

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİNERLENMİŞ BRONZ ESASLI KAYMALI
YATAKLARDA POLİMER KULLANIMININ
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Kadir GÜNGÖR

Enstitü Anabilim Dalı : **MAKİNE EĞİTİMİ**
Tez Danışmanı : **Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT**
Ortak Danışman : **Doç. Dr. Ahmet DEMİRER**

Şubat 2016

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİNERLENMİŞ BRONZ ESASLI KAYMALI
YATAKLARDA POLİMER KULLANIMININ
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

DOKTORA TEZİ

Kadir GÜNGÖR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ

Bu tez 26/02/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Mustafa KURT
Jüri Başkanı



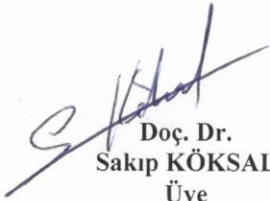
Prof. Dr.
İbrahim ÖZSERT
Üye



Prof. Dr.
Adem DEMİR
Üye



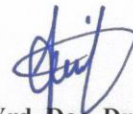
Doç. Dr.
Halil DEMİRER
Üye



Doç. Dr.
Sakıp KÖKSAL
Üye




Doç. Dr.
Ahmet DEMİRER
Üye



Yrd. Doç. Dr.
Ferit FIÇICI
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Kadir GÜNGÖR

29.12.2015

TEŞEKKÜR

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Enstitü Anabilim Dalında gerçekleştirilen bu çalışmada, Sinterlenmiş bronz esaslı kaymalı yataklarda polimer kullanımının tribolojik özelliklere etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma süresince, tez konusunun belirlenmesinden, deneylerin yapılmasına, deney sonuçlarının değerlendirilmesinden tezin yazımına kadar çalışmanın her aşamasında değerli fikir ve yönlendirmeleri ile yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen doktora tez danışmanlarım Sayın Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT ve Sayın Doç. Dr. Ahmet DEMİRER'e teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesinde yer alan ve değerli görüşleri ile çalışmayı yönlendiren ve deneysel çalışmalarına katkı sağlayan Sayın Prof. Dr. Adem DEMİR ve Sayın Doç. Dr. Sakıp KÖKSAL hocalarıma teşekkür ederim. Bu doktora tezi Sakarya Üniversitesi'nin 2012-50-02-005 numaralı araştırma projeleri tarafından desteklenmiştir. Bu vesile ile Sakarya Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak yetişmemde ve bugünlere gelmemde haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim aileme ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli eşime teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

BEYAN.....	i
TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xvi
ÖZET	xviii
SUMMARY	xix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	5
BÖLÜM 2.	
YATAKLAR	6
2.1. Kaymalı Yataklar.....	6
2.1.1. Giriş	6
2.1.2. Kaymalı yatakların başarısızlık (arıza) halleri.....	8
2.1.3. Kaymalı yatak malzemeleri.....	9
2.1.4. Seçim kriterleri.....	10
2.1.5. Sınıflandırma.....	12
2.1.5.1. Metalik malzemeler.....	12
2.1.5.1.1. Babbitler (beyaz metaller)	12
2.1.5.1.2. Bakır alaşımları	13
2.1.5.1.2.1. Bronzlar.....	13

2.2.7. Yağlama ve yağlayıcılar.....	47
2.2.7.1. Katı yağlayıcılar.....	48
2.2.7.2. Sıvı yağlayıcılar.....	48
2.2.7.3. Yarı katı yağlayıcılar.....	49
2.2.7.4. Gaz yağlayıcılar.....	49
2.3. Sinterleme Yöntemi.....	50
2.3.1. Giriş.....	50
2.3.2. Gözenekli bronz yatakların üretimi	54
2.3.2.1. Gözenekli bronz yatakların üretim aşamaları.....	55
2.3.2.1.1. Karıştırma ünitesi.....	56
2.3.2.1.2. Presleme ünitesi.....	57
2.3.2.1.3. Sinterleme ünitesi.....	59
2.3.2.1.4. Kalite kontrol ünitesi.....	61
2.3.3. Bronz yatakların gözeneklerine yağlayıcı emdirilmesi/kaplanması.....	62
2.3.4. Literatür taraması.....	64
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	78
3.1. Giriş.....	78
3.2. Materyal.....	78
3.2.1. Bronz yatak numunelerin üretilmesi	79
3.2.2. Gözenekli bronz yatak numunelerinin PTFE kaplama/emdirme işlemi.....	85
3.3. Yöntem.....	88
3.3.1. Taguchi Yöntemiyle Deneysel Tasarım.....	88
3.3.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü.....	90
3.3.3. Yoğunluk ölçümü	92
3.3.4. Sertlik ölçümü.	93
3.3.5. Kaymalı yatak sürtünme ve aşınma deneyleri.....	96
3.4. Mikroyapı İncelemeleri.....	101
3.4.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri.....	101

3.4.2. Enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi.....	101
3.4.3. Optik mikroskop incelemeleri.....	102
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	103
4.1. Giriş.....	103
4.2. Yatak Numunelerinin Sürtünme Katsayılarının Belirlenmesi.....	104
4.2.1. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin deney sonuçları.....	104
4.2.2. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin deney sonuçları.....	108
4.2.3. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin deney sonuçları.....	111
4.2.4. Ticari yatak numunelerinin deney sonuçları.....	115
4.3. Yatak Numunelerinin Aşınma Kayıplarının Belirlenmesi.....	119
4.3.1. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin aşınma deneyi sonuçları.....	119
4.3.2. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma deneyi sonuçları.....	119
4.3.3. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma deneyi sonuçları.....	120
4.3.4. Ticari yatak numunelerinin aşınma deneyi sonuçları.....	121
4.4. Yatak Numunelerinin Görüntü Analizi.....	121
4.4.1. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin görüntü analizi.....	121
4.4.2. PTFE +% 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin görüntü analizi.....	124
4.4.3. PTFE +% 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin görüntü analizi.....	126
4.4.4. Ticari PTFE kaplı yatak numunelerinin görüntü analizi.....	128
4.5. Yatak Numunelerinin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	131
4.5.1. Sürtünme katsayısı grafiklerinin karşılaştırılması.....	131
4.5.2. Aşınma kaybı grafiklerinin karşılaştırılması.....	135
4.6. Taguchi Deneysel Tasarım Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	137

4.6.1. Optimum deney sonuçları.....	137
4.6.2. ANOVA analizleri.....	140
4.6.2.1. ANOVA analiz haritaları.....	142
4.7. Yatak Ömür Testi.....	144
BÖLÜM 5.	
GENEL SONUÇLAR.....	148
5.1. Çalışma Sonuçları.....	149
5.2. Öneriler.....	150
KAYNAKLAR	152
ÖZGEÇMİŞ	162

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ANSI	: Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
Al	: Alüminyum
Br	: Brom
°C	: Santigrad derece
C	: Karbon
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
d/dk	: Devir/dakika
dk	: Dakika
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
EDS	: Element analizi
F	: Flor
Fe	: Demir
Fn	: Normal Kuvvet
Fs	: Sürtünme kuvveti
g/cm ³	: Gram/santimetreküp
HB	: Brinel Sertlik
Hz	: Frekans
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
JIS	: Japon Sanayi (Endüstri) Standartları
μ	: Sürtünme katsayısı
μm	: Mikrometre
m/s	: Metre/saniye
m/dk	: Metre/dakika

mg	: Miligram
Mg	: Magnezyum
MoS ₂	: Molibden disülfid
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
Sn	: Kalay
N	: Newton
P	: Güç
PA	: Poliamid
Pb	: Kurşun
PE	: Polietilen
PEEK	: Polieter eterketon
PPS	: Polifenilensülfid
POM	: Polioksimetilen, Polyasetal, Asetal
PTFE	: Politetrafloroetilen
PTFE+GR	: Politetrafloroetilen+Grafit
SAE	: Society of Automative Engineers
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskopisi)
Si	: Silisyum
T/M	: Toz Metalürjisi
v	: Hız
% wt.	: Yüzde Ağırlık
TSE	: Türk Standartlar Enstitüsü
XRD	: X-ışını difraktometresi
Zn	: Çinko

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Yatakların şematik gösterimi, a) kaymalı yatak b) rulmanlı yatak	6
Şekil 2.2.	Taşıdığı kuvvetin yönüne bağlı olarak yatakların şematik gösterimi, a) radyal yatak, b) aksenel yatak, c) radyal-aksenel yatak.....	7
Şekil 2.3.	PTFE' nin yapısı.....	17
Şekil 2.4.	PTFE monomeri.....	17
Şekil 2.5.	Grafitin kristal yapısı.....	19
Şekil 2.6.	MoS ₂ ' nin kristal yapısı.....	20
Şekil 2.7.	PA'nın monomeri.....	21
Şekil 2.8.	PA'nın yapısı.....	21
Şekil 2.9.	Stribeck diyagramı, a) sürtünme alanları b) yağlama durumları.....	24
Şekil 2.10.	Yağlayıcı maddenin bulunma durumuna göre sürtünme halleri, a) kuru sürtünme b) sınır sürtünme c) sıvı sürtünme.....	25
Şekil 2.11.	Kuru sürtünme modeli.....	26
Şekil 2.12.	Sınır sürtünmesi.....	27
Şekil 2.13.	Sıvı sürtünmesi (a) Yağlayıcı tabaka, (b) Tabakalar arası hızlar.....	28
Şekil 2.14.	Hidrodinamik sıvı sürtünme, a) Aksenel yatak, b) Radyal yatak.....	29
Şekil 2.15.	Hidrodinamik sıvı sürtünme halleri	30
Şekil 2.16.	Stribeck sürtünme eğrisi üzerindeki sürtünme halleri ve geçiş bölgeleri.....	31
Şekil 2.17.	Sürtünme çiftinin yağ film katmanı.....	31
Şekil 2.18.	Yuvarlanma sürtünmesi modeli.....	35
Şekil 2.19.	Zamanla oluşan aşınma.....	36
Şekil 2.20.	Adhesif aşınma mekanizması.....	39
Şekil 2.21.	Ara yüzün kesilmesi esnasında kırılmanın (1 ve 2) iki olasılığı.....	40
Şekil 2.22.	Yüzeylerdeki pürüzlerin temasıyla malzeme parçasının ayrılması..	41

Şekil 2.23. Aşındırıcı parçacıkların sistematiği [102]. (a) aşındırıcı parçacıklı bir yüzey (b) yüzeyler arasına sıkışan serbest aşındırıcı parçacıklar.	42
Şekil 2.24. Abrasif aşınma mekanizması, (a) iki gövdeli abrasif aşınma, (b) üç gövdeli abrasif aşınma.....	43
Şekil 2.25. Plastik deformasyon sonucunda oluşan abrasif aşınma süreci.....	44
Şekil 2.26. Yüzey yorulma aşınması.....	46
Şekil 2.27. Sinterleme sırasında küresel taneler arasındaki boyun oluşumu.....	52
Şekil 2.28. Toz parçacıkların sinterleme sırasında oluşturduğu homojen yapı...	53
Şekil 2.29. Yatak numunelerinin üretim işlemi üniteleri, (a) karıştırma ünitesi, (b) presleme ünitesi, (c) sinterleme ünitesi, (d) kalite kontrol ünitesi.....	56
Şekil 2.30. Kalıp setinin montaj resmi.....	57
Şekil 2.31. Ham numunelerin üretim işlem basamaklarının şematik resmi.....	58
Şekil 2.32. Sinterleme fırını bant sistemi.....	59
Şekil 2.33. Sinter fırın hattının üç bölgesi.....	60
Şekil 2.34. Sinterleme fırınının ısıl çevrimi.....	61
Şekil 3.1. Bronz yatak malzemelerin üretimi ile ilgili işlem adımları.....	79
Şekil 3.2. Cu89Sn11 küresel bronz tozlarının, a) fotoğraf görüntüsü, b) mikro görüntüsü.....	80
Şekil 3.3. Çinko stereat tozu.....	81
Şekil 3.4. Toz karıştırma mikseri.....	81
Şekil 3.5. Kalıp setinin teknik resmi.....	82
Şekil 3.6. Pres ve üretim işlemi tamamlanmış ham numunenin resmi.....	83
Şekil 3.7. Sinterleme fırını bant sistemi.....	83
Şekil 3.8. CuSn11 bronz burç, (a) üretim sonu hali, (b) imalat resmi.....	84
Şekil 3.9. Bronz numunelerin PTFE kaplama işlem akışı.....	85
Şekil 3.10. Alttan hazneli sprej-gun tabanca.....	86
Şekil 3.11. Üç ayaklı döner tabla.....	86
Şekil 3.12. Sprej kaplama işlemi.....	87
Şekil 3.13. Kurutma ve kürlenme fırını.....	87
Şekil 3.14. CuSn11 bronz numune, (a) kaplanmış hali, (b) kaplama kalınlığı...	88
Şekil 3.15. Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı.....	90

Şekil 3.16. . Brinell sertlik ölçümünün şematik gösterimi.....	90
Şekil 3.17. Yoğunluk ölçümünde kullanılan digital hassas terazi.....	92
Şekil 3.18. Brinell sertlik ölçümünün şematik gösterimi.....	94
Şekil 3.19. Bakalite alınmış numunenin sertlik ölçümü	95
Şekil 3.20. Qness marka universal sertlik ölçüm cihazı	96
Şekil 3.21 Kaymalı yatak aşınma cihazı.....	97
Şekil 3.22. Aşınma cihazının devre şeması	98
Şekil 3.23. Kaymalı yatak aşınma deney mekanizması	99
Şekil 3.24. Deneyler öncesi hazırlanmış numuneler.....	100
Şekil 3.25. Taramalı elektron mikroskobu.....	101
Şekil 3.26. Optik mikroskop.....	102
Şekil 4.1. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin 0,5 m/s hız ve 2,5 saatteki sürtünme katsayısı grafiği.....	104
Şekil 4.2. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin 1 m/s hız ve 2,5 saatteki sürtünme katsayısı grafiği	105
Şekil 4.3. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin 1,5 m/s hız ve 2,5 saatteki sürtünme katsayısı grafiği	105
Şekil 4.4. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yük ve 2,5 saatteki sürtünme katsayısı grafiği	106
Şekil 4.5. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yük ve 2,5 saatteki yatak sıcaklıkları.....	107
Şekil 4.6. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin 0,5 m/s hızdaki sürtünme katsayı grafiği	108
Şekil 4.7. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin 1 m/s hızdaki sürtünme katsayı grafiği	109
Şekil 4.8. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin 1,5 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği	109
Şekil 4.9. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yükteki sürtünme katsayısı grafiği	110
Şekil 4.10. PTFE+% 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yükteki yatak sıcaklıkları	111

Şekil 4.11. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin 0,5 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği.....	112
Şekil 4.12. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin 1 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği	112
Şekil 4.13. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin 1,5 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği	113
Şekil 4.14. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yükteki sürtünme katsayısı grafiği	114
Şekil 4.15. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yükteki yatak sıcaklıkları.....	115
Şekil 4.16. Ticari yatak numunelerinin 0,5 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği.....	115
Şekil 4.17. Ticari yatak numunelerinin 1 m/s hızda sürtünme katsayısı grafiği	116
Şekil 4.18. Ticari yatak numunelerinin 1,5 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği	116
Şekil 4.19. Ticari yatak numunelerinin 50 N yük ve 2,5 saatteki sürtünme katsayısı grafiği	117
Şekil 4.20. Ticari PTFE kaplı yatak numunelerinin 50 N yük ve 2,5 saatteki yatak sıcaklıkları.....	117
Şekil 4.21. PTFE kaplanmış numunelerin 0,5 - 1 ve 1,5 m/s hızlardaki yüke bağlı aşınma kayıpları	119
Şekil 4.22. PTFE + % 10 GR kaplanmış numunelerin 0,5 - 1 ve 1,5 m/s hızlardaki yüke bağlı aşınma kayıpları	120
Şekil 4.23. PTFE + % 20 GR kaplanmış numunelerin 0,5 - 1 ve 1,5 m/s hızlardaki yüke bağlı aşınma kayıpları	120
Şekil 4.24. Ticari yatak numunelerinin 0,5 - 1 ve 1,5 m/s hızlardaki yüke bağlı aşınma kayıpları.....	121
Şekil 4.25. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin aşınma sonrası mikroyapı görüntüleri	122
Şekil 4.26. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	122

Şekil 4.27. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin aşınma yüzeyinin SEM EDS analizi	123
Şekil 4.28. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	124
Şekil 4.29. PTFE + % 10 GR yatak numunelerinin aşınma yüzeyinin SEM EDS analizi	125
Şekil 4.30. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri	126
Şekil 4.31. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma yüzeyinin SEM EDS analizi	127
Şekil 4.32. Ticari yatak numunelerin yanal yüzey kesitinin mikro yapısı ve PTFE kaplama kalınlığı	128
Şekil 4.33. Ticari yatak numunelerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	129
Şekil 4.34. Ticari yatak numunelerinin aşınma yüzeyinin SEM EDS analizi....	130
Şekil 4.35. Yatak numunelerinin 0,5 m/s hız ve 30 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri	132
Şekil 4.36. Yatak numunelerinin 0,5 m/s hız ve 50 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri	132
Şekil 4.37. Yatak numunelerinin 0,5 m/s hız ve 70 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri	132
Şekil 4.38. Yatak numunelerinin 1 m/s hız ve 30 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri	133
Şekil 4.39. Yatak numunelerinin 1 m/s hız ve 50 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri	133
Şekil 4.40. Yatak numunelerinin 1 m/s hız ve 70 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri	133
Şekil 4.41. Yatak numunelerinin 1,5 m/s hız ve 30 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri	134
Şekil 4.42. Yatak numunelerinin 1,5 m/s hız ve 50 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri	134
Şekil 4.43. Yatak numunelerinin 1,5 m/s hız ve 70 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri	134

Şekil 4.44. Yatak numunelerinin 0,5 m/s hızdaki aşınma kayıpları.....	136
Şekil 4.45. Yatak numunelerinin 1 m/s hızdaki aşınma kayıpları.....	136
Şekil 4.46. Yatak numunelerinin 1,5 m/s hızdaki aşınma kayıpları.....	136
Şekil 4.47. Sürtünme katsayısının optimizasyonuna ait ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimi	139
Şekil 4.48. Aşınma kaybının optimizasyonuna ait ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimi	139
Şekil 4.49. Yatak sıcaklığının optimizasyonuna ait ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimi.....	140
Şekil 4.50. Sürtünme katsayısına etki eden parametrelerin analiz haritası.....	143
Şekil 4.51. Aşınma kaybına etki eden parametrelerin analiz haritası.....	143
Şekil 4.52. Yatak sıcaklığına etki eden parametrelerin analiz haritası	144
Şekil 4.53 Ömür testi sonunda aşınan ticari PTFE kaplı yatak numuneleri.....	145
Şekil 4.54 Ticari PTFE kaplı numunelerin test sonundaki mikroyapı görüntüleri.....	145
Şekil 4.55 Ömür testi sonunda aşınan PTFE + %10 GR numuneler.....	146
Şekil 4.56 PTFE + % 10 GR numunelerin test sonundaki mikroyapı görüntüleri.....	146
Şekil 4.57 Ticari ve PTFE + % 10 GR numunelerin ömür testi grafiği ve aşınma bölgeleri.....	146

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Farklı sürtünme durumlarında sürtünme katsayı aralıkları.....	24
Tablo 2.2.	Sinterlenmiş bronş yatakların % ağırlıkça kimyasal kompozisyonu	51
Tablo 2.3.	Yağ emdirilmiş sinterlenmiş bronş yatakların yoğunluk değerleri..	51
Tablo 2.4.	Yağ miktarları (minimum % hacimce yağ miktarı).	51
Tablo 2.5.	Malzemelerin sinterleme sıcaklıkları ve süreleri	52
Tablo 3.1.	Cu ₈₉ Sn ₁₁ küresel bronş tozlarının kimyasal kompozisyonu.....	80
Tablo 3.2.	Çinko stearat tozlarının teknik değerleri.....	80
Tablo 3.3.	L ₂₇ (3 ¹³) ortogonal dizisi.....	89
Tablo 3.4.	Yüzey pürüzlülüğü olm cihazının zellikleri	91
Tablo 3.5.	Numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri.....	91
Tablo 3.6.	Numunelerin teorik ve deneysel yoğunluk değerleri	93
Tablo 3.7.	Deneylerde kullanılan malzemelerin sertlik değerleri	96
Tablo 3.8.	Karşı aşındırıcı olarak kullanılan milin kimyasal bileşimi ve zellikleri	100
Tablo 4.1.	PTFE kaplanmış yatak numunelerin farklı hız ve yüklerdeki ortalama sürtünme katsayıları	106
Tablo 4.2.	PTFE kaplanmış yatak numunelerinin ortalama yatak sıcaklıkları	107
Tablo 4.3.	PTFE + % 10 GR kaplanmış numunelerin farklı hız ve yüklerdeki ortalama sürtünme katsayıları.....	110
Tablo 4.4.	PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin ortalama yatak sıcaklıkları.....	111
Tablo 4.5.	PTFE + % 20 GR kaplanmış numunelerin farklı hız ve yüklerdeki ortalama sürtünme katsayıları.....	114
Tablo 4.6.	PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin ortalama yatak sıcaklıkları	114

Tablo 4.7. Ticari PTFE kaplı numunelerin farklı hız ve yüklerdeki ortalama sürtünme katsayıları.....	118
Tablo 4.8. Ticari PTFE kaplı yatak numunelerinin ortalama yatak sıcaklıkları.....	118
Tablo 4.9. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin aşınma yüzeyindeki element oranları (wt. %)......	123
Tablo 4.10. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma yüzeyindeki element oranları (wt. %)......	126
Tablo 4.11. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma yüzeyindeki element oranları (wt. %)......	128
Tablo 4.12. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma yüzeyindeki element oranları (wt. %)......	130
Tablo 4.13. Yatak burçlarının deneyleri için hazırlanan L27 (3^{13}) dizisi.....	138
Tablo 4.14. Yatak burçlarının sürtünme katsayısına göre ANOVA analiz sonuçları.....	141
Tablo 4.15. Yatak burçlarının aşınma kaybına göre ANOVA analiz sonuçları ...	141
Tablo 4.16. Yatak burçlarının yatak sıcaklıklarına göre ANOVA analiz sonuçları.....	142

ÖZET

Anahtar Kelimeler: CuSn11 Kalay Bronzu, Sinterlenmiş Gözenekli Bronz, Kendinden Yağlamalı Burç, PTFE + Grafit, PTFE Kaplama/Emdirme, Kaymalı Yatak, Bronz + PTFE Kompozit Malzeme.

Toz Metalürjisi (T/M), üstün özelliklere sahip farklı malzemeleri bir araya getirerek istenilen özellikte parçalar üretmek için kullanılan popüler yöntemlerden biridir. T/M alanındaki gelişmeler, kalay bronzlarının yüksek aşınma direnci, iyi korozyon direnci, yüksek termal iletkenlik gibi özellikleri ve polimer malzemelerin ise iyi kayma ve kendinden yağlamalı, düşük sürtünme katsayısı, korozyona karşı yüksek direnç özellikleri nedeniyle birlikte yatak malzemesi olarak kullanılmasına imkân tanımıştır. Bu durum, sinterlenmiş bronz yatakların gözeneklerine katı yağlayıcı polimer emdirilerek kendinden yağlamalı yataklar olarak kullanılmaları şeklindedir. Politetrafloroetilen (PTFE) gibi kendinden yağlama özelliğine sahip polimerlerin, gözenekli yataklara emdirilerek veya yüzeylerine kaplamak suretiyle Bronz + PTFE kompozit yatak olarak kullanılmaları, özellikle devamlı yağlama imkânı olmayan endüstriyel uygulamalarda (elektrik motorları, otomobiller, dikiş makineleri, yazıcılar, gıda ve paketleme makineleri vb.) her geçen gün yaygınlaşmaktadır.

Bu çalışmanın hedefi, klasik burç malzemelerinden farklı olarak düşük sürtünme katsayısı ve yüksek ömre sahip alternatif bir yatak malzemesi üretilmesidir. Yapılan çalışmada sinterlenmiş gözenekli yapıya sahip bronz esaslı kaymalı yatakların gözeneklerine polimer malzemenin emdirilerek, polimer kullanımının tribolojik özelliklere etkisi incelenmiştir. Bronz yatak ana malzemesi (matris), 100-200 µm tane boyutlarına sahip CuSn11 alaşım tozu kullanılarak T/M yöntemiyle üretilmiştir. Bu malzemelerin gözeneklerine spreylendirilerek kaplama metoduyla PTFE, PTFE + % 10 Grafit, PTFE + % 20 Grafit katkılı polimer olmak üzere üç farklı malzeme emdirilmiştir. Kaplanan gözenekli yatak numunelerinin sertlik, yoğunluk ve yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Yatak numunelerinin tribolojik özelliklerinin tespiti için özel olarak kaymalı yatak aşınma deney cihazı tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Kaymalı yatak aşınma test cihazında üç farklı hız ve üç farklı yük altında kuru sürtünme, aşınma deneyleri gerçekleştirilerek numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma kayıpları belirlenmiştir. Deneyler boyunca yatak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, üretilen bu yatak numunelerinin Taguchi metodu kullanılarak alınan veriler ANOVA yöntemiyle sonuçlar üzerindeki her bir faktörün (malzeme türü, yük ve hız) etkinlik derecesi istatistiksel olarak elde edilmiştir. Ayrıca bu yöntemle en uygun sürtünme, aşınma ve sıcaklık değerleri için deneysel optimizasyonu yapılmıştır. Endüstride yaygın olarak kullanılan çelik altlık yüzeyine bronz sinterlenmiş PTFE kaplı ticari yatak burçları da test edilerek, PTFE ve grafit katkılı PTFE kaplanmış/emdirilmiş kompozit yatak burçlarıyla kıyaslanmıştır. Yatak numunelerinin optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) mikro yapıları incelenmiştir. Deneyler sonucunda, kuru sürtünmenin gerçekleştiği kompozit bir yapı olan Bronz + PTFE yüzeyinde, PTFE malzemenin tek başına sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı açısından yeterli olmadığı görülmüştür. Ancak, PTFE malzemeyle birlikte grafitin de kullanımının sürtünme katsayısı ve aşınma değerlerinde olumlu sonuçlar vermiştir. Ticari yataklara göre ömrün yaklaşık % 30 daha uzun olduğu, sürtünme katsayısının da % 7,5 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Grafit katkılı PTFE kaplanmış/emdirilmiş kompozit yatak burçlarının ticari yatak burcuna bir alternatif olduğu görülmüştür. Sonuç olarak % 10 grafit katkılı PTFE bronz burcun 0,5 m/s hızda ve 70 N yük altında optimum sonucu verdiği deneysel ve istatistiksel olarak belirlenmiştir.

THE EFFECT TO TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF USE POLYMER IN SINTERED BRONZE-BASED PLAIN BEARINGS

SUMMARY

Keywords: CuSn11 Tin Bronze, Sintered porous bronze, Self-Lubricating Bushing, Plain bearing, PTFE + Graphite, PTFE coating / impregnating, Bronze + PTFE Composite Materials,

Powder metallurgy (P/M) is a popular metal forming technology used to produce the desired components by combining different materials having superior properties. Advances in powder metallurgy allowed the use of tin bronzes and polymer materials together as bearing material owing to their properties such as high wear resistance, good corrosion resistance, high thermal conductivity properties of tin bronze with good sliding, shock damping, low friction coefficient, high resistance to corrosion of polymer materials. This is used as self-lubrication bearing by means of impregnating solid lubricant polymer into pores of sintered porous bronze bearings. Especially, with no possibility of continuous lubrication in industrial applications, PTFE with solid lubricant property is used by impregnating into pores of the bronze bearing materials or coating onto bearing surfaces. Hereby; this structure has been widely used as Bronz + PTFE bearings. The objective of this study is to produce an alternative bearing material having low friction coefficient and a high life as different from the conventional bushing material. In this study, Bronze + polymer composite bearing was produced by impregnating polymer into porous bronze bearing material and impact on the tribological properties of polymers is investigated. Bearing matrix material is produced by the P/M method from 100 - 200 μm grain size CuSn11 tin bronze powders. Three different polymers including PTFE, PTFE + 10% GR, PTFE + 20% GR were impregnated into porous bronze material by spray coating method. The hardness, density and surface roughness values of the coated bearing samples were determined. Plain bearing wear test equipment is designed and manufactured for the determination of tribologic properties of bearing samples. Experiments have been carried out under dry environments at three different speeds and loads and measured for every half an hour during 2.5 h by using plain bearing wear test rig. Friction coefficients and wear loss have been determined. As a result of experiments, the efficiency degrees of each factor (material type, load and speed) on the bearing samples were obtained and statistically analyzed using ANOVA and Taguchi method. Also, Experimental optimization samples were performed for most suitable coefficient of friction, wear and temperature values by this method. Also a widely used commercial bushings which were PTFE coated on working surfaces of sintered bronze layer of steel substrate materials are tested for the same conditions and compared with PTFE and graphite reinforced PTFE coated / impregnated composite bearing bushings. Microstructure of bearings samples were investigated in optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). It has been found that, the dry friction occurs on surface of bronze and PTFE composite structure. PTFE has been found to be adequate in terms of friction coefficient and wear only. However, the use of graphite with PTFE has been found to give good results on friction coefficient and wear parameters. In life tests, PTFE + 10% GR samples have a longer bearing life and a lower coefficient of friction compared commercial bearings. Graphite reinforced PTFE coated / impregnated composite bushing bearings can be an alternative to commercial bearing bushing. Optimum results were obtained with, 10% graphite reinforced PTFE bronze bushings under 0.5 m / s speed and 70 N load, experimentally and statistically.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızlı olarak ilerlemesi yeni ihtiyaçları da beraberinde getirmektedir. Teknolojideki bu ilerleme, kaymalı yatak malzeme üreticilerini ve araştırmacıları yeni malzemeler araştırmaya veya mevcut malzemeleri geliştirmeye yöneltmiştir. Kaymalı yataklar, millerin yüzeylerinde kayarak kolaylıkla dönmelerini sağlayan ve aynı zamanda ortaya çıkan kuvvetlerin karşılanmasında kullanılan destekleme elemanları olarak, en önemli makine elemanlarının arasında yer almaktadır.

Uygulamalarda kaymalı yatak malzemelerinden istenilen en önemli özellikler; yüksek basma ve yorulma mukavemeti, düşük aşınma ve yüksek korozyon dayanımı, yüksek ısı iletim katsayısı, düşük genleşme katsayısı, yağ ve dışarıdan gelen sert parçacıkları bünyesine gömebilme kabiliyeti, kolay işlenebilirlik ve ekonomiklik olarak sıralanmaktadır [1]. Çünkü kaymalı yatak sistemlerinde, birbirleriyle izafi harekette ve çalışma yüzeyleri temas halinde bulunan mil ve yatak arasında, çalışma periyoduna bağlı olarak, sürtünme; aşınma ve sıcaklık yükselişi oluşmaktadır. Bu durum enerji kaybına sebep olurken sistem verimini düşürmektedir [2]. Bu sebeple; sürtünmenin etkisini azaltmada alınacak tedbirlerden biri de yatak malzemesinin doğru seçilmesidir. Bu sistemlerin temas yüzeylerindeki sürtünme direnci malzemelerinin tribolojik özelliklerine bağlıdır.

Kaymalı yatak malzemesi olarak, endüstride çinko, pirinç, beyaz metal, alüminyum, bakır ve bronz gibi bakır esaslı malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Teknoloji gelişme sürecine paralel olarak, Toz Metalürjisi (T/M), ekstrüzyon, enjeksiyon, döküm gibi üretim metotlarının gelişmesi, bakır esaslı alaşımlarının ve çoğunlukla da kalay bronzlarının yüksek aşınma direnci iyi korozyon direnci, yüksek termal ve elektrik iletkenliği gibi özellikleri ve polimer malzemelerin iyi kayma ve

darbe sönümlenme özelliği, düşük sürtünme katsayısı, korozyona karşı yüksek direnç göstermeleri nedeniyle bu malzemelerin kolaylıkla üretimlerinin yapılarak yatak malzemesi olarak kullanılmalarna katkı sağlamıştır [4,5,6]. Bu durum, döküm yoluyla imal edilen bronz yataklar ve sinterlenmiş gözenekli bronz yataklarda, bu yatakların gözeneklerine yağ veya katı yağlayıcı polimer emdirilerek kendinden yağlamalı yatak olarak kullanılmalarnı sağlamıştır. Bunun yanında, bronz ve polimer malzemelerin üstün yanlarının birlikte kullanılmalarnı, bronz-polimer kompozit yatakların da üretimini yaygınlaştırmıştır. Özellikle de devamlı yağlama imkânı olmayan sistemlerde Politetrafloroetilen (PTFE) gibi polimer malzemeler gözenekli yatak malzemelerinin gözeneklerine emdirilerek veya yüzeylerine kaplamak suretiyle Bronz + PTFE kompozit yatak olarak kullanılmalarna imkân tanımıştır [7].

T/M yöntemi ile üretilen sinterlenmiş yataklar gözenekleri sayesinde, gözeneklere emdirilen yağlayıcıyı depolayabilme görevi yapmaktadır. Ayrıca, kaplanan yağlayıcı özelliğe sahip malzemenin de hem depolanabilmesine hem de bünyesine tutunabilmesine imkân tanımaktadır. Bu durum, milin dönmeye başladığında mil ile yatak çiftinin çalışma yüzeylerinin temasıyla oluşacak sürtünme esnasında, sistemde sıcaklık yükseleceğinden yağlayıcının genleşmesine ve gözeneklerdeki yağların yüzeye çıkarak yağlama yapmalarını sağlamaktadır. Dışarıdan yapılacak herhangi bir yağlamada ise bu gözenekler tekrar dolarak uzun süreli yağlamalar yapabilmektedirler. Öte yandan kaplama işlemi yapılması durumunda ise, kaplanan katı yağlayıcı hem gözeneklere dolmakta hem de yüzeyde bir katman oluşturmaktadır. Bu durum sürtünme çiftinin çalışması esnasında ilk önce kaplamayla elde edilen kendinden yağlamalı kayar yüzeyde çalışmasını sağlamaktadır. Zaman içinde yüzeyde oluşacak aşınmayla birlikte bu katman kalksa bile gözeneklerdeki yağlayıcı maddeler aşınmayla birlikte her kademedede sürtünme çiftleri arasına girerek aşınmayı yavaşlatmakta ve aynı zamanda sürtünme katsayısının da stabil bir konumda kalmasını sağlamaktadır [8,9]. Ancak, aşınmanın zamana bağlı olarak geliştiği dikkate alındığında, yatakların uygun basınç \times hız (p.v) değerleri arasında kullanılmasının aşınma değerlerini azalttığı ve yatak ömrünü de uzattığı unutulmamalıdır. Yukarıda belirtilen her iki durumda da yatak kendi kendini

yağlayabilmektedir. Bu durum yataklarda aranılan önemli özelliklerden birisidir. Bu sebeple devamlı yağlama imkânı olmayan makine parçalarına yağ emdirebilmek için T/M tekniği kullanılmaktadır [10].

T/M tekniğiyle üretilen bakır esaslı sinterlenmiş kompozitler, tribolojik mühendislik parçalarında da (yataklar, burçlar, kılavuzlar vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda, katı yağlayıcı içeren bakır-kalay esaslı kompozitler, aşırı yük, atmosfer ve sıcaklık şartlarında kendi kendini yağlayabilen malzemeler olarak geliştirilmektedirler [11,12]. T/M tekniğiyle üretilen bu kompozitlerde sürtünme ve aşınma azaltıcı olarak ilave edilen katı yağlayıcılara bakıldığında grafit, molibden disülfat (MoS_2), PTFE gibi katkı maddeleri göze çarpmaktadır.

Çeşitli katı yağlayıcı özelliğe sahip metallerin veya polimerlerin metal yüzeylerine uygulanmasında kullanılan kaplama tekniklerine bakıldığında ise, daldırma, spreyleme, haddeleme, santrifüj döküm gibi tekniklerin uygulandığı görülmektedir. Kullanılan polimer malzemeler arasında en düşük sürtünme katsayısına sahip ve korozyona dirençli olan PTFE dir. 250°C ' ye kadar çözücülere, asit ve alkalilere dayanır. Endüstriyel mühendislik polimerleri arasında PTFE'nin geniş çalışma sıcaklığı aralığına (-260°C ila $+270^\circ\text{C}$) sahip olması, kimyasal maddelere karşı dayanımı, çok düşük statik ve dinamik sürtünme katsayısına sahip olması, kayar/yapışmaz (non-stick) özelliği göstermesi ve mekanik açıdan yeterli mukavemette olması gibi özellikleri nedeniyle geniş kullanım alanına sahiptir. En büyük dezavantajı aşındırıcı ortam içinde aşınma direncinin az olmasıdır. Aşınma uygulanan basınç veya yük, kayma hızı ve zamana bağlıdır. Aşınma direncinin yüksek olması gereken yerlerde kompozit yapılı veya alaşımlı PTFE tercih edilmektedir. Bronz, grafit, MoS_2 , cam elyaf katkılı PTFE'nin mekanik özellikleri daha iyidir [13,14].

Günümüzde bronzun sinterlenmesiyle elde edilen gözenekli mikro yapıya katı yağlayıcı olan PTFE ve PTFE katkılı katı yağlayıcılar kaplanarak yatak uygulamaları için mükemmel tribolojik özelliklere sahip malzemeler elde edilebildiği gözlenmiştir [15,16]. PTFE'nin avantajlarından yararlanmak ve dezavantajlarından sakınmak

için, çoğu araştırmacılar ticari dolgulardan yararlanarak tribolojik uygulamalar için polimer esaslı kompozitler geliştirmişlerdir. (Örneğin; cam fiber, karbon dolguları, demir olmayan metalik tozlar ve bazı metal oksitler gibi.) [13,17]. PTFE'nin belli özelliklerine ilave olarak katkılarla birleştirildiğinde aşınma direnci diğer polimerlerinkinden daha büyük olmaktadır [18,19]. Bu kaplamalar sayesinde, düşük kuru sürtünme katsayısı, sertlik, yüksek gerilme direnci elde edilebilmektedir. Bu işlemlerle üretilen sinterlenmiş bronz (bakır ve % 10 - 15 kalay) ve yüzeyi katı yağlayıcılarla (PTFE, PTFE + grafit, PTFE + Pb, PTFE + Polimer vb.) kaplanmış yataklar, makine ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [20, 21,22].

PTFE, düşük yük ve hızlarda yalnız başına veya PTFE'ye yük altında deformasyona ve aşınmaya karşı direnç, termal genişmesini azaltmak, termal ve elektriksel iletkenlik gibi özellikler kazandırmak amacıyla polimerler cam elyaf katkılı, karbon katkılı, bronz katkılı vb. kompozit bir malzeme olarak üretilmektedirler. Daha sonra bu malzemeler işlenerek kaymalı yatak olarak kullanılmaktadır [23,24]. Çünkü PTFE non-stick kayar/yapışmaz özelliklerine sahip bir malzemedir. Aynı zamanda, yatak malzemesi olarak kullanılan bronz ile beraber PTFE' nin de kaplanması bu malzemelere kendini yağlayabilme ve mükemmel yük taşıma kapasitesi sağlamaktadır [25]. Bronzun yüzeyinde yağlayıcı bir katman olarak çalışan PTFE veya PTFE katkılı yüzey, çalışma esnasında zamanla aşınsa bile alt katman olarak ortaya çıkan bronzun yüzeyi (bronz da yatak malzemesi olarak kullanıldığından) milin zarar görmesini erteleyebilmektedir. Bu sebeple, kaymalı yatakların seçiminde, çalışma şartlarına (yüklemenin büyüklüğü ve tipi, işletme sıcaklığı, yağlama durumu vb.) uygun olarak kendinden beklenen özellikleri yerine getirebilen malzemeler seçilmelidir.

Gözenekli bronz malzemeler ile PTFE ve PTFE katkılı kompozit malzemeler en çok makine, otomotiv ve uçak sanayiinde kullanılmaktadır. Bronz ve polimer katkılı kompozit yatak malzemeleri, elektrik ve elektronik makinaları, kimya mühendisliğinde kullanılan makinalar ve tekstil makinaları gibi makine endüstrisinde önemli bir uygulama alanı bulmaktadır. Özellikle devamlı yağlama imkânı olmayan

elektrik motorları, otomobiller, dikiş makinaları, yazıcılar, tarım ve paketleme makinalarında yaygın kullanılırlar. Bunun yanında otomotiv sektöründe forklift ve kaldırma makineleri, pistonlar, biyeler, gergi kolları, amortisörler, menteşeler, dişli kutuları, pompalar, vanalar, araba koltukları, vibrasyon takozları ve diğer ekipmanların bağlantı parçalarının yatak uygulamaları mevcuttur. Endüstrinin, farklı özellikleri bir arada barındıran yatak malzemelerine olan ihtiyacı arttıkça tercih edilebilirlik oranları da artacaktır.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, T/M üretim tekniği kullanılarak üretilen gözenekli bronz yatak burcuna, yağlayıcı özelliğe sahip PTFE, ağırlıkça PTFE + % 10 grafit (PTFE + % 10 GR), PTFE + % 20 grafit (PTFE + % 20 GR) katkılı katı yağlayıcıların gözeneklere kadar nüfuz ederek emdirilmesi için sprej kaplama tekniği kullanılarak kaplanmıştır. Bu sayede elde edilen kendinden yağlamalı grafit katkılı PTFE kaplı bronz yatak malzemeleri üretilip, bu malzemelerin kuru ortam şartlarında tribolojik özelliklerinden sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla; 100 - 200 µm ön alaşımlandırılmış küresel CuSn11 bronz tozlardan sinterlenerek üretilmiş yatak burcuna, ortalama toz boyutu 200 µm olan ve ağırlıkça % 10 ve % 20 oranlarında grafit tozu PTFE solüsyonuna ilave edilerek homojen karışımlar oluşturulmuş ve hazırlanan bu hammadde sprej kaplama metoduyla kaplanmıştır. Elde edilen yatak numunelerinin yoğunlukları ve sertlikleri ölçülmüştür. Kaplanmış numune yanal yüzeyden kesilerek zımparalanmış ve sprej kaplama metoduyla gözeneklere emdirilen kaplamaların nüfuziyetinin tespiti amacıyla kaplama kalınlığı yanal kesitten taramalı mikroskop yardımıyla ölçülmüştür. Bu çalışma için özel olarak tasarlanmış ve imal edilmiş aşınma test cihazında kaymalı yatak numuneleri test edilerek sürtünme katsayıları ve aşınma değerleri belirlenmiştir. Grafit katkılı ve katkısız PTFE kaplı bronz yatak numuneleri ile ticari olarak temin edilen çelik altlığa sinterlenmiş bronz katmanın yüzeyine PTFE kaplı yatak numunelerinin, sürtünme ve aşınma performansları karşılaştırılmış ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

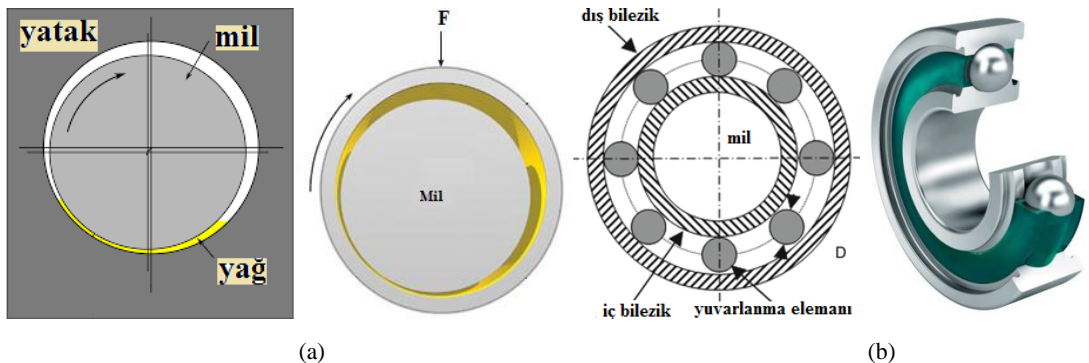
BÖLÜM 2. YATAKLAR

2.1. Kaymalı Yataklar

2.1.1. Giriş

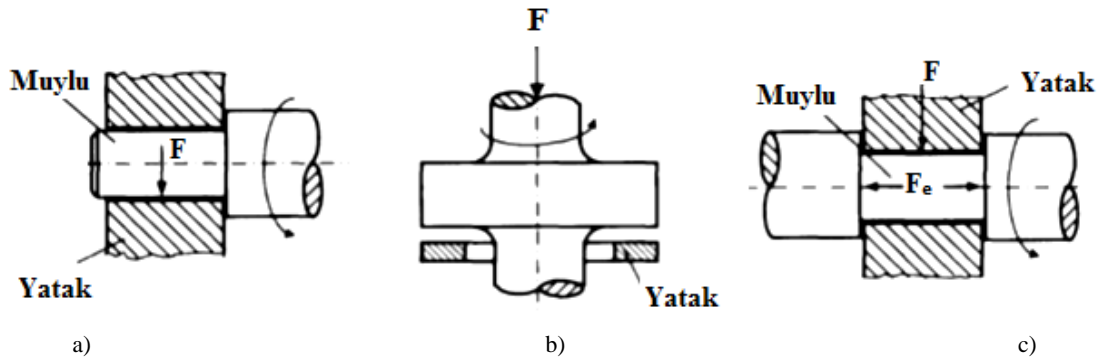
Yataklar, birbirlerine göre izafi harekette bulunan iki mekanik parça arasındaki doğrusal veya dönme hareketi esnasında sürtünmeyi azaltmak ya da parçaları harekete uygun biçimde konumlandırmak ve kuvvet doğrultusunda hareketlerine engel olmak için kullanılan tribolojik makina elemanlarıdır. Yatağın sürtünme azaltan mekanizması birçok faktörün kombinasyonu yoluyla olabilir. Bu faktörler, yatağın spesifik şekli, malzemesi, mekanik parçaların bir yağlayıcı akışkan katman/yağlayıcı yüzeyden veya elektro manyetik alandan faydalanılarak ayrılması gibi durumlar sayılabilir [26].

Yataklar, konstrüksiyonlarına göre kayar sürtünme prensibinden faydalanılan kaymalı ve yuvarlanma sürtünme prensibinin kullanıldığı rulmanlı yataklar (yuvarlanma elemanı) olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.1’de kaymalı ve rulmanlı yatakların şematik gösterimi verilmiştir [27].



Şekil 2.1. Yatakların şematik gösterimi a) kaymalı yatak b) rulmanlı yatak [28].

Kaymalı yataklarda yatak elemanlarının çalışma yüzeylerinin yağ filmi veya yağlayıcı bir katman ile ayrılarak kayma hareketini sağlaması, rulmanlı yataklarda ise; yüzeyler arasında yuvarlanma elemanları vasıtasıyla yuvarlanma hareketinin gerçekleştirilmesi söz konusudur. Birbirleriyle izafi harekette bulunan iki elemanın çalışma yüzeyleri birbirinden ayrılması, metal-metal temasını önlerken dönme hareketini de kolaylaştırmaktadır. Böylelikle de sürtünme ve aşınmayı en alt düzeyde tutulabilmektedir. Yataklar, dönme hareketini kolaylaştırırken mil veya aksı destekleme işlevini de gördüğünden dolayı kuvvete maruz kalmaktadırlar. Yatakların taşıdığı kuvvetin yönü yatak eksenine dik yönde ise radyal yatak, eksenine ile aynı doğrultuda ise aksel yatak olarak adlandırılır. Şekil 2.2’de taşıdığı kuvvetin yönüne bağlı olarak yatakların şematik resmi gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Taşıdığı kuvvetin yönüne bağlı olarak yatakların şematik gösterimi a) radyal yatak b) rulmanlı yatak c) radyal-eksenel yatak [29].

Kaymalı yatak sistemlerinde, hareket eden parçaların (mil ve yatak) temas yüzeyleri arasında kayma sürtünmesinin oluşturduğu dirence karşı yatak elemanı kaymaktadır. Yatak elemanlarının temas yüzeylerinin sürtünme katsayılarının düşük olması veya iyi bir yağlamanın (işletme devir sayısının sınır devir sayısından daha büyük olması, $n_{iş} > n_{sınır}$) gerçekleşmesi sürtünme direncinin azaltılmasına katkı sağlar [30]. Kaymalı (kayar) yataklar, dönmekte olan milleri desteklemek için genellikle tek parça halindeki burçlar “plain bearing” ve yarım ay şeklinde yapılmış iki parçalı yataklar “journal bearing” olarak iki tipte kullanılmaktadır [31].

Kaymalı yatakların yağlama durumlarına göre dört ana türü vardır [32]:

- a. Film yağlamalı yataklar: Genellikle hem yağ hem de gres yağı ile yağlanan kaymalı yataklardır.
- b. Kuru sürtünmeli yataklar: kendinden yağlamalı yataklar olarak da adlandırılan, yağlama imkânı olmayan makine parçalarının yataklanmalarında kullanılmaktadır. PTFE veya grafit gibi kayar çalışma yüzeylerine sahip bu yataklar yağ veya yağlama olmadan çalışabilmektedirler.
- c. Katı yağlayıcı emdirilmiş yataklar: Yatağı oluşturan matrisin PTFE, grafit veya molibden disülfür gibi katı bir yağlayıcı madde ile empenye edildiği yataklardır.
- d. Ön yağlamalı yataklar: Örneğin bronz tozlarının sinterlenmesiyle elde edilmiş gözenekli matrisin yağlayıcı yağ emdirildiği yataklardır.

2.1.2. Kaymalı yatakların başarısızlık (arıza) halleri

Kaymalı yataklarda erken başarısızlık sorunlarının birçok nedeni olabilmektedir. Bu nedenleri, zamanla veya ansızın ortaya çıkan arıza durumları olarak incelemekte fayda vardır. Bu durumları önlemede kaymalı yatak tasarımı hususu önemli bir konudur. Aşağıda kaymalı yatakların başarısızlığa uğramalarına neden olan başlıca durumlar verilmektedir [33].

- a. Yağlayıcıdaki kir partiküllerinin varlığı sebebiyle yatağın yüzeyinde hareket yönünde ortaya çıkabilecek ciddi çizilmeler
- b. Yetersiz yağlama tasarımı sebebiyle ortaya çıkabilecek kavitasyon erozyonu
- c. Uygun olmayan malzeme seçimi nedeniyle ortaya çıkabilecek korozyon
- d. Kaymalı yatak ve yuva arasına istenmeyen partiküllerin sıkışması nedeniyle yatak sarma durumu.
- e. Doğru olmayan yağlama kanalı tekniğinden dolayı kanal kaybı

- f. Yetersiz yağlama veya aşırı yükten dolayı ortaya çıkabilecek aşırı ısınma sebebiyle yatak yüzeyinin ergimesi
- g. Merkez kaçıklığı veya balansı yapılmamış mil nedeniyle düzensiz aşınma
- h. Aşırı dinamik yükleme nedeniyle ortaya çıkan yorulma probleminden dolayı oluşabilecek çatlak veya çatlak ilerlemesi.

Yataklarda ortaya çıkabilecek bu hasar durumları veya başarısızlık hallerini en aza indirmek ve yatakların ömrünü uzatmak için öncelikle kaymalı yatakların çalışma ortam ve şartları (yük, hız, sıcaklık vb.) göz önünde bulundurularak en uygun yatak malzemesi seçimi yapılmalı ve optimum çalışma şartları belirlenmelidir.

2.1.3. Kaymalı yatak malzemeleri

Kaymalı yataklar çeşitli malzemelerden yapılmaktadırlar. Ancak, yatak malzemesi seçiminin esas amacı, düzgün çalışma ve uzun yatak ömrüne sahip bir yatak üretimi için olmalıdır. Uygun malzeme seçimi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, nihai uygulama önemli bir faktördür. Örneğin, bazı malzemeler düşük sıcaklık uygulamaları için uygunken bazıları da yüksek sıcaklık uygulamalarına da uygun olabilmektedirler. Bazı malzemeler ise, yüksek titreşim ile sert ve aşındırıcı ortamlar veya durumlar için iyi olabilir. Ayrıca, yatak malzemelerinin istenilen performansı beklenen düzeyde gösterebilmesi için kayma hızı ve taşınan yük gibi çalışma şartlarının ve işletim faktörlerinin tasarımcılar tarafından dikkate alınması gerekmektedir. Kuru ve sınır sürtünmenin söz konusu olduğu hallerde sürtünme direncinin oluşumunda hareketli yüzeylerin malzemelerinin (tribo-malzemelerin) özellikleri belirleyicidir [2]. Makine mühendisliği uygulamalarında çelik mile karşı çalışan yatak sistemlerinde mil ve yatak arasında meydana gelen sürtünmeyi düşürmek ve aşınmanın etkisini azaltmada alınacak tedbirlerin başında yatak malzemesinin doğru seçilmesi gelmektedir. Bu nedenle bir kaymalı yatak malzemesinden beklenen özellikleri bilerek yatak malzemesi tasarımı ve seçimi yapmak; yatak ömrü ve yatak hasarlarını en aza indirmek açısından fayda sağlamaktadır. Öte yandan, yağlayıcı maddelerinin kullanılacak olması tasarımcılara malzeme seçiminde daha fazla seçenek sunarken, kuru çalışan uygulamaları için de kendinden yağlamalı malzemeler seçmeleri gerekmektedir [34].

2.1.4. Seçim kriterleri

Kaymalı yatak malzemelerinin kendilerinden beklenen özellikleri yerine getirebilme kalitelerini değerlendirmede tasarımcıların göz önünde bulundurması gereken temel kriterler mevcuttur. Ancak, tüm bu kriterler açısından eşit derecede istenilen özelliklere sahip bir yatak malzemesi bulmak gerçekten zordur. Bu nedenle, uygun bir kayar yatak malzemesi seçimi tamamen yatağın nihai uygulamasına bağlıdır. Aynı zamanda bu durum istenilebilecek farklılık içeren karşıt kriterler arasında da bir uyum sağlamaktadır. Genel olarak, kaymalı yatak malzemelerini seçerken aşağıdaki temel kriterler kullanılmalıdır:

- a. Uyumluluk: Bir yatağın kayma ve çizilmeyi önleyebilme kabiliyetidir. Kendinden yağlamalı veya tam film yağlama ile çalışan yataklarda bazen sınır yağlama ya da yağlamasız çalışma şartlarının bir sonucu olarak, meydana gelen aşırı sürtünme ile bölgesel kaynama lekeleri oluşabilir. Bu bölgeselleşmiş kaynama lekeleri çizilmeye benzeyen yapışma arızasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, yatak malzemeleri, kuru çalışma koşullarında bölgesel kaynama ihtimaline karşı, mil malzemesi ve pürüzlülüğü dikkate alınarak seçilmelidirler.
- b. Uygunluk: Kaçıklık ve sapma gibi herhangi bir geometrik hatanın kendisine uyması için yatağın gösterdiği kabiliyettir. Genellikle, metalik alaşımlar arasında düşük elastiklik modülüne sahip yumuşak malzemeler, daha iyi uyum özellikleri sergilemektedir [35].
- c. Gömülebilirlik: Bir yatağın istenmeyen parçacıkları bünyesine gömebilmesinin ölçüsüdür. İstenmeyen parçacıklar; yağlayıcı kirlilikleri veya yatağın çalışması sırasında aşınma sonucu üretilen partiküller olabilir. Örneğin, babbittler (beyaz metaller) istenmeyen partikülleri gömülebilen yatak malzemelerinden biri olarak kabul edilmektedirler. Çünkü milin olası herhangi bir zarar görmesini, yumuşak yüzeylerine sert yabancı partikülleri gömebilmeleri sayesinde önleyebilmektedirler.
- d. Yük kapasitesi: Malzemenin aşırı sürtünme veya aşınma olmaksızın işletme şartları altındaki maksimum birim basıncıdır. Yatak tasarımı ve

yağlama maddelerinin varlığı yatağın yük kapasitesini değiştirebilir. Öte yandan, doğru yatak malzemesinin seçimi yatağın yük kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bronz yataklar iyi yükleme kapasitesine sahip yataklara örnektir.

- e. Fonksiyonellik: Yatağın sürtünme ve aşınmayı önleyen özelliğinin bir ölçüsüdür. Fonksiyonel bir yatak, çalışma esnasında aşınmaya uğramazken sürtünmeyi azaltabilen yataktır.
- f. Yorulma direnci: yatak malzemesinin, çevrimsel yüklerde sürekli yüklemeye uğraması sonucu, ilerleyen ve yapısal olarak hasara uğramaması için gerektiği gibi karşı koyabilme adına göstermiş olduğu kabiliyettir. Bu kabiliyet, uçak ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan yataklar için önemli bir özellik olarak kabul edilir. Bronz, gümüş ve alüminyum, beyaz metaller (babbitler) ile karşılaştırıldığında, yüksek sertlik ve mukavemetleri nedeniyle çevrimsel yüklere daha çok mukavemetlidirler.
- g. Korozyon direnci: korozyon, metal veya alaşımlarının oksitlenme veya farklı kimyasal etkilerle aşınma durumudur. Aşınmayı oluşturan bu kuvvet ise korozyon kuvvetidir. Korozyona karşı yatak öz direncinin ölçüsü de korozyon direncidir. Bazı yatak malzemeleri korozif ortamlara, yüksek sıcaklıklarda ve bazı yağlama yağlarına daha duyarlıdır. Örneğin, kurşun, kadmiyum, bakır, çinko ve alaşım yatakları, bazı yağlama ajanları tarafından korozyona uğramış olabilir. Ancak, kalay ilavesi yatakların korozyon direncini artırmaktadır.
- h. Genel maliyet faktörü: Yatakların tasarımında genel maliyet faktörü müşteriler açısından önemli bir husustur. Ancak, nihai yatak bileşiminde önemli rol oynayan genel maliyet faktörü, spesifik bir uygulama için tasarlanmış yatağa özgü bileşimin seçiminde tek başına değerlendirilmemelidir. Örneğin, uzay uygulamalarında, pahalı yatak malzemelerini kullanmak gerekebilir. Maliyetin önemli bir husus olduğu nihai yatağın maliyeti, düşük maliyetli altlık ve yüksek maliyetli kaplama kombinasyonu ile etkili bir çözüm bulunabilmektedir.

