

**KENDİNDEN YAĞLAMALI YATAKLARIN  
YORULMA VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN  
DENEYSEL İNCELENMESİ**

**Fazlı DURAN**

**Yüksek Lisans Tezi**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**ISPARTA-2004**

T.C  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENDİNDEN YAĞLAMALI YATAKLARIN YORULMA VE TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

**HAZIRLAYAN**

Fazlı DURAN

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Ertuğrul DURAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

ISPARTA;2004

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne

Bu çalışma jürimiz tarafından MAKİNA ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : .....

Üye : .....

Üye : .....

ONAY

Bu tez ...../...../20.. tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL

Enstitü Müdürü

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ .....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Toz Metalurjisinin Tanımı.....	1
1.2. Toz Metalurjisinin Tarihi Gelişimi .....	3
1.3. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Diğer Yöntemlerin Kıyaslanması.....	4
1.3.1. Toz Metalurjisinin Avantajları.....	4
1.3.2. Toz Metalurjisinin Dezavantajları .....	5
1.4. Toz Metalurji Parçaların Üretimi .....	6
1.5. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları.....	10
1.5.1. Talaşlı İmalat Gerektirmeyen Makine Parçaları .....	11
1.5.2. Takım Çelikleri .....	11
1.5.3. Sermetler .....	12
1.5.4. Sert Metaller .....	12
1.5.5. Elektrik ve Manyetik Uygulamalar .....	12
1.5.6. Gözenekli Metaller ve Filtreler .....	13
1.5.7. Sürtünme Elemanları .....	13
1.5.8. Askeri Uygulamalar .....	14
1.5.9. Kaymalı Yataklar .....	14
1.6. Toz Metalurji Yöntemiyle İmal Edilen Gözenekli Kaymalı Yataklar .....	15
1.7. Zorlanma ve Yüklenme Tipleri .....	20
2. YORULMA .....	22
2.1. Metallerde Yorulma Olayı .....	22

2.2. Yorulmanın oluşumu .....	26
2.3. Yorulma Mekanizmaları .....	28
2.4. Yorulma Kırıklarının Görüntü ve Oluşum Şekilleri .....	30
2.5. Yorulma Dayanımının Saptanması ve Gösterimi .....	34
2.6. Yorulma Ömrü .....	36
2.7. Yorulma Ömrüne Etki Eden Faktörler .....	36
2.7.1. Malzemeye Bağlı Olan Faktörler .....	37
2.7.1.1. Kimyasal Bileşim .....	37
2.7.1.2. Hatalar .....	37
2.7.1.3. Yapı Hataları .....	37
2.7.1.3.1. Dislokasyonlar .....	37
2.7.1.3.2. Kayma Düzlemleri .....	38
2.7.1.4. Eleman Geometrisi .....	38
2.7.1.4.1. Boyut Etkisi .....	38
2.7.1.4.2. Çentik Duyarlılığı ve Çentik Katsayısı .....	38
2.7.1.5. Yüzey Durumu .....	39
2.7.1.6. İşlemler .....	40
2.7.1.6.1. Isıl İşlemler .....	40
2.7.1.6.2. Soğuk Çekme .....	40
2.7.1.6.3. Artık Gerilmeler .....	40
2.7.2. Yükleme Durumu ve Ortalama Gerilme .....	41
2.7.3. Ortam .....	41
2.7.3.1. Oksitlenme ve Vakum.....	41
2.7.3.2. Sıcaklık .....	41
2.7.3.3. Korozyon .....	42
2.7.3.4. Radyasyon Etkisi .....	42
3.KAYMALI YATAKLARDA YÜZEY YORULMASI .....	43
3.1.Giriş .....	43
3.2.Yüzey Yorulması Nedenleri ve Gerilme Kaynakları .....	43
3.3.Mekanik Kökenli Gerilmeler .....	45
3.4.Sıcaklığın Oluşturduğu Isıl Gerilmeler .....	46
4. KAYNAK ÖZETLERİ .....	48

5. MATERYAL VE METOD .....	52
5.1. Deney Setinin Özellikleri .....	52
5.2. Sürtünme Kuvvetinin Ölçülmesi .....	55
5.3. Yükleme Sistemi .....	58
5.4. Test Yatağı .....	61
6. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	62
6.1. Sürtünme Kuvveti ve Sürtünme Katsayıları Deneyleri .....	64
6.2. Mil ve Test Yatak Sıcaklık Ölçümleri .....	85
6.3. Yatak Yüzey İncelemeleri .....	91
6.4. Aşınma Test sonuçları .....	100
6.5. Yorulma Diyagramı .....	102
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	105
8. KAYNAKLAR .....	108
ÖZGEÇMİŞ.....	113

## ÖZET

Statik yüklü toz metal esaslı radyal kaymalı yataklar üzerine pek çok deneysel inceleme olmasına rağmen dinamik yük altındaki deneysel araştırmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, toz metalurjisiyle üretilen sinter bronz yatakların, sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı, aşınma gibi tribolojik özellikleri ile yorulma davranışının tespiti için deneyler yapılmıştır. Deney numunesi olarak piyasadan bakır ve kalay alaşımlı T/M esaslı yataklar kullanılmıştır. Yataklar, 45µm çapındaki ve %90Cu %10Sn kompozisyonundaki tozlardan meydana gelmektedir. Deneyler için tam değişken yük tipi seçilmiştir. Sürtünme kuvveti ve katsayıları her bir test için ayrı ayrı grafik halinde sunulmuştur. Test numunelerinin aşınma miktarları ağırlık kaybı metodu ile ölçülmüş ve grafik halinde verilmiştir. Test süresince mil ve yatak sıcaklıkları da ölçülmüştür. Ayrıca yatak numunelerinin yüzey filmleri çekilerek hasar durumları incelenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Toz Metalurjisi, Kendinden Yağlamalı Bronz  
Yataklar, Sürtünme, Aşınma, Dinamik Yükleme,  
Yorulma

## ABSTRACT

There are many studies on the experimental investigations of Journal Bearing with base powder metallurgy under statically loading but there is insufficient paper on the experimental investigations under dynamically loading. In this study, tests was conducted on to measure the tribological characteristics such as friction force, friction coefficient, wear and properties of the fatigue of base sintered bronze journal bearings manufactured with powder metallurgy (P/M). P/M base sintered bronze bearings were commercially used and they contain elemental copper and tin powder. Compositions of powders are 90% Cu+10% Sn with 45 $\mu$ m powder diameter. In the tests were selected dynamically loaded with reversed and oscillating types. For the each the tests of the coefficient and forces of the friction results were graphically presented. Wear rates of the test specimens was measured by weight loss, and were graphically presented. During the tests, temperatures of the journal and journal bearing were measured. Also, surfaces of the test bearings were examined by microscopy in order to determine the failures.

**KEY WORDS:** Powder Metallurgy, Bronze, Self -Lubricated Bearings, Friction, Wear, Dynamic Loading, Fatigue.



## ÖNSÖZ

Metallerin tekrarlanan zorlanmalar altında gösterdikleri özellikler ve bunları doğuran nedenler, metalürji ve makine mühendisliğinin oldukça önemli sayılan konularını oluşturmaktadır. Havacılık, otomotiv sanayi gibi insan faktörünün çok önemli olduğu alanlarda malzemelerin yorulması sonucunda doğabilecek hasarların önceden tahmin edilebilmesi, dolayısıyla yorulan parçanın görevini yerine getiremeyecek derecede hasara uğramadan değiştirilmesinin sağlanması sorunun özünü oluşturmaktadır.

