmemesi ve malzeme kullanım oranının % 100'lere ulaşması sayesinde hammadde kayıplarının en az düzeye indirilmesi, aynı parçadan çok sayıda üretim gerektiğinde uygulanabilen en iyi yöntem olması, boyut ve şekil kontrolü en önemli avantajlarından [25, 26].

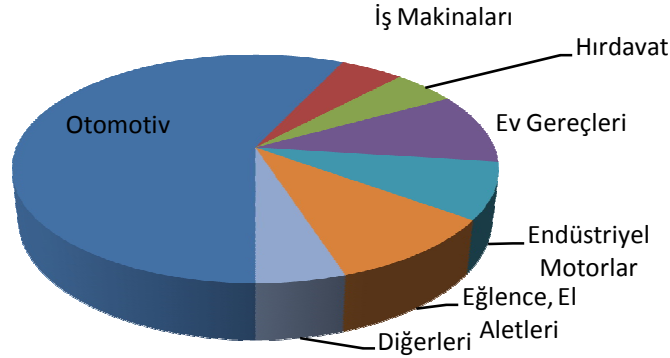
Bu üstünlüklerinin yanında, metal tozlarının ve kullanılan takımların maliyetlerinin yüksek olması, toleransların talaşlı işlemlere göre daha kaba olması, T/M parçalarının ilave işlem yapılmadığı takdirde düşük mekanik özelliklere sahip olması ve parça tasarımlarının sınırlı olması gibi zayıflıkları mevcuttur.

Toz metalurjisinin uygulama alanları

T/M oldukça yaygın bir alanda kullanılmaktadır. Tungsten lamba teli, diş dolguları, kendinden yağlamalı yataklar, otomotiv güç aktarma dişlileri, zırh delici mermiler, elektrik kontakları ve fırçaları, mıknatıslar, nükleer güç yakıt elemanları, ortopedik protezler, iş makinelerinin parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, şarj edilebilir piller, boyalar, patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtları, sert lehim bileşikleri ve katalizörlerde kullanım alanları bulurlar. Bakır ve bakır esaslı alaşım tozları, alüminyum ve paslanmaz çelik tozunun pazar payları 2000 yılından itibaren giderek genişlemektedir [2].

T/M'den yapılmış alüminyum parçalar özellikle otomobil üreticilerinin ilgisini fazlasıyla çekmektedir. Uygulama olarak kam mili yatakları, ayna parçaları, amortisör parçaları, pompalar ve bağlantı kolları sayılabilir. Paslanmaz çeliklerde ise daha çok 400 serisinin kullanımı ekzost flanşlarında, ABS sistemlerinin sensör parçalarında giderek artmaktadır. Paslanmaz çelikler ayrıca kilitlerde ve bazı parçalarda kullanılabilmektedir [27].

T/M parçaların dünya genelindeki pazar payları Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu pazarın % 70'i otomotiv endüstrisi tarafından kullanılmaktadır. Avrupa yapımı arabalar 7 kg, Japon yapımı arabalar ise 5 kg T/M parçaya sahip olduğu halde, Amerikan arabaları 16 kg'dan daha fazla T/M parça içermektedir [28].



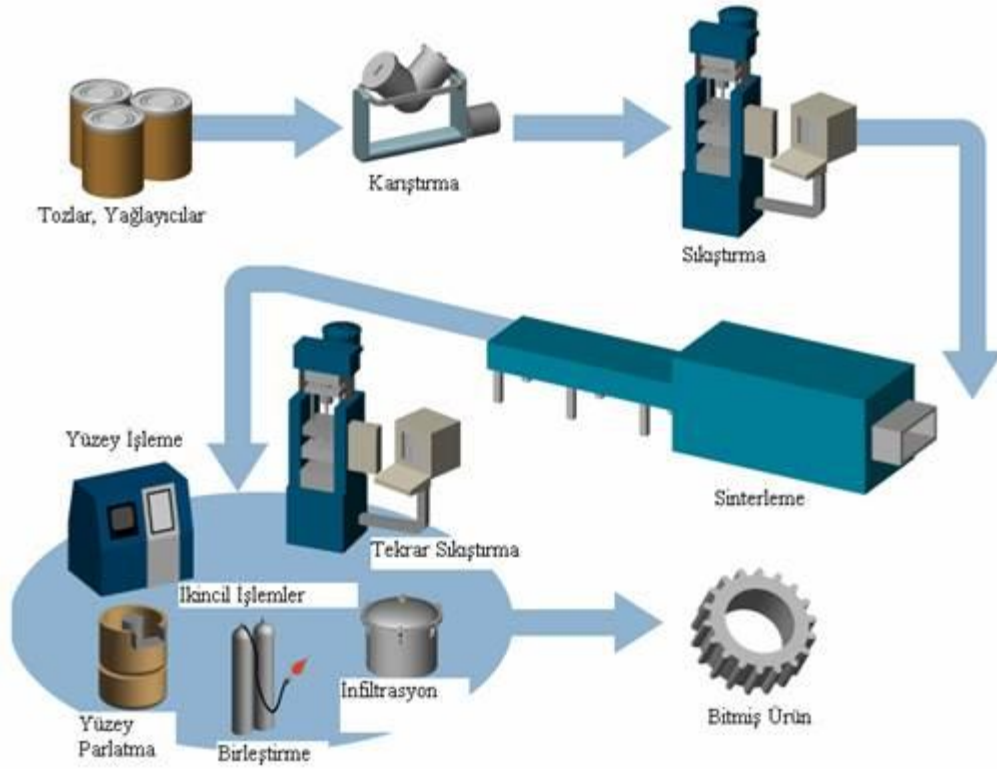
Şekil 3.1. Toz metalurjisinin pazar payları [29]

Toz metalurjisinde temel basamaklar

Gerekli boyut, şekil ve paketlenme özelliklerine sahip metal tozunu güçlü, mükemmel ve yüksek performanslı bir şekle dönüştüren toz metalurjisinde temel basamaklar, toza şekil verilmesi veya sıkıştırma işlemi ve sinterleme yolu ile tozların ısı birleştirilmesidir. Ancak T/M parçalarının üretiminde genel olarak beş aşama mevcuttur [2]:

- Toz hazırlama
- Soğuk presleme
- Sinterleme
- Yağ emdirme ve kalibrasyon (gerekli hallerde)
- Tam yoğunluk işlemleri

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, ana toz, metal ilaveler ve yağlayıcılar bir karıştırıcı içerisinde karıştırılarak sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi bir kalıp içerisinde yapılır ve oluşturulan şekil sinterlenerek (pişirme) gerekli mukavemete kavuşturulur. Böylece bu uygulama bir tozun şeklini, özelliklerini ve yapısını bitmiş bir ürüne dönüştürür. Gerektiğinde elde edilen ürün ikincil işlemlere tabi tutulur.



Şekil 3.2. Toz metalurjisi yöntemi ile parça üretim aşamaları [29]

3.1. Toz Üretim Teknikleri

Toz üretim yöntemi; üretilen tozun boyutunu, şeklini, saflığını, mikro yapısını, maliyetini ve diğer özelliklerini belirler. Metal tozları farklı üretim yöntemleriyle üretilebileceği gibi, bir üretim yöntemiyle pek çok metal veya alaşım tozları elde edilebilir. Toz üretim yöntemleri olan mekanik yöntemler (talaşlı imalat, öğütme), elektroliz yöntemi, kimyasal yöntemler (doğrudan indirgeme, karbonil), çökeltme yöntemi (sıvıdan çökeltme, gazdan çökeltme), atomizasyon yöntemleri (su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, döner disk atomizasyonu, döner elektrot atomizasyonu, vakum atomizasyonu, ultrasonik gaz atomizasyonu) hakkında literatürde geniş bilgi yer almaktadır [2].

3.2. Toz Özellikleri ve Ölçülmesi

Metal tozlarının birçok özelliği üretim yöntemlerine göre belirlenmektedir. Bu sebeple toz metalurjisi parçaların kullanım alanlarına göre değişik yöntemlerle üretilen tozlar kullanılmaktadır. Bazı durumlarda ise farklı yöntemlerle üretilmiş tozlar aynı parçanın yapımında karışım oluşturularak kullanılmaktadır. Örnek olarak elektrolitik ve indirgenmiş bakır tozlarının bronz yataklarda kullanılması verilebilir. Buna benzer istisnalar dışında genellikle her uygulamada farklı tekniklerle üretilmiş belli özellikteki tozlar kullanılır. Metal tozlarının özellikleri kimyasal ve fiziksel olmak üzere ikiye ayrılır. Tozların kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirleyebilmek için kullanılan toz numunesi, toz kütlesinin tüm kesitinden alınarak kütleye ait özellikleri doğru olarak vermelidir. Bunun için özel numune alıcılar ve ayırıcılar üretilmiştir. Bu alıcılar bir tüp şeklindedir ve açılır kapanır pencereleri vardır. Tüp toz kütlesinin içine batırıldıktan sonra tüpün pencereleri açılarak tüpün içine toz dolması sağlanır. Daha sonra bu tozlar harmanlanıp bölücülerle parçalanarak özellik tespiti yapılır. Bu amaçla döner numune bölücüler yaygın olarak kullanılır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Döner numune bölücü

Bir tozun boyutunu veya diğer özelliklerini doğru olarak belirlemek için, tozun uygun bir biçimde dağıtılması gerekir. Dağıtma işlemi, parçacık boyutu ne kadar küçük olursa o kadar güçleşir. Birçok parçacık için yüzey aktifleştiren sıvılar ve

mekanik veya ultrasonik çalkalama parçacıkların dağıtılması ve özelliklerin doğru olarak belirlenmesinde etkili olabilir. Özellikle 100 µm'den daha küçük parçacıklar, dağıtma işlemine direnç gösteren yüksek çekim kuvvetlerine sahiptirler. Önemli derecede topaklanmaya neden olan kılcal kuvvetler, ağırlıkça % 0,1 gibi oldukça küçük nem düzeylerinde oluşur. Nem topaklanmaya neden olduğu için, toz kurutma işlemi genellikle iyi bir ilk adımdır. Tozu su, alkol veya diğer bir çözücü ile tamamen doyurmak başka bir seçenektir. Daha sonra dağıtıcı sıvılar, tozları birbirinden uzaklaştırmak için sulu çamura eklenir. En yaygın dağıtıcı sıvılar, yüklü anyonik veya katyonik uç grupları olan karbon zincirlerine sahip küçük kutup moleküllerdir. Uç gruplar hidroksil (OH^-), sülfonat (SO_3^-), sülfat (SO_3^-) veya amonyak (NH_4^+) bileşikleri olabilir. Bunlar, bulaşık deterjanlarının çoğunda bulunur. Ayrıca kayma kuvvetleri de bir tozun dağıtılmasına yardım eder. Mekanik karıştırma veya ultrasonik çalkalama, topaklanmayı dağıtmada çok tercih edilen yöntemlerdir . Tozların içerisine genellikle üretim sırasında kimyasal indirgenme sonucu yabancı parçacıklar karışır. Yeterince indirgenmemiş toz taneciklerinde oksit kalıntılarına rastlanabileceği gibi tane sınırında da oksitler görülür. Tozların hava ile teması sonucu bir süre sonra tozlar oksitlenebilir. Tozların preslenmesi sırasında Cr, Zr, Al, Mg, Pb, Sn gibi metallerin kararlı oksitlerinin kalıp ve zımba yüzeylerinde olumsuz etkileri söz konusudur. Tozların kimyasal özelliğinin tespiti için mevcut analiz yöntemlerine literatürde geniş biçimde yer verilmiştir [2].

Tozların boyut, şekil, görünüş vb. özellikleri T/M'sinde önemlidir. Bu özellikler T/M ürünü parçaların mekanik özelliklerini etkiler. Toz boyut ölçümü mikroskop ile inceleme, eleme, sedimantasyon, ışık saçılımı ve kırınımı gibi yöntemler uygulanarak belirlenebilmektedir. Ancak ölçülen parametrelerdeki farklılıklar nedeniyle, çeşitli parçacık boyut analiz yöntemlerinin genellikle aynı sonuç vermediği bilinmektedir.

Işık saçılımı ve kırınımı, toz boyutunun lazer ışını ile ölçüldüğü modern bir tekniktir. Bu teknikte, otomatik parçacık boyut analiz cihazlarında, parçacıklar hareketli bir akışkan içinde dağıtılan parçacıklar bir detektörün önünden geçirilir. Akışkan içinde hacimce % 1'den daha az katı kullanır. Kullanıldığı fizik yasalarına bağlı olarak

detektör, parçacık boyutu ile orantılı olan ışık saçılması, elektrik iletkenliği veya diğer sinyallerdeki değişimleri ölçer. Kabarcıklar gibi yapay süreksizlikler var ise, bu durum hataya sebep olur.

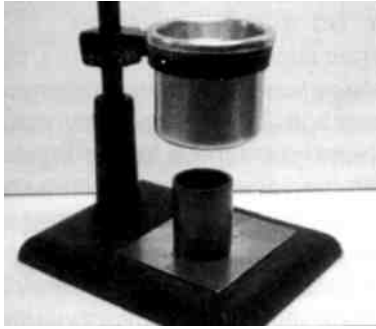
Parçacık şekli; paketlemeyi, akışı ve sıkıştırılabilirliği etkiler. Bundan başka, bir tozu üretmek için kullanılan şartların belirlenmesine yardımcı olur. Parçacık şeklini sayısal olarak ifade etmek zor olduğundan; şeklin bir anlam ifade etmesi için, nitelikle ilgili tanımlayıcılar sıkça kullanılır. Şekil 3.4, parçacık şekillerini ve uygun niteliksel tanımlamaları göstermektedir.



Şekil 3.4. Olası parçacık şekilleri

Yüzey alanı, çok sayıdaki parçacığın dış yüzeyinin ortalama bir ölçüsüdür. Böyle bir ortalama parametre kimsayal tepkimeye girebilirlik, paketleme, katalitik davranış, adsorpsiyon, kirlenme, hatta briketleme ve sinterleme ile ilişkilendirildiği için kullanışlıdır. Yüzey alanı, toz şekli ve büyüklüğüne bağlıdır. Küçük boyutlu ve karmaşık şekilli parçacıkların yüzey alanı büyüktür. Yüzey alanı arttıkça, birim kütledeki yüzey alanı artar ve bunun sonucu olarak tozdaki sürtünme miktarı artar, paketleme zorlaşır.

Toz akış hızı, 50 g ağırlığındaki bir tozun, akış ölçerden aktığı saniye cinsinden süre olarak ifade edilir ve pres kalıplarının doldurulmasında kullanılan önemli bir toz özelliğidir. Kısa akış süreleri tozların serbest akışını, uzun akış süreleri ise tozlar arası yüksek sürtünmeyi gösterir. Test genellikle % 5 gibi bir hataya karşılık gelen $\pm 2-3$ s arasında tekrarlanabilirliğe sahiptir. Toz akış hızı Hall, Scott, Arnold akış ölçeri veya Carney hunisi ile ölçülür. Resim 3.1’de Hall akış hunisinin resmi verilmiştir.



Resim 3.1. Hall akış hunisi

Tozun şekli, akış hızını etkiler. Küresel tozlar en yüksek akış hızına sahiptir. Elek altı tozların yüzey alanları fazla olduğu için sürtünmeden dolayı kolayca akmazlar. Bu nedenle preslenmeleri zordur.

Görünür yoğunluk bir tozun kütlesinin, sarsılmamış ve gevşek halde (sıkıştırılmamış) işgal ettiği hacme oranı olarak ifade edilir. Görünür yoğunluk Hall hunisi ile belirlenir. Hall hunisinden serbest halde akan toz, 25 cm³ hacmindeki kabı doldurur. Kabın üzerindeki fazla toz metal bir cetvel yardımıyla sıyrılır ve kabın içinde yani 25 cm³’lük hacimde kalan tozun kütlesi belirlenir. Toz kütlesi, kabın hacmine bölünerek görünür yoğunluk elde edilir.

Teorik yoğunluk doğrudan gözenek miktarını verir. Görünür yoğunluk, kalıp yüksekliğini ve zımba boyunu belirlediğinden tasarım parametreleri arasında gösterilir. Tozlar arası sürtünme artarsa, görünür yoğunluk düşer. Görünür yoğunluğu artırmanın bir yolu; büyük tozlar arası boşluğu dolduracak miktarda ince

toz içeren bir boyut dağılımı elde etmektir. İnce tozlar optimum miktarı geçerse görünür yoğunluk tekrar düşmeye başlar.

Toz kütlelerinin yoğunluğunun diğer bir parametresi ise vurgu yoğunluğudur. Bir toz kütlelerinin ilave bir basınç uygulamadan sadece titreştirerek elde edilebilecek en yüksek yoğunluğudur. Vurgu yoğunluğu, görünür yoğunluktan ~% 10 daha fazladır [2,30].

Sıkıştırılabilirlik, uygulanan bir yük altında elde edilen ham yoğunluk (green density) değeri olarak ifade edilir. Tipik test geometrisi, basit bir silindir veya dikdörtgendir. Kalıp toz ile görünür yoğunlukta doldurulur ve yoğunluk sıkıştırmadan sonra ölçülür. Ham yoğunluk sıkıştırmadan sonraki yoğunluktur ve sıkıştırılabilirliğin ifade edilmesinde temel oluşturur. Sünek tozların ham yoğunluğu görünür yoğunluğun 2-3 katı olabilir. Sıkıştırma oranı C_R , 400 MPa standart sıkıştırma basıncı altındaki hacim veya yoğunluk değişimini ifade eder.

Tozun sertliği, tozun şekli, toz boyutu, iç gözeneklerin varlığı, yağlayıcılar sıkıştırılabilirliğe etki eden faktörlerdir.

Ham mukavemet, toz kütlelerinin preslenmiş halinin mukavemetidir. Tozların bir arada kalmasında % 90 mekanik kilitlenme ve % 10 soğuk kaynak etkilidir. Ham mukavemet sinterlenmiş mukavemete göre çok düşüktür. Ham mukavemetten beklenen parçanın kalıptan çıkması ve taşınması için gerekli dayanıma sahip olmasıdır. Küresel tozlar ve yağlayıcı ilavesi ham mukavemeti düşürür.

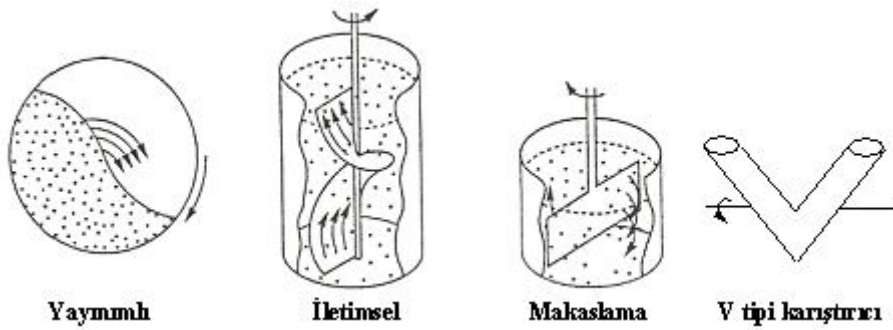
Bir tozun mikro yapısının incelenmesi toz şekli, iç gözenekler, segregasyon, soğuma hızı, uydulaşma gibi özellikler hakkında fikir sahibi olmamızı sağlar. Mikro yapı incelemesi için toz ilk önce epoksi reçine ile karıştırılır ve katılaştırılır. Sonrasında parlatma ve dağlama yapılarak mikro yapı incelenir [2].

3.3. Tozların Karıştırılması

Karıştırma, kimyasal bileşimi ve ebadı farklı olan tozların birbirleri içerisinde homojen olarak dağıtılmasıdır. Genel olarak tozlar, kuru halde veya katı yağlayıcılarla karıştırılmaktadır [24].

3.3.1. Kuru toz karıştırma

Toz karıştırma metotları Şekil 3.5’de gösterildiği gibi yayımlı (difüzyon), iletimli ve makaslama. Bunlardan başka laboratuvar amaçlı çeşitli toz karıştırma metotları da vardır. En çok tercih edilen V tipte karıştırıcıdır. Karışım tankındaki toz hacmi, karışımın etkinliğini belirler. Karıştırıcıdaki toz kütlesi aşırı olduğunda tozun karışım hızını engellenir.



Şekil 3.5. Endüstriyel alanda kullanılan toz karıştırma metotları [31]

Karıştırıcının kapasitesine göre toz hacmi % 20 – 40 oranında olduğunda optimum karışım sağlanabilir. Aynı zamanda karıştırıcının dönüş hızı da tozun, karışım etkinliğini belirlemektedir. Karıştırıcının yavaş dönüşüyle yeterli karışım elde etmek için gerekli zaman uzar. Ancak hızlı dönüşü tozların merkezkaç kuvvetiyle çeperlere yapışmasına neden olacağından karışım etkinliği düşer. En iyi karışım merkezkaç kuvvetleri düşük olduğunda gerçekleşir. Arzu edilen dönüş hızı yer çekimi ve merkezkaç kuvvetler dengesinin sağlandığı hız olarak kabul edilebilir. Silindirik bir karıştırıcı için dakikadaki optimum dönüş hızı (N_0), Eş. 3.1’de verildiği gibi

hesaplanabilir. Ancak bunlar genellikle yüksek kapasiteli T/M üretimleri için uygulanmaktadır.

$$N_0 = 32.d^{-0.5} \quad (3.1)$$

Burada d, tambur çapı olup birimi metredir. Daha küçük tambur çapında daha hızlı dönüş gerekmektedir. Metalik parçacıklar daha uzun karıştırma sürelerinde deformasyon pekleşmesine maruz kalabilir ve bu nedenle de preslenebilme kabiliyetleri düşer. Uygun olarak tasarlanmamış karıştırma düzeneği farklı iki toz arasında boyut, şekil ve yoğunluk gibi pek çok sorumlara neden olarak parçacıklar segregasyonuna neden olabilir. Karıştırma esnasında tozların ufalanması da mümkündür. Daha uzun süren dönüş hareketiyle daha küçük ve küresel tozlar ortaya çıkabilir. Karıştırmada yumuşak ve sert parçacıklar kullanıldığında yumuşak parçacıklar sert parçacık yüzeyine sıvanabilir [24, 31].

3.3.2. Yağlayıcılarla karıştırma

Karıştırma, şekillendirme öncesi ilk basamaktır. Karışımın kalitesi çok önemlidir. Çünkü karışımın yetersizliği daha sonraki işlemlerle giderilemeyebilir. Yağlayıcılar, T/M şekillendirmeyi kolaylaştırmak için gerekebilir.

Karışımında heterojenlik bir kaç nedenle gerçekleşebilir. Bu nedenler, tozdan yağlayıcıların ayrışması, tozların özelliklerine göre bölgesel olarak bir araya toplanması ve segregasyondur. Bu durumlar, düzgün olmayan paketleme yoğunluklarına neden olur ve elde edilen üründe çarpılma meydana gelebilir. Küçük veya düzensiz şekilli parçacıklarda homojenliği sağlamak için daha uzun karıştırma zamanlarına ihtiyaç vardır. Küçük toz parçacıklarda homojen karışım için gerekli zaman artırıldığında topaklaşma (aglomerasyon) olabilir. Topaklaşma, karıştırılan tozların bir araya toplanmasıdır. Topaklaşmanın gerçekleşmesi ise homojen karışımı güçleştirir. Parçacıkların üzerinde kutupsal çekim kuvvetlerinin, topaklaşmanın ve Parçacıklar arası sürtünmenin düşürülmesi ile karışımın etkinliği artırılabilir. Böylece

paketlenme özelliği artırılır. Bu olay, mikron altı parçacıklarda daha da önem kazanır [24].

Yukarıda belirtilen problemlerin en aza indirilmesi amacıyla toz karışımlarına yağlayıcıların ilave edilmesi gerekmektedir. Yağlayıcılar, toz karıştırma esnasında tozların topaklaşmasını engeller ve tozların akıcılığını artırır. Ayrıca presleme esnasında tozların daha iyi preslenmesine yardım ederek ham yoğunluğun artmasına katkı sağlar. Bunların yanı sıra, presleme kalıbının çeperleri ile toz kütlesi ara yüzeyinde sürtünme kuvvetini azaltarak hem kalıp aşınması engellenir hem de presleme sonrası numunelerin kalıptan çıkarılması kolaylaşır. Toz karışımlarında sıklıkla kullanılan yağlayıcılardan bazıları kalsiyum stearat, akravaks C etilenbistearamid, teflon, çinko stearat, parafin mumu ve lityum stearattır. Bunlardan en fazla tercih edilen yağlayıcı çinko stearattır. Bunlar aynı zamanda yüzey aktif elementleri olarak da bilinir. Yağlayıcıların ortalama partikül boyutu 5-30 μm 'dir. Bu yağlayıcılar, toz karışımlarına ağırlıkça % 0,5-2 oranında ilave edilir. Yağlayıcılar, daha sonra preslenmiş toz kütlesinin bünyesinden sinterleme esnasında buharlaşarak uzaklaşırlar [24, 30, 31].

3.4. Toz Sıkıştırma Teknikleri

Tozlar basınç uygulandığında; önce toz parçacıklarının birbiri üzerinden kayması ile daha sonra da yüksek basınçlarda parçacığın şekil değiştirmesiyle yoğunlaşırlar. Yoğunluk artması düşük basınçlarda önce hızlıdır, fakat gözenekler kapandıkça toz, yoğunlaşmaya karşı daha fazla direnç gösterir. Sıkıştırma işleminden sonra parça elle tutulabilir bir mukavemet kazanmış olsa da, esas mukavemet sinterlemeden sonra kazanılır [2, 28, 32].

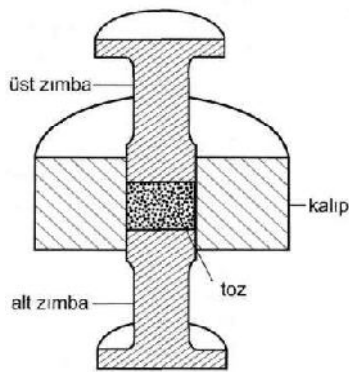
3.4.1. Sıkıştırma yöntemleri

Tozların sıkıştırılmasında uygulanan şekillendirme metotları şu şekilde sınıflandırılabilir.

1. Kalıpta sıkıştırma
2. İzostatik sıkıştırma
3. Yüksek enerjili sıkıştırma
4. Ekstrüzyonla sıkıştırma
5. Titreşimle sıkıştırma

Kalıpta sıkıştırma

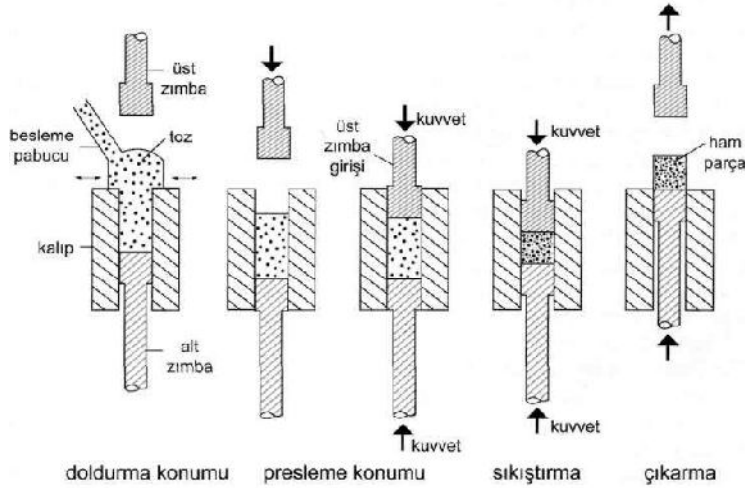
Kalıpta sıkıştırma, bir tozu istenilen şekle getirmek için alt ve üst zımbalar aracılığıyla basınç uygulama yöntemidir. Kalıpta sıkıştırılmanın basitleştirilmiş bir görünüşü Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilmiştir. Başlangıçta kalıp boşluğundaki toz görünür yoğunluktadır ve her bir parçacık 4-6 komşusu ile temas halindedir. Parçacığın temas halindeki komşu sayısına koordinasyon sayısı denilmektedir. Görünür yoğunluktaki toz kütleinde herhangi bir bağ mukavemeti yoktur. Basınç uygulandıkça parçacıklar boşluklara doğru kayar, yerleşir ve şekil değiştirerek komşu parçacıklarla bağ oluşturur. Şekil değiştiren parçacıkların sertliği artar, bu yüzden sıkıştırmaya devam etmek için daha yüksek basınç uygulamak gerekir. Sonuç olarak malzeme geri dönüşü olmayan bir noktaya kadar sertleşir. Çok sert ve çok yumuşak malzemeler düşük basınç altında sıkıştırılırlar [2, 10].