Yukarıda açıklanan tasarımcının yatak uygulamalarında göz önünde bulundurması gereken hususları dikkate alarak; bir kaymalı yatak malzemelerinden beklenen özellikler de şu şekilde sıralanabilir;

- a. Basma ve yorulma mukavemetinin yüksek olması
- b. Aşınmaya ve korozyona dayanıklı olması
- c. Yüksek ısı iletim katsayısı ve düşük genleşme katsayısına sahip olması
- d. Yağ ve dışarıdan gelen sert parçacıkları bünyesine alma kabiliyeti
- e. Kolay işlenebilirlik ve ekonomik olması

Ancak, burada sıralanan özelliklerin hepsini bir arada bulunduran yatak malzemesi yoktur. Bu özelliklerin çoğunu veya bir kaçına sahip yatak malzemeleri vardır.

2.1.5. Sınıflandırma

Kaymalı yataklar yapıldıkları malzemelere göre metal ve metal olmayan yatak malzemeler olarak ikiye ayrılırlar.

2.1.5.1. Metalik malzemeler

Kaymalı yataklar çoğunlukla metalik malzemelerin kullanılmasıyla imal edilmektedirler. Metalik yatak malzemelerin ana türleri; babbitletler, bakır alaşımları, alüminyum ve alaşımları, sinterlenmiş malzemeler, gümüş, kadmiyum ve çinko alaşımları olarak sınıflandırılmaktadır.

2.1.5.1.1. Babbitletler (Beyaz Metaller)

Beyaz metaller metalik yatak malzemelerinin en önemlilerindedir. Yumuşak metal matriks içinde sert bileşiklerin yer aldığı yumuşak metal alaşımlarıdır. Beyaz metallerin geleneksel bileşimi % 90 kalay ile % 10 bakır veya % 89 kalay ile % 7 antimon ve % 4 bakırdan oluşmaktadır. Beyaz madenin yapısı, yumuşak bir kalay kütlesi içinde dağılmış sert kristaller şeklindedir. Mil malzemesiyle uyumlu çalışma

özelliği ve yabancı partikülleri gömebilme yeteneğine sahiptir. Korozyon ve aşınmaya dayanıklı ve düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Ancak, düşük sertlik ve yorulma mukavemetine sahiptir [36].

2.1.5.1.2. Bakır alaşımları

Bakır esaslı yatak malzemelerinin ana matrislerini sert bakır oluşturur. Matris içine ilave edilmiş kalay (Sn), kurşun (Pb) gibi alaşım elementlerinin yumuşak kristalleri bakır içerisinde yayılmış durumdadır. Bakır esaslı alaşım malzemelerinden en çok kullanılan alaşım bronzdur. Bronzlar kolaylıkla işlenebilen, korozyona dayanıklı ve nispeten düşük sürtünme katsayısı ve düşük aşınma gösteren bir malzemedir. Kaldırma makinalarının, türbinlerin, pompaların ve takım tezgâhlarında bulunan yatakların malzemesi olarak kullanılmaktadır.

2.1.5.1.2.1. Bronzlar

Yatak malzemesi olarak en çok kullanılan bakır alaşımı bronzdur. Genellikle bronz kolay işlenebilen, korozyona iyi dayanıklılık gösteren, nispeten düşük sürtünme katsayısına sahip bir yatak malzemesidir. Bronz yataklar esas olarak, bakır ile % 5 - 20 oranında kalay (veya kurşun) ve çok az miktarda fosfor ihtiva etmektedir.

Kalay Bronzu: Bakır esaslı malzemelerde kalay, aşınmayı azaltan bir etkiye sahip olduğundan önemlidir. Bu yüzden, kalay içeren bakır esaslı kalay bronzları yüksek aşınma direncine sahip oldukları için yatak malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelere ilave edilecek kalay miktarı sürtünme ve aşınma özelliklerini iyileştirmektedir [37]. Yatak malzemesi olarak kalay bronzu, büyük ve darbeli yüklerde ve aynı zamanda korozyon tehlikesi olan yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygundur. % 90 Cu ve % 10 Sn içeren kalay bronzu yaygın olarak kullanılan en iyi yatak performansı gösteren malzemeler arasındadır [38]. Kalay bronzuna (% 5 - 14 Sn) az miktarda fosfor da ilave edilerek fosfor bronzu da elde edilmektedir. Genellikle büyük kuvvetler ve orta hızlar için kalay bronzu daha uygundur.

Kurşun Bronzu: Kurşun bronzları, darbeli yüklere ve yüksek sıcaklıklara karşı iyi bir dayanıklılık gösteren, sertliği 70 HB civarında olan ve (% 10 - 28 Pb, % 3 - 10 Sn) en yumuşak bronz türüdür. Bunlar aşınmaya çok dayanıklı değildirler. Ancak, (Tipik olarak, % 10 Pb, % 7 Sn, gerisi bakır) beyaz metale nazaran daha az aşınan yatak malzemeleri arasındadır. Bu malzeme özellikle, dizel motorlarının ana ve biyel yataklarında, buhar türbini yataklarında, takım tezgâhlarında, taşlama tezgahı ve taş mili yataklarında kullanılmaktadır. Çoğunlukla çelik zarf üzerinde 0,25 - 1 mm kalınlığında ince bir tabaka halinde bulunmaktadır. Kurşun-kalay bronzları (% 5 -14 Sn, % 3 - 25 Pb) daha serttir.

Alüminyum Bronzu: Yüksek mukavemet iyi aşınma, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık uygulamalarındaki iyi özelliklerinden dolayı iyi bilinen alaşımdır. Alüminyum bronz alaşımları kendi bileşimlerinde % 14 kadar alüminyum içerebilmektedir.

Manganez Bronzu: Bu bronzun mukavemet ve sertliği manganez elemanın ilavesi ile arttırılmaktadır. Bu alaşımlar ile yapılan yatakların yük kapasitesi basit bronz kayar yataklarla karşılaştırıldığından daha yüksektir.

Sinterlenmiş Bronz: gözenekli malzeme elde etmek için bronz tozlarının belirli basınç altında sıkıştırılarak üretilmiş ham numunelerin belirli sıcaklıkta sinterlenmesiyle üretilmektedir. Gözeneklere yağ, grafit ya da PTFE gibi yağlayıcı maddeler emprenye edilerek yağlanamayan koşullarda yağ haznesi olarak işlev görmektedir [39].

2.1.5.1.3. Alüminyum ve alüminyum alaşımları

Bronz ve babbıt alaşımlarına bir alternatif olarak sunulmuş, fakat yabancı partikülleri gömebilme ve yorulma direnci gibi kabiliyetinin zayıf olması nedeniyle bu alaşımların başarılı uygulamaları sınırlı kalmıştır. Alüminyum alaşımlarının tipik alaşım elementleri, bakır, çinko, magnezyum, silikon ve manganezdır. Alüminyum alaşımları korozyona karşı mükemmel direnç, iyi ısı iletkenliği ve düşük maliyetle

temin edilebilir. Çelik ile daha iyi uyumlu çalışabilmeleri için alüminyum alaşımlarına kalay ilave edilmiştir [40]. Yaygın olarak kullanılan alüminyum yatak malzemesi SAE 750, uyumluluğunu geliştirmek için % 6,5 kalay oranına sahiptir [41].

2.1.5.1.4. Sinterlenmiş malzemeler

Toz metal veya alaşımlarının kalıpta preslenerek ve belirli bir sıcaklıkta sinterlenmesiyle elde edilen malzemelerdir. Sinterleme sonucunda elde edilen gözenekli yapısı genellikle (% 90 Cu ve % 10 - 11 Sn içerir) yağlama amacıyla kullanılmaktadır. Yüksek basınç altında yağ/yağlayıcı (hacimlerinin % 20 - % 35'ine kadar) yağ emdirilmektedir. Çalışma esnasında sürtünmenin bir sonucu olarak oluşan sıcaklığın etkisiyle malzemenin parçacıkları genişir ve bunların arasında bulunan boşluklar küçülür. Böylelikle, boşluklarda bulunan yağ çalışma yüzeyine iletilerek kendi kendini yağlayabilme durumu söz konusu olmaktadır.

2.1.5.1.5. Gümüş

Mükemmel uyumluluk özelliklerine sahip olan (çizilme ve yapışma önleyici) % 3 – 5 Pb ihtiva eden gümüş yatakları, gümüşün yüksek maliyeti nedeniyle çelik destek üzerine 0,05 - 0,15 mm kalınlıkta kuvvetli bağ ile kaplanarak veya elektrolitik edilerek kullanılmaktadır. İnce bir katman halinde olan bu yatakların ergime sıcaklıklarının yüksek olması, özellikle büyük zorlanmalara maruz kalan uçak motorlarında tercih sebebidir [42].

2.1.5.1.6. Kadmiyum

Kadmiyum (Cd) yataklarının yüksek sıcaklıklarda çalışma kabiliyetine sahip olması değerini arttırmaktadır. Gümüş yataklarda olduğu gibi çelik altlıkla kuvvetli bağ yapabilmektedirler. Yüksek ergime sıcaklığı ve yorulma dayanımlarına sahip olmalarından dolayı da ağır yük altında çalışan sürtünmeli yataklarda kullanılmaktadırlar.

2.1.5.1.7. Çinko

% 85 - 88 Zn, % 4 - 10 Cu ve % 2 - 8 Al ihtiva eden bu yataklar çok sert olup mükemmel aşınma direnci sergilemektedirler. Ancak yüksek sürtünme katsayısına ve darbelere karşı dayanımları azdır. Sıvanma tehlikesine de müsait özelliktedirler.

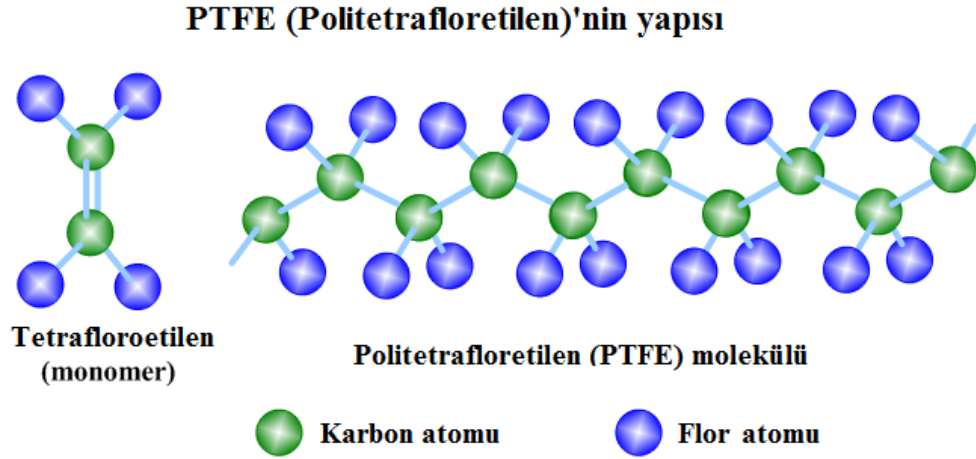
2.1.5.2. Metalik olmayan malzemeler

Metalik olmayan malzemelerin birçoğu kaymalı yatak uygulamalarında kullanılmaktadır. Grafit, molibden disülfür (MoS_2) ve PTFE, naylon (polyamid) gibi çeşitli türdeki polimerler en yaygın olarak kullanılan metalik olmayan kayar yatak malzemeleri arasındadır. Aynı zamanda, MoS_2 , PTFE, grafit gibi kendinden yağlayıcı özelliğe sahip malzemeler bakır esaslı malzemelere katkı olarak kullanıldığı gibi, epoxy gibi polimerlere cam fiber, karbon fiber gibi katkılarla birlikte ilave edilerek de kendini yağlamalı kompozit üretmek için kullanılmaktadır [43]. Bu metalik olmayan kendinden yağlamalı malzemelerin bir avantajı, genel olarak herhangi bir sıvı yağlama gerektirmez olmasıdır. Bununla birlikte, kendinden yağlama yatağın aşınma direnci ve anti sürtünme özelliği önemli ölçüde yağlayıcı maddelerinin uygulanmasıyla da daha iyi hale gelebilmektedir. Metalik olmayan bileşiklerin diğer bir avantajı da, konvansiyonel yağlar bu koşullarda son derece işlevsel değil iken çok düşük ya da yüksek sıcaklıklarda işlevsel kalabilmektedirler.

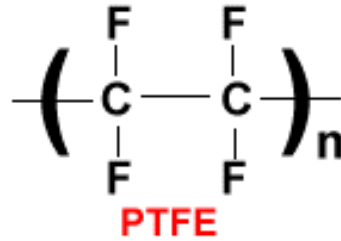
2.1.5.2.1. PTFE (Politetrafloretillen)

Politetrafloretillen (PTFE), yaygın olarak Teflon® adıyla bilinen DuPont firmasının tescilli ticari markası olan bir mühendislik polimeridir. 6 Nisan 1938 yılında, Dr. Roy J. Plunkett New Jersey'deki DuPont'un Jackson Laboratuvarı'nda çalıştıkları esnada sıkıştığı Tetrafloroetilen numunesinin polimerize olduğunu fark etti. Sonuç olarak PTFE denilen mumsu katı ve beyaz polimeri bulmuştu. PTFE'nin 1941 yılında patenti alınarak 1945 yılında DuPont tarafından Teflon markasıyla tescil edilmiştir [44].

Mükemmel kimyasal, termal, tribolojik ve elektriksel özelliklere sahip olan termoplastik floropolimerdir. Şekil 2.3’de gösterildiği gibi PTFE’nin yapısı, florlanmış karbonların düz ve uzun zincirlerinden oluşmaktadır. Politetrafloroetilen benzersiz özellikleri, simetrik flor atomu ile çevrili karbon atomlu omurgaya bağlı bulunmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.3. PTFE’ nin yapısı [44].



Şekil 2.4. PTFE (Politetrafloroetilen) monomeri.

2.1.5.2.1.1. PTFE malzemelerinin türleri

PTFE üç farklı formda mevcuttur. Her bir form uç ürüne bazı özel özellikleri vermek ve belirli bir üretim tekniği için daha uygundur olabilir. Bu formlar vardır [45].

Granül reçineler: Sıkıştırma kalıplama veya ekstrüzyon imalat tekniklerinde kullanılan beyaz granül toz yapısındadır. Sıkıştırma kalıplama tekniğinde, oda sıcaklığında sıkıştırma kalıplamanın ardından sinterlenerek normal olarak işlenmesidir. Bu maddeler, yapışkan olmayan ve daha düşük sıcaklıklarda iyi

derecede tokluğa sahiptir. Bu reçinelerin en yüksek işletme sıcaklığı 260 ° C'dir. PTFE granül reçineler, yüksek frekans ve yüksek sıcaklık kabloları için izolatörlerini ve mekanik contalar ve yataklar, contalar, yapışmaz yüzeyler elde etmek için kullanılmaktadır.

İnce tozlar: hazırlanan beyaz pürüzsüz tozlar, özellikle ince kesitleri imal etmek için ekstrüzyon tekniği ile işlenmesi için hazırlanmaktadır. Bu tozlar, granül reçineler ile aynı özellikleri sunmaktadır. Elektrik izolasyonları, exrüde hortum ve boru kaplamaları, PTFE ince tozlar kullanılarak imal edilebilir ürünler arasındadır.

Sulu dispersiyon: PTFE sıvı bazlı bir emülsiyon ve bir ıslatma ajanıdır. PTFE sulu dispersiyonun uygulaması, metal kaplama ya da gözenekli yapılara emdirmeyi kapsar. Sıvı bir madde olarak kullanılması uygulama kolaylığı sağlamaktayken PTFE sulu dispersiyon özellikleri, granül haldeki reçineler ile elde edilenlere özdeştir.

2.1.5.2.1.2. PTFE'nin özellikleri

PTFE mükemmel özelliklere sahip bir polimerdir. PTFE'nin üstün özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

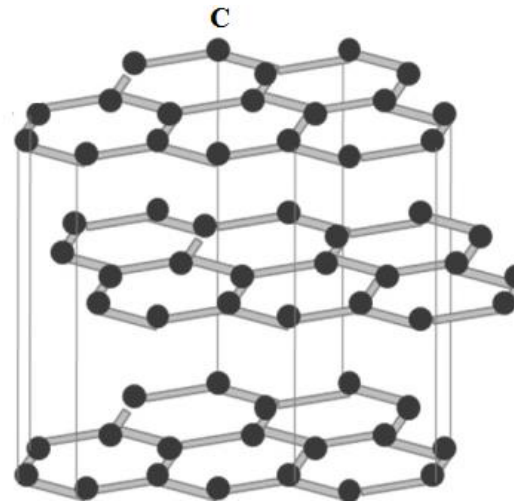
- a. Düşük sürtünme katsayısı ile son derece kaygan yüzey
- b. İyi gerilim çatlağı direnci
- c. Yüksek sıkıştırılabilirlik
- d. Olağanüstü yapışmaz özellikleri
- e. Üstün termal stabilite
- f. Mükemmel ısı yalıtımı
- g. İyi kimyasal kararlılık
- h. Üstün korozyon direnci
- i. İyi nem direnci
- j. Önemli yanmazlık

PTFE, kaymalı yatak için gerekli kriterleri üzerinde barındıran üstün bir kayar yatak malzemesi olarak kabul edilmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık kabiliyeti, üstün

termal stabilite, belirli yük ve düşük hızlarda gösterdiği düşük sürtünme katsayısı PTFE'yi kaymalı yatak uygulamaları için tercih edilen bir polimer haline getirmektedir. Aynı zamanda, tam film yağlamanın elde edilemediği ve sıvı yağlayıcı kullanımının arzu edilmediği veya mümkün olmadığı durumlarda kendinden yağlamalı bir polimer olarak tercih edilmektedir [46]. PTFE'nin tribolojik özelliklerini katkı sağlamak ve geliştirmek için bazı ilave malzemelerle (grafit, karbon, bronz, cam fiber, MoS₂) birlikte kullanılmaktadır [47]. Sonuç olarak, geniş bir çalışma sıcaklık aralığı (- 250 ila + 240 ° C arasında) Teflon®'nun yağlayıcının bulunmadığında bile yüksek sıcaklık stabilitesine sahip olduğunu göstermektedir.

2.1.5.2.2. Grafit

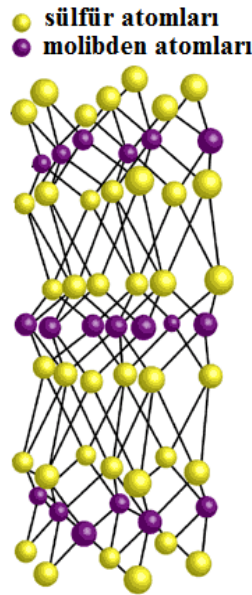
Grafit % 99 saf karbon ihtiva eden bir maddedir. Karbon elementinin hekzagonal kristal yapıya sahip allotropudur. Kristal şekli düz, levhamsı kristal şeklinde ve altıgen dizide düzenlenmiş karbon atomlarından oluşmaktadır. Şekil 2.5'de grafitin kristal yapısı görülen grafiti, birbirlerine kovalent bağlarla bağlanan karbon "C" atomlarının levhamsı düzlemler oluşturur. Yumuşak, kaygan ve kâğıt üzerinde iz bırakan, siyah renkli bir katı yağlayıcı maddedir. Bu nedenle, grafit, yağlayıcı olarak makinelerde, birbiriyle temas halinde çalışan parçaların sürtünme ve aşınmasını azaltmak ya da engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Grafit, mükemmel bir katı yağlayıcıdır ve aynı zamanda PTFE kompozitlerin ısı iletkenliği geliştirmek için de kullanılmıştır.



Şekil 2.5. Grafitin kristal yapısı [48].

2.1.5.2.3. Molibden disülfür (MoS₂)

MoS₂ granit içinde ince katı damarlar şeklinde doğal olarak oluşmaktadır. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi MoS₂, hexagonal kristal bir yapıya sahiptir. Katmanlar arasındaki etkileşim, kaplanmış bir zemine benzer kayar bir etki sağlamaktadır. Böylelikle; toplam yüzey direnci azalmakta ve birçok etkileşim yüzeyleri arasındaki yüzey sürtünme ve direnci azalmaktadır. MoS₂ özellikle yüksek sıcaklıklarda iki sürtünme yüzeyleri arasında iyi bir yağlayıcıdır ve aşınmayı ve sürtünme katsayısını azaltmaya yardımcı olmaktadır. MoS₂ kaplama kuru film yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. MoS₂ kaplamalar yük taşıma kapasitesi, çalışma sıcaklığı ve sürtünme katsayısının önemli olduğu uygulamalar olan uzay ve havacılık sistemlerinde kullanılmaktadırlar [49].



Şekil 2.6. MoS₂' nin kristal yapısı [49].

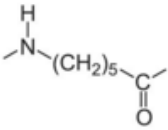
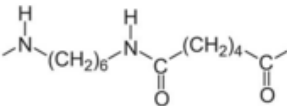
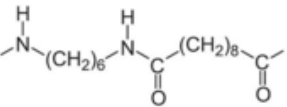
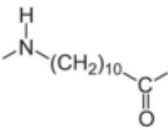
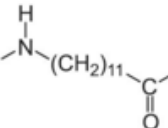
2.1.5.2.4. Poliamid (PA)

Poliamidler yinelenen amit, -CO-NH-, bağlantıları içeren polimerlerdir (Şekil 2.7). Doğal yollarla (proteinler, yün, ipek) oluşabildikleri gibi, suni metotlarla da (nylon, kevlar, sodyum (poli)aspartat) yapılabilmektedirler. Esnek, rijit ve kaygan yüzey, iyi

mekanik ve ısı dayanım ile yüksek enerjili radyasyona (Gamma, X-Ray) dayanıma sahiptirler. Ancak, kimyasal dayanımları çok kuvvetli değildir ve bünyesine su ve nem alma oranı oldukça yüksektir. Bu nedenle boyutsal ölçü değişimine uğramaktadırlar ve hassas toleranslarda dikkat edilmesi gerekmektedir. Nem emilimi nedeniyle anlık darbe ve titreşimlere karşı dayanım kazanarak dinamik gerilmeleri bünyelerinde dağıtabilmektedirler. Şekil 2.8’de PA’nın yapısında görüldüğü gibi, içerdikleri karbon sayılarına göre Nylon 6, Nylon 6.6, Nylon 6.10 ve Nylon 8 olarak adlandırılmaktadırlar.



Şekil 2.7. PA’nın monomeri [50].

Polyamide (nylon)	Repeating unit
6	
6,6	
6,10	
11	
12	

Şekil 2.8. PA’nın yapısı [50].

2.2. Sürtünme ve Aşınma

2.2.1. Giriş

Mil ve yatak arasında meydana gelen sürtünmenin etkisini azaltmak için alınacak tedbirlerden biri de yağlama ve yatak malzemesinin doğru seçilmesidir. Yağlama, bağıl hareket içinde ve temas halinde olan iki yüzey arasındaki sürtünmeyi en aza indirmek için yapılır. Cisimlerin yüzeyleri asla mükemmel derecede pürüzsüz olmadıkları bilinmektedir. Çok hassas işlenmiş düzgün bir yüzeye dahi mikroskop altında bakıldığında, hassa bir dokunmayla bile tespit edilemeyen yüzey pürüzlülüğü ve düzensizlik tespit edilmektedir. Bu nedenle, katı bir yüzey mikroskobik olarak düzgün olmadığından sürtünme meydana gelmektedir. Bir başka deyişle, en hassas işlenmiş yüzeylerde bile yüzey pürüzlülüğü olarak adlandırılan pikler ve çukurlar mevcuttur. İki yüzey temas ettiğinde de gerçek temas yüzeyleri, inceden çıkıntı yapan yüzeyin en üst noktaları olan piklerdir. Bu temas noktaları, normal yükü desteklemesiyle de plastik olarak deforme olmakta ve soğuk birleşmeyi gerçekleştirmiş olmaktadır. Normal yükün büyüklüğüne bağlı olarak, daha çok yüksek noktalar veya pikler temas eder ve temas yüzeylerinin gerçek alanı, temastaki yüzeylerin geometrik alanı olan görünür alanın aksine artmaktadır. Bu olguya adezyon (yapışma) denir. Sürtünmeye bu yapışma neden olmaktadır. Örneğin, Bir blok aynı ya da farklı bir malzemedan yapılmış düz bir yüzey üzerine yerleştirilirse inceden çıkıntı yapan parçacıkların birbirine belirli bir derecede kilitlenmesi (kaynaklanması) gerçekleşir. Bu durum hareket veya hareket eğilimi olmadığı sürece bir kuvvete yol açmaz. Fakat blokun hareket etmesi veya temas ettiği yüzeye göre teğet olarak hareket etme eğilimine girdiğinde, çıkıntı yapan parçacıkların yapışma özelliği, hareket etmesine karşı çıkmaktadır. Üst blokun hareketinin ters yönünde hareket eden bu karşıt kuvvet, sürtünme ya da sürtünme kuvveti olarak adlandırılır [51]. Böylece, bir makinedeki her bir mafsalda, iki parça arasındaki bağıl hareket nedeniyle sürtünme kuvveti artar ve bir miktar enerji sürtünme direnci sebebiyle israf edilmektedir. Sürtünme, istenmeyen bir durum olarak kabul edilse de, hem doğada ve hem de mühendislikte önemli bir rol oynar. Örneğin; yolda yürürken, raylar

üzerindeki lokomotifin hareketi, kayış ve dişliler vasıtasıyla güç iletimi, araçları hareket ettirmek için, tekerlekler ve yol arasında sürtünme gereklidir.

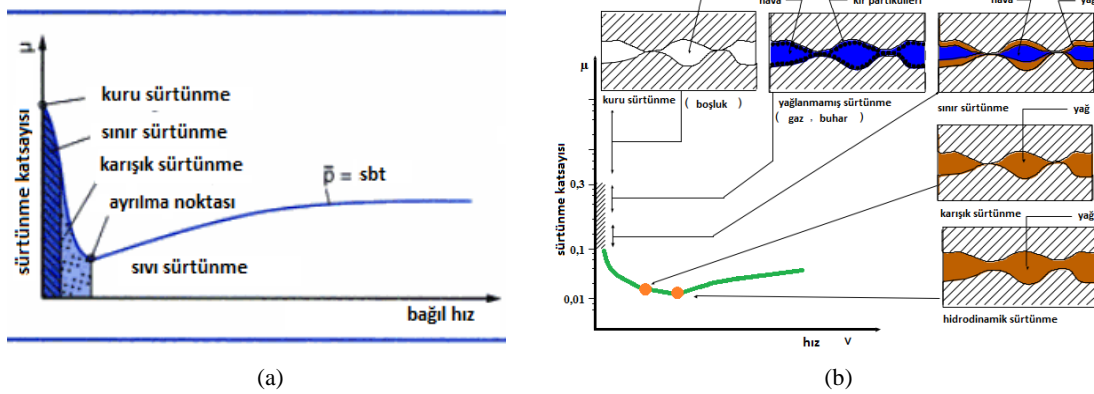
Sürtünme, aşınma ve yağlama konularını inceleyen bilim dalına triboloji denir. Triboloji, makine elemanı çiftlerinin çalışma yüzeyleri arasındaki bağıl hareket sonucu ortaya çıkan sürtünme, aşınma ve yağlama problemlerinin bilimsel olarak inceleyerek daha somut verilerle bu problemlerin çözümü için iyileştirme çalışmaları gerçekleştirir. Tribolojik sistemde, karşılıklı etkileşim halindeki sürtünme çifti, ara yağlayıcı madde, hız, kuvvet (yük), ısı etkenler ve çevre şartları vb. gibi çalışma şartları dikkate alınır ve bu etkiler sonucu ortaya çıkan aşınma olayı incelemektedir [52].

2.2.2. Sürtünme

Sürtünme, yukarıda da ayrıntılı açıklandığı üzere, kısaca birbirleri ile temas halindeki iki yüzey arasındaki harekete karşı oluşan direnç olarak tanımlanabilir. Yani, temasta olan ve izafi hareket yapan iki elemanın, temas halindeki yüzeylerinin hareket veya hareket edebilmelerine karşın gösterdikleri dirence “sürtünme” denir. Buna göre birbirleriyle temas halinde olan hareketli parçaların yüzeyleri arasında kinematik bakımdan sürtünme; “kayma”, “yuvarlanma” veya “kayma - yuvarlanma” şeklinde gerçekleşmektedir. Kaymalı yataklar kayma sürtünmesi prensibine göre görevlerini yerine getirirler.

Makinelerde sürtünmenin ortaya çıkması arzu edilen bir durum değildir. Bu durum, aşınma, ısı artışıyla birlikte ekipmanın verimliliğinin azalarak ömrünün kısalmasına neden olmaktadır. Sürtünmeyi azaltmada yağlama işlemi önemli bir faktördür. İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı maddenin bulunma durumuna göre sürtünme Şekil 2.9’da görülmektedir. Bunlar;

- a. Kuru sürtünme
- b. Sınır sürtünme (yarı sıvı sürtünme)
- c. Sıvı sürtünme



Şekil 2.9. Stribeck diyagramı, a) sürtünme alanları b) yağlama durumları [53].

2.2.3. Sürtünme çeşitleri

Sürtünme genel olarak iki tipe sınıflandırılabilir. Bunlar, kayma sürtünmesi veya yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olabilen katı sürtünme ve sıvı sürtünmedir. Kayma sürtünmesi, piston ve silindir arasında veya düz yataklarda olduğu gibi, iki yüzeyin yağlama olmadan birbirleri üzerinde kayabildiklerinde oluşmaktadır. Yuvarlanma sürtünmesi ise, bilyalı veya makaralı rulmanlarda olduğu gibi silindirik veya küresel cisimlerin yağlama olmadan başka bir yüzey üzerinde yuvarlandıklarında ortaya çıkmaktadır. Katı sürtünme ile sıvı sürtünme karşılaştırıldığında, aynı iki yüzey arasına yağ filmi ilave edilirse, malzeme yüzeyindeki pikler ve çukurlar yağ partikülleri ile dolmaktadır. İki yüzey arası yeterli miktarda yağ partikülleri ile doldurulduğunda ise, pikler ve çukurların içinde gömüleceği kalın ve güçlü bir yağ filmi oluşacaktır. Böylelikle, çalışma yüzeyleri birbirlerine temas etmeksizin ayrılarak kayabilmektedirler. Yüzeyler, yağ filmi vasıtasıyla ayrı tutulduğunda sıvı sürtünmesi söz konusu olacağından çalışma yüzeyleri de aynı zamanda yağlanmış olmakta ve sürtünmeyi minimuma indirmektedir. Tablo 2.1’de bu farklı sürtünme durumlarına ait sürtünme aralıkları verilmiştir [54].

Tablo 2.1. Farklı sürtünme durumlarında sürtünme katsayı aralıkları

Sürtünme türü	Sürtünme katsayısı
Kuru sürtünme	$> 0,3$
Sınır sürtünme	$= 0,1 - 0,3$
Karışık sürtünme	$= 0,01 - 0,1$
Sıvı sürtünme	$= 0,001 - 0,01$

Birbirleri ile temas halinde hareket yapan yüzeyler arasında yağlayıcı maddenin bulunma durumuna göre sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı sürtünme olmak üzere üç halde incelenmektedir. Şekil 2.10'da yağlayıcı maddenin bulunma durumuna göre sürtünme halleri gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Yağlayıcı maddenin bulunma durumuna göre sürtünme halleri, a) kuru sürtünme b) sınır sürtünme c) sıvı sürtünme [55].

2.2.3.1. Kuru sürtünme

Temas halindeki ve yağsız iki kuru yüzey arasında oluşan sürtünme, kuru veya katı sürtünme olarak bilinmektedir. Bu durum yüzey pürüzlülüğü kaynaklanmaktadır. Kuru ya da katı sürtünme, yukarıda ele alındığı gibi kayar sürtünme ve yuvarlanma sürtünmesini de kapsar. Birbirleriyle izafi hareket halinde olan bu iki parça temas yüzeylerindeki pürüzlere temas ederek kayar. Yüzey pürüzlülüğünün yüksekliği yağlama bölgesinde sürtünmenin artışına sebep olduğu gösterilmiştir [56].

Kuru sürtünmeli yüzeyler arasında bir ara malzeme veya yağlayıcı olmadığından, Coulomb kanunu esas alınırsa izafi hareket yapan ve normal kuvveti etkisinde bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete ters olan ve $F_s = \mu \cdot F_n$ şeklinde tanımlanan bir sürtünme kuvvetinin oluştuğu görülmektedir.

Sürtünme Amountons tarafından iki yasa ile açıklanmıştır.

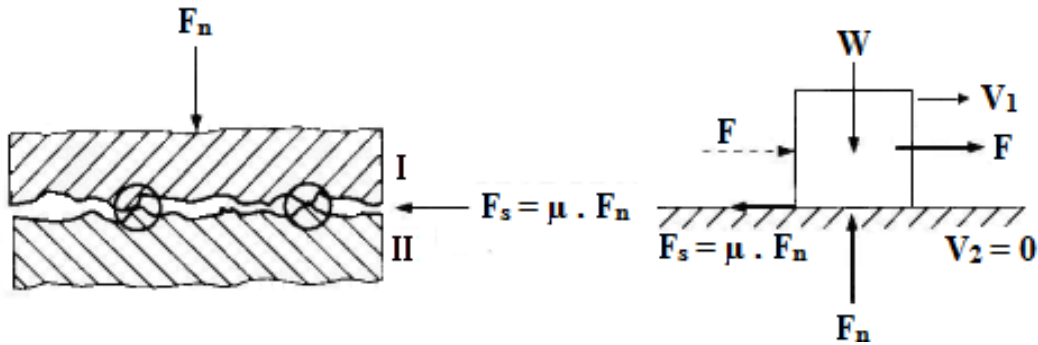
- Sürtünme kuvveti normal yükler ile orantılıdır.
- Sürtünme cisimlerin boyutundan bağımsızdır.

Şekil 2.11’de gösterildiği gibi kuru sürtünme, birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya temasta olan iki yüzey arasında oluşacağından, bu iki yüzey F_n normal kuvvetinin etkisi altında ise temas yüzeyleri arasında harekete karşı;

$$F_s = \mu \cdot F_n \quad (2.1)$$

değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur. Burada μ sürtünme katsayısıdır. Şekil 2.11’deki blok cisme F kuvveti uygulanırsa iki durum ortaya çıkmaktadır.

- $F_s > F$ durumunda cisimler birbiri üzerinde kaymaz. Ancak hareket ihtimali olacağından yüzeyler arasında “statik sürtünme” direnci meydana gelmektedir.
- $F_s \leq F$ durumunda ise “kinematik sürtünme” durumu ortaya çıkmaktadır. Yani F kuvvetinin etkisiyle yüzeyler birbiri üzerinde kaymaktadır.



Şekil 2.11. Kuru sürtünme modeli [52].

Uygulamada sürtünmeye örnek verilebilecek durum olan kinematik sürtünme halinde, aşınma, sıcaklık artışı ve enerji kaybı ortaya çıkmaktadır.

F_n [N] kuvveti uygulanan cismin hızı v [m/s] ise sürtünme sonucu kaybolan güç;

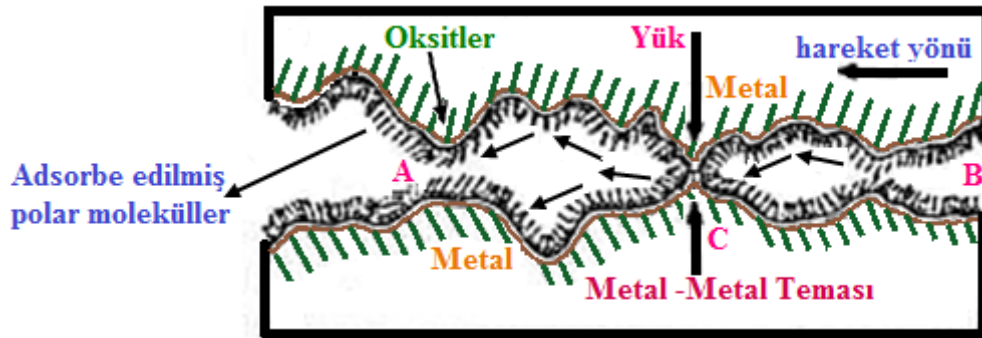
$$P = \mu \cdot F_n \cdot v \quad [\text{Nm/sn} = \text{Watt}] \quad (2.2)$$

olmaktadır. Buna göre sürtünme nedeniyle meydana gelen güç kaybını azaltmak için sürtünme katsayısının değerini küçültebilmek gerekmektedir. Yüzeylerin sürtünme katsayılarını küçültebilmek için şu işlemler uygulanabilir.

- Yüzeylerin hassas işlenerek yüzey pürüzlülüklerinin optimum seviyeye getirilmesi
- Çalışan malzeme yüzeylerinin düşük sürtünme katsayısına veya kendinden yağlamalı özelliğine sahip kompozit bir yapıdan imal edilmesi
- Yüzeyler arasındaki sürtünmeyi elimine edecek, yüzeylere kendinden yağlama özelliği kazandıracak kendinden yağlamalı bir katı yağlayıcıyla kaplanması veya malzemenin gözeneklerine emdirilmesi
- Yüzeylerin birbirinden ayırarak temasını kesebilen yağ filmi oluşturan bir yağlayıcı eklenmesi
- Yüzeyler arasında yuvarlanma sürtünmesi açığa çıkaracak yuvarlanma elemanları konularak sağlanabilir.

2.2.3.2. Sınır sürtünme

Yüzeyler arasında yağlayıcı bulunmasına rağmen sıvı sürtünme oluşturmak için yeterli olmadığı durumlarda, sınır sürtünmesi söz konusudur (Şekil 2.12). Yağlayıcı yüzeyler arasında tam yağ filmi oluşturamadığından temas yüzeylerinin yüzey pürüzlülüklerine ait çıkıntıları birbirlerine teması ve sürtünmesi söz konusudur [57].



Şekil 2.12. Sınır sürtünmesi [57].

2.2.3.3. Sıvı sürtünme

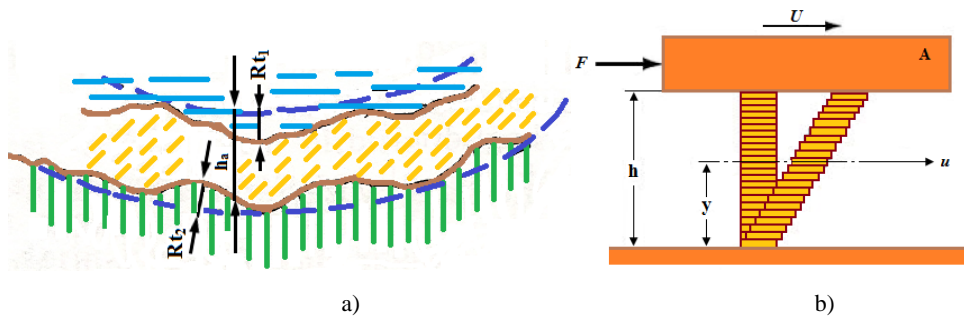
Sıvı sürtünme, birbirleriyle izafi hareket halinde olan iki katı cismin çalışma yüzeylerindeki yüzey pürüzlerinin teması önleyecek ve birbirinden ayırarak şekilde, yağlayıcının tam bir yağ filmi oluşturduğu durumdur (Şekil 2.13). Bu çalışma

durumunda sürtünme, doğrudan doğruya yağlayıcı sıvının tabakaları arasında oluşmaktadır. Cismin hareketine karşı koyan bu direnç kuvveti yağ tabakaları arasındaki kayma gerilmesine bağlıdır. Metal yüzeyler arasındaki yağ tabakasında oluşan basınç dış kuvveti dengeleyecek bir değere ulaştığında yüzeyler birbirinden tamamen ayrılmaktadır. Yağlama hesaplarında sıvı sürtünmede muylunun yatak zarfına temasına imkân vermeyen bu yağ filminin kalınlığı tespit edilmeye çalışılmaktadır. Yüzeylerin pürüzlülüğü göz önüne alınırsa, analitik bakımdan sıvı sürtünmesi;

$$h_0 > (R_{t1} + R_{t2}) \quad (2.3)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada; h_0 ; minimum yağ tabakası kalınlığı ve R_{t1} ve R_{t2} ise yağın yüzeylerine çıkan maksimum yüzey pürüzlülükleridir.

Metal yüzeyleri ile doğrudan doğruya temasta olan yağ tabakalarının adsorbsiyon dolayısıyla her iki yüzey boyunca tamamıyla yapışabilmektedir. Örneğin, Şekil 2.13-b’de verilen şematik resimden de anlaşılacağı üzere, U hızıyla hareket eden yüzeye yapışmış olan tabakanın hızı “ u ”; sabit yüzey üzerindeki tabakanın hızı ise sıfırdır. Ara tabakalarının hızı y mesafesine bağlı olarak “ u ” ile sıfır arasında değişmektedir.



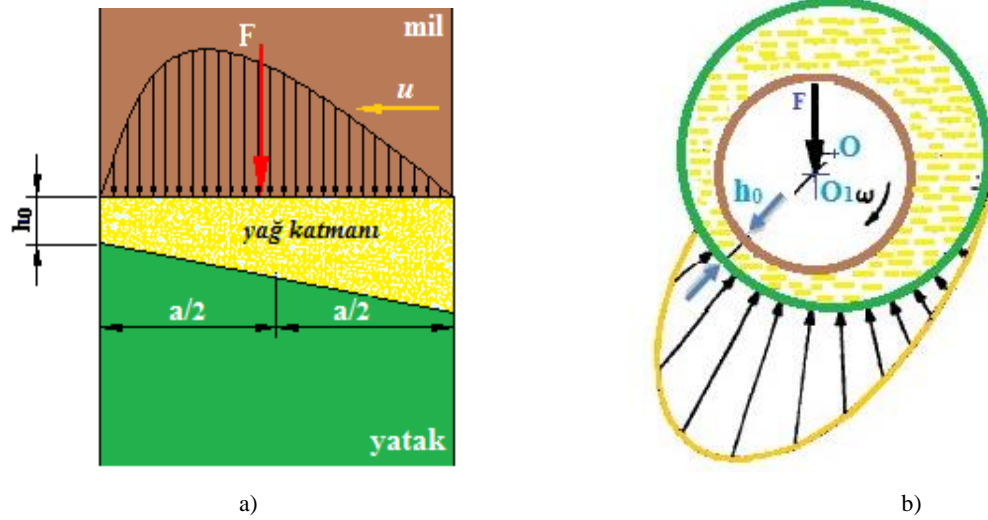
Şekil 2.13. Sıvı sürtünmesi, a) Yağlayıcı tabaka, b) Tabakalar arası hızlar [52].

Sıvı sürtünme halinde esasında sürtünme, birbirlerinin yüzeylerinde kayan yağ katmanlarının aralarında oluşan temas yüzeylerinde oluşmaktadır. Bu sebeple sıvı sürtünme bu katmanlar arasındaki kayma gerilmelerine bağlıdır. Sıvı sürtünmenin oluşmasında rol oynayan esas etken yağ tabakasında meydana gelen basınçtır. Yağ

tabakasındaki basınç dış yükü dengeleyecek bir değere ulaştığı takdirde yüzeyler tamamen birbirinden ayrılır. Yağ tabakasındaki basınç oluşumu; hidrodinamik ve hidrostatik olmak üzere iki olaya bağlıdır [52].

2.2.3.3.1. Hidrodinamik sıvı sürtünme

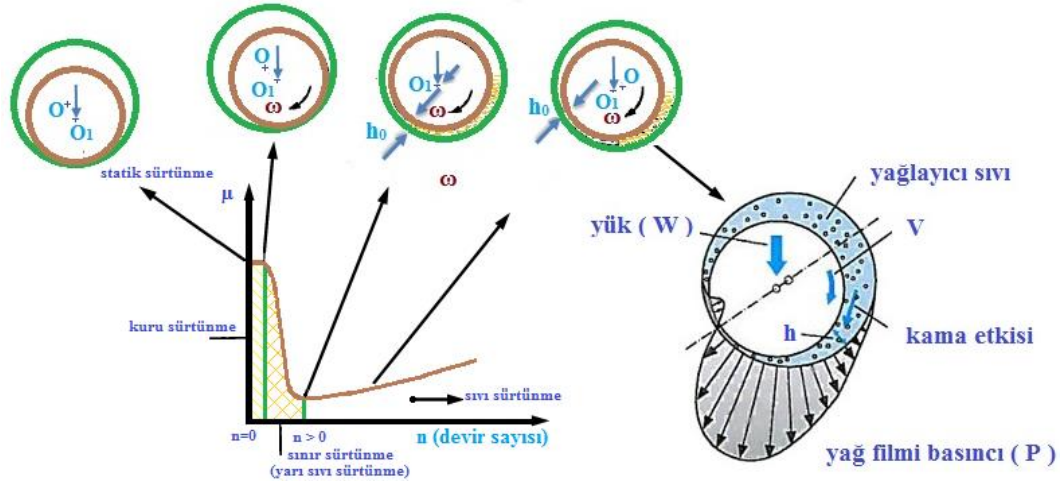
Hidrodinamik sıvı sürtünmede, yüzeylerin geometrik ve kinematik şartlarına bağlı olarak yağ tabakasındaki kendiliğinden bir basınç alanı oluşmaktadır. Basıncılı bir yağ filminin oluşmasında kinematik ve geometrik şartların, yüzeylerin birbirine göre belirli bir bağıl hıza sahip olması ve yağ tabakasının hareket yönünde daralmasına bağlıdır. Uygulamalarda bu iki şart, eğik düzlemsel yüzeylerde aksel yataklarda (Şekil 2.14-a) ve birbirine göre eksantrik durumda olan silindirik yüzeylerde radyal yataklarda (Şekil 2.14-b) gerçekleşmektedir [58].



Şekil 2.14. Hidrodinamik sıvı sürtünme, a) Aksel yatak, b) Radyal yatak

Hidrodinamik sıvı sürtünme kinematik ve dinamik şartlara bağlı olduğundan uygulama alanı sınırlıdır. Genellikle bu sürtünme hali, izafi hareketin sürekli olduğu ve yağ tabakasının hareket yönünde daralan bir yağ kaması oluşturduğu takdirde çok kısa süreli gerçekleşebilir. Ancak bu sürtünme hali sürekli olmamaktadır. Şekil 2.15'de görüldüğü gibi hidrodinamik sıvı sürtünmesi bölgesinde çalışan sistemlerde, milin durma noktası ve sistemin ilk çalışmaya başladığı zaman diliminde yağ filmi oluşmaz. Kuru ve sınır sürtünmesi hallerinde ise yağ filmi tam olarak oluşamaz veya

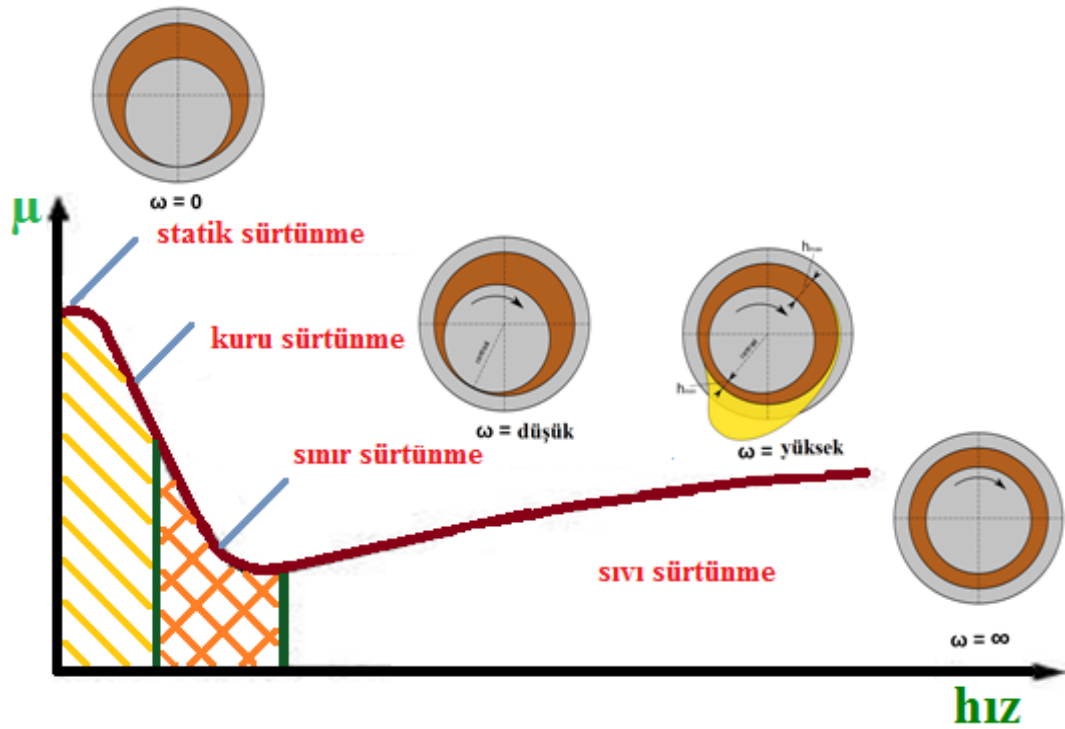
yağ filmi tam olarak oluşmadığından dolayı yağ filminde yırtılmalar meydana gelebilir. Bu durumlarda de aşınmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle hidrodinamik sıvı sürtünmesinde de sistemlerin aşınması tamamen önlenememektedir [57].



Şekil 2.15. Hidrodinamik sıvı sürtünme halleri [57].

2.2.3.3.2. Hidrostatik sıvı sürtünme

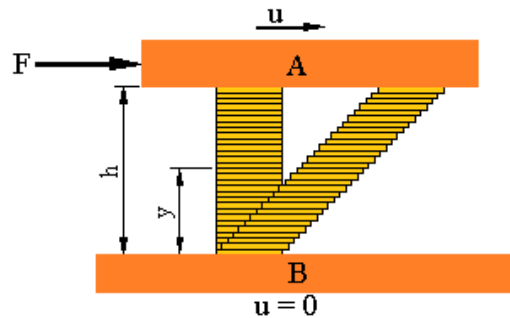
Hidrostatik sıvı sürtünme halinde, dış yükün dengelenmesi ve yüzeylerin birbirinden ayrılması için gereken basınçlı yağlayıcının, dışarıdan yüksek basınçlı bir pompa vasıtasıyla yüzeyler arasına gönderilmesi sağlanmaktadır. Böylelikle istenilen sistemlerde, yüzeylerin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı olmaksızın sıvı sürtünme sağlanmaktadır. Yani hidrostatik sıvı sürtünme hareketsiz yüzeylerde de oluşturulabilmektedir. Hidrostatik sıvı sürtünme halinde dışarıdan pompa yardımıyla yağlayıcı basınçlı olarak gönderildiği için yağlama durumunda aşınma da yoktur. Şekil 2.16'da iki yüzey arasındaki izafi harekete göre sürtünme durumları, geçiş bölgeleri ve sürtünme katsayısının hız ile değişimini vermektedir.



Şekil 2.16. Stribeck sürtünme eğrisi üzerindeki sürtünme halleri ve geçiş bölgeleri

2.2.4. Viskozite

Viskozite, akışkanın harekete karşı gösterdiği direnç veya akma sırasında sıvı tabakaları arasındaki iç sürtünmeyi ifade eden bir özellik olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.17’de görüldüğü gibi birbirine paralel olarak çalışan bir sürtünme çiftine ait A ve B yüzeyleri, h kalınlığındaki yağ filmi vasıtasıyla temas yüzeyleri birbirinden ayrılmaktadır. A tablası u hızı ile hareket etmekte iken, B tablası ise sabit hızda durmaktadır. Sisteme Newton’un viskoz akışkanlarla ilgili kanunu uygulanarak viskoziteyi veren bir bağıntı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.17. Sürtünme çiftinin yağ film katmanı [52]

Yağ filminin yatay katmanlardan oluştuğunu ve **F** kuvvetinin bu katmanlara uyguladığı kuvvet vasıtasıyla birbirlerinin yüzeyinde kaydırmaya çalışmaktadır. Sisteme ait A ve B parçalarının doğrudan temasta olan çalışma yüzeylerinin yağ katmanlarına, absorpsiyon nedeniyle yapıştığı düşünülmüştür. Burada, **u** hızı ile hareket eden A yüzeyindeki yağ katmanının hızı **u**, B yüzeyindeki yağ katmanının hızı sıfır ara katmanların hızı ise sabit yüzeyden olan **y** uzaklığına bağlı olarak sıfır ile **u** hızı arasında değişmektedir. Newton kanununa göre de akışkan filminin herhangi bir noktasındaki kayma gerilmesi **y noktasına** göre hızdaki değişim miktarı ile orantılıdır. Bu sebeple;

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{du}{dy} \quad (2.4)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada; η orantı sabiti olup dinamik viskoziteyi, $\frac{du}{dy}$ ise hızın **y** mesafesine göre değişimini, hız gradyanı veya kayma oranını ifade etmektedir. Burada η yağın viskozitesi, du/dy ise **y** mesafesine göre hız değişimi (gradyanı) veya kayma oranıdır. Kayma gerilmelerine bağlı olarak sürtünme kuvveti olarak yazılmaktadır [59]. Viskozite (η) akışkanın iç sürtünme direncinin bir ölçüsüdür. Hız yağ filminin kalınlığıyla doğru orantılı olarak değişeceğinden;

$$\frac{du}{dy} = \frac{u}{h} \quad (2.5)$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{u}{h} \quad (2.6)$$

ifadesi elde edilmektedir. Boyut analizi yapıldığında viskozitenin;

$$\eta = \frac{F.t}{L^2} = \frac{(\text{kuvvet}).(\text{zaman})}{(\text{uzunluk})^2} \quad (2.7)$$

boyutunda olduğu görülmektedir [59].

Dinamik viskozite, Poise (P) veya bunun yüzde biri olan Centipoise (cP) ile ölçülmektedir. Buradan yola çıkılara;

$$\eta = \frac{F.h}{A.u} = \frac{[N.].[m.]}{[m^2].[m/s]} = [Pa.s] = 10 [Poise] = 10^3 [cP] = 145 [\mu\text{reyn}] \quad (2.8)$$

İngiliz-Amerikan sisteminde ise dinamik viskozitenin birimi;

$$\eta = \frac{[\text{Pound}].[s.]}{[\text{inch}^2]} = 1 [\text{reyn}] = 10^6 [\mu\text{reyn}] \quad (2.9)$$

Kinematik viskozite (ν) de ise;

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\eta.g}{\gamma} \quad (2.10)$$

olarak ifade edilmektedir. η dinamik viskozite, ρ kütle yoğunluğu, g yerçekimi ivmesi ve γ özgül ağırlık olarak verilmiştir.

Kütle yoğunluğu ile özgül ağırlık arasında;

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (2.11)$$

bağıntısı vardır.

Kinematik viskozitenin boyutu $\left(\frac{\text{uzunluk}^2}{\text{zaman}} \right)$ 'dır ve Stokes (St) veya bunun yüzde biri olan Centistokes (cSt) ile ölçülmektedir.

$$\nu = \frac{[cm^2]}{[s]} = [St.] = 100 [cSt.] = \frac{1}{929} [ft^2 / s.] \quad (2.12)$$

Almanya’da kinematik viskozite Engler derecesi ile gösterilir ve aşağıdaki esasa göre tayin edilmektedir.

$$E^{\circ} = \frac{100 \text{ cm}^3 \text{ yağ akma zamanı}}{100 \text{ cm}^3 \text{ suyun } 20^{\circ} \text{ C de akma zamanı}} \quad (2.13)$$

Buna göre Engler derecesi ile dinamik viskozite arasında

$$\eta = \left(7.42 E^{\circ} - \frac{6.44}{E^{\circ}} \right) \gamma \cdot 10^{-4} \quad \left[\frac{\text{daN.s}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.14)$$

şeklinde bir bağıntı vardır. Burada yağın özgül ağırlığı (γ)’nın birimi [daN/dm^3] olarak alınmaktadır [59].