Konunun önem kazanmaya başladığı yirminci yüzyılın başlarından itibaren metallerin önce oda sıcaklıklarında ve uzun ömürlü yorulmaya neden olan zorlanmalar altındaki davranışları incelenmeye başlanmış, daha sonra teknolojinin gelişmesi ile önem kazanan yüksek ve düşük sıcaklıklardaki uzun ömürlü yorulma özellikleri saptanmaya çalışılmıştır. Yüzyılın ikinci yarısında ise daha ağır zorlanmaların sebep olduğu “ Kısa Ömürlü Yorulma ” (Low Cycle Fatigue) gündeme gelmiş ve metallerin çevrimsel yüklenmeler altındaki davranışları daha çok oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda incelenmeye çalışılmıştır. Son zamanlarda ise gerek kullanılan deney teçhizatındaki gelişmeler, gerekse konunun öneminin açığa çıkması nedeni ile metallerin alçak sıcaklıktaki özellikleri ve buna bağlı olarak kısa ömürlü yorulma karakterleri araştırılmaya başlanmıştır.

**TEŞEKKÜR**

Hazırlamış olduğum yüksek lisans tezi konusunu öneren ve çalışmamın her safhasında büyük ilgisini; bilgi ve birikimlerini esirgemeyen saygı değer hocam, Sn. Yrd. Doç. Dr. Ertuğrul DURAK 'a ve öğrenim boyunca vermiş oldukları bilgilerden dolayı bütün bölüm hocalarıma, deneyin yapılışı sırasında bizden yardımlarını esirgemeyen laboratuvar sorumlularına, ayrıca hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Toz metal parçaların üretim safhaları .....	2
Şekil 1.2. Toz Metalurjisi Aşamaları .....	7
Şekil 1.3. Toz Metal İlaveleri .....	8
Şekil 1. 4. Presleme basamakları .....	8
Şekil 1.5. Sinterleme aşamaları .....	9
Şekil 1.6. Toz enjeksiyon kalıplama aşamaları .....	9
Şekil1.7.Bir araba içindeki Toz Metalürji parçaların dağılımı .....	10
Şekil 1.8.Bakır ve demir esaslı Toz Metalürji parçalar .....	11
Şekil 1.9. Toz metalurjisinin elektrik-manyetik uygulamaları .....	13
Şekil 1.10. Gözenekli metallere ve filtreler .....	13
Şekil 1.11. Toz-Metal yöntemiyle üretilmiş kaymalı yataklar .....	15
Şekil 1.12. Toz metalurjisi yöntemiyle burç üretiminde sıkıştırma aşamaları...	16
Şekil 1.13. Yağlama mekanizmaları .....	17
Şekil 1.14. Yağ beslemeli gözenekli yatak konstrüksiyonu .....	18
Şekil 1.15. Yükleme tipleri .....	21
Şekil 2.1 Yorulma ile çatlak ilerlemesinin şematik gösterilimi .....	26
Şekil 2.2 Yorulma çatlaklarının büyümesi .....	28
Şekil 2.3 Kısa ömürlü yorulmada çatlak büyümesi .....	29
Şekil 2.4 Uzun ömürlü yorulmada çatlak oluşumu .....	30
Şekil 2.5 a..f Çekme zorlamaları ile tek taraflı eğilme zorlanmalarının ortak etkimesi sonucu yorulma kırıklarının oluşum şekilleri .....	31
Şekil 2.6 a..f çift taraflı eğme zorlamaları altında yorulma oluşumu .....	32
Şekil 2.7 a..f Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğilme) sonucu oluşan yorulma kırıkları .....	33
Şekil 5.1. Deney setinden genel bir görünüş .....	52
Şekil 5.2. Deney düzeneğinin kesit resmi .....	53
Şekil 5.3. Frekans değiştirici ve mil tahrik motoru .....	53
Şekil 5.4. Yatak ana gövdesi .....	54
Şekil 5.5. Isıtıcılar, termostat ve digital sıcaklık ölçer .....	55

Şekil 5.6. Hidrolik donanım sistem .....	56
Şekil 5.7. Sürtünme kuvveti ölçüm sistemi .....	57
Şekil 5.8. Strain-gauge indikatarü ve 12 bit AD-DA kart .....	57
Şekil 5.9. Sürtünme kuvvetinin ölçümünde kullanılan kalibrasyon eğrisi .....	57
Şekil 5.10. Statik yükün uygulanması .....	58
Şekil 5.11. Dinamik yükün değiştirilmesi .....	59
Şekil 5.12. Eksantriklik mesafesi “e” ile yatağa uygulanan $F_n$ kuvvetine ait kalibrasyon eğrisi .....	60
Şekil 5.13. Dinamik yükün uygulanması .....	60
Şekil 6.1. Test düzeneğinde örnek yük değişimi (Test 3).....	63
Şekil 6.2. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.1 sürtünme kuvveti değişimi...	65
Şekil 6.3. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.1 sürtünme katsayısı değişimi..	65
Şekil 6.4. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.2 sürtünme kuvveti değişimi....	66
Şekil 6.5. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.2 sürtünme katsayısı değişimi..	66
Şekil 6.6. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.3 sürtünme kuvveti değişimi....	67
Şekil 6.7. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.3 sürtünme katsayısı değişimi...	67
Şekil 6.8. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.4 sürtünme kuvveti değişimi....	68
Şekil 6.9. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.4 sürtünme katsayısı değişimi...	68
Şekil 6.10. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.5 sürtünme kuvveti değişimi...	69
Şekil 6.11. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.5. sürtünme katsayısı değişimi.	69
Şekil 6.12. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.6 sürtünme kuvveti değişimi....	70
Şekil 6.13. $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d Deney 1.6 sürtünme katsayısı değişimi..	70
Şekil 6.14. $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d Deney 2.1 sürtünme kuvveti değişimi.....	71
Şekil 6.15. $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d Deney 2.1 sürtünme katsayısı değişimi....	71
Şekil 6.16. $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d Deney 2.2 sürtünme kuvveti değişimi.....	72
Şekil 6.17. $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d Deney 2.2 sürtünme katsayısı değişimi....	72
Şekil 6.18. $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d Deney 2.3 sürtünme kuvveti değişimi.....	73
Şekil 6.19. $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d Deney 2.3 sürtünme katsayısı değişimi....	73
Şekil 6.20. $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d Deney 2.4 sürtünme kuvveti değişimi.....	74
Şekil 6.21. $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d Deney 2.4 sürtünme katsayısı değişimi....	74
Şekil 6.22. $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d Deney 2.5 sürtünme kuvveti değişimi.....	75
Şekil 6.23. $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d Deney 2.5 sürtünme katsayısı değişimi....	75