Şekil 3.6. Kalıpta sıkıştırma

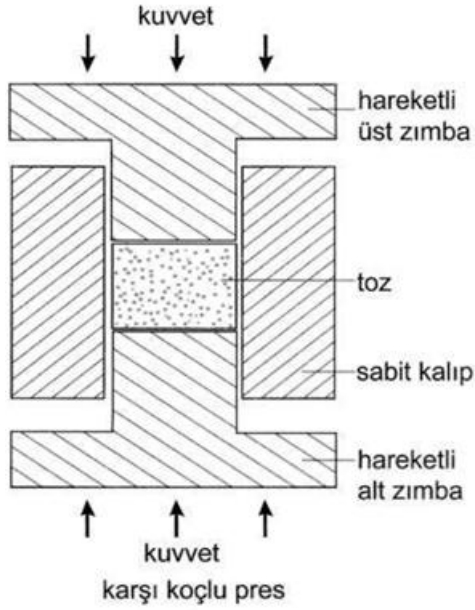
Kalıpta sıkıştırma işleminde, alt zımba doldurma konumunda iken kalıp boşluğuna tozlar dolar. Doldurma pabucunun geri çekilmesinden sonra ölçülü toz miktarı

presleme konumuna çekilir. Üst zimba kalıba girer, alt ve üst zimbalar merkeze doğru ilerler. Sıkıştırmadan sonra, üst zimba geri çekilir ve alt zimba çevrimin tekrarlanmasından önce parçayı çıkarır. İşlem sırası Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Kalıpta sıkıştırmanın işlem sırası

Sıkıştırılmış toza ham parça adı verilir. Presleme sonrası yoğunluk ham yoğunluk, presleme sonrası mukavemet ise ham mukavemet olarak adlandırılır. Basıncın alt ve üst zimbaların her ikisinden de yapıldığı işleme çift hareketli presleme denir (Şekil 3.8). Aynı etki üst zimbanın basınç uygulaması sırasında kalıbın hareketli olması ile de elde edilebilir (Şekil 3.9). Eğer basınç tek bir zimbadan uygulanırsa parça yoğunluk açısından daha az homojendir ve bu işleme tek hareketli presleme denir. Preslemeden sonra kalıp içinde kalan parçayı çıkartmak için uygulanması gereken kuvvete çıkartma kuvveti adı verilir. Presleme esnasında kalıp yüzeylerinin yağlanması kalıp yüzeyinin aşınmasını azaltır ve kalıptan parçanın kolay çıkmasına yardımcı olur. Yağlayıcı olarak çinkostearat ve çeşitli parafin kökenli sentetik mumlar kullanılmaktadır. Yağlama işlemi, için genellikle 100 ml aseton içinde 10 g çinkostearat çözündürülerek hazırlanan çözeltinin her defasında kalıp yüzeylerine sürülmesi ile yapılır ya da malzeme karışımına ağırlıkça % 0,5-1,5 oranında katı yağlayıcı katılması ile sağlanır [2, 32, 33]



Şekil 3.8. Çift yönlü sıkıştırma



Şekil 3.9. Yüzer kalıp

Kalıpta sıkıştırmada en önemli zorluklardan biri kalıp yüzeyinde oluşan sürtünmedir. Bu sürtünme, ham parçaların kolay çıkarılmasını engellediği gibi aynı zamanda yoğunluk farklılıklarının oluşmasına sebep olur. Zımbanın toza karşı olan hareketi kar küremeye benzetilebilir: Zımbaya yakın olan yerler yoğundur, ancak zımbanın ucuna uzak olan yerlerde yoğunluk giderek azalmaktadır. Bu mesafeye bağlı basınç sönümünün sebebi tozun kuvveti kalıp çeperlerine sürtünme olarak yaymasıdır.

Basınç, ham yoğunluğu belirlediği için basınç farklılıkları yoğunluk farklılıklarını meydana getirir.

Sinterlemede oluşan boyut değişimi ham yoğunlukla ters orantılı olduğundan düşük yoğunluklu bölgelerde daha fazla değişme oluşur. Kalıp yüzeyi sürtünmesine bağlı olarak oluşan değişken ham yoğunluk, parçanın sinterleme sırasında çarpılmasına sebep olur. Netice olarak, kalıpta sıkıştırma en iyi yoğunluk gradyanlarını en az indiren şekilde uygulanır. Yoğunluk gradyanları, alt ve üst zimbaların çift hareketli preslerde aynı anda ortaya doğru hareket etmeleri ile azaltılmaktadır. Sıkıştırılmamış malzemede yoğunluğun en düşük olduğu bölgeye nötr bölge denir. Çoğu uygulamada istenilen, nötr bölgenin parçanın orta bölgesinde olmasıdır.

Basınç oranı parçanın kalınlık/çap oranına göre değişmektedir. Parça kalınlığı arttıkça basınç aktarımında açık bir azalma meydana gelir. Homojen basınç değişimi kısa ve geniş parçalarda oluşur.

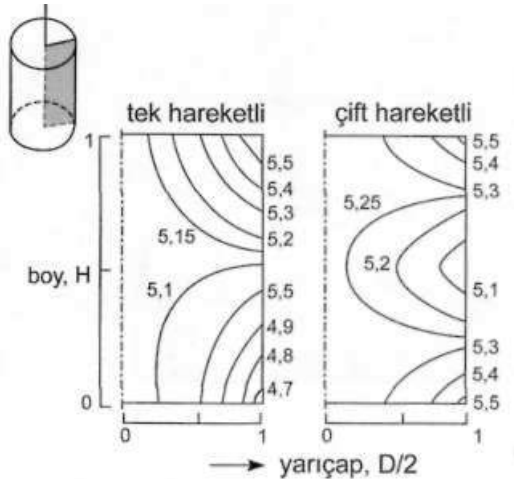
Kütle boyunca basınç homojen olmadığı için yoğunluk da homojen değildir. Kütledeki ortalama ham yoğunluk ortalama basınca bağlıdır. Yoğunlaşmaya sebep olan ortalama basınç her zaman uygulanan basınçtan daha azdır ve üç değişkene bağlıdır:

$$\frac{P}{P_x} = e^{-4\mu zH/D} \quad (3.2)$$

- H/D faktörünün temsil ettiği parça geometrisi
- z faktörünün temsil ettiği eksenel / radyal basınç oranı
- μ faktörünün temsil ettiği kalıp duvarı sürtünmesi

Şekil 3.10'da hem tek hem de çift hareketli preslemedeki yoğunluk farkları çizilmiştir. Bunlar mikroskopla veya mikro sertlik ölçüm izleriyle ölçülebilirler. Her iki şekildeki sıkıştırmada da parça boyunun çapa oranı 1, sürtünme katsayısı μ 0,3 ve

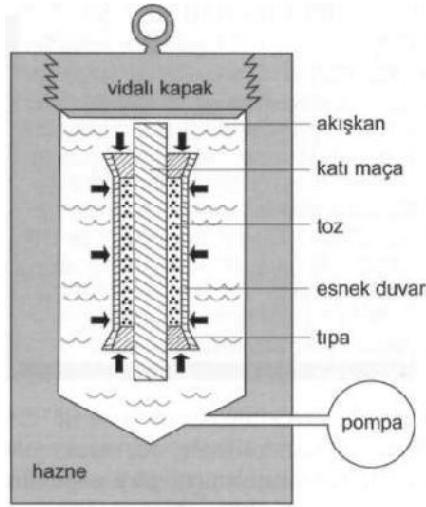
basınç oranı z 0,5'dir. Yoğunluk farklılıklarının oluşumu daha sonraki sinterleme operasyonunda çarpılmalara sebep olacağı için sorun teşkil eder [2].



Şekil 3.10. Tek ve çift yönlü preslemede basınç dağılımı [2]

İzostatik sıkıştırma

Toz metal parçalarda homojen yoğunluk elde etmek ancak izostatik sıkıştırma ile mümkündür (Şekil 3.11). Boy/çap oranı fazla olan parçalar bu yöntemle sıkıştırılabilirler. Sıkıştırma basıncı bir gaz veya sıvı yardımıyla parçaya her yönden ve eşit olarak uygulanır. Akışkanların bilinen özelliğinden faydalanılarak herhangi bir noktaya uygulanan basınç bütün yönlerde aynı değerde etki yapar. Bundan dolayı sıkıştırılan parçanın yoğunluğu her noktada aynı değerde olur [2].



Şekil 3.11. İzostatik sıkıştırma [2]

İzostatik sıkıştırma iki şekilde yapılır;

- Kuru kalıp
- Yaş kalıp

Kuru kalıp

Elastik toz kalıbı içinde birden çok parça sıkıştırılabilir. Sıkıştırma kalıbı, basınç hücresine yerleştirilerek metal tozu kalıba doldurulur. Sonra kalıp kapağı kapatılarak gerekli sıkıştırma basıncı uygulanarak, sıkıştırma tamamlanır. Sonra basınç düşürülerek kalıbın kapağı açılır ve parça kalıptan alt zımbanın yukarı hareketi ile çıkarılır [2].

Yaş kalıp

Metal tozları kalıp görevi yapan elastik bir kaba doldurularak sıkıca kapatılır. Kalıp basınç hücresinin içine konarak basınç uygulanır. Gerekli basınç uygulandıktan sonra basınç düşürülerek kalıp çıkarılır. Sıkışan toz metal parçanın üzerinden kalıp sıyrılarak çıkarılır. Yaş kalıplamada kalıp bir defa kullanılır, bir daha kullanılmaz [2].

Yüksek enerjili sıkıştırma (HERF)

Bazı malzemelerde, tam yoğunlukta ham parça oluşturmak için yüksek sıkıştırma basınçları kullanılır. Bu teknikte alışılmış sıkıştırma da kullanılanlardan çok daha yüksek basınçlar uygulanır. Eğer basınç aynı zamanda hızla uygulanırsa ilave faydalar sağlanır. Basınçlar 1 GPa'lı aşar ve bazı durumlarda 3 GPa'ya kadar çıkar. Bu basınçlara dayanabilecek özel kalıplar gereklidir. Çok fazla hacim kapladığından dolayı yağlayıcı toz ile karıştırılarak kullanılmaz, sadece kalıp duvarları yağlanır. Parça içinde kirlilik olmaması için tozun temiz olması gerekir. Yüksek enerji ve basınçlarla teorik yoğunluklara ulaşmak mümkündür.

Üretim aşamasına gelen çalışmalar olmasına rağmen, yüksek basınçla yapılan çalışmalar çoğunlukla araştırma seviyesindedir. İlk yapılan çalışmalarda basit şekilli, hassas olmayan parçalar üretilmiştir. Son gelişmelerle, hassas ve karmaşık parçaları da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. İşlenmesi zor olmasına rağmen, sadece sert metaller bu basınçları taşıyabileceklerinden kalıp malzemesi olarak kullanılır [2].

Ekstrüzyon yöntemi ile sıkıştırma

Metal tozlarının şekillendirilmesinde sınırlı ölçüde kullanılan ekstrüzyon yönteminde tozlar kapalı bir kap içine doldurulduktan sonra kabın içerisindeki havası vakumla alınır. Kap içerisinde tozlar ısıtılarak ekstrüzyon yoluyla parça üretimi gerçekleştirilir. Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen parçalarda yüksek yoğunluk elde edilir. Ekstrüzyon öncesi tozlar ısıtılmış ise ayrıca sinterlemeye gerek yoktur.

Ekstrüzyon genellikle daha önce izostatik presleme ile yoğunlaştırılmış metal tozlarına uygulanır. Bu yöntem en çok takım çeliklerinin üretiminde kullanılır.

Titreşimle sıkıştırma

Titreşimle sıkıştırma yönteminde sert bir kalıp içerisindeki toza basınç uygulanırken bir yandan da titreştirilir. Bu titreşimler yardımıyla daha az basınçla kalıpta şekillendirmeye eşdeğer bir yoğunluk elde edilir. Titreşim uygulamada frekans ve genlik önemli iki değişkendir. Herhangi bir basınca karşılık en uygun bir genlik ve frekans vardır [2, 32].

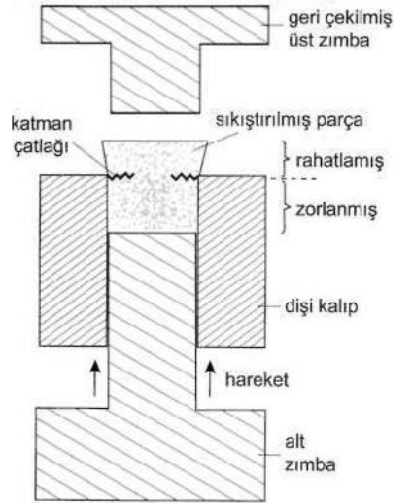
3.4.2. Sıkıştırma hataları

Sıkıştırılmış toz metal parçaların yapısındaki hatalar parça mukavemetini hata nispetinde azaltır. Sıkıştırma sırasında genellikle iki tür hata ile karşılaşılır. Bunlardan birisi sıkıştırma sırasında parçadaki düzlemsel çatlaklar şeklinde kendini gösteren ve katmanlaşma dediğimiz hata, diğeri parçanın kalıptan çıkarılması sırasında genleşme ile meydana gelen geri yaylanma denilen hatalardır.

Katmanlaşma parça içerisinde sıkıştırma yönüne dik yatay çatlakların meydana gelmesi şeklinde görülür. Katmanlaşma genellikle şu nedenlerle oluşur. Sıkıştırılan parça içindeki yoğunluk farkından genellikle gözenek miktarının fazla olduğu ve hızlı yoğunluk değişiminin görüldüğü parçanın alt bölgelerinde, kötü kalıp tasarımı; parça kalıpta iken yük kaldırıldığında kalıptaki elastik genleşmeden dolayı parçanın dışındaki gerilmeler kırılmaya neden olur. Uygulanan sıkıştırma basıncı ile gözeneklerde hapis kalan hava parçada yırtılmalara neden olabilir. Katmanlaşmayı önlemek için yukarıdaki hataların meydana geliş nedenleri giderilmelidir.

Kalıpta sıkıştırılan parça kalıptan çıkarıldığında parçanın boyutlarında bir miktar artma olur. Boyutlardaki bu artışa geri yaylanma veya elastik genleşme denir. Bu normal bir olay olmakla birlikte boyutlardaki artış miktarı fazla olursa parça içerisinde çatlama olacaktır. Geri yaylanmayı azaltmak için kalıba hafif bir koniklik verilmeli veya iki parçalı kalıp kullanılmalıdır. Böylece kalıp içindeki parçanın genleşmesi yavaş olacağından geri yaylanma azalmış olacaktır. Şekil

3.12’de kalıptan çıkarma sırasında parçadaki geri yaylanma hatası gösterilmiştir [2, 32].



Şekil 3.12. Geri yaylanma hatası [2]

3.5. Sinterleme

Sinterleme, dayanımı artırma amacı ile toza veya sıkıştırılmış kütleyle esas bileşenin ergime noktası altındaki bir sıcaklıkta uygulanan ısı işlemidir [23]. Tek bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı genellikle metalin ergime sıcaklığının $\frac{2}{3}$ veya $\frac{4}{5}$ 'i alınarak tespit edilirken birden fazla bileşenli (çok bileşenli) sistemlerde ise ergime derecesi düşük olan metalin ergime sıcaklığının üzerinde, ergime sıcaklığı yüksek olan metalin ergime sıcaklığının altında yapılır. Demir grubu metal alaşımları 1000-1300°C, sert alaşımlar 1400-1600°C arasında, refrakter metaller (molibden, tantal, wolfram) 2000°C ile 2900°C arasında sinterlenirler. Gözenekli bronzlar ve bronz alaşımları 600-800°C arasında sinterlenirler [34]. Sinterleme süresi kullanılan malzemeye göre değişir. Sinterleme sıcaklığı yükseldikçe sinterleme süresi kısalmır. Sinterleme süresi uzun tutulduğunda sıcaklığı düşük tutmak gerekir [2, 32].

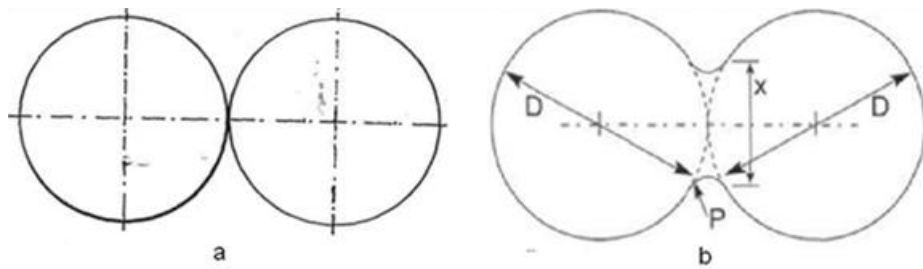
3.5.1. Sinterleme öncesi işlemler

Sinterleme için toz kütlenin hazırlanması gerekir. Bu olay normalde birbirlerine komşu parçacıkları sıkı şekilde temas ettirerek yüzey filmlerini yırtmak suretiyle gerçekleştirilir. Bu sıkıştırma tekniği kullanılan tozun üretim tekniği, biçimi ve sıkıştırılabilirlik özellikleri ile doğrudan ilgilidir. Sıkıştırılan toz metal kütle bir takım özellikleri iyileştirmek amacıyla sinterlenir.

Bazı durumlarda ise gevşek toz kütle, sıkıştırılmadan doğrudan sinterlenir. Bu gibi gevşek toz sinterlemesi genelde büyük gözenekli filtre vb. malzeme üretimi için arzu edilir [2].

3.5.2. Sinterleme teorisi

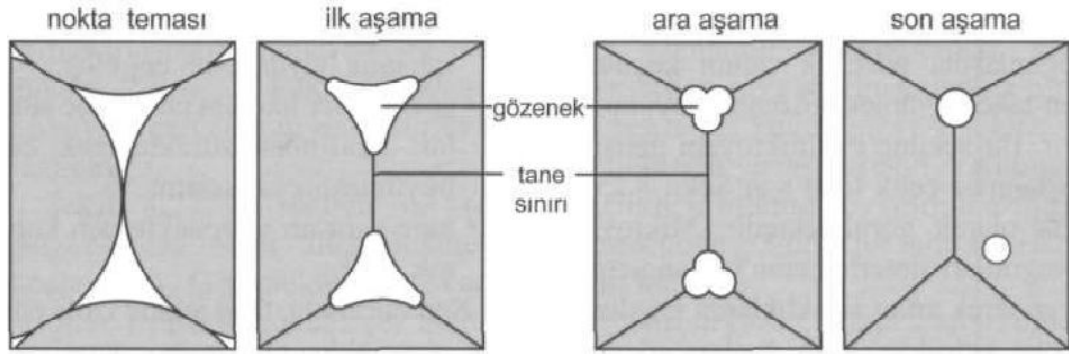
İki küresel parça Şekil 3.13'de görüldüğü gibi temas halinde olduğu kabul edilir. Sinterleme sırasında parçacıklarda önce bir boyun büyümesi ilerleyen sinterleme zamanı ile gözeneklerde büzülme olur. Gözenek kanalları kapanarak, gözenekler kapalı gözenek şekline dönüşürler.



Şekil 3.13. Sinterleme teorisi

- a) Sinterleme başlangıcında temas halindeki parçacıklar
- b) X yarıçapında bir boyun ile küresel parçacık sinterleme kesiti [2]

Parçacıklar arasında bağ büyürken mikro yapı Şekil 3.14'de gösterildiği gibi değişir. Sıkıştırılmamış tozların sinterlenmesinde oluşan boyun yarıçapının, parçacık çapına (X/R) oranının 0,3'den az olduğu kısım sinterlemenin ilk aşaması olarak tanımlanır [24].



Şekil 3.14. Bir nokta teması başlangıcı ile sinterleme esnasındaki parçacıklar arası bağların gelişimi

Orta kademedeki gözenekler ilk kademeye göre daha düzgün şekillidir ve birbirlerine bağlı silindirik yapıya sahiptirler. Orta kademedeki (sıkıştırma özelliklerinin) yüzey ve tane bağları enerjisinin her ikisini de kapsayan ara yüzey enerjisinden dolayı sıkıştırma özelliklerinin gelişimi görülür. Ara kademenin sonraki oranlarında tane büyümesinin yaygın olması sonucu gözenekler birbirinden ayrılabilir.

Yüksek bir sinterleme oranı elde etmede tane sınırları önemlidir. Bu nedenle tane büyümesi ve gözenek ayrılması istenmeyen bir durumdur. Gözenek yapılarının çekilmesi ile yaklaşık % 8 gözeneklilikte kararlı olmayan silindirikler oluşur. Bu noktada silindirik gözenekler yavaş tane büyümesinde etkili olmayan küresel gözenek şekline dönüşür. Birçok durumda da tane sınırlarından ayrılmış gözeneklerin mevcut olduğu mikro yapı oluşur. Tane içerisindeki gözeneklerin ayrışması sertlik artışına neden olur.

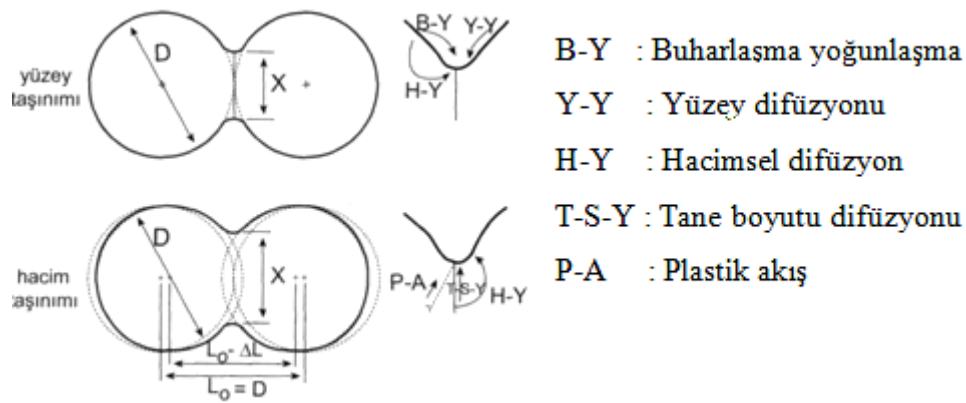
Gözeneklerdeki küresel görünüm ve ayrılmış gözenekler sinterlemenin son aşamasının başlangıç göstergesidir. Sinterlemenin son aşamasında hareketler çok yavaştır. Buna sebep katı gözenek ara yüzeyinin giderilmesidir. Gözenekler içindeki hapsedilen gazlar son yoğunlaşma kademesinin miktarını sınırlar.

Genellikle ilk kademe geniş eğim açılı bir mikro yapıya benzer. Boyun büyüme oranları ve büzülme küçüktür ve tane büyüklüğü toz büyüklüğünden daha azdır. Orta kademedeki gözenekler daha pürüzsüzdür, fakat bu kademedeki hala birbiri arasında tam

bağ vardır. Kuramsal yoğunluk % 92'den daha azdır ve tane büyümesi ara kademedede daha sonradan oluşabilir. Son sinterleme kademesinde gözenekler küreselleşir ve kapanır. Son kademedede % 92'yi geçen kuramsal yoğunluk ve tane büyümesi görülür [2, 32].

3.5.3. Taşınım mekanizmaları

Sinterleme sırasında, yüzey taşınımı ve hacim taşınımı olmak üzere iki sınıf taşınım meydana gelmektedir. Yüzey taşınımı Şekil 3.15'de gösterildiği gibi parçacık aralıklarında bir değişme olmaksızın boyun büyümesini kapsar. Sinterlemeyi kontrol eden yüzey taşınımı parçacık yüzeylerindeki uçlandırma ve kütle akması sonucu meydana gelir.



Şekil 3.15. Kürelerin sinterlenmesinde oluşan iki tür sinterleme mekanizması

Yüzey taşınımında net bir boyutsal değişim yoktur ve yoğunluk sabit kalır. Yüzey taşınım mekanizması yüzey kaynaklarından kütle hareketi ile boyun büyümesini sağlar. Hacimsel taşınımında iç kütle yayınımları oluşur. Hacimsel taşınım mekanizmaları büzülme vererek net bir boyutsal değişime neden olur. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi boyun bölgesindeki çökeltiler ile toz içinde yeni bir kütle oluşur. Hacimsel taşınım mekanizmaları, hacimsel yayınımları, tane sınırı yayınımları ve plastik akışı kapsar. Sinterleme esnasında yüzey gerilimleri yeni dislokasyonlar oluşturmak için yeterli değildir. Bununla birlikte elektron mikroskobu ince tozların ısıtılması esnasında

boyun bölgelerinde dislokasyon hareketleri oluştuğunu göstermiştir [24]. Bu nedenle plastik akışın yalnızca aktif olarak ısıtma esnasındaki kısa süreli bir işlem olduğu göz önünde tutulmalıdır [2, 32, 35, 36].

3.6. T/M Malzemelerinin Mekanik Özellikleri

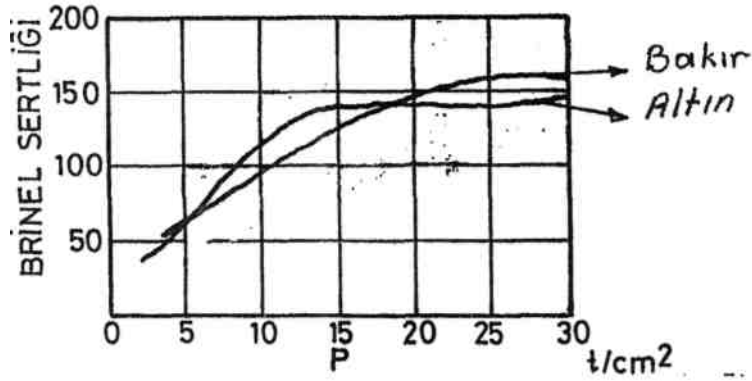
T/M malzemelerinin mekanik mukavemetleri şekillendirme sonrası uygulanan pişirme işlemi ile kazandırılır. Oda sıcaklığında sıkıştırılan T/M parçalarında mekanik bağ oluşur. Sonradan uygulanan pişirme ile mekanik bağlar kimyasal bağlara dönüştürülerek mekanik özellikler iyileştirilir.

T/M parçalar ile döküm parçalar arasındaki en önemli fark T/M parçaların gözenekli yapıya sahip olmalarıdır. Gözeneklilik sinterleme sıcaklığına ve atmosferine, presleme basıncına, tane büyüklüğüne bağlı olarak değiştiğinden T/M parçaların özellikleri ergitilerek elde edilen metallerin özelliklerine göre daha farklıdır [37].

3.6.1. Sertlik

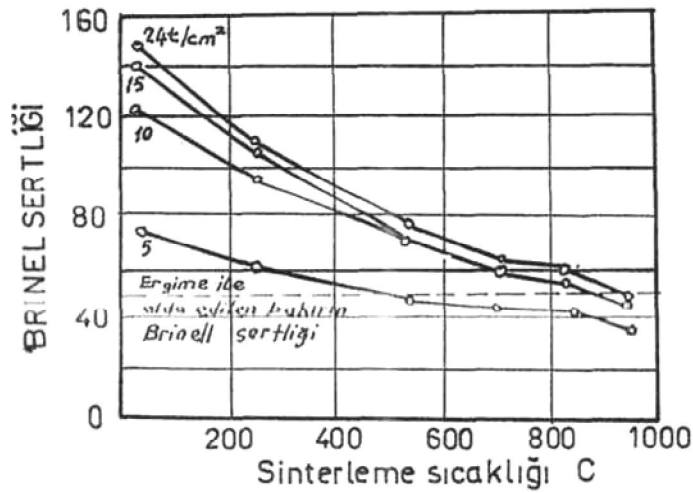
T/M parçalarda sertlik ölçümleri genellikle Brinell sertlik ölçüm metodu ile yapılır. Döküm ile elde edilmiş metallerde sertlik ile çekme mukavemeti arasında doğrusal ilişkisi T/M parçaları için söz konusu değildir. T/M parçaların gözenekli yapıya sahip olmaları nedeniyle sertlik değerinin ölçümünde ölçüm noktasının yerine dikkat etmek gerekir. Eğer ölçüm noktası gözenek üzerinde veya yakınında olursa iz büyük olacağından sertlik değerinde yanlış netice alınır.

T/M parçalarının sertlik değeri parçanın sıkıştırma basıncına göre de değişir. Altın ve bakır tozlarının sıkıştırma basıncıyla sertlik değişimi Şekil 3.16'da verilmiştir. Ergime ile üretilen bakırın sertliği $40 - 60 \text{ kg/mm}^2$ olduğu halde bakır tozlarının T/M yöntemiyle sıkıştırılmasıyla sertliğin % 100 arttırılması mümkündür. Sertliğin bu kadar yüksek olması tozun soğuk şekillendirme ile mekanik mukavemetinin çok artması ile izah edilebilir .



Şekil 3.16. Altın ve bakırın sıkıştırma basıncına bağlı sertlik değişimi

Bakır tozlarının değişik basınçlar altında preslenmesiyle elde edilen T/M parçalarının artan sinterleme sıcaklıkları sonucu sertlik değeri Şekil 3.17’de verilmiştir. Yüksek sinterleme sıcaklığında T/M parçalar, ergitilerek üretilen parçaların sertliğine yakın sertlik değeri gösterirler. Farklı tane boyutlarındaki bakır tozları üzerinde yapılan deney sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir [34].