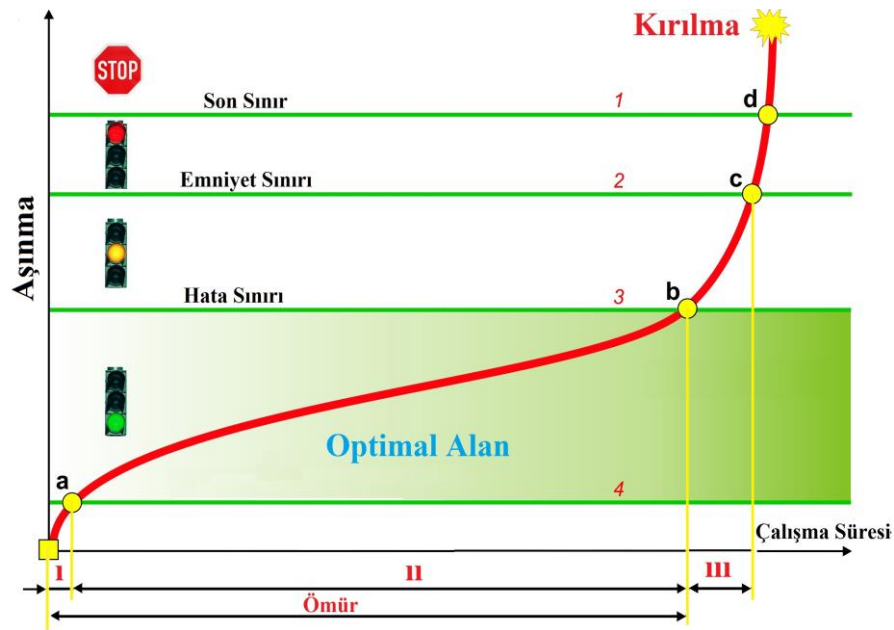
2.2.5. Yuvarlanma sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketine karşı temas yüzeylerinde oluşan dirençtir. Teorik bakımdan tam rijit ve yüzeyi pürüzsüz olan silindirik ve küre şeklindeki bir elemanın, rijit pürüzsüz bir düzlem üzerinde serbest yuvarlanma hareketinde sürtünme kuvveti meydana gelmemektedir. Ancak bu türden elemanların temas yüzeylerinde elastik veya plastik deformasyonlar oluşmaktadır. Şekil 2.18-b’ de gösterilen yuvarlanma hareketinde, temas yüzeyleri alan şeklinde olduğunda Şekil 2.18-c’de gösterilen hareket yönüne doğru temas alanında bir dalgalanma veya yığılma meydana gelebilmektedir. Dönel elemanı yuvarlamak için F_n kuvvetinin B noktasına dengelenmesi gerekeceğinden, bu dengeleme F kuvvetinin uygulanmasıyla gerçekleşmektedir. Buradan, kuvvetlerin B noktasına göre moment dengesi yazıldığında,

$$F \cdot a = F_N \cdot f \quad (2.15)$$

ifadesi elde edilir ve sürtünme kuvvetinden de yuvarlanma sürtünme katsayısı bulunmaktadır.

Aşınma, sürtünen yüzeylerde malzemenin, mekanik etkilerle istenmeyen bir şekilde kopması ve ana parçalardan ayrıldığından yüzeylerin gerçek şekilleri bozularak hasara uğramaktadırlar. Sonuç olarak; parçalar arasındaki boşluklar büyüyeceğinden, kendilerinden beklenen fonksiyonu yerine getirememektedirler. Aşınma ani ve zamanla gelişebilen bir durum olarak da incelenebilir. Zamanla oluşan aşınma için Şekil 2.19'da verilen aşınma miktarı zamana göre değişmekte olduğundan üç bölgeye ayrılmıştır.



Şekil 2.19. Zamanla oluşan aşınma [62].

I numaralı gösterilmiş olan ilk bölgeye (rodaj) adı verilmektedir. Bu bölge, parçaların ilk çalışması sırasında çalışma çiftlerinin yüzeyleri birbirine alıştıırılma sürecini temsil etmektedir. Alıştırma yüksüz ve normal hızdan daha küçük hızlarda yapılır ve özel yağlarda kullanılmaktadır. II. bölge çalışma yüzeylerinin birbirine alıştığı ve gerçek çalışma sürecini temsil etmektedir. III. bölge ise aşınmanın tam olarak başladığı yüzeylerde aşınmayı geciktiren yağlama, kaplama gibi durumların etkisini kaybettiği (özellikle kuru ve sınır yağlama şartları) süreci ifade etmektedir [63]. Çalışma şartlarına bağlı olarak emniyetli aşınma veya emniyet sınırının belirlenmesi, yatağın gerçek çalışma zamanını veya ömrünü tayin etmede kolaylık sağlamaktadır. Bu çalışma süresinden sonra yatak bakımı yapılmalı ya da yenisiyle değiştirilmelidir. Ani olarak oluşabilecek aşınma durumlarında ise parça yüzeylerinde hızlı aşınma

durumları söz konusu olmaktadır. Bu durum, statik zorlanma etkisindeki kopmayla ortaya çıkan aşınma durumudur ve yüzeylerin kilitlenmesine ve uyumsuzluğuna neden olmaktadır.

Aşınma, temas yüzeylerinde oluşan dış etkilerin etkisiyle fiziksel ve kimyasal değişimler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle aşınma tanımlanırken şu farklılıklara dikkat çekmek gerekmektedir.

- a. Cisimlerin yüzeylerinden mekanik etkenlerle mikro taneciklerin koparak ayrılması nedeniyle istenmeyen bir değişikliğin meydana gelmesidir.
- b. Mekanik etkenlerle oluşarak cisimlerin yüzeyinde artan bir şekilde malzeme kaybı meydana gelmektedir.
- c. Sürtünen yüzeyler arasında tekrarlı etkiler sebebiyle malzeme tahribatı meydana gelmektedir.
- d. Katı cisimlerin yüzeylerinden küçük parçacıkların veya ince tabakaların ayrılarak malzeme kaybı meydana gelmektedir.
- e. Katı cismin yüzeyinin tribolojik özelliklerini kaybederek artarak devam eden malzeme kaybının meydana gelmesidir.

Mühendislik malzemelerinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için aşağıdaki şartların sağlanması zorunludur [58].

- a. Mekanik bir etkinin olması
- b. Aşınmanın başlaması ve devamı için sürtünme olmalıdır (izafi hareket).
- c. Yavaş fakat devamlı olması
- d. Malzeme üzerinde değişiklik meydana gelmesi
- e. İsteğimiz dışında meydana gelmesi

Aşınma, yataklar, contalar, dişliler ve kamlar gibi hemen hemen tüm makine uygulamalarında istenmeyen bir durumdur. Malzeme yüzeyden nispeten küçük miktarlarda kalkarak ya da yüzeyi aşırı derecede bozulduktan sonra yenisiyle değiştirilmesine ihtiyaç duyulabilir. Tribolojik sistemlerde, malzemenin yüzeyden

kalkması başlangıçta yavaş bir süreçtir ve bu durum kararlı bir hal almasından sonraki süreçte sürekli bir hal alabilmektedir. Bu nedenle tribolojik sistemler, karşılıklı etkileşim halinde çalışan elemanların çalışma yüzeyleri ve ara madde özellikleri, yük, hız, termal şartlar ve çalışma ortamı gibi etkilerle birlikte değerlendirilerek aşınma olayını incelenmelidir [64].

2.2.6.1. Aşınma mekanizmaları

Aşınma mekanik ve / veya kimyasal vasıtalarla meydana gelmektedir ve genellikle sürtünme ile (ya da termal vasıtalar) hızlanmaktadır. Aşınma, çeşit olarak farklı olguyu içermektedir. Ancak, hepsinde sürtünen yüzeylerinden katı malzemenin kalkması ortak tarafları olarak tanımlanmaktadır. Bunlar: (1) adhesif aşınma; (2) abrasif aşınma; (3) korozyon aşınması; (4) yorulma aşınması; (5) erozyon ve kavitasyon aşınmasıdır. Endüstriyel durumlarda karşılaşılan aşınma çoğunlukla adhesif, ve abrasif aşınma mekanizmaları nedeniyle oluşmaktadır. Yorulma mekanizması dışında, tüm aşınma mekanizmaları malzemenin kademeli olarak uzaklaşması ile oluşmaktadır.

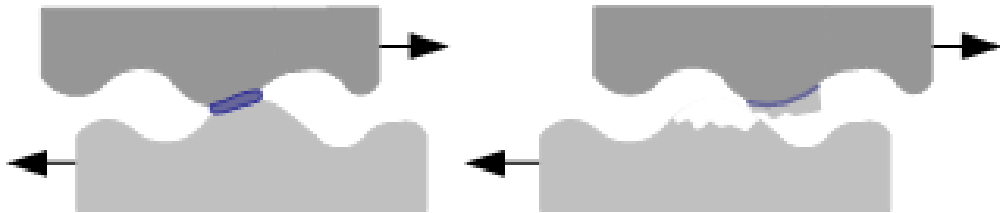
Bu aşınma mekanizmaları, biri ya da daha fazlası bazı makine parçalarında meydana gelmektedir. Çoğu durumda, aşınma tek bir mekanizma ile başlayabilmekte ve diğer aşınma mekanizmaları tarafından devam edebilmektedir. Bu nedenle hasar analizinin tespiti karmaşık olabilmektedir. Hasar bileşenleri genellikle muhtemel hasardan sorumlu olan aşınma mekanizmasının türünü belirlemek için incelenmektedir. Mikroskobik ve çeşitli yüzey analitik teknikleri genel olarak hasar analizlerinde kullanılmaktadır [63].

2.2.6.1.1. Adhesif aşınma

İki düzlemsel katı cismin (yağlanmış, olsun veya olmasın) kayar temas halinde olduğunda meydana gelmektedir. Adhezyon (ya da bağ) ara yüzeydeki çıkıntıların (yükseletilerin), pürüzlerin temas noktalarında meydana gelmektedir ve yüzey pürüzleri dış kuvvet etkisiyle akma sınırının aşılmasıyla plastik deformasyona

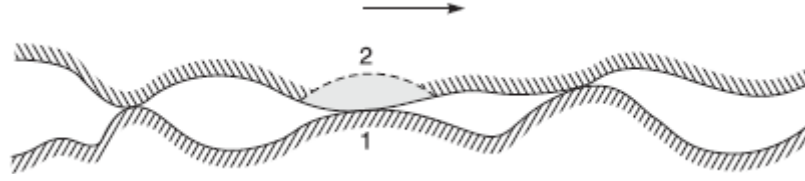
uğrayarak, yüzeyde absorbe edilmiş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanmaktadır. Temas noktalarında mikro kaynak bağları oluşmaktadır [65]. Bu etkileşimler kayarak kesildikleri için de bir yüzeyden kırıntı (partikül) olarak ayrılmasına ve diğer yüzeye bağlanmasına neden olabilmektedir. Kayma devam ederken, transfer edilen partiküller yüzeye çıkmaktadırlar. Bu partiküller transfer edilen partiküllerden ya da gerçek yüzeyine geri transfer olan veya diğer formlardaki gevşek aşınma partikülleridir. Bazıları tekrarlanan yükleme ve gevşek parçacıkların oluşumuyla sonuçlanan boşaltma eylemi sırasında yorulmayla kırılmıştır.

Malzemenin bir parçasının ayrılmasında çeşitli mekanizmalar önerilmektedir. Kayma aşınma teorisinin ilk başlarında kesme iki cismin birindeki en zayıf bölgede veya gerçek arayüzde oluşabileceği Şekil 2.20’de görüldüğü gibi teorik olarak ileri sürülmektedir [66]. Çoğu durumda, ara-yüz yapışma mukavemetinin, lokal bölgelerini çevreleyen kopma mukavemeti ile karşılaştırıldığında, az olması beklenmektedir. Bu nedenle, kesme sırasında kırılma meydana gelir bağların çoğundaki arayüzde (yüzey 1) oluşur ve bu kayma döngüsü içinde aşınma yoktur.



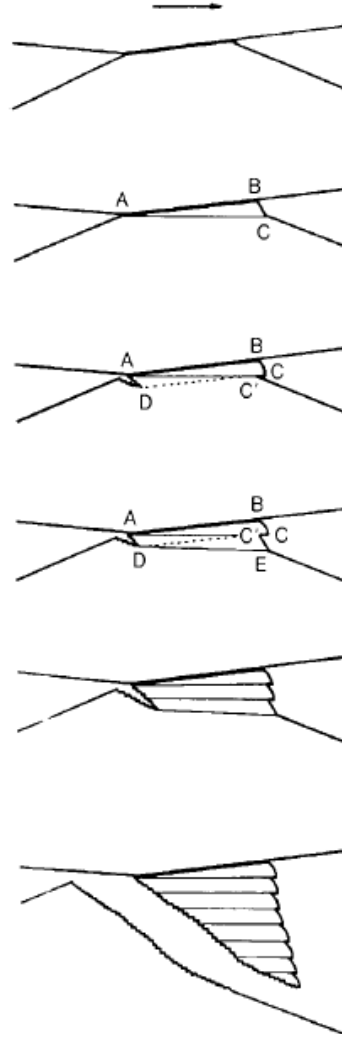
Şekil 2.20. Adhesif aşınma mekanizması [67].

Şekil 2.21’de görüldüğü gibi küçük temas parçalarında, iki gövdenin birinde (yüzey 2) kırılma meydana gelebilir ve küçük parça (gölgeli bölge) diğer yüzeye tutunmuş olabilir. Bu transfer parçacıkları düzensiz ve bloklu şekillenmiş olabilir. Başka bir mekanizmada, bir aşınma parçasının ayrılmasıyla sonuçlanan pürüz teması, ardışık tabakaların plastik kesilmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu teoriye göre, bir kayma hattı alanına dayanan ardışık tabakaların plastik kesilmesi, bir kesme çatlağının yayılımı ile birlikte, parça ayrılması oluncaya kadar oluşur.



Şekil 2.21. Ara yüzün kesilmesi esnasında kırılmanın (1 ve 2) iki olasılığı [68].

Bu süreç, ince kama şeklindeki transfer parçaları ile sonuçlanır. Bu parça, bir yüzeyden ayrılmıştır ve adhezyon nedeniyle birleşme yüzeyine aktarılmıştır. Ayrıca, kayma, iki mekanizmanın biriyle daha fazla parçacığın oluşmasına sebep olmaktadır. Bunlar bir yüzeye engaje olarak kalan, birleşme yüzeyine transfer olan ya da daha önceki parçaya bağlanmıştır. Bu son durumda, daha büyük bir aglomerat büyük bir gevşek aşınma parçacığı olarak ayrılmış olmaktadır. Bu parçacıklar her bir boyutta yaklaşık aynı büyüklükte olabilir. Parçacıkların yapışmış olmasına rağmen, parçacıklar ile transfer oldukları yüzey arasında güçlü bir bağ öngörülür, en son gevşek parçacığın oluşumu ise zayıf bir bağ anlamına gelir. Gevşek bir parçacığın oluşumu genellikle parçacıktaki kimyasal değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Parçacıklar, geniş bir yüzey alanına sahiptir ve adhezif kuvvetini azaltan okside olma eğilimindedirler ve bunlar kolaylıkla parçalanmaktadırlar. Gevşek parçacıkların oluşumundan sorumlu ikinci bir mekanizma, yapışan parçaların kalıcı elastik enerjisini kapsamaktadır. İki yüzey arasında sıkıştığında, parçacık ağır şekilde baskı yapmaktadır. Diğer yüzey üzerinde hareket ederken, sadece artık elastik gerilmeler kalmaktadır. Sözü edilen elastik enerji, adesif enerjiden daha büyük ise, parçacık bir aşınma partikülü olarak kırılmaktadır. Farklı malzemeler ve malzeme kombinasyonlarında daha yumuşak malzemedan aşınmaya daha çok parçacıkların oluşmasına rağmen, her iki malzemenin parçacıkları oluşturulmaktadır. Aşınma ve daha sert bir malzemede olan hasarlar ve çatlaklar vardır. Adezyon aşınması çoğunlukla, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir. Bu nedenle malzeme çiftlerinin birisi sert (çelik gibi) diğeri yumuşak (bronz gibi) seçilmelidir [69].



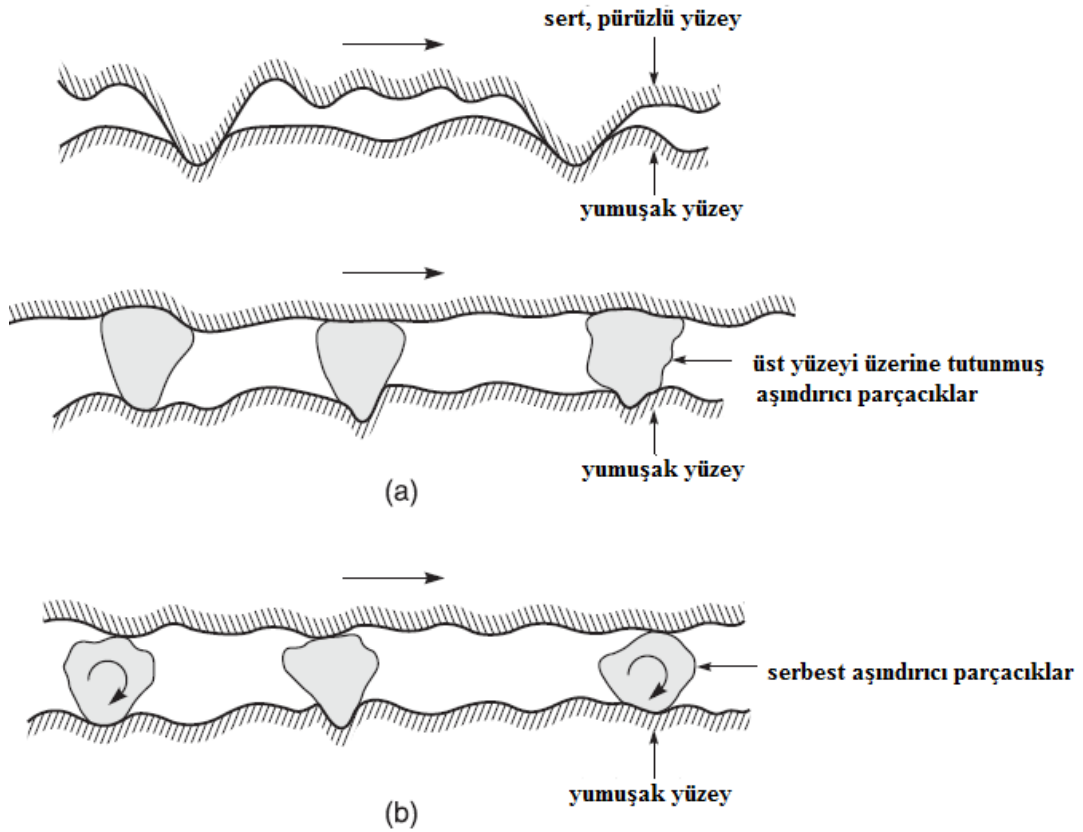
Şekil 2.22. Yüzeylerdeki pürüzlerin temasıyla malzeme parçasının ayrılması [68].

2.2.6.1.2. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma, pürüzlerin çıkıntılarının, sert yüzey veya sert partiküller daha yumuşak bir yüzey üzerinde kayar ve plastik deformasyon veya kırılmayla arayüze zarar vermektedir. Uygulanan yük ve hareketin etkisiyle sürtünen iki cisimden daha sert olanının pürüzleri veya çıkıntıları vasıtasıyla da diğerini çizerek üzerinden mikro talaş kaldırılması olayıdır. Yüksek kırılma tokluğuna sahip sünek malzemelerin (örneğin metaller ve alaşımlar gibi), sert pürüzleri veya sert partikülleri, daha yumuşak malzemenin plastik akışına neden olur. Çoğu metal ve seramik yüzeyler, kayma esnasında plastik akışın açık belirtilerini sergilerler. Metallerin temas eden pürüzleri hafif yüklerde bile plastik deforme olurlar. Düşük bir kırılma tokluğu olan

kırılgan malzeme durumunda, aşınma gevrek kırılma ile gerçekleşir. Bu gibi durumlarda, aşınmış bölgede önemli çatlamlar oluşur.

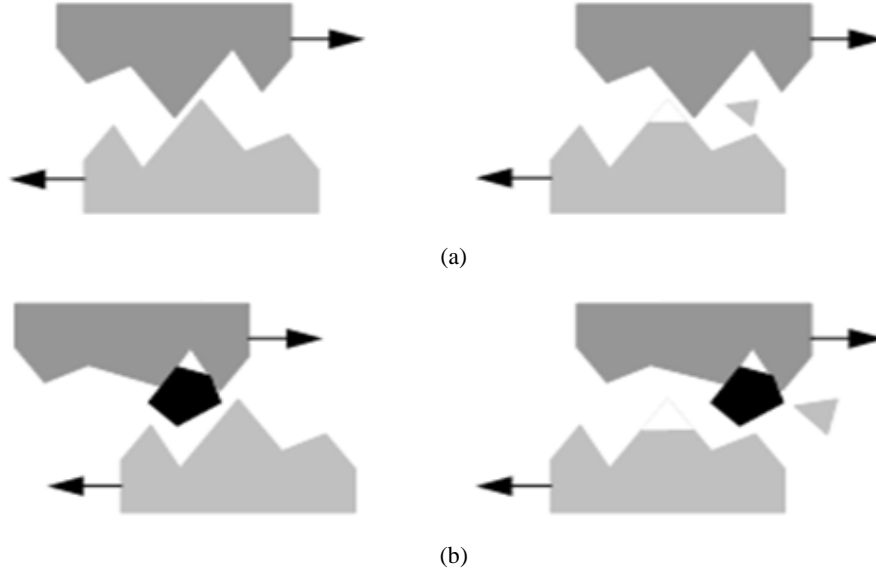
Şekil 2.23’de görüldüğü gibi abrasif aşınma için iki genel durum vardır. İlk durumda, sert yüzey iki sürtünme yüzeyleri olan (iki-cisim abrasyonu) örneğin, mekanik işlemler olan öğütme, kesme ve işleme gibi ve ikinci durumda, sert yüzey üçüncü bir cisimdir ve genellikle aşındırıcının küçük bir partikülüdür, diğer iki yüzey arasında sıkışmıştır ve yeterince serttir. Bu birleşen yüzeylerinin birini ya da her ikisini de aşındırması mümkündür. Örneğin, serbest aşındırıcı lepleme ve parlatma



Şekil 2.23. Aşındırıcı parçacıkların sistematığı [68]. (a) aşındırıcı parçacıklı bir yüzey (b) yüzeyler arasına sıkışan serbest aşındırıcı parçacıklar

Şekil 2.24’de abrasif aşınma mekanizması, iki gövdeli ve üç gövdeli abrasif aşınma olarak gösterilmektedir. Birçok durumda, başlangıçta aşınma mekanizması, üç gövdeli aşınmayla sonuçlanan, arayüzde sıkışan aşınma parçacıklarının oluşturduğu

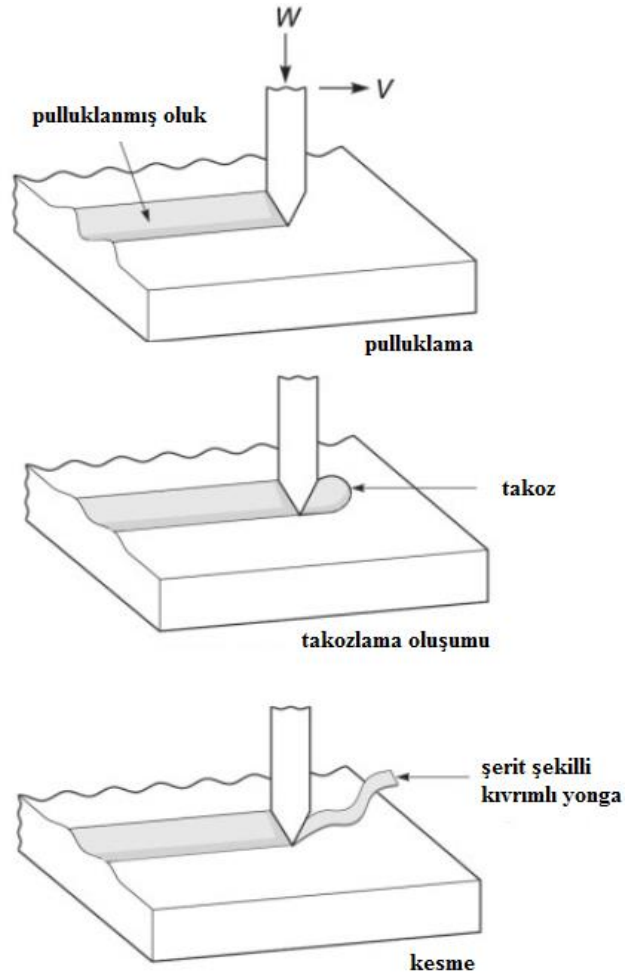
adhesiftir [70]. Çoğu abrasif aşınma durumlarında, kazıma (daha çok yumuşak olan yüzeyin), kayma yönüne paralel bir dizi oluklar (pulluklama) olarak görülmektedir.



Şekil 2.24. Abrasif aşınma mekanizması, (a) iki gövdeli abrasif aşınma, (b) üç gövdeli abrasif aşınma [70]

2.2.6.1.2.1. Plastik deformasyon yoluyla abrasif aşınma

Şekil 2.25. Plastik deformasyon sonucunda oluşan abrasif aşınma süreci görülmektedir. Burada abrazyon boyunca, plastik deformasyon yoluyla yüzeyden malzeme kaldırma, pulluklama, takozlama ve kesmeyi kapsayan çeşitli deformasyon biçimleriyle oluşabilir. Pulluklama, daha yumuşak plastik malzemenin akışının bir sonucu olarak bir dizi oluklar ile sonuçlanmaktadır. Pulluklama (aynı zamanda sırt oluşumu denilen) sürecinde, malzeme, kaldırılma durumu olmaksızın malzemenin yanlara doğru yığılarak bir oluğun oluşmasıyla yer değiştirmektedir. Bununla birlikte, yüzey birkaç kez pulluklanmadan sonrası kazıma (malzeme kalkması), düşük devir yorgunluk mekanizması sebebiyle oluşabilir. Pulluklama oluştuğunda aşınma parçacıkları oluşsun ya da oluşmasın bağımsız olarak pulluklanmış olukların kenarları boyunca sırtlar oluşur. Bu sırtlar tekrarlanan yükleme ve boşaltma döngüleri sonrasında kırılma ve düzleşme olur. Pulluklama süreci, hem yüzey altı plastik deformasyonların nedenidir hem de yüzeyin çekirdeklenmesine ve yüzey altı çatlaklara katkıda bulunabilir [64].



Şekil 2.25. Plastik deformasyon sonucunda oluşan abrasif aşınma süreci [64].

Yatak sistemlerinde abrasif aşınma, dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında oluşur. Bu aşınmanın önlenmesi için yüzeyler sertleştirilmelidir. Dışarıdan sert maddelerin yüzeyler arasına girmemesi için iyi bir sızdırmazlık sağlanmalıdır. Makine ve sistemler talaş ve diğer kirlere sık sık temizlenmelidir.

2.2.6.1.3. Korozyon aşınması

Kimyasal bir aşınma türü olan korozyon aşınması, birbiri üzerinde kayan veya yuvarlanan yüzeyler arasındaki küçük temas alanlarında plastik deformasyonlar oluşmaktadır. Plastik deformasyon sonucu kristal kafesin bozulmasıyla yüzey

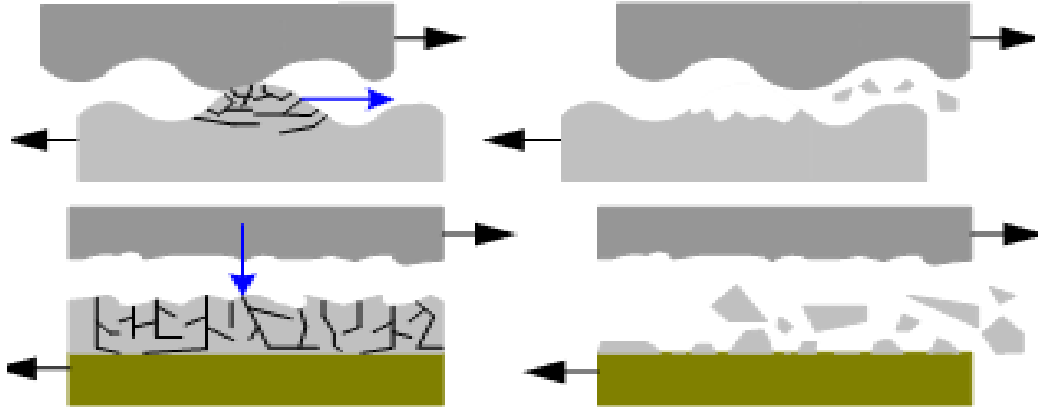
kimyasal olarak aktifleşerek ortamda bulunan oksijen ile oksitlenmektedir. Oluşan oksit tabaka devam etmekte olan hareket sonucu kırılmakta ve parçalanan oksit parçacıkları da aşınmayı meydana getirmektedir. Aşınma, sürtünme yüzeylerinin korozyon (oksidasyon) yolu ile hızlanabilmektedir. Sıcaklık artışı ve sürtünme sırasında yüzeyden koruyucu oksit filmlerin kalkması oksidasyon sürecini destekler. Sürtünme, yeni oksit filmin sürekli oluşmasına karşın oksit filmin sürekli uzaklaştırılmasını sağlar. Sert oksit partikülleri kayarak / dönerek çalışan yüzeyler arasına sıkıştırılmış ve yüzeyden çıkarılmıştır. Ayrıca üç cisim aşınma mekanizması ile aşınma oranını artırmıştır.

Kimyasal madde bulunan ortamda çalışan elemanların yüzeyleri bu maddelerle reaksiyona girerek ince ve sert tabakalar oluşturmaktadır. Benzer durum yağlar içindeki maddeler için de geçerlidir. Değişken yük altında bu sert tabaka kırılarak aşınmayı oluşturan parçacıkları meydana getirmektedirler. Örneğin, korozyonla meydana gelen demir oksit tanecikleri abrasiv aşınmayı hızlandırır. Korozif aşınmanın faydası, çok yüksek basınç altında çalışan yüzeylerde, meydana gelen oksit veya diğer ara tabakalarla yapışmasını önleyerek adhesiv aşınmayı azaltmaktır. Oksidasyon veya mekanik korozyon aşınmasını önlemek için yüzeyler fosfat, sülfid gibi maddelerle kaplanır veya oksidasyonu önleyen özel yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır [58, 71].

2.2.6.1.4. Yorulma aşınması

Bir malzemenin yorulma aşınması sürtünme esnasında devirli yükleme durumlarından kaynaklanmaktadır. Yorulmada, uygulanan yük metal malzemede yorulma direncinden daha fazla bir etki oluşturmaktadır. Şekil 2.26'da görüldüğü gibi yorulma olayı, malzeme yüzeyinden başlamakta ve alt yüzeylere doğru yayılabilir olup titreşimli yüklemelerde veya sürtünen elemanların tekrarlı gerilmelere maruz kaldıkları yüzeylerde mikro çatlaklar veya küçük çukurcuklar oluşturmaktadır. Çatlaklar, malzeme parçalarının delemantasyonuyla ve birbirlerinden ayrılmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu olay daha çok dişli çarklar, kam mekanizmaları, rulmanlı yataklar gibi yuvarlanma hareketi yapan parçacıkların yüzeylerinde oluşmaktadır.

Yüzeylerde meydana gelen Hertz basınçlarının etkisiyle, yüzeylerin hemen altında kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Değişken zorlanma durumunda da malzeme yüzeyinde yorulma olayı başlamaktadır. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru yayılarak büyümekte ve yüzeyde küçük çukurcuklar meydana getirmektedirler [58,70].



Şekil 2.26. Yüzey yorulma aşınması [70].

Yüzeyler arasındaki yağın yüksek basınç altında çatlaklara girmesi boşlukların /çukurların büyümesine neden olmaktadır. Pitting aşınması olarak da anılan yüzey yorulma aşınması, parçaların temas halindeki çalışma yüzeylerinde plastik deformasyonlar nedeniyle çukurların oluşmasına ve giderek iç kısımlarına doğru yayılmalarına neden olmaktadır [70].

2.2.6.1.4. Erozyon ve kavitasyon aşınması

Malzeme yüzeyi ile çalışma ortamındaki izafi hızın yüksek değerlere ulaşması sonucu ortaya çıkan hasar, erozyon olarak tanımlanmaktadır. Erozyon, içinde katı tanecikler bulunan sıvının çalışma yüzeyine yüksek hızla çarpması sonucu oluşmaktadır. Bununla birlikte, çok küçük sıvı damlalarının da yüksek bir hızda (1000 m/s) katı bir yüzeye düşmesi, damlaların cisme çarpma anındaki basıncı, cismin basma mukavemeti değerini aşabilmektedir. Bu durum, yüzeyde plastik deformasyon veya kırılma oluşturmaktadır. Çarpmaların sürekliliği de yüzeylerde yorulma veya erozyon aşınması meydana getirmektedir.

Kavitasyon erozyonu; bir cismin sıvı ile izafi hareketi durumunda; sıvı içinde oluşan kabarcıkların basıncın düşmesiyle büyüyerek patlaması sonucu meydana gelen şok dalgaların cismin yüzeyine çarparak hasar meydana getirmesidir. Oluşan kabarcığın kararlı olması iç ve dış yüzeyi arasındaki basınç ve yüzey enerjisine bağlıdır. Kabarcık yüzeyindeki gerilmenin düşük olması tahribatı azaltır. Kavitasyon erozyonu genellikle su türbinleri ve pompalarda meydana gelmektedir. Aşınma mekanizmaları, temas halinde çalışan elemanlarda tek başına meydana gelmeyebilir ve hasarın oluşmasına birkaçının da birlikte etkisi olabilmektedir. Aşınma olayı çeşitli faktörlerin etkileri ve tribosistemi oluşturan elemanların karşılıklı etkileşimleri sonucunda da aşınmanın türünü ve kaybını belirlemektedirler [70].

2.2.7. Yağlama ve yağlayıcılar

Tribolojide üçüncü konu yağlama konusudur. Eş çalışan yüzeyler arasında oluşan sürtünmeyi azaltmak ve aşınmayı önlemek amacıyla yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Yağlayıcı maddeler aynı zamanda sıcaklık artışını da önlemektedir. Yağlayıcılar temas yüzeylerine iyice yapışmaktadır ve yüzeylerin pürüzlerini birbirinden ayırmaktadır. Yüzeyleri korozyona karşı korumakla birlikte sistemde oluşan ısıyı da dışarı atmaktadır. Kuru ve sıvı sürtünme durumlarında kullanılan yağlayıcılardan beklenilen özellikler farklıdır. Sıvı sürtünmede yağlayıcıların viskozitesi (akışkanlık) önemliken yarı sıvı sürtünme halinde yağlayıcıların “ıslatma kabiliyeti” ve kimyasal bileşimi önem arz etmektedir. Sıvı sürtünmede çalışma yüzeyleri arasında oluşan yağ tabakası yüzeyleri ayırdığından bu durumda yağın iç sürtünmesi veya viskozitesi önem arz etmektedir. Bundan dolayı sıvı sürtünmesinde genellikle tam film oluşturacak yağlayıcı yağlar ya da bazı hallerde de gaz yağlayıcılar kullanılmaktadır. Yarı sıvı sürtünme halinde ise katı ve katılı sıvı yağlayıcılar kullanılırlar. Çünkü sınır veya yarı sıvı sürtünmesinde yağlayıcı maddenin yüzeylere yapışma kabiliyeti ve kimyasal yapısı belirleyicidir. Adhezyon, abrazyon ve korozyon aşınmalarının önlenmesi açısından yağlayıcılar önemlidir. Yağlayıcılar özelliklerine ve kullanım yerlerine göre katı, yarı katı, gaz ve sıvı yağlayıcılar olarak bu bölümde incelenmiştir [58].

2.2.7.1. Katı yağlayıcılar

Katı yağlayıcılar sürtünmeyi ve aşınma azaltarak çalışma yüzeylerinin hasara uğramasını önlemek için sürtünen yüzeylere toz, film veya kompozit malzeme şeklinde uygulanmaktadır. Yarı sıvı sürtünme halinde aşınmayı ve enerji kaybını önlemek için sürtünen yüzeylere kuvvetli olarak yapışan katı yağlayıcı, bir yağlama katmanı oluşturmaktadır. Genellikle kullanılan katı yağlayıcılar grafit, molibdendisülfid ve PTFE'dir. Bunların yanında asbest, çeşitli polimer malzemeler, mika ve talk gibi maddeler de yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Uygulamalarda en çok kullanılan katı yağlayıcılar grafit, molibdendisülfid, talk gibi toz şeklindeki yağlayıcılar ve Poliamid (PA), Polioksietilen (POM), Politetrafloretilen (PTFE) gibi polimer malzemeler kendinden yağlamalı özellikleri nedeniyle makine elemanlarının (kılavuz, yatak ve dişliler gibi) yağlanmasında kullanılmaktadırlar [58].

Toz veya ince levhalar şeklinde kullanılan grafit yüksek sıcaklıklarda (500 °C'nin üzerinde) yalnız başına, diğer hallerde yağlayıcılarla veya gres ile bir süspansiyon oluşturacak şekilde karıştırılarak kullanılmaktadır. Katı yağlayıcılar arasında PTFE (teflon), çoğu kimyasallarla ve 250 °C sıcaklığa dayanım özelliği olan yapışmama (non-stick) ve düşük sürtünme katsayısı ile de geniş bir kullanım aralığına sahiptir. En büyük dezavantajı, mekanik özelliklerinin iyi olmamasıdır. Bu yüzden bazı malzemelerle birlikte (cam elyafı, bronz, grafit gibi) gerek ilave edilerek gerekse kompozit malzeme olarak kullanılarak mekanik dayanımında göreceli iyileştirmeler elde edilebilmektedir. Grafitli olan cinsi ise yüksek kayma özelliğinden dolayı, sıcaklığın yüksek olduğu ve yağlama imkânlarının yeteri kadar iyi olmadığı ortamlarda oldukça iyi performans göstermektedir [58].

2.2.7.2. Sıvı yağlayıcılar (yağlar)

Sıvı yağlayıcı maddeler organik (hayvansal ve bitkisel), madensel (mineral) ve sentetik yağlar olmak üzere üç grupta incelenmektedir. İzafi hareket eden yüzeyler plastik, lastik gibi metal dışı malzemelerden yapılmışsa su da sıvı yağlayıcı madde olarak kullanılabilir.

2.2.7.3. Yarı katı yağlayıcılar (gresler)

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

Gresleri, ağırlığının % 65 - 95'ini yağ, % 3 - 30'unu katılaştırıcı ve % 10'u kadar katkı maddeleri oluşturmaktadır. Kullanılan katılaştırıcı maddeye göre (kalsiyum, alüminyum, sodyum, lityum, kurşun sabunu gibi) de gresler kalsiyum gresi, lityum gresi, sodyum gresi gibi isimlendirilmektedir. Gresler genellikle açıkta çalışan ve uzun yağlama süreli, düşük ve orta hız ve yük altındaki sistemlerde kullanılmaktadır. Lityum sabunlu gresler 30 – 100 °C sıcaklık aralığında kullanılmaktadır. Suyu karşı koruma veya korozyonu ve suda ayrışmayı önleyici özel katkıları katılmaktadır. Büyük yüke maruz rulmanlı yatakların yağlanması ise, çok defa kurşun sabunu katılmış kireç veya lityum sabunlu gresler kullanılmaktadır. Kireç + kurşun sabunlu greslerin büyük bir yapışma (adezyon) kabiliyeti ve su karşısında korozyona karşı koruma özelliği vardır. Darbeli ve sarsıntılı yataklarda kıvamları değişmediği için sodyum sabunlu gresler iyi sonuç vermektedir.

2.2.7.4. 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 sürtünme ve ısı oluşumu çok az olmaktadır. Ancak gaz yağlayıcıların kullanıldığı sistemlerin yük taşıma kabiliyetleri çok düşüktür. Hava, hidrojen ve azot yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda,

kükürtheksafloridler, sıvı nitrojen, buhar ve organik buharlar ve karbondioksit özellikle reaktörlerde soğutma amaçlı kullanılmaktadır [58].

2.3. Sinterleme Yöntemi

2.3.1. Giriş

Kaymalı yatakların üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri sinterleme metodudur. Sinterleme metodu ile üretilen yataklar, ilk olarak 1930'lu yılların başlarında Amerika Birleşik Devletlerinde ve 1934 yılında da Prof Tatsuo Matsukawa tarafından Japonya'da üretilmiştir. 1950'li yıllarda ise büyük ölçekli sinter yatak üretimine başlanmıştır [73]. Sinterlenmiş bronz yataklar iyi aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek mekanik özellikleri sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

T/M bronzları genellikle iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar, önceden karıştırılmış (premixed) ve ön alaşımlandırılmış (prealloyed) tozlardır. Premix PM bronzlar, elementel bakır ve kalay tozlarına ilave olarak, % 0,5 – 0,75 stearik asit ya da çinko stearat gibi kuru organik yağlayıcılar içermektedir. Önalaşımlandırılmış tozlar, premix tozlardan daha yüksek akma mukavemetine ve sertleşme oranlarına sahiptirler ve $7,0 \text{ gr/cm}^3$ 'den daha yüksek yoğunluk gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar. Çünkü ön alaşımlandırılmış tozların daha yüksek sertleşme oranlarından dolayı, premix tozlara göre verilmiş ham yoğunluğu elde etmek için sıkıştırma esnasında daha yüksek basınç gerektirmektedir. Ön alaşımlı tozlar daha iyi özelliklere sahip olmasına rağmen premix tozlar daha iyi sıkıştırma özelliklerine sahiptirler. Bu nedenle, kendinden yağlamalı yatak uygulamalarında, premix tozların kullanımı yağ/yağlayıcı emdirebilme açısından yeterli poroziteye sahip olmaları tavsiye edilmektedir. Sinterlenmiş bronz yataklar genellikle, kuru şartlarda $5,8 - 6,0 \text{ g/cm}^3$ veya yağ emdirilmiş şartlarda $6,0 - 6,8 \text{ g/cm}^3$ yoğunluklara sahiptirler [74].

ASTM B 438 standardına göre sinterlenmiş bronz yataklar, kimyasal kompozisyonu, yoğunluğu ve yağ emdirilme kapasitesine (hacimce % 7 - 27) göre 4 temel grupta

sınıflandırılmaktadır. Bu alaşımların kimyasal kompozisyonları, yoğunlukları ve yağ emdirilme durumları Tablo 2.1, Tablo 2.2 ve Tablo 2.3' de verilmiştir.

Tablo 2.2. Sinterlenmiş bronz yatakların % ağırlıkça kimyasal kompozisyonu

Element	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3	Sınıf 4
Bakır Cu	87,2 - 90,5	85,7 - 90,0	82,8 - 88,3	80,9 - 88,0
Kalay Sn	9,5 - 10,5	9,5 - 10,5	9,2 - 10,2	9,5 - 10,5
Grafit C	0 - 0,3	0,5 - 1,8	2,5 - 5,0	0,50 - 1,75
Demir Fe	1,0	1,0	1,0	1,0
Diğer Elementlerin Toplamı (max)	1,0	1,0	1,0	0,5
Kurşun Pb (max)				2,0 - 4,0
Nikel Ni (max)				0,75
Çinko Zn (max)				0,35
Antimon Sb (max)				0,25

Tablo 2.3. Yağ emdirilmiş sinterlenmiş bronz yatakların yoğunluk değerleri

Sınıf	Tip	Yoğunluk (g/cm ³)
Sınıf 1 ve 2	1	5,8 - 6,2
Sınıf 1, 2 ve 4	2	6,4 - 6,8
Sınıf 1 ve 2	3	6,8 - 7,2
Sınıf 1 ve 2	4	7,2 - 7,6
Sınıf 3	1	5,8 - 6,2
Sınıf 3	2	6,2 - 6,6

- Tip 1'de minimum % 27 yağ miktarını sağlamak için, maksimum yoğunluk sınırı 6,2 g/cm³ belirlenmiştir. Tatmin edici yataklar, Tip 1 ve Tip 2 arasında da üretilebilmektedir.

Tablo 2.4. Yağ miktarları (minimum % hacimce yağ miktarı)

Tip	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3	Sınıf 4
1	27	25	11	-
2	19	17	-	17
3	12	9	-	-
4	9	7	-	-

A % 3 grafitte, Tip 1 minimum % 14 yağ miktarı içerecektir.

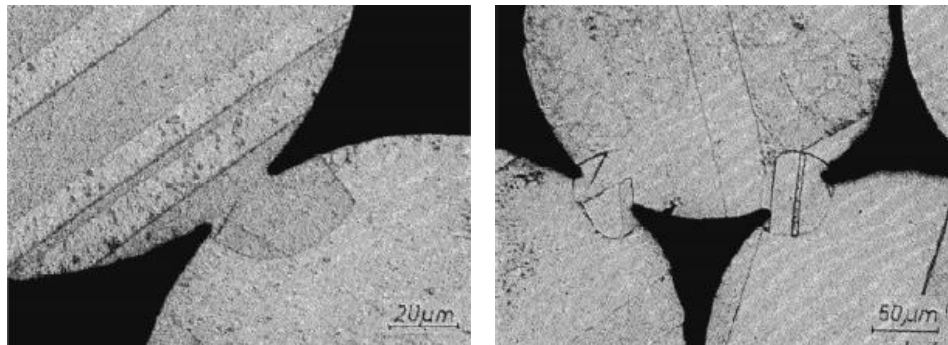
B % 3 grafitte, Tip 2 minimum % 8 yağ miktarı içerecektir. % 5 grafitte, Tip 2 sadece minimal yağ miktarını içerecektir.

Bronz yataklarının ortak mikro yapısı, yüzey merkezli kübik (YMK) kafes alfa (α) fazından oluşur. Sinterleme esnasında, elementel kalay erimekte ve 785 °C - 845 °C sıcaklık aralığında bakırda çözünerek yüksek sıcaklık intermetalik bileşiklerin bir dizisini oluşturmaktadır. Sinterleme prosesi de ham T/M parçaların metalürjik olarak birleştirilmiş alaşıma dönüştürme prosesidir. Elementel bakır ve kalay, sinterleme işlemi esnasında α bronzla dönüşmektedir [75]. Sıvı faz sinterlemede, sinterleme sıcaklığı kalayın ergime sıcaklığının (232 °C) üstünde, bakırın ergime sıcaklığının (1085 °C) altında 830 ila 900 °C sıcaklık aralığındadır [76]. Tablo 2.5’de bazı malzemelere ait sinterleme sıcaklıkları ve sinterleme süreleri verilmiştir.

Tablo 2.5. Malzemelerin sinterleme sıcaklıkları ve süreleri

Malzeme	Sıcaklık (°C)	Zaman (dk)
Bakır, Pirinç, Bronz	760-900	10 - 40
Nikel	1000 - 1150	30 - 40
Paslanmaz Çelikler	1100 - 1290	30 - 60
Demir	1200 - 1500	10 - 60
Tungsten Karbit	1430 - 1500	20 - 30
Molibden	2050	120
Tungsten	2350	480
Tantalum	2400	480

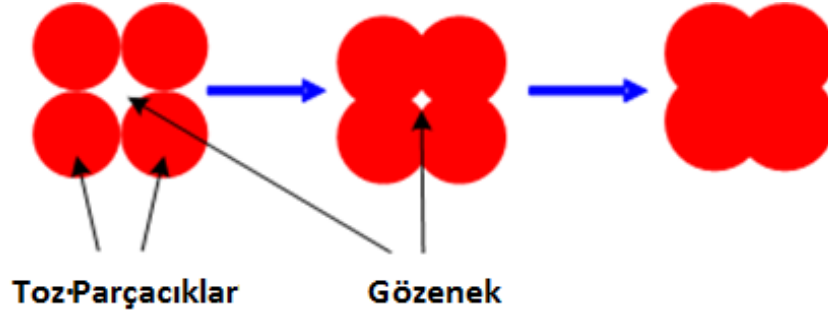
Sinterleme işleminde, küresel toz tanelerinin birbirleriyle bağ oluşturmaları gerçekleşmektedir. Sinterleme sırasında, Şekil 2.27’de görüldüğü gibi toz parçacıkları arasında sıcaklığın etkisiyle bağ oluşur.



Şekil 2.27. Sinterleme sırasında küresel taneler arasındaki boyun oluşumu [77].

Sinterleme üç fazlı bir prosestir. Başlangıçta taneler birbirlerine temas ederek boyun oluşumunu gerçekleştirmektedir. Yani, ilk faz hızlı olarak ilerleyen partiküller

arasındaki boyun verme işlemi vardır. Ancak parçacıklar genel olarak ilk formlarını korurlar. İkinci aşamada ise, tane büyümesi meydana gelmekte, gözenekler yuvarlanmakta ve yoğunlaşma gerçekleşmektedir. Bu safhada, parçacıklar ayrı kimliklerini kaybetmekte ve difüzyon gerçekleşmektedir. Üçüncü fazda yoğunlaşma ilerlemektedir. Şekil 2.28'den anlaşılacağı üzere bu durum, küçük parçacıkların daha büyük parçacıkları oluşturmak üzere birleşmeleriyle devam etmektedir. Bu duruma uygun olarak parçacıklar gözenekleri doldurarak büyümekte ve büyük bir parçacık halini almaktadırlar. Buna bağlı olarak da yoğunluk sıkılaşıyor, bulunduğu kalıp şeklinde katı homojen düzgün bir kütle meydana getirmektedirler.



Şekil 2.28. Toz parçacıklarının sinterleme sırasında oluşturduğu homojen yapı [78].

Sinterleme sıcaklığı, ana metalin ergime sıcaklığının altında tutulmaktadır. Alışım katkıları sıvı faz sinterlemenin sonucu olarak eriyebilmektedir. Başlangıçtaki ergime noktası düşük olan bileşenin oluşturduğu sıvı – katı parçacık sınırlarına nüfuz ettikçe yerlerinde boşluk oluşmaktadır. Bu durum yapı parçaları için zararlı iken gözenekli bronz yatakları için avantaj sağlamaktadır. Sıvı faz oluşuktan sonra hızlı bir sinterleme gerçekleşmektedir.

Sinterleme esnasında parçaları oksidasyondan korumak için işlem koruyucu atmosfer altında gerçekleştirilmektedir. Koruyucu atmosfer sinterleme sırasında oluşabilecek olumsuz reaksiyonları önlemektedir. Bir yandan, oksidasyondan sinter ürünlerini korumakta ve mevcut kalan oksitleri azaltmaktadır. Diğer yandan, karbon ihtiva eden malzemenin dekarburizasyonunu önlemek veya karbon içermeyen malzemenin karburizasyonunu engellemektedir.

Genellikle kullanılan koruyucu atmosferler;

- a. İndirgeyici- dekarburizasyon tipi: hidrojen (H_2), parçalanmış amonyak (% 75, H_2 , % 25 N_2)
- b. İndirgeyici -karbürleşmeye tipi: endogas (% 32 H_2 , % 23 CO, 0 - 0,2 % CO_2 , 0 - 0,5 % CH_4 , bal. N_2)
- c. Nötr tipi: kriyojenik nitrojen azot (N_2), eğer istenilirse küçük eklemeler ile H_2 (artık oksitleri ihmal etmemek için) ya da metan veya propan (karbon kayıplarını geri kazanmak için) [79].

2.3.2. Gözenekli bronz yatakların üretimi

Yatak imalatı üretim metotlarından biri de toz metalurjisi yöntemidir. T/M yönteminde özellikle gözenekli yatakların imalatı önemli yer tutmaktadır. Çünkü sinterleme yoluyla üretilen bu gözenekli yatak malzemeleri hacminin yaklaşık %25'i kadar yağ/yağlayıcı depolayabilme imkânına sahiptir. Çalışma anında gözeneklere emdirilmiş bu yağlayıcılar yatakların çalışma yüzeylerinde yağlama yapmaktadırlar. Dışarıdan yapılan herhangi bir yağlamada da bu gözenekler tekrar dolarak uzun süreli yağlama yapabilmektedirler. Bu durum yataklara kendi kendini yağlama özelliği kazandırmaktadır ve yataklarda aranılan önemli özelliklerden birisidir. Bu sebeple, devamlı yağlama imkânı olmayan bilgisayar, elektrik motorları, otomobil, dikiş makineleri, yazıcılar, tarım ve paketleme makinelerinin parçalarında T/M tekniğiyle üretilen kendinden yağlamalı yataklar kullanılmaktadır [80].

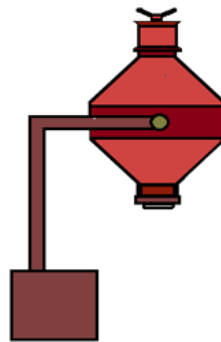
Kendinden yağlamalı yatak malzemeleri, sinterleme metoduyla üretilmiş gözenekli bronz yatakların gözeneklerine yağ veya yağlama özelliğine sahip polimerlerin emdirilmesi ile elde edilir. Uygulamalarda kendinden yağlamalı toz metal yataklar çoğunlukla bakır esaslıdır. Genel olarak, bakır ve % 10 - 15 kalay ve bir de katı yağlayıcıdan oluşan gözenekli kendinden yağlamalı, ön alaşımlandırılmış bronz yataklar tercih edilmektedir. Bu malzemelerin en yaygın kullanılan, kalay bronzu olarak ta adlandırılan bileşimi % 90 Cu - % 10 Sn olan yatak kompozisyonlarıdır. Sinter bronz yatakları (American Society Test and Materials) ASTM B 438

standartlarını içermektedir. Ön alaşımlandırılmış bronz tozlarının, ham yoğunluğu $6,0 \text{ g/cm}^3$ ila $7,2 \text{ g/cm}^3$ için sıkıştırma basıncı 138 ila 345 MPa da kalıplanarak sıkıştırılmaktadır. Ham yataklar genellikle koruyucu atmosfer altında çok bölgeli olarak sinterlenmektedir. İlk bölge ön ısıtma bölgesi 425 ila 650 °C arasındadır. İkinci Bölge yüksek ısıtma bölgesi, 730 ila 850 °C sıcaklıklarındadır. sinterleme işlemi, aşağıda detaylı olarak belirtilen sinterleme aşamaları doğrultusunda yapılmaktadır [81].

T/M tekniğiyle üretilen bakır esaslı sinterlenmiş bu kompozitler, tribolojik mühendislik parçalarında (yataklar, burçlar v.b.) yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda; bir katı yağlayıcı içeren bakır-kalay kompozitler, aşırı yük, atmosfer ve sıcaklık şartlarında kendi kendini yağlayabilen malzemeler olarak geliştirilmektedirler [82]. T/M tekniğiyle üretilen bu kompozitlere sürtünme ve aşınmayı azaltıcı olarak ilave edilen katı yağlayıcılara bakıldığında grafit, molibden disülfat, teflon gibi katkı maddeleri göze çarpmaktadır [83].

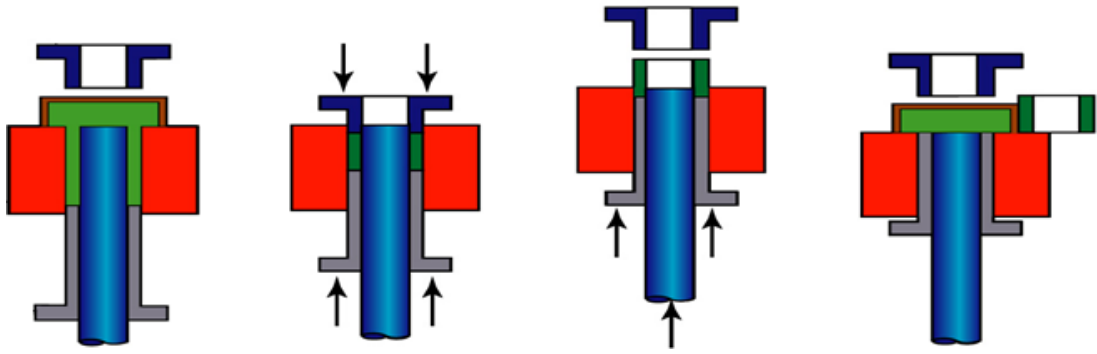
2.3.2.1. Gözenekli bronz yatakların üretim aşamaları

Toz metalürjisi yöntemiyle bronz yatak üretimi 4 ana aşamadan oluşan işlemlerin yapılmasıyla gerçekleşmektedir. Şekil 2.29' da şematik olarak yatak numunelerinin üretimi ile ilgili işlem adımlarının gerçekleştirildiği aşamalar anlatılmıştır. Bu aşamalar sırasıyla, karıştırma ünitesi, presleme ünitesi, sinterleme ünitesi ve kalite kontrol ünitesidir.

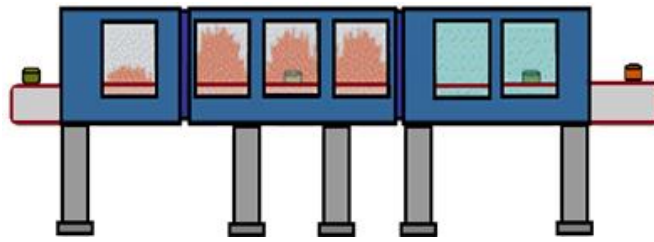


(a)

Şekil 2.29. Yatak numunelerinin üretim işlemi ünitesi, (a) karıştırma ünitesi, (b) presleme ünitesi, (c) sinterleme ünitesi, (d) kalite kontrol ünitesi



(b)



(c)



(d)

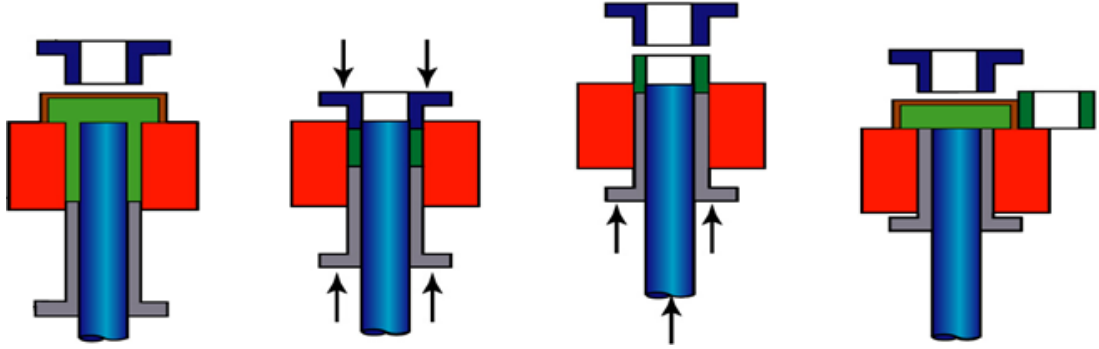
Şekil 2.29. Yatak numunelerinin üretim işlemi üniteleri, (a) karıştırma ünitesi, (b) presleme ünitesi, (c) sinterleme ünitesi, (d) kalite kontrol ünitesi (devamı).