Şekil 6.24. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.1. sürtünme kuvveti değişimi....	76
Şekil 6.25. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.1. sürtünme katsayısı değişimi.	76
Şekil 6.26. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.2. sürtünme kuvveti değişimi..	77
Şekil 6.27. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.2. sürtünme katsayısı değişimi.	77
Şekil 6.28. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.3. sürtünme kuvveti değişimi...	78
Şekil 6.29. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.3. sürtünme katsayısı değişimi..	78
Şekil 6.30. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.4. sürtünme kuvveti değişimi...	79
Şekil 6.31. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.4. sürtünme katsayısı değişimi..	79
Şekil 6.32. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.5. sürtünme kuvveti değişimi....	80
Şekil 6.33. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.5. sürtünme katsayısı değişimi.	80
Şekil 6.34. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.6. sürtünme kuvveti değişimi...	81
Şekil 6.35. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.6. sürtünme katsayısı değişimi.	81
Şekil 6.36. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.7. sürtünme kuvveti değişimi....	82
Şekil 6.37. $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d Deney 3.7. sürtünme katsayısı değişimi..	82
Şekil 6.38. Deney 1.1 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	85
Şekil 6.39. Deney 1.2 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	85
Şekil 6.40. Deney 1.3 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	86
Şekil 6.41. Deney 1.4 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	86
Şekil 6.42. Deney 1.5 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	86
Şekil 6.43. Deney 1.6 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	87
Şekil 6.44. Deney 2.1 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	87
Şekil 6.45. Deney 2.2 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	87
Şekil 6.46. Deney 2.3 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	88
Şekil 6.47. Deney 2.4 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	88
Şekil 6.48. Deney 2.5 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	88
Şekil 6.49. Deney 3.1 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	89
Şekil 6.50. Deney 3.2 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	89
Şekil 6.51. Deney 3.3 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	89
Şekil 6.52. Deney 3.4 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	90
Şekil 6.53. Deney 3.5 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	90
Şekil 6.54. Deney 3.6 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	90
Şekil 6.55. Deney 3.7 için mil ve yatak sıcaklık değişimi.....	91

Şekil 6.56. Test yataklarının deneyden önceki ve sonraki görünüşleri.....	91
Şekil 6.57. Hasara uğrayan örnek test numunelerindeki hasar ve çatlakların fotoğrafları.....	92
Şekil 6.58. Kullanılmamış yeni yatak numunesinin yüzey görünümü.....	93
Şekil 6.59. Kullanılmamış yeni yatak numunesinin yüzey görünümü.....	93
Şekil 6.60. 1 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d) çatlak görünümü.....	94
Şekil 6.61. 1 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 250$ N ve $n = 1000$ d/d ) çatlak görünümünün devamı.....	94
Şekil 6.62.1. nolu deney numunesinin ( $F = \pm 250$ N, $n = 1000$ d/d) diğer bir çatlak görünümü.....	95
Şekil 6.63. 2 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d ) çatlak görünümü.....	95
Şekil 6.64. 2 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 350$ N ve $n = 830$ d/d) yatak kenarında hasar sonucu kopan kısım.....	96
Şekil 6.65. 3 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d) yüzey filmi aşınma izleri.....	96
Şekil 6.66. 3 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 200$ N ve $n = 1200$ d/d) aşınma izleri.....	97
Şekil 6.67. Yataklarda çatlak ilerlemesi.....	97
Şekil 6.68. Yataklarda farklı yönlerdeki çatlakların ilerlemesi.....	98
Şekil 6.69. Yataklarda çatlak ilerlemesi sonucu yatağın parçalanması.....	98
Şekil 6.70. Yataklarda ilk çatlakların oluşumu ilerlemesi.....	99
Şekil 6.71. Yataklarda ilk çatlakların oluşumu ilerlemesi.....	99
Şekil 6.71. Test 1'e ait aşınma sonuçları.....	100

Şekil 6.72. Test 2'e ait aşınma sonuçları.....	101
Şekil 6.73. Test 3'e ait aşınma sonuçları.....	101
Şekil 6.74. Toplam aşınma miktarları.....	102
Şekil 6.75. Yatakların Yorulma eğrisi.....	103

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

	Sayfa
Çizelge 1.1. Kendinden yağlamalı bronz yatakların kimyasal kompozisyonu ....	19
Çizelge 1.2. Bronz yatakların yoğunlukları .....	19
Çizelge 1.3. Demir-bakır-Karbon yatakların kimyasal kompozisyonu .....	20
Çizelge 1.4. Demir-bakır-karbon yatakların yoğunlukları ve yağ kapasiteleri ...	20
Çizelge 1.5. Gözenekli Yatakların Tipik Özellikleri .....	20
Çizelge 2.1. Yorulmaya Etki Eden Faktörler .....	36
Çizelge 5.1. Test yatağı ve milinin bazı özellikleri .....	61
Çizelge 6.1. Bronz yataklar için yatak yükü ve mil devir sayısına bağlı olarak hesaplanan PV (MPa m/dak) değerleri.....	63
Çizelge 6.2. Deneylere ölçülen sürtünme kuvvetleri ve sürtünme katsayılarının ortalama değerleri.....	84



## 1. GİRİŞ

### 1.1. Toz Metalurjisinin Tanımı

Toz Metalurjisi (Toz Metalurjisi), elementel metal tozlarının, tam ve/veya yarı ön alaşımlandırılmış metal tozlarının bağlayıcılar ve yağlayıcılarla birlikte harmanlanarak uygun pekiştirme yöntemleri ve sıcaklıklar kullanılarak arzu edilen şekillerde üretilme süreçlerini içeren oldukça kapsamlı ve çok disiplinli bir malzeme üretim yöntemidir. Toz Metalurjisi, modern bir imalat yöntemi olup ileri teknoloji malzemelerinin üretilmesine çok uygundur.

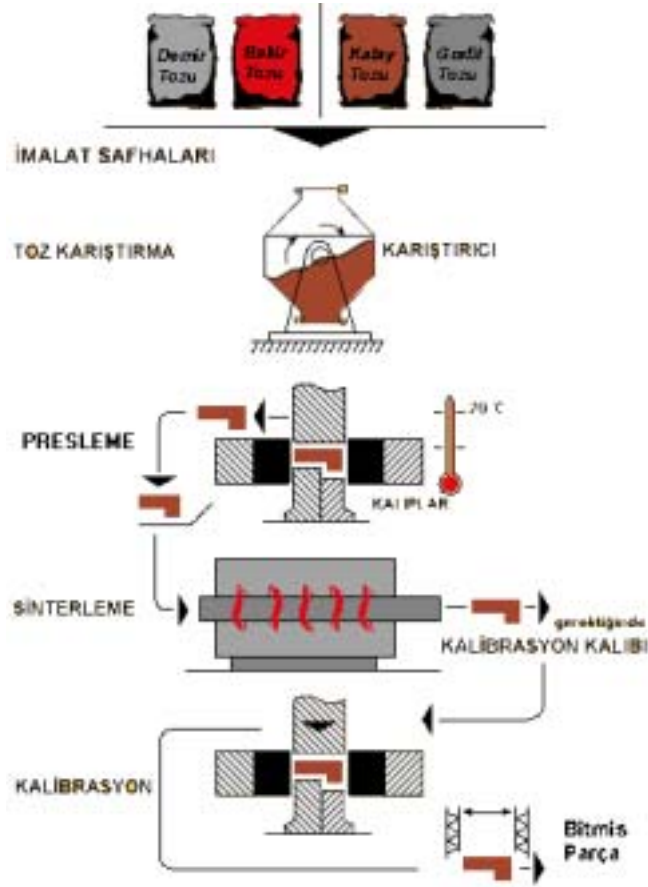
Günümüzde Toz Metalurjisini endüstriyel üretim aşamalarının hemen tümünde uygulanabilir hale getiren zorlayıcı nedenler vardır. Bu nedenler arasında; malzemedan tasarruf edilmesi, üretilen parçanın mikro yapısında ince tane boyutları ile kimyasal olarak homojenizasyonun sağlanması, karmaşık şekilli parçaların nispeten ekonomik olarak üretilmesi ve tam yoğunluk ile yüksek dayanım performansı gibi faktörler sayılabilir (Tunay, 2001).