Şekil 3.17. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak değişik basınçlar altında sıkıştırıldıktan sonra sinterlenen kaba bakır tozu numunelerinin sertlik değişimi

Çizelge 3.1. Farklı tane büyüklüğü ve farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş bakır tozunun sertlikleri

Tane Büyüklüğü, mm	Brinell Sertliği					
	Sıkıştırma kg/mm ²	Sinterleme Sıcaklığı °C				
		260	530	700	840	920
0,008	152,4	120,5	78,4	64,0	50,9	43,5
0,010	141,5	104,5	75,4	64,6	50,7	43,3
0,015	131,6	98,2	70,5	59,7	50,5	44,0
0,030	116,9	90,5	65,2	56,4	50,1	45,3

3.6.2. T/M parçaların çekme, yorulma ve darbe mukavemetleri

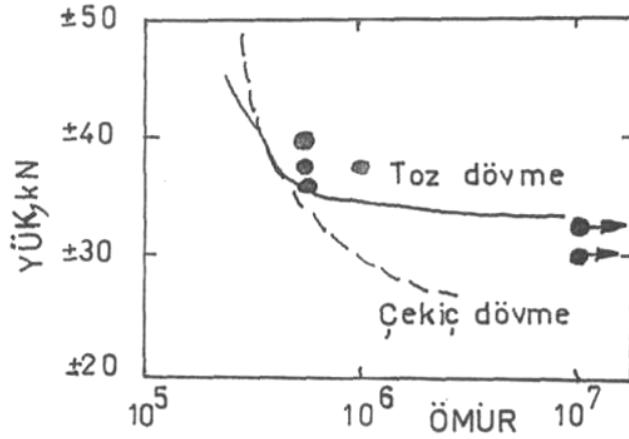
T/M parçaların gözenekli yapıya sahip olmaları, bu parçaların çekme mukavemetini olumsuz yönde etkiler, çekme deneyi sırasında parçada önemli bir uzama olmadan kopma meydana gelir. T/M parçalarının çekme mukavemetleri döküm parçaların çekme mukavemetlerinin ölçülmesi gibi tespit edilir. T/M parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde sıcak dövme yoluyla dökme-dövme malzemelere eşit, bazen de üstün özellikler sağlanır. Çizelge 3.2’de dövme ile % 99,9 yoğunluğa kavuşmuş çeliklerin çekme ve darbe mukavemetleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Hadde ve T/M çeliklerin özelliklerinin mukayesesi

MALZEME		UTS MPa	Uzama %	Kesit Daralması %	Darbe Enerjisi J
Mn-Mo Hadde	Hadde yönü	920-980	17-19	60-62	100
	dik yön	910-950	5-12	6-24	10
T/D Ni-Mo		900-930	13-15	40-50	27

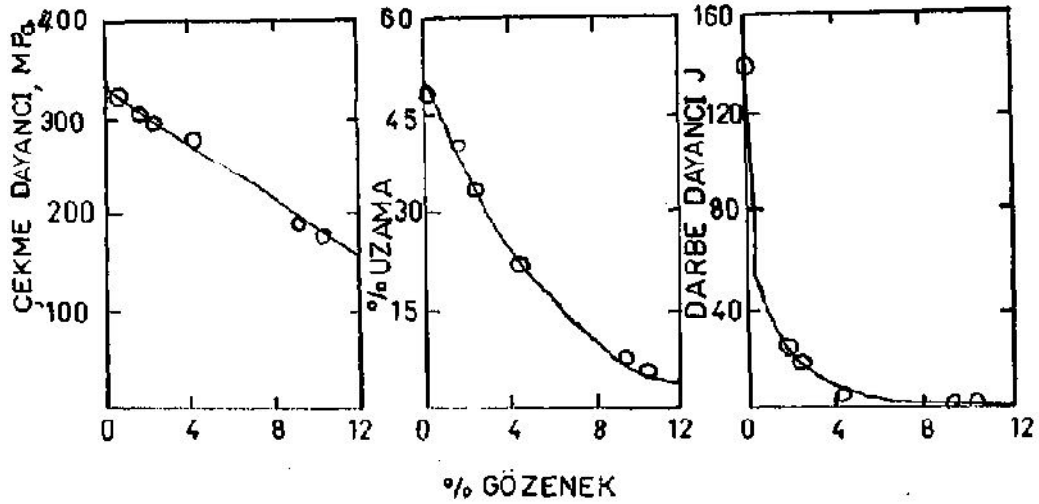
T/M parçaların yüzey kalitelerinden dolayı, özellikle T/M çeliklerin yük taşıma kabiliyetleri bazen hadde çeliklerinden bile üstündür.

Şekil 3.18'de motor silindirindeki şartlara benzer şekilde yapılan yorulma deneyi sonunda, çekiç dövme ve T/M biyel kolları yorulmaya karşı mukayese edilmiştir [38].



Şekil 3.18. Çekiçle dövme ve T/M biyel kollarının yorulma özelliklerinin mukayeseşi

T/M parçalarda kalıcı gözenek mekanik özelliklere tesir eder. Çekme mukavemeti ve mıknatıslık kalıcı gözenek ile yavaş değişmektedir. Süneklik ise çok süratli değişmekte Şekil 3.19'da kalıcı gözenneğin mekanik özelliklere etkisi görülmektedir.



Şekil 3.19. Kalıcı gözenneğin mekanik özelliklere etkisi

T/M parçaların mekanik özelliklerine kalıcı gözeneklerden başka oksijen miktarının da etkisi vardır. Süneklik, darbe mukavemeti darbe tokluğu ve yorulma mukavemeti

oksijen miktarı ile önemli oranda değişmektedir. Çatlak genellikle kalıcı gözenekleri ve toz yüzeyindeki oksitlerini takip etmektedir [32, 38].

4. KENDİNDEN YAĞLAMALI YATAKLAR

4.1. Kendinden Yağlamalı Yatak Nedir?

Dönmekte olan makine elemanlarında yatak ihtiyacı gerek malzeme gerekse işçilik yönünden pahalı olan bir makine parçasını korumak ihtiyacından kaynaklanır. Bu da genellikle korunması istenen malzemeden daha az sertlikteki başka bir malzeme ile karşılanır. Korunan parça genellikle bir çelik türü olurken koruyucu malzeme çeliğe göre daha yumuşak olan bakır veya alaşımlarıdır. Endüstride burç olarak da adlandırılan bakır veya bronz yataklar genelde döküm yöntemi ile imal edilmekteydiler. Toz metalurjisindeki gelişmeler gerek ekonomiklik, gerekse kendinden yağlama görevi yaptıklarından toz metal yatakları döküm yöntemine tercih edilir hale getirmiştir [1, 18].

Toz metalurjisi uygulamaları içerisinde yatak imalatı önemli bir yer tutmaktadır. T/M yatakların en önemlisi olan gözenekli yatakların imalatında kullanılan tozun miktarı, diğer sahalarda kullanılan toz metal parçaların miktarından daha fazladır. % 15–35 gözenekliliğe sahip bu yataklara kolaylıkla yağ emdirilebildiğinden ve kendi kendini yağlama özelliklerinden dolayı uygundurlar. Gözenekli yataklarda mevcut gözenekler yağ deposu olarak görev yaparlar. Yağ kalitesi en iyi çalışma ömrü ve yükleme kapasitesi için önemlidir. Bu yüzden gözenekli yataklarda kullanılan yağın yaşlanmaya karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Kullanım sırasında yağ kaybı yatağa zarar verir. Gözeneklerdeki yağ miktarı ilk değer % 70'ine düşerse yeniden yağ eklenmelidir. Aksi halde yatak hızla bozulacaktır. Kendinden yağlamanın ömrü yatağın dış yüzeyine açılacak bir yuvaya yağ emdirilmiş fitil veya keçe konması ile arttırılabilir.

Normal çalışma koşullarında, kendinden yağlamalı yataklar binlerce saat çalışma ömrüne ulaşabilirler. Yağ içeriğini arttırmak çalışma ömrünü 4 ila 5 kat arttırılabilir.

Sinterlenmiş bronz yataklar 3 m/s, sinterlenmiş demir yataklar 2 m/s kayma hızına kadar kullanılabilirler. Bu hız ek yağlama ile sinterlenmiş bronz yataklarda 4 m/s'ye kadar çıkarılabilir ve hatta düşük yüklerde kısa bir süreliğine 6–8 m/s bile olabilir [28, 39-41].



Resim 4.1. Kendinden yağlamalı bronz yatak [28]

4.2. Kendinden Yağlama Mekanizması

Yatak içinde mil dönmeye başladığı zaman, sürtünmeden dolayı sıcaklık artar ve metale göre yağın genleşme katsayısı büyük olduğundan, ayrıca yatak ile mil arasındaki yağ filminin hidrodinamik basınç değişikliği nedeniyle depo görevi yapan gözeneklerdeki yağ, gözeneklerden mile doğru emilir ve yağlama görevini yapar (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Kendinden yağlama mekanizması

Dönme işlemi durduğunda yatak soğur ve kılcallık etkisi ile yağ tekrar gözeneklere emilir [2, 28].

Kendinden yağlamalı yataklarda yatağın gözeneklerinde bulunan yağlayıcı, yatağın kullanım ömrü boyunca kalmaktadır. Bazı ağır yüklerde çalışan yataklarda gözeneklerdeki mevcut yağ yeterli olmayabilir. Bu gibi durumlarda yatağa yağlayıcı ilave edilmelidir [28, 42].

4.3. Kendinden Yağlamalı Yatakların Avantajları

- Mükemmel yağlama ve sessiz çalışma.
- Yağlamanın zor veya imkânsız olduğu uygulamalarda veya yağ sızıntılarına izin verilmeyen durumlarda uygulayabilme.
- Vargel hareketleri ve sürekli yağ filminin oluşmadığı ve bu yüzden yoğun yatakların kullanılmadığı düşük çalışma hızları için uygunluk.
- Yataktan yağlayıcının akabileceği dikey veya eğimli yatak durumlarına uygunluk.
- Kullanıldığı makinenin ömrü boyunca yağlama gerektirmeme [24].

4.4. Kendinden Yağlamalı Yatakların Dezavantajları

- Kendinden yağlamalı yataklar sadece düşük hızlar ve yüklerde kullanılabilir. Aksi halde yağ film kalınlığı kabul edilemez sınırlara düşer.
- Kendinden yağlamalı yataklar gözenekli yapıya sahip olduklarından dolayı diğer

yoğun yataklar kadar dayanıklı değildir [24].

4.5. Kendinden Yağlamalı Yatakların Kullanım Alanları

Dönme hareketi gerektiren her eleman için bir yatağa ihtiyaç vardır. Kendinden yağlamalı yatakların uygulama alanları bu yatakların bulunuşundan günümüze kadar artarak devam etmektedir. Bu yataklar hemen hemen dönme hareketi gerektiren her yerde kullanılırlar. Genellikle yağ ve gresin kullanılmadığı durumlarda tercih edilirler. Bu durumlar; yüksek vakum, aşırı radyoaktif ışınım, yüksek ve çok düşük basınç, gazlı ve yıpratıcı çevre şartları sayılabilir. Geniş kullanım alanlarına sahip olan toz metal kendinden yağlamalı yatakların kullanım alanlarından bazı örnekler aşağıda sunulmuştur:

- Otomotiv endüstrisi; ısıtıcı motorları, ön ve arka cam silici motorları, teyp motorları, pencere krik motorları.
- Portatif güç takımları; matkaplar, makineli oyma testereleri.
- Ev aletleri; çamaşır yıkayıcı ve kurutucuları, buzdolapları, karıştırıcılar, vantilatörler, saatler, elektrikli süpürgeler.
- Elektronik sahada; pikaplar, ses kaydediciler, stereo teçhizatları, video kayıt cihazları.
- Ziraat aletlerinde; traktörler, çim makineleri, biçerdöverler.
- Denizcilik ekipmanlarında; dıştan takmalı deniz motorlarında [27, 42].

4.6. Kendinden Yağlamalı Yatakların Üretimi

Pek çok yatak malzemesini üretmek için toz metalurjisi tek yoldur. Yatakların çoğu bronz, kalay ve grafit tozlarından üretilir. Alüminyum, kurşun ve diğer metal veya metal dışı maddelerde kullanılabilir. Grafit veya molibden disülfid kuru yağlayıcı toz olarak eklenir [22].

Üretimde gerekli üç safha vardır. Bunlar; sıkıştırma, sinterleme ve yağla doyurma safhalarıdır. Bronz yatakların üretiminde elementler bakır ve kalay alaşım tozları tercih edilir. Bakır tozları hem su atomizasyon yöntemi hem de elektrolitik yöntemi ile üretilebilir. Kalay tozları ise hava atomizasyon yöntemi ile üretilir [29].

Yataklar yüksek hız preslerinde preslenirler. Sıkıştırma basınçları normalde 230-250 MPa arasındadır. Yüksek dayanıklılığının gerekli olduğu yerlerde 550 MPa'a çıkabilir [28].

Yüksek miktardaki üretimlerde sinterleme için hidrokarbon atmosferli sinterleme fırınları kullanılır. Sinterleme sıcaklığı yatak malzemesi bileşimine bağlıdır. Bronz yataklar için sinterleme sıcaklığı 750 – 850°C arasında değişir. % 90 Cu - % 10 Sn'li bronz için uygun sinterleme sıcaklığı yaklaşık 800°C 'dir. Demir tozu yataklar için ise, 1100°C civarında sinterleme sıcaklığı seçilmelidir [28, 32].

Kendinden yağlamalı yataklarda gözenek % 40'a kadar çıkabilir. Kuru yağlamanın istenmediği hallerde bu gözenekler yağ, gres veya uygun bir plastik ile doldurulur. Böylece üretilen burç veya yatak ömür boyu yağlama istemez. Halen otomobillerde, elektrikli aletlerde, ziraat makinelerinde, ofis makinelerinde yüzlerce yağlama istemeyen yatak vardır.

Gözenekli kaymalı yataklar üç gruba ayrılır: Sinterlenmiş bronz yataklar, demir esaslı sinterlenmiş yataklar ve demir bronz sinterlenmiş yataklar. İlk ve en çok kullanılan T/M yatak, % 90 Cu - % 10 Sn'li bronz yataktır [33].

Sinterlenmiş bronz yataklar ASTM B 438'e göre kurşunlu ve kurşunsuz olarak iki sınıfa ayrılırlar. Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi, her sınıf tekrar grafitli ve grafitsiz olarak iki alt sınıfa ve onlarda gözenek miktarına göre dört türe ayrılırlar (Çizelge 4.2). T/M gözenekli yatakların özellikleri ise Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. T/M bronz yatakların kimyasal bileşenleri [43]

Element	Bileşenler %			
	1. Derece		2. Derece	
	A Sınıfı	B Sınıf	A Sınıfı	B Sınıfı
Bakır	87,5-90,5	87,5-90,5	82,6-88,5	82,6-88,5
Kalay	9,5-10,5	9,5-10,5	9,5-10,5	9,5-10,5
Grafit	Maks 0,1	Maks 1,75	Maks 0,1	Maks 1,75
Kurşun	-	-	2,0-4,0	2,0-4,0
Demir	Maks 1,0	Maks 1,0	Maks 1,0	Maks 1,0
Diğer	Maks 0,5	Maks 0,5	Maks 1,0	Maks 1,0

Çizelge 4.2. T/M bronz yatakların yoğunlukları ve yağ miktarları [43]

Tip	Yoğunluk g/cm ³	Yağ Miktarı % Hacim
I	5,8 6,2	27
II	6,4 6,8	19
III	6,8 7,2	12
IV	7,2 7,6	8

Çizelge 4.3. T/M gözenekli yatakların özellikleri [43, 44]

Özellik	Yatak Malzemesi		
	Bronz	Demir	Demir-Bronz
Çekme Mukavemeti, MPa	80-100	-	80-200
Sertlik B.S.	30-40	40-50	-
Maksimum Statik Yük, MPa	22-28	25-55	28
Maksimum Yavaş Dönme Yüğü, MPa	1,7-3,9	1,6-4,8	1,4-2,8
Maksimum Hız, m/s	7,6	4,0	-
Maksimum $p.v$, MPa.m/s	40,000-50,000	30,000-40,000	25,000-50,000
Maksimum Çalışma Sıcaklığı, °C	65	65	-

Kendinden yağlamalı yatakların üretim basamakları Şekil 4.2'de özetlenmiştir.



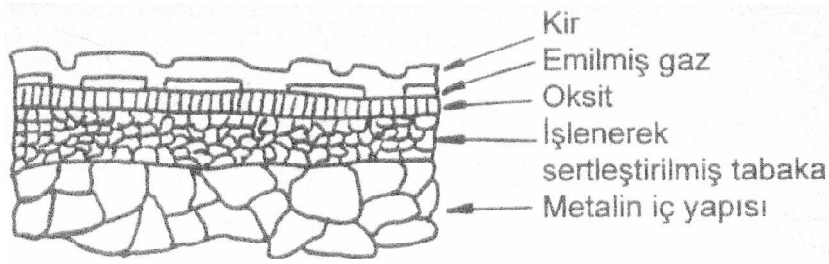
Şekil 4.2. Kendinden yağlamalı yatakların üretimi [28]

5. SÜRTÜNME VE AŞINMA

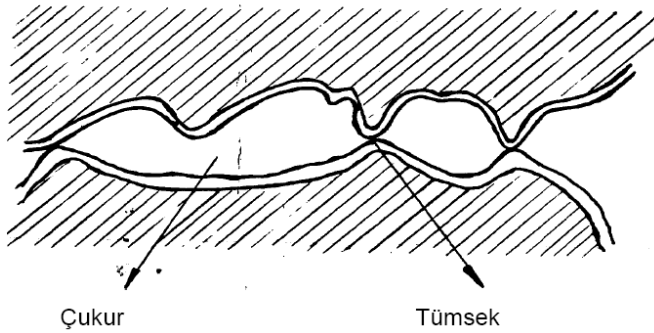
İnsanlığın tükettiği toplam enerjinin büyük bir bölümü kayma sırasında meydana gelen sürtünme kayıplarını yenmek için harcanmaktadır. Yapılan konstrüksiyonlar da, daha uygun bağlantı malzemelerinin kullanılması veya daha iyi bir yağlama ile sürtünmenin azaltılabilmesi bugünkü teknolojinin oldukça önemli bir sorunudur. Sürtünmeyi gerektiği zaman azaltma ve gerektiği zaman yeterince yüksek seviyeye çıkarabilme, sürtünme ile ilgili en önemli iki etmendir. Sürtünme çeşitli konstrüksiyonlarda yerine göre istenilen veya hiç istenilmeyen bir etmen olarak önemini her zaman korumaktadır [45].

5.1. Yüzeylerin Sürtünme Özellikleri

Sürtünme özelliklerine en büyük etki; sürtünen yüzeylerin tabaka yapılarıdır. Kuru sürtünen bir yüzey Şekil 5.1'de görüldüğü gibi bir dizi tabaka ile örtülüdür. Sürtünmeyi yüksek sürtünme ve küçük sürtünme olarak tanımlamak mümkündür. Yüksek sürtünmeden sonra yüzeyler incelendiğinde, sürtünen yüzeylerden birinden diğerine malzeme transferi ile bir yüzeydeki çıkıntıların diğer yüzey üzerinde geniş ve genellikle düzensiz izler bıraktığı görülür. Küçük sürtünme olayında, sürtünme katsayısı düşüktür. Sürtünen yüzeylerde çok ince çizgiler meydana gelir. Birbiri üzerinde kayan malzemelerden birisi sert, diğeri yumuşaksa (örneğin, kalay, kursun) yumuşak olan malzeme diğer malzemeyi kendi parçacıklarından oluşan bir tabaka ile kaplar ve bu şekilde iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kaymış olur. Yani yumuşak malzeme yağlayıcı görevi görür, sonuçta sürtünme katsayısı azalır. Sürtünme başlamadan önce Şekil 5.2'de görüldüğü gibi temas sırasında kontak noktaları oluşur. Sürtünmenin başlaması ile birlikte yük etkisi altında iki yüzey arasında ortaya çıkan madeni kaynak bağları her iki yüzeyi birbirine bağlar. Bu madeni kaynak bağlarının kesilmesi için gereken kuvvet sürtünme kuvveti olarak tanımlanır [45, 46].



Şekil 5.1. Sürtünme yüzeylerindeki tabakalar [45]



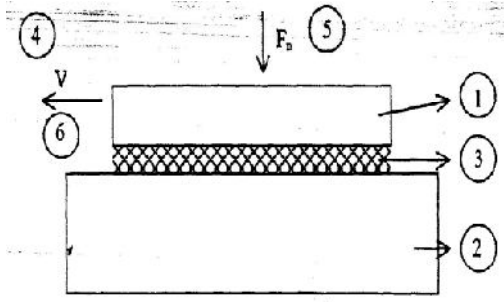
Şekil 5.2. Sürtünme öncesi temas noktaları [45]

5.2. Aşınma

Metal aşınması, metal yüzeyinden plastik deformasyon sonucu parçacık kopması biçiminde görülür. Bunun için iki yüzey arasında genellikle bir sürtünme olması gerekir. Aşınma; korozyon, yorulma, sürünme, çarpma ve aşındırıcı parçacıklar ile bozulma ve kesme içerebilir. Aşınma yağlı aşınma ve yağsız aşınma diye iki sınıfa ayrılır. Ayrıca sürtünen metal yüzeylerin durumuna göre de türlere ayrılabilir. Metal metale, metal metal dışı aşındırıcılara, metale sıvı çarpması gibi [45, 46].

5.3. Aşınma Olayını Oluşturan Unsurlar

Aşınma olayını analiz edebilmek için aşınma olayını oluşturan temel unsurların bilinmesi gerekir. Aşınma olayı meydana gelebilmesi için Şekil 5.3'de gösterildiği gibi altı temel unsurun bir arada bulunması gerekir [45, 47].



Şekil 5.3. Aşınmayı oluşturan unsurlar

- 1- Temel sürtünme elemanı: Fiziki ve kimyasal özellikleri ve durumu yüzey yapısı, şekli tamamen belirli ve aşınma durumu bizi ilgilendiren parçadır.
- 2- Karşı sürtünme elemanı: Gaz, sıvı ve katı olabilir.
- 3- Ara madde: Temel sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında sıvı, gaz, katı, buhar veya bunların karışımı şeklinde bir madde bulunabilir. Aşınma esnasında yüzeyden kopan parçacıklar yüzeyler arasında kalıyorsa ara madde olarak düşünülebilir.
- 4- Çevre: Çevrenin fiziksel ve kimyasal özellikleri.
- 5- Yükleme: Tesir eden yükün (kuvvetin) büyüklüğü, şekli (statik titreşimli darbeli v.s.), doğrultulu ve zamana göre değişimi yükleme hususunu meydana getirir.
- 6- Hareket: Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre hareketinin cinsi (kayma, yuvarlanma, çarpma), büyüklüğü, doğrultusu ve süresi ile belirlidir [45].

5.4. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınma, birçok faktörün meydana getirdiği bir sorundur. Aşınmayı meydana getiren faktörleri bir bütün içinde incelemek gerekir. Aşağıda yapılan sınıflandırma abrasif aşınma göz önünde bulundurularak yapılmıştır [45, 46].

A- Tribolojik sistemin elemanlarına bağlı etmenler;

- 1- Esas sürtünme elemanına bağlı etmenler
- 2- Karşı elemana bağlı etmenler
- 3- Ortama bağlı etmenler

B- İşletmeye bağlı etmenler

5.4.1. Esas sürtünme elemanına bağlı etmenler

Malzeme cinsi

Bir malzeme belli şartlarda yüksek aşınma direnci gösterirken, başka şartlarda düşük aşınma direnci gösterebilir. Bu nedenle aşınmanın meydana geldiği koşullar göz önünde bulundurularak aşınmaya dayanıklı malzeme seçimi yapmak gerekir.

Malzemenin mikro yapısı

Mikro yapıda bulunan fazlar ve tane boyutu mekanik özellikleri yüksek derecede etkileyen önemli bir etmendir. Katmanlı pörlit yapının katmanlar arası sertliğin fazla olması, tanecikli perlitik yapıya göre aşınma direncini daha fazla artırır [48].

Hacimsel ve yüzey sertliği

Malzemenin sertliği ile aşınma direnci arasındaki ilişki belli bir düzeye kadar doğrusal değişim gösterir. Yani sertliğin artması ile aşınma direncinde artar. Ancak belli bir değerden sonra sertlik artışı aşınmaya karşı direnç artışı getirmez [48].

Esneklik sabiti

Malzemelerin elastiklik modülü arttıkça malzemenin aşınmaya karşı direnci daha fazla olur. Bunun nedeni elastiklik ve akma sınırı yüksek olan malzemelerde gerçek temas alanı azalır. Elastiklik modülü farklı iki malzemenin aşınmasında, düşük elastiklik modülüne sahip malzemenin, gerçek temas alanı biraz daha fazla olduğu için izafi hareket sırasında bu malzemede soğuk kaynak olma ihtimali artar ve neticede biraz daha çabuk aşınır [45].

Yüzey pürüzlülük durumu

Metallerin yüzeyinin pürüzlülüğü gerçek temas alanını dolayısıyla sürtünme ve aşınma olaylarını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Malzemelerin yüzeylerinin kaba işlenmesi sonucunda gerçek temas alanı azalır. Yüzeyde temas alanının azalmasıyla tek bir pürüze gelen yükün artmasıyla bu noktalarda gerilme yığılmaları meydana gelerek temas noktaları şekil değiştirerek aşınmanın artmasına sebep olur [45, 49].

Soğuk şekil vermenin etkisi

Soğuk şekil vermenin aşınma direnci etkisine geçmeden önce sertliğin aşınma direncine etkisi incelenmiş ve sertliğin artışıyla aşınmanın azaldığı tespit edilmiştir. Soğuk şekil değiştirme sırasında meydana gelen pekleşme malzemenin sertliğinin artmasına neden olur. Böylece artan sertlik ile malzemenin aşınmaya karşı direnci artar.

Isıl işlem

Mekanik özellikleri etkileyen ısı işlem, aşınmayı etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Özellikle çeliklerde ısı işlem sonucu sertlik artarak aşınmaya karşı direnci yükseltir. Fakat sertleştirme işleminden sonra malzemenin içyapısında gerilme yığılmaları meydana gelir. Bu gerilme yığılmalarını gidermek için temperleme işlemi yapılmalıdır.

Aşındırıcının etkisi

Aşınma deneylerinde çok çeşitli aşındırıcılar kullanılır. Alüminyum oksit (Al_2O_3) aşındırıcı taneleri sert ve keskin köşelidir. Silisyum karbür (SiC) aşındırıcı taneleri ise daha sert ve keskin köşeli olmalarına rağmen, alüminyum oksit aşındırıcılara göre aşırı derecede kırılırlar. Bazı araştırmacılar artan tane büyüklüğüne bağlı olarak aşınma miktarlarının arttığını ve köşeli tanelerin yuvarlak tanelere kıyasla daha fazla

aşındırıcı etki yaptığını ispatlamışlardır [50]. Date ve Malkin çeşitli aşındırıcılar ile deneyler yapmışlar ve aşınmanın, abrasif tane boyutlarının artması ile 100 µm tane boyutuna kadar hemen hemen doğrusal olan bu artışın, bu boyuttan sonra sabit kaldığını göstermişlerdir [45, 51].

5.4.2. Karşı elemana bağlı faktörler (tane büyüklüğü, şekli ve dağılımı)

Yapılan araştırmalar sonucunda tane büyüklüğü arttıkça, malzemenin aşınma miktarının azaldığı ve aşındırıcı tanenin parabolik şekilli olması, keskin köseli tanelere göre aşınmayı azalttığı görülmüştür [46].

5.4.3. Ortama bağlı faktörler (sıcaklık, nem atmosfer)

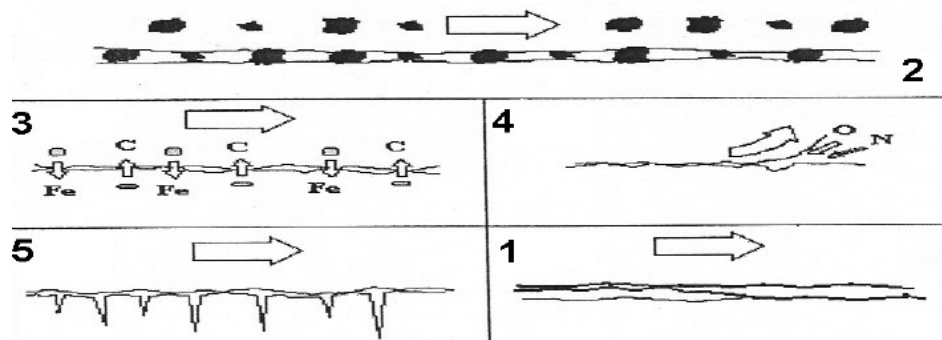
Aşınmayı etkileyen önemli faktörlerin biri de aşınma ortamının atmosferi, nemi ve sıcaklığıdır. Temas halinde bulunan yüzeylerin sürtünmeden dolayı yüzeylerde bölgesel olarak sıcaklık artısına sebep olur. Yüzeylerde meydana gelen sıcaklık artısı, malzemenin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirerek malzemenin aşınmaya karşı direncini etkiler [52].

5.4.4. İşletme koşulları

Aşınma sistemi içerisinde aşınma yüzeyinin maruz kalacağı basıncın büyüklüğü, birim yüzeye uygulanan kuvvetin büyümesini sağlayacağından, aşınmanın artmasına sebep olacaktır. Araştırmaların birçoğu kritik bir yükleme miktarına kadar yükün artışı ile hacimsel aşınmanın orantılı bir değişim gösterdiğini açığa çıkarmıştır. Kritik yükleme miktarı, aşınma yüzeyinin soğuk deformasyonla, sertliğin belli bir oranda arttığı değer olarak belirlenmiştir. Richardson hacimsel aşınmanın yük ile doğrusal olarak arttığını, fakat yükün daha fazla artmasıyla birim yük başına düşen aşınma miktarının belli bir kayma (aşınma) yolundan sonra dengeye geldiğini tespit etmiştir [49].