2.3.2.1.1. Karıştırma ünitesi

Bu aşamada, yatak için hammaddeyi oluşturan elementer metal tozlarının veya alaşımlarının toz homojen bir karışım olarak hazırlandığı ve ihtiyaca bağlı olarak, diğer alaşımların, madeni tozların ilave edildiği bölümdür. Bir mamulün kaliteli nihai ürün halini alabilmesinin ilk basamağı hammaddenin doğru seçilerek hazırlanmasıdır. Dolayısıyla, üretimin ilk basamağını oluşturan bu aşama, bronz

Kalıp setinin prese montajının tamamlanmasının ardından ham numunelerin preste üretimine geçilmektedir. Şekil 2.31’de görüldüğü gibi, ham numunelerin prese bağlanan kalıpta sıkıştırılarak üretilmesi işlemi 4 adımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Pabucun kalıp üzerine gelerek kalıp boşluğunu toz ile doldurulması
- Kalıp içerisindeki tozların sıkıştırılması
- Alt zımbanın yukarı doğru hareket ederek tozların sıkıştırılmasıyla elde edilen ham numunenin kalıptan çıkarılması
- Pabucun yeni bir döngü için kalıp üzerine gelirken üretilmiş ham numuneyi çalışma alanından uzaklaştırması adımlarıdır.



Şekil 2.31. Ham numunelerin üretim işlem basamaklarının şematik resmi.

Presin çalışmaya başlamasıyla birlikte, presin hammadde deposuna doldurulmuş olan homojen toz karışım, önce pabuçun toz haznesine dolmaktadır. Daha sonra, içi toz dolmuş olan pabuçun kalıp boşluğunun üzerine gelmesiyle içerisindeki tozlar kalıp boşluğuna akarak dolmaktadır. Pabuç bu işlemi tamamladıktan sonra geri çekilirken, üst zımba, kalıp içerisine doğru tozları sıkıştırma işlemi için ilerlemektedir. Burada sıkıştırma işlemi hem bronz tozlarının yumuşak ve düşük sertliğe sahip olması nedeniyle hem de numunelerin gözenekli olması istendiği için 100 MPa veya daha düşük basınç aralığında basılması tercih edilmektedir. Sıkıştırma işlemi belirtilen basınç aralığında tamamlandıktan sonra üst zımba kalıp içerisinden üst noktaya doğru geri çıkmaya başlamaktadır. Bir sonraki işlemde ise, sıkıştırma işlemiyle kalıbın şeklini alan üretilmiş ham numune kalıp içerisinden çıkarılır. Ham numune alt zımbanın itici görevi görmesi sayesinde kalıp içerisinden çıkarılırken yeni bir

döngünün ilk işlemini yapmak üzere kalıp boşluğunun üst yüzeyine doğru haznesi toz dolu pabuç gelmektedir. Pabuç, bir taraftan bu noktada kalıp içerisinden çıkmış olan ham numuneyi çalışma alanının dışına iterken bir taraftan da yeni döngüsüne devam etmektedir. Şekil 2.31’de bu üretim işlemi döngüsünün şematik resmi verilmektedir.

2.3.2.1.3. Sinterleme ünitesi

Bu aşamada, öncelikle preste basılarak ham halde üretilmiş numuneler sinterleme işlemi için hazırlanmaktadır. Sinterleme işleminin yapılacağı fırın hattı ilerleme sistemleri genellikle Şekil 2.32’de görüldüğü gibi bant mekanizmasıyla hareket etmektedir. Sinterleme işlemine başlarken ilk önce numuneler, taşıyıcı bant sistemi üzerine yerleştirilmektedir. Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra bant sistemi çalıştırılarak hareketi başlatılmaktadır.



Şekil 2.32. Sinterleme fırını bant sistemi

Sinter fırın hattı sistemi üç bölgeden oluşmaktadır. Şekil 2.33 ve Şekil 2.34’de görüldüğü gibi bu bölgeler, ön ısıtma, sinterleme ve soğutma bölgesidir. Sinterleme

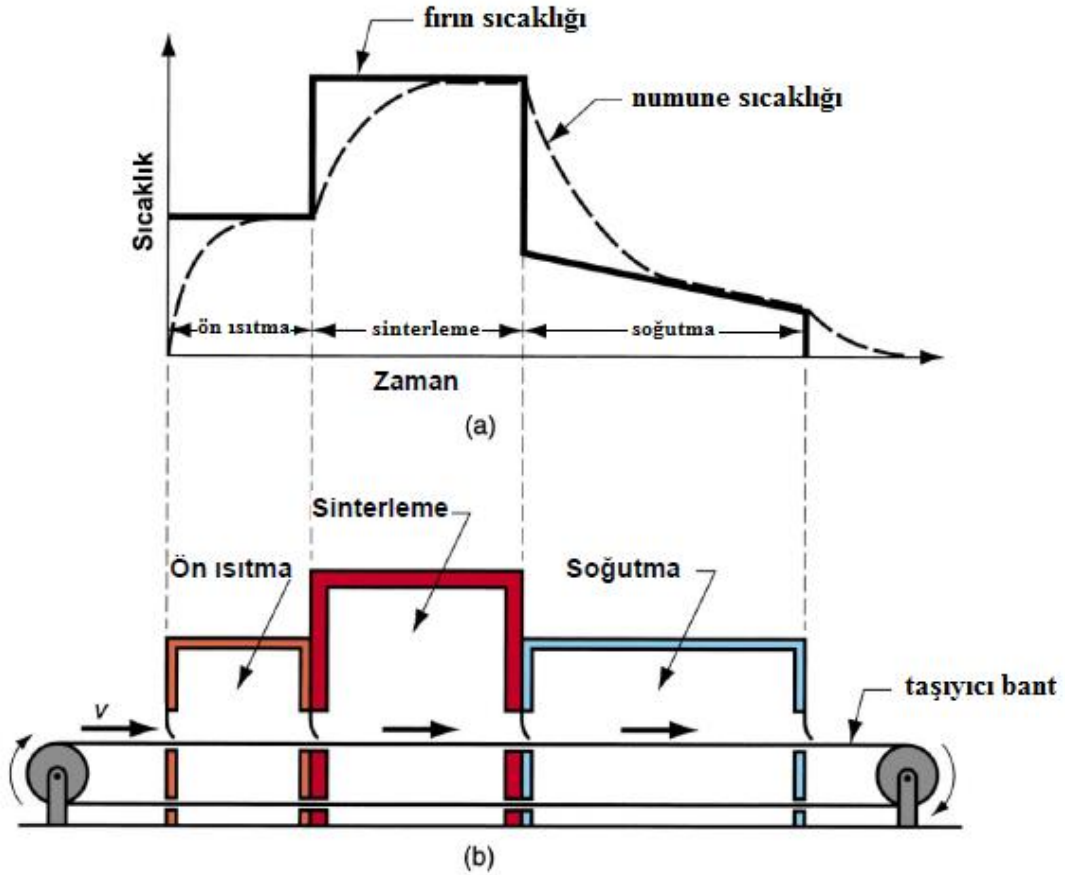
işleminin ilk bölgesi olan ön ısıtma bölgesinde, numuneleri oluşturan hammadde içinde kalıplama esnasında kolaylıkla şekillendirilebilmenin yapılabilmesi ve küresel toz tanelerinin istenilen formda sinterleme şartlarına uygun olarak birbirleriyle kolaylıkla bağ oluşturabilmesine katkı sağlamak amacıyla kullanılan bağlayıcı tozlarının uçurulma işlemi yapılmaktadır. Bu işlem için ön sinterleme sıcaklığı genellikle 450 - 650 °C aralığında seçilmektedir. Çünkü bu bölge aynı zamanda farklı sinterleme işlemleri için de katkı ve bağlayıcı olarak kullanılan polimerler malzemelerin uçurulduğu bölge olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.33. Sinter fırın hattının üç bölgesi

Şekil 2.34'den anlaşılacağı üzere fırının bu bölgesi gerçek sinterleme bölgesine geçiş için bir nevi ön hazırlık bölgesidir ve bu aşamada numunenin sıcaklığı sürekli artış halindedir. Sinterleme hattının ikinci bölgesi olan sinterleme aşamasında sinterleme sıcaklığı, ana metal olan bakırın ergime sıcaklığının altında tutulur. Alaşım katkıları sıvı faz sinterlemenin sonucu olarak ergiyebilir. Başlangıçtaki ergime noktası düşük olan bileşenin oluşturduğu sıvı – katı parçacık sınırlarına nüfuz ettikçe yerlerinde boşluk oluşur. Bu durum yapı parçaları için zararlı iken gözenekli bronz yatakları için uygundur [115]. Sinterleme hattının üçüncü bölgesi numunelerin ham halden çıkıp bir ürün haline geldiği son bölge olan soğutma bölgesidir. Bu bölgeye gelen numunelerin sıcaklıklarının düştüğü bölgedir. Sinterlenmiş numuneler hava ile temas

ederek oksitlenmelerini önlemek için, 20 – 37 °C koruyucu bir gaz altında 5 - 10 hertz fan desteğiyle soğumaya bırakılmaktadırlar.



Şekil 2.34. Sinterleme fırınının ısıl çevrimi

2.3.2.1.4. Kalite kontrol ünitesi

Soğutma işleminden sonra numuneler kontrol işlemi için hazırlanmaktadır. Sinterleme sonrası ürünlerde küçük boyutlu değişiklikler oluşabileceğinden çok yakın toleranslar ile numuneler özel hazırlanmış takım yardımıyla boyutlandırılmaktadır. Yani, numuneler çap kontrolü için hazırlanmış preste kalıba bağlanarak kontrolden geçirilirler. Boyutlandırma işleminin tamamlanmasının ardından numunelere yağ/yağlayıcı emdirme işlemi yapılacaksa bu işleme tabi tutulmaktadır yoksa paketleme işlemleri yapılarak üretim sonlandırılır.

2.3.3. Bronz yatakların gözeneklerine yağlayıcı emdirilmesi / kaplanması

Sinterleme teknolojisi kullanılarak üretilen gözenekli bronz yatakların anti-sürtünme özelliklerini geliştirmek için yapılan yağ emdirme işlemi 110 °C sıcaklıktaki yağ banyolarındaki yağlayıcı içine daldırılarak 10 - 15 dakika vakum altında yapılmaktadır. Tam emdirme sinterlenmiş parçanın gözeneklerini doldurmak için yapılır. Sinterlenmiş toz metalürjisi parçalarının bir yağlayıcı ya da reçine ile emdirilmesi parçaların kullanımına ilişkin farklı amaçlar için yapılmaktadır. Gözenekli yataklarda yağ emdirme işlemi sinterlenmiş numunelerin boyutlandırma işlemleri sonrasında yapılır. Yağın viskozitesi ve korozyonu önleme, film mukavemetini artırma ve oksidasyonu önlemek için katkı maddelerinin kullanılması yatakların spesifik uygulamalarına bağlıdır. Emdirme esnasında, yataklar bir vakum odasına yerleştirilir ve yaklaşık 1 mm Hg basınç altında tahliye edilir. Yağ vakum odasının içerisine girer. 0,5 MPa hava veya azot basıncında emdirme işlemini tamamlamak için bir dakika boyunca uygulanmaktadır. Reçine emdirme yaygın basınç sızdırmazlığı gerektiren vana, pompa, piston ve kompresör parçalarına uygulanmaktadır. Kaplanmış olan T/M parçaları, kaplanan kimyasallar sonrası, olabilecek korozyonu önlemek ve gözenek sızdırmazlığını sağlamak için reçine emdirilmektedir. Ayrıca emdirme işlemi kendinden yağlama yeteneği kazandırmasının yanı sıra mekanik özelliklerde ve basınç sızdırmazlığında gözeneklerin kapatılarak aşındırıcı tuzların girişini önleyen kaplama ve işlenebilirlik iyileştirilmesine katkı sağlar [84].

Öte yandan; yağlayıcı özelliğe sahip polimer malzemelerin metal yüzeylerine kaplanmasında kullanılan kaplama teknikleri olarak (a) daldırma metodu, (b) sprey kaplama metodu, (c) merdane çekerek ve fırçalayarak yapılabilmektedir. Isıtılmış metal yatak malzemesi, plastiklerin tozlarının oluşturduğu (PA (Poliamid), PVC (Polyvinylchloride) ve PE (Polietilen), Poliüretan, PTFE (Politetrafloretilen) vb.) akışkan yatağa daldırılması ile kaplanmaktadır. İyi bir yapışma sağlamak için parça daha yüksek sıcaklıklara ısıtılmaktadır.

Kendinden yağlayıcı özelliğe sahip polimer malzemeler arasında korozyona en dirençli olan PTFE'dir. 250°C'ye kadar çözücülere, asit ve alkalilere dayanmaktadır. PTFE, bütün endüstriyel plastikler içinde en geniş çalışma sıcaklık aralığına (- 260°C ila + 270°C) sahip oluşu, kimyasal maddelere dayanımı, bütün katılar içinde en düşük statik ve dinamik sürtünme katsayısına sahip oluşu, kayan/yapışmaz (non-stick) özelliği ve mekanik özelliklerinin yeterli oluşu nedeniyle geniş kullanım alanına sahiptir. PTFE'nin metal yüzeyine spreyle kaplama yöntemiyle uygulanabilirliği endüstriyel alanlarda sıkça görülmektedir.

Günümüzde bronzun sinterlenmesiyle elde edilen gözenekli mikro yapıya katı yağlayıcı olarak PTFE ve PTFE katkıları katı yağlayıcılar kaplanarak/emdirilerek yatak uygulamaları için mükemmel tribolojik özelliklere sahip malzemeler elde edilebildiği gözlenmektedir. PTFE ve PE, POM, PA6, PA66 gibi polimer partikülleri sürtünme katsayısını azalttığından kompozit yüzeyini düşük sürtünme katsayılı duruma getirmek için de kullanılmaktadır [85].

PTFE'nin avantajlarından yararlanmak ve dezavantajlarından sakınmak için, çoğu araştırmacılar ticari dolgulardan yararlanarak tribolojik uygulamalar için PTFE esaslı kompozitler geliştirmişlerdir. (Örneğin; cam fiber, karbon, grafit, bronz ve bazı metal oksitler gibi.) [13, 25, 87]. PTFE'nin belli özelliklerine ilave olarak katkılarıyla birleştirildiğinde aşınma direnci gibi özelliklerinin geliştirilmesinin yanında bu kaplamalar sayesinde, düşük kuru sürtünme katsayısı, sertlik, yüksek gerçek gerilme direnci elde edilebilmektedir. Örneğin; çelik altlık yüzeyine sinterlenen gözenekli bronz yapının gözeneklerine katkıları PTFE kompozit malzemeler doldurularak preslenmiş ve aşırı basınç altında sinterlenmiştir [15]. Seri imalata uygun olarak tasarlanmış bir başka metotta ise çelik altlık malzeme şerit şeklinde tasarlanmış ve yüzeyi kumlama işlemiyle pürüzlendirildikten sonra yatak malzemesine uygun bakır esaslı tozlar çelik altlık malzemesinin yüzeyine yayılmış ve ardından sinterlenmiştir. Sinterleme işleminden sonra ise haddelendirme işlemine tabi tutulmuştur. yatak malzemesi imalatı için hazırlanmış şerit malzeme yüzeyine bakır esaslı malzeme sinterlenerek elde edilen bimetal malzeme yüzeyi daha sonra spreyle kaplama yöntemiyle polimer katkıları kompozit malzemelerle kaplanmıştır. Yüzeyi kendinden

yağlama özelliğine sahip “POM, POM + Pb, PTFE, PTFE + grafit, PTFE + Pb, PTFE+ PA, PTFE + MoS₂ gibi”, katı yağlayıcılarla kaplanmış bu yataklar makine ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [87].

PTFE, düşük yük ve hızlarda yalnız başına veya aşınma ve yük altında deformasyona karşı direncini artırmak, termal genleşme ve katsayısını düşürmek, termal ve elektriksel iletkenlik gibi özellikler kazandırmak amacıyla cam elyaf katkılı, karbon katkılı, bronz katkılı kompozit bir malzeme şeklinde üretilerek de kaymalı yatak malzemesi olarak kullanılmaktadır. Öte yandan, PTFE yapışmaz kayma özelliklerine sahip bir malzeme olduğundan farklı kaplama teknikleri ile (elektro depolama, ultrasonik emdirme teknikleri ile Al₂O₃, CaF₂, talk partikülleri ve pirinç ile birlikte grafit ve bronz alaşımlarının kaplanması) ilgili çalışmalar da mevcuttur [25, 86, 88].

2.3.4. Literatür taraması

T/M yöntemiyle üretilen gözenekli bronz malzemelerin yatak malzemesi olarak kullanımı ile ilgili yıllardır birçok çalışma yapılmıştır. Son yıllarda mühendislik polimerlerinin de yatak malzemesi olarak gerek doğrudan gerekse bronz malzemelerle birlikte kullanılarak bu malzemelerin optimizasyonu ve geliştirilmesine dair çalışmalara halen devam edilmektedir. Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan malzemeler, yöntemler, seçilen parametreler ve incelenen özellikler açısından daha önceden literatürde yapılmış çalışmalar hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Jabur [89], T/M yöntemiyle ürettiği CuSn8 bronz malzemenin gözeneklerine proses şartlarının etkisini incelemiştir. Numunelerin üretiminde düzensiz şekilli 53- 212 µm, 250 - 500 µm ve 500 - 710 µm tane boyut dağılımına sahip bronz tozları ile % 0,7 sentetik balmumunu karıştırarak 200 - 500 MPa kalıpta sıkıştırmıştır. Elde edilen ham numuneleri 450 °C ön sinterleme ve 20 dk ve 700, 800, 850, 900 °C sinterleme sıcaklıklarında argon atmosferi altında ve farklı sinterleme sürelerinde (15 - 60 dk) gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucunda, sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme zamanının artmasıyla görünür porositenin azaldığını ve kütle yoğunluğunun arttığını belirlemiştir. Sinterlenmiş gevşek numunelerin görünür

porozitesini % 50 - 60 ve sıkıştırılmış numunelerin porozitelerini de % 20 - 30 aralığında tespit etmiştir.

Nenakhov ve Kostornov [90] yaptıkları çalışmada atomize küresel olmayan bronz tozu tane büyüklüğünün ve sıkıştırma basıncının sinterlenmiş malzemelerin gözenekliliğine ve gözenek boyutuna etkisini incelemişlerdir. Ham numuneler ≤ 63 μm , 63 - 100 μm , 100 - 160 μm ve 160 - 200 μm tane boyutlarında 100 - 700 MPa sıkıştırma basınç aralıklarında üretmişler ve 770, 780, 800, 820, 840, 860 °C sıcaklıklarında sinterlemişlerdir. Bronz yapıların maksimum porozite ve mukavemete ulaşmasındaki optimum sinterleme sıcaklığını belirlemişlerdir. Yağ ve polimer emdirdikleri sinterlenmiş bronz yapıların kuru şartlar altındaki sürtünme katsayılarını belirlemişlerdir. Deneyler sonucunda, optimum sinterleme sıcaklığını tane boyutu ≤ 63 μm için 770 - 780 °C, 63 - 100 μm için 780 - 800 °C, 100 - 160 μm ve 160 - 200 μm numuneler için ise 820 - 840 °C olarak tespit etmişlerdir. Yükün artmasıyla sürtünme katsayısının azaldığını ve optimum antisürtünme özelliklerini genel olarak porozite oranı % 35 - 40 ve tane boyutu 63 - 100 μm olan numunelerden elde etmişlerdir.

Ünlü ve ark. [91], T/M yöntemiyle üretilmiş CuSn10 bronz radyal yatağın, 10 ve 20 N yük, 750 d/dk ($v = 0,392$ m/s hız, 3532,5 m kayma mesafesi) ve 1500 d/dk ($v = 0,785$ m/s hız, 7065 m kayma mesafesi) hızlarda, kuru ve yağlı (yağlayıcı olarak SAE 90 dişli yağı) ortam şartlarında ve 2,5 saat süren deneylerle sürtünme katsayısını belirlemişlerdir. Yük ve hızın artmasıyla yatak sıcaklığının arttığı, sürtünme kuvvetinin ise sürenin artmasıyla kararlı hale geldiğini tespit etmişlerdir. En yüksek sürtünme katsayısı (0,6 - 0,9) ve aşınma kaybı kuru ortam şartlarındaki deneylerde elde ederken en düşük sürtünme katsayısı (0,05 - 0,1) ve aşınma kaybı yağlı ortam şartlarındaki deneylerde elde etmişlerdir. Kuru ortamda yapılan deneylerde yük ve hızın artmasıyla sürtünme katsayısının arttığını yağlı ortam deneylerinde ise yükün artmasıyla film kalınlığının azalmasından dolayı arttığını belirtmişlerdir.

Duran [92] tez çalışmasında, 45 µm çapındaki ve % 90 Cu % 10 Sn kompozisyonundaki tozlardan toz metalürjisiyle ticari olarak üretilmiş sinter bronz yatakların sürtünme katsayısı, aşınma özellikleri ile yorulma davranışının tespiti için deneyler yapmıştır. Deneyleri 1000 çevrim yaklaşık 3,5 saat boyunca ± 250 N yük ve 1000 d/dk hız, ± 350 N yük ve 830 d/dk hız, ± 200 N yük ve 1200 d/dk hız olan yatak test şartlarında gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucunda ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla, 0,121 – 0,136, 0,085 – 0,125 ve 0,094 – 0,137 aralıklarında aşınma kayıplarını 8 - 9 mg, 12 - 14 mg ve 7 - 8 mg olarak ve maksimum sıcaklığı 35 - 40 °C aralığında bulmuştur. Deney şartlarının sınır veya karışık film sürtünme bölgesinde olduğunu yatak ile mil yüzeyi arasında tam sıvı filmin oluşmadığını tespit etmiştir.

Ünlü ve ark. [93], T/M yöntemiyle üretilmiş bakır esaslı CuSn10 bronzu ve demir esaslı Fe-Grafit yatak ile döküm yöntemiyle üretilmiş bakır esaslı CuSn10 bronzu ve demir esaslı Fe-C yatakların mikro yapı, aşınma ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve birbiriyle karşılaştırmışlardır. Deneyleri radyal kaymalı yatak aşınma test cihazında 20 N yükte, 1500 d/dk (0,785 m/s) da, karşı aşındırıcı SAE 1050 çelik mil kullanarak 2,5 saat süresince yağlı ortam şartlarında (yağlayıcı olarak SAE 90) gerçekleştirmişlerdir. En düşük sürtünme katsayısını (0,01 – 0,02) T/M bronz yatağın, en yüksek sürtünme katsayısını (0,8 – 0,9) ise döküm bronz yatağın sürtünme katsayısı olarak bulmuşlardır. Yatak sıcaklıklarını birbirine yakın ve en yüksek (48 – 52 °C) döküm bronz yatak iken en düşük (42 – 44 °C) döküm demir yataktır. Yatak ağırlık kayıplarının ise en yüksek döküm (12 - 13 mg) bronz yatağın iken en düşük (1 - 2 mg) döküm demir yatağın olduğunu tespit etmişlerdir.

Ünlü ve ark. [94], radyal kaymalı yatak aşınma deney düzeneğinde Saf Cu, Sn, Zn malzemeleri karşı aşındırıcı olarak kullandıkları SAE 1050 çelik mile karşı 2,5 saat boyunca aşındırmışlardır. Deneyleri yük 20 N, devir sayısı 1500 d/dk yağlı ortam şartlarında (yağlayıcı olarak SAE 90 yağı) gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonunda, Saf Cu'dan üretilen numunelerde, Sn ve Zn göre daha büyük sürtünme katsayısı (0,08 – 0,1) ve yatak sıcaklığı (40 - 45 °C) değerlerini bulmuşlardır. Ağırlık kaybının ise en fazla Sn'de en az ise Cu ve Zn'de olduğunu tespit etmişlerdir. Bu

malzemelerin mukavemet değerlerinin düşük olması nedeniyle uygulamada sınırlı kullanım alanı olduğunu ve yatak malzemesinde tercih edilmediklerini belirlemişlerdir. Cu içerisine belirli oranlarda Zn ve Sn alaşım elementlerinin katılarak mukavemet değerleri yüksek olan bronz ve pirinç yatakların üretildiğini belirtmişlerdir.

Ünlü ve ark. [95] yaptıkları çalışmada ise; kalay kurşun esaslı SnPbCuSb (beyaz metal) alaşımından ve bu malzemelerin esasını oluşturan saf Sn, Pb ve Cu dan üretilen kaymalı yatakların sürtünme ve aşınma özellikleri belirlemişler ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Karşı aşındırıcı olarak SAE 1050 çelik mil kullanmışlardır. Deneyleri, radyal kaymalı yatak aşınma deney cihazında 20 N yük, 1500 d/dk ve 2,5 saatte yağlı ortamda (yağlayıcı olarak SAE 90 yağı) yapmışlardır. Sonuç olarak, saf Sn, saf Pb ve SnPbCuSb yatak numunelerinin sürtünme katsayılarını (0,01 – 0,03), ve yatak sıcaklıklarını (37 - 40 °C) yaklaşık olarak birbirlerine yakın ve düşük değerlerde bulmuşlardır. Saf Cu yatak numunesinin ise sürtünme katsayısı (0,08 – 0,1) ve yatak sıcaklığını (42 – 44 °C) diğerlerine göre daha yüksek değerlerde tespit etmişlerdir. En düşük yatak ağırlık kaybını saf Cu ve SnPbCuSb alaşımly yatakta ve en fazla yatak ağırlık kaybının ise Saf Pb yatakta elde etmişlerdir.

Gao ve ark. [96], yatak uygulamaları için ön alaşımlandırılmış 10 µm toz tane boyutuna sahip CuSn10 kalay bronz ve katkı malzemesi olarak 20 µm tane boyutlu T-401 tribo alaşım tozun ilavesiyle termal sprey tekniğiyle orta karbonlu AISI 4340 çelikten yapılmış burcun içyapısına 580 µm kaplama kalınlığında kaplanmışlardır. Karşı aşındırıcı olarak kullanılan taşıyıcı, AISI 9310 alaşımly çelikten yapılmıştır. Karşılaştırma için AISI 1015 düşük karbonlu altlığa kaplanmış kurşunlu kalay bronzlu burç numunesini kullanarak elde ettikleri bu kompozit kaplı numunelerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerde her iki numuneden de iki tane olmak üzere, taşıyıcı hızı 9 m/sn ayarlanmış ve başlangıçta 1 N olmak üzere her 2 dakikada bir kademe (1 N) olmak üzere 50 N'a kadar uygulamış ve sürtünme katsayısı 0,5'e ulaştığında deneyi sonlandırmışlardır. Deneyler sonucunda T-401/CuSn10 kaplı bronz burcun, kurşun/CuSn10 bronz kaplamaya göre daha düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Zeren ve ark. [97], iki farklı kalay esaslı malzemenin SAE12 (% 7 Sb) ve Sn-Sb-Cu alaşımı (% 20 Sb) olan yatak malzemelerinin kuru kayma şartlarındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyle karşı aşındırıcı olarak mil malzemesi AISI 440C paslanmaz çelik kullanarak 115 N yük, 750 dev/dk hız ve 120000 m kayma mesafesinde gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, Sb oranı fazla olan Sn-Sb-Cu alaşımının aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı Sb oranı daha düşük SAE12 yatak malzemesinden daha düşük bulmuşlardır. Bu durumu Sn-Sb-Cu alaşımındaki Sb miktarındaki artışa bağlamışlardır.

Khoddamzadeh ve ark. [98], yeni PTFE esaslı kompozit malzemeyi kayar yatak uygulamaları için geliştirmişlerdir. Katkı malzemesi olarak kullandıkları yeni geliştirilmiş T-401 alaşımı, geleneksel katkı malzemeleri bronz, karbon fiber ve grafit ile karşılaştırmışlardır. Farklı katkı oranlarında hazırladıkları numuneleri basınç altında kalıplama tekniğiyle basmışlar ve numune boyutu ve katkı oranını dikkate alarak 360, 370 ve 375 °C sıcaklıkta sırasıyla 2,1, 2,5 ve 3,4 saatte sinterlemişlerdir. Daha sonra üretilen numunelerin sürtünme ve aşınma deneyleri pin-on disk tribometer vasıtasıyla 10 N yük, 0,1 m/s hız ve 500 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda, en düşük sürtünme katsayısı A (ağırlıkça % 100 PTFE) numunesinde 0,101 olarak ve en yüksek sürtünme katsayısı H numunesinde (ağırlıkça % 41 PTFE + % 12,5 T-401 + % 40 bronz + % 1 karbon fiber + % 5,5 grafit) bulmuşlardır. En fazla aşınma oranını ise A numunesinde bulurken en düşük aşınma oranını ise F numunesinde (ağırlıkça % 40 PTFE + % 15 T-401 + % 45 bronz) tespit etmişlerdir.

Muterlle ve ark. [99], gözenekli sinterlenmiş bronz-grafit kompozitin kuru kayma aşınma davranışını incelemişlerdir. Deneyle farklı yükler (30, 50, 80 ve 100 N) ve iki hızda (0,314 ve 0,838 m/s) 5 saat boyunca disk on disk aşınma deney cihazında kuru kayma şartlarında gerçekleştirmişlerdir. Aşındırıcı disk olarak AISI M2 takım çeliği seçmişlerdir. Kuru kayma aşınmasını, katı yağlayıcı (SL) ve transfer (T) ve adesif aşınma (W) olarak üç adıma ayırmışlardır. Deneyler sonucunda grafitin sürtünme ve aşınmayı azaltan katı yağlayıcı olarak katkı sağladığını belirlemişlerdir.

SL adımı hem yük hem de hızın artmasıyla katı yağlayıcı etkisinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Düşük kayma hızı ve yüklerde transfer gerçekleşmemiştir. Genel olarak yük ve hızın artmasıyla sürtünme ve aşınmanın arttığını tespit etmişlerdir.

Jia ve ark. [100], T/M yöntemiyle üretilmiş bronz-grafit kompozit numunelerin Ağ (%) 85 Cu, 7 Sn, 8 grafit) ring on blok test cihazında 100, 200, 300 ve 400 N yüklerde ve 0,53 ve 1,06 m/sn hızlarda 120 dk boyunca, su altında ve kuru kayma şartlarında sürtünme ve aşınma davranışlarını belirlemişlerdir. Deneyler sonucunda, kuru kayma şartlarındaki sürtünme katsayısının (0,21 – 0,28) su ortamında yapılan kayma testinden elde edilen sürtünme katsayılarına (0,25 – 0,32) göre düşük değerlerde bulmuşlardır. Aşınma değerlerini ise, 100 ve 200 N yükte kuru kayma şartlarında, su ortamında yapılan kayma testlerine göre daha yüksek aşınma değeri elde ederken 500 N yükte bu aşınma değerleri birbirine yakın değerler elde etmişlerdir.

Equey ve ark. [101], kurşun katkılı ve katkısız kalay bronzlarının kuru şartlar altındaki sürtünme ve aşınma davranışlarına yüzey pürüzlülüğü ve alaşım mikro yapısının rolünü incelemişlerdir. Deneyler 0,5 m/s hız, 2 N ve 5 N yük, 500 m kayma mesafesinde bal on disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı olarak 100Cr6 çelik bilya malzeme ve numuneler olarak döküm yoluyla üretilmiş ince dentritli CuSn10Pb10 alaşımı Br1, 580 °C' de 1 saat ısıl işlem uygulanmış kaba dentritli CuSn10Pb10 alaşımı Br2 ve 600 °C'de 2 saat tavllanmış CuSn8 alaşımı Br3 bronz diskleri kullanmışlardır. Deneyler sonucunda, kurşunsuz Br3 alaşımı yüksek sürtünme katsayısı ve aşınma oranı gösterirken, Br1 alaşımı düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Ünlü ve ark. [102], PE, PA, POM, PTFE ve Bakalit malzemelerden imal ettikleri kaymalı yatakları, 0,13 m/s (250 dev/dk) kayma hızında, 20N yük altında ve 1177,5 m kayma mesafesinde 2,5 saat süresince kuru ortam şartlarında kaymalı yatak test cihazında test etmişlerdir. Aşındırıcı mil malzemesi olarak SAE 1050 çelik kullanmışlardır. Aşınma testleri sonrası sürtünme katsayılarını 0,15 - 0,25 aralığında ve yatak sıcaklıklarını 30 - 35 °C' de bulmuşlardır. Bakalit ve PTFE' nin sürtünme katsayısını en düşük iken, PE' nin sürtünme katsayısı ise en yüksek değerde tespit

etmişlerdir. En yüksek aşınma oranının saf bakalitde ve en düşük aşınma oranının ise POM'da olduğunu belirlemişlerdir. Yüzey pürüzlülüklerinin PE ve PA'de arttığını POM, PTFE ve bakalit malzemede ise azaldığını tespit etmişlerdir.

Feyzullahoğlu ve Şafak [103], POM (Derlin), PETP, Döküm polyamid, Devateks (PTFE + polyester + Cam elyaf katkılı epoxy) malzemelerden imal edilmiş kaymalı yatakların aşınma davranışlarını kaymalı yatak test cihazında 0,5, 1, 1,5 ve 2 m/s hızlarında, 60, 80, 100, 120, 140, 160 ve 180 N yükler altında test etmişlerdir. Aşındırıcı malzeme olarak AISI 440C kullanmışlardır. Numunelerde kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısının arttığını ve kayma mesafesi arttıkça da sıcaklık artışıyla birlikte sürtünme katsayısının da arttığını gözlemlemişlerdir.

Cong ve ark. [104] yaptıkları çalışmada, PA66, PPS ve PTFE termopolimerden üretilmiş pim şeklindeki malzemeleri, aşındırıcı yüzey olarak aynı malzeme kullanarak kuru sürtünme şartlarında "pin on disk" pim üzeri disk test cihazında polimer aşınma davranışlarını test etmişlerdir. Polimer aşınma davranışlarını incelemelerindeki amaç, polimer malzemelerin metaller ile eş çalışma durumlarında, polimer tarafından metal yüzeye sıvayan polimerin etkisini görmek olmuştur. Deney 0,5 - 1, - 1,5 ve 2 N yüklerde ve 0,2 m/s kayma hızda gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda, en düşük sürtünme katsayısı PTFE' de olup, en yüksek sürtünme katsayısı ise PPS' de görülmüştür. Üç farklı termoplastik malzemede de uygulanan yük arttıkça sürtünme katsayısı düştüğünü tespit etmişlerdir.

Ünal ve ark. [105] yapmış oldukları çalışmada, PTFE, %17 cam elyaf takviyeli PTFE, % 25 bronz takviyeli PTFE ve % 35 cam elyaf takviyeli PTFE' den imal edilmiş pimlerin, kuru aşınma şartları altında "pin on disk" pim üzeri disk test cihazında test etmişlerdir. Deney şartları olarak kayma hızlarını 0,32, 0,64, 0,96 ve 1.26 m/s, uygulanan yükleri 5, 10, 15 ve 20 N ve test süresini ise 1 saat olarak seçmişlerdir. Aşındırıcı malzeme olarak AISI 440C kullanılmışlardır. Deney neticesinde en düşük sürtünme katsayısını %17 cam elyaf takviyeli PTFE verirken, devamında % 25 bronz takviyeli ve % 35 karbon elyaf takviyeli PTFE gelmiştir. En yüksek sürtünme katsayısını katkısız PTFE olarak tespit etmişlerdir.

Duman [106] yapmış olduğu tez çalışmasında, teflon – bronz tabakası içeren polimer kaymalı yatakların yorulma özellikleri, değişik form, büyüklük ve frekansta dinamik yük uygulayabilen bir kaymalı yatak deney düzeneği yardımıyla deneysel olarak incelemiş ve yatakta oluşan basınç dağılımlarını tespit etmiştir. Yorulma açısından önemli olan teflon bronz tabakasının yüzeyi ile bu tabakanın çelik destek tabakasının birleştiği yüzeyi inceleyerek, gerilim dağılımları açısından en kritik bölgenin teflon – bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyi olduğunu tespit etmiştir.

Tevrüz [18] yapmış olduğu çalışmada, % 60 bronz katkılı PTFE kaymalı yatakları aşınma davranışlarını araştırmıştır. Daha önceden cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kaymalı yataklar ile yapmış olduğu deneyler neticesinde elde ettiği sürtünme katsayısı değerleri ile mukayese etmiştir. Tevrüz çalışmasında deneylerini iki grupta yapmıştır. Birinci grupta yüklerin ve hızın tribolojik davranışlara olan etkisini incelerken, ikinci grupta, kayma mesafesinin ve kayma zamanının tribolojik davranışa etkisinin incelemiştir. % 60 bronz katkılı PTFE kaymalı yatakları incelerken aşındırıcı olarak AISI 440C paslanmaz çeliği kullanılmıştır. Deneylerde, yük uygulanmadan kaymalı yatağın sürtünme katsayısının hızla yükseldiğini ve yaklaşık 33 saat sonra da sürtünme katsayısındaki artışın durarak kararlı bir hal aldığını tespit etmiştir. Yatağa basınç uygulandıktan sonra ise sürtünme katsayısının düştüğünü ve hızının artırılmasıyla da sürtünme katsayısının artış gösterdiğini tespit etmiştir. Sonuç olarak, % 25 cam elyaf takviyeli PTFE ile % 60 bronz dolgulu PTFE kaymalı yatakların sürtünme katsayılarının birbirine yakın, %35 karbon elyaf takviyeli kaymalı yatakların sürtünme katsayısının ise diğer yataklardan 0,9 kat daha az olduğunu tespit etmiştir.

Kukureka ve ark. [107], % 20 aramid , %30 karbon ve% 30 cam elyaf takviyeli PA66 ve saf PA 66'nın yuvarlanma kayma aşınma davranışlarını tespit etmişlerdir. Aşınma deneylerini 50 - 300N yüklerde ve 1000 d/dk hızda yuvarlanma-kayma (Rolling-sliding) test cihazında gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde sürtünme katsayılarını, saf PA 66 için 0,3 – 0,45, % 20 aramid elyaf takviyeli PA 66 için 0,2 – 0,35, % 30 karbon elyaf takviyeli PA 66 için 0,2 – 0,3 ve % 30 cam elyaf takviyeli

PA 66 için 0,1 – 0,15 aralıklarında olduğunu belirlemişlerdir. % 30 cam elyaf takviyesinin matris malzemenin erime sıcaklığına kadar katılığını, kararlı bir şekilde ısıl ve boyutsal olarak koruyarak sürtünme katsayısının ve aşınma oranının düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Tevrüz [108], % 35 karbon elyaf takviyeli PTFE kaymalı yatakların aşınma davranışlarını kaymalı yatak test cihazında incelemiştir. Deneyleri iki aşamada yaparak, ilk aşamada hızın ve yükün aşınma davranışına olan etkisini incelerken, diğer aşamada kayma mesafesinin aşınma davranışına etkisini incelemiştir. Deneyler sonucunda, % 35 karbon elyaf takviyeli PTFE kaymalı yatakların, sürtünme katsayısının saf PTFE'nin sürtünme katsayısına oranla 1,2 – 1,6 kat daha iyi aşınma gösterirken, % 25 cam elyaf takviyeli PTFE kaymalı yataklardan ise 1,1 kat daha iyi aşınma davranışı gösterdiğini tespit etmiştir.

Temiz [109] yapmış olduğu çalışmada, çeşitli polimer malzemelerden imal edilmiş kuru sürtünmeli radyal kaymalı yatakların çelik malzeme ile es çalışmasında, kuru sürtünme şartlarında sürtünme ve aşınma özelliklerini kaymalı yatak test cihazında deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada yatak malzemesi olarak, polioksimetilen (POM), döküm polyamid (PA6), çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (YYP), politetrafloretillen (PTFE) + % 15 cam elyaf, PTFE + % 25 karbon, PTFE + % 35 karbon, PTFE + % 40 bronz ve PTFE + % 60 bronz kullanılmış ve çelik ile temaslarındaki sürtünme katsayısı, aşınma miktarları ve yüzeylerindeki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. %15 cam elyaf takviyeli PTFE' de kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısının arttığı, % 25 cam elyaf takviyeli PTFE' de ise kayma hızı arttıkça bazı normal kuvvet değerlerinde sürtünme katsayısının azaldığı gözlemlenmiştir. % 25 karbon elyaf takviyeli PTFE kaymalı yatakta, artan hızla beraber sürtünme katsayısının çok azaldığı, % 35 karbon elyaf takviyeli PTFE kaymalı yatak da sürtünme katsayısındaki artışın ise benzer özellik gösterdiğini tespit etmiştir. %40 ve %60 bronz dolgululu PTFE kaymalı yatakların artan hız ile beraber sürtünme katsayısında yavaş artış olduğunu gözlemlenmiştir. Artan yük ile beraber normal kuvvette % 15 cam elyaf ve % 35 karbon elyaf takviyeli PTFE' de sürtünme

katsayısı azalırken, % 25 cam elyaf ve % 40 ve % 60 bronz dolgulu PTFE ‘de sürtünme katsayısı artmıştır.

Demirci [110] tez çalışmasında, 6 farklı polimer malzemedden (PA 66, PA 6.6, PA6.6 + %30 Cam elyaf, PA 66 + %20 Cam elyaf + %25 PTFE, PA 66 + %18 PTFE, PA 66 + % 25 Cam elyaf + % 3MoS₂) imal edilmiş kaymalı yatakların sürtünme kuvvetleri, sürtünme katsayıları, aşınma miktarları ve yağlama özellikleri farklı 3 hız (0,5, 1 ve 1,5 m/s) ve basınçta inceleyerek aşınma performansları değerlendirmiştir. Cam elyaf takviyesinin kaymalı yataklarda termal iletkenlik, yük taşıma kapasitesi ve aşınma direnci sağladığını tespit etmiştir. Cam elyaf ve MoS₂ katkılı kaymalı yataklarda diğer numunelere göre daha düşük sürtünme katsayısı elde etmiştir. PTFE katkılı kaymalı yataklarda ise 0,5 m/s gibi düşük kayma hızlarında düşük sürtünme katsayısı elde etmiştir. Hızın artması ile sürtünme katsayısında da bir artış olduğunu belirlemiştir.

Wang ve ark. [111], yapmış oldukları çalışmada sırasıyla 50, 7, 50 ve 50 µm, ortalama toz boyutlarına sahip hacimce % 15 MoS₂, grafit, alüminyum, bronz tozu içeren PTFE esaslı kompozitleri sıkıştırma kalıplama yöntemiyle ile basılmış ve sıcaklık prosedürlerine uygun olarak sinterlenerek hazırlanmışlardır. Sinterlenmiş bu numuneleri 100 N normal yük altında 5 dakika boyunca geçiş başına 50 mm kayar mesafe ile 120 devir / dak (0,2 m / s) kayma hızında çift yönlü ileri geri hareket tarzı şeklindeki sürtünme ve aşınma testlerinde (transfer filmleri hazırlamak için) pin olarak kullanmışlardır. Altlık olarak yaklaşık 0,11-0,13µm yüzey pürüzlülüğüne sahip AISI-1045 çelik bar seçmişlerdir. Numunelerin hepsinin transfer filmleri bu metot kullanılarak hazırlanmıştır. Transfer filmlerin tribolojik özelliklerini geçiş başına 17 mm kayma mesafesinde tek yönlü ileri geri sürtünme ve aşınma testleriyle ve karşı aşındırıcı GCr15 çelik bilya kullanarak 0,5 N, 1 N, 2 N, 3 N yük 150 mm/dk kayma hızı şartlarında gerçekleştirmişlerdir. Deneyle sonucunda, PTFE’nin transferi filminin aşınma ömrü, PTFE’ nin karşı aşındırıcı olan çelik yüzeyinde dayanıklı transferi film tabakası oluşturamadığından dolayı kısa olduğunu, ancak kullanılan MoS₂, grafit, alüminyum ve bronz katkı maddeleri etkin ile bir PTFE esaslı kompozit transfer filmin aşınma ömrünün uzatılabildiğini tespit etmişlerdir. Bu durumun stabil

yüzey pürüzlülüğün çukurlarında kalarak kuvvetle yapışan transferi film ve küçük aşınma partikülleri yada ince katkılar sayesinde elde edildiğini vurgulamışlardır. Transfer filmlerin tribolojik özellikleri yük değişimine duyarlı olduğunu ve yükün artmasıyla aşınma ömrünün kısaldığını belirtmişlerdir. En fazla aşınma ömrünü en yüksek yük olan 3 N'da bronz ve grafitte (800 ve 520 devir), en düşük yükte ise MoS₂ ve grafitte (4500 ve 2150 devir) bulmuşlardır.

Conte ve Igartua [112], saf PTFE ve 6 PTFE kompozitin (ağırlıkça PTFE + % 25 karbon, PTFE + % 60 bronz, PTFE + % 15 Grafit, PTFE + % 25 cam fiber, PTFE + % 20 cam fiber + % 5 Grafit, PTFE + % 15 cam fiber + % 3 MoS₂) tribolojik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Deneyler aşınma cihazında, 60 Hz frekans hız ve 2 mm strok olarak 30 saniye 50 N ve ardından 100 N yük uygulanmış 30 dakika boyunca uygulanmıştır. Aşındırıcı olarak CrVNiMo eksenel kayar mil kullanmışlardır. Deneyler sonucunda en yüksek sürtünme katsayısı olarak PTFE + % 60 bronz ve PTFE + % 15 Grafit olan kompozitlerde (0,33), en düşük sürtünme katsayısı olarak da PTFE + % 15 cam fiber + % 3 MoS₂'yi (0,19) tespit etmişlerdir. En yüksek aşınma kaybı olarak ta PTFE + % 60 bronz (13 mg) ve saf PTFE (5,3 mg) diğer kompozitlerin ise birbirine yakın daha düşük değerlerde (0,4 – 1,1) olduğunu bulmuşlardır. Polimer matrisi içinde hem de yumuşak ve hem de sert fazların kullanımını PTFE tribolojik özellikleri geliştiren matrisin, kendini yağlama ve yük taşıma özelliklerini arttırdığını belirtmişlerdir.

Balaji ve ark. [25], CECD (Konvensiyonel Elektrodepolama) ve SCD (Çökeltme vasıtasıyla-depolama) teknikleri vasıtasıyla yumuşak çelik altlık üzerine bronz (bakır ve %10–15 kalay) ve ortalama partikül boyutu 0,3 µm olan PTFE ile hazırlanan PTFE konsantrasyonunun depolanması Bronz-PTFE yağlayıcı kompozit kaplamalar elde etmişler ve tribolojik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Bronz kaplamalar karşılaştırmak için test etmişlerdir Kaplamaların aşınma deneylerini, kuru şartlarda pin on disk aşınma cihazını kullanarak belirtmişlerdir.. Test etmede 6 mm çapında pin, (65 HRC sertlikte % 5 kobalt içeren yüksek hızlı çelik SAE 200) kullanılmıştır. Deneyler sonucunda, PTFE partiküllerini, bronz alaşımları ile hem CECD hem de SCD tekniklerinde başarılı olarak depolayabilmişlerdir. SCD tekniğiyle elde edilen

PTFE' nin miktarı, CECD tekniğiyle elde edilenden daha büyüktür. Bronz-PTFE kaplama, bronz kaplamaya nazaran sertlikte belirgin azalma sergilediğini ve PTFE miktarının artması ile sertliğin kısmen azaldığını tespit etmişlerdir. Bronz alaşımlı kaplama yumuşak yüzeye sahipken, bronz-PTFE kaplama, pürüzleyici olan kaplama banyosundaki PTFE konsantrasyonunun artması ile yüksek pürüzlülüğe sahip olduğunu bulmuşlardır. Bronz-PTFE kompozit kaplamaların aşınma direnci, kuru yağlayıcı olan PTFE partikülleri sayesinde geliştirildiğini, depolamadaki PTFE partiküllerinin artmasıyla aşınma direncinin arttığını ve CECD için elde edilen kompozit kaplamaların aşınma oranı, SCD tekniğiyle elde edilen kompozit kaplamalarınkinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Ghorbani ve ark. [88], CECD (Konvensiyonel Elektrodepolama) ve SCD (Çökeltme vasıtasıyla-depolama) teknikleri ile kaplanmış farklı miktarlarda Grafit partikülleri ihtiva eden ortalama 20 µm grafit-bronz G – CuSn kompozit kaplamaların sürtünme ve aşınma ve özelliklerini incelenmişlerdir. Deneyleri (SAE 52100 çelik) ball on disk aşınma cihazı ile 400 dev/dk daha düşük hızlarda ve 5 kgf ye kadar hidrolik basınç uygulanarak yapmışlardır. Deneyler sonucunda, Bronz-grafit kaplamanın grafit miktarının artması ile sertliğin kısmen azaldığını tespit etmişlerdir. Bronz alaşımlı kaplama yumuşak yüzeye sahipken, bronz- grafit kaplama, pürüzleyici olan kaplama banyosundaki grafit konsantrasyonunun artması ile yüksek pürüzlülüğe sahip olduğunu bulmuşlardır. Kompozit kaplamanın sürtünme katsayısı matristeki grafit ve kalayın içerik miktarına, aşınma testindeki yük, kayma mesafesi ve hızına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Yük, hız ve kayma mesafesinin artmasıyla sürtünme katsayısının azaldığını aşınma kaybının ise arttığını tespit etmişlerdir. Kompozit kaplamanın sürtünme katsayısı (0,37 – 0,18) grafit yüzdesinin (hacimce % 0 - 12) artmasıyla azalmış, aşınma kaybı (2 - 9 mg) ise arttığını ve kalay yüzdesinin (hacimce % 9 - 15) artmasıyla da sürtünme katsayısı (0,32 - 0,24) ve aşınma kaybı (6,8 – 3,4 mg) azaldığını bulmuşlardır. Grafit-bronz kompozit kaplamaların 450 °C'de 2 saat sinterlenmesi sürtünme katsayısı, aşınma direnci ve sertliğini geliştirdiğini saptamışlardır.

Kornopol'tsev ve ark. [15], çelik altlığa sinterlendikleri bronz-pirinç örgü malzemenin gözeneklerine, PTFE ve kurşuna dayanan kompozit toz karışım ile doldurularak, yüksek basınç altında presleyerek 640 - 650 K' de sinterlemiş, antisürtünme ve aşınma direncine sahip metal - PTFE malzeme elde etmişlerdir.

Khoddamzadeh [113], kaymalı yatak uygulamaları için yeni bir grup PTFE esaslı kompozit malzeme geliştirmiştir. Konvansiyonel triboalaşımınla karşılaştırmada, daha iyi elastikiyete sahip olan yeni geliştirilmiş T401 (% 59,8 Co, % 17 Cr, % 22 Mo, % 1,2 Si) triboalaşımınla birlikte, öğütülmüş grafit, kesilmiş karbon fiberler, küresel bronz partikülleri gibi katkıları kullanarak, çeşitli PTFE esaslı kompozit malzemeleri, farklı şekillendirme ve sinterleme çevrimlerinde, basınçlı kalıplama tekniği ile üretmişlerdir. Bu kompozitlerin mekaniksel, tribolojik özelliklerini ve korozyon direncini incelenmişlerdir. Bu özellikleri, katkıların oranı ve cinsinin etkilediğini ve PTFE kompozitlerin aşınma dirençlerinin çok düşük, sürtünme katsayılarının ise saf PTFE' den yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Geliştirdikleri kompozitler arasında % 40 PTFE + % 15 T401 (Co + Cr + Mo + Si) + % 45 bronz karışımın daha iyi bir bileşim özelliği sunduğunu belirlemişlerdir.

Hui Wang ve ark. [114], kendinden yağlamalı anotsal filmi, ultrasonik emdirme ve sonrasında ısıtma işlemiyle alüminyum kaplamışlardır. Kaplamada fosforik asit elektrotuna alüminyumun anotlanması ile ultrasonik emdirmeyi gerçekleştirmişler, böylece alüminyum oksit (alümina) deliklerine bir miktar PTFE dolduğunu ve yüzey sertliğinin ultrasonik zaman içerisinde bir miktar azaldığını tespit etmişlerdir. Sonrasında uyguladıkları ısıtma işlemi, kaplama sertliğini büyük ölçüde artırdığını bulmuşlardır. Böylelikle, bu üretim yöntemiyle, kendinden yağlamalı kaplamaların abrazyon direncini ve aşınma önleyici özelliklerini büyük oranda geliştirebildiklerini göstermişlerdir.

Lewis [16], PTFE emdirilmiş kumaş malzemeyi, kam silindiri ile hidrolik motor pistonlarının ara yüzeylerinde, yüzey katmanı olarak kullanımı için test etmiştir. Testleri standart Bowden & Leben kayar sürtünme test cihazının kullanımıyla yapmıştır. Kumaş malzeme, hali hazırda kullanılan PTFE emdirilmiş sinterlenmiş

bronz malzemeyle hem kuru hem de yağlı ortamda benzer sonuçlar verdiğini bulmuştur.

Dearn ve ark. [115], PA66, PEEK 450G ve PEEK 450CA30 polimer dişli çarkların temas yüzeylerine dört farklı katı yağlayıcı (MoS₂, Grafit, Bor nitrit ve PTFE) kaplama uygulamışlardır. Dişli çarkların birlikte çalıştırıldığı deneyler sonucunda PTFE ve grafitle kaplı numunelerin aşınma kayıpları ve sıcaklık artışlarını diğer kaplamalara göre daha düşük bulmuşlardır. Bu durumun dişli ömrü ve güç iletiminde artış sağladığını vurgulamışlardır.

Nickchi ve Ghorbani [116], Grafit, MoS₂ ve PTFE gibi kendinden yağlamalı partiküller içeren kompozit kaplamaların tribolojik yüzeylerin sürtünme katsayısı azaltmada yaygın olarak kullanıldığından yola çıkarak, elektrodepolanmış bronz-grafit kompozit kaplamaların kaplama parametrelerini ve pin on disk aşınma cihazında sürtünme ve aşınma davranışlarına etkisini ve incelemiştir. Sonuç olarak, kaplamada kullandıkları % 4 - % 18 grafit miktarının sürtünme katsayısını ve malzemenin sertliği azalttığını belirlemişlerdir. En düşük sürtünme katsayısını % 12 grafit miktarında tespit etmişlerdir.

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Bu çalışmada; 100-200 µm tane boyutlarına sahip CuSn11 kalay bronzundan T/M metoduyla gözenekli yatak numuneleri üretilmiştir. Bu malzemelerin gözeneklerine spreyle kaplama metoduyla, PTFE, PTFE + % 10 grafit, PTFE + % 20 grafit katkı polimer olmak üzere üç farklı polimer malzeme emdirilmiştir.

Bronz, bakır (Cu) ve kalayın (Sn) alaşımından meydana gelir. Bakıra ilave edilen kalay miktarı ile bu malzemelerin sürtünme ve aşınma özellikleri iyileşmektedir. Matris malzemesi olarak bakır esaslı CuSn11 kalay bronzunun seçilmesinin nedeni, bakır esaslı malzemelerin korozyon ve aşınma dirençlerinin iyi olması ve yüksek termal iletkenliğine sahip olmalarıdır [6]. Bakır alaşımlarındaki kalayın aşınmayı azaltmada önemli bir etkisinin olması, kalay bronzlarının yüksek aşınma direncine sahip yatak malzemesi olarak kullanılmalarına katkı sağlamaktadır [4,5]. Bu sebeple; yatak malzemesi olarak kullanılan kalay bronzu, sert ve çok yüksek sünekliğe sahip, aşınmaya, deniz suyuna ve korozyona dayanıklı bir malzemedir. Kalay bronzu pompa, türbin pervaneleri, ağır yük ve düşük dönme hızında çalışan yataklar, sonsuz ve salyangoz vida, sonsuz dişli ve kaymalı yataklar için uygundur. Kaymalı yatak beklentilerine uygunluğu ile en yaygın kullanılan malzeme % 90 Cu ve % 10 - 12 Sn içeren kalay bronzudur [117].

3.2. Materyal

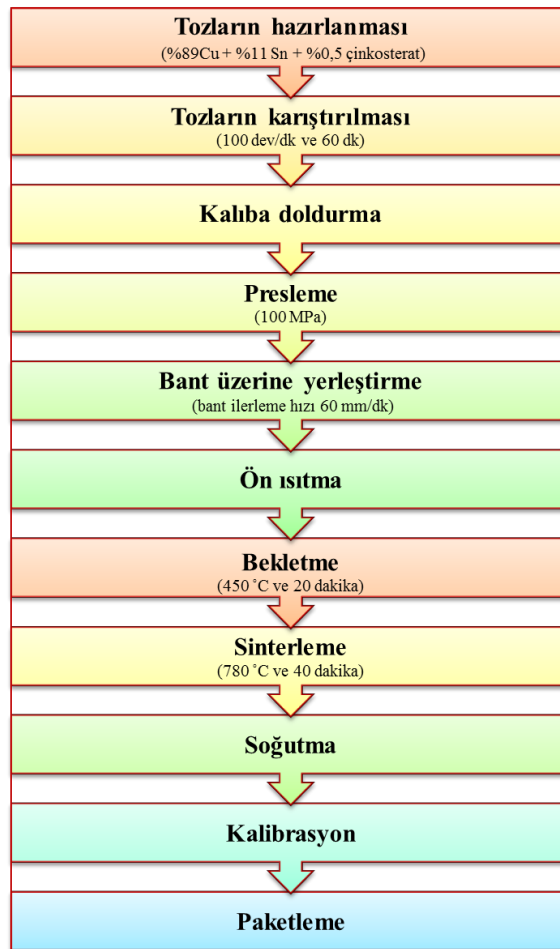
CuSn11 bronzundan sirterleme yöntemiyle üretilen ve deneylerde incelenen yatak burçları aşağıda listelenmiştir.