Toz metalurjisi, düşük enerji tüketimi, küçük maliyetlerde ve yüksek verimde malzeme kullanımı ile otomasyon üretim süreçlerini içerir. Bu özellikleri itibarıyla Toz Metalurjisi, günümüz teknolojilerinde önemli kavramlar olan **verimlilik**, **enerji ve hammadde** üçlüsü ile uyum içerisindedir. Bütün bunlar dikkate alındığında, toz metalurjisi, gerek teknolojik, gerekse ekonomik açıdan diğer metalurjik üretim süreç ve teknolojilerine alternatif oluşturan bir teknolojidir (Büyükdavraz, 2000).

Toz metalurjisi üretim yöntemleri, diğer metal şekillendirme yöntemlerinden tamamen farklı olup seramik parça üretim teknolojisine benzemektedir (Hansner, 1982). Genelde çok sayıda küçük parçalar için ekonomik üretim sağlar. Elde edilen ürünlerin boyut hassasiyeti oldukça iyidir. Tüm metal işleme teknolojileri içerisinde toz metalurjisi, sunduğu çeşitlilik açısından en kapsamlı şekillendirme ve üretim süreçlerine sahiptir. Toz metalurjisini çekici kılan en önemli unsur yüksek kaliteye

sahip karmaşık şekillerdeki parçaların istenilen toleranslarda kayıpsız yada çok az kayıpla ekonomik olarak imal edilebilmesidir (Kurbanoglu, 2001).

Toz metalurjisinde üretim, basit olarak Şekil 1.1'de gösterilen imalat safhalarından meydana gelmektedir.



Şekil 1.1. Toz metal parçaların üretim safhaları (Karataş, 1997)

1. Toz Hazırlama
2. Soğuk presleme
3. Sinterleme
4. (Gerekirse) Yağ emdirme ve kalibrasyon

Çeşitli yöntemlerle elde edilen metal tozları, bağlayıcı ve yağlayıcı maddelerin ilavesiyle birlikte belirli bir süre karıştırılır ve uygun tekniklerle tozlar pres

kalıplarında sıkıştırılarak "briket" haline getirilir. Parçaların presten çıkmış “ham” halleri ile mukavemetleri çok düşüktür. Mukavemet kazandırmak için, indirgeyici gaz altında, uygun sıcaklıklarda pişirilir. Preslenmiş-piştirilmiş parçaların yoğunlukları genellikle %90'ı geçmez. Yüzey kaliteleri ve boyut toleransları talaşlı imalata göre çok iyidir. Toz Metalurjisi parçaların yüksek mukavemetli olmaları istenirse pişirmeden sonra dövülerek yoğunluklarının artırılması gerekir. Toz Metalurjisi ile üretilen parça tipi binlerle ifade edilmektedir. Talaşlı imalat gerektirmeyen parçalar, sert metaller, takım çelikleri, kendi kendini yağlayan burçlar, gözenekli metaller ve filtreler, sürtünme elemanları, elektrik kontak malzemeleri, grafit fırçalar ve mıknatıslar bunlardan bazılarıdır (Tüfekci,2002).

## 1.2. Toz Metalurjisinin Tarihi Gelişimi

Günümüzde modern imalat yöntemleri arasında yerini alan toz metalurjisinin tarihinin M.Ö. 5000’li yıllara dayanan en eski ve en modern metal parça üretim metodu olduğu bilinmektedir. Örneğin, İnkalar altın tozlarını bu metotla mücevhere dönüştürmüşlerdir. Eski Mısırlılar demir oksiti indirgeyerek “sünger demir” üretimini gerçekleştirmişlerdir. M.S. 300’lü yıllarda Hindistan’da, indirgenmiş demir tozlarından yaklaşık olarak 6.5 ton ağırlığında bir kütle bulunmuştur. 1750 – 1825 yılları arasında ise toz dövme yolu ile şekillendiren platin laboratuvar aletlerine olan ihtiyaç ile yeni toz birleştirme metotları bulunmuş ve bu toz metalürjisinin yeniden doğuşu olmuştur(German, 1984). İlk olarak Lewis (1755), kurşun-platin alaşımından kurşun oksidin giderilmesi sonucu süngerimsi bir platin kütesinin kaldığını keşfetti. Bu gelişmeyi takiben Rochon (1798) ve Tilloch (1805) platin tozlarından tam pekişmiş kompakt kütleler üretmeyi başarmışlardır(Öveçoğlu, 1977).

1826 yıllarında Rusya’da tedavüle çıkarılan platin para, toz metalurjisinin ilk endüstriyel uygulaması olmuştur. 19. Asrın sonlarında, endüstride platin ve iridyum gibi yüksek sıcaklıkta ergiyen metallerin kullanılması denenmiştir. Kimyasal bir usulle platin toz haline getirilmekte, bu toz çok yüksek basınçta sıkıştırılmakta ve sonra ısıtılmaktadır. Böylece tozlar masif bir kütle haline gelmektedir.

İlk bronz alaşımlı yataklar 1925’li yıllarda üretilirken, bugünkü anlamda gelişimi 1945 yılından sonra başlamış, sinterlenmiş demir ve çelik esaslı makine parçaları üretilebilmiştir (Ersümer, 1970). 1950’li yıllardan itibaren demir ve çelik tozlarından üretilen dişliler, kamlar ve çeşitli konstrüksiyonlardan oluşan makine elemanları piyasaya egemen olmaya başlamıştır. 1960’larda dövme çelik parçalar, takım çelikleri ve izostatik preslenmiş süper alaşımlar gibi tam yoğun Toz Metalurjisi gereçleri üretilmiştir (Sarıtaş, 1985). 1975’te toz enjeksiyon kalıplama ile MX güdümlü roketler ile niobyumlu ve radyasyon soğutmalı roket motorları üretilmiştir (Ülgenci, 1991).

### **1.3. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Diğer Üretim Yöntemlerinin Kıyaslanması**

Toz Metalurjisi yönteminin diğer imalat yöntemlerine göre (döküm, kaynak, talaşlı imalat, talaşsız imalat vb.) çeşitli üstünlüklerinin bulunması bu teknolojinin hızla yaygınlaşmasına sebep olmuştur. Toz Metalurjisinin avantajları ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

#### **1.3.1. Toz Metalurjisinin Avantajları**

1. Toz metalurjisinde üretim hızı yüksektir ve işler kolaylıkla otomasyona çevrilebilir. Fazla işgücü gerektirmez.
2. Dişli çarklar, kamlar vs. gibi karmaşık şekilli parçaların üretimi yapılabilir.
3. Toz Metalurjisi yöntemi ile son şekli verilemeyen parçaların sinterleme sonrası talaşlı işlenebilmesi, haddeleme, yüzey sertleştirme, su verme gibi işlemlerin yapılabilmesi bu yöntemi diğer üretim yöntemlerine göre avantajlı kılmaktadır.
4. Yüzey hassasiyeti ve yüzey kalitesi, kullanılan kalıp malzemesine bağlı olmakla birlikte oldukça iyidir. Eğer sinterleme sonrası Toz Metalurjisi parçanın elde edilen

yüzey kalitesi istenilen düzeyde değilse, taşlama, honlama, parlatma gibi yüzey işlemleri uygulanabilir.