5.5. Aşınma Mekanizmaları

Genel olarak aşınma, dış etkiler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişmelerin sonucudur. Aşınma olayının mikro yapısı yani moleküller arasındaki fiziki gelişimi incelenirse aşınmanın meydana gelişinin aşağıda tanımlanan belirli birkaç tipte olduğu görülmüştür (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Temel aşınma mekanizmaları; 1-Yapışma, 2-Çizilme, 3- Yayınım, 4- Oksitlenme, 5- Yorulma

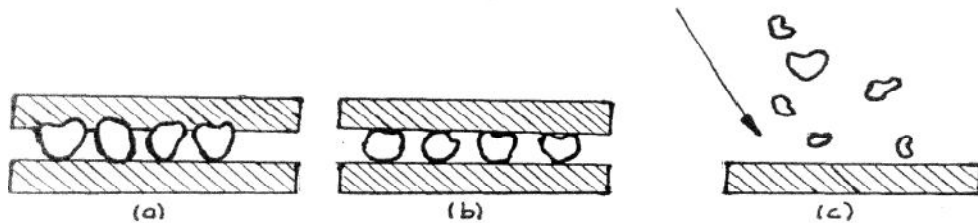
5.5.1. Yapışma aşınması

En önemli aşınma türlerinden biri olup, sürtünme elemanlarının temas yüzeylerinde yüksek mekanik gerilme sonucu "mikro kaynak" bölgelerin oluşması esasına dayanır. Birbirleriyle temas halinde ve bağıl harekete sahip parçalarda birinin diğerine malzeme transferi olarak tanımlanır. Yüzey pürüzlülüğü dolayısıyla gerçek temas yüzeyi geometrik sürtünme yüzeyinin çok küçük bir parçasıdır. Normal gerilimlerle izafi hareket sırasında oluşan teğetsel gerilmelerin süper konumuyla; bir mikro temas yüzeylerinde mekanik gerilmeler büyük ölçülere ulaşır. Bu ölçüler çoğu zaman sürtünme elemanı malzemesinin akma sınırını aşarak yüzey bölgesini plastik deformasyonlarına götürür, adsorpsiyon veya tepkime tabakalarını kırarak doğrudan doğruya metalik teması sağlar. Yüksek bölgesel basınç altındaki bu temas ise atom bağlantıları ve "mikro soğuk kaynak" bölgeleri oluşturur. Bu bölgeler izafi hareket durumunda, sürtünme kuvvetinin etkisiyle kırılarak yüzeyler arasında taşınır. Bu şekilde meydana gelen malzeme kaybına yapışık aşınma denir. Ortamın ısısı, yüzeyin pürüzlülüğü, hareket hızı ve ortamın basıncı aşınmanın şiddetini artıran

temel faktörlerdir. Yapışık aşınma miktarı uygulanan yük ile ve kayılan yol ile doğru orantılı olup aşındırılmış yüzeyin sertliği ile ters orantılıdır. Yapışık aşınma, bir metal yüzeyinin başka bir metal yüzeyi üzerindeki hareketi sırasında daha yumuşak olan metalin yüzeyindeki pürüzlerin kopması sonucu ortaya çıkar. Adezif aşınma genellikle yataklarda, dişlilerde, kam mekanizmalarında ve demiryollarında çalışan teker ray sistemlerinde görülür. Yüksek yükleme ve hız durumlarında yağlama aşınmanın azaltılmasını sağlar. Yüzeyler arasında bulunan oksit, CO_2 , nem ve N gibi maddeler adezif aşınma, miktarının azalmasını sağlar [46].

5.5.2. Çizilme aşınması

Sürtünen iki yüzey arasına dışarıdan giren ya da, iki yüzey arasında oksitlenmeden dolayı meydana gelen daha sert bir maddenin yüzeylerde yaptığı hasar olarak tanımlanır. Bu sert maddeler yüzeylerde taşlama işleminde olduğu gibi, bir malzemeden parça kopartılması olayı ile benzer işlem yaparlar. İki kısımlı abrazyon aşınmaya sürtünen yüzey üzerindeki sert tümsekler sebep olur. Fakat üç kısımlı aşınmada kayan yüzeyler arasında serbestçe yuvarlanan ve kayan sert parçacıklar bulunur (Şekil 5.5). Abrazyon aşınmayı izah etmek için bazen kullanılan terimler ise "yüksek gerilme çizilmesi" ve "düşük gerilme çizilmesi" dir. Yüksek gerilim abrazyonunda çizici parçacıkların kırılma dayanımı aşılar, dolayısıyla aşınma sırasında bu parçacıklar kırılır. Düşük gerilme çizilmesinde parçacıklar kırılmadan kalır. Bazı durumlarda sert parçacıklar yüzeye çarpması aşınmaya sebep olur. Bu tür aşınmada sert parçacıklar yüzey üzerine ya bir gaz akışı veya bir sıvı akışı ile taşınır. Bu tip aşınmaya erozyon denir [53].



Şekil 5.5. Çizilme aşınması, a) iki kısımlı çizilme, b) üç kısımlı çizilme, c) erozyon aşınma farklarının gösterilmesi [53]

Abrazif aşınma mekanizmaların gevrek kırılma olaylarının her ikisini de içerir. Abrazif aşınmanın anlaşılması için bu iki mekanizmanın anlaşılması gerekir.

5.5.3. Yayınım aşınması

Yayınım aşınmasında, yüzeylerin karşılıklı çalışması sırasında oluşan kimyasal olaylar daha etkili olmaktadır. Karşılıklı çalışan malzemelerin kimyasal özellikleri ve karşılıklı malzemeyle olan birleşme eğilimleri yayınım aşınması mekanizmasının oluşmasını sağlamaktadır. Karşılıklı çalışan malzemelerin sertliği bu aşınmada çok fazla etkili olmamaktadır. Malzemeler arasındaki metalurjik ilişki, asıl aşınma mekanizmasının büyüklüğünü tayin etmektedir. Mekanizma daha çok sıcaklığa bağlıdır ve bu sebeple yüzeyler arasında yüksek basınç ve yüksek kayma hızlarında daha fazla olmaktadır [46].

5.5.4. Oksitlenme aşınması

Pek çok malzeme için oksitlenme oldukça farklı olmakla beraber, metal malzemelerin çoğu için yüksek sıcaklık ve havanın varlığı oksitlenme anlamına gelmektedir. Sürtünme etkisi yüzeyde yüksek sıcaklıkların meydana gelmesine neden olur ve bu sıcaklık artışı kimyasal tepkimelerin sebep olduğu çatlak oluşumunu artırır. Hava, çalışan iki yüzey kenarlarından ve abrazif aşınmanın neden olduğu kanallardan içeri girme imkânı bulur. Bu tür aşınma yüksek sıcaklık ve dış havayla temas gerektirdiğinden daha çok kuru kayma aşınmasında meydana gelir [46].

5.5.5. Yorulma ve tabakalaşma aşınması

Yorulma aşınması, genellikle ısıl-mekanik bir birleşimdir. Sıcaklık dalgalanmaları ve karşılıklı kaymanın sık sık durup başlaması neticesinde çalışan yüzeylerin kenarlarına düşen yüklerdeki değişimden dolayı kenarlarda çatlaklar ve kırılmalar oluşur. Yorulma büyük bir çatlağı başlatabilir ve malzeme yüzeyinden taneciklerin kopmasını sağlayabilir. Tabakalaşma aşınması; yüzey pürüzlülüklerinin birbiri

üzerinde kayması sırasında mikroskobik ölçekte meydana gelen bir yorulma aşınmasıdır. Küçük çatlaklar yüzeyin altında çekirdeklenir [46].

6. YATAK MALZEMELERİ

Yatak tasarımında uygun yatak malzemesinin seçimi çok önemlidir. Yağlamanın iyi yapıldığı ve yükün bütünüyle sıvı sürtünme ile karşılandığı durumlarda yatak malzemesinin gerekli mukavemet ve rijitlikte olması yeterlidir. Fakat uygulamada böyle ideal koşulları yakalamak mümkün olmadığından yatak malzemesinin beklenen özelliklere sahip olması çok önemlidir.

En yüksek basınç ortalama basınçtan bir kaç kat büyük olabileceğinden yatağın basma mukavemeti kalıcı deformasyonları karşılayabilecek kadar yüksek olmalıdır. Millerdeki sehimler ya da birtakım hatalar yatağın plastik deformasyonu ile karşılanabilmelidir. Özellikle uçak ve otomobil sanayisinde kullanılan yatakların maruz kaldıkları tekrarlı yüklere dayanabilmeleri için yorulma mukavemetlerinin yüksek olması gerekir. Yatağın içine dışarıdan giren ya da yatağın aşınması sonucu oluşan parçacıkların aşındırıcı etki yaparak kısa zamanda yatak ve mili bozmaması için yatak malzemesinin bu parçacıkların gömülebileceği kadar yumuşak olması istenir. Yatağın sınır sürtünme koşullarında ya da yağsız ortamlarda aşınmadan, çizilmeden ve sarmadan çalışması, yük altında harekete başlayan ya da yetersiz yağlamanın beklendiği durumlarda önemlidir. Bu nitelik mil, yatak ve yağlayıcının uyumuna bağlıdır. Yakın özellikteki malzemeler birbirlerini kolayca aşındırıcılar. Bu sebeple, genel prensibi olarak farklı cins ya da farklı ısıl işlem görmüş metaller kullanılır. Birçok uygulama için mil çelikten yapıldığından sert bir mil ve daha yumuşak yatak malzemesi seçilir. Böylece hem aşınmalar azaltılmış hem de sadece yatağın aşınması sağlanmış olur. Mil ve yatağın pürüzlülüğü de önemlidir. Mikro sivrilikler yağ filminin yırtılması, dolayısıyla aşınmalara sebep olur. Isıyı kolayca iletebilmeleri için ısıl iletkenlik katsayıları yüksek olmalı ve geniş sıcaklık aralığında çalışan yerlerde ısıl genişleme katsayıları düşük olmalıdır. Düşük sürtünme katsayısına sahip olmalıdır. Yatak işletmeye alındığında kolay alışmalı, yağ ve karşı malzemeye kolay uyum sağlayabilmelidir. Mümkün olduğu kadar ucuz olmalıdır.

Tahmin edildiği üzere tüm bu beklentileri karşılayabilecek ideal bir yatak malzemesi bulmak mümkün değildir. Hatta bazı durumlarda birbirine zıt özelliklerin kullanılması gerekebilir. Buna yatağın basma mukavemetinin yüksek olması ve mildeki deformasyonları karşılayabilmesi gibi bir durum örnek olarak verilebilir. Bu sebeple tek bir yatak malzemesi yerine farklı özellikleri üstün olan birçok yatak malzemesi vardır. Uygulamada kullanılan yatak malzemeleri metalik ve metalik olmayan şekilde iki grupta incelenebilir [1].

6.1. Metalik Yatak Malzemeleri

6.1.1. Beyaz metal

Beyaz metal; kalay, kurşun, antimon ve bakır içeren alaşımdır. Genelde bir kalay alaşımı olarak değerlendirilen bu malzeme ile; kalay miktarı yüksek (% 80 Sn ve daha fazla), kurşun miktarı yüksek (% 80 Pb ve % 1-12 Sn) veya kurşun ve kalay oranları ara değerlerde olan beyaz metal olarak karşılaşılabilmektedir.

Babbitt olarak isimlendirilen en eski alaşım % 89,5 kalay, % 8,8 antimon (Sb) ve % 1,7 bakır ihtiva eder. Kurşun oranı yüksek beyaz metaller plastik deformasyona uyumlu olurken, kalay oranı yüksek olanlar korozyona daha dayanıklıdır. WM80 beyaz metal alaşımına bir örnek olup bileşimi % 79-81 Sn, % 10-12 Sb, % 8-10 Cu ve % 1-3 Pb'dir. Beyaz metalin yapısı yumuşak bir kalay kütlesi içinde dağılmış sert kristaller şeklindedir. Bu nedenle mil malzemesiyle iyi bir eş çalışma özelliği ve gömme yeteneği gösterir, korozyona ve aşınmaya dayanıklıdır. Sürtünme katsayısı oldukça küçüktür. Ancak bu malzemelerin sertliği, basma ve yorulma mukavemetleri nispeten küçüktür. Kurşun esaslı beyaz metallerin en önemli sakıncası, yağın oksitlenmesi dolayısıyla oluşan organik asitlerin kurşunla tepkimeye girmesi, aşınma ve yağ içinde bir tortu oluşturmalarıdır. Ancak bunlar kalay esaslı beyaz metallere göre daha ucuzdurlar [1].

6.1.2. Bakır alaşımları

Yatak malzemesi olarak en çok kullanılan bakır alaşımı bronzdur. Bronz alaşımları da bileşimlerine göre kalay ve kurşun bronzu olarak iki gruba ayrılmaktadır. Genellikle bronz kolay işlenebilen, korozyona iyi dayanıklılık gösteren, nispeten küçük bir sürtünme katsayısı yaratan ve oldukça sert bir yatak malzemesidir. Bakır esaslı malzemelerin ana bileşeni sert bakırdır.

Kurşun bronzları (% 10-28 Pb, % 3-10 Sn) en yumuşak bronz türüdür. Bunlar aşınmaya çok dayanıklı değildirler. Kurşun-kalay bronzları (% 5-14 Sn, % 3-25 Pb) daha serttir. Kalay bronzuna (% 5-14 Sn) az miktarda fosfor da ilave edilerek fosfor bronzu elde edilir, genellikle büyük kuvvetler ve orta hızlar için kalay bronzu uygundur.

Bakır-kalay-çinko ve kurşun alaşımı olan kızıl döküm ve bakır-çinko alaşımı olan pirinç de çok daha pahalı olan kalay bronzu yerine yatak malzemesi olarak kullanılırlar. Ancak bunların kayma özellikleri kalay bronzundan daha kötüdür [1].

6.1.3. Alüminyum alaşımları

Bileşiminde % 6-7 kalay, % 1,5-2,5 silikon ve az miktarda bakır ve nikel bulunan alüminyum alaşımları da yatak malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin korozyona dayanıklılığı ve ısı iletkenlikleri iyi olup aşınma özellikleri bakımından beyaz metale yakındır. Isıl genleşme katsayılarının büyüklüğü en önemli mahsur olarak değerlendirilir. Sert olduklarından gömme kabiliyetleri düşüktür [1].

6.1.4. Kadmiyum ve gümüş alaşımları

Bileşiminde % 98 kadmiyum, % 2 nikel veya % 98 kadmiyum, % 1 gümüş ve % 1 bakır bulunan kadmiyum alaşımının sürtünme katsayısı küçük, yük direnci ve yorulma mukavemeti yüksektir. Çok pahalı olan bu alaşım otomobil ve uçaklardaki yataklarda kullanılmaktadır [1].

6.1.5. Sinterlenmiş malzemeler

Toz metalurjisi yoluyla elde edilen bu malzemeler ince toz haline getirilmiş metal veya metal alaşımının bir kalıp içinde 500 N/mm^2 civarında yüksek basınçla sıkıştırılıp $750\text{-}1000^\circ\text{C}$ 'de ocakta sinterlenerek imal edilirler. Yatak malzemesi olarak kullanılacak sinter malzemelere belli bir sıcaklıkta yağ emdirilir (gözenekli olarak imal edilen sinter yataklar yağ emdirilerek kullanılmaktadır).

Genel olarak sinterlenmiş malzemelerin mukavemeti döküm yatak malzemelerinkinden daha düşüktür. Bileşimi % 90 bakır, % 10 kalay ve bazı hallerde % 1-3 grafitten oluşan sinter bronz istenilen özellikler bakımından en iyi sonuç veren yatak malzemesidir. Sinter demir ise hem ucuz hem de mukavemeti daha yüksek olduğundan özellikle düşük hızlarda kullanılmaktadır [1].

6.2. Metal Olmayan Yatak Malzemeleri

6.2.1. Plastik malzemeler

Metal dışı yatak malzemelerinden en çok kullanılan plastik malzemeler teflon ve naylondur. Teflon (Politetrafloretillen-PTFE) geniş bir işletme sıcaklık bölgesine sahiptir (200°C 'ye kadar karalı bir şekilde kullanılabilir). Düşük hızlarda ve yüksek basınç altında sürtünme katsayısı 0,01 mertebesinde. Bu malzeme yağa ihtiyaç göstermeden kullanılabilir. Bu malzemenin rijitliği, aşınmaya dayanıklılığı ve statik mukavemeti cam elyafı, asbest, grafit, molibdendisülfid, kurşun ve bronz gibi dolgu malzemeleri eklenerek arttırılır. Teflon genelde pahalı bir malzemedir.

Naylon (poliamid) teflona göre mukavemeti daha yüksek, kayma ve darbe sönümleme özellikleri iyi ve daha düşük sürtünme özelliklerine sahiptir. Poliüretanlar daha az su emme yanında diğer özellikleriyle poliamidlere benzerler. Bu malzemelerin işletme sıcaklıkları -25°C ile 80°C arasında olabilmektedir.

Oda sıcaklığında naylon, teflondan daha sert, daha rijit ve aşınmaya karşı daha dayanıklı olduğundan düşük sıcaklıklarda naylon tercih edilmektedir. Yağlı sürtünmede naylon, kuru sürtünmede ise teflon iyi sonuç vermektedir. Yüksek hızlarda da sürtünme katsayısı daha düşük olduğundan teflon tercih edilmektedir. Ayrıca teflon kimyasal bakımdan naylondan daha dayanıklıdır. Genel olarak bütün plastik malzemelerde olduğu gibi teflon ve naylonun metal malzemelere göre çok kötü ısı iletkenlikleri vardır. Isıl genleşme katsayıları ise büyüktür [1].

6.2.2. Diğer malzemeler

Yukarıda belirtilen sentetik malzemelerden başka özellikle su içinde çalışan yataklar için yapay lastik ve sert odun (pelesenk) da kullanılmaktadır. Bu malzemeler gemi pervane yatakları için uygun malzemelerdir.

Bu malzemelerden başka ölçü aletleri ve hassas cihaz tekniğinde kullanılan safir, koridon ve elmas gibi kıymetli taşlar ve yüksek sertlikte karbürlerden yapılmış yatak malzemeleri de mevcuttur. Kendi kendine yağlama özelliğinde olan demir ve bronz yatak malzemeleri de üretilmektedir [1].

7. YAĞLAMA VE YAĞLAYICILAR

Tribolojide üçüncü aşama olan yağlama, eş çalışan yüzeyler arasında oluşan sürtünmeyi azaltmak ve aşınmayı kısmen veya tamamen önlemek için yağlayıcı maddeler kullanılmasıdır. Yağlayıcı maddeler ayrıca sıcaklık yükselmesini de önlemektedirler. Yağlayıcı maddeler temas yüzeylerine iyice yapışarak yüzeylerin pürüzlerini birbirinden ayırır, yüzeyleri korozyona karşı korur, sistemde oluşan ısıyı dışarı atar.

Çeşitli sürtünme halleri için yağlayıcı malzemenin değişik işlevleri yerine getirdiği görülür. Sıvı sürtünmesinde yüzeyler arasında bulunan yağ tabakası yüzeyleri birbirinden tamamen ayırdığından burada yağın viskozitesi çok önemlidir. Bundan dolayı sıvı sürtünmesinde genellikle sıvı madde, bazı hallerde ise gaz yağlayıcı madde olarak kullanılmaktadır. Sınır sürtünmesinde yağlayıcı maddenin yüzeylere yapışma kabiliyeti ve kimyasal yapısı önemlidir. Bu sürtünme halinde katı ve katı katı sıvı yağlayıcılar kullanılmaktadır.

Özelliklerine ve kullanım yerlerine göre yağlayıcı maddeler katı, yarı katı, sıvı ve gaz yağlayıcılar olarak incelenmektedir [1, 54].

7.1. Katı Yağlayıcılar

Bu yağlayıcılar yalnız başlarına kullanılabildikleri gibi sıvı yağlar veya gresler ile karıştırılarak da kullanılabilmektedir. Uygulamada en çok kullanılan katı yağlayıcılar grafit, molibden disülfid, talk gibi toz şeklindeki yağlayıcılardır. Poliamid (PA), Poliasetal (POM), Politetrafloretlen (PTFE) gibi plastik malzemeler de kaygan özelliklerinden dolayı kılavuz, yatak ve dişliler gibi değişik makina elemanlarının yağlanmasında kullanılırlar.

Toz veya ince levhalar şeklinde kullanılan grafit 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yalnız başına, diğer hallerde yağ veya gres ile bir süspansiyon oluşturacak şekilde karıştırılarak kullanılmaktadır. Molibden disülfid metalik yüzeylerin üzerinde grafit

benzer bir tabaka oluşturur. Vakumda veya oda sıcaklığında molibden disülfid çok iyi yağlama özelliğine sahiptir. MoS_2 ile yağlanmış yüzeylerin sürtünme katsayısı 0,02 ile 0,12 arasında değişmektedir. Alüminyum, kurşun, bakır gibi kolay deforme olabilen metal malzemeler ise sınır sürtünmesinde yüzeyleri aşınmadan korumak için kullanılmaktadır [1, 54].

7.2. Gaz Yağlayıcılar

Yüksek hız ve düşük yüklü sıvı sürtünmeli sistemlerde gaz yağlayıcılar kullanılmaktadır. Ayrıca gıda ve ilaç sanayinde sıvı yağ veya gres kullanımı istenmediğinden bu sektördeki sistemlerde de gaz yağlayıcılar tercih edilmektedir. Gaz yağlayıcıların viskoziteleri sıvı yağlayıcılara göre çok küçük olduğundan kullanıldıkları sistemlerde sürtünmeden kaynaklanan güç kaybı ve ısı oluşumu çok az olmaktadır. Ancak gaz yağlayıcıların kullanıldığı sistemlerin yük taşıma kabiliyetleri çok düşüktür. En çok kullanılan gaz yağlayıcılar hava, hidrojen ve azot'tur. Son zamanlarda kükürt heksafloridler, sıvı azot, buhar ve organik buharlar ve karbondioksit (özellikle reaktörlerde aynı zamanda soğutma amaçlı) kullanılmaktadır [1, 54].

7.3. Yarı Katı (Gresler) Yağlayıcılar

Gresler içinde katılaştırıcı madde bulunan, sıvı yağlardan oluşan, krem kıvamında madeni sabun yapılı organik kökenli veya yapay yollarla (gliserinin bir yağ asidi ile esterleştirilmesiyle) elde edilen yarı katı yağlayıcı maddelerdir. Madeni sabunlarla katılaştırılmış yağlardan olan greslerde katılaştırıcı madde olarak genellikle alüminyum, baryum, kalsiyum, lityum, sodyum gibi metalik sabunlar ve bentonit, mika veya organik esaslı sabun olmayan maddeler de kullanılmaktadır.

Greslerin ağırlığının % 65 ila % 95'ini yağ, % 3 ila % 30'unu katılaştırıcı ve bazılarında % 10'a kadar da katkı maddeleri oluşturur. Kullanılan katılaştırıcı maddeye göre gresler kalsiyum gresi, lityum gresi, sodyum gresi gibi isimlendirilir.

Gresler genellikle açıkta çalışan ve uzun yağlama süreli, düşük ve orta hız ve yük altında çalışan sistemlerde kullanılır.

Lityum sabunlu gresler çalışma sıcaklığı -30°C ila 100°C aralığında olan sistemlerde tercih edilirler. Suya karşı koruma istenirse korozyon önleyici ve suda çözünmeyi engelleyici özel katıklar eklenir. Büyük yüke maruz rulmanlı yatakların yağlanması ise çok defa kurşun sabunu katılmış kireç veya lityum sabunlu gresler kullanılır. Bunlara EP (extreme pressure) gresleri denir. Kireç+kurşun sabunlu greslerin büyük bir yapışma kabiliyeti ve su karşısında korozyona karşı koruyuculuk özelliği vardır. Darbeli ve sarsıntılı yataklarda koyulukları değişmediği için sodyum sabunlu gresler iyi sonuç verir ve çalışma sıcaklıkları yaklaşık 100°C 'ye kadar ulaşabilen sistemlerde kullanılabilir [1, 54].

7.4. Sıvı Yağlayıcılar (Yağlar)

Sıvı yağlayıcı maddeler organik (hayvansal ve bitkisel), metalik (mineral) ve yapay yağlar olmak üzere üç grupta incelenebilir. İzafi hareket eden yüzeyler plastik, lastik gibi metal dışı malzemelerden yapılmışsa su da sıvı yağlayıcı madde olarak kullanılabilmektedir [1, 54].

7.5. Organik Yağlayıcılar

Bu yağlayıcılar iyi yağlama özelliğine sahip olmalarına rağmen ömürleri çok kısadır. Ayrıca belirli bir oranda asit ihtiva ettiklerinden yüzeylerde korozyona sebep olmaktadır. Hayvansal yağlar; mafsallık yağı, kemik yağı, bitkisel yağlar ise Hint yağı, şalgam yağı, zeytinyağı gibi organik yağlayıcıların çoğunluğu gıda maddesi olarak tercih edilmekte ve fiyatları da çok yüksek olduğundan endüstride çok az kullanılmaktadırlar [1, 54].

7.6. Yapay Yağlar

Bu yağlar genellikle kimyasal maddelerden elde edilen yapay yağlar olup ham petrol esaslı yağların yağlayıcı özelliklerine sahiptirler. Ancak çok kaliteli ve çok pahalı yağlardır. Bu yağlar tek başlarına veya metalik yağların özelliklerini iyileştirmek için katık olarak kullanılırlar.

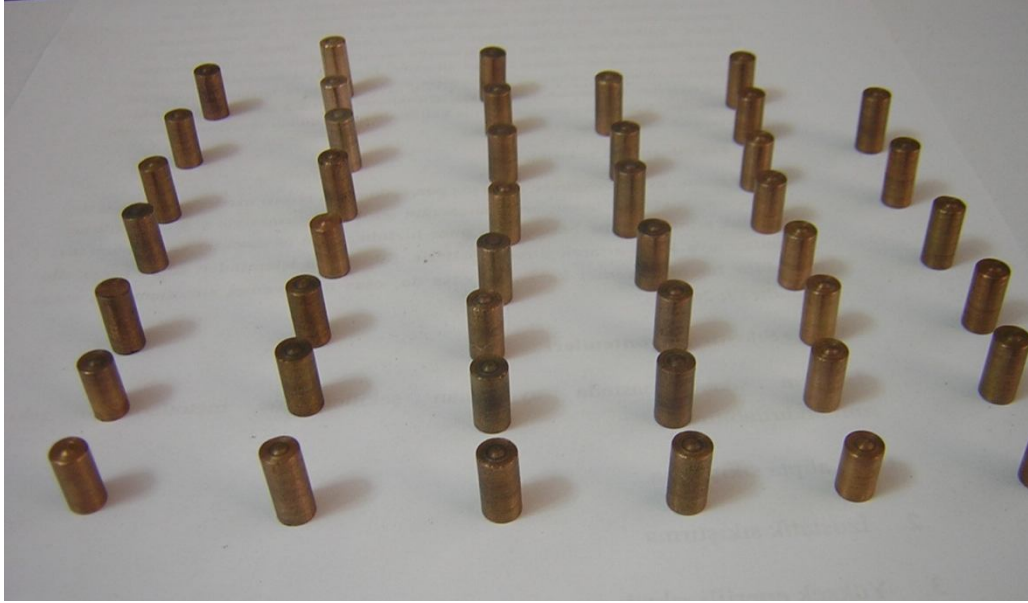
Sentetik yağlar; kimyasal sentezlerinde kullanılan kimyasal maddelere göre sınıflandırılırlar (fosfat ester, silikon, silikat ester yağları vb.). Kimyasal açıdan hidrokarbonlar (sadece H ve C içeren) ve sentetik sıvılar olmak üzere iki grupta incelenebilir. Bu yağların termik mukavemet, zor oksitleme, viskozite-sıcaklık değişiminin küçük büyük olması, zor tutuşma ve çok geniş sıcaklık aralıklarında kullanılabilme gibi avantajları vardır. Korozyon, her malzemeyle uyum sağlayamama, her katkıyı içinde çözümleyememe, yüksek fiyat ve zehirleyebilme gibi sakıncalı yönleri de değerlendirilmelidir. Ancak bu yağlayıcıların gelecekte önemli kullanım alanlarına sahip olacakları tahmin edilmektedir [1, 54].

8. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında, grafit içermeyen ve farklı oranlarda grafit içeren kendinden yağlamalı bronz yatak malzemesi numuneleri farklı basınçlar altında T/M teknikleri kullanılarak üretilmiştir (Resim 8.1). Numuneler içerdiği grafit oranına ve sıkıştırma basıncına göre kodlanmıştır. Örneğin K99-1*100 kod numarasına sahip numune ağırlıkça % 99 bronz ve ağırlıkça % 1 grafit içermekte olup 100 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır (Çizelge 8.1). Çalışmalar Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Toz Metalurjisi Laboratuvarı, Takım Tezgâhları Laboratuvarı, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Malzeme Laboratuvarı, TOBB ETÜ Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sıcaklığı $15\pm5^{\circ}\text{C}$ olan laboratuvar ortamında yapılmıştır. Hassas tartım gerektiren ölçümlerde Scientech marka 0,0001 g hassasiyetli elektronik terazi kullanılmıştır.

Çizelge 8.1. Numunelere ait kodlamalar

NUMUNE	Grafit % Ağırlıkça	Bronz % Ağırlıkça	Sıkıştırma Basıncı, MPa
K99-1*100	1	99	100
K99-1*150	1	99	150
K99-1*200	1	99	200
K99-1*250	1	99	250
K98-2*100	2	98	100
K98-2*150	2	98	150
K98-2*200	2	98	200
K98-2*250	2	98	250
K97-3*100	3	97	100
K97-3*150	3	97	150
K97-3*200	3	97	200
K97-3*250	3	97	250
K100-0*100	0	100	100
K100-0*150	0	100	150
K100-0*200	0	100	200
K100-0*250	0	100	250



Resim 8.1. Üretilen yatak numuneleri

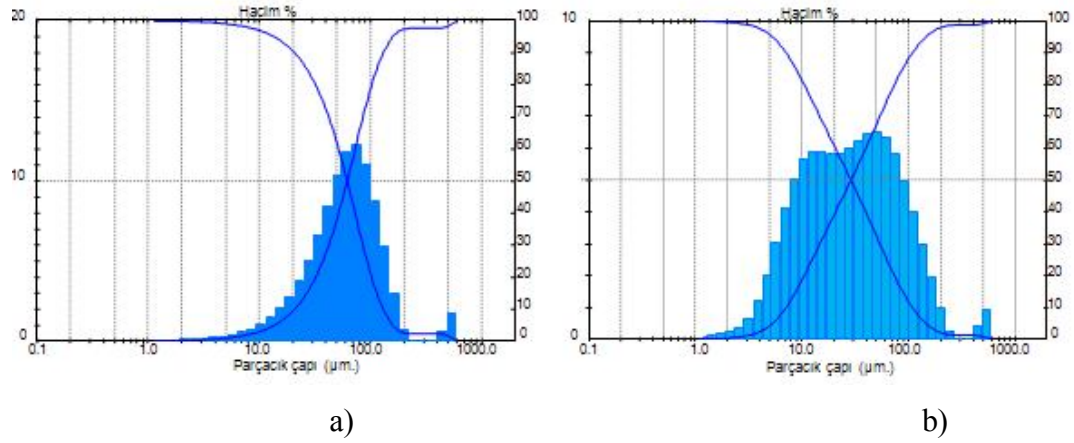
8.1. Malzeme

Yatak malzemesi olarak kullanılan ön alaşımlı CuSn10 bronz tozları Tozmetal Ticaret ve Sanayi A.Ş.'den, grafit tozları ise Çağrı Kimya'dan temin edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan tozların boyutları Resim 8.2'te görülen Malvern Sizer E tipi laserli toz boyut ölçme cihazıyla belirlenmiştir. Ortalama toz boyutunun yanı sıra toz boyut dağılımı da elde edilmiştir. Çizelge 8.2'de verilen d_{50} değeri ortalama toz boyutu; d_{10} ve d_{90} değerleri ise sırasıyla tozların % 10 ve % 90'ının küçük olduğu toz boyutlarıdır. Çalışmada kullanılan bronz ve grafit tozlarının yoğunluğu sırası ile $8,76 \text{ g/cm}^3$ ve $2,25 \text{ g/cm}^3$ 'dür.