- a. PTFE kaplanmış yatak burcu
- b. PTFE + % 10 grafit kaplanmış yatak burcu

- c. PTFE + % 20 grafit kaplanmış yatak burcu
- d. Çelik altlıklı, bronz sinterlenmiş PTFE kaplı, ticari yatak burcu

3.2.1. Bronz yatak numunelerin üretilmesi

Deneysel çalışmada; bakır esaslı CuSn11 bronz yatak malzemelerinin üretimi için toz metalürjisi yöntemi kullanılmıştır. Numune üretimi için ticari bir firmadan temin edilen 100 - 200 µm boyutunda küresel tozlar hazırlanmıştır. Belirlenmiş olan numunelere uygun kalıbın teknik resmi çizilerek üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu kalıp prese bağlanarak ham numunelerin üretim işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Ham halde üretilen numuneler özel bir firmanın sinterleme hattında sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi sonrası numuneler kaplama işlemi için hazırlanmış olan polimer malzemelerle özel bir polimer kaplama firmasında, spreycaplama yöntemiyle kaplanmışlardır.



Şekil 3.1. Bronz yatak malzemelerin üretimi ile ilgili işlem adımları

Toz metalürjisi yöntemiyle bronz yatak numune üretiminin karıştırma, presleme, sinterleme ve kalite kontrol olmak üzere 4 ana üniteden oluştuğu bir önceki bölümde anlatılmıştır. Bu bölümde ise bu adımların nasıl gerçekleştirildiği anlatılmıştır. Üretilen gözenekli yatak numunelerin hammaddesi bir Alman firmasından temin edilen Cu89Sn11 küresel bronz tozlarıdır (Şekil 3.2). Tablo 3.1’de Cu89Sn11 küresel bronz tozlarının kimyasal kompozisyonuna ait spektro analiz sonuçları verilmiştir



Şekil 3.2. Cu89Sn11 küresel bronz tozlarının, a) yığın görüntüsü, b) mikro görüntüsü [118].

Tablo 3.1. Cu89Sn11 küresel bronz tozlarının kimyasal kompozisyonu

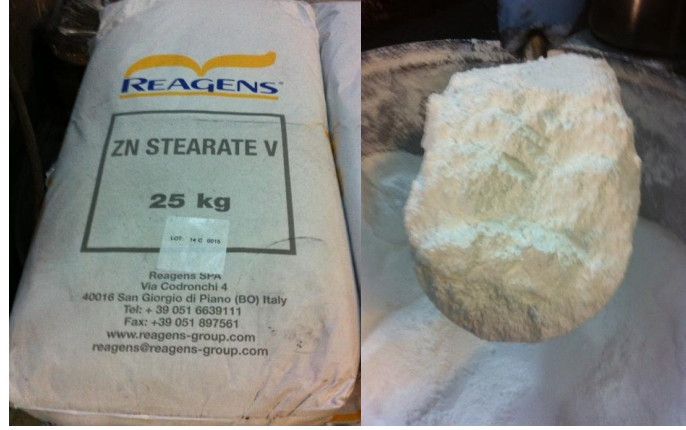
Cu	Si	Zn	P	S	As	Ni	Al	Pb	Sn	Sb	Fe
88,67	0,042	0,015	0,2	0,002	0,002	0,003	0,033	0,004	11	0,012	0,015

Diğer yandan hazır olarak temin edilmiş Cu89Sn11 küresel bronz tozlarıyla karışımı yapılacak kuru organik yağlayıcı olan çinko stearat tozları bir İtalyan firmasından temin edilmiştir. Tablo 3.2’de çinko stearat tozlarına ait teknik değerler görülmektedir.

Tablo 3.2. Çinko stearat tozlarının teknik değerleri

Yağlayıcı adı ve Formülasyonu	Ergime sıcaklığı °C	Buharlaştırma sıcaklığı °C
Çinko Stearat $Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$	140	335

Şekil 3.3’de görülen çinko stearat tozları, presleme işlemi sırasında şekillendirilmenin ve sinterleme işleminde küresel taneciklerarası bağ oluşumunun kolaylaştırılmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.3. Çinko stearat tozu

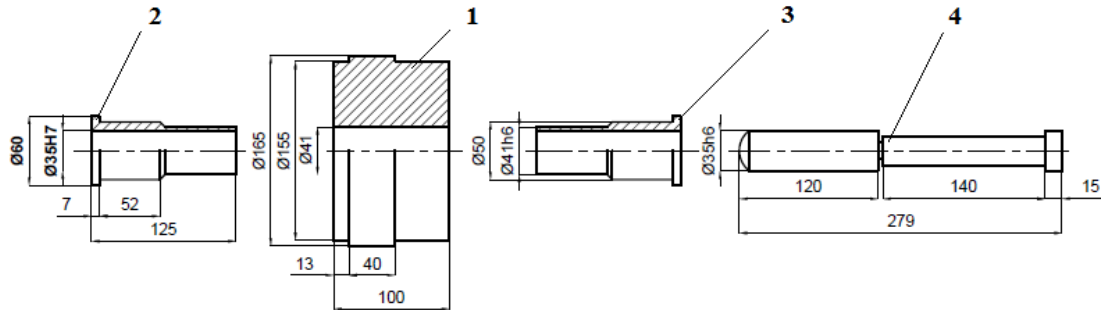
Karıştırma mikserinde küresel bronz tozlarına % 0,5 oranında çinkostreat katılmıştır. Şekil 3.4'de gösterilen mikser, karışımın homojen hale gelebilmesi için 100 dev/dk hızda 60 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Homojen karışım haline gelmiş hammadde presin haznesine doldurulmak üzere bir kapta hazır olarak bekletilmiştir.



Şekil 3.4. Toz karıştırma mikseri

Presleme ünitesinin ilk aşaması hazırlık aşamasıdır. Bir önceki ünite olan karıştırma ünitesinde homojen karışım haline getirilmiş hammadde, presin toz haznesine doldurulmuştur. Daha sonra, gözenekli bronz yatak numunelerinin üretimi amacıyla tasarlanan ve talaşlı imalat yöntemiyle imal edilen numune kalıpları prese bağlanmıştır.

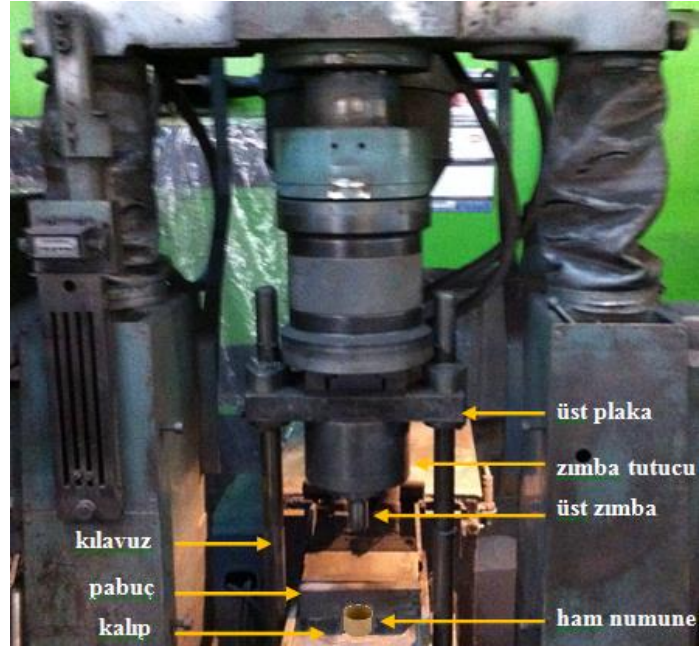
Kalıp elemanları Şekil 3.5’de görüldüğü gibi, (1) kalıp gövdesi, (2) üst zimba, (3) alt zimba ve (4) maçadan oluşmaktadır.



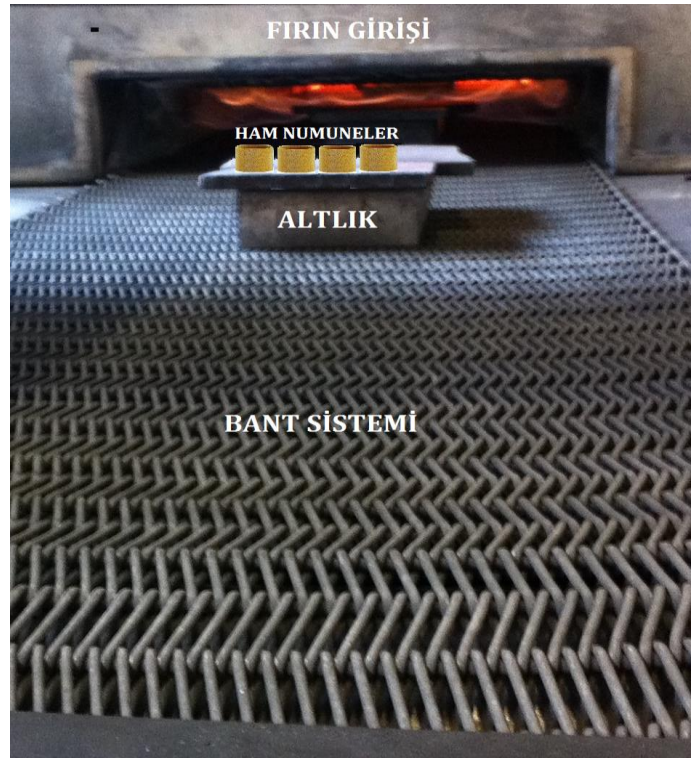
Şekil 3.5. Kalıp setinin teknik resmi.

Presin çalışmaya başlamasıyla birlikte, presin hammadde deposunda bulunan homojen toz karışım, pabucun toz haznesine dolmuştur. Daha sonra, pabucun kalıp boşluğunun üzerine gelmesiyle içerisindeki tozlar kalıp boşluğuna akarak dolmuştur. Pabuç bu işlemi tamamladıktan sonra geri çekilirken üst zimba, kalıp içerisine doğru tozları sıkıştırma işlemi için ilerlemiştir. Burada sıkıştırma işlemi hem bronz tozlarının yumuşak yani düşük sertliğe sahip olması hem de numunelerin gözenekli olması istendiği için 100 MPa basınç basılması tercih edilmiştir. Sıkıştırma işlemi belirtilen basınçta tamamlandıktan sonra üst zimba kalıp içerisinden üst noktaya doğru geri çıkmaya başlamıştır. Sonraki işlemde ise, sıkıştırma işlemiyle kalıbın şeklini alarak üretilmiş ham numune kalıp içerisinden çıkarılmıştır. Şekil 3.6’de bronz tozlarının sıkıştırılarak ham numunelerin elde edildiği pres ve üretim işlemi tamamlanmış ham numune görülmektedir.

Prete basılarak ham halde üretilmiş numuneler sinterleme işlemi için hazırlanmıştır. Sinterleme işleminin yapılacağı fırının bant sistemi Şekil 3.7’de görülmektedir. Sinterleme işlemine başlarken ilk önce numuneler, taşıyıcı bant sistemi üzerine konulan tablanın yüzeyine yerleştirilmiştir. Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra bant sistemi çalıştırılarak hareketi başlatılmıştır. Bant sistemi, sinterleme işlemi boyunca 60 mm/dk hızda hareket ettirilmiştir.



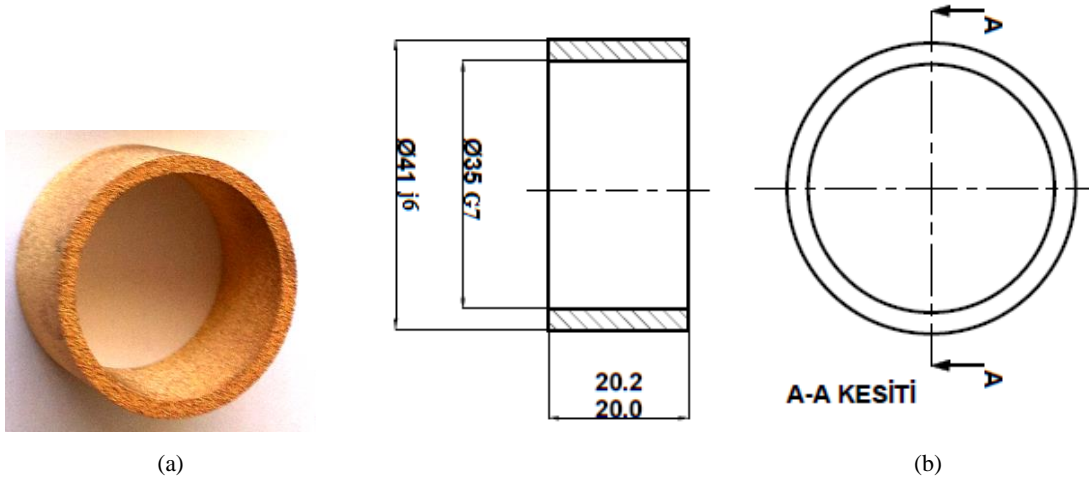
Şekil 3.6. Pres ve üretim işlemi tamamlanmış ham numunenin resmi.



Şekil 3.7. Sinterleme fırını bant sistemi

Sinterleme fırın hattı üç bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler, ön ısıtma, sinterleme ve soğutma bölgesidir. Sinterleme işleminin ilk bölgesi olan ön ısıtma bölgesinde, hammaddenin kalıplama esnasında kolaylıkla şekillendirilmesi ve küresel toz tanelerinin istenilen formda sinterleme şartlarına uygun olarak birbirleriyle kolaylıkla bağ oluşturabilmesine katkı sağlamak amacıyla kullanılan çinko stearat tozlarının uçurulma işlemi için ön sinterleme sıcaklığı 450 °C'dir. Sinterleme bölgesi ise, numunelerin hammaddesi olan küresel bronz Cu89Sn11 tozları dikkate alınarak 780 °C sıcaklığındadır. Sinterleme sırasında oluşabilecek olumsuz reaksiyonları önlemek için, koruyucu olarak hidrojen (H₂) atmosferi kullanılmıştır [77]. Sinterleme hattının üçüncü bölgesi numunelerin ham halden çıkıp bir ürün haline geldiği son bölge olan soğutma bölgesidir. Bu bölgede sinterlenmiş numuneler, hava ile temas ederek oksitlenmelerini önlemek için, 20 – 37 °C sıcaklığında koruyucu atmosfer altında 5 - 10 hertz fan desteğiyle soğumaya bırakılmışlardır. Soğutma işleminden sonra numuneler kontrol işlemi için hazırlanmıştır.

Sinterleme sonrası ürünlerde küçük boyutlu değişiklikler oluşabileceğinden çok yakın toleranslar ile numuneler hazırlanmış malafa yardımıyla boyutlandırılmıştır. Yani, numuneler çap kontrolü için hazırlanmış preste kalıba bağlanarak kontrolden geçirilmişlerdir. Boyutlandırma işleminin tamamlanmasının ardından numuneler sonraki işlem olan kaplama işlemleri için Şekil 3.8'de görüldüğü gibi hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.8. CuSn11 bronz burç, (a) üretim sonu hali, (b) imalat resmi

3.2.2. Gözenekli bronz yatak numunelerinin PTFE kaplama / emdirme işlemi

Bronz yatak numunelerinin PTFE kaplama işlem akışı Şekil 3.9’da verilmiştir. Bronz yatak numuneleri sinterleme metoduyla üretilmiş olmaları nedeniyle gözenekli bir yapıya sahiptirler. Numunelerin gözenekli olması çalışma yüzeylerine yağlayıcı özelliğe sahip polimer bir malzeme olan ve teflon adıyla da bilinen PTFE (Politetrafloretilen)’nin nüfuz edebilmesi açısından avantaj sağlamaktadır.



Şekil 3.9. Bronz numunelerin PTFE kaplama işlem akışı

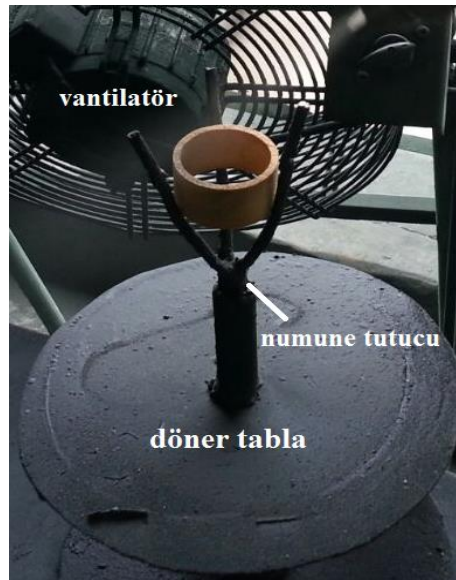
PTFE kaplama işlemine başlamadan önce numunelerin kaplanacak yüzeyi kir, toz vb. gibi kaplamanın yüzeye tutunmasına ve gözeneklere girmesine engel teşkil edecek kalıntılar solvent yardımıyla temizlenmiş ve numuneler kaplamaya hazırlanmıştır. Kaplama işlemine geçilmeden önce uygulanacak hammaddenin ve tabancanın seçimi yapılmıştır. Kaplama işlemi için, PTFE, PTFE+ % 10 Grafit ve PTFE + % 20 Grafit olmak üzere uygulanacak üç ayrı hammadde hazırlanmıştır. Kullanılan PTFE teknik uygulamalar için hazırlanmış ve özel bir ticari firma tarafından üretilmiş olan bir üründür.

Firmadan hazırlanmış olarak gelen hammadde, Şekil 3.10'da görülen ve pulverizasyon yapabilen spreylere kaplama tabancasıyla tatbik edilmiştir. Tabancanın meme çapı 1,8 mm ve çalışma basıncı 3 bar olarak seçilmiştir.



Şekil 3.10. Alttan hazneli spreylere tabanca

Daha sonra numuneler, Şekil 3.11'da gösterilen üç ayaklı döner tablanın üzerine yerleştirilmiştir. Kaplama sırasında döner tablanın dönme hızı 40 dev/dk'dır.



Şekil 3.11. Üç ayaklı döner tabla

Üç ayaklı tabla üzerine sırayla yerleştirilen her bir numuneye sağ yönlü, sol yönlü ve ters çevrilerek ortalama 15'er saniye spreylere kaplama işlemi uygulanmıştır.

Şekil 3.12’de görüldüğü gibi, kaplama işleminde tabanca numuneye 7 - 8 cm uzaklıktan tutulmuştur.



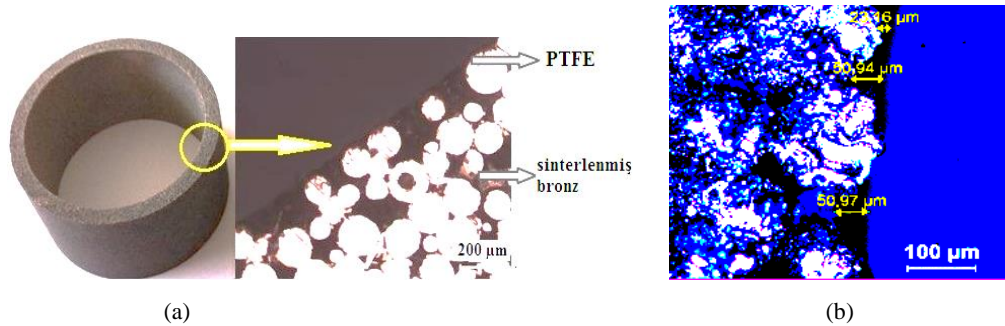
Şekil 3.12. Sprey kaplama işlemi

Kaplama işleminin ilk katı olan bu işlem sonrası, numuneler, hammadde imalatçısının prosedürüne uygun olarak 150 °C sıcaklıkta hazırlanmış Şekil 3.13’de görülen fırında 15 dk süreyle kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem her kat arası uygulanmıştır ve üç adımda yapılmıştır. İlk ikisi kurutma (flash-off), sonuncusu kürlenme (fiksasyon) işlemidir.



Şekil 3.13. Kurutma ve kürlenme fırını

Kurutma işlemi, parçanın bir sonraki işleme hazırlanması yani kısmi kurutma işlemidir. Amacı, hammaddenin içerisindeki kimyasalların (solventin) uçurulması işlemidir. Hammadde imalatçısının prosederüne uygun olarak yapılmaktadır. Son olarak yapılan kütleme işlemi, hammaddenin numune yüzeyine nüfuz ederek tamamen kalıcı hale getirilmesi amacı taşımaktadır. Kütleme işlemi ise, son kattan sonra 400 °C sıcaklıkta hazırlanmış fırında 20 dk süreyle yapılmıştır. Daha sonra numuneler fırından çıkarılmadan oda sıcaklığına düşene kadar kendi halinde soğumaya terk edilmişlerdir. Kaplama sonrası elde edilen CuSn11 bronz numune Şekil 3.14’de görülmektedir.



Şekil 3.14. CuSn11 bronz numune, (a) kaplanmış hali, (b) kaplama kalınlığı

3.3. Yöntem

3.3.1. Taguchi yöntemi ile deneysel tasarım

Yatak burçlarının deneylerinde, parametreler; sürtünme katsayısı, aşınma kaybı ve yatak sıcaklığı olarak seçilmiştir. Tanımlanan parametreler, Minitab programında seçilen deney şartları ve parametrelerin durumuna uygun dizine göre belirlenerek girilmiştir [119,120]. Standart Taguchi yöntemi $L_{27}(3^{13})$ ortogonal dizisinin kullanımı uygun bulunmuştur. Bu dizine uygun olarak yapılması gereken yatak burçlarının deneyleri için oluşturulan dizi Tablo 3.15’de verilmiştir. Minitab programına girilen faktörlerden sonra Taguchi analizine geçilerek, etkileşimler, sinyal/gürültü oranları ve analiz opsiyonları seçilmiştir [121].

Tablo 3.15. $L_{27}(3^{13})$ ortogonal dizisi

$L_{27}(3^{13})$ test	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Taguchi deneysel metodunda kalite karakteristiğini ifade eden sinyal/gürültü oranı bir performans ölçütüdür. Örneğin deneysel durum için alınan 5 adet sıcaklık sonucu tek bir S/N oranı ile ifade edilebilir [121]. Yatak burçlarının deneyleri için uygun olan Taguchi analiz metodu en küçük en iyi (Smaller is better) durumudur.

Çalışmada bu duruma göre analizler yapılmıştır. Yapılan Taguchi analizi metodunda seçilen performans karakteristiğinin, en küçük en iyi durumunun sinyal gürültü oranları verilmiştir.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.1)$$

n : gözlem sayısı

y_i : gözlem değeri

Kaplama işleminden sonra sürtünme ve aşınma deneylerine hazır hale getirilen numuneler, özel olarak tasarlanan kaymalı yatak aşınma deney cihazında 3 farklı hız ve 3 farklı yük altında test edilip sürtünme ve aşınma değerleri incelenmiştir. Üretilen numuneler üzerinde gerekli ölçüm ve kontroller (çap-boyut, dairesellik) yapıldıktan sonra sertlik ve yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Metalografik incelemelerde ise optik ve taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.

3.3.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü bir yüzeyin sürtünme ve aşınma özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biridir [122, 123].



Şekil 3.16. Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı

Deneylerde kullanılan masaüstü yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı (Şekil 3.16), DIN, ISO, JIS, ANSI standartlarına göre çeşitli parametrelere bağlı olarak yüzey pürüzlülük yapısını değerlendirmektedir. Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri dijital

olarak ekranda görülmektedir. Düz ve silindirik gibi farklı yüzey şekline sahip parçaların yüzey pürüzlülük değerlerini ölçerken, 2 µm radüslü ölçüm ucuna sahip elmas uçlu iğnenin bulunduğu dedektör kısmı, sürücü ünitesindeki yuvaya sıkı geçme suretiyle monte edilerek ölçme yapılacak yüzeye paralel konuma getirilmektedir. Destek ayakları kullanılarak sürücü ünitesi ölçüm yapılacak yüzeyin seviyesine göre ayarlanabilmektedir. Dedektörün ucundaki iğne z ekseninde maksimum 350 µm ölçme kursuna (+150 µm /-200 µm; 0,01 µm hassasiyette) ve x ekseninde 17,5 mm tarama boyuna göre hareket edebilmektedir. (1µm = 0,001 mm). Dedektör gidişi 0,5 mm/s, dönüşü 1 mm/s dir (Tablo 3.4).

Tablo 3.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının özellikleri

Model	Mahr (MarSurf PS1)
Ölçme Yöntemi	İzleyici Uçlu (Stylus) Cihazlar Yöntemi
Tarama Hızı	0,5 mm/sn (ölçme yaparken),1 mm/sn (geri dönerken)
Ölçme Kuvveti	4 mN (0,4 gf)
Uç malzemesi	Elmas
Ölçme Sıcaklığı	20°C ± 1 °C
Numune Uzunluğu	0,8 mm
Değerlendirme Uzunluğu	4 mm
İzleyici Uç Yarıçapı	2 µm
Ortalama yüzey pürüzlülüğü	R _a =
On nokta yüksekliği	R _z =
Maksimum pürüzlülük	R _y (µm)

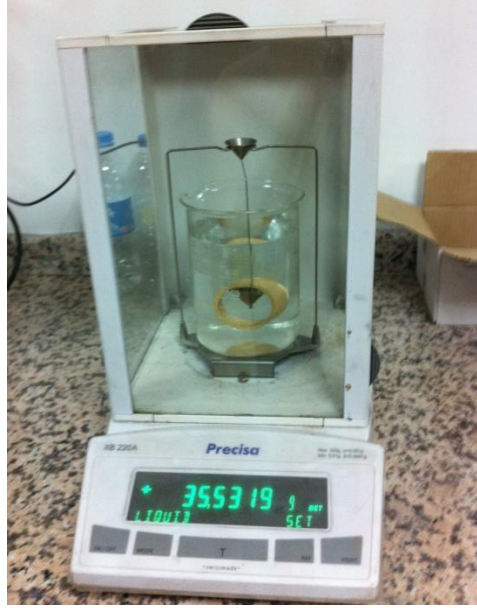
Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yatak numunelerin çalışma yüzeyleri olan iç yüzeylerinden yapılmıştır. Ölçümler numunenin 30 – 45 derecelik açılarda döndürülerek belirlenen en az beş farklı yerden alınmış ve elde edilen verilerin ortalamaları alınarak yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5. Numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

Numune Adı	Yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)
CuSn11 bronz yatak burcu	15,43
PTFE kaplanmış yatak burcu	13,41
PTFE + % 10 grafit kaplanmış yatak burcu	10,32
PTFE + % 20 grafit kaplanmış yatak burcu	9,24
Ticari yatak burcu	0,63
AISI 4140 mil	< 0,23

3.3.3. Yoğunluk ölçümü

T/M yöntemi ile üretilen bronz yatak numunelerinin deneysel ve teorik yoğunlukları ile % porozite miktarları tespit edilmiştir. Deneysel yoğunluk ölçümünde Arşimet prensibi kullanılmıştır. Yoğunluk deneylerinde 0,1 mg hassasiyetli ve 220 g kapasiteli PRECISA XB 220A marka dijital terazi kullanılmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Yoğunluk ölçümünde kullanılan dijital hassas terazi

Numunelerin ağırlıkları kaydedilmiştir. Ağırlık ölçümleri yapılan numunelerin, terazide beher ve içindeki saf su ile beraber önce darası alınmıştır. Numuneler terazideki beher içerisine daldırıldığında ölçülen değer, hacim (suyun kaldırma kuvveti/suyun yoğunluğu) esaslı ile elde edilmiştir. Saf suyun yoğunluk değeri 1 g/cm^3 olarak kabul edildiğinden, numuneler su içerisine daldırıldığında numunenin sahip olduğu hacmi kadar saf suyun beher içine ilave edildiği düşünülür. Böylelikle, teraziden ölçülen ağırlık farkı, numunenin hacmine eşit olmaktadır.

Yoğunluk hesaplamaları aşağıda verilen (3.1) nolu eşitlikle belirlenmiştir.

$$d_b = m_b / V_b \quad (3.1)$$

d_b : Yoğunluk, g/cm^3

m_b : Numunenin ağırlığı, g

V_b : Hacim değişimi, cm^3

Bununla birlikte, denklem'den Numunelerin % porozite miktarları ise aşağıdaki eşitlik (3.2) yardımıyla hesaplanmıştır. Numunelerin yoğunluk değerleri Tablo (3.6)'da verilmiştir.

$$\%P = [(d_{bt} - d_{bd}) / d_{bd}] \cdot 100 \quad (3.2)$$

P : Porozite, %

d_{bt} : Bronz yatak numunesinin teorik yoğunluğu, g/cm^3

d_{bd} : Ölçülen deneysel yoğunluk değeri, g/cm^3

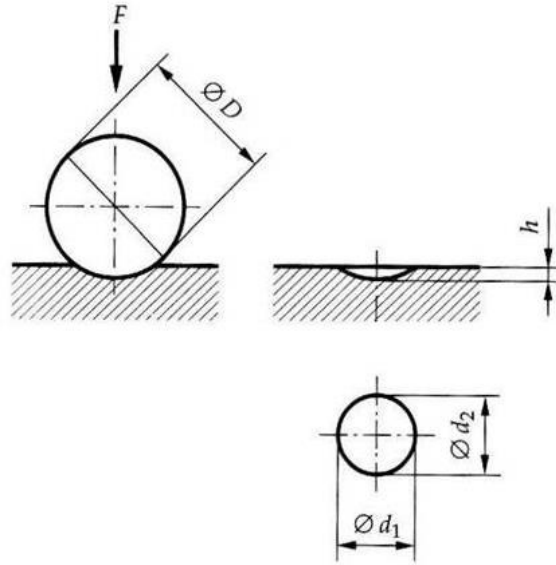
Tablo 3.6. Numunelerin teorik ve deneysel yoğunluk değerleri

Numune Adı	T. yoğunluk (g/cm^3)	D. yoğunluk (g/cm^3)	Porozite (%)
CuSn11 bronz yatak burcu	8,7	5,44	59
PTFE kaplanmış yatak burcu	-	5.68	-
Ticari yatak burcu	-	7,45	-

3.3.4. Sertlik ölçümü

T/M yöntemi ile üretilen bronz yatak numunelerinin sertlik deneylerinde Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, Şekil 3.18'de gösterildiği gibi malzeme yüzeyine belirli bir yük altında, bilya şeklindeki ucun batırılmasıyla sertlik ölçümü yapılır. Brinell sertlik değeri (HB), uygulanan kuvvetin oluşan izin küresel yüzey alanına bölünmesiyle bulunmaktadır.

Brinell sertlik değerinin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir. [124].



şekil 3.18. Brinell sertlik ölçümünün şematik gösterimi [125]

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.3)$$

$$HB = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

$$HB = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h} \quad (3.5)$$

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.6)$$

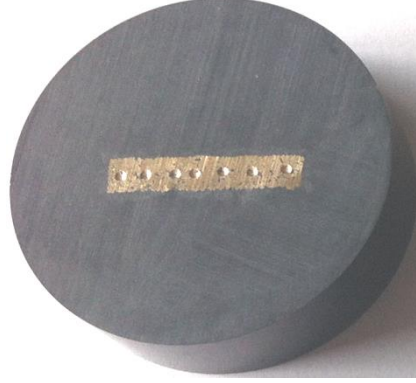
D= Bilya çapı, mm

d= Bilya iz çaplarının ortalaması mm

F= Test yükü, kg

h= Dalma derinliği, mm

Sertlik ölçme işleminin rahatlıkla yapılabilmesi için numuneler bakalit cihazında Şekil 3.19’da görüldüğü gibi bakalite alınmışlardır. Daha sonra numune yüzeyleri ince zımpara ile zımparalanarak temizlenmiştir. Ölçme işlemi için numuneler alt ve üst yüzeyleri paralel olacak şekilde Brinell sertlik deney cihazına konumlandırılmışlardır.



Şekil 3.19. Bakalite alınmış numunenin sertlik ölçümü

Ölçümler Şekil 3.20’de görülen Qness marka Q 250 tipi üniversal sertlik ölçüm cihazı kullanılarak, 62,5 kg yükte ve 2,5 mm çapındaki çelik bilye yardımıyla 30 sn yük uygulanarak yapılmıştır. Batma ucunun oluşturduğu iz çapı mikroskop objektifi aracılığı ile iz çapı “ d_1 ” ve “ d_2 ” olarak ölçülmüş ve eşitlik (3.1) ile ortalama bilye iz çapı ve eşitlik (3.6) ile de Brinell sertlik değeri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar standart tablolar yardımıyla karşılaştırılarak sertlik değerleri belirlenmiştir. Sertlik değerlerinin bulunmasında her bir numune üzerinde beş farklı alanda ölçüm yapılmış ve bu ölçüm değerlerinin ortalamaları hesaplanarak Tablo 3.7’de verilen sertlik değerleri belirlenmiştir [126].



Şekil 3.20. Qness marka universal sertlik ölçüm cihazı

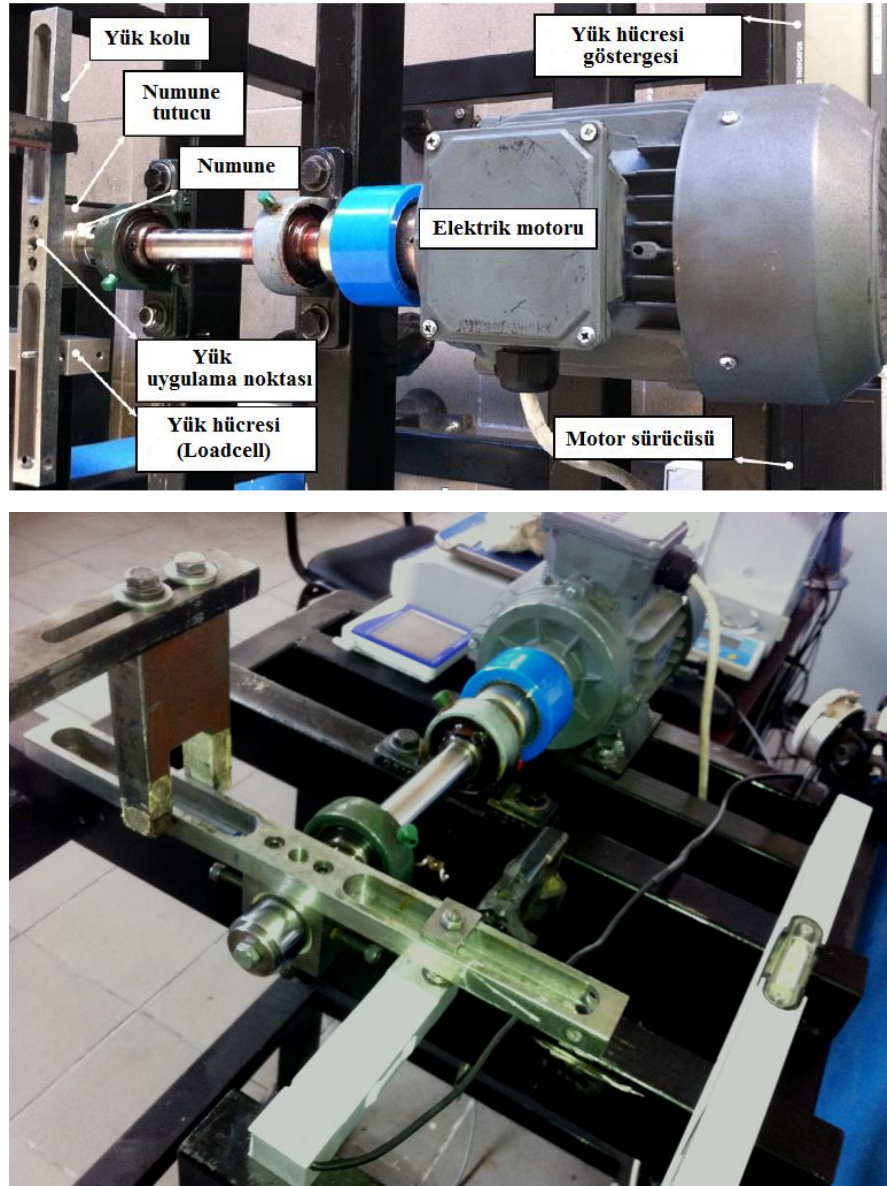
Tablo 3.7. Deneilerde kullanılan malzemelerin sertlik değerleri

Numune Adı	Sertlik (HB)
CuSn11 bronz yatak burcu	35
Ticari yatak burcu	83
AISI 4140 mil	423

3.3.5. Kaymalı yatak sürtünme ve aşınma deneyleri

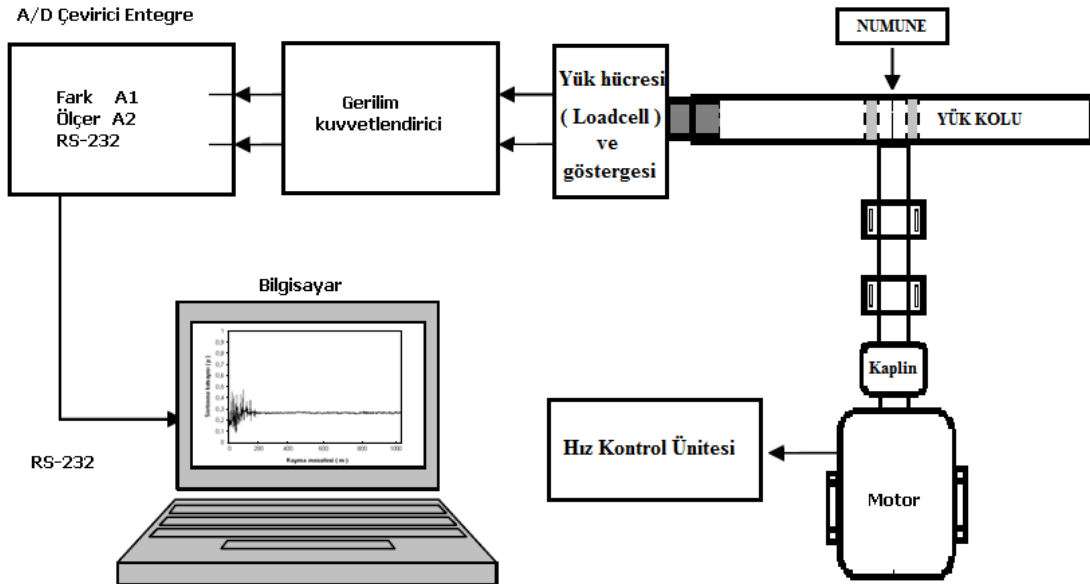
Aşınma deneyleri, Şekil 3.21’de gösterilen kaymalı yatak aşınma cihazında yapılmıştır. Bu yöntemde, dönme hareketi elektrik motoru vasıtasıyla sağlanmaktadır. Tezgâh üzerine yataklanan mil, kaplin aracılığıyla motordaki dönme hareketini almaktadır. Karşı aşındırıcı olarak kullanılacak milin söküp takılabilmesi için tezgâh üzerine yataklanan milin uç kısmı konik imal edilmiştir. Numune tutucu içine yerleştirilmiş yatak numunesi karşı aşındırıcı olarak kullanılan bu milin yüzeyine yataklanarak kayma hareketi sağlanmaktadır. Motora bağlanan hız kontrol ünitesi ile mil hızı 0’den 3000 dev/dk’ya kadar ayarlanabilmektedir. Numune tutucu yük hücreesine (loadcell) temas eden bir kola tespit edilmiştir. Yüklemeler kol

üzerinden ve mekanik olarak yapılmaktadır. Deney öncesi yatağa radyal yönde gelen yük uygulanmış ve dengelenmiştir. Aynı zamanda denge durumu su terazisiyle de kontrol edilmiştir. Deneyin başlangıcında, denge halinde bulunan kol dönme hareketinin başlamasıyla yük hücresine temas ederek kuvvet uygulamaktadır. Yük hücresinden okunan veriler RS-232 bağlantısı sayesinde bilgisayara kurulmuş program yardımıyla alınmıştır. Bilgisayar ortamına aktarılmış olan bu veriler, sistem üzerinden çıkartılan formüller yardımıyla da “excel” programına aktarılarak hesaplanmış ve grafikleri oluşturulmuştur. Deney süresince her 30 dk bir yatak sıcaklığı infrared pirometre yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 3.21. Kaymalı yatak aşınma cihazı

Şekil 3.22’de kaymalı yatak aşınma deney cihazının devre şeması gösterilmektedir. Devre şemasında kaymalı yatak aşınma deney cihazı, hız göstergesi, yük hücresi, gerilim kuvvetlendirici, analog/dijital(A/D) çevirici entegre, monitör ve kasadan oluşan bilgisayar bağlantısı bulunmaktadır.

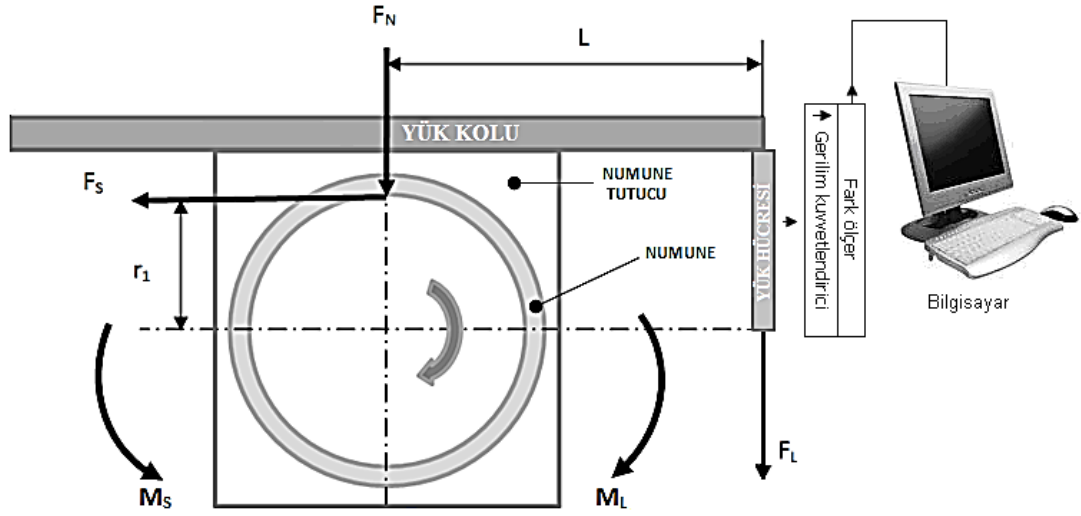


Şekil 3.22. Aşınma cihazının devre şeması

Aşınma deneylerinde karşı aşındırıcı olarak kullanılan milin yüzeyi her deney öncesinde asetonla temizlenmiştir. Aseton ile temizleme numunelerin çalışma yüzeylerine de uygulanarak, çalışma çiftlerinin yüzeylerde gözle görülmeyen toz, yağ, kir ve lekelerin ortamdaki uzaklaştırılması amaçlanmıştır. Deneylerde kullanılacak olan yatak numunelerinin aşınma deneyleri öncesi ilk ağırlıkları ve aşınma sonrası son ağırlıkları ölçülmüştür. Ölçümler kapalı ortamda yapılmış ve en az üç kez ölçüm alınıp doğruluğu saptanarak kaydedilmiştir. Yatak numuneleri numune tutucunun yuvasına oturtularak karşı aşındırıcı mil yüzeyine düzgün bir şekilde temas etmesi sağlanmıştır.

Sürtünme katsayılarının hesaplanması amacıyla deneyler süresince her 2 saniyede bir veri alınmış ve bilgisayara kurulan program (kalibrasyonu ve ayarları yapılmış) vasıtasıyla değerler kayıt edilmiştir. Bilgisayar ortamına aktarılmış olan bu veriler, sistem üzerinden çıkartılan (Şekil 3.23) ve aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla [127]

da “excel” programına aktarılarak sürtünme katsayıları hesaplanmış ve grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.23. Kaymalı yatak aşınma deney mekanizması

$$\sum M_0 = 0$$

$$M_S = M_L \quad (3.7)$$

$$F_S \cdot r_1 = F_L \cdot L \quad (3.8)$$

$$F_S = F_L \cdot L / r_1 \quad (3.9)$$

$$F_S = \mu \cdot F_N \quad (3.10)$$

$$\mu = F_S / F_N \quad (3.11)$$

Aşınma deneylerinde 4140 ıslah çeliği mil kullanılmıştır. Islah çelikleri, kimyasal bileşimleri özellikle karbon miktarı bakımından, sertleştirilmeye elverişli olan ve ıslah işlemi sonunda belirli bir çekme dayanımında yüksek tokluk özelliği gösteren, makine imalat çeliğidir. Yüksek direnç gerektiren makine ve otomotiv parçalarında, aks, dişli ve mil yapımında, fren elemanlarında, iş makinası paletlerinde, yüksek basınca dayanıklı ekipman yapımında kullanılır. Tablo 3.8’de aşınma deneylerinde kullanılan milin kimyasal bileşimi ve özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.8. Karşı aşındırıcı olarak kullanılan milin kimyasal bileşimi ve özellikleri

Karşı aşındırıcı olarak kullanılan milin kimyasal bileşimi (%)											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Sn	Sb	Fe
0,430	0,228	0,835	0,009	0,027	1,03	0,136	0,021	0,32	0,02	0,018	96,6
Özellikleri											
Çap (mm)						Sertlik (HB)					
35						45,8					

Aşınma deneylerinde 30 N, 50 N ve 70 N yük ve 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s kayma hızlarında numuneler 2,5 saat süresince test edilerek aşınma kaybı ve sürtünme katsayısı değerleri tespit edilmiştir. Aşınma deneyleri tüm numunelere ortalama üç defa uygulanarak ortalama değerler alınmıştır. Aşınma deneylerinde numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları 0,1 mg hassasiyetli ve 220 g kapasiteli PRECISA XB 220A marka yüksek hassasiyetli dijital bir terazide ölçülmüştür. Aşınma deneyi öncesinde ve sonrasında numunelerin ağırlıkları ölçülmüş ve aşınma sonucunda meydana gelen ağırlık kayıpları eşitlik (3.12)'den yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta_m = m_1 - m_2 \quad (3.12)$$

m_1 : numunenin deney öncesi ağırlığı, g

m_2 : numunenin deney sonrası ağırlığı, g



Şekil 3.24. Deneyler öncesi hazırlanmış numuneler

3.4. Mikroyapı İncelemeleri

3.4.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı incelemelerinde topografik, kompozisyon ve gölgeleme görüntüleme sistemine sahip ve 8X ile 300.000X arası 146 adımlı büyütme yapabilen JEOL JSM marka 6060LV tip cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Taramalı elektron mikroskobu

3.4.2. Enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi

Enerji dağılımlı spektrometre cihazında numunelerin elementel analizi yapılmıştır. Bileşik haldeki yapıların elementleri ve pik şiddetleri tespit edilmiştir. EDS analizleri ise, 10 mm² aktif kristal yüzeyli, C (6) elementi dahil U (92) elementine kadar olan elementlerin analizlerini yapabilen SEM cihazına entegre IXRF systems Inc. 500 Processing cihazında yapılmıştır (Şekil 3.25).

3.4.3. Optik mikroskop incelemeleri

Deneysel çalışmalarda üretilen kompozitlerin optik mikroskop incelemeleri, 1000 kat büyütmeli, 22 mm geniş görüş alanı, ince odaklamada, 0,1 mm ile 1 μ m hassasiyet özelliklerine sahip Nikon marka Eclipse L 150 A tip mikroskopda gerçekleştirilmiştir (şekil 3.26). Üretilen CuSn11 bronz numunelerinin gözenekleri, PTFE kaplama kalınlıkları ile makro ve mikroyapıları incelenmiştir.



şekil 3.26. Optik mikroskop

BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Giriş

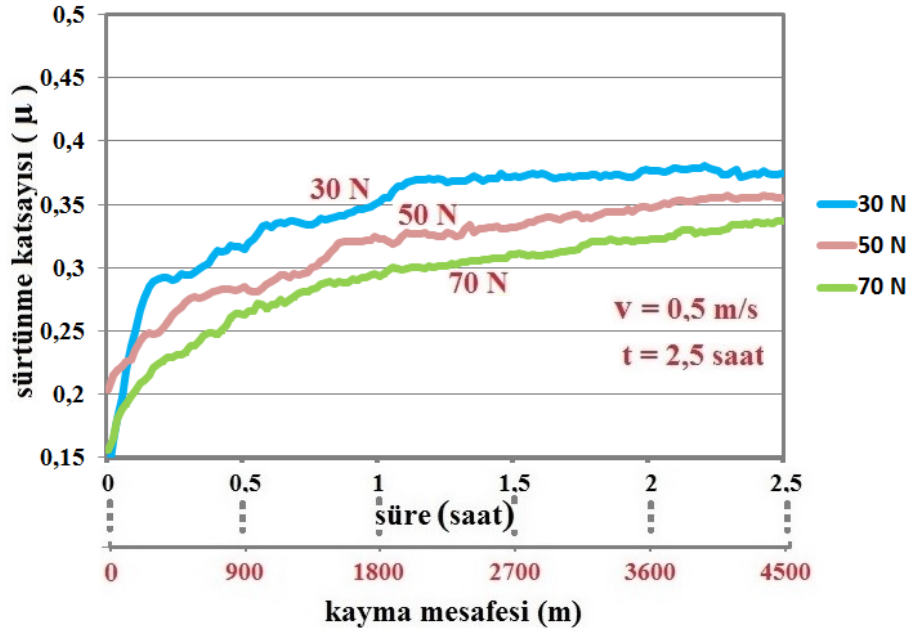
Bu çalışmada; 100-200 µm tane boyutlarına sahip CuSn11 kalay bronz tozları, toz metallurjisi metoduyla sinterlenerek gözenekli yatak malzemeleri üretilmiştir. Bu malzemelerin gözeneklerine PTFE, PTFE + % 10 grafit, PTFE + % 20 grafit olarak üç farklı katkılı polimer malzeme emdirilmiştir. Üretilen yatak malzemelerinin gözeneklerine PTFE malzemelerinin emdirilmesinde spreycaplama yöntemi kullanılmıştır. Kaplanan gözenekli yatak malzemeleri sertlik, yoğunluk ve yüzey pürüzlülük değerleri belirlenerek, daha önceden tasarlanmış ve imalatı yapılmış, kaymalı yatak aşınma test cihazında üç farklı hız ve üç farklı yük altında kuru sürtünme ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş, deneyler boyunca yatak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Aynı zamanda piyasadan ticari olarak temin edilen çelik altlık yüzeyine bronz sinterlenmiş PTFE kaplı ticari yatak burçlarının da aynı şartlarda testleri yapılarak, üretilen PTFE ve grafit katkılı PTFE kaplanmış kompozit yatak malzemeleriyle deney sonuçları kıyaslanmıştır. Öte yandan, ANOVA metodu kullanılarak yatak numunelerinin çalışma şartlarının optimizasyonu yapılmıştır.

Bu bölümde, üretilen ve ticari olarak temin edilen tüm gözenekli yatak malzemelerinin yukarıda da belirtildiği gibi tribolojik deney sonuçları detaylandırılmış ve optimum deney şartları belirlenmiştir. Yatak numunelerinin deneyler öncesi ve sonrası optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) mikroyapıları incelenmiştir. Ayrıca bu kompozit yapıdaki yatak numunelerinin EDS analizleri yapılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar gerek kendi aralarında gerekse de literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

4.2. Yatak Numunelerinin Sürtünme Katsayılarının Belirlenmesi

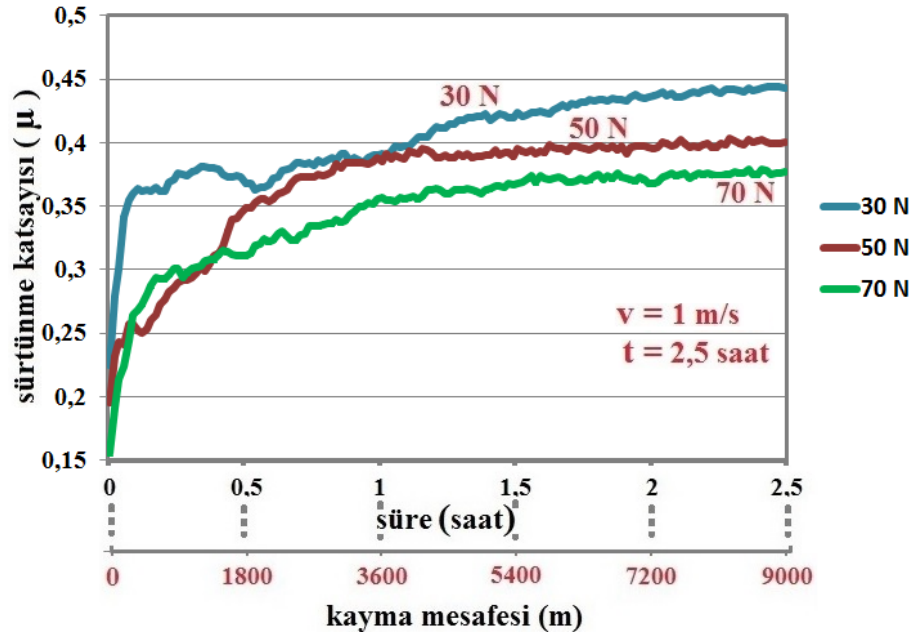
4.2.1. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin deney sonuçları

PTFE kaplanmış yatak numunelerinin sürtünme katsayıları Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Anılan şekillerde, bütün hızlarda (0,5 - 1 ve 1,5 m/s) yükün artmasıyla sürtünme katsayılarında düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 4.1’de görüleceği üzere, 0,5 m/s hızda yapılan PTFE kaplı numunelerin deneylerinden elde edilen sürtünme katsayıları incelendiğinde; 30 N yükte yapılan deneyler sonunda numunenin ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,37$ ve 70 N yükte yapılan deneyler sonunda ise $\mu = 0,33$ olarak tespit edilmiştir. Bu durumda yük artışına bağlı olarak yaklaşık % 11 düşüş belirlenmiştir.



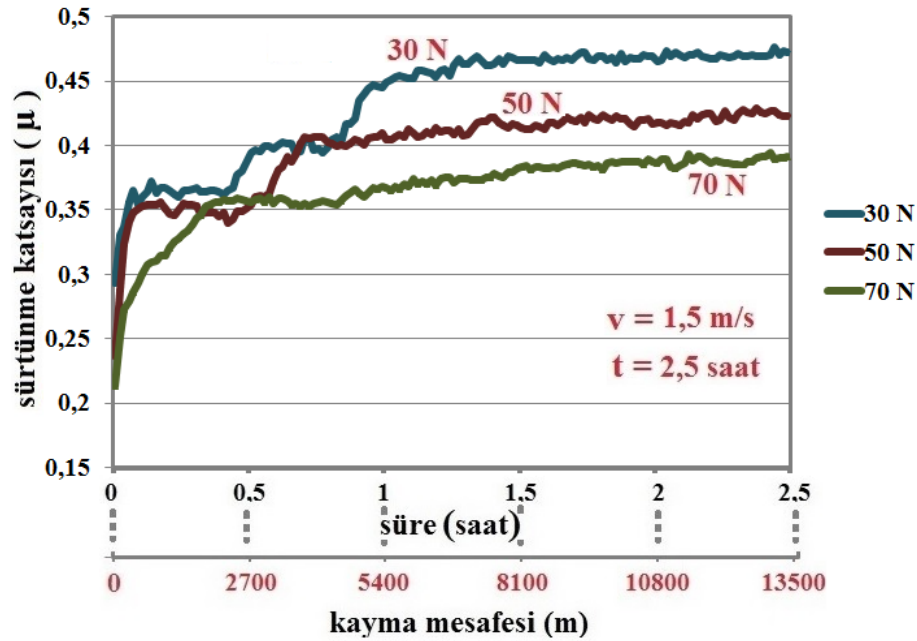
Şekil 4.1. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin 0,5 m/s hız ve 2,5 saatteki sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.2’de incelendiğinde 1 m/s hızda yapılan PTFE kaplı numune deneylerinde sürtünme katsayıları; 30 N yükte uygulanmış deneyler sonundaki ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,44$ ve 70 N yükte yapılan deneyler sonunda ise $\mu = 0,37$ olarak tespit edilmiştir. Bu durumda yükün artmasıyla sürtünme katsayılarında yaklaşık % 16 oranında bir düşme gözlemlenmiştir.