5. Normalde birbiri içinde çözünmeyen farklı karakterdeki malzemeler, bir araya getirilebilir. Özellikle, ergime sıcaklıkları arasında büyük sıcaklık farkları olan malzemelerin birleştirilmesinde Toz Metalurjisi yöntemi kullanılır.

6. Toz Metalurjisi yönteminde elde edilen parçaların mekanik özellikleri, parça yoğunluğu ile çok büyük değişiklikler göstermektedir. Dolayısıyla parçadan istenen özellikler çok kolaylıkla değiştirilebilmektedir. Bunun yanında sinterlenmiş parçaların yoğunlukları, toz dövme ile %99'a kadar çıkarılabilmekte ve elde edilen özellikler, bazen tam yoğun malzemelere yakın olabilmektedir.

7. Toz Metalurjisi yönteminde, diğer klasik üretim yöntemlerine göre imalattaki hurda miktarı çok azdır. Çünkü üretilen parçalar son boyut ve şekillerine göre yada küçük işlemlerle son boyutlarını alabilecek şekilde üretilebilmektedir. Bu ise özellikle malzemesi pahalı olan parçaların imalatında parça maliyetini oldukça düşürmektedir.

### **1.3.2. Toz Metalurjisinin Dezavantajları**

1. Toz Metalurjisi üretim yönteminde üretilecek parçanın yüzey kalitesi kalıbın yüzey kalitesine bağlıdır. Kalıp malzemesinin mukavemetini artırmak için hacim ve yüzey sertleştirme işlemleri uygulanabilir. İşte tüm bu faktörler Toz Metalurjisi metodunda kalıp maliyetinin artmasına sebep olur. Toz Metalurjisi yönteminin diğer üretim yöntemlerinden avantajlı olabilmesi için üretilecek parça sayısının çok olması gerekir.

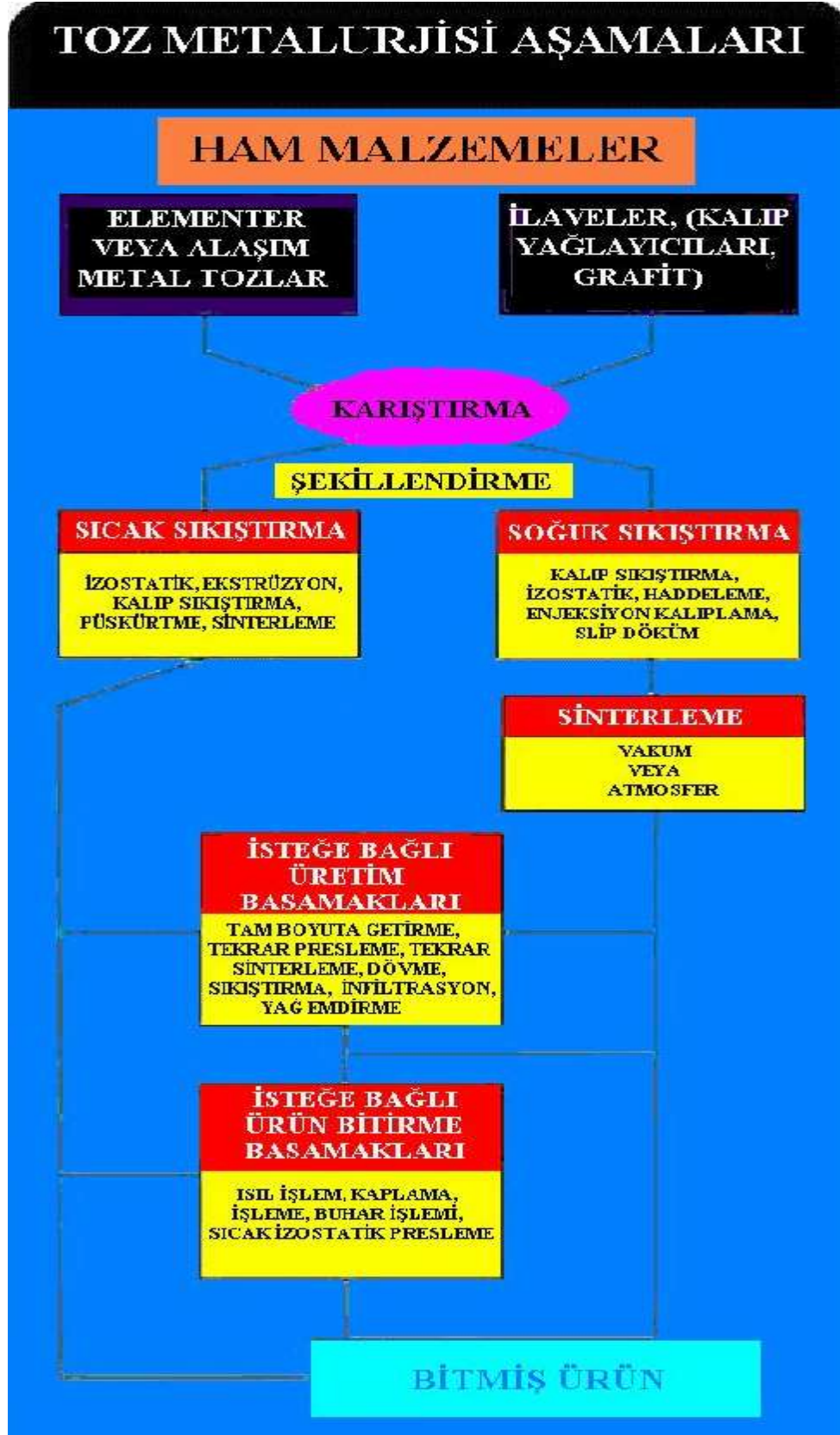
2. Toz Metalurjisi'nde kullanılan metal tozların birim ağırlığının fiyatı, normal malzeme fiyatına göre daha pahalıdır. Ancak üretimden hurdaya atılan malzeme miktarının çok az veya hiç olmamasından dolayı normal malzemelerle arasındaki fiyat farkını dengelemektedir.

3. Özellikle kalınlık/çap oranı çok büyük olan malzemelerin imalatında güçlükler vardır. Bunun yanında preslenen parçaların geometrisinin kalıptan bozulmadan çıkabilecek şekilde olabilmesi gerekir. Parça boyutları pres kapasitesinin belirlediği sınırlarda olmalıdır. Preslemede özellikle homojen yoğunlukların elde edilmesi için parça boyutlarında sınırlamalar mevcuttur. Bugün 20 kg'a kadar Toz Metalurjisi parça üretimi yapılabilmektedir.

4. Toz Metalurjisi yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özellikleri tam yoğun malzemelere göre daha düşüktür. Bunun sebebi yapı içinde gözeneklerin bulunmasıdır. Bunun yanında Toz Metalurjisi parçalarda toz dövme, bilyalı dövme, çeşitli ısı çevrimleri vb. işlemlerin uygulanması ile tam yoğun malzemelerin mekanik özelliklerine erişilebilmektedir(Büyükdavraz, 2000).