Resim 8.2. Malvern Sizer E Tipi laserli toz boyut ölçme cihazı

Çizelge 8.2. Bronz ve grafit tozlarının boyut dağılımı



Kullanılan Toz	d_{50} , μm	d_{10} , μm	d_{90} , μm
a) Bronz Tozu	61,68	20,82	130,74
b) Grafit Tozu	28,86	7,09	108,95

8.2. Deneysel Yöntem

8.2.1. Toz karışımlarının hazırlanması

Grafit katkılı numuneler hazırlamak için, bronz tozlarına ağırlıkça %1-2-3 oranında grafit tozu ilave edilmiştir. Homojen karışımlar sağlamak amacıyla üç boyutlu

kariştırma yapabilen Resim 8.3’de görülen Turbula cihazında 20 dakika süreyle kariştırılmıştır.

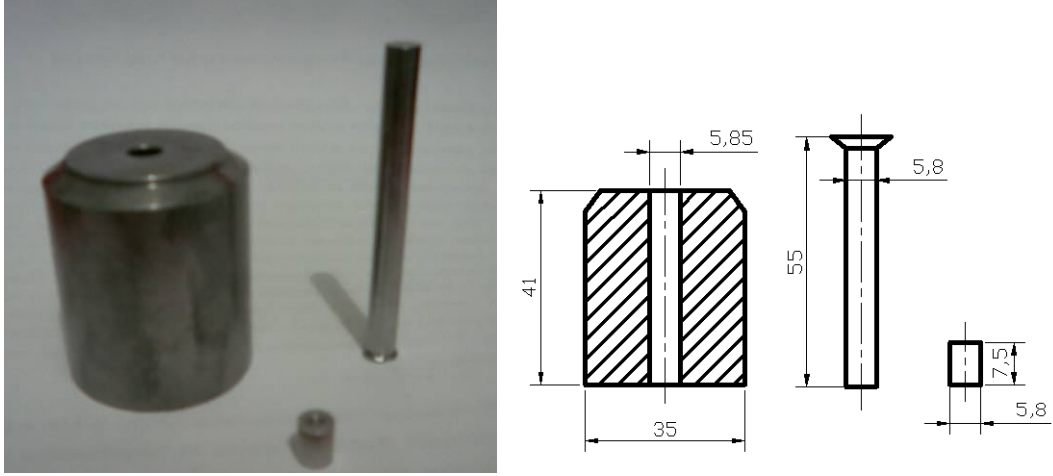


Resim 8.3. Turbula cihazı

Çalışmada kullanılan bronz tozunun ve bronz-grafit karişımlarının akış hızı ve görünür yoğunlukları Hall akış  l eri kullanılarak belirlenmiştir. Akış hunisinden 50 g tozun akma süresi belirlenmiştir. Hall hunisinden akan toz, hacmi 25 cm³ olan silindir bir kaptaki toplanmış ve tozun fazlası yüzeyden bir cetvel yardımıyla sıyrılmıştır. 25 cm³’lük hacmi dolduran tozun ağırlığı 0,01 g hassasiyetli terazi ile tartılıp görünür yoğunluğu hesaplanmıştır.

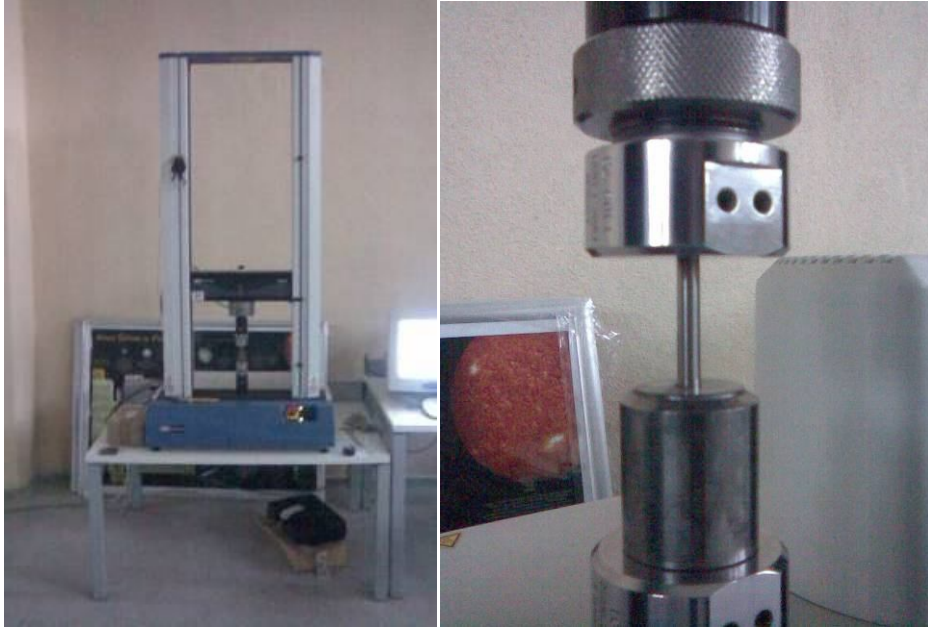
8.2.2 Sıkıştırma

Elde edilen toz karişımlarının sıkıştırılarak yatak numunelerinin üretilmesi için Resim 8.4’de görülen kalıp seti hazırlanmıştır. Kalıp gövdesinin malzemesi SAE 3343 çeliğinden olup G. . Takım Tezgâhları Laboratuvarında istenilen geometriye getirilmiş ve Akalın Isıl İşlem firmasında yaptırılan ısıl işlem sonrası 62 HRC sertlik kazandırılmıştır. Kalıp alt ve üst zımbası 60 HRC sertliğinde olup Zirve Kalıpcılık’tan alınmıştır.



Resim 8.4. Kalıp seti ve teknik resmi

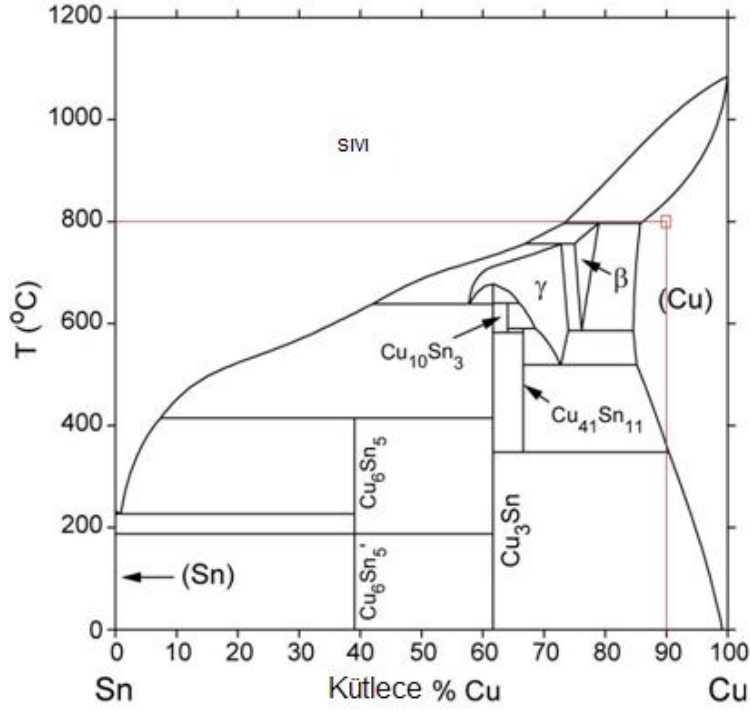
Sıkıştırma işlemi için TOBB ETÜ Malzeme Laboratuvarında bulunan 50 kN kapasiteli Instron marka bilgisayar kontrollü basma-çekme cihazı kullanılmıştır (Resim 8.5). Sıkıştırma basıncı olarak dört farklı basınç değeri belirlenmiştir. Toz karışımları 100 ile 250 MPa arasında 50 MPa aralıklarla artırılarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma esnasında her defasında kalıp boşluğuna 2,0 g ağırlığında karışım tozu koyulmuştur. Sıkıştırma hızı 5 mm/dak olarak ayarlanmıştır. Kalıp yüzeyinin bozulmaması için her sıkıştırma işlemi sonrasında kalıp iç yüzeyi ve zımba, hazırlanan çözeltisi (1 lt aseton içinde 100 g çinkostearat) ile temizlenmiştir.



Resim 8.5. Instron Marka 50 kN kapasiteli basma çekme cihazı

8.2.3. Sinterleme

Preslenerek ham mukavemet kazanmış grafit ilaveli bronz yatakların sinterleme işlemi, fırın içine yerleştirilen özel bir düzenek içinde kömür tozuna gömülerek ve atmosfer kontrollü olarak yapılmıştır. Sinterleme fırınının ve sinterleme düzeneğinin görünümü Resim 8.6’de verilmiştir. Kontrollü atmosfer olarak % 99,5 saflıkta azot gazı kullanılmıştır. Sinterleme atmosferinde bulunabilecek olası oksijenin numune yüzeyine ulaşmadan reaksiyona sokularak zararsız hale getirilmesi için numuneler çelik folyoya sarılıp mangal kömür tozu içine gömülmüştür. Numunelerin çelik folyoya sarılmasındaki amaç ise numunelerin yüzeylerine karbon difüzyonunu engellemektir. Sinterleme sıcaklığı, Şekil 8.1’de görülen bakır-kalay faz diyagramından % 90 Cu ve % 10 Sn alaşımı için katıgen sıcaklığının altında olan 800°C seçilmiştir. Isıtma işlemi 10°C/dak hız ile yapılmış ve 800°C’de 20 dakika beklendikten sonra yine atmosfer kontrolü altında ilave bir işlem yapılmadan fırın sıcaklığının oda sıcaklığına düşmesi için beklenmiştir.



Şekil 8.1. Bakır-kalay faz diyagramı



Resim 8.6. Sinterlemede kullanılan fırın ve düzenek

8.2.4. Arşimet prensibi ile hacim hesaplaması

T/M ile üretilen kendinden yağlamalı yataklar gözenekli yapıya sahip olduğu için Arşimet prensibine göre hacim hesaplanırken numuneler suya daldırıldığında gözeneklerin suyla dolması kaçınılmazdır. Bu hem hacim ölçümünün hatalı olmasına neden olur, hem de gözeneklere dolan suyun daha sonra uzaklaştırılmasında problemler meydana getirir. Bunu önlemek için, üretilen yatakların yüzeylerinin su

geçirgenliği olmayan bir malzeme ile film tabakası şeklinde kaplanması gerekmektedir. Bunun için TS 2305 EN ISO 2738’de belirtildiği şekliyle parafin (% 5) – kloroform (% 95) çözeltisi hazırlanarak sinterlenmiş deney numuneleri bu çözelti içine daldırılarak yüzeylerinin kaplanması sağlanmıştır. Sonrasında ise numuneler, kloroformun uçması için desikatörde 1 saat kurumaya bırakılmışlardır. Kurutulan numuneler 0,0001 g hassasiyetle tartılmıştır.

Standarda uygun biçimde Arşimet prensibi uygulanmış ve numunelerin saf sudaki ağırlıkları ölçülmüştür (Resim 8.7). Hacim hesabı bittikten sonra numunelerin yüzeylerini kaplayan parafinin uzaklaştırılması için numuneler 65°C’deki etüv fırında 1 saat bekletilmiştir (Resim 8.8).



Resim 8.7. Arşimet düzeneği



Resim 8.8. Etüv fırın ve desikatör

8.2.5. Yağ emdirme işlemi

Yağ emdirme işlemi Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Toz Metalurjisi Laboratuvarında bulunan ve çalışma kapsamında üzerine yeni eklemeler yapılan yağ emdirme ünitesi ile yapılmıştır. Düzenek sızdırmaz kap, karıştırıcı, ısıtma ve vakum ünitesinden oluşmaktadır (Resim 8.9). Numuneler yağ dolu düzeneğin içine yerleştirilmeden önce kap içerisinde bulunan yağın sıcaklığının $\pm 1^\circ\text{C}$ hassasiyetle istenilen değere çıkması sağlanmıştır. Karıştırıcı sayesinde yağ içinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilir. İstenilen sıcaklık şartının sağlanmasının ardından numune kabın içindeki özel delikli tabla üzerine yerleştirilmiştir. Vakum pompası ve ayar musluğu sayesinde kabın içindeki atmosfer basıncı 0-1 atm arasında 0,02 atm hassasiyetle istenilen değere ayarlanmıştır. Vakum işlemi devam ettirildiğinde numunenin gözeneklerinde bulunan havanın yerini yağ damlacıkları alır. Bu olay yağın üzerinde kabarcık oluşumu şeklinde kendini gösterir. Gözeneklerdeki tüm hava çekildikten sonra ve yağ içinde istenilen süre kadar beklendikten sonra vakum pompası kapatılmış, kabın içindeki basınç yavaş yavaş dış hava basıncına eşitlenmiştir. Bu eşitleme sırasında gözeneklere dolmuş olan yağ kararlı bir hal alır. Yağ emdirmek için kullanılan bu yöntem, Mitsubishi Materials Corporation'a ait olan, Kanezaki Noboru ve Miki Takeyoshi tarafından geliştirilen 27.05.1994 tarihli JP6145717 numaralı Japon patentidir [28].



Resim 8.9. Yağ emdirme ünitesi

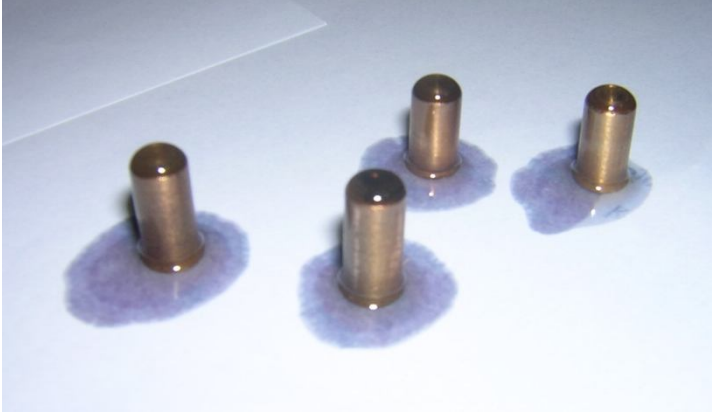
Yağ emme kapasitesi düşük basınç, yüksek sıcaklık ve vakum-bekleme süresinin eşit olduğu durumlarda yüksek olduğu bilinmektedir. Sıcaklığın artması ile yağın viskozitesi azalmaktadır, bu ise kılcallarla bağlı iç gözeneklere yağın emilimini kolaylaştırmaktadır. Bu olay dikkate alınarak elimizde mevcut olan vakum pompasıyla inilebilecek en düşük basınç değerine inilmiş ve SAE 30 yağının sıcaklığı ise elde edilen basınçtaki kaynama sıcaklığının altında tutulmuştur. Al-Jaroudi ve Mohammed Y.'ye ait olan 4,655,610 numaralı Amerikan patentinde gözeneklerdeki hava boşaltılana kadar yeterli süre vakum işlemine devam edilmesi gerektiği belirtilmiş fakat vakum işlemi için kesin bir süre verilmemiştir [28].

Sinterlenmiş numuneler, Çizelge 8.3'de özellikleri verilen SAE 30 yağ içinde 80°C ve 0,2 atm basınç altında 1 saat bekletildikten sonra oda sıcaklığındaki yağın içine bırakılmış ve 10 dakika bekletilerek gözeneklere dolmuş olan yağın kararlı bir hal alması sağlanmıştır.

Yağ emdirme işlemi tamamlanan numuneler, yüzeylerindeki fazla yağın süzülmesi için temiz bir zemin üzerinde 10 dakika bekletildikten sonra TS 2305 EN ISO 2738 standardında belirtildiği gibi yüzeyde süzülmeden kalan fazla yağ gözeneklerdeki yağa zarar vermeden dikkatlice temizlenmiştir (Resim 8.10).

Çizelge 8.3. SAE 30 yağ özellikleri

SAE #	Viskozite, ASTM D445		Viskozite index, ASTM D 2270	Akma Noktası, ASTM D 97 °C	Parlama Noktası, ASTM D 92 °C	Uygulama
	cSt@ 40°C	cSt@ 40°C				
30	85	10.0	97	-15	238	Genel amaç



Resim 8.10. Yağ emdirilmiş numuneler

8.2.6. Gözenek yapısı ve sertlik ölçümü

Gözeneklilik, gözenek yapısının önemli ancak eksik bir ölçüsüdür. Farklı gözenek boyutları, gözenek şekilleri ve gözenek bağlanabilirlikleri mümkündür. Sadece gözeneklilik yapısından ziyade, gözeneklilik yapısıyla ilgili daha fazla detaya ihtiyaç vardır .

İki çeşit gözenek vardır: İzole olmuş olanlar veya diğer gözeneklerle bağlantılı yani açık olanlar. Kendinden yağlamalı yataklarda açık gözenekler yağlama ve emdirme için gereklidir. Gözeneklilik yapısı hakkında fikir sahibi olmak için mikroskop altında inceleme yapılabilir [2].

Her gruptan seçilen birer adet numunenin gözenek yapısının incelenmesi ve sertlik ölçümleri G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Laboratuvarında yapılmıştır. Mikro yapı incelemesi yapılacak numunelerin gözeneklerindeki yağın uzaklaştırılması gerekmektedir. Yağı numunelerden uzaklaştırmak için TS ISO 13944 standardında belirtildiği gibi soxhlet cihazı kullanılmıştır (Resim 8.11). Soxhlet düzeneği kurulup numuneler ekstraktöre yerleştirilmiştir. Gözeneklerde bulunan SAE 30 yağının parlama noktası ve yağın buharlaşma sıcaklığı göz önünde tutularak ısıtıcı ceketin sıcaklığı 70°C’de tutulmuştur. Sıcaklığın etkisiyle balonda bulunan ve çözücü olarak kullanılan kloroform buharlaşarak ekstraktördeki yağlı numunelerin üzerine yoğunlaştırılmıştır.

Ekstraktörde biriken yüksek saflıktaki kloroform numunenin gözeneklerindeki yağı çözmekte ve bunun neticesinde oluşan kloroform-yağ karışımı bir süre sonra sifon yaparak tekrar balona dönmektedir. Yağ emdirilmiş numunelerin gözeneklerindeki yağın çıkarılması için bu işlem 3 saat süreyle uygulanmıştır. Soxhlet sonrası numunelerin gözeneklerine dolan kloroformun giderilmesi için numuneler desikatörde 1 saat bekletilmiştir.



Resim 8.11. Soxhlet düzeneği ve ekstraktör

Gözenek yapısının belirlenmesi için numuneler 200 ile 1200 numara zımpara kâğıdı arasında 200 numara aralıklarla yeteri kadar zımparalandıktan sonra sırası ile 6, 3 ve 1 mikron elmas pastalar ile yüzeyleri parlatılmıştır. Yüzeylerinde kalan parçacıkların ve pastanın temizlenmesi için parlatılmış yüzeyler su ve sıvı sabun ile yıkandıktan sonra alkol ile durulanıp hızla kurutulmuştur.



Resim 8.12. Gözenek yapısı incelenen numuneler

Sertlik ölçümleri, gözenek yapısı incelemelerinde kullanılan parlatılmış numuneler üzerinden yapılmıştır (Resim 8.12). Sertlik 1 kg yük ve piramit uç kullanılarak HV cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümünde Digital Microhardness Tester MHV2000 marka sertlik cihazı kullanılmıştır (Resim 8.13).



Resim 8.13. Sertlik cihazı

8.2.7. Sürtünme ve aşınma deneyleri

Üretilen kendinden yağlamalı yatak numunelerinin aşınma değerlerinin ve sürtünme katsayılarının belirlenmesi için adezif aşınma yapan pin-on-disk tipi deney düzeneği tasarlanıp G.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Takım Tezgâhları Laboratuvarında imal edilmiştir (Resim 8.14). Cihaz üzerinde bulunan 1,1 kW 1100 d/dak kapasiteye

sahip elektrik motorunun dönme hareketi kayış kasnak mekanizması yardımıyla karşı aşındırıcı olarak kullanılan diske iletilmektedir. Disk malzemesi olarak SAE 1040 çeliği kullanılmış ve Akalın Isıl İşlem firmasında yaptırılan ısıtıl işlem sonrası 55 HRC sertlik kazandırılmıştır. Disk yüzeyinin düzlemselliğini sağlamak ve yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için uygulanan taşlama sonrası Ra 1 µm yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Farklı hız ve yol değerlerinde deney yapabilmek için test cihazına frekans ayarlayıcı, devir sayacı ve yol ölçer bağlantısı yapılmıştır. Sürtünme ara yüzeyine uygulanması istenen normal kuvvet ise yük kolu üzerine yerleştirilmiş gezer bir ağırlık sayesinde ayarlanabilmektedir.

Sürtünme katsayısı ölçümü, yük kolunun hareketini engelleyecek biçimde yerleştirilmiş Esit SPA_6 kg marka yük hücresi ve TDG marka Ai8b model 8 kanallı veri toplama sistemi yardımıyla elektronik olarak ölçülmektedir (Resim 8.15). Disk dönmeye başladığında disk ile numune arasında oluşan sürtünme kuvvetinin etkisi ile yük kolu diskin dönme yönünde harekete zorlanmaktadır. Dönmeye zorlanan yük kolunun hareketi yük hücresi tarafından engellenmekte ve yük hücresini eğmeye çalışan kuvvet elektronik olarak ölçülüp belirlenmiş aralıklarla kayıt edilmektedir.



Resim 8.14. Hazırlanan sürtünme aşınma düzeneği



Resim 8.15. ESİT-6kg SPA yük hücresi ve TDG marka Ai8b model 8 kanallı veri toplama sistemi

Aşınma deneyleri ASTM G99 standardı referans alınarak yapılmıştır. Disk yüzeyi her aşınma testi öncesi aseton ile silinerek temizlenmiştir. Numunelerin sürtünen yüzeylerinin disk ile tam temas etmesi için test numunelerine ön aşındırma yapılmıştır. Farklı özelliklere sahip yatak numuneleri 1m/s kayma hız, 15 N yük ve 2000 m mesafede aşındırılmıştır. Sürtünme deneyi ise zamana bağlı olarak

yapılmıştır. En iyi aşınma performansına sahip numunelerin 1 m/s kayma hızı ve 15 N yük için sürtünme katsayıları 2,5 saat süreyle kaydedilmiştir.

8.3. Hesaplamalar Ve Deneysel Veriler

Hesaplamalarda kullanılacak olan semboller ve anlamları Çizelge 8.4’de verilmiştir.

Çizelge 8.4. Hesaplamalarda kullanılan semboller ve anlamları

Sembol	Anlamı
ρ_b	Bronzun Yoğunluğu, g/cm ³
ρ_k	Karışımın Yoğunluğu, g/cm ³
ρ_g	Görünür Yoğunluk, g/cm ³
ρ_s	Suyun Yoğunluğu, g/cm ³
ρ_y	Yağın Yoğunluğu, g/cm ³
$m_{k@25cm^3}$	Karışım Tozlarının 25cm ³ ’deki Ağırlığı, g
m_1	Kuru Ağırlık, g
m_2	Parafinli Ağırlık, g
m_3	Yağ Emdirilmiş Ağırlık, g
m_s	Sudaki Ağırlık, g
m_y	Numunelere Emdirilen Yağ Miktarı, g
V	Gerçek Hacim, cm ³
V_a	Ağırlığına Göre Olması Gereken Hacim, cm ³
V_g	Gözenek Hacmi, cm ³
V_y	Yağ Hacmi, cm ³
A	Numunenin Üst Yüzey Alanı, mm ²
P	Numuneye Uygulanan Presleme Basıncı, MPa

Karışımın görünür yoğunluğu;

$$\rho_g = \frac{m_{k@25cm^3}}{25cm^3} [g/cm^3] \quad (8.1)$$

Karışımın yüzde teorik yoğunluğu;

$$\frac{\rho_g}{\rho_k} \times 100 \quad (8.2)$$

Numunenin üst yüzey alanı;

$$A = \pi r^2 \quad [mm^2] \quad (8.3)$$

Numuneye uygulanan presleme basıncı;

$$P = \frac{F}{A} \quad [MPa] \quad (8.4)$$

Numunenin gerçek hacmi;

$$V = \left(\frac{m_2 - m_s}{\rho_s} \right) \quad [cm^3] \quad (8.5)$$

Kuru yoğunluk;

$$\frac{m_1}{V} \quad [g/cm^3] \quad (8.6)$$

Tam emdirilmiş yoğunluk;

$$\frac{m_3}{V} \quad [g/cm^3] \quad (8.7)$$

Numunenin ağırlığına göre olması gereken hacmi;

$$V_a = \left(\frac{m_1}{\rho_k} \right) \quad [cm^3] \quad (8.8)$$

Numunedeki gözenek hacmi;

$$V_g = V - V_a \quad [cm^3] \quad (8.9)$$

Numunenin gözeneklilik yüzdesi;

$$\% \text{ gözeneklilik} = \left(\frac{V_g \times 100}{V} \right) \% \quad (8.10)$$

Numunede yağ emdirme işleminden sonra bulunan yağ hacmi;

$$V_y = \left(\frac{m_3 - m_1}{\rho_y} \right) \quad [cm^3] \quad (8.11)$$

Numunenin yağ emme yüzdesi (gözenek hacmine göre);

$$\% \text{ yağ emme} = \left(\frac{V_y \times 100}{V_g} \right) \% \quad (8.12)$$

Yağ muhtevası (hacimce yüzde);

$$\% \text{ yağ muhtevası} = \left(\frac{V_y \times 100}{V} \right) \% \quad (8.13)$$

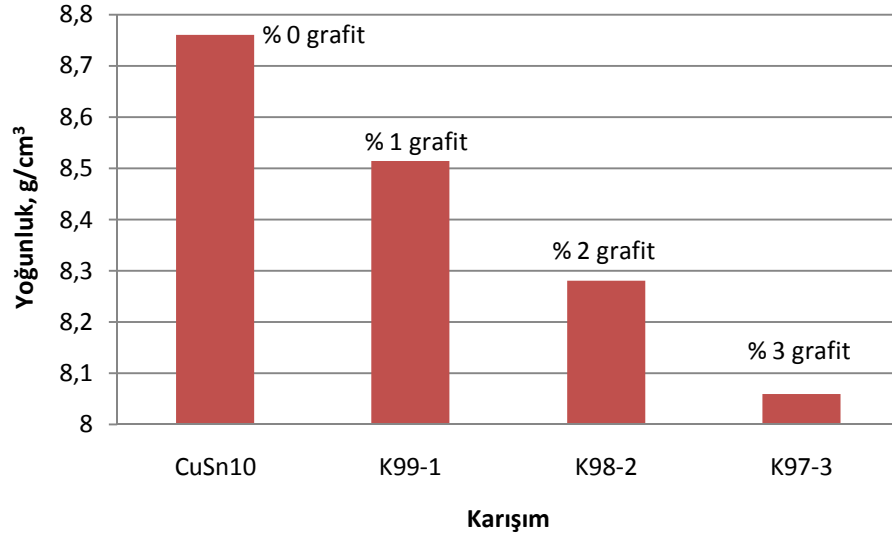
Numunenin emdiği yağ miktarı;

$$m_y = V_y - \rho_y \quad [g] \quad (8.14)$$

Numuneler için hesaplanan değerler EK-1’de verilmiştir.

8.4. Deneysel Bulgular ve Tartışma

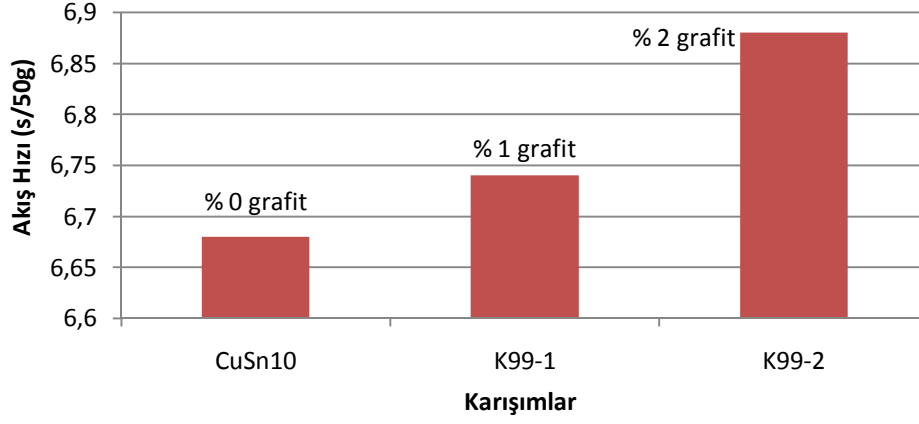
İçerdiği ağırlıkça % grafit oranına göre numunelerin yoğunlukları Şekil 8.2’de verilmiştir.