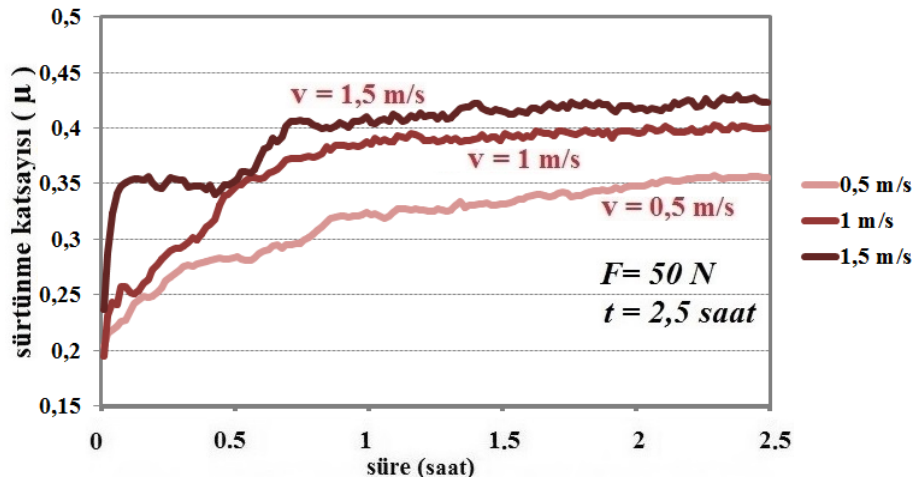
Şekil 4.2. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin 1 m/s hız ve 2,5 saatteki sürtünme katsayısı grafiği

1,5 m/s hızda yapılan deneylerde sonunda 30 N yükteki ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,47$ ' ye ulaşırken ve 70 N yükte yapılan deneylerde 2,5 saat deney sonunda ise $\mu = 0,39$ 'da son bulmuştur (Şekil 4.3). Burada da yine yük artışına bağlı olarak sürtünme katsayılarında yaklaşık % 17 oranında bir düşme gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin 1,5 m/s hız ve 2,5 saatteki sürtünme katsayısı grafiği

Grafiklere bir başka açıdan bakılarak, yük sabit tutulup hızın artmasına bağlı olarak değerlendirildiğinde ise hızın artmasıyla sürtünme katsayısının da arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 4.1 de görüldüğü gibi bu durum hız artışına paralel olarak alınan yolun da (kayma mesafesi) artacak olmasıyla açıklanabilir. Öte yandan; grafiklerdeki sürtünme katsayılarını takip ettiğimizde sürtünme katsayılarının lineer olarak ilerlemeye başladığı bölgeler de bize önemli bilgiler vermektedir. Örneğin Şekil 4.4' de görüldüğü gibi, 50 N yükte yapılan deneylerde sürtünme katsayısının kararlı hale geldiği yatay bölgeler, 0,5 m/s hızda 2 saatte ~ (3600 m) de görülürken, 1 m/s hızda ise 1,8 saat olarak ~ (7000 m)'de ve 1,5 m/s hızda ise yaklaşık olarak 1,4 saat ~ (7900 m) de ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yük ve 2,5 saatteki sürtünme katsayısı grafiği

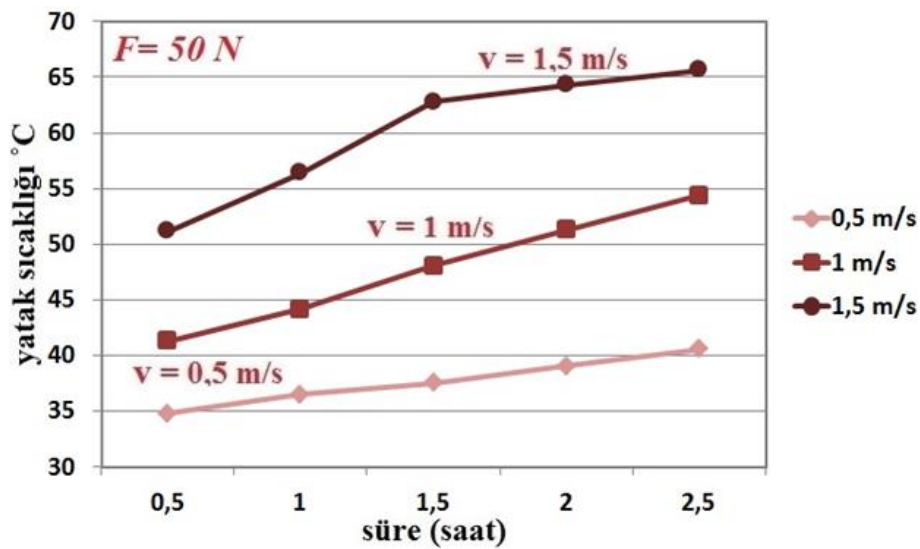
Tablo 4.1. PTFE kaplanmış yatak numunelerin farklı hız ve yüklerdeki ortalama sürtünme katsayıları

Hız	30 N			50 N			70 N		
	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s
Süre (saat)	Kayma mesafesi (m)								
	4500	9000	13500	4500	9000	13500	4500	9000	13500
	Sürtünme Katsayısı (μ)								
0,5	0,317	0,371	0,386	0,283	0,344	0,352	0,263	0,311	0,357
1	0,350	0,390	0,446	0,322	0,386	0,406	0,294	0,354	0,366
1,5	0,372	0,420	0,467	0,331	0,392	0,415	0,309	0,367	0,381
2	0,376	0,436	0,468	0,347	0,396	0,418	0,322	0,369	0,387
2,5	0,376	0,443	0,472	0,355	0,399	0,423	0,336	0,376	0,390

Farklı hız ve yüklerde numunelerde çalışma esnasında sıcaklık artışlarında gözlenmektedir (Tablo 4.2). Deneye başlanmadan önce yatak numunelerinin ortalama parça sıcaklıkları 21 ~ 23 °C aralığındadır. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi, deney başladıktan sonra kuvvet ve hız artışına bağlı olarak yatak sıcaklıkları da artmaktadır. Deneyin başlamasıyla birlikte, en fazla sıcaklık artışı deneyin ilk zaman diliminde meydana gelmektedir. Bu durum aşınma bölgelerinin belirtildiği aşınma-zaman grafiğindeki ilk bölge olan çalışma yüzeylerinin birbirlerine alıştırılmasını ifade etmektedir.

Tablo 4.2. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin ortalama yatak sıcaklıkları

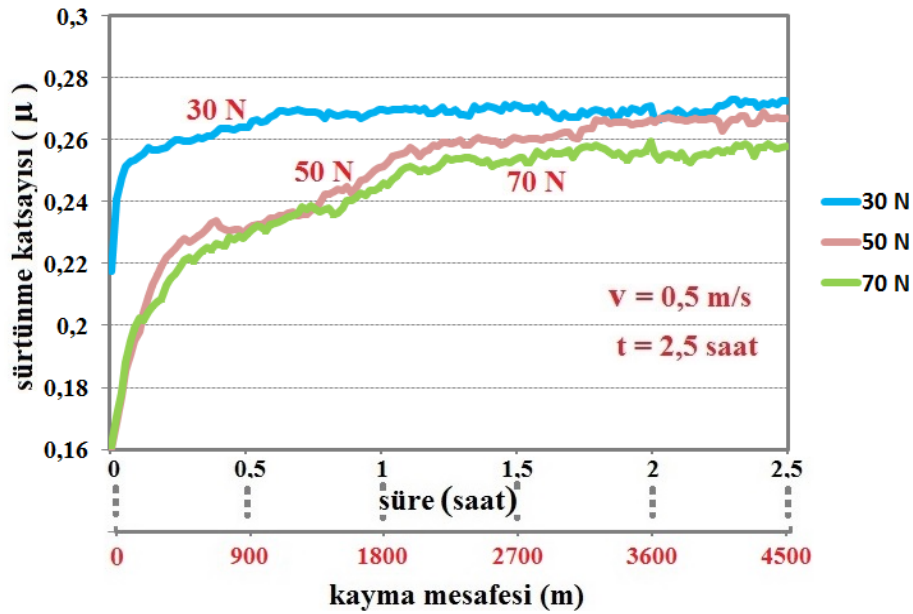
PTFE	HIZ	Süre (saat)					Sıcaklık (°C)
		0,5	1	1,5	2	2,5	
30 N	0,5 m/s	29,9	31,95	33,15	34,1	34,55	
	1 m/s	38,05	40,87	42,9	44,35	45,82	
	1,5 m/s	39,8	43,5	47,55	49,5	52,7	
50 N	0,5 m/s	34,77	36,50	37,50	39,07	40,57	
	1 m/s	41,30	44,15	48,03	51,25	54,40	
	1,5 m/s	51,15	56,4	62,75	64,3	65,65	
70 N	0,5 m/s	36,85	39,77	41,57	43,32	44,35	
	1 m/s	48,23	54,55	58,78	60,90	62,00	
	1,5 m/s	63,40	69,47	75,03	77,37	79,20	



Şekil 4.5. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yük ve 2,5 saatteki yatak sıcaklıkları

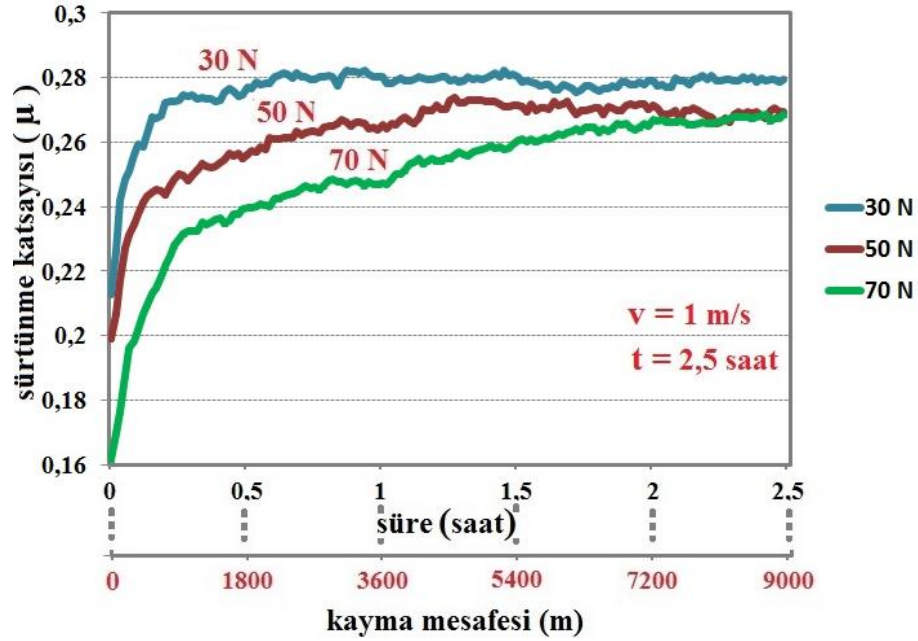
4.2.2. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin deney sonuçları

%10 grafit katkılı PTFE kaplanmış yatak numunelerinin sürtünme katsayıları Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Tablo 4.3’de gösterilmiştir. Anılan şekillerde, bütün hızlarda (0,5, 1 ve 1,5 m/s) yükün artmasıyla sürtünme katsayılarında düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 4.6’ de görüleceği üzere, 0,5 m/s hızda yapılan numunelerin deneylerinde, 30 N yükte yapılan deneyler sonunda numunenin ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,27$ ve 70 N yükte yapılan deneyler sonunda ise $\mu = 0,25$ olarak tespit edilmiştir. Bu durumda yük artışına bağlı olarak % 7,5 düşüş belirlenmiştir.



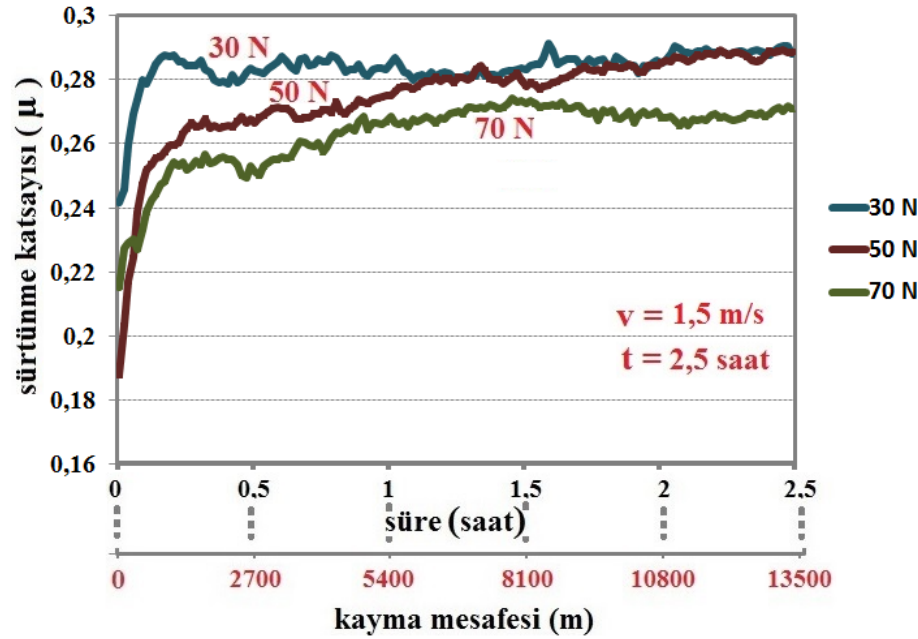
Şekil 4.6. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin 0,5 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.7’ de görüleceği üzere, 1 m/s hızda yapılan % 10 Grafit katkılı PTFE kaplı numunelerin deneylerinde sürtünme katsayıları; 30 N yük uygulanmış deneyler sonundaki ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,28$ ve 70 N yükte yapılan deneyler sonunda ise $\mu = 0,26$ olarak tespit edilmiştir. Bu durumda kuvvetin artmasıyla sürtünme katsayılarında % 7,15 oranında bir düşme gözlemlenmiştir.



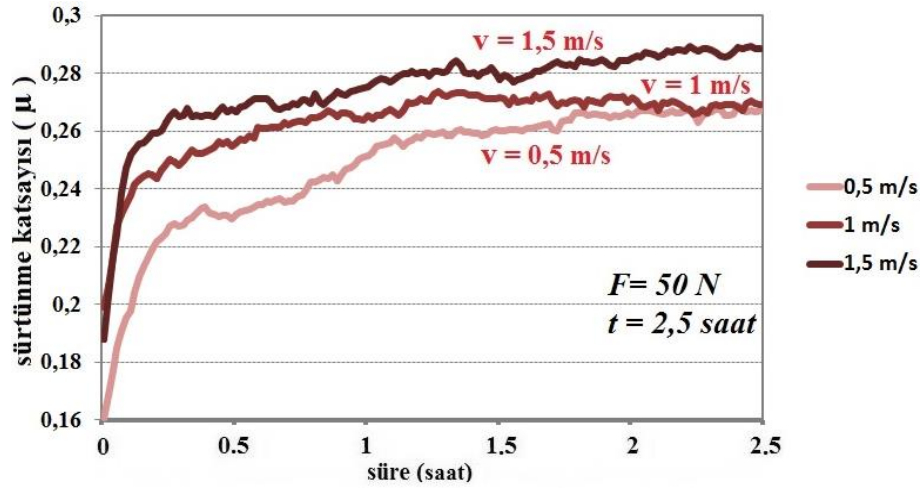
Şekil 4.7. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin 1 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.8 incelendiğinde ise; 1,5 m/s hızda yapılan deneylerde sonunda 30 N yükteki ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,29$ ' a ulaşırken ve 70 N yükte yapılan deneylerde 2,5 saat deney sonunda ise $\mu = 0,27$ 'ye yaklaşmıştır. Burada da yine kuvvet artışına bağlı olarak sürtünme katsayılarında % 6,92 oranında bir düşme tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin 1,5 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği

Grafikler; aynı yüklerde belirlenen değerlerde, hızın artmasına bağlı olarak yeniden değerlendirildiğinde, Şekil 4.9 ve Tablo 4.3’de görüldüğü gibi hızın artmasıyla sürtünme katsayısının ve yatak sıcaklığının (Şekil 4.10) arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.9. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yükteki sürtünme katsayısı grafiği

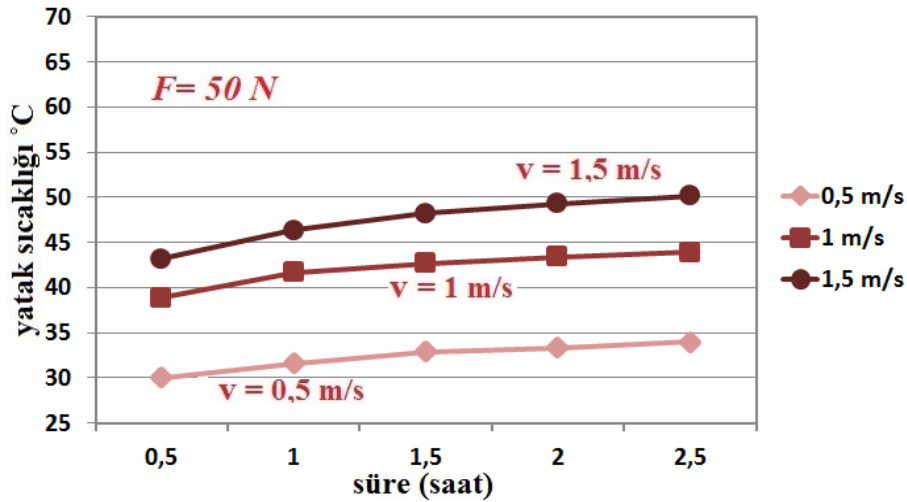
Tablo 4.3. PTFE + % 10 GR kaplanmış numunelerin farklı hız ve yüklerdeki ortalama sürtünme katsayıları

	30 N			50 N			70 N		
Hız	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s
Süre (saat)	Kayma mesafesi (m)								
	4500	9000	13500	4500	9000	13500	4500	9000	13500
	Sürtünme Katsayısı (μ)								
0,5	0,264	0,275	0,279	0,230	0,256	0,267	0,229	0,238	0,250
1	0,269	0,280	0,283	0,250	0,264	0,275	0,244	0,247	0,267
1,5	0,270	0,280	0,286	0,260	0,271	0,280	0,253	0,259	0,273
2	0,269	0,278	0,285	0,265	0,271	0,284	0,257	0,265	0,269
2,5	0,272	0,279	0,287	0,266	0,269	0,288	0,257	0,267	0,271

Tablo 4.4’de görüldüğü gibi, hız ve yüklerdeki artışlara bağlı olarak numunelerin çalışma esnasındaki sıcaklıklarında artışlar gözlenmiştir. Örneğin; 1 m/s hızda yük arttıkça, katkısız PTFE kaplı numunelere göre yaklaşık, sırasıyla 5, 10 ve 12 °C yatak sıcaklıklarında azalmalar gözlenmiştir.

Tablo 4.4. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin ortalama yatak sıcaklıkları

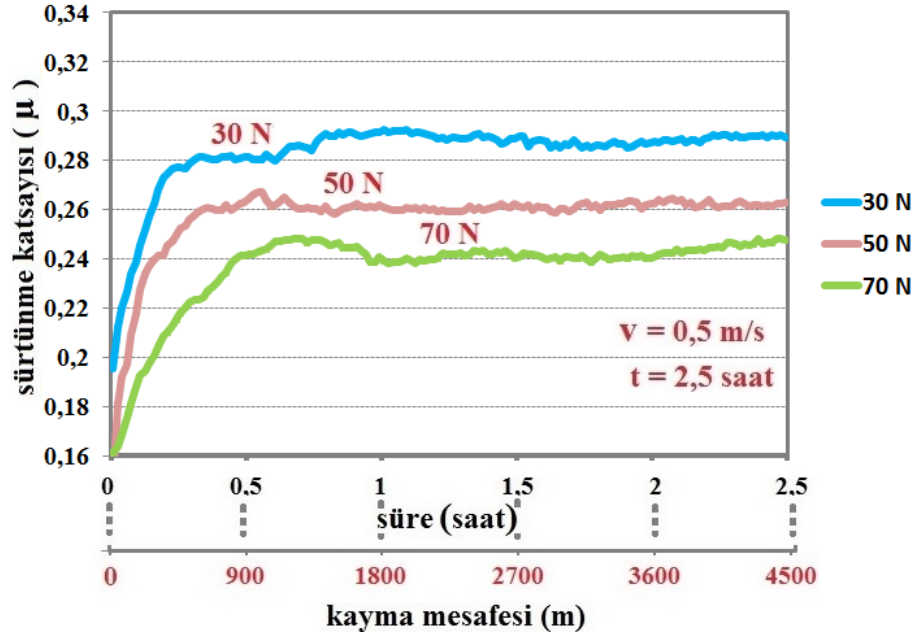
PTFE+%10 GR	HIZ	Süre (saat)					Sıcaklık (°C)
		0,5	1	1,5	2	2,5	
30 N	0,5 m/s	29,33	29,8	30,3	30,97	31,7	
	1 m/s	36,63	38,4	39,43	40,1	40,6	
	1,5 m/s	40,6	43,1	44,58	45,55	46,18	
50 N	0,5 m/s	30,25	31,6	32,9	33,37	33,98	
	1 m/s	38,88	41,7	42,68	43,42	43,92	
	1,5 m/s	43,23	46,38	48,23	49,3	50,15	
70 N	0,5 m/s	31,27	32,63	33,5	34,83	35,2	
	1 m/s	40,7	45,77	48,1	48,93	50,53	
	1,5 m/s	50,2	54,4	56,95	57,45	57,7	



Şekil 4.10. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yükteki yatak sıcaklıkları

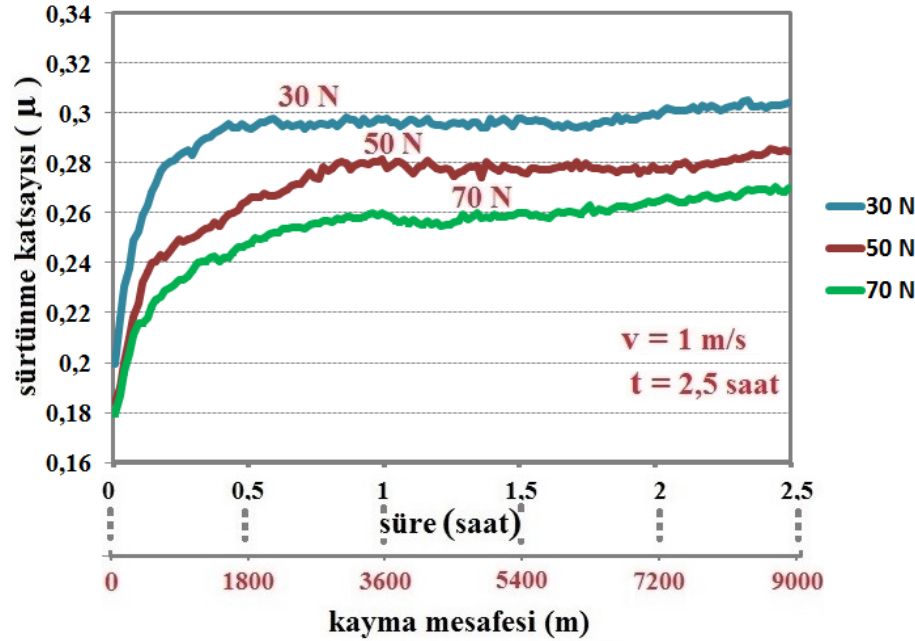
4.2.3. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin deney sonuçları

% 20 grafit katkılı PTFE kaplanmış yatak numunelerinin sürtünme katsayıları Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Tablo 4.5’de gösterilmiştir. Anılan şekillerin incelenmesi sonucunda, bütün hızlarda (0,5, 1 ve 1,5 m/s) yükün artmasıyla sürtünme katsayılarında düşme gözlemlenmiştir. Şekil 4.11’ de görülen 0,5 m/s hızda yapılan numunelerin deneylerinde, 30 N yükte numunenin ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,29$ iken 70 N yükte ise $\mu = 0,24$ olarak tespit edilmiştir. Bu durumda yük artışına bağlı olarak % 15, 22 düşüş belirlenmiştir.



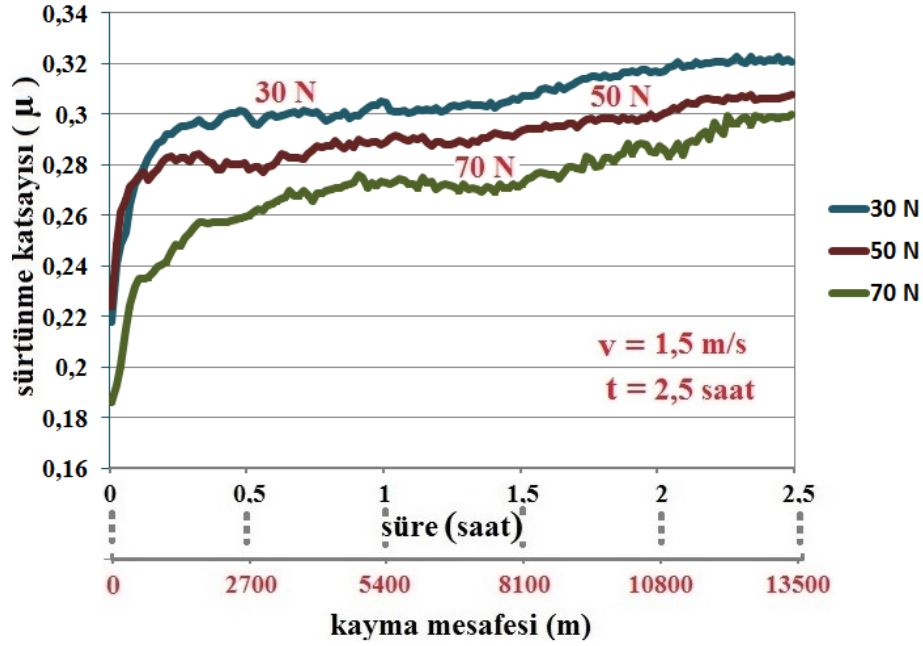
Şekil 4.11. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin 0,5 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.12'de, 1 m/s hızda yapılan % 20 grafit katkılı PTFE kaplı numune deneylerinde sürtünme katsayıları; 30 N yükte uygulanmış deneyler sonundaki ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,30$ ve 70 N yükte yapılan deneyler sonunda ise $\mu = 0,27$ olarak tespit edilmiştir. Bu durumda yükün artmasıyla sürtünme katsayılarında yaklaşık % 11,58 oranında bir düşme gözlemlenmiştir.

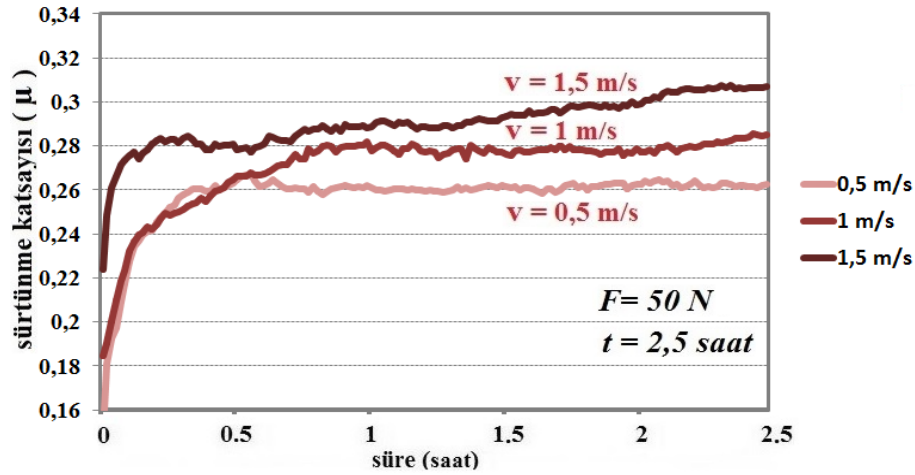


Şekil 4.12. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin 1 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.13 incelendiğinde ise; 1,5 m/s hızda yapılan deneylerde, 30 N yükteki ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,32$ ' ye ulaşırken ve 70 N yükte yapılan deneylerde sonunda ise $\mu = 0,29$ 'da son bulmuştur. Burada da yine yük artışına bağlı olarak sürtünme katsayılarında yaklaşık % 9,38 oranında bir düşme gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin 1,5 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği



Şekil 4.14. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yükteki sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.14'de görülen % 20 Grafit katkılı PTFE kaplanmış yatak numunelerinin grafikleri hız artışına bağlı olarak değerlendirildiğinde, hızın artmasıyla sürtünme katsayısının ve Şekil 4.15'de yatak sıcaklığının da arttığı belirlenmiştir. Genel olarak,

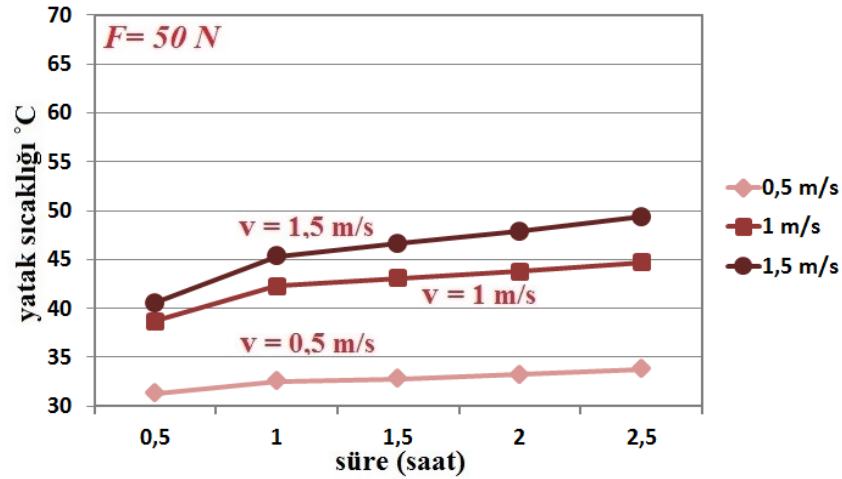
%10 Grafit katkılı PTFE kaplanmış yatak numunelerinin grafiklerine göre 0,01~ 0,02 farklar oluşmaktadır. Düşük yüklerde bu fark gözlenirken yük arttıkça azalmaktadır. Genel olarak, Tablo 4.5’de görüldüğü gibi yük ve hızın artmasıyla sürtünme katsayılarında artışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca, yük ve hız artmasıyla da yatak sıcaklıklarında artışlar gözlemlenmiştir (Tablo 4.6). % 10 Grafit katkılı PTFE kaplanmış yatak numunelerine göre kıyaslandığında yatak sıcaklıklarında hemen hemen benzer değerler görülmektedir. Sıcaklıklarda ciddi bir düşme gözlenmemiş, bilakis bazı numunelerde 2 ~ 6 °C artışlar görülmüştür.

Tablo 4.5. PTFE + % 20 GR kaplanmış numunelerin farklı hız ve yüklerdeki ortalama sürtünme katsayıları

Hız	30 N			50 N			70 N		
	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s
Süre (saat)	Kayma mesafesi (m)								
	4500	9000	13500	4500	9000	13500	4500	9000	13500
	Sürtünme Katsayısı (μ)								
0,5	0,281	0,294	0,300	0,263	0,264	0,279	0,241	0,247	0,259
1	0,291	0,297	0,304	0,261	0,279	0,289	0,239	0,259	0,272
1,5	0,288	0,296	0,306	0,261	0,277	0,292	0,241	0,259	0,271
2	0,287	0,299	0,316	0,262	0,278	0,299	0,240	0,264	0,286
2,5	0,290	0,303	0,321	0,262	0,285	0,306	0,247	0,268	0,298

Tablo 4.6. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin ortalama yatak sıcaklıkları

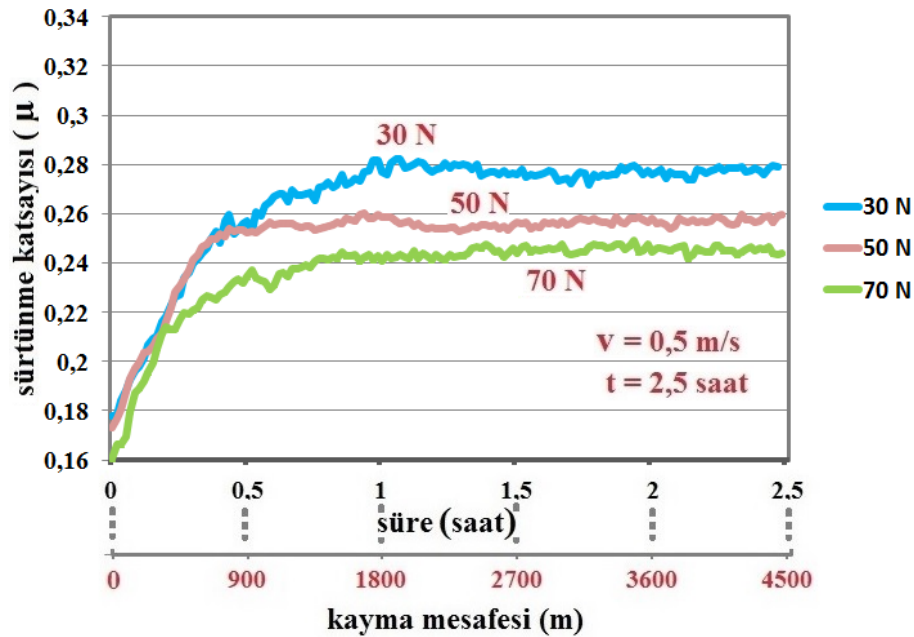
PTFE+%20 GR	HIZ	Süre (saat)					Sıcaklık (°C)
		0,5	1	1,5	2	2,5	
30 N	0,5 m/s	29,37	30,37	31,17	31,77	32,23	
	1 m/s	35	36,7	38,15	38,65	39,4	
	1,5 m/s	36,93	38,6	39,8	40,77	42,23	
50 N	0,5 m/s	31,3	32,55	32,8	33,25	33,8	
	1 m/s	38,7	42,3	43,1	43,8	44,7	
	1,5 m/s	40,57	45,3	46,63	47,87	49,33	
70 N	0,5 m/s	32,97	34,9	35,4	36,1	36,77	
	1 m/s	40,8	47,85	49,55	51,6	52,8	
	1,5 m/s	50,47	57,17	59,87	61,53	63,4	



Şekil 4.15. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin 50 N yükteki yatak sıcaklıkları

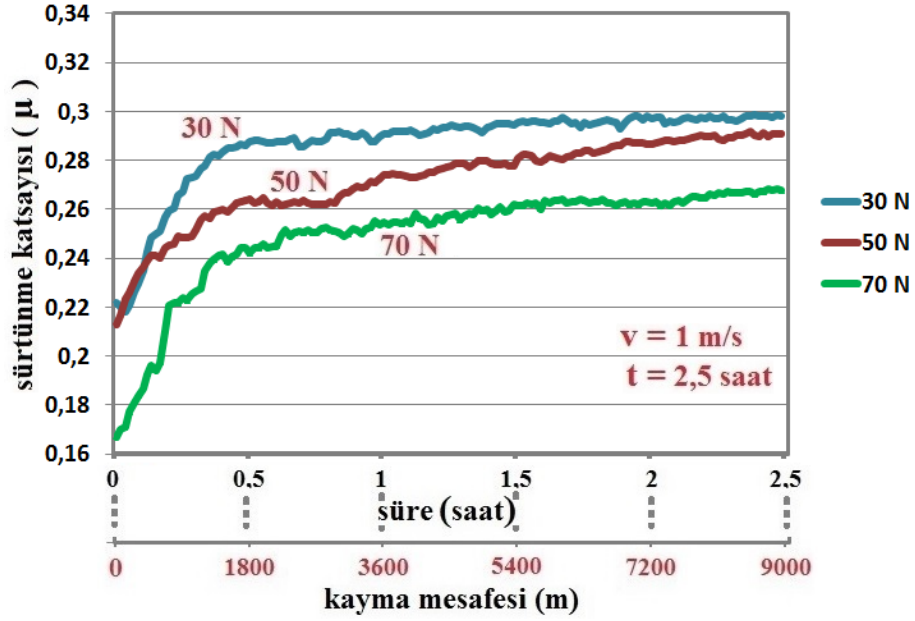
4.2.4. Ticari yatak numunelerinin deney sonuçları

Ticari yatak numunelerinin sürtünme katsayıları Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Tablo 4.7'de verilmiştir. Anılan şekiller incelendiğinde, diğer numunelerde olduğu gibi, bütün hızlarda (0,5, 1 ve 1,5 m/s) yükün artmasıyla sürtünme katsayılarında düşüş gözlemlenmiştir. 0,5 m/s hızda yapılan deneylerde, 30 N yükte numunenin ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,28$ ve 70 N yükte yapılan deneyler sonunda ise $\mu = 0,25$ olarak tespit edilmiştir. Bu durumda yük artışına bağlı olarak sürtünme katsayılarında % 11,55 düşme belirlenmiştir (Şekil 4.16).

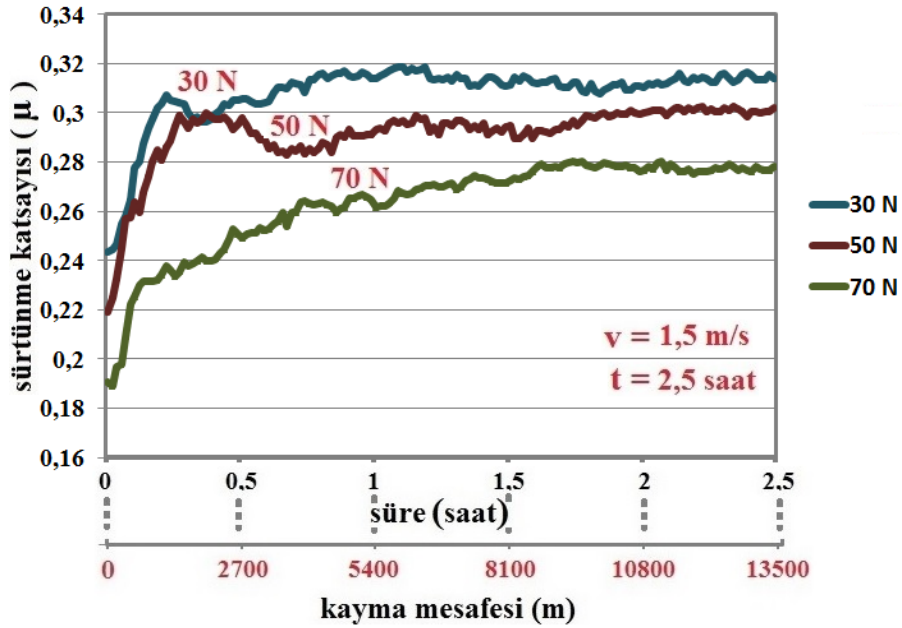


Şekil 4.16. Ticari yatak numunelerinin 0,5 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, 1 m/s hızda yapılan Ticari yatak numunelerinin 30 N yük uygulanmış deneyler sonunda ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,30$ ve 70 N yükte yapılan deneyler sonunda ise $\mu = 0,27$ olarak tespit edilmiştir. Bu durumda yükün artmasıyla sürtünme katsayılarında yaklaşık % 10, 77 oranında bir düşme gözlemlenmiştir.

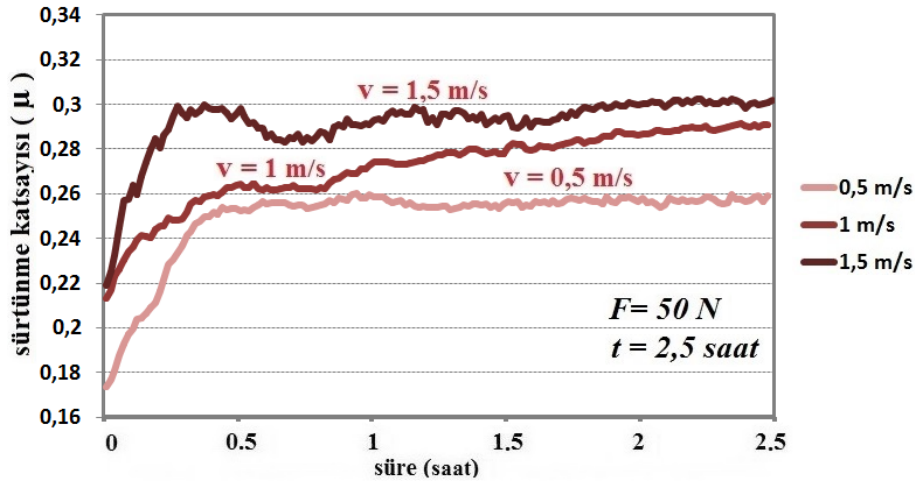


Şekil 4.17. Ticari yatak numunelerinin 1 m/s hızda sürtünme katsayısı grafiği

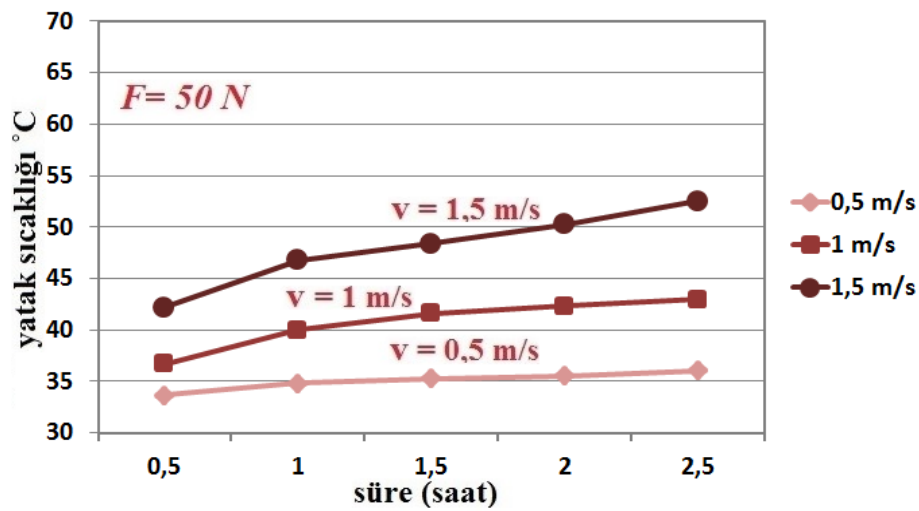


Şekil 4.18. Ticari yatak numunelerinin 1,5 m/s hızdaki sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.18 incelendiğinde, 1,5 m/s hızda yapılan deneylerde sonunda 30 N yükteki ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0,32$ ' e yaklaşırken ve 70 N yükte yapılan deneylerde 2,5 saat deney sonunda ise $\mu = 0,28$ olarak belirlenmiştir. Burada da yine yük artışına bağlı olarak sürtünme katsayılarında yaklaşık % 11,18 oranında bir düşme gözlemlenmiştir. Deneylerde uygulanan yük arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı , sürtünme hızı arttıkça sürtünme katsayısında artış olduğu gözlenmiştir. 0,5 m/s hızda maksimum $\mu = 0,28$, 1 m/s hızda $\mu = 0,30$ ve 1,5 m/s hızda 0,32 olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.19'da ise, ortalama yükte hızın artmasıyla sürtünme katsayısının arttığı, $v = 0,5$ m/s hızda $\mu = 0,26$ ve $v = 1,5$ m/s hızda $\mu = 0,30$ olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.19. Ticari yatak numunelerinin 50 N yük ve 2,5 saatteki sürtünme katsayısı grafiği



Şekil 4.20. Ticari PTFE kaplı yatak numunelerinin 50 N yük ve 2,5 saatteki yatak sıcaklıkları

Tablo 4.7 ve 4.8’de görüldüğü gibi, hızın artmasıyla sürtünme katsayısının ve yatak sıcaklıklarının arttığı belirlenmiştir. Şekil 4.20’de ortalama yükteki yatak sıcaklığının grafiği verilmiştir.

Tablo 4.7. Ticari PTFE kaplı numunelerin farklı hız ve yüklerdeki ortalama sürtünme katsayıları

Hız	30 N			50 N			70 N		
	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s
Süre (saat)	Kayma mesafesi (m)								
	4500	9000	13500	4500	9000	13500	4500	9000	13500
	Sürtünme Katsayısı (μ)								
0,5	0,255	0,286	0,305	0,253	0,263	0,295	0,233	0,243	0,250
1	0,280	0,289	0,314	0,258	0,272	0,291	0,242	0,254	0,264
1,5	0,276	0,295	0,311	0,255	0,279	0,293	0,244	0,260	0,272
2	0,276	0,297	0,310	0,257	0,286	0,300	0,245	0,262	0,277
2,5	0,278	0,298	0,313	0,258	0,290	0,301	0,245	0,267	0,277

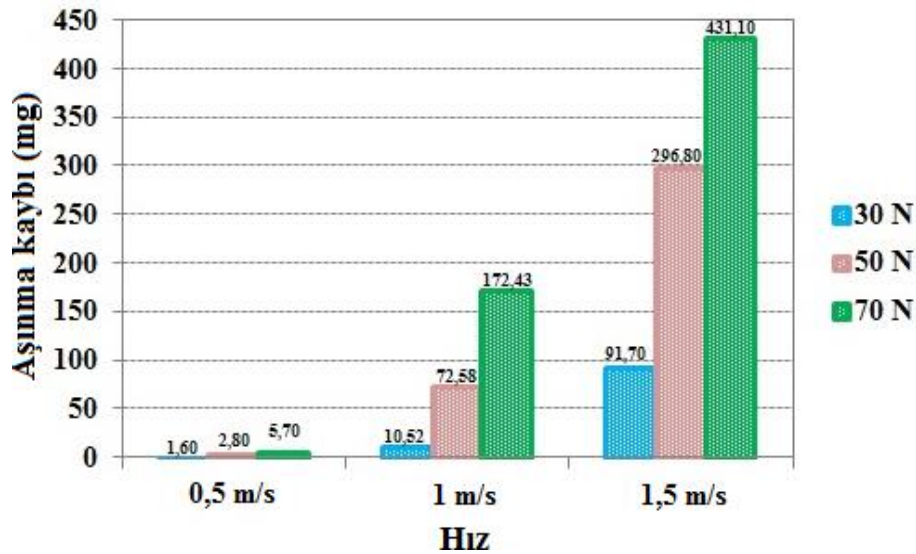
Tablo 4.8. Ticari PTFE kaplı yatak numunelerinin ortalama yatak sıcaklıkları

TİCARİ PTFE NUMUNE	HIZ	Süre (saat)					Sıcaklık (°C)
		0,5	1	1,5	2	2,5	
30 N	0,5 m/s	30,73	31,83	32,37	33,00	33,40	
	1 m/s	33,87	35,20	36,03	36,93	37,63	
	1,5 m/s	40,64	42,72	43,84	44,42	45,12	
50 N	0,5 m/s	33,70	34,83	35,27	35,57	36,07	
	1 m/s	36,70	40,03	41,63	42,30	42,97	
	1,5 m/s	42,22	46,80	48,37	50,28	52,53	
70 N	0,5 m/s	35,35	36,50	37,73	38,33	38,85	
	1 m/s	40,67	45,33	46,00	46,33	47,27	
	1,5 m/s	44,96	49,24	51,64	53,96	55,46	

4.3. Yatak Numunelerinin Aşınma Kayıplarının Belirlenmesi

4.3.1. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin aşınma deneyi sonuçları

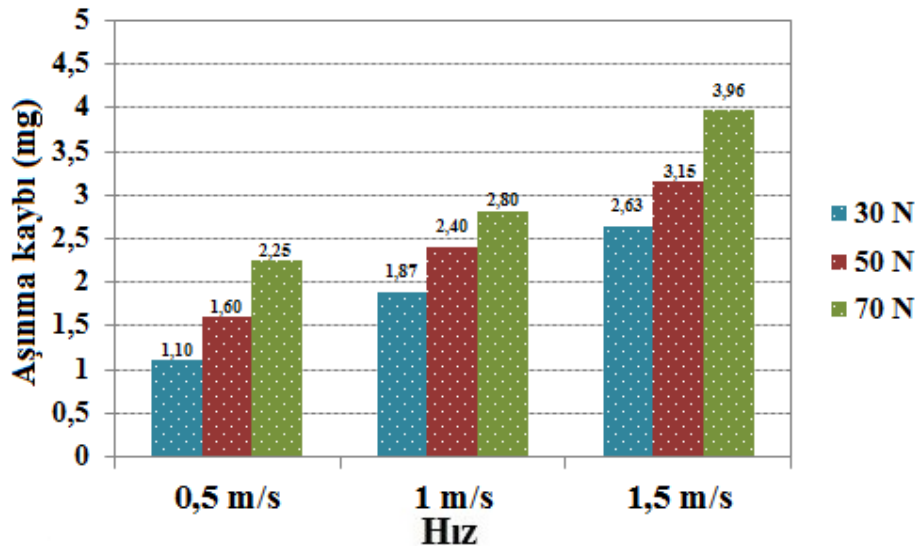
PTFE kaplanmış numunelerin aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma kayıplarını gösteren grafikde (Şekil 4.21), yük ve hız arttıkça aşınma kaybının arttığı görülmüştür. Deneylerde, en fazla yol alınan 1,5 m/s hızda, en yüksek yük olan 70 N'daki aşınma kaybının en düşük yük olan 30 N'a göre 4,7 kat arttığı belirlenmiştir. Bu durum hız artışıyla alınan yolun da (kayma mesafesi) arttığı ve 1,5 m/s hızda numunelerin en fazla yolu almış olmasıyla açıklanabilir. Öte yandan, aşınma kaybındaki artış, kayma mesafesinin artmasıyla çalışma yüzeyinde bulunan PTFE malzemenin aşınarak bronz malzemenin çalışma yüzeyi olarak görev yapmasıyla izah edilebilir. PTFE malzeme yüzeyden kalktıktan sonra gözeneklerdeki PTFE malzemeye birlikte mile teması (kısmen metal-metal teması) söz konusudur.



Şekil 4.21. PTFE kaplanmış numunelerin 0,5 - 1 ve 1,5 m/s hızlardaki yüke bağlı aşınma kayıpları

4.3.2. PTFE+ % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma deneyi sonuçları

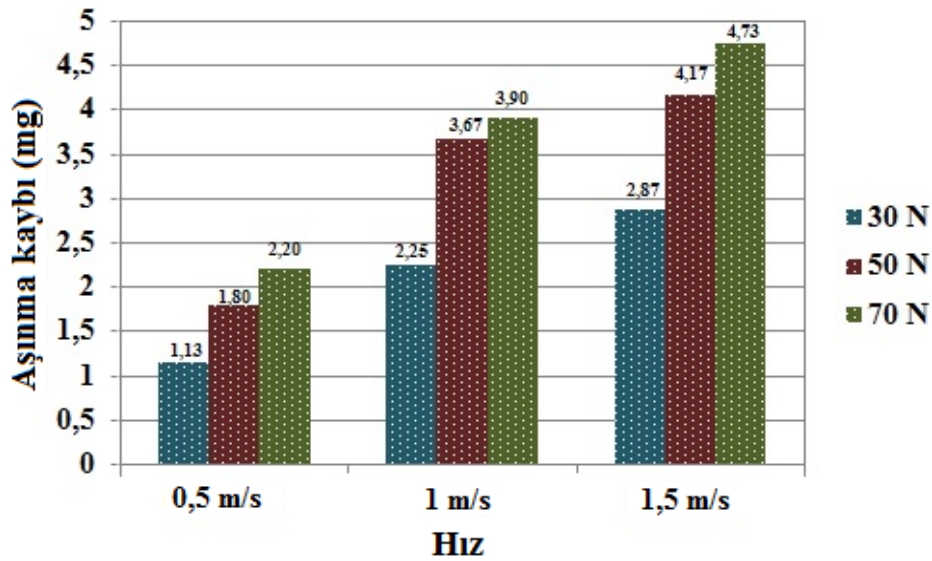
%10 Grafit katkılı PTFE kaplanmış numunelerin grafiklerinde, Şekil 4.22'de görüldüğü gibi, yük ve hız arttıkça aşınma kaybının arttığı görülmüştür. Deneylerde aşınma kaybının en fazla olduğu numunenin en yüksek hız 1,5 m/s ve en yüksek yük olan 70 N şartlarındaki numunenin olduğu tespit edilmiştir. 1,5 m/s hızda 30 N yük ile 70 N yükteki aşınma kaybının 1,5 kat arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.22. PTFE + % 10 GR kaplanmış numunelerin 0,5, 1 ve 1,5 m/s hızlardaki yüke bağlı aşınma kayıpları

4.3.3. PTFE+ % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma deneyi sonuçları

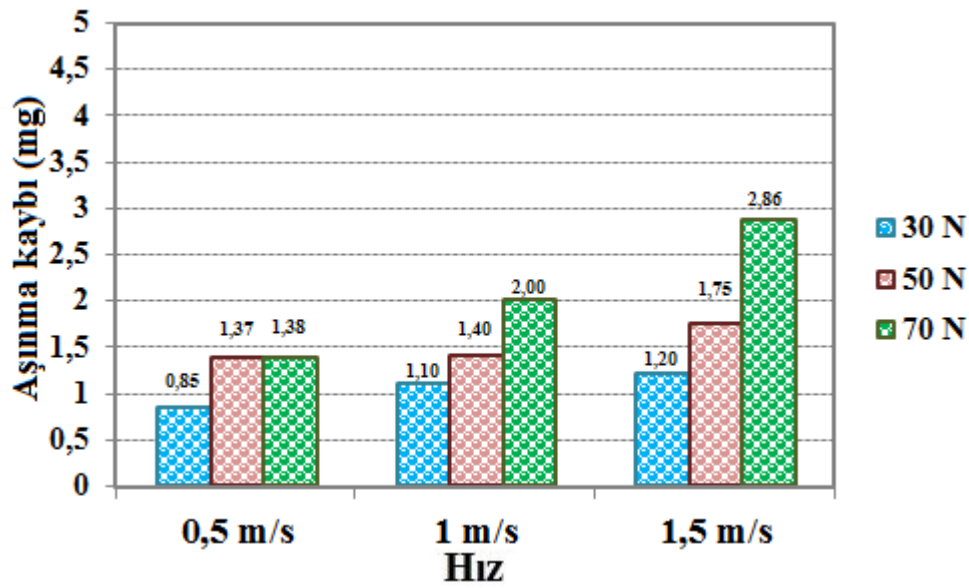
Şekil 4.23'de, % 20 Grafit katkılı PTFE kaplanmış numunelerin grafiklerinde, yük ve hız arttıkça aşınma kaybının arttığı görülmüştür. Deneylerde en yüksek hız olan 1,5 m/s' de en yüksek yük olan 70 N' da aşınma kaybının en fazla olduğu numunedir. 1,5 m/s hızda 30 N yük ile 70 N yükteki aşınma kaybının 1,7 kat arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.23. PTFE + % 20 GR kaplanmış numunelerin 0,5, 1 ve 1,5 m/s hızlardaki yüke bağlı aşınma kayıpları

4.3.4. Ticari yatak numunelerinin aşınma deneyi sonuçları

Şekil 4.24'de Ticari yatak numunelerinin grafiklerinde, yük ve hız arttıkça aşınma kaybının arttığı görülmüştür. En fazla aşınma kaybı, en yüksek hız 1,5 m/s ve en yüksek yük 70 N olan deney şartlarındadır. Bu şartlarda, aşınma kaybının 2,4 kat arttığı tespit edilmiştir. Ticari yatak numunelerinin daha düşük hız ve yük şartlarında aşınma kayıplarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir, bu durumun da bu yatak numunelerinin yüzeyinin ortalama 50 µm PTFE ile kaplanmış olmasına ve PTFE kaplamanın yüzeyinde de eser oranda kurşun katkılı olduğuna bağlanmaktadır. Yük ve hız artışına bağlı olarak ta çalışma yüzeyinin bu özelliğini aşınmaya bağlı olarak kaybedeceğinden bu hız ve yüklerde diğer grafit katkılı PTFE numunelere yakın değerler elde edildiği gözlemlenmiştir.