#### **1.4.Toz Metalurjisi Parçaların Üretimi**

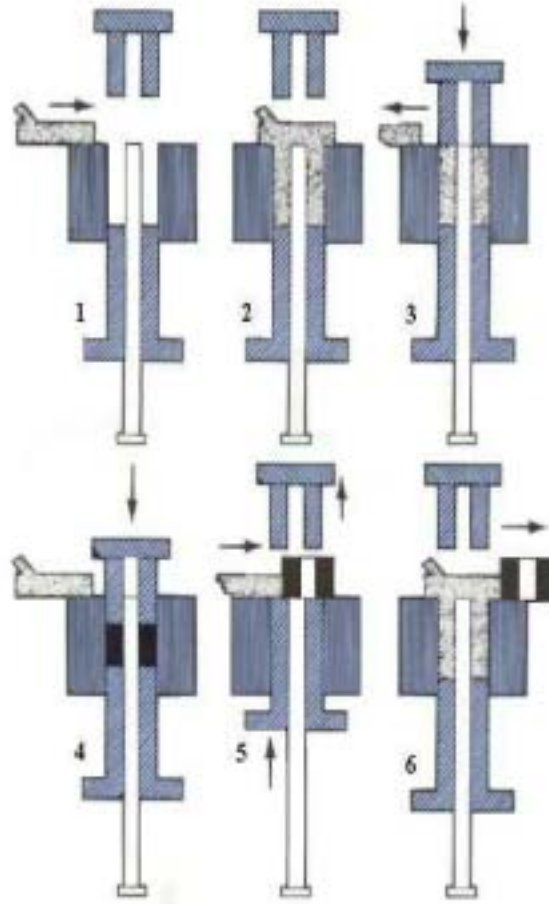
Toz Metalurjisi uygulamasındaki genel işlemler şematik olarak kısaca akış şemasında gösterilmiştir(Şekil 1.2-1.6.). Parçayı oluşturan tozlar ve yağlayıcılar homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılırlar. Karışım daha sonra kalıbın içerisine doldurulur ve basınç altında sıkıştırılır, son olarak parçalar sinterlenir. Küresel ve iri bronz tozlarından filtre elemanlarının basınç kullanılmadan üretimi istisnai bir durumdur. Bu işlemde tozlar uygun şekilli kalıp içerisine doldurulur ve kalıpla birlikte sinterlenir. Tozları sıkıştırmanın tek eksenli presleme, haddeleme, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, izo-statik presleme gibi bir çok metotları vardır. Bu metotların seçimi parça geometrisine üretim miktarına bağlıdır.



Şekil 1.2. Toz Metalurjisi Aşamaları ( Büyükdavraz, 2000)

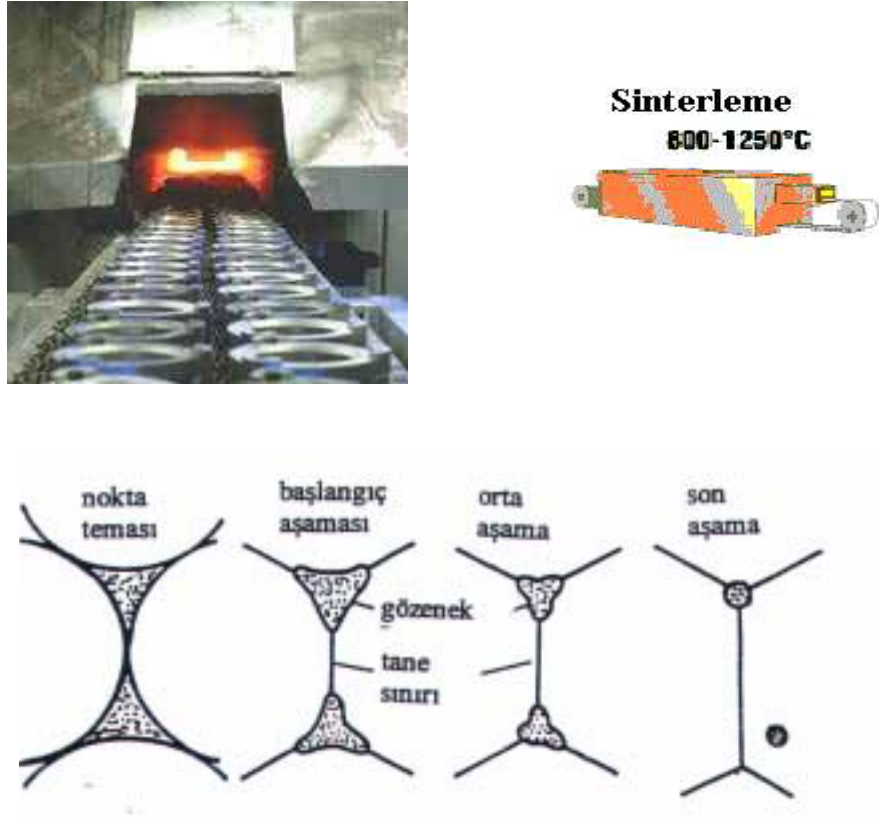


Şekil 1.3. Toz Metal İlaveleri( Kurt, 1992)

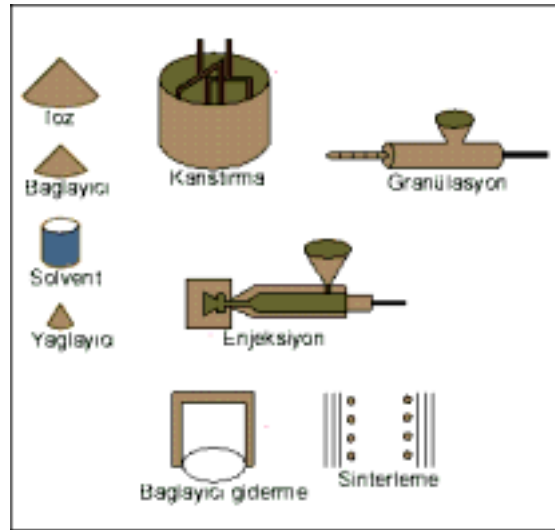


Şekil 1. 4. Presleme basamakları ( Öveçoğlu, 1997)





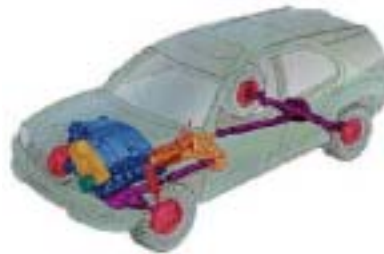
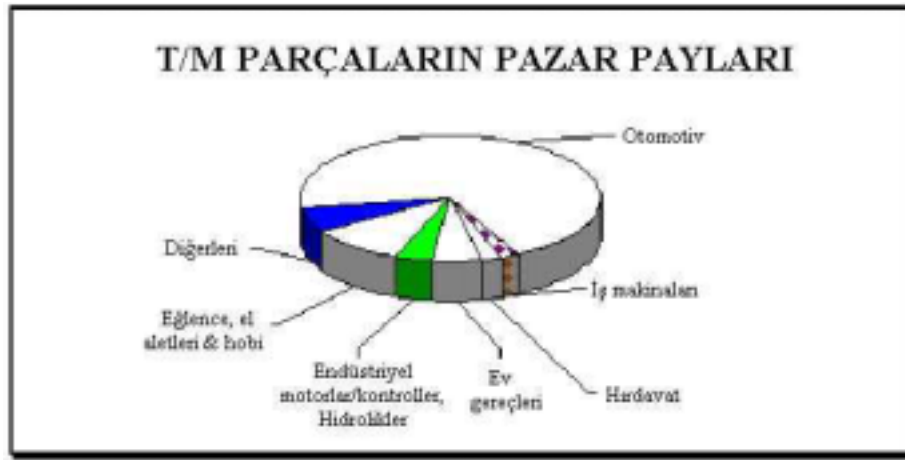
Şekil 1.5. Sinterleme aşamaları (German, 1990)