Şekil 8.2. Toz karışımlarının yoğunlukları

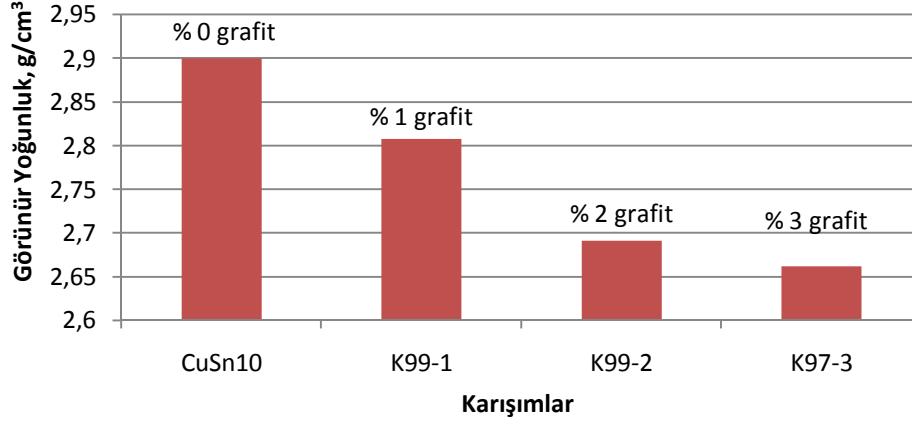
Grafitin yoğunluğunun bronzunkinden daha az olması nedeniyle grafit miktarı arttıkça karışımın yoğunluğu azalmıştır.

Toz karışımlarının akış hızları ve görünür yoğunlukları Hall akış ölçeri kullanılarak belirlenmiştir. Karışımların akış hızları ve görünür yoğunlukları sırası ile Şekil 8.3 ve Şekil 8.4’de verilmiştir.



Şekil 8.3. Toz karışımlarının akış hızları

Kısa akış süreleri tozların serbest akışını, uzun akış süreleri ise tozlar arasındaki yüksek sürtünmeyi gösterir. Küçük tozların, tozlar arası yüksek sürtünme nedeniyle genellikle akmadığı bilinmektedir [24]. Karışımında kullanılan grafit tozlarının ortalama boyutu bronz tozlarınınkinden daha küçük olması nedeniyle grafit miktarındaki artış karışımın ortalama toz boyutunun küçülmesine neden olmuştur. Bundan dolayı, grafit miktarı arttıkça akış süreleri artmıştır. Ağırlıkça % 3 grafit içeren bronz-grafit karışımının Hall akış hunisinden akmadığı gözlenmiştir. Benzer durum literatürde, akış süresinin yüksek yağlayıcı miktarına bağlı olarak artması ile ilişkilendirilmektedir [24].



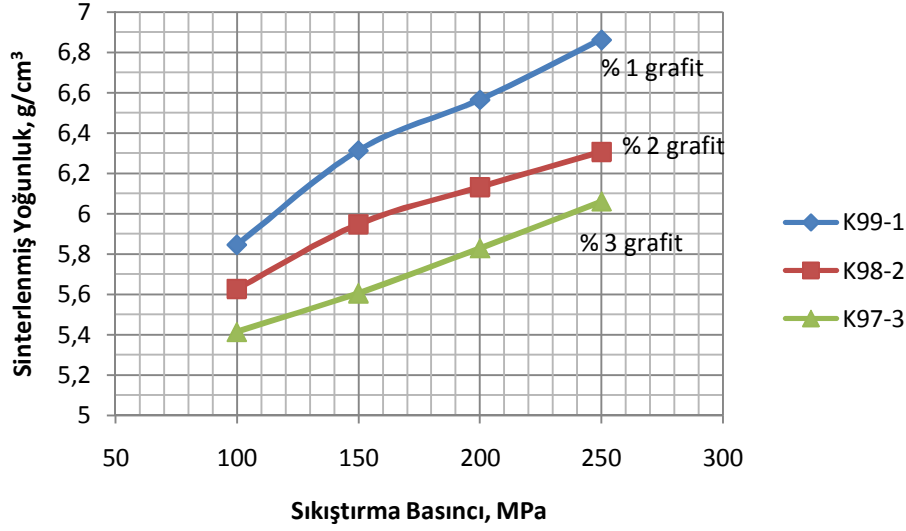
Şekil 8.4. Toz karışımlarının görünür yoğunlukları

Grafit miktarı ile karışımların yoğunlukları ters orantılıdır (Şekil 8.4). Grafite miktarı arttıkça, toz karışımlarının görünür yoğunlukları azalmıştır. En düşük görünür yoğunluğa $2,66 \text{ g/cm}^3$ 'lük değerle ağırlıkça % 3 grafit içeren karışım sahiptir.

Toz karışımlarına uygulanan sıkıştırma basıncı 100 MPa ile 250 MPa arasında 50 MPa aralıklarla artırılarak uygulanmıştır. Sıkıştırma sırasında narınlık oranına dikkat edilmeye çalışılsa da ileride yapılacak sürtünme ve aşınma deneyleri göz önüne alınarak numunelerin boyları uzun tutulmuştur.

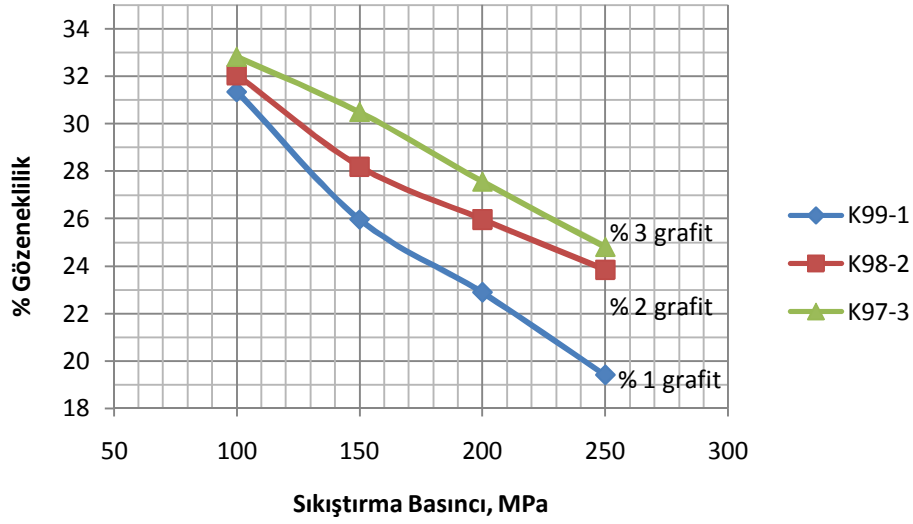
Sinterleme işlemi öncesinde numunelerin ham yoğunluklarının belirlenmesine çalışılmıştır. Ancak Arşimet prensibine göre hacmi hesaplanacak ham mukavemete sahip numuneler parafin-kloroform çözeltisine batırıldığında dağılarak tekrar toz haline gelmiştir. Bu nedenle numunelerin ham yoğunlukları hesaplanamamıştır.

Sıkıştırılmış numunelerin atmosfer kontrolü altında 800°C 'de 20 dakika bekletilerek yapılan sinterleme işlemi sonrasında yoğunlukları ve % gözeneklilik değerleri TS 2305 EN ISO 2738 standardında belirtildiği şekilde hesaplanmış ve Şekil 8.5 ve 8.6'da verilmiştir.



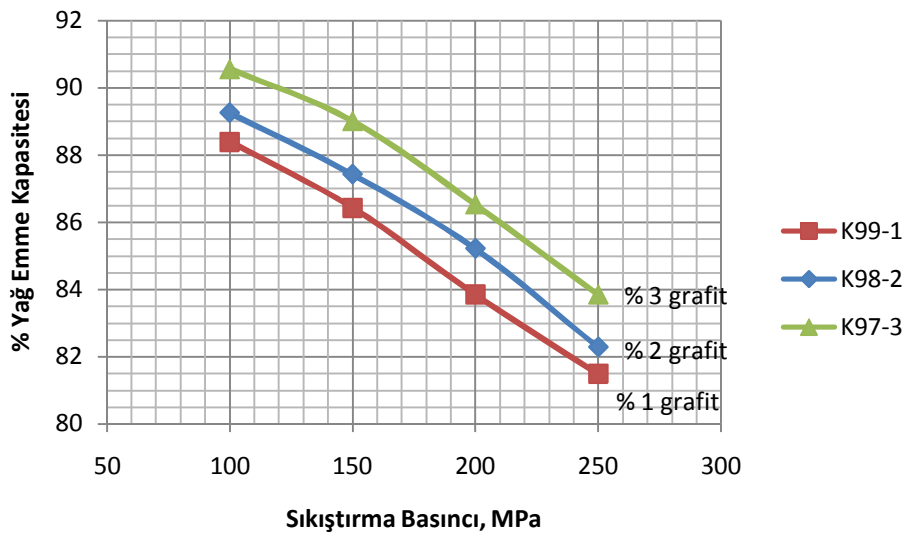
Şekil 8.5. Sinterlenmiş yoğunluğun sıkıştırma basıncı ile değişimi

Şekil 8.5 incelendiğinde, yoğunluğun sıkıştırma basıncı ile doğru, grafit miktarı ile ters orantılı olduğu görülmektedir. En yüksek sinterlenmiş yoğunluk $6,86 \text{ g/cm}^3$ 'lük değerle 250 MPa basınç altında sıkıştırılmış ağırlıkça % 1 grafit içeren numunede; en düşük yoğunluk ise, $5,41 \text{ g/cm}^3$ 'lük değerle 100 MPa basınç altında sıkıştırılmış, % 3 grafit içeren numunede ölçülmüştür. Şekil 8.6'de, % gözenekliliğin ise sıkıştırma basıncı ile ters, grafit miktarı ile doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. En yüksek gözeneklilik % 31,34'lük değerle 100 MPa basınç altında sıkıştırılmış, ağırlıkça % 3 grafit içeren numunede başka bir ifadeyle en düşük yoğunluğa sahip numunede ölçülmüştür. En düşük gözeneklilik ise % 19,41'lik değerle 250 MPa basınç altında sıkıştırılmış, ağırlıkça % 1 grafit içeren numunede başka bir ifadeyle en yüksek yoğunluğa sahip numunede ölçülmüştür. Ulaş ve Çıtak ile Turan da yaptıkları çalışmada, benzer şekilde, presleme basıncının artması ile sinterlenmiş yoğunluğun arttığından ancak gözenekliliğin azaldığından bahsetmişlerdir [55, 56].



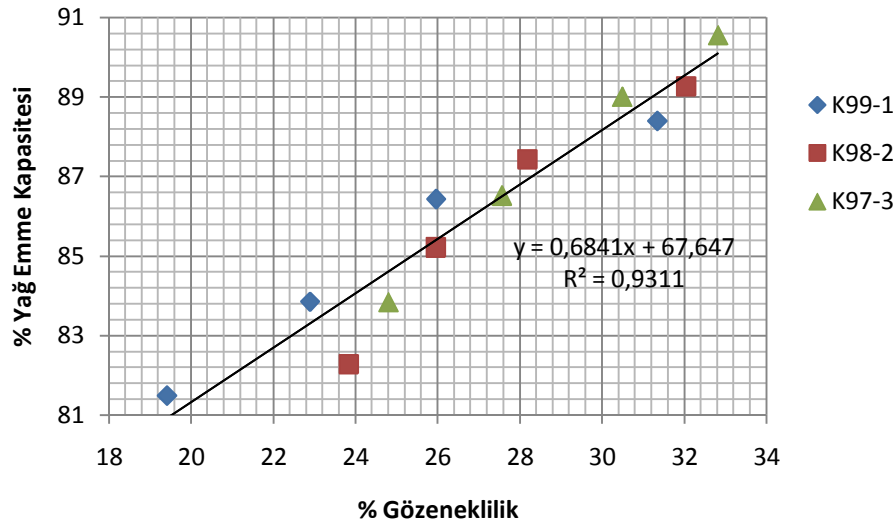
Şekil 8.6. Sıkıştırma basıncı ile % gözenekliliğin değişimi

Yağ emdirme işlemi için sinterlenmiş numuneler SAE 30 yağı içinde 80°C ve 0,2 atm basınç altında 1 saat tutulduktan sonra oda sıcaklığındaki yağına bırakılmış ve burada da 10 dakika bekletilerek gözeneklere dolmuş olan yağı kararlı bir hal alması sağlanmıştır. Yağ emdirme işlemi sonrasında numunelerin tartımları 0,0001 g hassasiyetli elektronik terazi ile yapılarak gözeneklerin doluluk oranı hesaplanmış ve sıkıştırma basıncı ile yağ emme kapasitesi arasındaki ilişki Şekil 8.7’de verilmiştir.



Şekil 8.7. Sıkıştırma basıncı ile % yağ emme kapasitesinin değişimi

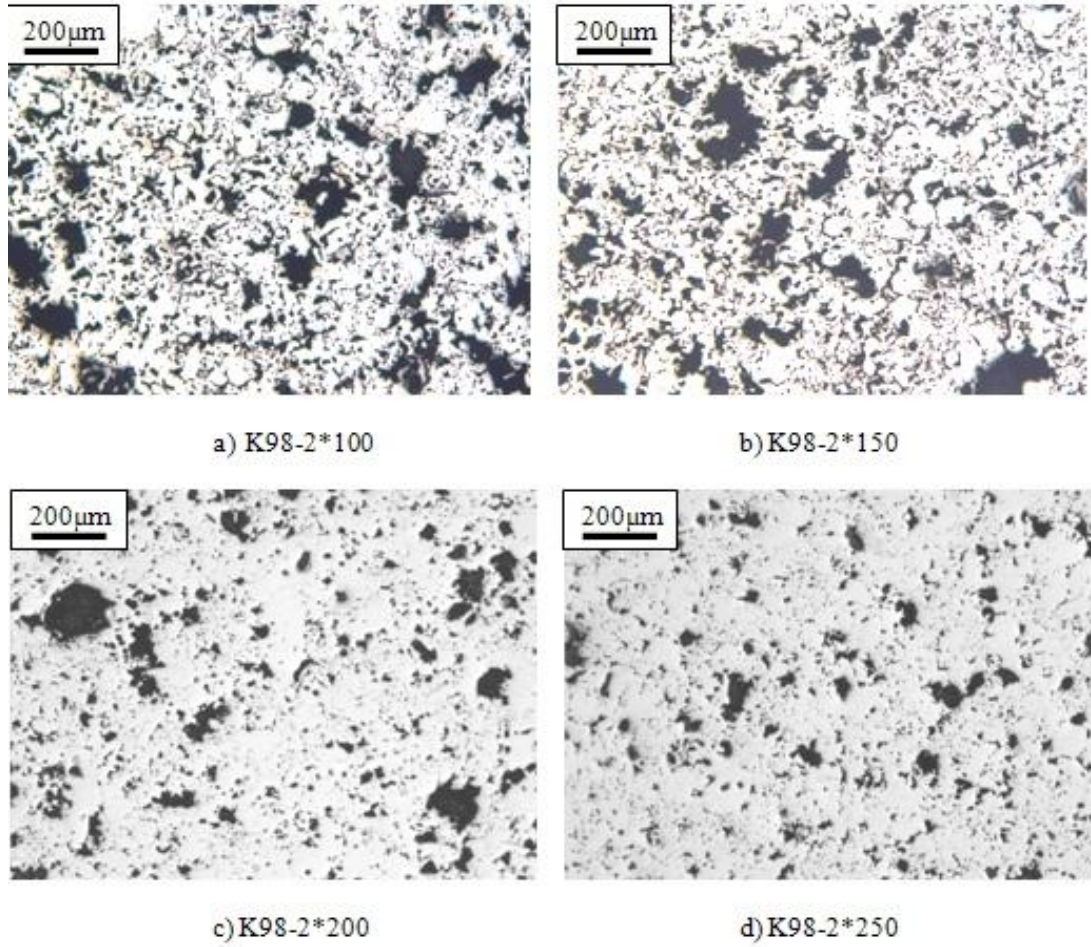
Şekil 8.7 incelendiğinde, sıkıştırma basıncı ile % yağ emme kapasitesi arasında ters orantı olduğu görülmektedir. Sıkıştırma basıncı arttığında, gözenek miktarı ve gözeneklerin birbirine bağlantılarının azaldığı ve yağın kapalı gözeneklere ulaşamadığı anlaşılmaktadır. Aynı sıkıştırma basıncı değerlerinde ise grafit miktarı arttıkça % yağ emme kapasitesinde artış görülmektedir. Aynı sıkıştırma basıncında; grafit miktarının artması ile sinterlemenin olumsuz yönde etkilendiği ve bunun neticesinde de gözeneklerin kılcallarla birbirlerine bağlantılı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8.8. % Gözeneklilik ile % yağ emme kapasitesinin değişimi

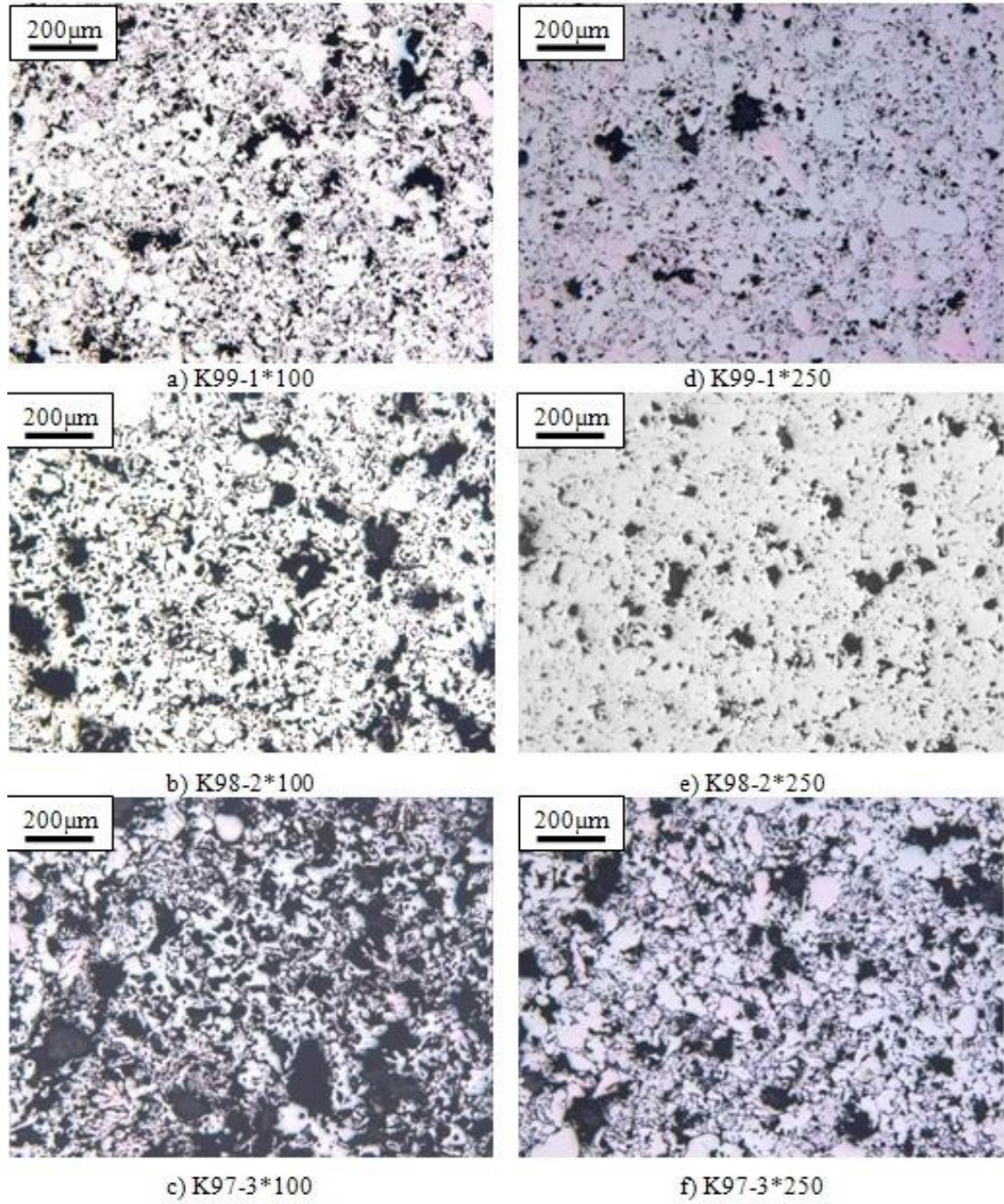
Gözeneklilik ile yağ emme kapasitesi arasında doğrusal bir ilişki söz konusudur (Şekil 8.8). Kurt da çalışmasında bu ilişkiye vurgu yapmıştır. Bu durum numuneler içindeki gözenekliliğin artması ile daha çok gözenekğin açık, yani birbirleri ile bağlantılı hale geldiğinin bir ifadesidir [32]. 100 MPa altında sıkıştırılmış ağırlıkça % 3 grafit içeren numunenin gözeneklerinin % 90,56'sının yağ ile doldurulması başarılmıştır. Vatansever yapmış olduğu çalışmada, gözeneklerin yağ ile doldurulmasında yağ sıcaklığının, yağ cinsinin ve vakum basıncının büyük ölçüde etkili olduğunu belirtmiştir [57].

Numunelerin gözenek yapısının görülmesi için parlatılmış yüzeylerinin fotoğrafları optik mikroskop ile 50 kez büyütme yapılarak çekilmiştir (Resim 8.16 ve 8.17).



Resim 8.16. Numunelerin gözenek yapısı, x50 büyütme; a) K98-2*100, b) K98-2*150, c) K98-2*200, d) K98-2*250

Resim 8.16’da farklı sıkıştırma basıncı uygulanan numunelerin gözenek yapıları görülmektedir. Gözeneklerin genelde kılcallarla birbirlerine bağlı olduğu ancak sıkıştırma basıncının artırılmasıyla gözeneklerin küçüldüğü, gözenek miktarının azaldığı ve gözenekler arası bağların kaybolduğu görülmektedir. Uygur , Gülsoy ve Salman da yapmış oldukları çalışmalarında, sıkıştırma basıncındaki düşüş ile gözenek miktarında artış olduğunu, sıkıştırma basıncı arttırıldığında ise gözenek miktarında azalma ve gözenek dağılımında farklılaşma olduğunu ifade etmişlerdir [58,59].

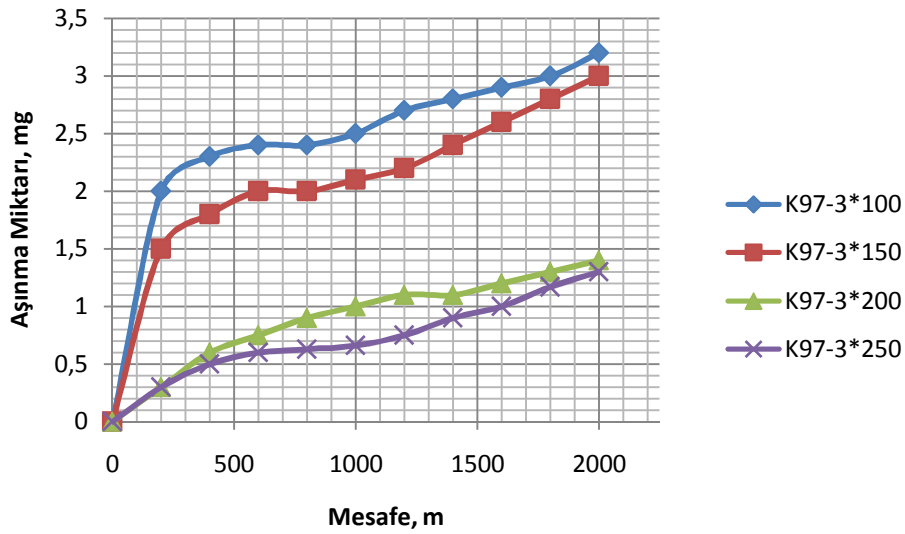


Resim 8.17. En düşük (100 MPa) ve en yüksek (250 MPa) sıkıştırma basıncında grafit miktarıyla gözenekliliğin değişimi, x50 büyütme; a) K99-1*100, b) K98-2*100, c) K97-3*100, d) K99-1*250, e) K98-2*250, f) K97-3*250

Resim 8.17’de farklı oranlarda grafit içeren karışımların en düşük ve en yüksek basınçta sıkıştırılmış numunelerde gözeneklilik durumu görülmektedir. Aynı basınç altında sıkıştırılmış farklı miktarda grafit içeren numunelerde grafit miktarı arttıkça

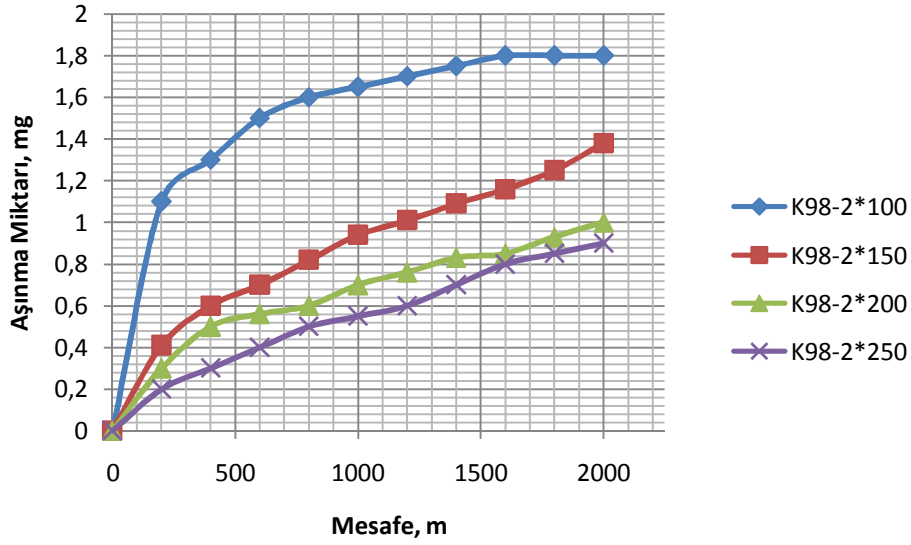
gözenek miktarının arttığı görülmektedir. Bunun nedeninin ise, Boz ve Kurt'unda çalışmalarında ifade ettikleri gibi, grafitin sinterlemeyi zorlaştırması ve grafitin yanması (karbon yanması) olduğu düşünülmektedir [9]. Aynı miktarda grafit içeren numunelerde ise sıkıştırma basıncının artmasıyla gözeneklerde küçülmeler ve kapanmalar olduğu görülmektedir.

Aşınma deneyi ASTM G99 standardı referans alınarak yapılmıştır. Farklı özelliklere sahip yatak malzemeleri 1 m/s kayma hızında, 15 N yükte ve 2000 m mesafede dışarıdan yağ ilavesi yapılmaksızın aşındırılmıştır (Şekil 8.9 - 8.11). Numunelerin deney öncesi ve her 200 m de bir ağırlıkları 0,0001 g hassasiyetli elektronik terazi ile ölçülmüştür. Yapılan aşınma ve sürtünme deneylerinin sayısal sonuçları EK-1'de verilmiştir.



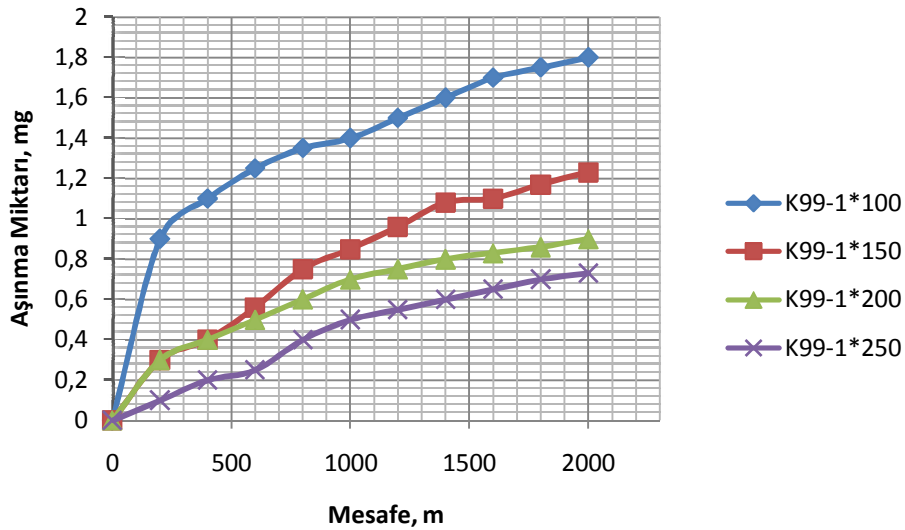
Şekil 8.9. K97-3 kodlu numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri

Ağırlıkça % 3 grafit içeren numuneler arasında en iyi aşınma performansını toplamda 1,30 mg'lık değerle, 250 MPa altında sıkıştırılmış numune göstermiştir.



Şekil 8.10. K98-2 kodlu numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri

Ağırlıkça % 2 grafit içeren numuneler arasında en iyi aşınma performansını toplamda 0,90 mg'lık değerle, 250 MPa altında sıkıştırılmış numune göstermiştir.