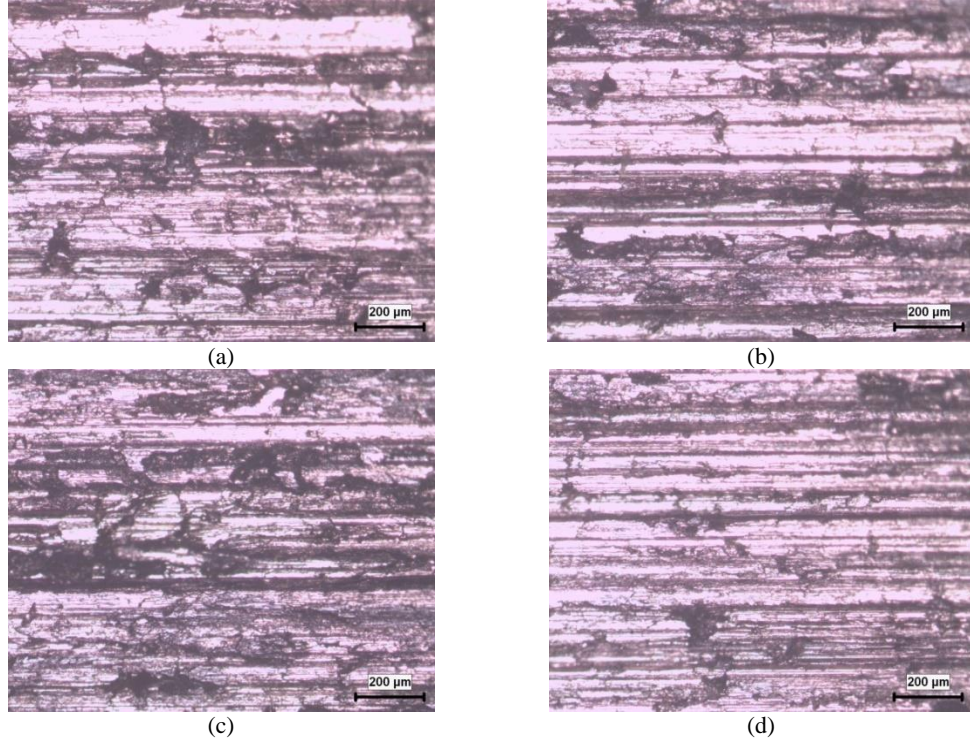
Şekil 4.24. Ticari yatak numunelerinin 0,5, 1 ve 1,5 m/s hızlardaki yüke bağlı aşınma kayıpları

4.4. Yatak Numunelerinin Görüntü Analizi

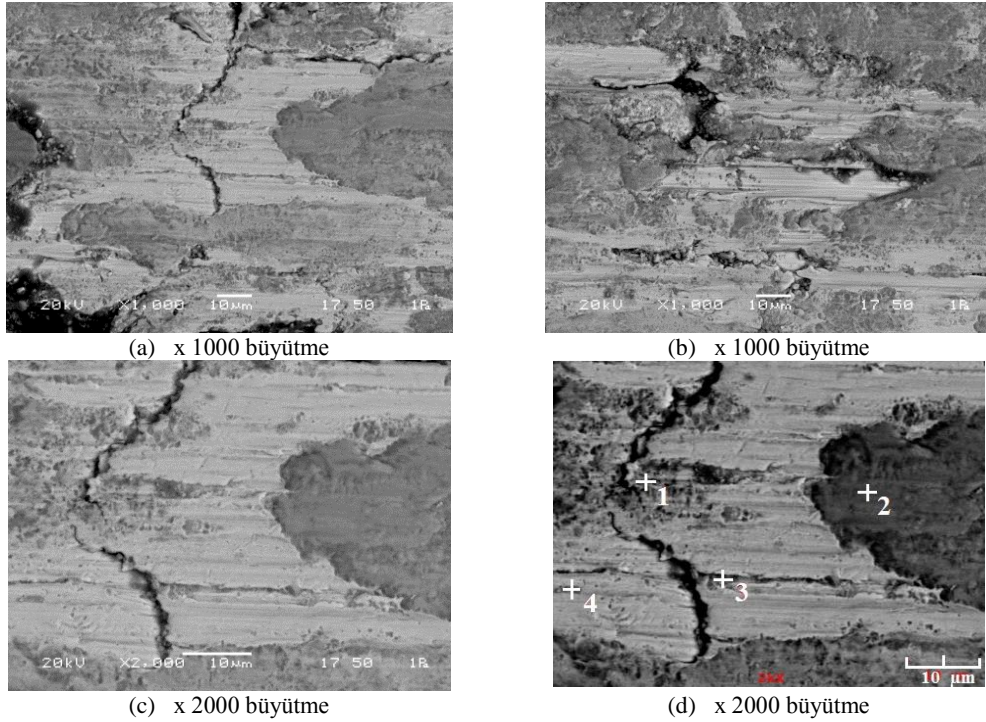
4.4.1. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin görüntü analizi

Şekil 4.25 ve 4.26'da sırasıyla, PTFE kaplanmış yatak numunelerinin ortalama hız ve ortalama yükte yapılmış deneyler sonrası alınmış aşınma yüzeylerinin açıkça

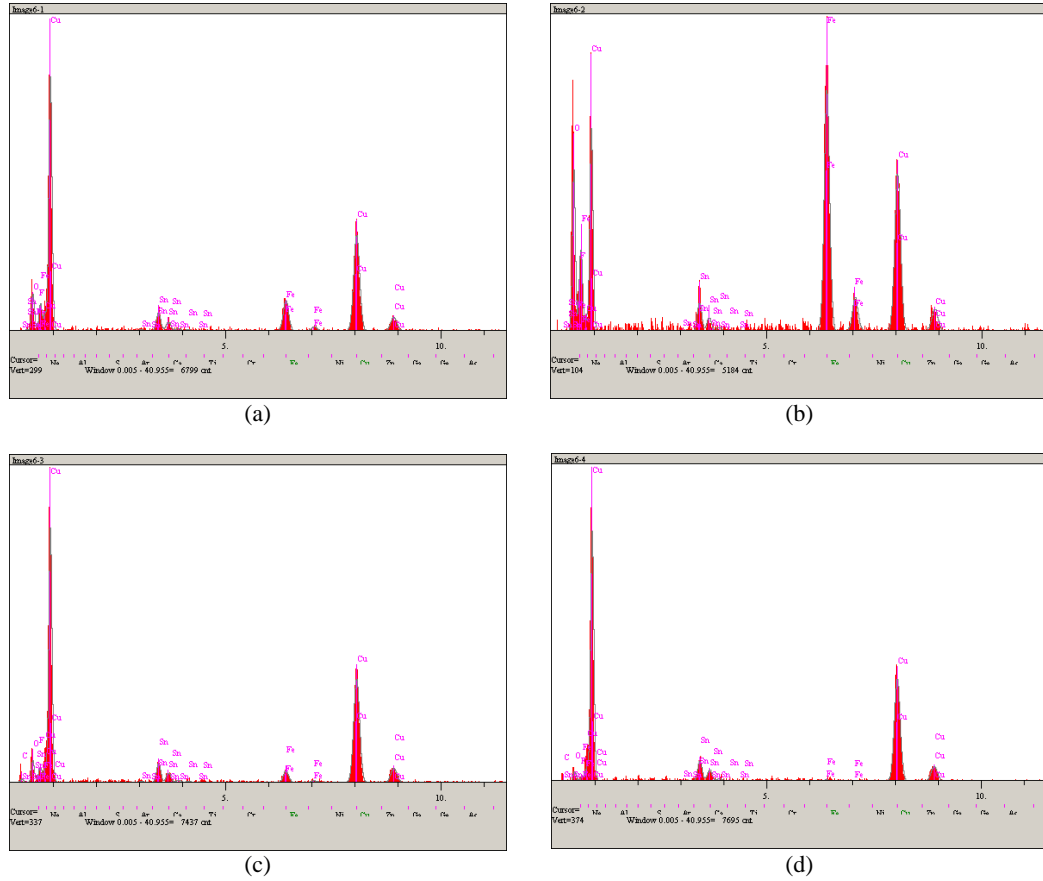
görüldüğü mikroyapı ve SEM görüntüleri verilmiştir. Burada aşınmış yüzeylerden alınmış EDS analizleri ise Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.25. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin aşınma sonrası mikroyapı görüntüleri



Şekil 4.26. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri



Şekil 4.27. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin aşınma yüzeyinin SEM EDS analizi

Tablo 4.9. PTFE kaplanmış yatak numunelerinin aşınma yüzeyindeki element oranları (wt. %).

Element (wt. %)						
Pik No	C	O	F	Fe	Cu	Sn
d1	-	13,575	0,345	9,871	68,780	7,430
d2	-	17,738	5,314	31,254	41,746	3,948
d3	3,565	8,727	1,602	3,668	74,222	8,217
d4	1,266	4,519	0,092	0,461	83,415	10,247

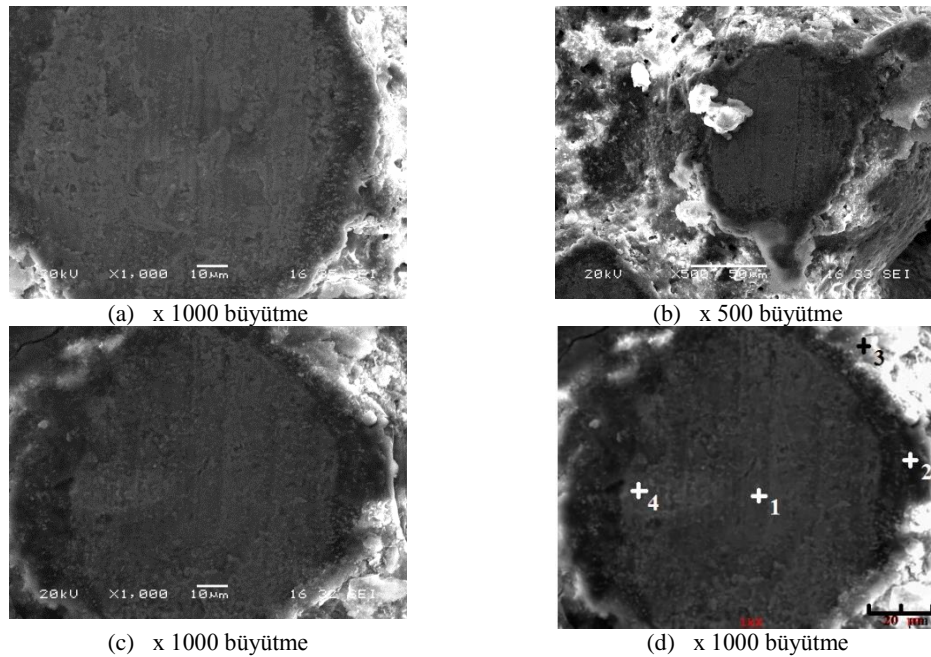
Şekil 4.27’de yatak numunelerinin ana matrisini oluşturan bronz malzemenin ihtiva ettiği Cu ve Sn pikleri açıkça görülmektedir. O piki CuSn malzeme yüzeyinin oksitlenmesinden ve Fe piki ise karşı aşındırıcı olarak bu yüzeyde çalışan demir esaslı malzeme olan 4140 çelik malzeme yüzeyinden kaynaklanmaktadır. Öte yandan C ve F pikleri görülmektedir ki bu pikler de yatak matris malzemenin yüzeyine ve gözeneklerine spray kaplama metoduyla kapladığımız PTFE polimer malzemenin ispatıdır (Tablo 4.9). Çünkü PTFE malzeme aşınmadan sonra yüzeyden kalkmış

olmasına rağmen gözeneklerde kalmaktadır. Aynı zamanda yüzeyden kalkan PTFE malzeme gözeneklerdeki boşluklara dolmaktadır.

4.4.2. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin görüntü analizi

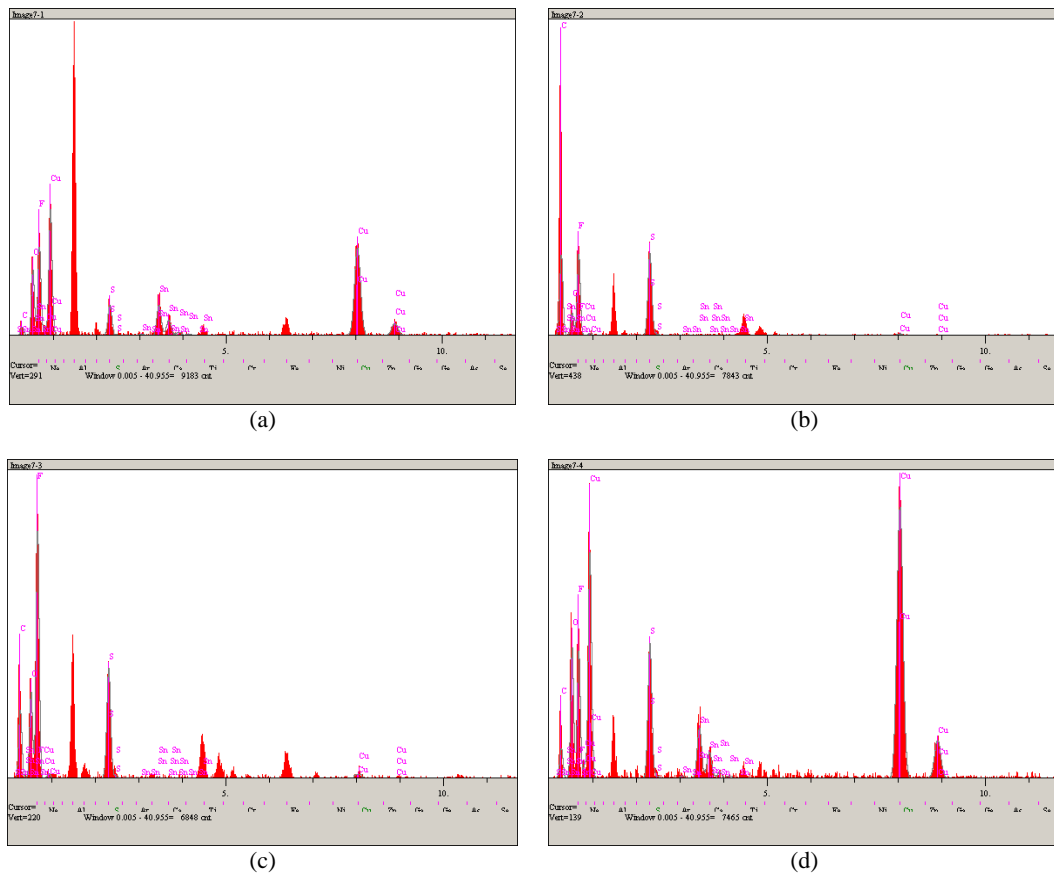
Şekil 4.28'de %10 grafit katkıli PTFE ile kaplanmış yatak numunelerinin 1 m/s hız ve 50 N yük olan ortalama şartlarda yapılmış deneyler sonrası aşınma yüzeylerinin görüldüğü SEM mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bu aşınmış yüzeyin dört ayrı bölgesinden alınmış EDS analizleri de Şekil 4.29'da verilmiştir.

Aşınmış yüzeyleri incelediğimiz de Şekil 4.28'de de görüleceği üzere, yatak numunelerinin yüzeyinde bulunan PTFE + % 10 GR'li polimer yüzeyden PTFE kaplı numune yüzeylerine nazaran polimer malzeme tamamen kalkmamış ve SEM görüntülerinden de anlaşılacağı gibi, yüzey kenarlarındaki boşluklara doğru adeta sıvanmıştır/kaymıştır. Bu durum PTFE ve grafitin kompozit yapılarda uyumlu birlikteliğinin göstergesidir. Bu sebeple, kuru yağlayıcı özelliğe sahip grafit katkıli PTFE yatak yüzeylerinin de aşınmasını geciktirmiştir.



Şekil 4.28. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.29'da ise PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin EDS analizlerini incelediğimizde ise ana matrisini oluşturan bronz malzemenin ihtiva ettiği Cu ve Sn pikleri Tablo 4.10'da açıkça görülmektedir. Ancak PTFE kaplı yatak numunelerine göre bronz matris yüzeyi tamamen ortaya çıkmamış yani polimer kaplı malzemeyle birlikte bulunmaktadır. PTFE'nin C ve F pikleri ile grafitinde, karbon ihtiva eden malzeme olduğundan C piki açıkça görülmektedir. Ayrıca, %10 grafit katkılı PTFE malzemenin hem gözeneklerde bulunması hem de kaplama şeklinde çalışma yüzeyinde bulunup hareket esnasında yüzey kenarlarındaki boşluklara doğru kayarak yığılması SEM görüntüleri ile Tablo 4.10'daki d2 ve d3 piklerindeki C ve F oranlarının, yüzeydeki d1 ve d4 piklerine göre daha yoğun olmasından anlaşılmaktadır.



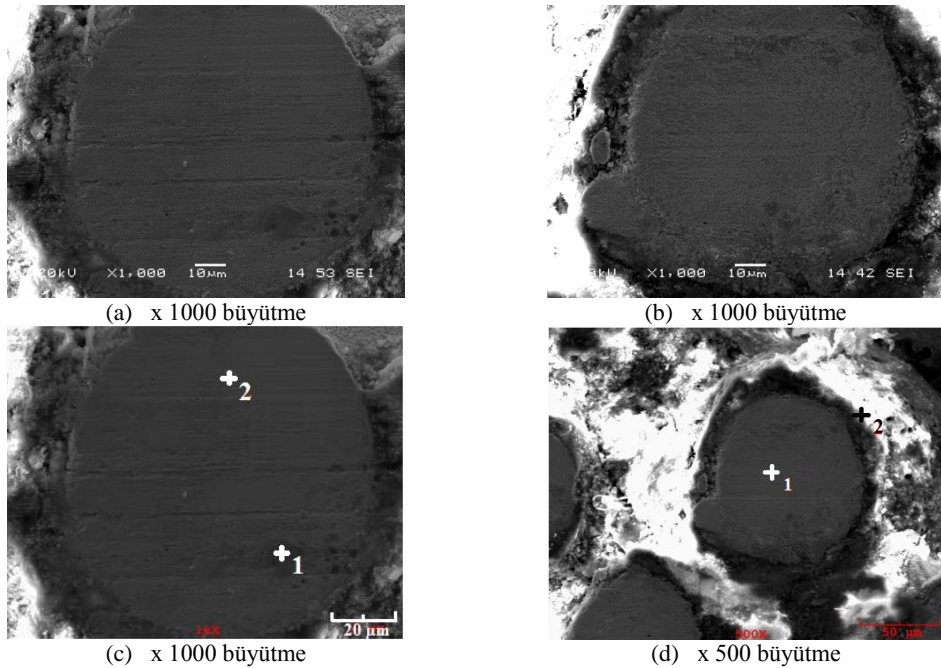
Şekil 4.29. PTFE + % 10 GR yatak numunelerinin aşınma yüzeyinin SEM EDS analizi

Tablo 4.10. PTFE + % 10 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma yüzeyindeki element oranları (wt. %).

Pik No	Element (wt. %)					
	C	O	F	S	Cu	Sn
d1	5,089	17,909	19,428	3,270	44,665	9,638
d2	46,495	13,144	30,552	8,448	1,036	0,325
d3	24,905	18,395	47,593	7,032	1,844	0,231
d4	8,594	14,803	10,799	5,682	53,842	6,280

4.4.3. PTFE+%20 GR kaplanmış yatak numunelerinin görüntü analizi

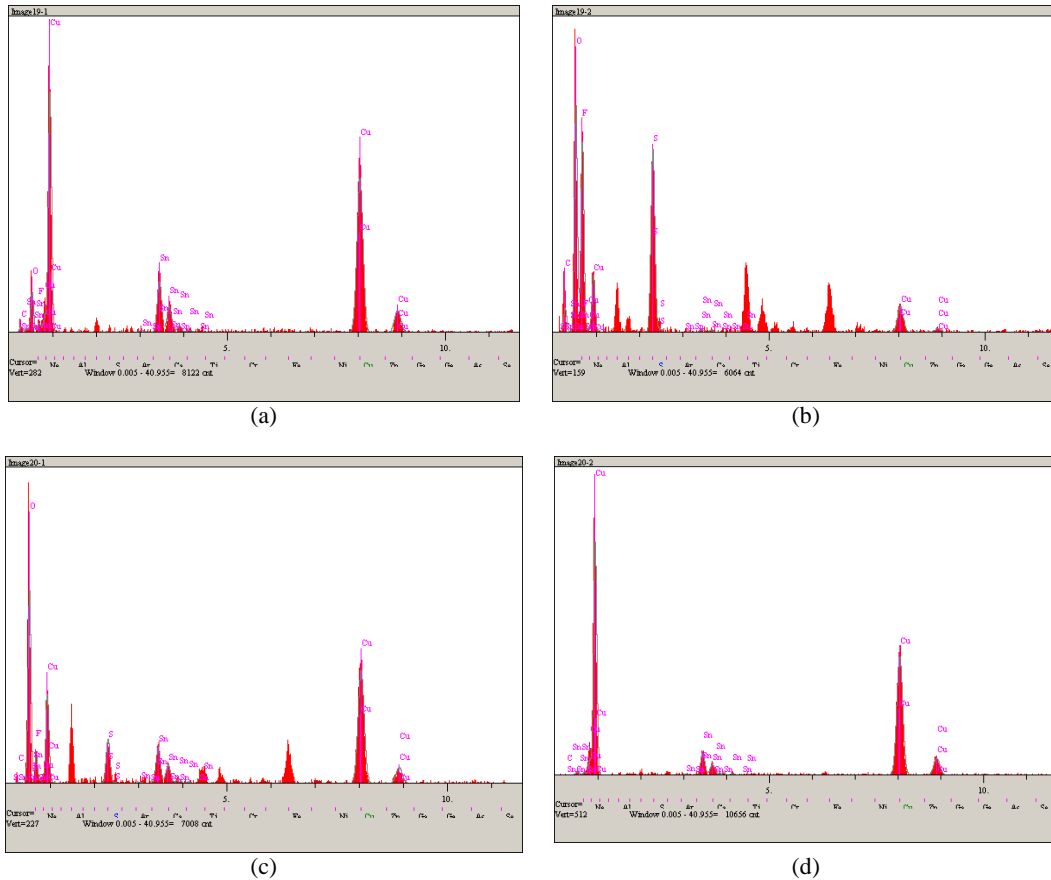
PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin ortalama hız 1 m/s ve ortalama yükte olan 50 N'da yapılmış deneyler sonrası aşınma yüzeylerinin görüldüğü SEM görüntüleri Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.30. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri

Bu yüzeylerin EDS analizleri ise Şekil 4.31'de verilmiştir. Burada yatak numunelerinin ana matrisini olan bronz malzemenin ihtiva ettiği Cu ve Sn pikleri açıkça görülmektedir. Bu piklere ait wt. % oranlar ise Tablo 4.11'da verilmiştir.

O piki ise CuSn malzeme yüzeyinin oksitlenmesinden ve Fe piki ise karşı aşındırıcı 4140 çelik mil malzemesinin yüzeyinden kaynaklanmaktadır. Diğer yandan katı yağlayıcı olarak gözeneklere emdirdiğimiz ve yüzeye kaplanan PTFE polimer malzemenin C ve F pikleri görülmektedir. %10 grafit katkılı PTFE kaplanmış numunelerdeki gibi, PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinde de, polimer malzeme ve grafitin bileşenlerinin hem gözeneklerde hem de çalışma yüzeyindeki hareketin başlamasıyla yüzey kenarlarındaki boşluklara doğru kayarak yığılması SEM görüntülerindeki d2 piklerindeki C ve F oranlarında açıkça görülmektedir. Ancak, bu oranlar yüzeyde ve yüzey kenarlarında % 10 grafit katkılı PTFE kaplanmış numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Bu durum, grafitin C atomlarının, düzgün altıgen kafesler oluşturarak üst üste yığılmış yassı levha katmanları biçiminde ve birbiri üzerinde kolayca kayabilen bu atom katmanlarıyla birbirlerine bağlanmış olmalarından dolayı yüzeyi daha çabuk terketmesine bağlanabilir. Burada grafitin katkı oranının artması bu duruma neden olmuştur.



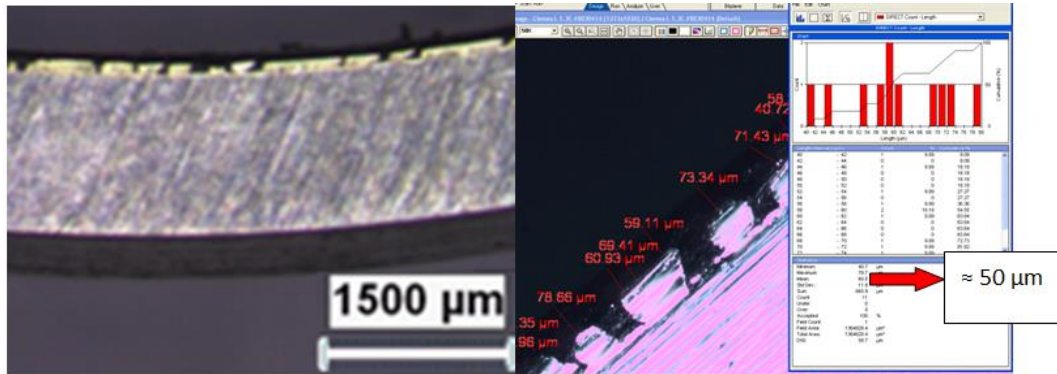
Şekil 4.31. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma yüzeyinin SEM EDS analizi

Tablo 4.11. PTFE + % 20 GR kaplanmış yatak numunelerinin aşınma yüzeyindeki element oranları (wt. %).

Pik No	Element (wt. %)					
	C	O	F	S	Cu	Sn
c1	0,895	35,906	6,363	3,622	44,385	8,829
c2	-	1,948	0,639	-	87,566	9,846
d1	3,431	11,236	1,329	-	69,683	14,322
d2	10,029	32,348	38,001	10,476	8,416	0,731

4.4.4. Ticari PTFE kaplı yatak numunelerinin görüntü analizi

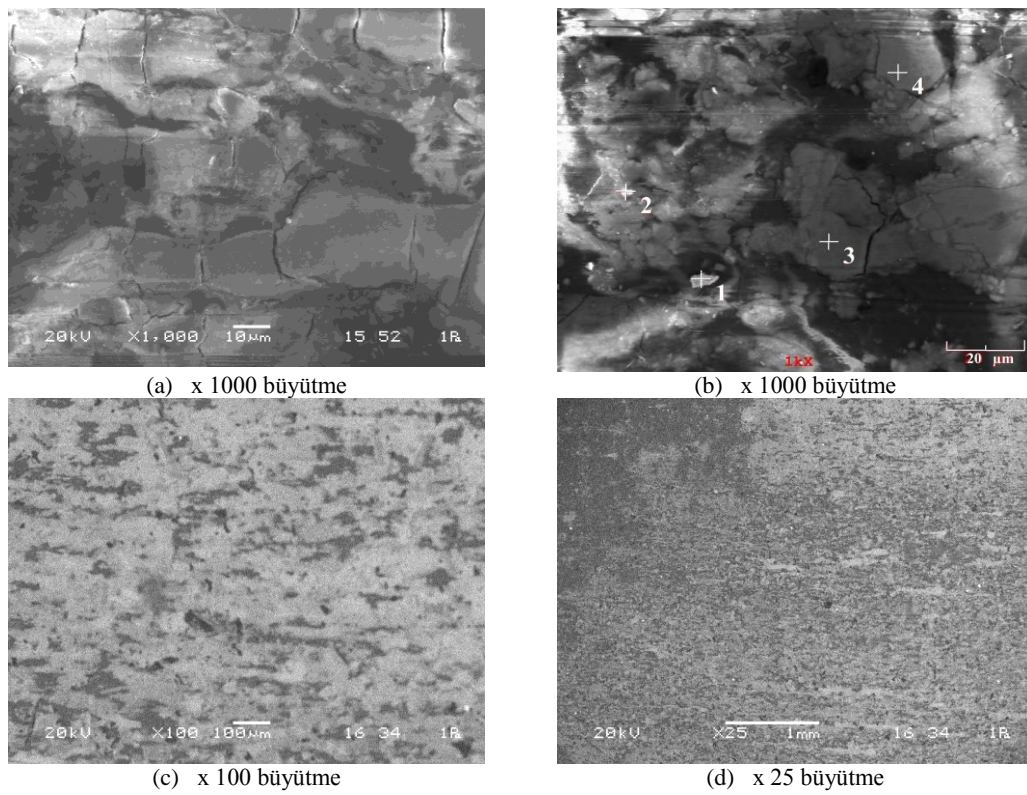
Ticari yatak numunelerinin üretimi, toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş numunelere göre farklıdır. Ticari yatak numuneleri çelik altlık yüzeyine bronzun haddelenerek sinterlenmesi şeklinde üretilmiştir. Bu sebeple Şekil 4.32’de görüldüğü gibi PTFE katmanı ince bronz katman yüzeyinde kaplama biçiminde bulunmaktadır. Ticari yatak numunesinin yanal yüzey kesiti zımparalanarak mikro yapı resimleri alınmış ve ortalama teflon kaplama kalınlığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.32. Ticari yatak numunelerin yanal yüzey kesitinin mikro yapısı ve PTFE kaplama kalınlığı

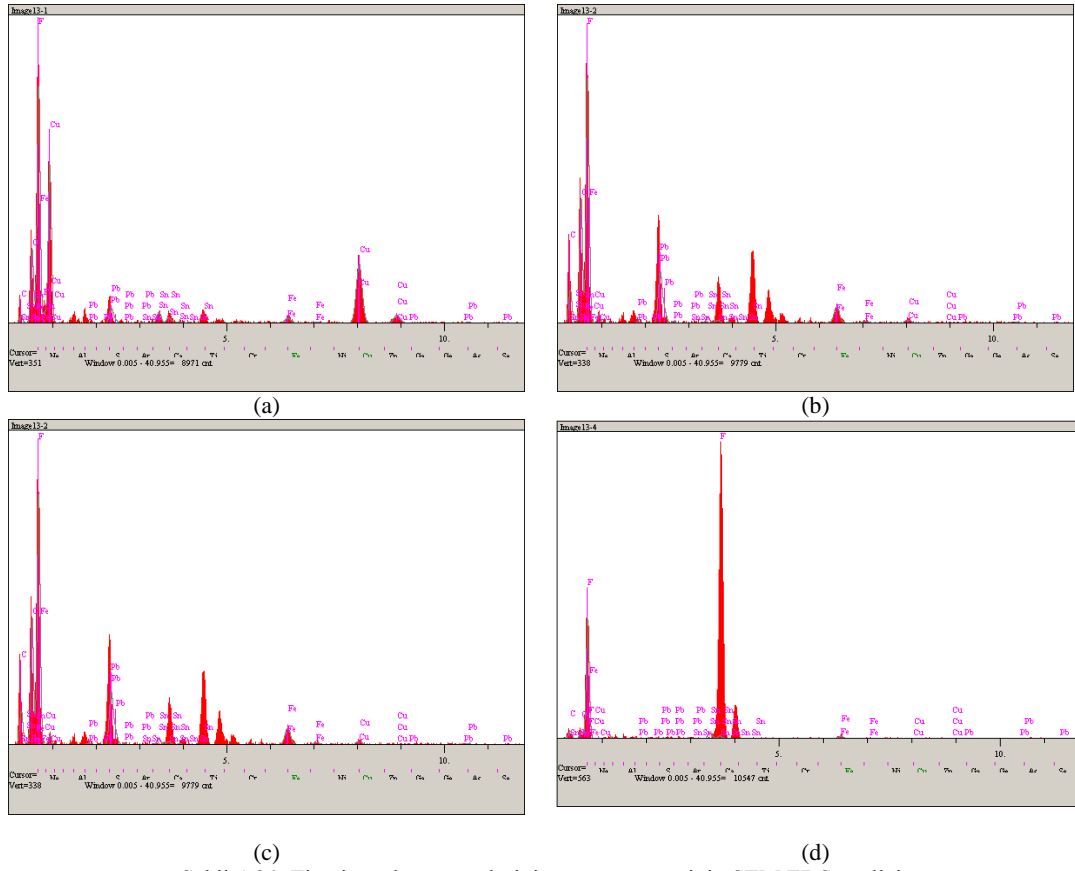
Şekil 4.33’de Ticari PTFE yatak numunelerinin 1 m/s hız ve 50 N yük olan ortalama şartlarda yapılmış deneyler sonrası aşınma yüzeylerinin görüldüğü SEM mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bu aşınmış yüzeyin dört ayrı bölgesinden alınmış EDS analizleri de Şekil 4.34’de verilmiştir.

Şekil 4.33'de verilen aşınmış yüzeylerin SEM görüntülerine incelediğimizde, kompozit bir yapı olan Ticari yatak numunesinin üst katmanını oluşturan PTFE yüzeyinde milin bu malzeme yüzeyinde çalışmasıyla birlikte, lokal plastik deformasyonun ve adezyon mekanizmasının oluşmaya başladığı açıkça görülmektedir. Şekil 4.33a'da görülmekte olan çatlaklar bunun bir göstergesidir. Uygulanan yük ve kayma mesafesindeki artışla birlikte plastik deformasyonun ve adezyon mekanizmasının büyümesi mümkündür [128].



Şekil 4.33. Ticari yatak numunelerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.34'de ticari yatak numunelerinin ara katmanı olan bronz malzemenin ihtiva ettiği Cu ve Sn pikleri açıkça görülmektedir. Bu piklere ait wt. % oranları ise Tablo 4.12'de verilmiştir. Ayrıca bu numunelerin yüzeyine kaplanmış PTFE katmanının C ve F pikleri ile bu kaplamada bulunan Pb piki görülmektedir.



Şekil 4.34. Ticari yatak numunelerinin aşınma yüzeyinin SEM EDS analizi

Tablo 4.12. Ticari yatak numunelerinin aşınma yüzeyindeki element oranları (wt. %).

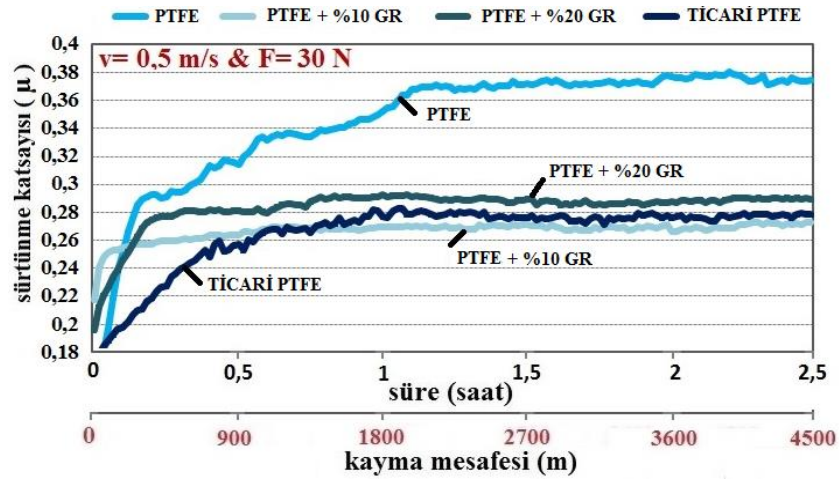
Element (wt. %)							
Pik No	C	O	F	Fe	Cu	Sn	Pb
b1	3,394	14,913	44,122	1,224	29,938	3,571	2,837
b2	10,686	22,855	55,415	4,473	1,611	1,918	3,042
b3	3,314	17,158	33,358	39,002	0,263	1,560	5,345
b4	8,825	6,099	66,457	2,446	0,816	7,062	8,296

4.5. Yatak Numunelerinin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

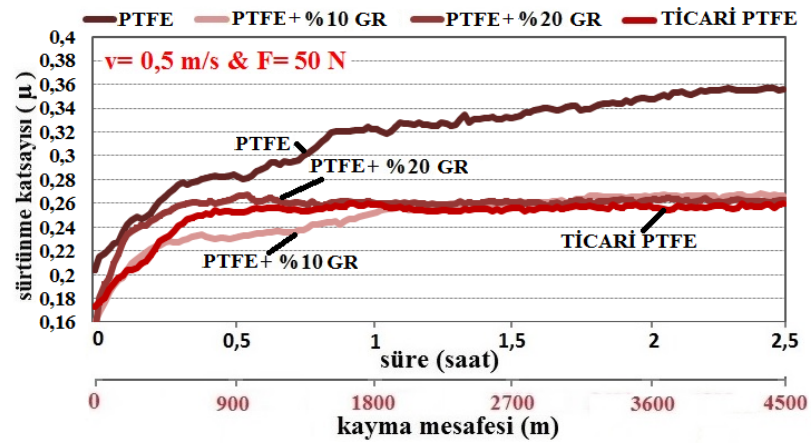
4.5.1. Sürtünme katsayısı grafiklerinin karşılaştırılması

Deneyle sonucunda elde edilen sürtünme katsayılarına ait grafikler birlikte değerlendirildiğinde, Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de numuneler 0,5 m/s hızda en az kayma mesafesi olan 4500 m yol aldıklarından dolayı bu mesafede karşı aşındırıcı mil, ilk olarak numunelerin PTFE veya PTFE katkılı çalışma yüzeyinde çalışmışlardır. Özellikle ortalama yükte tüm numunelerin sürtünme katsayılarının başlangıçta birbirine yakın değerlerde seyretmesi ve ilerleyen zamanda da katkılı numunelerin yakın değerlere sahip olması bu durumun bir göstergesidir. Bu nedenle, 0,5 m/s hızla yapılan deneyler diğer hızlara göre en düşük sürtünme katsayılarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, yük arttıkça, numuneler mil yüzeyine tam olarak teması ve yağlayıcı özelliğe sahip polimer malzemenin gerçek performansını göstermesi için belirli bir sıcaklık değerine ulaşmış olması söz konusudur.

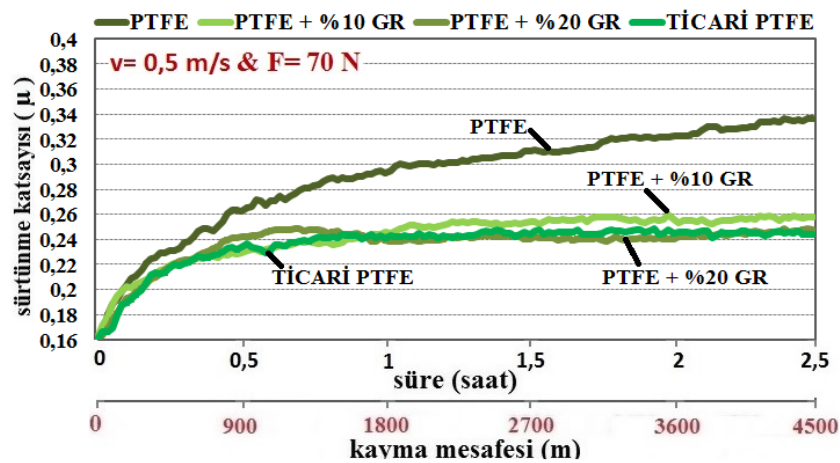
Şekil 4.38, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40’da, 1 m/s hızda yapılan deneyler sonucunda elde edilen sürtünme katsayılarına ait grafikler değerlendirildiğinde ise, 9000 m yol alan numuneler yaklaşık ilk 1 saat süresince daha düşük sürtünme katsayılarına sahip oldukları ve bu değerlerin ilerleyen zaman içinde artarak kararlı hale geldikleri gözlenmiştir. Ancak, PTFE kaplı numunelerde bu durum az da olsa artarak devam etmiştir. Çünkü, mil PTFE yüzeyinde çalışırken belirli bir zaman sonra bronz katmana da ulaşmaya başladığının bir göstergesidir.



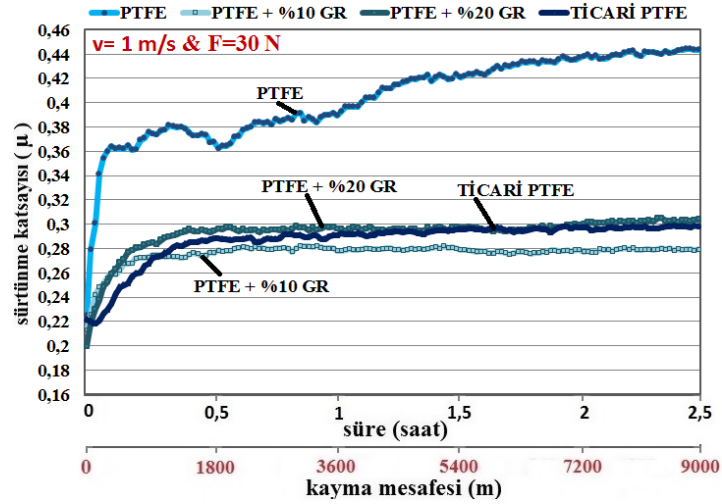
Şekil 4.35. Yatak numunelerinin 0,5 m/s hız ve 30 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri



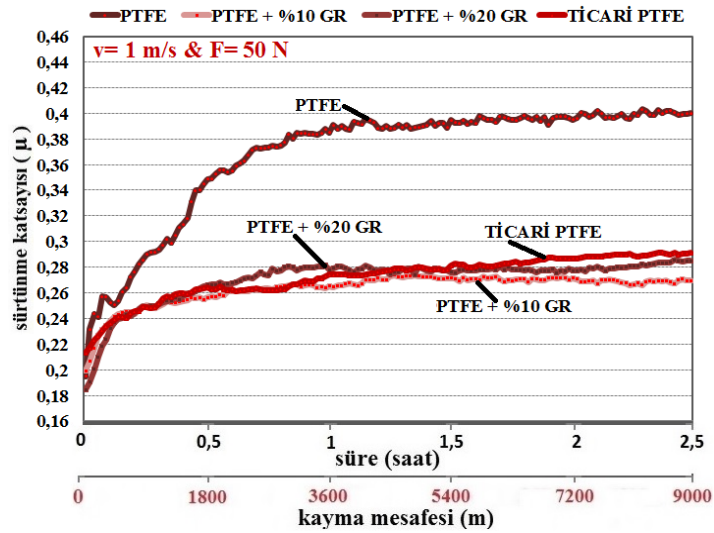
Şekil 4.36. Yatak numunelerinin 0,5 m/s hız ve 50 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri



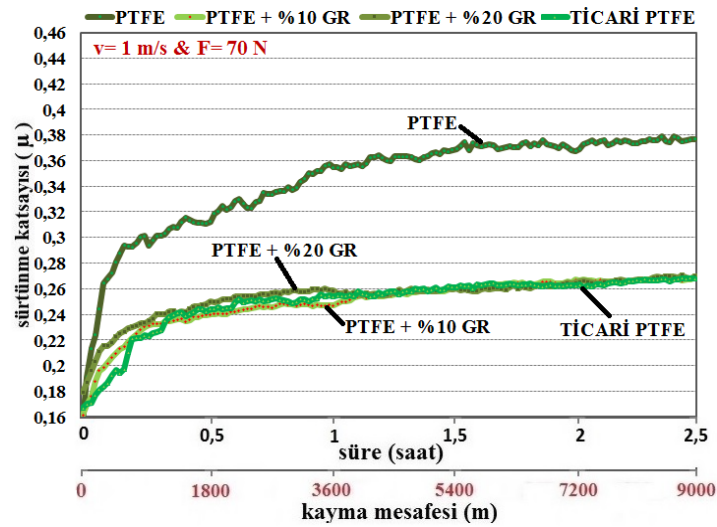
Şekil 4.37. Yatak numunelerinin 0,5 m/s hız ve 70 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri



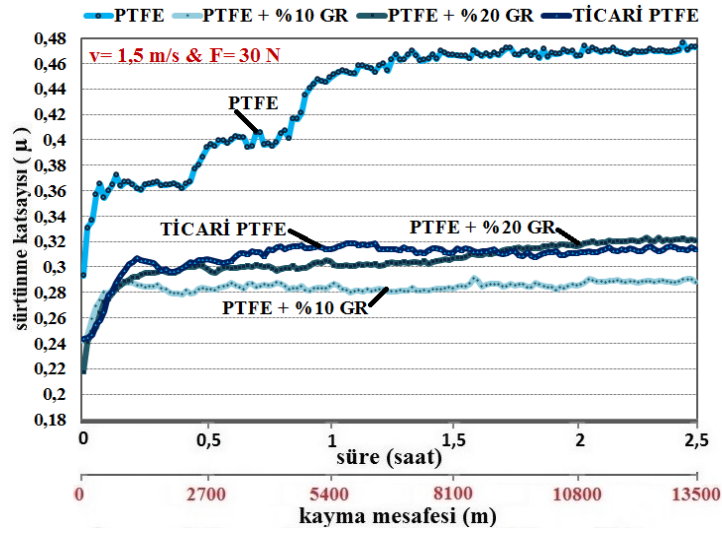
Şekil 4.38. Yatak numunelerinin 1 m/s hız ve 30 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri



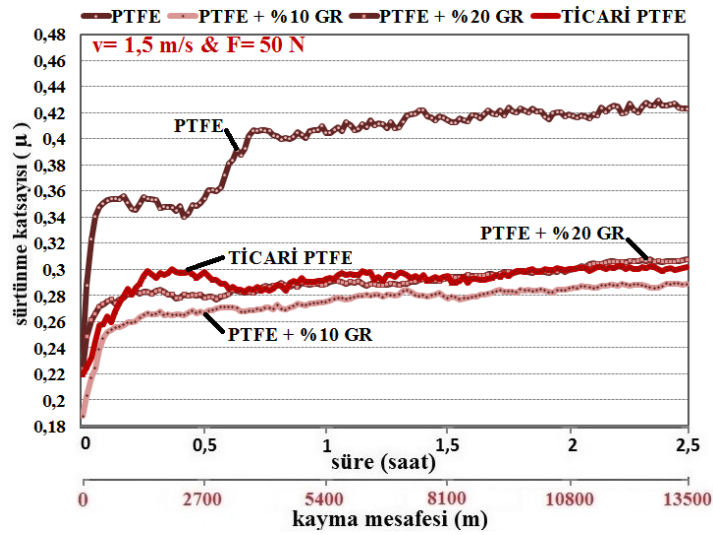
Şekil 4.39. Yatak numunelerinin 1 m/s hız ve 50 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri



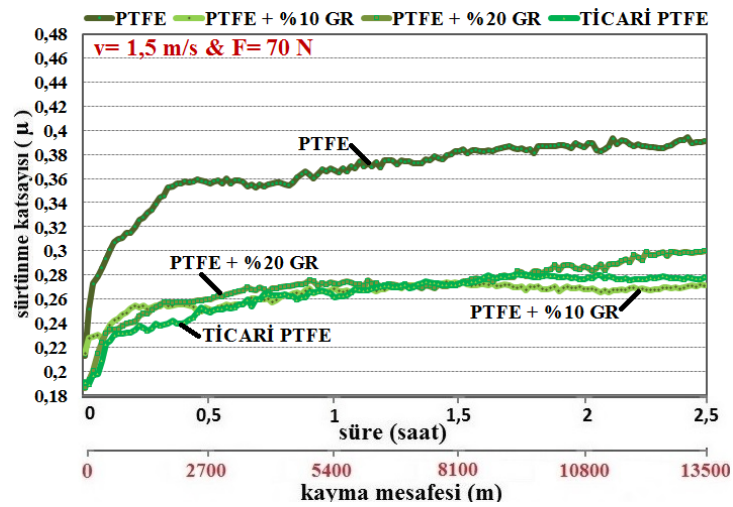
Şekil 4.40. Yatak numunelerinin 1 m/s hız ve 70 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri



Şekil 4.41. Yatak numunelerinin 1,5 m/s hız ve 30 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri



Şekil 4.42. Yatak numunelerinin 1,5 m/s hız ve 50 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri

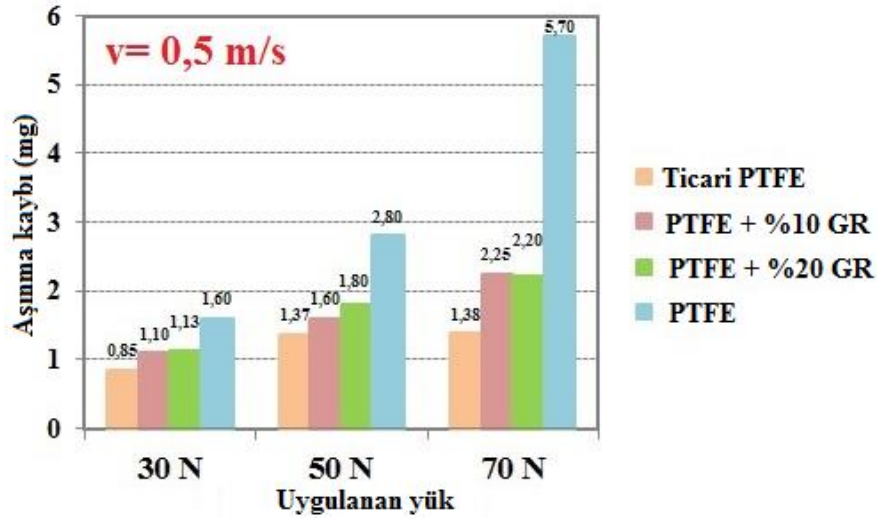


Şekil 4.43. Yatak numunelerinin 1,5 m/s hız ve 70 N yükteki sürtünme katsayısı değişimleri

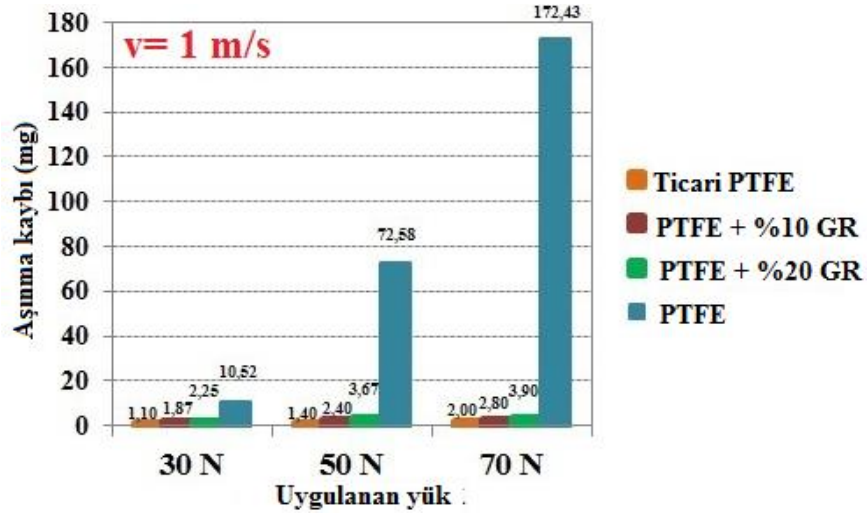
Deneyleerde en yüksek hız olan 1,5 m/s hızda elde edilen sürtünme katsayıları Şekil 4.41, Şekil 4.42 ve Şekil 4.43’de diğer hzlara göre daha yüksek değerlerdedir. Çünkü numuneler 1,5 m/s hızda en fazla kayma mesafesi olan 13500 m yol almıŐlardır. Çalışma yüzeylerinde bulunan PTFE ve PTFE katkılı polimer malzemeler kalkarak yerini gözeneklerde bulunan PTFE + Bronz kompozit yüzeye bırakmıŐtır. Bu yüzey her ne kadar bronz malzeme yüzeyinden daha düşük bir sürtünme katsayısına sahip olsa da ilk deneylerin baŐlangıcındaki ve daha az yol alınan mesafelerdeki yüzeylerden daha iyi durumda değerdir. Ancak grafit katkılı PTFE kaplı numunelerin sürtünme katsayılarında hız artmıŐ olmasına rağmen PTFE kaplı numunelere göre çok fazla artış olmamıŐtır. Bu durum PTFE’ye katkı malzemesi olarak kullanılan yine yağlayıcı özelliğe sahip grafitin, büyük partikül boyutuyla gözenekleri doldurmuŐ olması ve PTFE’nin yüzeyden tamamen kalkmasını durdurmuŐ olmasıyla açıklanabilir. Öte yandan, SEM görüntülerinden de anlaşılacağı gibi, PTFE kaplı numune yüzeylerine nazaran polimer malzeme yüzeyden tamamen kalkmamŐ ve yüzey kenarlarındaki boşluklara doğru adeta sıvanmŐtır/kaymıştır. Bu durum PTFE ve grafitin kompozit yapılar da uyumlu birlikteliğinin göstergesidir.

4.5.2. AŞınma kaybı grafiklerinin karşılaştırılması

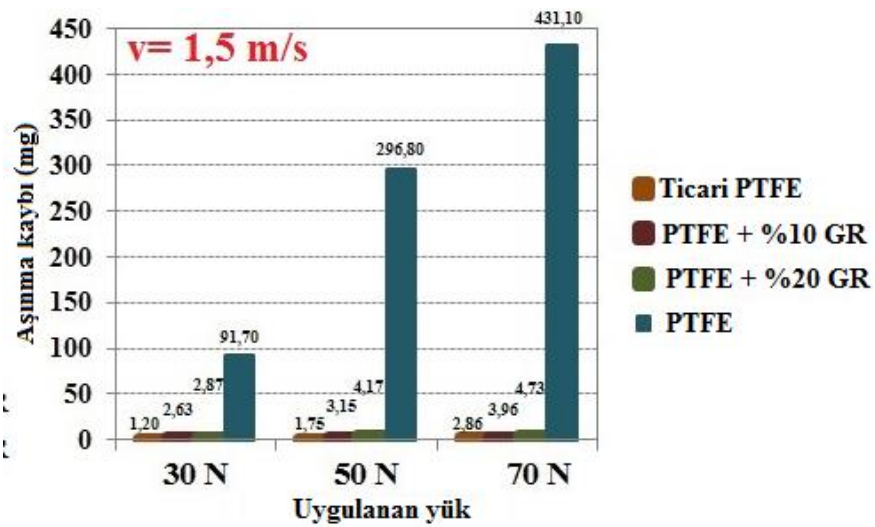
Yatak numunelerinin aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma kayıplarını gösteren grafikler Şekil 4.44, Şekil 4.45 ve Şekil 4.46 karşılaştırıldığında, genel olarak numunelerde, yk ve hız arttıkça aşınma kaybının arttığı görülmüştür. Deneyleerde, en fazla yol alınan 1,5 m/s hızda ve en yüksek yük olan 70 N’daki aşınma kaybının fazla olduğunu, en az yol alınan 0,5 m/s hızda ve en düşük yük olan 30 N’da ise aşınma kaybının en az olduğu belirlenmiştir. Yatak numuneleri kendi aralarında kıyaslandığında ise, PTFE kaplanmış numunelerin tüm hızlarda en fazla aşınma kaybına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, çalışma yüzeyinde bulunan PTFE malzemenin aşınarak bronz malzemenin çalışma yüzeyi olarak görev yapmasıyla aşınma kaybının da arttığı görülmektedir. Yani, PTFE malzeme yüzeyden kalktıktan sonra gözeneklerdeki PTFE malzemeyle birlikte mile temas (kısmen metal-metal temas) söz konusudur.



Şekil 4.44. Yatak numunelerinin 0,5 m/s hızdaki aşınma kayıpları



Şekil 4.45. Yatak numunelerinin 1 m/s hızdaki aşınma kayıpları



Şekil 4.46. Yatak numunelerinin 1,5 m/s hızdaki aşınma kayıpları

Grafit katkılı PTFE kaplanmış ve Ticari PTFE kaplı yatak numuneleri kendi aralarında kıyaslandığında, her üç tür numunedeki aşınma kayıpları PTFE kaplı numuneye göre tüm hızlarda önemsenmeyecek miktardadır. PTFE+% 10 GR katkılı yatak numunesi ile Ticari kaplı yatak numunesi en az aşınma kaybına sahip numunelerdir. Bu durum PTFE+ % 10 GR numuneler için, polimer malzemenin yüzeyden tamamen kalkmamış olmasına ve bölüm 4.4'de bu numunelerin görüntü analizlerindeki SEM görüntülerinden de anlaşılacağı gibi, yüzey kenarlarındaki boşluklara doğru adeta sıvanmış/kaymış olmasına bağlanmıştır. Ayrıca, grafitin sürtünme ve aşınmayı azaltan katı yağlayıcı olarak katkı sağlaması [99], PTFE ve grafitin kompozit yapılarda uyumlu birlikteliğiyle de kuru yağlayıcı özelliğe sahip hem grafit hem de PTFE yatak yüzeylerinin de aşınmasını ertelemiştir. Ticari numuneler açısından değerlendirildiğinde ise, Ticari yatak numuneleri çelik altlık yüzeyine ince bir bronz katmanın haddelenerek sinterlenmesi şeklinde üretilerek ardından PTFE'nin kaplanmasıyla, yüzeyi PTFE kaplı kompozit bir yapı olarak imal edilmiştir. Karşı aşındırıcı olarak çalışan milin de ortalama 50 µm kalınlığındaki bu PTFE kaplı yüzeyde çalışmasıyla açıklanabilir. Çünkü bu çalışma yüzeyi, hem PTFE hem de PTFE kaplamanın yüzeyinde eser oranda yağlayıcı özelliğe sahip Pb' olan bir yüzeydir.

4.6. Taguchi Deneysel Tasarım Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deney tasarımında çok sayıda faktörün az sayıda deneyle incelenmesi için Taguchi deneysel tasarım kullanılmıştır. Taguchi deneysel tasarım metodu ortogonal özelliği sayesinde bir faktörün seviyelerinin diğer faktörlerin aynı sayıdaki farklı seviyeleri ile eşleştirilmesi imkânı sağlamaktadır [129,130].

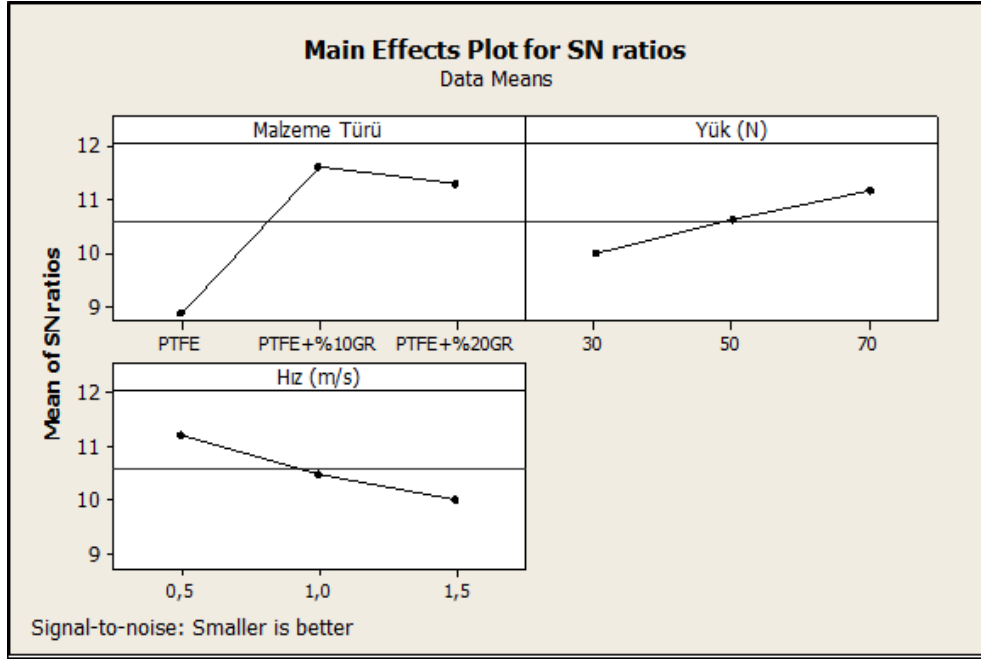
4.6.1. Optimum deney sonuçları

Tablo 4.13'de verilen yirmi yedi farklı deney parametresine göre yapılan deneysel optimizasyon sonucunda, malzeme türü, hız ve yük parametrelerinin optimizasyonu amacı ile Şekil 4.47'de faktör seviyelerinin ortalama S/N oranları dikkate alınarak

hazırlanmış “faktörlerin grafiksel gösterimi” yer almaktadır. Elde edilen bu grafiğe göre endüşük sürtünme katsayısı için optimum deney şartlarının %10 grafit katkılı PTFE malzeme türünde 70 N yük ve 0,5 m/s kayma hızında elde edildiği tespit edilmiştir.