Şekil 1.6. Toz enjeksiyon kalıplama aşamaları (Colton 2001)

### 1.5. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları

Toz Metalurjisi'nin uygulamaları oldukça geniştir. Tungsten lamba filamentleri, dişçilik, dişli çarklar, kendinden yağlamalı yataklar, elektrik kontakları, nükleer güç yakıt elemanları, ortopedik gereçler, ofis makinaları parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balataları, akü elemanları ve jet motor parçaları metal tozlarından üretilen parçalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca, metal tozları boyalar, gözenekli betonlar, basılmış devre levhaları, zenginleştirilmiş un, patlayıcılar, kaynak elektrodları, roket yakıtları, baskı mürekkepleri, lehimleme aletleri ve katalizörlerin üretilmesinde de kullanılmaktadır(Şekil 1.7.-1.8.). Toz Metalurjisi parçaların dünya genelindeki pazar payı Şekil 1.7.'de grafikte verilmiştir. Bu pazarın %75'i otomotiv endüstrisi tarafından kullanılmaktadır. Avrupa yapımı arabalar 7 kg, Japon yapımı arabalar ise 5 kg Toz Metalurjisi parçaya sahip olduğu halde Amerikan arabaları 16 kg'dan daha fazla Toz Metalurjisi parça içermektedir.



Şekil1.7.Bir araba içindeki Toz Metalurjisi parçaların dağılımı (Sarıtaş, 1994)



Şekil 1.8. Bakır ve demir esaslı Toz Metalurjisi parçalar

### 1.5.1. Talaşlı İmalat Gerektirmeyen Makine Parçaları

Bu tip makine elemanları çoğunlukla otomotiv sanayiinde kullanılmaktadır. Bu parçalar tozun sıkıştırılıp pişirilmesiyle doğrudan son şekillerine getirilmektedir. Yakıt pompa elemanları, araba kapısı parçaları, amortisör pistonu, kilit parçası, hız kutusu senkromeçleri vs. gibi parçalar bu gruba dahil edilmektedir (Karataş, 1997).

### 1.5.2. Takım Çelikleri

Toz Metalurjisi ile elde edilen takım çelikleri iç yapıda karbürlerin çok ince taneli olması ve homojen dağılmasından dolayı, dökümlle üretilen takım çeliklerine göre daha tok ve daha uzun ömürlüdürler (Sarıtaş, 1994).

### **1.5.3. Sermetler**

Sermetler, çeşitli seramik tozlarının bir metal veya metal alaşımı ile bağlanmasını ifade eder. Seramik tozu miktarı hacimce %15-85 arasında değişebilir. Sermetlerde seramik faz olarak uranyum oksit, uranyum karbür, zirkonyum borik, silikon karbür, silikon oksit, alüminyum oksit, titanyum karbür, grafit veya elmas kullanılmaktadır. Metalik bağlayıcı faz olarak; kobalt, demir, krom, nikel, molibden, tungsten, paslanmaz çelik, bronz ve süper alaşımlar kullanılmaktadır(Sarıtaş, 1992).

### **1.5.4. Sert Metaller**

Toz Metalurjisi yöntemi ile elde edilen sert metaller bugün kesici takım, kaya delici taş kesici ve şekillendirme kalıbı olarak kullanılmaktadır. Sert metal takımlar ile elmas kesici takımlar karşılaştırıldığında, elmas kesicilerin maliyetlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak mükemmel iş parçası kalitesi, azalan kesme kayıpları, artan verimlilik, düşen tezgah vuruş süresi, bazı uygulamalarda ara işlemlerin eliminasyonu ile toplam maliyet düşmesi, birçok üreticiyi elmas kesici takımlara yönlendirmektedir (Karagöz, 1996).

### **1.5.5. Elektrik ve Manyetik Uygulamalar**

Bu grubun içerisine direnç kaynağı elektrotlar, tungsten ve molibden filamanları, elektrik kontak malzemeleri, metal-grafit fırçalar, süper iletkenler ve çeşitli mıknatıslar girmektedir (Şekil 1.9). Çeşitli gümüş alaşımları her tür elektrik kontaklarında kullanılabilir. Metal grafit karışımı fırçalar elektrik motorlarının en önemli parçalarıdır. Bu fırçalarda, metal miktarı %20-99 arasındadır. Metal olarak bakır yada gümüş kullanılmaktadır. Tungsten ampul filamanlarının tek üretim yöntemi toz metalurjisidir. (Sarıtaş, 1994)



Şekil 1.9. Toz metalurjisinin elektrik-manyetik uygulamaları (Saritaş, 1994)

### 1.5.6. Gözenekli Metaller ve Filtreler

Toz metal filtreler, seramik filtrelerden daha fazla darbe mukavemetine sahip olmaları, suya ve sıcaklığa karşı daha az hassas oldukları için tercih edilirler. Filtrelerdeki gözenek miktarı %80'e kadar çıkabilir (Şekil 1.10). Genellikle sıcak gazların filtre edilmesinde kullanılırlar. Basıncılı gaz sanayisinde alev engelleyici olarak, uçakların hava emme kanallarında buzlanmayı önlemek için, silah sanayisinde susturucu olarak kullanılırlar (Saritaş, 1994).



Şekil 1.10. Gözenekli metaller ve filtreler (Saritaş, 1994)

### 1.5.7. Sürtünme Elemanları

Sürtünme elemanları, makine parçalarının temaslarında oluşan mekanik enerjisi ısıya çevirmektedir. Isı enerjisi emilerek ya da iletilerek o bölgeden uzaklaştırılmaktadır.

Isıyı iletici toz olarak bakır ve kalay, sürtünme sağlayıcı toz olarak silikon karbür ya da alümina kullanılmaktadır. Ayrıca sürtünme katsayısını istenen değerde ayarlamak için kurşun, çinko ve grafit tozları eklenmektedir. Uçak tank, iş makinaları ve büyük frenlerin fren ve debriyaj balataları örnek olarak verilebilir (Sarıtaş, 1994).

### **1.5.8. Askeri Uygulamalar**

Toz Metalurjisi'nin askeri uygulamaları iki ana gruba ayrılır. Birinci grup alışılmış Toz Metalurjisi uygulamalarıdır. Metal veya alaşım tozları, çeşitli Toz Metalurjisi teknikleri ile biçimlendirilirler ve böylece bir Toz Metalurjisi parça üretilmiş olur. Bu gruba; çeşitli titanyum parçalar, mermi ve silah parçaları, askeri taşıtların parçaları, uçak parçaları (hafif alaşımlar, süper alaşımlar vb.) zırh deliciler ve benzerleri girer. İkinci grubu piroteknik uygulamalar oluşturur. Piroteknik uygulamalar, alışılmış Toz Metalurjisi uygulamalarından oldukça farklıdır. Piroteknik uygulamalarda metal ve metal-olmayan pek çok maddenin tozları çeşitli organik maddelerle karıştırılarak istenilen piroteknik bileşim elde edilir. Bu gruba; roket yakıtları, patlayıcılar, tutuşturucular, geciktiriciler, ateşleyiciler, aydınlatma bombaları ve sinyaller, dumanlar vb. girer. Bu uygulamalarda kullanılan metal tozu miktarı alışılmış Toz Metalurjisi uygulamaları ile karşılaştırılabilir boyutlardadır. Uzay mekiğinin her fırlatılışında 160 ton alüminyum tozu yakılmaktadır (Gurganus,1995) .