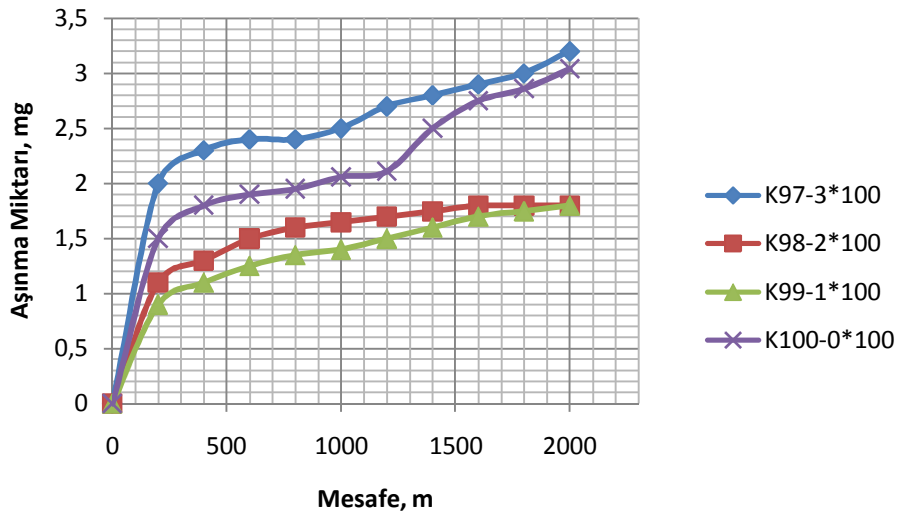


Şekil 8.11. K99-1 kodlu numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri

Ağırlıkça % 1 grafit içeren numuneler arasında en iyi aşınma performansını toplamda 0,73 mg'lık değerle, 250 MPa altında sıkıştırılmış numune göstermiştir.

Yapılan aşınma deneyleri sonucunda ağırlıkça farklı oranlarda grafit içeren numuneler kendi aralarında incelendiğinde, Kurt'un da yaptığı çalışmada belirttiği gibi, sıkıştırma basıncı arttıkça aşınma miktarında iyileşme olmaktadır [32]. Aşınma deneylerinin başlangıcında aşınma miktarının hızlı, ilerleyen kısımlarda ise azalma olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, başlangıçta malzemenin yüzeyinde bulunan pürüzlülüğün koparak aşınma miktarını artırması, sonrasında ise aşınan parçacıkların aşınma ara yüzeyinde yumuşak bir tabaka oluşturarak aşınmayı azalttığı gösterilebilir.

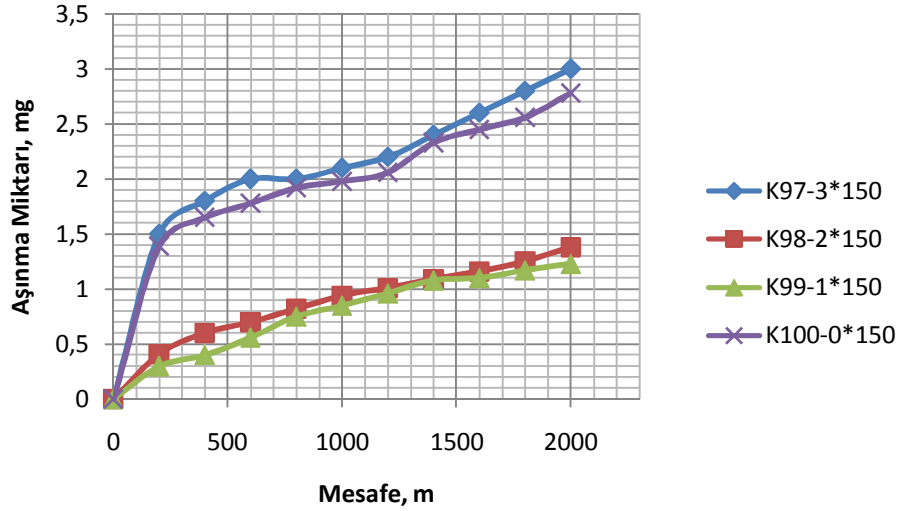
Grafit ilavesinin yatakların aşınma performansına etkisinin tam olarak anlaşılması için aynı yöntemler kullanılarak üretilen grafitsiz yatak malzemeleri aynı şartlarda deneylere tabi tutularak elde edilen sonuçlar kıyaslamada kullanılmıştır.



Şekil 8.12. 100 MPa altında sıkıştırılmış grafitli ve grafitsiz numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri

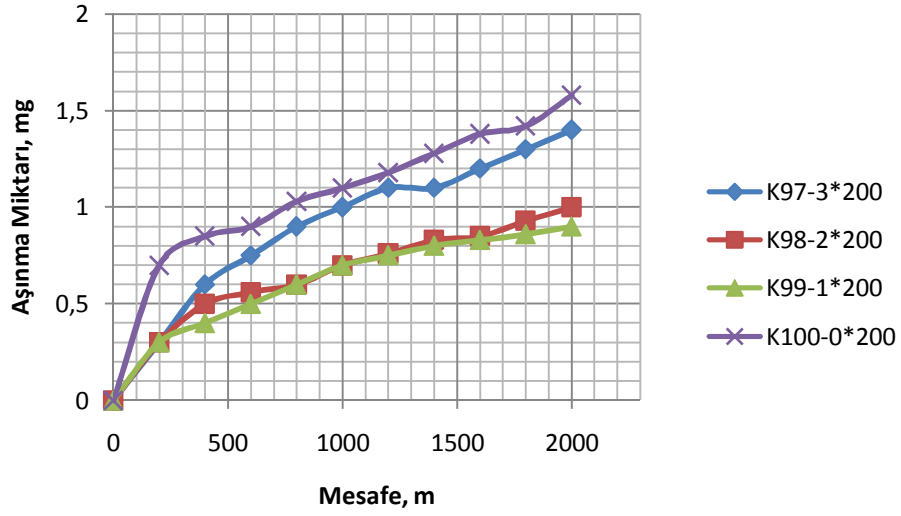
100 MPa basınç altında sıkıştırılan ve farklı oranlarda grafit içeren numunelerin aşınma eğrilerinin kıyaslanması sonucunda ağırlıkça % 1 grafit içeren malzemenin toplamda 1,8 mg'lık aşınma miktarı ile 100 MPa altında sıkıştırılan numuneler arasında en iyi aşınma performansına sahip olduğu görülmüştür. Ağırlıkça % 3 grafit içeren numunenin ise aşınma miktarının grafitsiz numuneden daha kötü olduğu görülmektedir. Bu durumun, grafit ilavesinin artmasıyla sinterlemenin olumsuz

yönde etkilenmesi ve aşınma sırasında birbirleriyle tam olarak kaynaşmayan parçacıkların koparak aşınmayı artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



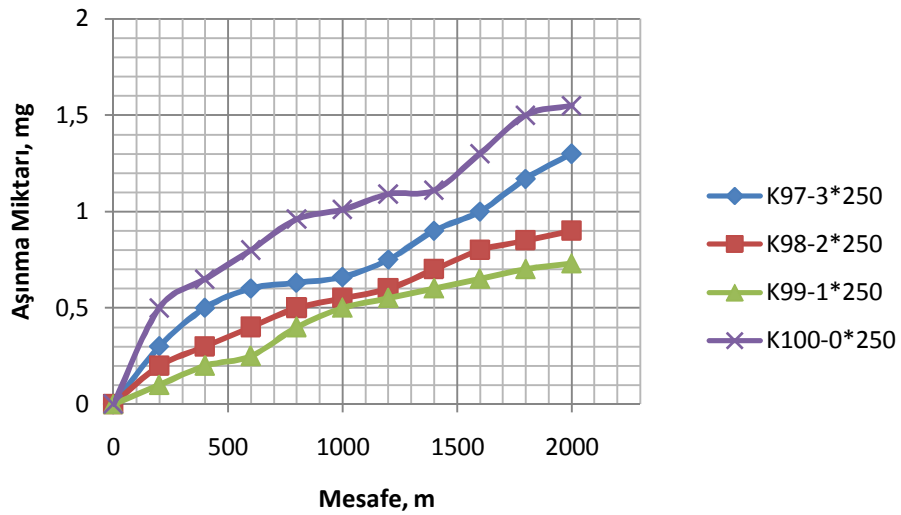
Şekil 8.13. 150 MPa altında sıkıştırılmış grafitli ve grafitsiz numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri

150 MPa basınç altında sıkıştırılan ve ağırlıkça farklı oranlarda grafit içeren malzemelerin kıyaslanması sonucunda ağırlıkça % 1 grafit içeren malzemenin toplamda 1,23 mg'lık aşınma miktarı ile 150 MPa altında sıkıştırılan numuneler arasında en iyi aşınma performansına sahiptir. Sıkıştırma basıncındaki artış ile ağırlıkça % 3 grafit içeren numune ile grafit içermeyen numune arasındaki farkın azaldığı görülmektedir. Sıkıştırma basıncının sinterlemeyi olumlu yönde etkileyip, aşınma yüzeyinden parçacık kopmasını zorlaştırdığından dolayı aşınma miktarında azalma olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8.14. 200MPa altında sıkıştırılmış grafitli ve grafitsiz numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri

200 MPa basınç altında sıkıştırılan ve ağırlıkça farklı oranlarda grafit içeren malzemelerin karşılaştırılması ile ağırlıkça % 1 grafit içeren malzemenin toplamda 0,9 mg'lık aşınma miktarı ile 200 MPa altında sıkıştırılan numuneler arasında en iyi aşınma performansına sahiptir. Sıkıştırma basıncının artmasıyla ağırlıkça % 3 grafit içeren numunenin aşınma performansı da grafitsiz numuneye göre daha iyi çıkmıştır.



Şekil 8.15. 250MPa altında sıkıştırılmış grafitli ve grafitsiz numunelerin 1 m/s, 15 N yük altında aşınma değerleri,

250 MPa basınç altında sıkıştırılan ve ağırlıkça farklı oranlarda grafit içeren malzemeler kıyaslandığında ise ağırlıkça % 1 grafit içeren numune toplamda 0,73 mg'lık aşınma miktarı ile 250 MPa altında sıkıştırılan numuneler arasında en iyi aşınma performansına sahiptir.

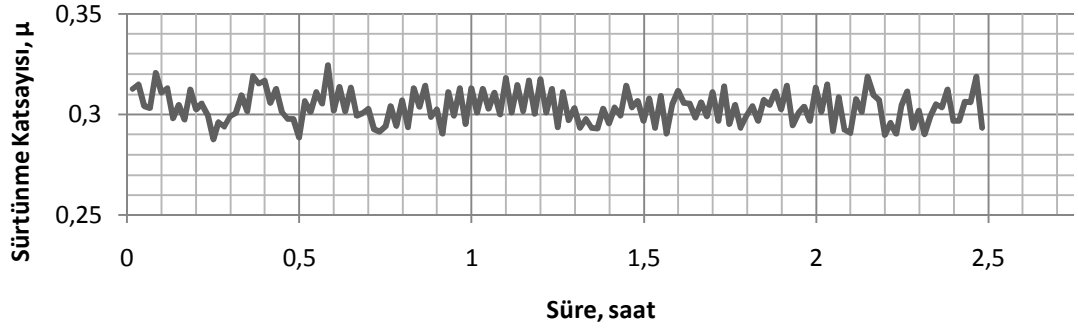
Sıkıştırma basıncındaki artış ile farklı miktarlarda grafit içeren bütün numunelerin aşınma performansında iyileşme olduğu görülmektedir. Düşük basınçlarda ağırlıkça % 3 grafit içeren malzemenin aşınma performansı grafit içermeyen malzemenin aşınma performansından kötü iken, sıkıştırma basıncı 200 MPa ve üzerine çıkarılınca aşınma performansı grafitsiz malzemeninkinden daha iyi olmuştur.

250 MPa altında sıkıştırılmış grafit içeren yatak malzemelerinin aşınma performansı grafitsiz yatak malzemesinin aşınma performansı ile kıyaslandığında; ağırlıkça % 1 grafit içeren numunenin 2,12 kat, ağırlıkça % 2 grafit içeren numunenin 1,72 kat, ağırlıkça % 3 grafit içeren numunenin 1,19 kat daha iyi olduğu belirlenmiştir. Grafit katkısının ağırlıkça % 1'lik değerden sonra giderek aşınma direncini azalttığı belirlenmiştir. Muratoğlu da çalışmasında grafit katkısının belli bir değerden sonra aşınma direncini azalttığından bahsetmiştir [60].

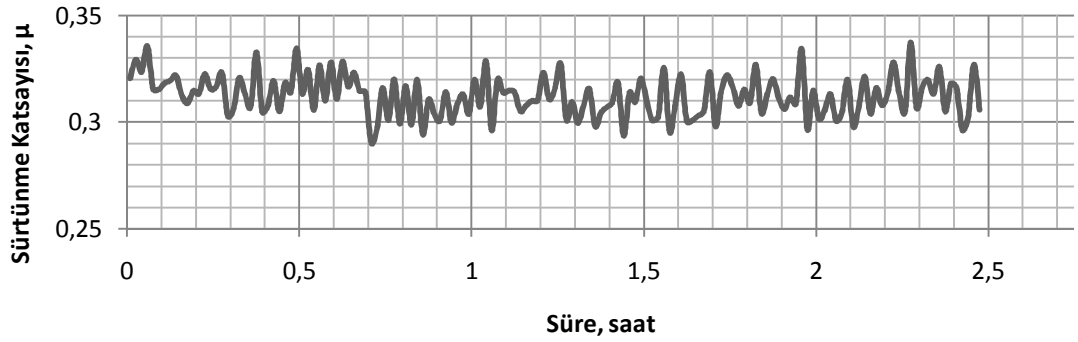
Yapılan bütün aşınma deneyleri sonucunda ağırlıkça % 1 ve 2 oranında grafit katkısının aşınma performansını olumlu yönde etkilediği açık bir şekilde görülmektedir. En iyi aşınma performansı 250 MPa altında sıkıştırılmış ve ağırlıkça % 1 grafit içeren yatak malzemesinde 0,73 mg'lık değerle elde edilmiştir. Coupard ark., pin-on-disk test cihazında CuSn12 bronzunu AISI 5410 çeliğinde kuru ortamda 30 N yükte 100 m/s hızda 30 dakika süre ile yaptığı testlerde toplam aşınma miktarını 50 mg olarak ölçmüşlerdir [61]. Ünlü ark., radyal kaymalı yatak test cihazında CuSn10 bronzunu SAE 1050 mil karşısında 150 d/d'da 20 N yükte yağlı ortamda 2,5 saat süre ile aşındırmışlar ve 12,3 mg'lık aşınma kaybı olduğunu belirlemişlerdir [12].

En iyi aşınma performanslarının elde edildiği sıkıştırma basıncındaki numuneler hazırlanan pin-on-disk cihazında dışarıdan yağlama yapılmaksızın 1 m/s kayma hızı

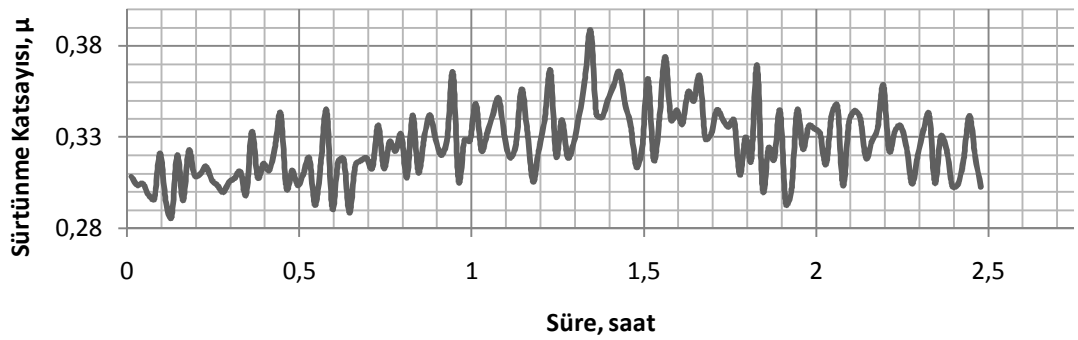
ve 15 N yük için sürtünme katsayıları 2,5 saat süreyle sürtünme deneylerine tabi tutulmuştur (Şekil 8.16 - 8.19).



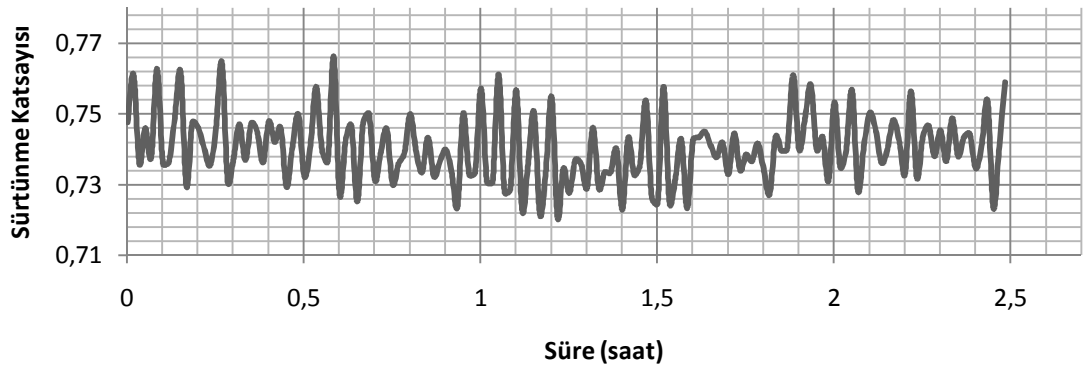
Şekil 8.16. K99-1*250 kodlu numunenin 1 m/s, 15 N yük altında sürtünme katsayısı



Şekil 8.17. K98-2*250 kodlu numunenin 1 m/s, 15 N yük altında sürtünme katsayısı



Şekil 8.18. K97-3*250 kodlu numunenin 1 m/s, 15 N yük altında sürtünme katsayısı



Şekil 8.19. K100-0*250 kodlu numunenin 1 m/s, 15 N yük altında sürtünme katsayısı

Sürtünme katsayısının belirlenmesi için yapılan testler sonucunda 250 MPa altında sıkıştırılmış farklı miktarlarda grafit içeren yatak malzemelerinin sürtünme katsayılarının 0,28 ila 0,39 arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Grafit miktarı arttıkça malzemelerin sürtünme katsayısında artış ve dalgalanmalar olmaktadır. Bunun nedeninin ise grafit miktarı arttıkça sinterlemenin zorlaşması ve gözenek miktarının artarak sürtünme yüzeyinden parça kopmasını kolaylaştırması olduğunu düşünmekteyiz. Grafit içeren numuneler arasında ortalama 0,3'lük sürtünme katsayısı ve sürtünme katsayısındaki kararlılık ile ağırlıkça % 1 grafit içeren malzemenin en iyi sürtünme performansına sahip olduğu görülmektedir. 250 MPa altında sıkıştırılmış grafit içermeyen kendinden yağlamalı CuSn10 bronz yatak malzemesinin sürtünme katsayısı 0,72 ila 0,77 arasında olduğu belirlenmiştir. 250 MPa altında sıkıştırılan farklı oranlarda grafit içeren numunelerin her birinin sürtünme katsayısı grafitsiz numuneden daha iyi çıkmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sayısal değerleri EK-1'de verilmiştir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş kendinden yağlamalı bronz yataklara grafit katkısının aşınma ve sürtünme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İlk olarak, ön alaşımlı CuSn10 bronz tozlarına ağırlıkça % 1-2-3 oranında grafit tozları ilave edilerek homojen karışımları elde edilmiş ve bu karışımlar 100 MPa ile 250 MPa arasında 50 MPa aralıklarla sıkıştırılmıştır. Ham mukavemete sahip numunelerin sinterlenmesinden sonra malzemelerin yoğunluğu ve gözenekliliği hesaplanmıştır. Malzemelerin, farklı basınçlardaki gözenek dağılımı optik mikroskop ile incelenmiştir. Sonrasında sinterlenmiş yatak numunelerine SAE 30 makine yağı emdirilmiş ve yağ emme kapasiteleri hesaplanmıştır. Daha sonra, grafit katkılı ve katkısız bronz yatakların aşınma performanslarının karşılaştırılması için grafit katkısız bronz yataklar aynı teknik kullanılarak üretilmiştir. Üretilen yatak malzemeleri, hazırlanan disk-çubuk test düzeneğinde, 1 m/s kayma hızında, 15 N yük altında, 2000 m yol aldırılarak aşınma değerleri ve sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

1. Grafit miktarı arttıkça toz karışımlarının yoğunlukları azalmıştır. Bunun nedeni grafitin yoğunluğunun bronzunkinden daha az olmasıdır.
2. Grafit miktarı arttıkça karışımların akış süreleri artmış ve görünür yoğunlukları azalmıştır. Bunun nedeni ise karışımda kullanılan grafit tozlarının ortalama boyutunun bronz tozlarından küçük olması nedeniyle sürtünme yüzeyini artırarak akışı zorlaştırmasıdır. Görünür yoğunluktaki azalmanın sebebi ise grafit tozlarının özkütlesinin bronzunkinden az olmasıdır.
3. Hazırlanan numunelerin ham yoğunluklarının belirlenmesine çalışılmış ancak numuneler parafin-kloroform çözeltisine bastırıldığında dağılarak tekrar toz haline gelmiştir. Uygulanan sıkıştırma basınçlarında karışımların ham yoğunluklarının belirlenemeyeceğine karar verilmiştir.
4. Sinterlenmiş yoğunluk sıkıştırma basıncı ile doğru orantılı, grafit miktarı ile ters orantılıdır. En yüksek sinterlenmiş yoğunluk $6,86 \text{ g/cm}^3$ 'lük değerle 250 MPa altında sıkıştırılmış ağırlıkça % 1 grafit içeren numunede; en düşük yoğunluk

ise, $5,41 \text{ g/cm}^3$ 'lük değerle 100 MPa altında sıkıştırılmış % 3 grafit içeren numunede elde edilmiştir.

5. Gözeneklilik sıkıştırma basıncı ile ters, grafit miktarı ile doğru orantılıdır. En yüksek gözeneklilik % 31,34'lük değerle 100 MPa basınç altında sıkıştırılmış, ağırlıkça % 3 grafit içeren numunede; en düşük gözeneklilik ise % 19,41'lik değerle 250 MPa basınç altında sıkıştırılmış, ağırlıkça % 1 grafit içeren numunede ölçülmüştür.
6. Sıkıştırma basıncı ile yağ emme kapasitesi ters orantılıdır. Sıkıştırma basıncı arttığında, gözenek miktarı ve gözeneklerin birbirine bağlantılarının azaldığı ve yağın kapalı gözeneklere ulaşamadığı görülmüştür.
7. Yağ cinsi, sıcaklığı, ortam basıncı ve gözeneklerin kılcallarla birbirine bağlı olması yağ emme kapasitesini etkilemektedir. Yağın viskozitesinin düşük olması, emdirme sırasında yağın sıcaklığının yüksek olması, ortamda yüksek vakum basıncının sağlanması gözeneklere emilen yağ miktarını artırmaktadır.
8. Gözenekler kılcallarla birbirlerine bağlıdır. Ancak sıkıştırma basıncının artırılmasıyla gözeneklerin küçüldüğü, gözenek miktarının azalma ve gözenekler arası bağların kaybolduğu görülmüştür. Aynı basınç altında sıkıştırılmış farklı miktarda grafit içeren numunelerde grafit miktarı arttıkça gözenek miktarı artmaktadır.
9. Numunelerin sertlik değerleri ölçülmeye çalışılsa da anlamlı sonuçlar elde edilememiştir, bunun nedeninin ise tüm dikkatlere rağmen ölçüm noktasının gözeneğe veya yakınına isabet etmesindendir.
10. Sıkıştırma basıncındaki artış ile farklı miktarlarda grafit içeren bütün numunelerin aşınma performansında iyileşme olmuştur. Düşük basınçlarda ağırlıkça % 3 grafit içeren malzemenin aşınma performansı grafit içermeyen malzemenin aşınma performansından kötü iken, sıkıştırma basıncı 200 MPa ve üzerine çıkarılınca aşınma performansı grafitsiz malzemeninkinden daha iyidir. Yapılan aşınma deneyleri sonucunda ağırlıkça % 1 ve 2 oranında grafit katkısının aşınma performansını olumlu yönde etkilediği açık bir şekilde görülmektedir. En iyi aşınma performansı 250 MPa altında sıkıştırılmış ve ağırlıkça % 1 grafit içeren yatak malzemesinde $0,73 \text{ mg}$ 'lık değerle elde edilmiştir.

11. 250 MPa altında sıkıştırılmış grafit içeren yatak malzemelerinin aşınma performansı grafitsiz yatak malzemesinin aşınma performansı ile kıyaslandığında; ağırlıkça % 1 grafit içeren numunenin 2,12 kat, ağırlıkça % 2 grafit içeren numunenin 1,72 kat, ağırlıkça % 3 grafit içeren numunenin 1,19 kat daha iyi olduğu belirlenmiştir.
12. 250 MPa altında sıkıştırılmış farklı miktarlarda grafit içeren yatak malzemelerinin sürtünme katsayılarının 0,28 ila 0,39 arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Grafit miktarı arttıkça malzemelerin sürtünme katsayısında artış ve dalgalanmalar olmaktadır. Grafit içeren numuneler arasında ortalama 0,3'lük sürtünme katsayısı ve sürtünme katsayısındaki kararlılık ile ağırlıkça % 1 grafit içeren malzeme en iyi sürtünme performansına sahiptir. 250 MPa altında sıkıştırılmış grafit içermeyen kendinden yağlamalı CuSn10 bronz yatak malzemesinin sürtünme katsayısı 0,72 ila 0,77 arasında olduğu belirlenmiştir. 250 MPa altında sıkıştırılan farklı oranlarda grafit içeren numunelerin her birinin sürtünme katsayısı grafitsiz numuneden daha iyi çıkmıştır.

9.2. Öneriler

Bu çalışmanın devamı niteliğinde aşağıdaki çalışmalar yapılabilir:

1. Daha yüksek sıkıştırma basınçlarında malzemeler üretilerek yüksek basınçların sürtünme ve aşınma performansına etkileri araştırılabilir.
2. Katkı malzemesi olarak kullanılan grafit parçacıkların toz boyutunun malzemenin sürtünme ve aşınma performansına etkisi farklı toz boyutlarından malzemeler üretilerek incelenebilir.
3. Yağ emdirme parametreleri değiştirilerek yağ emme kapasitesine etkileri araştırılabilir.
4. Sinterleme sıcaklığı değiştirilerek malzemelerin yoğunluk ve gözeneklilik değişimleri incelenebilir.
5. Farklı hız ve kuvvetler altında malzemelerin sürtünme ve aşınma performansı araştırılabilir.

6. Farklı katkı malzemeleri kullanılarak sürtünme ve aşınma performansına etkisileri grafitin etkisi ile kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

1. Akkurt, M., "Makine Elemanları, 1", **Birsen Yayınevi**, İstanbul, 300-550 (1990).
2. German, R. M., "Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Görüntü İşlemleri", Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., **Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları: 05**, Ankara, 15-500 (2007).
3. Yong-Xin, Q., Ji, M., Yi-Geng, Tian., Gui-Ru, Z., Gao-Yi, S., Guo-Liang, W., "Investigation of Sintered Bronze Bearings Under High-Speed Conditions", **Tribology International**, 18 (2): 75-80 (1985).
4. Cho, M. H., Ju, J., Kim, S. J., Jang, H., "Tribological Properties of Solid Lubricants (graphite, Sb_2S_3 , MoS_2) for Automotive Brake Friction Materials", **Wear**, 260: 855-860 (2006).
5. Akhlaghi, F., Zare-Bidaki, A., "Influence of Graphite Content on The Dry Sliding and Oil Impregnated Sliding Wear Behavior of Al 2024-Graphite Composites Produced By in Situ Powder Metallurgy Method", **Wear**, 266 (1-2): 37-45 (2008)
6. Bagchi, H., "Performance of Impregnated Bronze Bearings at Low Speeds", **Wear**, 72: 267-276 (1981).
7. Gawarkiewicz, R., Wasilczuc, M., "Wear Measurements of Self-Lubricating Bearing Materials in Small Oscillatory Movement", **Wear**, 263: 458-462 (2007).
8. Gnanaraj, S. D., Raman, R., "Experimental Studies on Wear in Oil-Impregnated Sintered Bearings", **Wear**, 155: 73-81 (1992).
9. Boz, M., Kurt, A., "Effect of Different Amount of Graphite on The Sintering and Transverse Rupture Properties of Powder Metal Parts", **Materials Science and Technology**, 22 (3): 419-422 (2006).
10. Ünlü, B. S., Yılmaz, S. S., Varol, R., "T/M Yatak Malzemelerinin Aşınma ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması", **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 2 (2): 31-37 (2005).
11. Ünlü, B. S., Köksal, N. S., Atik, E., "Bakır Esaslı Bronz ve Pirinç Yatakların Tribolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması", **DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, 5 (2): 103-108 (2003).
12. Ünlü, B. S., Atik, E., Meriç, C., "Effect of loading capacity (pressure-velocity) to tribological properties of CuSn10 bearings", **Materials and Design**, 28: 2160-2165 (2007).
13. Ünlü, B. S., Köksal, N. S., Atik, E., Meriç, C., "CuSn10 Yatak Malzemesinin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi", **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 11(1): 41-45 (2005).