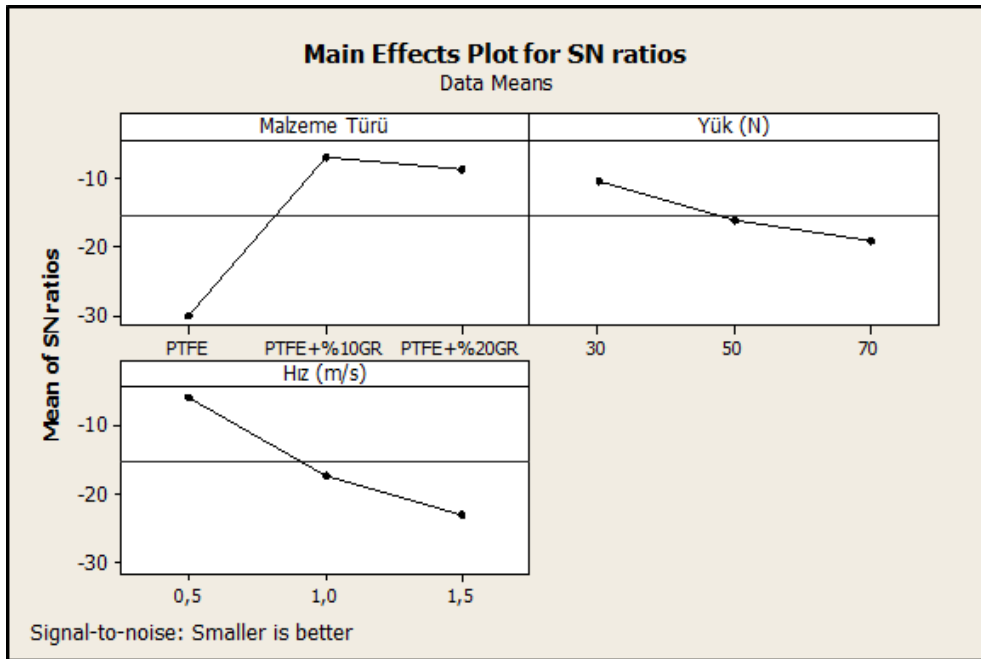
Tablo 4.13. Yatak burçlarının deneyleri için hazırlanan L_{27} (3^{13}) dizisi.

Malzeme Türü	Yük (N)	Hız (m/s)	Sürtünme (μ)	Aşınma Kaybı (mg)	Sıcaklık ($^{\circ}$ C)
PTFE	30	0,5	0,345	1,60	32,73
PTFE	30	1	0,404	10,52	42,39
PTFE	30	1,5	0,433	91,70	46,61
PTFE	50	0,5	0,316	2,80	37,68
PTFE	50	1	0,367	72,58	47,82
PTFE	50	1,5	0,397	296,80	60,05
PTFE	70	0,5	0,29	5,70	41,17
PTFE	70	1	0,344	172,43	56,89
PTFE	70	1,5	0,365	431,10	72,89
PTFE+%10 GR	30	0,5	0,266	1,10	30,42
PTFE+%10 GR	30	1	0,276	1,87	39,03
PTFE+%10 GR	30	1,5	0,284	2,63	44
PTFE+%10 GR	50	0,5	0,248	1,60	32,42
PTFE+%10 GR	50	1	0,263	2,40	42,12
PTFE+%10 GR	50	1,5	0,275	3,15	47,45
PTFE+%10 GR	70	0,5	0,242	2,25	33,48
PTFE+%10 GR	70	1	0,25	2,80	46,8
PTFE+%10 GR	70	1,5	0,263	3,96	55,34
PTFE+%20 GR	30	0,5	0,283	1,13	30,98
PTFE+%20 GR	30	1	0,293	2,25	37,58
PTFE+%20 GR	30	1,5	0,304	2,87	39,67
PTFE+%20 GR	50	0,5	0,257	1,80	32,74
PTFE+%20 GR	50	1	0,27	3,67	42,52
PTFE+%20 GR	50	1,5	0,29	4,17	45,94
PTFE+%20 GR	70	0,5	0,236	2,20	35,23
PTFE+%20 GR	70	1	0,254	3,90	48,52
PTFE+%20 GR	70	1,5	0,271	4,73	58,49



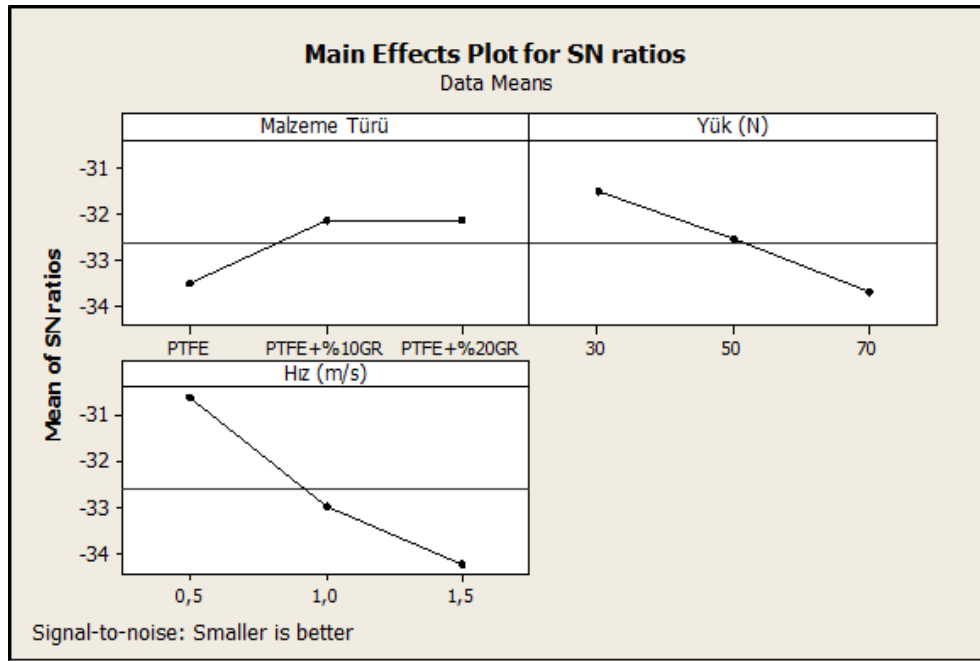
Şekil 4.47. Sürtünme katsayısının optimizasyonuna ait ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimi.

Yapılan çalışmada aşınmaya etki eden malzeme türü, hız ve yük parametrelerinin optimizasyonunda ise Şekil 4.48'de görülen deneyler sonucunda elde edilen faktör seviyelerinin ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimine göre minimum aşınma kaybı için optimum deney şartlarının PTFE + % 10 GR malzeme türünün 30 N yük ve 0,5 m/s hızda olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.48. Aşınma kaybının optimizasyonuna ait ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimi

Şekil 4.49’da deneylerde yatak sıcaklığına etki eden malzeme türü, hız ve yük parametrelerine ait faktör seviyelerinin ortalama S/N oranlarının grafiksel gösteriminden elde edilen optimum şartlar gösterilmektedir. Optimizasyon sonucunda, optimum yatak sıcaklığı için deney şartlarının, PTFE+ % 10 GR ve PTFE + % 20 GR malzeme türlerinde 30 N yük ve 0,5 m/s hız olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.49. Yatak sıcaklığının optimizasyonuna ait ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimi

4.6.2. ANOVA analizleri

Taguchi metodu kullanılarak alınan verilerin ANOVA (değişkenler analizi) yöntemiyle yapılan analizler sonucunda sürtünme katsayısı, aşınma kaybı ve yatak sıcaklığı üzerinde en etkili faktörlerin etkinlik dereceleri “ $P^a(\%)$ ” tespit edilmiştir. Bu yöntemin uygulanmasıyla elde edilen değerlerde, $F_{test} > 4$ olduğu zaman deney sonucu üzerinde parametrelerin büyük bir etkiye sahip olduğu kabul edilmektedir[131,132].

Tablo 4.14. incelendiğinde sürtünme katsayısı üzerinde en etkili faktörün “malzeme türü” parametresi olduğu gözlenmiştir. Etkinlik derecesine göre kayma hızı ve yük parametrelerinin de sonuç üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.14. Yatak burçlarının sürtünme katsayısına göre ANOVA analiz sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SDQ)	Varyans	F _{test}	F _{table}	P ^a (%)
Malzeme Türü	2	0,0537899	0,0268949	1762,53	14,54 ^b	71,61
Yük (N)	2	0,0077547	0,0038774	254,1	14,54 ^b	10,32
Hız (m/s)	2	0,0089543	0,0044771	293,41	14,54 ^b	11,92
Malzeme Türü*Yük (N)	4	0,0010588	0,0002647	17,35	12,03 ^b	1,41
Malzeme Türü*Hız (m/s)	4	0,0034093	0,0008523	55,86	3,18 ^c	4,54
Yük (N)*Hız (m/s)	4	0,0000237	0,0000059	0,39		0,03
Error	8	0,0001221	0,0000153			
Total	26	0,0751127				100

Tablo 4.15 incelendiğinde ise, aşınma kayıpları üzerinde en etkili faktörün sırasıyla “malzeme türü, hız ve yük” parametrelerinin her üçünün de etkili olduğu belirlenmiştir. Etkinlik derecesine göre en fazla malzeme türü etki ederken, malzeme türü ve hız ile malzeme türü ve yükün de birlikte daha etkili oldukları gözlemlenmiştir.

Tablo 4.15. Yatak burçlarının aşınma kaybına göre ANOVA analiz sonuçları.

Faktörler	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SDQ)	Varyans	F _{test}	F _{table}	P ^a (%)
Malzeme Türü	2	83387	41693	17,20	14,54b	30,88
Yük (N)	2	14664	7332	3,03	14,54b	5,43
Hız (m/s)	2	39295	19647	8,11	14,54b	14,55
Malzeme Türü*Yük (N)	4	27970	6992	2,89	12,03b	10,36
Malzeme Türü*Hız (m/s)	4	75572	18893	7,80	3,18c	27,98
Yük (N)*Hız (m/s)	4	9770	2442	1,01		3,62
Error	8	19389	2424			
Total	26	270046				100

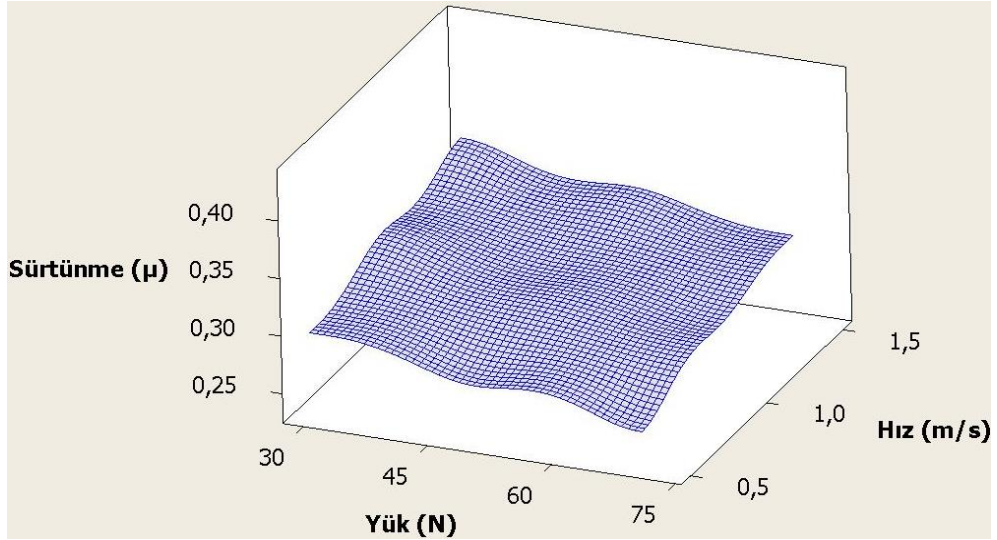
Tablo 4.16’de yatak sıcaklıkları üzerinde en etkili faktörün sırasıyla “hız ve yük olduğu belirlenirken malzeme türünün de kısmen etkili olduğu tespit edilmiştir. Etkinlik derecesine göre ise en fazla hız faktörünün etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 4.16. Yatak burçlarının yatak sıcaklıklarına göre ANOVA analiz sonuçları.

Faktörler	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SDQ)	Varyans	F _{test}	F _{table}	P ^a (%)
Malzeme Türü	2	331,2	165,6	73,83	14,54 ^b	12,13
Yük (N)	2	621,2	310,6	138,48	14,54 ^b	22,75
Hız (m/s)	2	1503,48	751,74	335,15	14,54 ^b	55,06
Malzeme Türü*Yük (N)	4	62,46	15,615	6,96	12,03 ^b	2,29
Malzeme Türü*Hız (m/s)	4	51,59	12,8975	5,75	3,18 ^c	1,89
Yük (N)*Hız (m/s)	4	142,92	35,73	15,93		5,23
Error	8	17,94	2,2425			
Total	26	2730,8				100

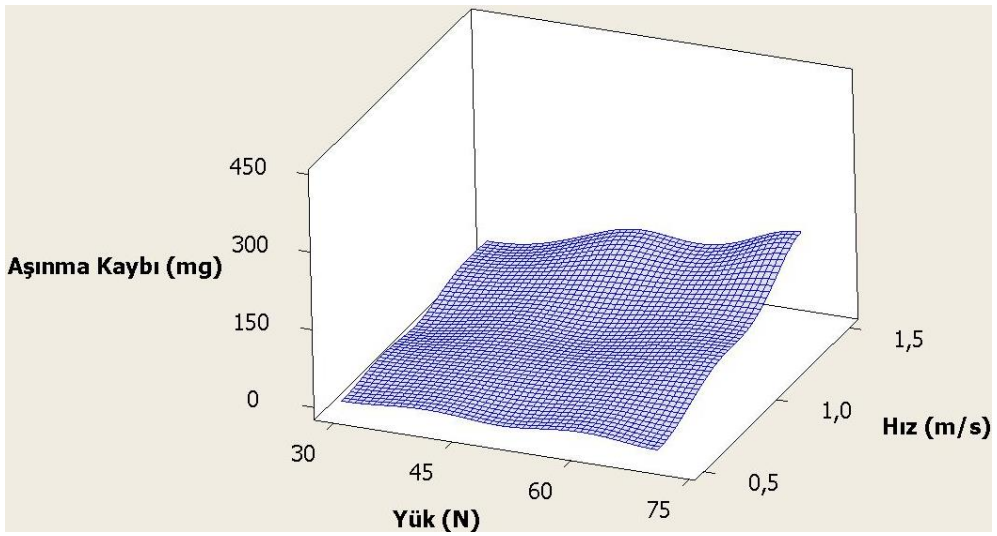
4.6.2.1. ANOVA analiz haritaları

Analiz haritaları yapılan deneyler sonucunda elde ettiğimiz değerlere etki eden parametreleri birlikte görmemize imkan tanımaktadır. Taguchi metodu kullanılarak alınan verilerin ANOVA yöntemiyle değişkenler analizi sonucunda elde edilen bu haritalarla da optimum sonuçların yanı sıra alt ve üst değerleri de görerek bu değerleri yorumlanmasına kolaylık sağlamaktadır. Şekil 4.50’de gösterilen sürtünme katsayısına ait analiz haritasını incelediğimizde sürtünme katsayısına etki eden hız ve yük parametrelerinin birlikte en yüksek yük (70 N) ve en düşük hızda (0,5 m/s) en düşük sürtünme katsayısı elde edildiği açıkça görülmektedir.



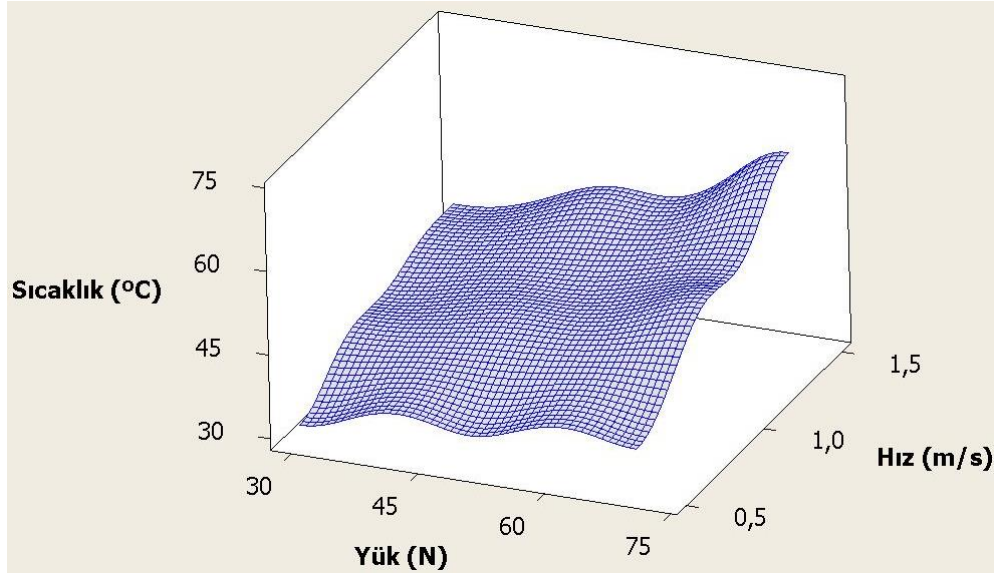
Şekil 4.50. Sürtünme katsayısına etki eden parametrelerin analiz haritası

Şekil 4.51’de gösterilen aşınma kaybına ait analiz haritasını incelediğimizde sürtünme katsayısına etki eden hız ve yük parametrelerinin birlikte en düşük yük (30 N) ve en düşük hızda (0,5 m/s), en düşük aşınma kaybının elde edildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4.51. Aşınma kaybına etki eden parametrelerin analiz haritası

Şekil 4.52’de ise yatak sıcaklığına etki eden parametrelerin analiz haritasını incelediğimizde ise, en yüksek yatak sıcaklığının en yüksek yük ve en yüksek hızda gerçekleştiği ve en düşük yatak sıcaklığın ise en düşük yük (30 N) ve en düşük hızda (0,5 m/s), elde edildiği gözlenmektedir. Aynı zamanda, analiz haritasında yatak sıcaklığına en fazla etki eden parametrenin, hız faktörü olduğu açıkça görülmektedir.



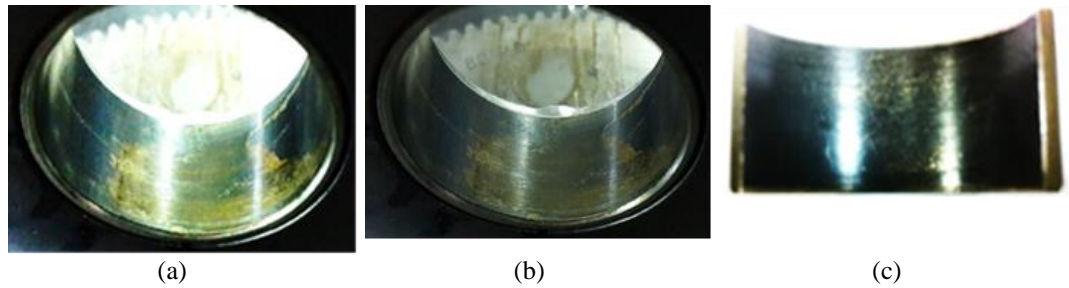
Şekil 4.52. Yatak sıcaklığına etki eden parametrelerin analiz haritası

4.7. Yatak Ömür Testi

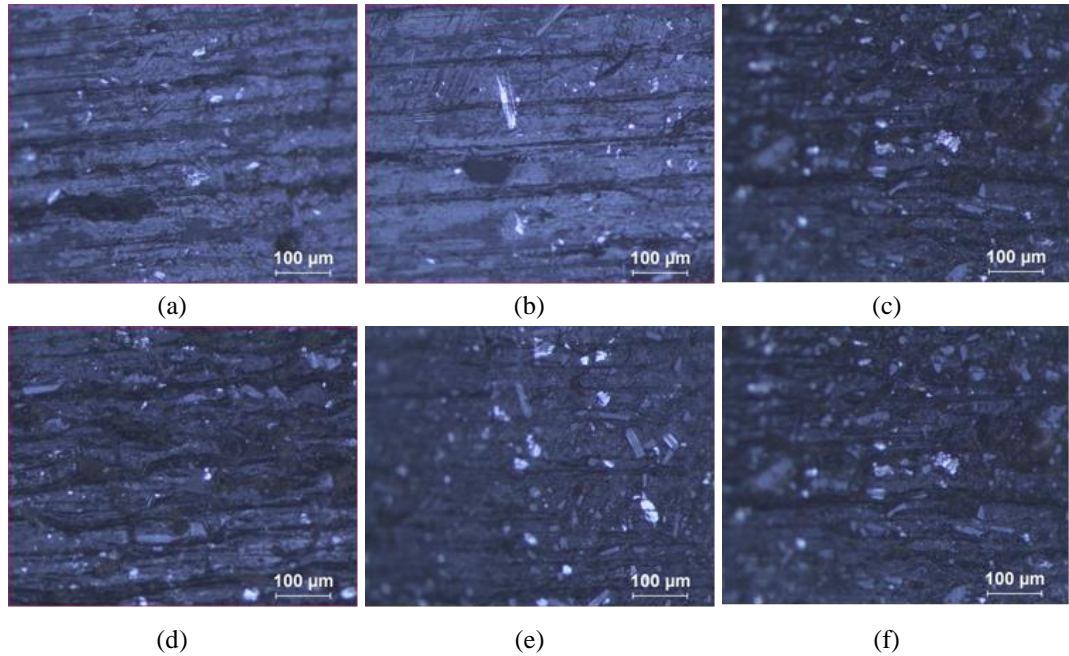
Kaymalı yataklardan beklenen özelliklerden biri de kendinden beklenen çalışma performansı ve bunu uzunca bir sürede kararlı olarak devam ettirmesidir. Yani uzun ömürlü olmasıdır. Çalışma performansı kaymalı yatağın üretildiği malzeme ve çalışma ortamının şartlarına bağlıdır. Yatak ömrü ise, yatağın kabul edilebilir performans aralığında çalışması sonucunda yatağın bu performans aralığından çıkarak çalışma yüzeylerinde hasarın meydana gelmeye başlaması ve yenisiyle değiştirilmesinin gerekli olduğu zamana kadarki işletme saatidir.

Yapılan ömür testi çalışmasında numuneler normal oda şartlarında deney düzeneğine bağlanarak uygulanabilecek en yüksek yükte (70 N) ve hızda (1 m/s) çalıştırılarak sürtünme katsayıları sürekli takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek hızlara ve yüklere çıkılması durumu incelenerek en uygun ve uzun süre testin stabilitesi bozulmadan gerçekleştirilebilecek şartlar olan şartlar uygulanmıştır. Sürtünme katsayılarındaki değişim aşınma bölgelerindeki geçiş bölgelerini göstermektedir. Alıştırma aşınmasını geçen numuneler kararlı aşınma bölgesini ne kadar sürede tamamladıkları gözlemlenmiş ve aşırı aşınma bölgesine kaç saat sonunda ulaştıkları tespit edilmiştir.

Öncelikle ticari numuneler teste tabi tutularak en az üç numune uzun çevrim süreleri sonunda (13-19 saat) sürtünme katsayıları alınarak aşırı aşınma bölgesine geçtikleri yüksek değerlere ulaşması ve sürtünmede oluşan ses neticesinde deney sonlandırılmıştır. Aynı işlem %10 grafit katkılı PTFE emdirilmiş numuneler içinde tekrarlanmıştır. Çalışma esnasında belli aralıklarla numune sıcaklıkları kontrol edilerek kayda alınmıştır. Şekil 4.53’de ticari numunelerin ömür testi sonundaki yatak aşınmasını göstermektedir. Şekil 4.54 ise mikroskop altında (100 μm) yatak numunesinin bronz yüzeyin partikül formunda mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



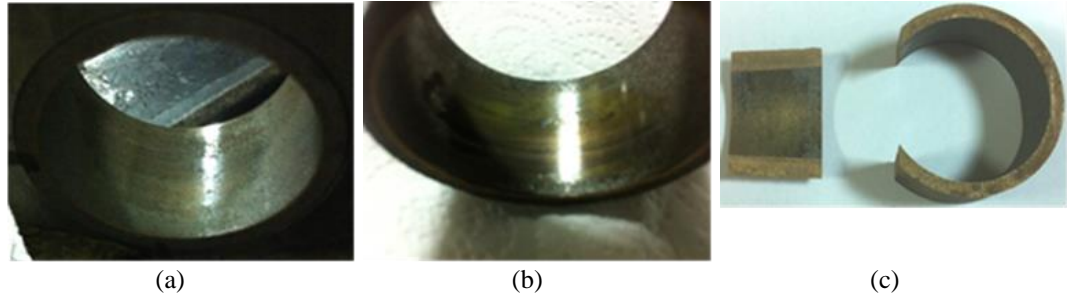
Şekil 4.53. Ömür testi sonunda aşınan ticari PTFE kaplı yatak numuneleri



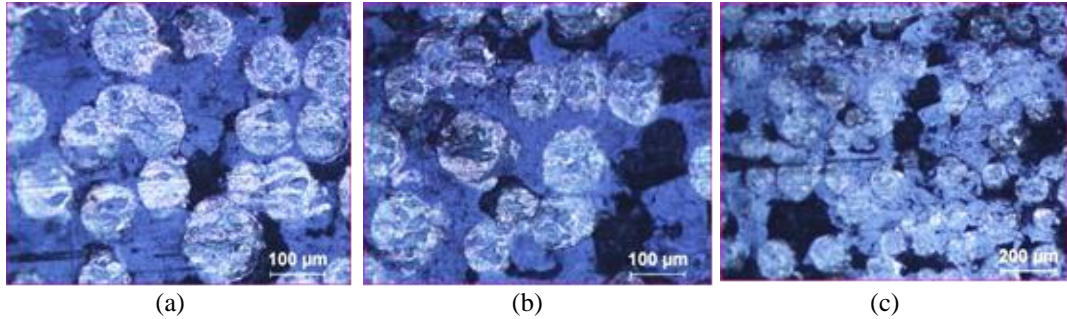
Şekil 4.54. Ticari PTFE kaplı numunelerin test sonundaki mikroyapı görüntüleri

Şekil 4.55 PTFE + % 10 GR numunelerin ömür testi sonundaki yatak aşınmasını ve Şekil 4.56 ise mikroskop altında (100 -200 μm) yatak numunesinin bronz yüzeyin

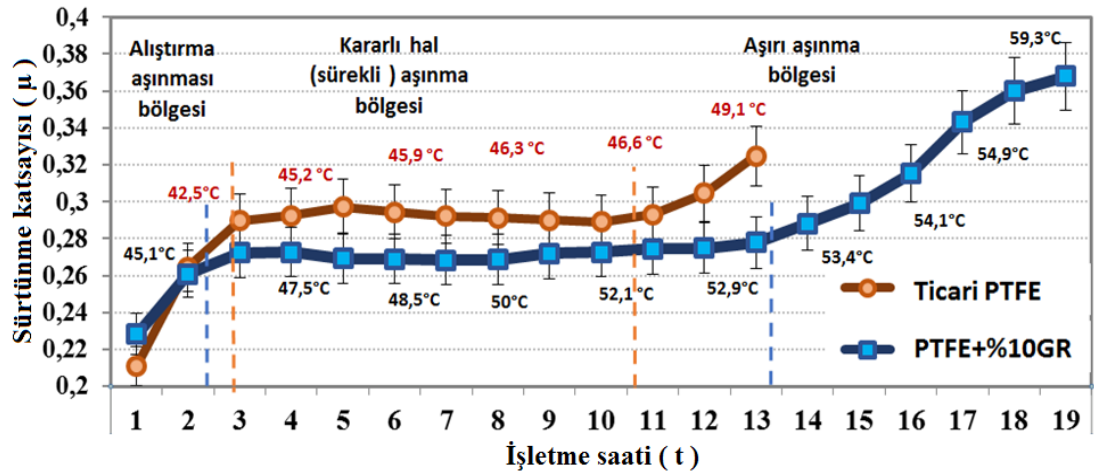
partikül formunda mikro yapı görüntüsünü göstermektedir. Şekil 4.57’de ise iki farklı yatak numunesinin ortalama değerler alınarak elde edilen ömür testi ve aşınma bölgelerini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 4.55. Ömür testi sonunda aşınan PTFE + % 10 GR numuneler



Şekil 4.56. PTFE + % 10 GR numunelerin test sonundaki mikroyapı görüntüleri



Şekil 4.57. Ticari ve PTFE + % 10 GR numunelerin ömür testi grafiği ve aşınma bölgeleri

Şekil 4.57’deki grafikte görüldüğü üzere ticari numuneler 2,5 saat sonunda alıştırma aşınmasını geçerek 10. Saatte kadar kararlı bir aşınma göstermişlerdir. Bu saatten sonra ise aşırı aşınma bölgesine geçerek yatağın ömrünü doldurduğunu gözlemlerken, PTFE + % 10 GR numunelerde alıştırma aşınması daha kısa sürede

geçilerek (2 saat) kararlı aşınma bölgesi 13. saate kadar devam etmiştir. Bu durumda PTFE + % 10 GR numunelerin ömrü yaklaşık % 30 daha uzun olduğu, aynı zamanda sürtünme katsayısının ise kararlı bölgede ticari numuneden % 7,5 daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Ticari numunede sürtünme katsayısı 0,289 - 0,297 iken PTFE + % 10 GR numunelerde ise 0,268 - 0,274 arasındadır. Ömür testi sonunda aşınma kayıpları incelendiğinde ticari numunelerde aşınma kaybı ortalama 0,0037 g, iken PTFE + % 10 GR numunelerde ise 0,0055 g'dır. Ticari numunelerin biraz daha az aşındığı fakat sürtünme katsayısının daha yüksek ve yatak ömürünün de daha kısa olduğu belirlenmiştir.

BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR

Makine, otomotiv ve uçak endüstrisinde yaygın olarak kullanılmakta olan, bronzun sinterlenmesiyle elde edilen gözenekli mikro yapıya katı yağlayıcı PTFE ve PTFE katkılı katı yağlayıcılar kaplanarak/emdirilerek elde edilen bronz + PTFE kompozit yapılar, düşük sürtünme katsayısı, korozyona karşı yüksek direnç, iyi basma ve yorulma mukavemeti, iyi aşınma dayanımı, yüksek ısı iletim katsayısı, düşük genleşme katsayısı, yağ ve dışarıdan gelen sert partikülleri bünyesine gömebilme kabiliyeti, kolay işlenebilirlik ve ekonomiklik gibi mükemmel tribolojik özellikleri nedeniyle devamlı yağlama imkânı olmayan kaymalı yatak uygulamalarında kullanılmaktadır. Gelişen teknolojiye paralel olarak bu özellikleri bir arada barındıran yatak malzemelerine olan ihtiyaç arttıkça tercih edilebilirlik oranları ve bu alandaki AR-GE çalışmaları da her geçen gün artmaktadır.

Bu çalışmada, CuSn11 kalay bronz tozları, toz metallurjisi metoduyla sinterlenerek gözenekli yatak malzemeleri üretilmiştir. Bu malzemelerin gözeneklerine PTFE, PTFE + % 10 GR, PTFE + % 20 GR olarak üç farklı katkılı polimer malzeme spreylendirilerek emdirilmiştir. Bu numuneler, tasarlayarak imalatı gerçekleştirilen kaymalı yatak aşınma test cihazında üç farklı hız ve üç farklı yük altında kuru sürtünme, aşınma deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda piyasadan ticari olarak temin edilen çelik altlık yüzeyine bronz sinterlenmiş PTFE kaplı ticari yatak burçlarının da aynı şartlarda testleri yapılarak, üretilen PTFE ve grafit katkılı PTFE kaplanmış kompozit yatak malzemeleriyle deney sonuçları ve aşınma yüzeylerinin SEM mikroyapı analizleri incelenerek kıyaslanmıştır. Öte yandan, ANOVA metodu kullanılarak üretilen yatak numunelerinin çalışma şartlarının optimizasyonu yapılarak deney sonuçlarının doğrulanması yapılmıştır. Son olarak da, üretilen numuneler arasında deney sonuçları daha iyi olarak belirlenen PTFE + % 10 GR numuneler ile Ticari PTFE kaplı numunenin yatak ömür testleri de yapılarak kıyaslanmıştır.

5.1. Çalışma Sonuçları

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sırası ile özetlenmiştir;

- 1) Kuru sürtünmenin gerçekleştiği kompozit bir yapının (Bronz + PTFE) yüzeyinde PTFE malzemenin tek başına yeterli (sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı) olmadığı görülmüştür.
- 2) Gözenekli bronz malzemenin yüzeyine sprej kaplama metoduyla emdirilmiş PTFE malzemeyle birlikte grafitin de kullanımı sürtünme katsayısı ve aşınma parametrelerine olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.
- 3) Farklı bir üretim tekniğiyle üretilmiş olan yatak burcunun, ticari olarak üretilmiş yatak burcuna bir alternatif olduğu görülmüştür.
- 4) T/M ve sprej kaplama metoduyla kaplanmış (PTFE emdirilen) burcun tamamı bir yatak malzemesi olarak kullanılabilir.
- 5) Gözenekli bronz numunelerin gözeneklerine katı yağlayıcı olarak emdirilen PTFE'ye sürtünme ve aşınmayı azaltmasına katkı sağlaması için ilave edilen grafitle uyumlu birlikteliği kuru şartlardaki aşınma deneylerinde yatak yüzeylerinin aşınmasını azaltmıştır.
- 6) Grafit oranını % 20 oranında artırmanın aşınma kaybında ortalama yük ve hızda % 10 grafitte göre bir miktar arttığı (1,27 mg / % 65), % 10 grafit katkılı burcun daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.
- 7) Yüksek hızlarda (1,5 m/s) ve yüksek yüklerde (70 N) PTFE'nin tek başına yeterli olmazken, % 10 grafit katkısıyla daha iyi sonuçlar verdiği ve sürtünme katsayısını ortalama $\mu = 0,26$ değere indirdiği gözlemlenmiştir.

- 8) Hız ve yüklerdeki artışlara bağlı olarak numunelerin çalışma esnasındaki sıcaklıklarında artışların, katkısız PTFE kaplı numunelere göre yaklaşık, sırasıyla 5, 10 ve 12 °C yatak sıcaklıklarında azalmalar gözlenmiştir.
- 9) Yatak numunelerinin deneyleri sonrası, Taguchi metodu kullanılarak alınan veriler ANOVA yöntemiyle sonuçlar üzerindeki her bir faktörün (malzeme türü, yük ve hız) etkinlik derecesi istatistiki olarak elde edilmiştir.
- 10) ANOVA analizi sonucunda optimum deney şartlarının yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu belirlenmiştir.
- 11) Deneyler sonucunda, % 10 grafit katkılı PTFE bronz burcun 0,5 m/s hızda ve 70 N yük altında optimum sonucu verdiği deneysel ve istatistiksel olarak tespit edilmiştir.
- 12) % 10 grafit katkılı PTFE numunelerin ömrü yaklaşık % 30 daha uzun olduğu, aynı zamanda sürtünme katsayısının ise karalı bölgede ticari numuneden % 7,5 daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir.

5.2. Öneriler

Deneyler sonucunda elde edilen verilere dayanarak bu çalışmanın aşağıda belirtilen önerilerle daha da geliştirilebilecektir.

- 1) Gözenekli bronz burçların gözeneklerine farklı polimerler/yağlayıcılar emdirilmek suretiyle çalışma şartlarındaki performansları belirlenerek bu burçların uygulama alanları genişletilebilir.
- 2) Üretilen yatak numunelerin çalışma yüzeyine ticari numunelerin çalışma yüzeyindeki PTFE kaplama kalınlığına benzer bir kaplama kalınlığı elde edilerek çalışmanın bu yüzeyde gerçekleşmesi sağlanabilir.

- 3) Gözenekli bronz numunelerin üretilmesinde kullanılan bronz tozlarının farklı tane boyutlarında kullanımıyla üretimi sağlanarak tane boyutunun, gözenek durumunun yatak çalışma performansına etkisi incelenebilir.
- 4) Yatak numunelerin çalışma yüzeylerinin kaplanmasında kullanılan PTFE polimeri ile birlikte Grafitin yanı sıra daha farklı katkılar da kullanılabilir.
- 5) PTFE ve katkılı PTFE polimerlerin gözenekli bronz numunelerin gözeneklerine veya çalışma yüzeylerine farklı kaplama metotlarıyla emdirilmeleri/kaplanmaları sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Akkurt, M., Makine Elemanları I, Birsen Yayınları, İstanbul, 1990.
- [2] Uzuner, F., Gediktaş, M., Salınım hareketi yapan radyal kaymalı plastik yataklarda sürtünme, İTÜ. Dergisi, Cilt 3, Sayı 6, 2004
- [3] Ünlü, B. S., Yılmaz, S.S., Uzkut, M, Borlanmış ve semantasyon yapılmış SAE 1020 yatağın aşınma özellikleri, C B Ü Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, Cilt 2, Sayı 14, 2010.
- [4] Backensto, A. B., Effects of lubricants on the properties of copper-tin powders and compacts, Advances in P/M. Proc. of PM Conf., N. Jersey, APMI, pp.303-314, 1990.
- [5] Prasad B. K., Dry sliding wear response of some bearing alloys as influenced by the nature of micro constituents and sliding conditions Metalurgical and Materials Transactions A 28, 809-15, 1997.
- [6] Schmidt, R. F., Schmidt, D. G., Selection and application of copper alloy castings, ASM Handbook II, 346-355, 1993.
- [7] Güngör, K., Demirer, A., Özsert I., Investigation of the wear behavior of self-lubricating PTFE (Teflon) - coated bushing material, 7th International Advanced Technologies Symposium, IATS'13, İstanbul, 2013.
- [8] Sarıtaş S., M. Türker, N. Durlu, Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 2007.
- [9] German, R. M., Powder Metallurgy Science (Second Edition), Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 472 pages. ISBN: 1-878954-42-3; (Japanese edition) 1996, Uchida Rokakuho Publishing, Tokyo, Japan., 1994.
- [10] Durak, E., Duran, F., Tribological and fatigue failure properties of porous P/M bearing, International Journal Of Fatigue 30, 745-755, 2008.
- [11] Morgan, V. T., Porous Metal Bearings, 1970.

- [12] Nickchi, T., Ghorbani, M., Alfantazi, A., Farhat, Z., Fabrication of low friction bronze–graphite nano-composite coatings *Materials and Design* 32, 3548–3553, 2011.
- [13] Khedkar, J., Negulescu, L., Meletis, E. I., Sliding wear behavior of PTFE composites, *Wear*, 252, 361-369, 2002.
- [14] Ünal, H., Şen, U., Mimaroglu, A., An approach to friction and wear properties of Polytetrafluoroethylene composite, *Materials and Design* 27, 694–699, 2006.
- [15] Kornopol'tsev, V. N., Kornopol'tsev, N. V., and Mognonov, D. M., Metal-PTFE material for dry friction bearings, *Journal of Friction and Wear*, 28, 187–192, 2007.
- [16] Lewis R., Friction in a hydraulic motor piston/cam roller contact lined with PTFE impregnated cloth, *Wear* 266, 888–892, 2009.
- [17] Klaas, N. V., Marcus, K., Kellock C., The tribological behaviour of glass filled polytetrafluoroethylene, *Tribology International* 38, 824–833, 2005.
- [18] Tevrüz, T., Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings, *Wear* 230, 61–69, 1999.
- [19] Jia, Z.-N., Yang, Y.-L., Chen, J.-J., Yu, X.-J., Influence of serpentine content on tribological behaviors of PTFE/serpentine composite under dry sliding condition, *Wear* 268, 996–1001, 2010.
- [20] <http://www.skf.com/binary/49-120169/SKF-bushings-thrust-washers-and-strips-1-DE.pdf>. Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [21] http://www.boie.de/ftp/pub/skf/4741I_G.pdf. Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [22] http://www.elringklinger-kunststoff.de/fileadmin/user_upload/pdf/service/katalog-downloads/ka_gleitlager_gb.pdf., Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [23] Aldousiri, B., Shalwan, A., and Chin C. W., A review on tribological behaviour of polymeric composites and future reinforcements, Hindawi Publishing Corporation *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013.
- [24] Kawakame, M., Bressan, J.D., Study of wear in self-lubricating composites for application in seals of electric motors *Journal of Materials Processing Technology* 179, 74–80, 2006.

- [25] Balaji, R., Malathy P., Kumar, K. Y., Subramanian K., Electrodeposition of bronze-PTFE composite coatings and study on their tribological characteristics, *Surface & Coatings Technology* 201, 3205–3211, 2006.
- [26] Harris, T. and Kotzalas, M., *Advanced Concepts of Bearing Technology*, Fifth Edition, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2007.
- [27] Koç, E., *Makina Elemanları*, Cilt-II, Nobel Yayınları, Adana, 2006.
- [28] https://en.wikipedia.org/wiki/Plain_bearing, Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [29] <http://www.merkeziyaglamasistemleri.com>, Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [30] Rende, H., Hanyaloğlu, C., *Rulmanlarda ve kaymalı yataklarda seramiklerin kullanımı*, *Mühendis ve Makina Dergisi*, cilt 53, sayı 633, s. 28-35, 2012.
- [31] Ai, X. and Moyer, C. A., “*Modern Tribology Handbook*”, Vol. I & II, CRC Press, London, New York Washington, 2001.
- [32] Welsh, R. J., *Plain Bearing Design Handbook*, The Thetford Press Ltd., UK, 1983.
- [33] Neale, M. J., *The Tribology Handbook*, Second Edition, Antony Rowe Ltd., Oxford, Britain, 2001.
- [34] Srivastava, V.K. Pathak, J.P., Friction and wear properties of bushing bearing of graphite filled short glass fibre composites in dry sliding, *Wear* 197, 145–150, 1996.
- [35] Booser, E. R., *Plain Bearing Materials*, *Machine Design*, 42 (15), pp. 14-20, 1970.
- [36] Zeren, A., Embeddability behaviour of tin-based bearing material in dry sliding, *Materials & Design* 28, 2344–2350, 2007.
- [37] Feyzulloğlu E., Zeren A., Zeren M., Tribological behaviour of tin-based materials and brass in oil lubricated conditions, *Materials & Design* 29, 714–720, 2008.
- [38] Unlu, B. S., Atık, E., Meriç C., Effect of loading capacity (pressure-velocity) to tribological properties of CuSn10 bearings, *Materials & Design* 28, 2160–2165, 2007.
- [39] Gnanaraj, S. D., Raman, R., Experimental studies on wear in oil-impregnated sintered bearings, *Wear* 155, 73–81, 1992.

- [40] Glaeser, W.A., Copper base bearing materials, *Materials For Tribology* 20, 46–68, 1992.
- [41] Khonsari, M. M., Booser E. R., *Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication*, A Wiley-Interscience Publication, 2001.
- [42] Morris, P. J., *Polymer Pioneers: A Popular History of the Science and Technology of Large Molecules*, 2005.
- [43] Kumar, P. S., Manisekar, K., Effect of Composition on Friction Coefficient of Copper based Cu-Sn-MoS₂ Composites, *IJE TRANSACTIONS A: Basics* Vol. 28, 115-120, 2015.
- [44] http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=polytetrafluoroethylene_ptfe_as_solid_lubricant, Erişim Tarihi: 10.10.2013.
- [45] Rowan, H. I., *ASM International Engineered Materials Handbook-Engineering Plastics*, Vol. 2, ASM International, USA, 2001.
- [46] B. S. Unlu, E. Atik, S. Koksall, S., Tribological properties of polymer-based journal bearings, *Materials and Design* 30, 2618–2622, 2009.
- [47] Kulkarni P. V., Chapkhane N. K., Development and testing of ptfе based composite bearing material for turbine pump, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* ISSN: 2249 – 8958, Volume-1, Issue-6, August 2012.
- [48] <http://www.intechopen.com/books/advances-in-ceramics-electric-and-magnetic-ceramics-bioceramics-ceramics-and-environment/marine-based-carbon-and-silicon-carbide-scaffolds-with-patterned-surface-for-tissue-engineering-appl.>, Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [49] <http://www.machinerylubrication.com/Read/861/solid-film-lubricants>, Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [50] <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyamides.html>, Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [51] Khurmi, R. S., Gupta, J. K., *Theory of machines*, Eurasia Publishing House, pp.258-260, 2008.
- [52] Koç, E., *Makine Elemanları*, Cilt 2, Nobel Kitabevi, Adana, 2004.
- [53] http://www.plasticbearings.com/uploads/media/Tribologie_DE.pdf. Erişim Tarihi: 05.11.2015.

- [54] Shigley, J. E., Mischke, C. R., Brown, T. H., Standard Handbook of Machine Design, Third Edition, The McGraw-Hill Companies, 2004.
- [55] <http://www.machinerylubrication.com/Read/29040/lubricant-starvation-dangers>, Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [56] uvalcı, H., and Baş, H., Investigation of the tribological properties of silicon containing zinc–aluminum based journal bearings, Tribology International, 37 (6), 433- 440, 2004.
- [57] <http://www.astbearings.com/bushings-and-plain-bearings-lubrication.html>., Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [58] Kara, K., Krank kol yataklarının aşınma davranışının işlem parametrelerine bağlı olarak incelenmesi, Y.L. Tezi, E.Ü-FBE, Ağustos 2006.
- [59] Shigley, J. E., Mischke, C. R., Brown, T. H., Standard Handbook of Machine Design, Third Edition, The McGraw-Hill Companies, 2004
- [60] <http://www.lehrerfreund.de/technik/1s/reibung-2-haftreibung-gleitreibung-rollreibung/3709>, Erişim Tarihi: 11.12.2015.
- [61] Singh, H., Sen, S., Wear in hydrodynamic journal bearings: a review, International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER), 4, 45-57, 2014.
- [62] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SR_und_FK_Diagram-Kurve2.jpg, Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [63] Myshkin, N. K., Grigoriev, A. Y., Markova L. V., Condition monitoring of tribosystems by wear debris analysis, International Journal of Applied Mechanics and Engineering 7, 923-947, 2002.
- [64] Bhushan, B., Introduction to Tribology, John Wiley & Sons Ltd. Publication, 2013.
- [65] Rigney, D. A., Chen, L. H., Naylor M. G. S., Wear processes in sliding systems, Wear 100, 195–219, 1984.
- [66] <http://www.dviaviation.com/wear-friction-testing.html>., Erişim Tarihi: 05.11.2015
- [67] Holmberg, K., Allan, M., Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering, Elsevier, 2009.

- [68] Kayaba, T., And Kato, K., Adhesive transfer of the slip-tongue and the wedge, ASLE Trans. 24, 164–174, 1981.
- [69] Say, U., Çok amaçlı bir tribometre konstrüksiyonu, Y.L. Tezi, İ.T.Ü-FBE, Haziran 2008.
- [70] www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear
Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [71] Davis, J. R., Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, ASM International, 2001.
- [72] <https://www.threebond.co.jp/en/technical/technicalnews/pdf/tech09.pdf>
Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [73] Hayashi, Y., Trends in Oil-Impregnated Sintered Metal Bearings: Mainly about Hybrid Sintered Metal Bearing Material, Japanese Journal of Tribology 42, 1403-1408, 1997.
- [74] ASM Handbook, Volume 7, Powder Metal Technologies and Applications, First Printing, pp. 859-873, Dec. 1998.
- [75] ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams, ASM International, 1992.
- [76] ASM Specialty Hand Book, Copper and Copper alloys, 105-112, 2001.
- [77] Höganäs Handbook for Sintered Components, Production of Sintered Components, Copyright Höganäs AB, December 2013.
- [78] Hayashi, Y., Trends in Oil-Impregnated Sintered Metal Bearings: Mainly about Hybrid Sintered Metal Bearing Material, Japanese Journal of Tribology 42, 1403-1408, 1997.
- [79] ASM Handbook, Volume 7, Powder Metal Technologies and Applications, First Printing, pp. 859-873, Dec. 1998.
- [80] Ünlü, S. B., Yılmaz, S. S., Varol, R., T/M yatak malzemelerinin aşınma ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2, 31-37, 2005.
- [81] Pelletiers, T., Nadkarni A., Ijeoma, R., Murphy T., Improving performance from self-lubricating bronze bearings, Metal Powder Report, 62, 26–31, 2007.

- [82] Tavakoli, A., Liu, R., Wu, X.J., A., Improved mechanical and tribological properties of tin-bronze journal bearing materials with newly developed tribaloy alloy additive. *Materials Science and Engineering* 489, 389–402, 2008.
- [83] Katoa, H., Takamaa, M., Iwaib, Y., Washidac, K., Sasaki, Y., Wear and mechanical properties of sintered copper-tin composites containing graphite or molybdenum disulfide, *Wear* 255, 573–578, 2003.
- [84] Angelo, P. C., Subramanian R., *Powder Metallurgy: Science, Technology And Applications*, PHI Learning Pvt. Ltd., 2008.
- [85] <http://www.ggbearings.com/en/products/metal-polymer/ds>, Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [86] Li, F., Yan, F., Yu, L., Liu, W., The tribological behaviors of copper-coated graphite filled PTFE composites, *Wear* 237, 33–38, 2000.
- [87] <http://www.oilesbearing.com>, Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [88] Ghorbani, M., Mazaheri M., Afshar A., Wear and friction characteristics of electrodeposited graphite-bronze composite coatings, *Surface and Coatings Technology* 190, 32-38, 2005.
- [89] Jabur, A. S., Effect of powder metallurgy conditions on the properties of porous bronze, *Powder Technology* 237, 477-483, 2013.
- [90] Nenakhov, A. V., And Kostornov, A. G., Tribological characteristics of materials based on bronze for small friction assemblies, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* 42, 7-8, 2003.
- [91] Ünlü, S. B., Atik E., Determination of friction coefficient in journal bearings *Materials and Design* 28, 973–977, 2007.
- [92] Duran, F., Kendinden yağlamalı yatakların yorulma ve tribolojik özelliklerinin deneysel incelenmesi, Y.L. Tezi, SDÜ-FBE, 2004.
- [93] Ünlü, S. B., Yılmaz, S. S., Kurgan N., Bronz-demir, T/M-döküm yatakların mikroyapı, aşınma ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu IATS'09, Karabük, 2009.
- [94] Ünlü, S. B., Köksal, N. S., Saf Cu, Sn, Zn' den üretilen yatakların aşınma özelliklerinin incelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* 2, 37-42, 2004, www.teknolojikarastirmalar.org.

- [95] Ünlü, S. B., Durmuş, H., Meriç, C., SnPbCuSb (beyaz metal) yataktaki aşım elementlerinin aşınmaya etkisinin incelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* 4, 15-20, 2006, www.teknolojikarastirmalar.org.
- [96] Gao, F., Liu, R., Wu, X. J., Tribology alloy reinforced tin-bronze composite coating for journal bearing applications, *Thin Solid Films* 519, 4809–4817, 2011.
- [97] Zeren, A., Feyzullahoglu, E., Zeren, M., A study on tribological behaviour of tin-based bearing material in dry sliding, *Materials and Design* 28, 318–323, 2007.
- [98] Khoddamzadeh, A., Liu, R., Wu, X., Novel polytetrafluoroethylene (PTFE) composites with newly developed Tribaloy alloy additive for sliding bearings *Wear* 266, 646–657, 2009.
- [99] Muterllea, P. V., Cristofolini, I., Pilla, M., Pahl, W., Molinari, A., Surface durability and design criteria for graphite-bronze sintered composites in dry sliding applications, *Materials and Design* 32, 3756–3764, 2011.
- [100] Jia, J.-H., Chen, J.-M., Zhou, H.-D., Wang, J.-B., Zhou, H., Friction and wear properties of bronze-graphite composite under water lubrication, *Tribology International* 37, 423–429, 2004.
- [101] Equey, S., Houriet A., Mischler, S., Wear and frictional mechanisms of copper-based bearing alloys, *Wear* 273, 9–16, 2011.
- [102] Ünlü, S. B., Atik, E., Yilmaz, S. S., Tribological behaviour of polymer based journal bearings manufactured from particle reinforced bakelite composites, *Materials and Design* 30, 3896-3899, 2009.
- [103] Feyzullah, E., Saffak, Z., The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions, *Materials and Design* 29, 205 -211, 2008.
- [104] Cong, H. P., Liu, X. J., Li, T. S., Jia, B. B., Tribological behaviors of several polymer-polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions, *Wear* 262, 1353- 1359, 2007.
- [105] Unal, H., Şen, U., Mimaroglu, A., Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface, *Tribology International* 37, 727–732, 2004.

- [106] Duman, M. S., Dinamik yük altında çalışan teflon – bronz tabakalı kaymalı yataklarda gerilme analizi ve yüzey yorulmasının incelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2002.
- [107] Kukureka, S. N., Rao, M., Hooke, C. J., Liao, P., and Chen, Y. K., The effect of PTFE on the friction and wear behaviour of polymers rolling – sliding contact, *Polymer Engineering and Science* 38, 1946–1958, 1998.
- [108] Tevruz, T., Tribological behaviours of carbon filled Polytetrafluororthylene (PTFE) dry journal bearings, *Wear* 221, 61–68, 1998.
- [109] Temiz, V., Çesitli katkılı ve katkısız polimer yatakların sürtünme ve aşınma karakteristiklerinin deneysel tayini, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.
- [110] Demirci, M. T., Polimer esaslı kaymalı yatakların tribolojik özelliklerinin deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [111] Wang Y., Yan F., Tribological properties of transfer films of PTFE-based composites *Wear* 261, 1359–1366, 2006.
- [112] Conte M., Igartua A., Study of PTFE composites tribological behavior, *Wear* 296, 568–574, 2012.
- [113] Khoddamzadeh, A., Development of Lead-free PTFE Based Sliding Bearing Materials, Master of Applied Science, Department of Mechanical and Aerospace Engineering Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada, August, 2007.
- [114] Wang H. and Wang H., Fabrication of self-lubricating coating on aluminum and its frictional behaviour *Applied Surface Science* 253, 4386–4389, 2007.
- [115] Dearn, K. D., Hoskins, T. J., Petrov, D.G., Reynolds, S.C., Banks, R., Applications of dry film lubricants for polymer gears, *Wear* 298-299, 99-108, 2013.
- [116] Nickchi, T., Ghorbani, M., Pulsed electrodeposition and characterization of bronze-graphite composite coatings *Surfaces & Coatings* 203, 3037-3043, 2009.

- [117] Unlu, B. S., Köksal, N. S., Atik, E., Meriç C., CuSn10 yatak malzemesinin tribolojik özelliklerinin incelenmesi, Pamukkale University Engineering College, Journal of Engineering Sciences 11-1, pp.41-45, 2005.
- [118] <http://www.ecka-granules.com/en/products/copper-and-copper-alloys>, Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [119] Savaşkan, M., Yaptık, Y., Ürgen, M., Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu, İTÜ Dergisi/D mühendislik, Cilt: 3, Sayı: 6,117–128, Aralık 2004.
- [120] Taguchi, T., Elsayed, E., Hsiang, T., Quality Engineering In Production Systems, McGraw-Hill International Editions, Engineering Series,1989.
- [121] Ross, P.J., Taguchi techniques for quality engineering, loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design. New York: McGraw-Hill Inc., 1988
- [122] Holmberg, K., Matthews, A., Coatings Tribology: Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering, Elsevier, 1994.
- [123] Sedlaček, M., Vilhena, L. M. S., Podgornik B., Vižintin, J., Surface topography modelling for reduced friction, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 57, 674-680, 2011.
- [124] Açıkbaş, N. Ç., Esener, E., Mühendislikte deneysel metodlar dersi, sertlik ölçme deney föyü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, 2014.
- [125] <http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Hardness%20Test.htm>, Erişim Tarihi: 05.11.2015.
- [126] Fındık, F., Kurşun, T., Malzeme Teknolojisi, Lisans Yayıncılık, İstanbul, 2008.
- [127] Ünlü, S. B., Atik E., Determination of friction coefficient in journal bearings Materials and Design 28, 973–977, 2007.
- [128] Zafarani H. R., Abdi M., Bahrololoom M. E., Wear behavior of PTFE–hydroxyapatite composite fabricated by hot-press sintering process, Acta Metallurgica Sinica (English Letters) 27(2), 347-351, 2014.
- [129] Yang, W.H., Tarng, Y.S., Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, Journal of materials processing technology, 84:122–129, 1998.

- [130] Kirby, E.D., Zhang, Z., Chen, J.C., Chen, J., Optimizing surface finish in a turning operation using the Taguchi parameter design method, *Int J Adv Manuf Technol*, 30: 1021–1029, 2006.
- [131] İzgiz, S., *Deney Tasarımı ve Taguchi Metodu Ürün ve Proseslerinin Optimizasyonu*, Federal Mogul Yayınlar, Maşukiye, Şubat 1999.
- [132] Lochner, R. H., Matar, J. E., *Designing For Quality: An Introduction To The Best Of Taguchi And Western Methods Of Statistical Experimental Design*, Chapman And Hall, London, Newyork, Tokyo, Melbourne, Madras, 1990.

ÖZGEÇMİŞ

1978 Simav doğumlu olan Kadir GÜNGÖR, ilk, orta ve lise eğitimini Tavşanlı'da tamamladı. 1998 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Tasarım Konstrüksiyon Öğretmenliği Bölümünde lisans öğrenimine başladı ve bu bölümden 2002 yılında mezun oldu. 2005 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim dalında yüksek lisans derecesini aldı. 2007 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim dalında doktora eğitimine başladı. 2002 yılının Aralık ayından itibaren Sakarya Üniversitesi Hendek Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.