14. Karadere, G., "Sinterlenmiş Bronz Yataklarda Performans Karakteristiklerinin Sürtünme Katsayısına Etkileri", *DAÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1): 55-65 (2001).
15. Ünlü, B. S., Atik, E., "Kalay-Kurşun Esaslı Yataklardaki Alaşım Elementlerinin Aşınmaya Etkisi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(1): 1-5 (2005).
16. Tüfekçi, K., Kurbanoglu, C., Durak, E., Tunay, R. F., "Friction and Wear Properties of Cu and Fe-based P/M Bearing Materials", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 20 (44): 513-521 (2006).
17. Durak, E., Duran F., "Tribological and Fatigue Failure Properties of Porous P/M Bearing", *International Journal of Fatigue*, baskıda (2007).
18. Kurt, A., Türker, M., Sarıtaş, S., "Toz Metalurjisi Metodu ile Üretilmiş Bakır Yatakların Aşınma Özellikleri", *1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 419-429 (1996) .
19. Mutlu, İ., Koç, R., "Otomotiv Fren Balataları İçin Sürtünme Katsayısı Test Cihazının Tasarımı", *Teknoloji Dergisi*, 8(1): 79-84 (2005).
20. Savaşkan, T., Pürçek, G., "Çinko-Aluminyum Esaslı Alaşımların ve Bu Alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Aşınma Özellikleri", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 24(1):25-34(2000).
21. Boz, M., Kurt, A., "Effect of Different Amounts of Graphite on the Sintering and Transverse Rupture Properties of Powder Metal Parts", *Journal of Materials Science & Technology*, 22(3): 419-422 (2006).
22. Arslan, F., Cinbat, S., Dönmez, A. G., "Gözenekli Bronz Yatak İmalinde Üretim Parametrelerinin Yatak Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi", *1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 429-441 (1996).
23. TS 3087 Mayıs, "Toz Metalurjisi Deyimleri", *Türk Standartları Enstitüsü*, 1-5 (1978).
24. German, R. M., "Powder Metallurgy Science", *MPIF*, New Jersey, USA, 15-363 (1997).
25. Sarıtaş, S., Turan, H., " Gaz Atomizasyon ile Metal Tozu Üretimi", *4.Uluslararası Makina Tasarımı ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 61-73 (1994).
26. Ünal, R., "Gaz Atomizasyonu ile Metal Tozu Üretim Parametrelerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-58 (1995).

27. Baksan, B., Gürlü, R., "Toz Metalurjisinin Savunma Sanayinde Uygulanması", Yüksek Lisans Tezi, **Osmangazi Üniversitesi Metalurji Enstitüsü**, Eskişehir, 1-15 (2003).
28. Eren, S., "Kendinden Yağlamalı Bronz Yatak Üretimi", Bitirme Projesi, **G.Ü. M.M.F. Makine Mühendisliği Bölümü**, 20-50 (2006).
29. Küçükaslan, S., "Gaz Atomize Kalay Tozu Üretim Parametrelerinin Deneysel olarak Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 5-86 (2006).
30. German, R. M., "Powder Metallurgy of Iron and Steel", **John Willey and Sons**, USA, 45-442 (1998).
31. Güral, A., "Ara Kritik Tavlama Isıl İşlemlerinin Düşük Alaşımli Sade Karbonlu Toz Metal Çeliklere Uygulanabilirliği Ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması", Doktora Tezi, **G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 9-10 (2005).
32. Kurt, A., "Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, **G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 38-50 (1992).
33. Sarıtaş, S., "Toz Metalurjisi Makine Mühendisliği El Kitabı, 1", **MMO**, Ankara, 25-100 (1994).
34. Ersümer, A., "Toz Metalurjisi Sert Metal Sinterleme", **İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları**, İstanbul, 23-45 (1970).
35. Exner, H. E., "Principle of Single Phase Sintering", **Reviews Powder Metallurgy, Phys. Cerom**, 1: 7-25 (1979).
36. Thummler, F., Thomma, W., "The Sintering Process", **Metal Reviews**, 12: 69-08 (1967).
37. Karataş, Ç., "Toz Enjeksiyon Kalıplamada Kurşun, Demir ve Alümina Tozlarının Basılabilirliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 64-76 (1992).
38. Sarıtaş, S., "Çelik Toz Dövmecilik", **ODTÜ Uygulamalı Araştırmalar Dergisi**, 3 (11): 1-26 (1985).
39. Arnold, A. N., "P/M Bearing", **Metals Handbook 9th Ed.**, 7, **Powder Metallurgy**, 704-709 (1984).
40. Justino, J. G., Bernardini, P. A. N., "Self-Lubricating Bearings: Microstructural and Dimensional Evolution Under Industrial Processing Conditions", **Materials Science Forum**, 299-300, 356-363 (1999).

41. İnternet: EPMA, "Porous Bearings", <http://www.epma.com/rvpm/PM%20Products/2.%20POROUS%20BEARINGS/Porous%20Bearings%20Intoduction.html> (2005).
42. Kurt, A., *Türk Toz Metalurjisi Derneği Haber Bülteni*, 5 (17): 5-15 (2001).
43. ASTM B438, "Standart Specification for Sintered Bronze Bearings (Oil Impregnated)", *American Society for Testing and Materia*, 1-22 (2008).
44. ASTM B612, "Standart Specification for Iron Bronse Sintered Bearings (Oil Impregnated)", *American Society for Testing and Materials*, 375-379 (2004).
45. Gemalmayan, N., "Sürtünme Malzemelerinin Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 10-50 (1984).
46. Kılıç, E. F., "Aluminyum Alaşımlı SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Makine Eğitimi Yüksek Lisans Tezi, *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, 29-36 (2007).
47. Demirci, A. H., "Ötektoid Altı Alaşımsız Çeliklerin Isıl İşlemlere Bağlı Olarak Aşınma Davranışlarının İncelenmesi ve Optimizasyonu", Doçentlik Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 26-35 (1982).
48. Çelik, H., "Kaynak Edilebilen Kobalt ve Demir Esaslı Alaşımların Yüksek Sıcaklıktaki Aşınma Davranışları", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniveristesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 33-41 (1991).
49. Richardson, E. R. C. D., "The Wear Of Metal Shores In Agricultural Soils", Ph. D. Thesis, *Great Britain University Press*, London, 13-18 (1969).
50. Moore, M. A., Review, A., "Of Two-Body Abrasive Wear", *Wear*, 27:1-17 (1974).
51. Date, S. W., Malkin, S., "Effect of Grid Size on Abrasion With Contact Abrasives", *Wear*, 40: 252-264 (1976).
52. Abhok, K. V., "Comparative Tendencies for Metal Loss by Abrasive Wear", *Impact Erosion and Arc Erosion Wear*, 40: 305-314 (1978).
53. Hutchings, I. M., "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, First Published in Great Britain", *Edward Arnold Advision of Hodder Stoughton*, London, 340-376 (2006).
54. Can, A. Ç., "Makine Elemanları Tasarımı", *Birsan Yayınevi*, İstanbul, 250-350 (2006).

55. Ulaş, M., Ramazan, Ç., "Toz metalurjisi ile üretilmiş demir esaslı parçalarda asidik ve bazik akımsız nikel çözeltilerin kaplama kalitesine etkisi", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 20 (2): 239-246 (2005).
56. Turan, H. E., Savaş, M. A., Altıntaş, S., "Döküm kalitesinin sıkıştırma döküm yöntemi ile yükseltilmesi", *Makina-İmalat Teknolojileri Sempozyumu*, Konya, 154-159 (1999).
57. Vatansever, K., "Kendinden yağlamalı yatak üretimi ve emdirilen yağ miktarının basınç ve sıcaklık ile değişimi", Bitirme Projesi, *G.Ü.M.M.F. Makina Mühendisliği Bölümü*, Ankara, 30-50 (2007).
58. Uygur, İ., "Fe-Cu-C çeliklerine mangan ilavesinin mekanik özelliklere etkisi", *G.Ü.M.M.F. Dergisi*, 22 (3): 325-330 (2007).
59. Gülsoy, H. Ö., Salman, S., "Fe-Cu kompaktlarına katılan farklı miktardaki grafit ilavelerinin sabit sinter sıcaklığı ve sabit sürelerde mekanik özelliklere etkisi", *1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı Bildiri Kitabı*, 559-560 (1996).
60. Muratoğlu, M., "Alüminyum bronzuna grafit katkılı kompozitin aşınma davranışının araştırılması", *Denizli Malzeme Sempozyumu*, 130-136 (2006).
61. Coupard, D., Castro, M. C., Coletto J., Garcia, A., Goni, J., Palacios J. K., "Wear behaviour of copper matrix composites", *Key Engineering Materials*, 127-131, 1009-1016 (1995).

EKLER

EK-1 Deneysel sonuçları

Ağırlıkça %1 grafit içeren ve 100-150-200-250 Mpa basınç altında sıkıştırılmış yatak numunelerinin ölçüm ve hesaplama sonuçları

Formülasyon	Başınc MPa	Kuru Ağırlık (g)	Toz Karanım Yoğunluğu (g/cm ³)	Parafallı Ağırlık (g)	Sudalı Ağırlık (g)	Etiv Sıra Ağırlık (g)	Yağ Endirime Sırası Ağırlık (g)	Sat(Sıvıya 11°C'daki Yoğunluğu (g/cm ³))	SAE 30 Yağı 15°C'daki Yoğunluğu (g/cm ³))	Hacim (cm ³)	Gerekli Yoğunluk (g/cm ³))	Ortalama Gerekli Yoğunluk (g/cm ³))	Olması Gerekli Hacim (cm ³))	Gözetim Miktarı (cm ³))	% Gözetim Miktarı	Ortalama % Gözetim Miktarı	Emilen Yağ Miktarı (g)	Ağırlıkça % Yağ Miktarı	Emilen Yağ Hacmi (cm ³))	% Yağ Emme Miktarı	Ortalama % Yağ Emme Miktarı
K89-1*100	100	1.9658	8.5137	1.9663	1.6432	1.9660	2.0660	0.9997	0.8930	0.3437	5.7777		0.2332	0.1105	32.1367		0.0800	3.8722	0.0396	81.1062	
K89-1*100	100	1.7136	8.5137	1.7142	1.4152	1.7137	1.7942	0.9997	0.8930	0.2981	5.7294		0.2013	0.0978	32.7037		0.0805	4.4867	0.0901	92.1607	
K89-1*100	100	1.7340	8.5137	1.7349	1.4335	1.7341	1.8054	0.9997	0.8930	0.3015	5.7514	5.8458	0.2037	0.0978	32.4448	31.34	0.0713	3.9493	0.0798	91.6242	88.39
K89-1*100	100	1.9663	8.5137	1.9671	1.6662	1.9663	2.0664	0.9997	0.8930	0.3410	5.8542		0.2245	0.1065	31.2375		0.0891	4.2726	0.0998	93.6683	
K89-1*100	100	1.9445	8.5137	1.9462	1.6637	1.9446	2.0296	0.9997	0.8930	0.3366	5.7769		0.2284	0.1082	32.1460		0.0850	4.1880	0.0952	87.9682	
K89-1*100	100	1.9678	8.5137	1.9687	1.6788	1.9679	2.0718	0.9997	0.8930	0.3320	6.1842		0.2347	0.1083	27.3468		0.0740	3.6716	0.0829	93.8054	
K89-1*150	150	2.0214	8.5137	2.0221	1.6972	2.0214	2.0890	0.9997	0.8930	0.3250	6.2197		0.2374	0.0976	26.9441		0.0676	3.2860	0.0757	86.4474	
K89-1*150	150	2.0810	8.5137	2.0816	1.7465	2.0810	2.1505	0.9997	0.8930	0.3352	6.2082		0.2444	0.0908	27.0794		0.0695	3.2318	0.0778	85.7413	
K89-1*150	150	2.0432	8.5137	2.0440	1.7161	2.0434	2.1134	0.9997	0.8930	0.3280	6.2293	6.3032	0.2400	0.0880	26.8318	25.36	0.0700	3.3122	0.0784	89.0686	86.43
K89-1*150	150	2.0168	8.5137	2.0207	1.688	2.0168	2.0848	0.9997	0.8930	0.3288	6.1988		0.2373	0.0886	27.1776		0.0649	3.1190	0.0727	82.0794	
K89-1*150	150	1.9547	8.5137	1.9555	1.6462	1.9548	2.0144	0.9997	0.8930	0.3094	6.3179		0.2266	0.0798	25.7916		0.0596	2.9897	0.0667	83.6385	
K89-1*150	150	1.9859	8.5137	1.9865	1.6877	1.9859	2.0388	0.9997	0.8930	0.2989	6.6443		0.2333	0.0696	21.9978		0.0587	2.6329	0.0601	91.6270	
K89-1*200	200	2.0300	8.5137	2.0309	1.7173	2.0300	2.0878	0.9997	0.8930	0.3137	6.4713		0.2384	0.0783	23.9898		0.0578	2.7685	0.0647	86.0095	
K89-1*200	200	1.9155	8.5137	1.9164	1.6715	1.9156	1.9734	0.9997	0.8930	0.2989	6.4089		0.2312	0.0587	20.2472	22.39	0.0445	2.9250	0.0487	87.4826	
K89-1*200	200	1.9633	8.5137	1.9639	1.6752	1.9634	2.0123	0.9997	0.8930	0.2989	6.7889	6.5648	0.2237	0.0648	22.4571		0.0477	2.4433	0.0534	82.4471	83.85
K89-1*200	200	1.9045	8.5137	1.9053	1.6169	1.9046	1.9523	0.9997	0.8930	0.2885	6.6017		0.2207	0.0548	18.8126	19.41	0.0386	1.8481	0.0432	77.6793	81.46
K89-1*200	200	1.9833	8.5137	1.9837	1.6811	1.9835	2.0251	0.9997	0.8930	0.2882	6.7259		0.2277	0.0605	20.9994		0.0449	2.2638	0.0503	83.0836	
K89-1*250	250	1.9383	8.5137	1.9392	1.6511	1.9385	1.9834	0.9997	0.8930	0.2958	6.9120	6.8815	0.2401	0.0566	18.8126		0.0437	2.1478	0.0489	83.2526	
K89-1*250	250	2.0445	8.5137	2.0507	1.755	2.0500	2.0886	0.9997	0.8930	0.3268	6.8041		0.2338	0.0588	20.0802		0.0524	2.4605	0.0587	80.1438	
K89-1*250	250	1.9503	8.5137	1.9516	1.6891	1.9505	2.0346	0.9997	0.8930	0.2926	6.9120		0.2349	0.0572	19.5814		0.0406	1.8688	0.0455	79.4910	
K89-1*250	250	1.9868	8.5137	2.0009	1.7089	1.9866	2.0404	0.9997	0.8930	0.2921	6.8466		0.2310	0.0507	20.1515		0.0380	2.1127	0.0426	83.5043	
K89-1*250	250	1.7105	8.5137	1.7119	1.4603	1.7110	1.7490	0.9997	0.8930	0.2917	6.7980		0.2334	0.0684	22.1490		0.0487	2.3923	0.0545	82.1307	

Ağırlıkça %2 grafit içeren ve 100-150-200-250 Mpa basınç altında sıkıştırılmış yatak numunelerinin ölçüm ve hesaplama sonuçları

Formülasyon	Başınc MPa	Kuru Ağırlık (g)	Toz Karanım Yoğunluğu (g/cm ³)	Parafallı Ağırlık (g)	Sudalı Ağırlık (g)	Etiv Sıra Ağırlık (g)	Yağ Endirime Sırası Ağırlık (g)	Sat(Sıvıya 11°C'daki Yoğunluğu (g/cm ³))	SAE 30 Yağı 15°C'daki Yoğunluğu (g/cm ³))	Hacim (cm ³)	Gerekli Yoğunluk (g/cm ³))	Ortalama Gerekli Yoğunluk (g/cm ³))	Olması Gerekli Hacim (cm ³))	Gözetim Miktarı (cm ³))	% Gözetim Miktarı	Ortalama % Gözetim Miktarı	Emilen Yağ Miktarı (g)	Ağırlıkça % Yağ Miktarı	Emilen Yağ Hacmi (cm ³))	% Yağ Emme Miktarı	Ortalama % Yağ Emme Miktarı
K88-2*100	100	1.9212	8.2803	1.9247	1.5797	1.9214	2.0398	0.9980	0.8930	0.3457	5.5976		0.2320	0.1137	32.8854		0.0884	4.2778	0.0950	87.0786	
K88-2*100	100	1.9756	8.2803	1.9750	1.6298	1.9757	2.0631	0.9980	0.8930	0.3499	5.6462	5.6266	0.2386	0.1113	31.8161	32.35	0.0874	4.2157	0.0979	87.9164	89.26
K88-2*100	100	1.9830	8.2803	1.9853	1.6166	1.9830	2.0857	0.9980	0.8930	0.3704	5.3831		0.2395	0.1310	35.9595		0.027	4.9240	0.1150	87.8995	
K88-2*100	100	2.0384	8.2803	2.0427	1.7066	2.0386	2.1208	0.9980	0.8930	0.3428	5.9495		0.2463	0.0965	28.1533		0.0812	3.8287	0.0909	94.2220	
K88-2*150	150	1.9315	8.2803	1.9348	1.6113	1.9318	2.0011	0.9980	0.8930	0.3241	5.9887		0.2332	0.0909	28.0422		0.0893	3.4631	0.0776	88.3740	
K88-2*150	150	2.0220	8.2803	2.0254	1.6857	2.0220	2.0943	0.9980	0.8930	0.3404	5.9404	5.9465	0.2442	0.0962	28.2630	28.19	0.0723	3.4622	0.0810	84.1595	87.43
K88-2*150	150	1.9265	8.2803	1.9318	1.6097	1.9265	1.9869	0.9980	0.8930	0.3227	5.9753		0.2329	0.0899	27.8417		0.0704	3.5219	0.0768	87.7395	
K88-2*150	150	1.9700	8.2803	1.9732	1.6419	1.9703	2.0446	0.9980	0.8930	0.3320	5.9344		0.2379	0.0841	28.3358		0.0745	3.6934	0.0834	88.8907	
K88-2*150	150	2.3113	8.2803	2.3146	1.9251	2.3116	2.3969	0.9980	0.8930	0.3803	5.8221		0.2791	0.1112	28.4835		0.0873	3.6952	0.0978	87.9412	
K88-2*150	150	1.9948	8.2803	1.9951	1.6301	1.9952	2.0302	0.9980	0.8930	0.3287	5.9478		0.2381	0.0926	28.1733		0.0750	3.6942	0.0840	90.7045	
K88-2*200	200	1.9918	8.2803	1.9953	1.6763	1.9920	2.0582	0.9980	0.8930	0.3196	6.2314		0.2405	0.0791	24.1490		0.0662	3.2164	0.0741	93.7107	
K88-2*200	200	1.9629	8.2803	1.9663	1.6350	1.9629	2.0270	0.9980	0.8930	0.3320	5.9130		0.2370	0.0949	28.8941		0.0841	3.1623	0.0718	75.6205	
K88-2*200	200	1.9786	8.2803	1.9819	1.6603	1.9789	2.0422	0.9980	0.8930	0.3392	5.1979	6.1312	0.2389	0.0803	25.1638	25.36	0.0833	3.0966	0.0709	88.2740	85.22
K88-2*200	200	2.0022	8.2803	2.0056	1.6795	2.0022	2.0702	0.9980	0.8930	0.3328	5.0168		0.2416	0.0910	27.3399		0.0880	3.2847	0.0761	83.5584	
K88-2*200	200	2.0184	8.2803	2.0229	1.6885	2.0186	2.0809	0.9980	0.8930	0.3361	5.2126		0.2458	0.0812	24.9762		0.0613	2.9469	0.0686	86.5585	
K88-2*200	200	1.9503	8.2803	1.9534	1.6403	1.9500	2.0097	0.9980	0.8930	0.3137	6.2156		0.2355	0.0782	24.9399		0.0597	2.9706	0.0669	85.4427	
K88-2*250	250	2.0118	8.2803	2.0151	1.6887	2.0119	2.0665	0.9980	0.8930	0.3170	5.3457		0.2438	0.0709	22.8237		0.0546	2.6421	0.0611	82.5276	
K88-2*250	250	2.0152	8.2803	2.0228	1.7087	2.0154	2.0732	0.9980	0.8930	0.3147	5.4157	6.3063	0.2438	0.0709	22.8237	23.84	0.0838	2.9950	0.0602	84.9872	82.29
K88-2*250	250	2.0066	8.2803	2.0090	1.6820	2.0057	2.0643	0.9980	0.8930	0.3277	6.2111		0.2422	0.0855	26.0814		0.0886	2.9877	0.0696	76.7889	
K88-2*250	250	1.9303	8.2803	1.9337	1.6343	1.9305	1.9813	0.9980	0.8930	0.3000	6.4343		0.2331	0.0669	22.2883		0.0508	2.4609	0.0569	80.0391	
K88-2*250	250	2.0077	8.2803	2.0113	1.6888	2.0077	2.0668	0.9980	0.8930	0.3230	5.2148		0.2405	0.0806	24.9482		0.0591	2.8995	0.0662	80.1169	

EK-1 (Devam) Deneysel sonuçlar

Ağırlıkça %3 grafit içeren ve 100-150-200-250 Mpa basınç altında sıkıştırılmış yatak numunelerinin ölçüm ve hesaplama sonuçları

Formülasyon	Basınç (MPa)	Kuru Ağırlık (g)	Tor Karşılığı (g/cm ³)	Pratik Ağırlık (g)	Sıvı Ağırlık (g)	Elir Sıvı Ağırlık (g)	Yağ Endirme Sıvısı Ağırlık (g)	Saf Sıvı 11°C'deki Yoğunluğu (g/cm ³)	SAE 30 Yağ 15°C'deki Yoğunluğu (g/cm ³)	Hacim (cm ³)	Gerekli Yağ Miktarı (g/cm ³)	Ortalama Gerekli Yağ Miktarı (g/cm ³)	Olunmuş Gerekli Hacim (cm ³)	Gerekli Yağ Miktarı (cm ³)	% Gözlen Miktar	Ortalama Yağ Miktarı	Emilen Yağ Miktarı (g)	Ağırlıkça % Yağ Miktarı	Emilen Yağ Miktarı (cm ³)	% Yağ Emme	Ortalama % Yağ Emme
K37-3*100	100	1.9533	8.0604	1.9513	1.5538	1.9354	2.0259	0.9980	0.8930	0.3582	5.4138		0.2406	0.1176	32.8347		0.0855	4.2697	0.0969	82.3543	
K37-3*100	100	1.9955	8.0604	2.0015	1.6300	1.9956	2.0384	0.9980	0.8930	0.3722	5.3607		0.2476	0.1247	33.4828		0.0978	4.6718	0.1095	87.8432	
K37-3*100	100	1.9730	8.0604	1.9776	1.6224	1.9732	2.0871	0.9980	0.8930	0.3595	5.5435	5.4148	0.2445	0.1111	31.2251		0.0599	4.5426	0.1052	94.6168	90.56
K37-3*100	100	2.0046	8.0604	2.0156	1.6403	2.0046	2.1154	0.9980	0.8930	0.3761	5.3306		0.2467	0.1274	33.8659		0.1108	5.2378	0.1241	97.4265	
K37-3*100	100	2.0135	8.0604	2.0198	1.6588	2.0136	2.1019	0.9980	0.8930	0.3618	5.5649		0.2488	0.1120	30.9601		0.0883	4.2010	0.0969	88.2694	
K37-3*100	100	1.9542	8.0604	1.9592	1.5733	1.9343	2.0393	0.9980	0.8930	0.3666	5.2756		0.2400	0.267	34.5452		0.1050	5.1468	0.1176	92.8257	
K37-3*150	150	1.9933	8.0604	1.9984	1.6359	1.9933	2.0313	0.9980	0.8930	0.3592	5.5504		0.2474	0.1119	31.1388		0.0875	4.2041	0.0980	87.5997	
K37-3*150	150	2.0035	8.0604	2.0157	1.6391	2.0036	2.1053	0.9980	0.8930	0.3774	5.2252		0.2508	0.1014	28.7898		0.0763	3.6371	0.0854	84.2344	
K37-3*150	150	1.9769	8.0604	1.9817	1.6406	1.9769	2.0942	0.9980	0.8930	0.3418	5.7841	5.6026	0.2453	0.0965	28.2406		0.0773	3.7630	0.0866	88.6816	89.01
K37-3*150	150	1.9883	8.0604	1.9895	1.6442	1.9855	2.0712	0.9980	0.8930	0.3464	5.7314		0.2463	0.0901	28.8846		0.0857	4.1377	0.0860	95.8336	
K37-3*200	200	1.9850	8.0604	1.9838	1.6072	1.9550	2.0937	0.9980	0.8930	0.3771	5.4856		0.2430	0.1141	31.9430		0.0947	4.6112	0.1080	92.9642	
K37-3*200	200	1.9804	8.0604	1.9801	1.6046	1.9866	2.0714	0.9980	0.8930	0.3362	5.5389		0.2477	0.0985	26.3195		0.0748	3.6111	0.0838	94.6688	
K37-3*200	200	1.9356	8.0604	1.9402	1.6144	1.9368	2.0034	0.9980	0.8930	0.3421	5.7892		0.2457	0.0964	28.1767		0.0707	3.4469	0.0792	82.1382	
K37-3*200	200	2.0411	8.0604	2.0458	1.7015	2.0411	2.1124	0.9980	0.8930	0.3450	5.5164	5.8392	0.2322	0.0918	26.5683		0.0676	3.3743	0.0757	87.9062	86.53
K37-3*200	200	1.9987	8.0604	2.0006	1.6372	1.9988	2.0777	0.9980	0.8930	0.3700	5.5771		0.2371	0.0809	25.9433		0.0641	3.3123	0.0718	88.7248	
K37-3*250	250	2.0013	8.0604	2.0047	1.6309	2.0015	2.0692	0.9980	0.8930	0.3641	5.4808		0.2483	0.0762	23.4736		0.0577	2.8021	0.0646	84.8396	
K37-3*250	250	1.9864	8.0604	1.9912	1.6602	1.9864	2.0910	0.9980	0.8930	0.3317	5.9882		0.2464	0.0852	25.6956		0.0646	3.1487	0.0723	84.8838	
K37-3*250	250	1.9614	8.0604	1.9655	1.6379	1.9615	2.0261	0.9980	0.8930	0.3383	5.5752	6.0610	0.2433	0.0849	25.8653		0.0546	3.1884	0.0723	85.1980	83.85
K37-3*250	250	1.9350	8.0604	1.9394	1.6178	1.9352	1.9983	0.9980	0.8930	0.3222	6.0048		0.2401	0.0822	25.6056		0.0541	3.2061	0.0718	87.3446	
K37-3*250	250	1.9862	8.0604	1.9904	1.6690	1.9864	2.0384	0.9980	0.8930	0.3220	6.1675		0.2464	0.0796	23.4838		0.0520	2.9510	0.0582	76.9959	

EK-1 (Devam) Deneysel sonuçlar

Yatak malzemelerinin 15 kN yük altında 1m/s kayma hızında aşınma miktarları, mg

Mesafe, m	K99-1*100	K99-1*150	K99-1*200	K99-1*250	K98-2*100	K98-2*150	K98-2*200	K98-2*250	K97-3*100	K97-3*150	K97-3*200	K97-3*250	K100*100	K100*150	K100*200	K100*250
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0,9	0,3	0,3	0,1	1,1	0,41	0,3	0,2	2	1,5	0,3	0,3	1,5	1,39	0,7	0,5
400	1,1	0,4	0,4	0,2	1,3	0,6	0,5	0,3	2,3	1,8	0,6	0,5	1,8	1,65	0,85	0,65
600	1,25	0,56	0,5	0,25	1,5	0,7	0,56	0,4	2,4	2	0,75	0,6	1,9	1,78	0,9	0,8
800	1,35	0,75	0,6	0,4	1,6	0,82	0,6	0,5	2,4	2	0,9	0,63	1,95	1,92	1,03	0,96
1000	1,4	0,85	0,7	0,5	1,65	0,94	0,7	0,55	2,5	2,1	1	0,66	2,06	1,98	1,1	1,01
1200	1,5	0,96	0,75	0,55	1,7	1,01	0,76	0,6	2,7	2,2	1,1	0,75	2,11	2,06	1,18	1,09
1400	1,6	1,08	0,8	0,6	1,75	1,09	0,83	0,7	2,8	2,4	1,1	0,9	2,5	2,33	1,28	1,11
1600	1,7	1,1	0,83	0,65	1,8	1,16	0,85	0,8	2,9	2,6	1,2	1	2,75	2,45	1,38	1,3
1800	1,75	1,17	0,86	0,7	1,82	1,25	0,93	0,85	3	2,8	1,3	1,17	2,86	2,56	1,42	1,5
2000	1,8	1,23	0,9	0,73	1,85	1,38	1	0,9	3,2	3	1,4	1,3	3,04	2,78	1,59	1,55

Yatak numunelerinin HV cinsinden mikrosertlik değerleri

NUMUNE	ÖLÇÜM 1	ÖLÇÜM 2	ÖLÇÜM 3	ÖLÇÜM 4	ÖLÇÜM 5	ORTALAMA
K99-1*100	90,2	104	67,9	96,6	88,9	89,52
K99-1*150	114	96,8	112	128	65,6	103,28
K99-1*200	96,2	94,5	88,4	71,4	85,1	87,12
K99-1*250	106	104	86,3	111	72	95,86
K98-2*100	42,5	70,7	77,6	110	159	91,96
K98-2*150	105	82,9	110	53,19	86,9	87,60
K98-2*200	83,3	73,8	96,4	101	105	91,9
K98-2*250	90,1	49	72,7	126	130	93,56
K97-3*100	78,4	168	98,6	105	83,5	106,7
K97-3*150	138	70,1	55,6	85,9	81,3	86,18
K97-3*200	116	90,2	96,1	106	112	104,06
K97-3*250	103	134	109	91,1	56	98,62

Toz karışımlarının özellikleri

Karışım	yoğunluk	göçürür yoğunluk	% teorik yoğunluk	akış hızı
CuS ₁₀	8,76	2,90	33,11	6,68
K99-1	8,51	2,87	33,72	6,74
K98-2	8,28	2,69	32,50	6,88
K97-3	8,06	2,66	33,03	-

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ATAK, Yusuf
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 08.10.1982 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : (312) 410 31 18
e-mail : atak1337@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim	Tarih
Lisans	: Gazi Üniversitesi/ Makine Mühendisliği	2005
Lise	: Ankara Süper Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-...	Devlet Malzeme Ofisi	Makine Mühendisi
2005-2008	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Futbol, Masa Tenisi, Yüzme, Kitap