### **1.5.9. Kaymalı Yataklar**

Toz Metalurjisinin en önemli uygulama alanlarından birisi gözenekli yataklardır (Şekil 1.13). Uygulamalarda genellikle bronz ve demir alaşımı kaymalı yataklar kullanılmaktadır. Bronz yatakların mekanik özellikleri demir yataklara göre düşük olmakla birlikte sürtünmeleri daha küçük olduğu için tercih edilirler (Kurt, 1992).

Toz metalurjisinin en önemli uygulama alanlarından birisi olan sinter (gözenekli) yataklar yağ emdirilerek kullanılırlar (Şekil 1.11). Özellikle 1950'lerden sonra bu

sinterlenmiş yataklarda yatak malzemesi olarak bakır-çinko, bakır-kalay alaşımları ile alüminyum, demir bronzu ve PTFE (Politetrefloretilen) kullanılmaktadır.



Şekil 1.11. Toz-Metal yöntemiyle üretilmiş kaymalı yataklar( Kurt, 1992)

Bakır-kalay alaşımından meydana gelen bronz yataklarda %6-12 miktarında kalay vardır. Sinterlenmiş yataklar içerisinde en fazla kullanılanı %90 Cu, %9 Sn ve %1 grafit içeren bronz yataklardır.

Sinter yataklar, alçak devir sayılarında dönen veya salınım hareketi yapan millerin yataklanmasında özellikle tercih edilir. Buralarda düşük hızdan dolayı yağ filmi oluşamaz. Yağ emdirilmiş sinter yataklar hem kendi kendilerini yağlayan makinelerde hem de bakım-yağlama gibi işlemlerin sürekli yapılamayacağı makinelerde kullanılır.

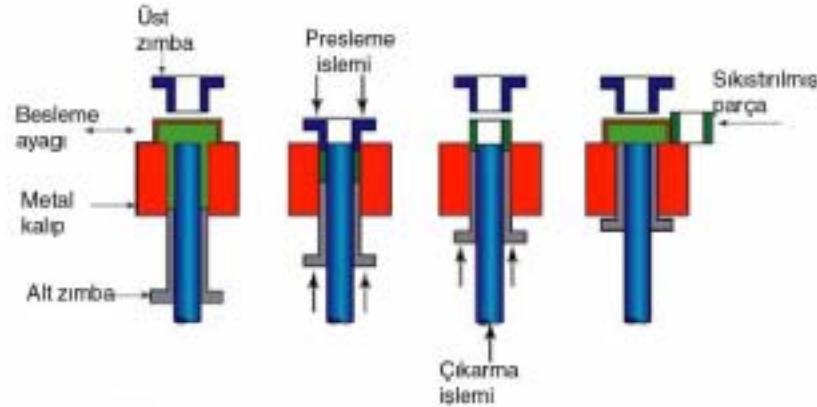
### **1.6. Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Gözenekli Kaymalı Yataklar**

Kaymalı yataklar kullanımları esnasında dışarıdan gelen yükleri karşılarken kuvvet yönündeki hareketi engellemek ve diğer yönlerdeki harekete izin vermekle görevlidirler. Bunu gerçekleştirirken sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybını en aza indirmelidirler. Kaymalı yatak malzemelerinin düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci, yüksek yük kapasitesi, statik ve dinamik yüklere yeterli dayanım, iyi ısıl iletkenlik özelliği, iyi korozyon dayanımı, yabancı partikülleri gömme özelliği ve

düşük ısı genleşme özelliklerine sahip olmaları gerekir. Uygulamada yataklar hidrostatik veya hidrodinamik olarak yağlanırlar. Ancak montaj sonrası yataklara yağ gönderme imkanı yoksa, bu durumda yataklara montaj öncesi yeterli yağ emdirilmeli veya yağlayıcı, yatak malzemesi içinde bulundurulmalıdır. Eğer yağlama eksikliğinden dolayı yataklarda kuru sürtünme ortaya çıkarsa büyük konum hataları, dinamik kararsızlıklar, enerji kaybı, aşınma ve beraberinde yatak bölgesinde sıcaklık artışı meydana gelir (Günther, 1995).

Kaymalı yataklar döküm yoluyla veya Toz Metalurjisi teknolojisi ile üretilebilirler. Toz Metalurjisi ile üretilen yataklar gerek ekonomiklik gerekse kendinden yağlama görevi yapmalarında dolayı döküm metodu ile elde edilen yataklara tercih edilir hale gelmiştir. Şekil 1.12’de basit olarak toz metalurjisi yöntemiyle burç üretiminde sıkıştırma aşamaları gösterilmiştir. Bir metal kalıp içerisine doldurulan tozlar, tek veya çift etkili olarak, istenilen yoğunluğa bağlı olarak belirli basınçlarda sıkıştırılırlar.

Gözenekli toz metal yataklar tam yoğun bir malzeme gibi görünseler de, sinterleme sonrası toz tanecikleri arasında binlerce küçük kanalcık ve gözenek mevcuttur (Şekil 1.13). Yatak elemanında gözenekler yağ deposu görevi yaparlar. Bu gözenekler parça hacminin %15-30’u kadardır. Sinterleme sonrası gözeneklere, yağ banyolarında vakum altında sıvı veya gaz yağlayıcılar emdirilir. Bu gözeneklere, gözenek hacminin % 90-95’lere varan değerlerde yağ emdirmek mümkündür.



Şekil 1.12. Toz metalurjisi yöntemiyle burç üretiminde sıkıştırma aşamaları (Colton, 2001).





Şekil 1.13. Yağlama mekanizmaları(Colton, 2001).

Bu yataklarda çalışma esnasında, yatakla mil arasındaki sürtünmeden dolayı, yatak bölgesinde sıcaklık yükselir. Yağın metale göre ısıl genişmesi daha büyük olduğundan ve milin yatağa oturduğu bölgede yağ filminin hidrodinamik basınç değişimi nedeniyle gözeneklerdeki yağ, mile doğru emilir (Şekil 1.13.b). Dönme işlemi bittiğinde ise yatak soğur ve kılcallık etkisi ile yağ tekrar geri emilir (Şekil 1.13.c) (Norbert, 1998).

Sinterleme sonrası 80 °C-100 °C yağ banyolarında vakum altında 6-8 saat süre ile yağ emdirilir. Emdirilecek yağın cinsi yatağın porozite oranına, toz tane büyüklüğüne ve şekline, sıkıştırma basıncına ve yatağın alıştırılacağı ortama göre değişmektedir. Eğer yatağın çalışacağı yerde maruz kalacağı yükler büyükse kalın yağlar; yükler küçük ise ince yağlar kullanılır. Gözenekli toz metal yatakların yağ emme miktarı şöyle tarif edilir (Morgan, 1970).

$$\%Yağ \text{ Miktarı} = \frac{\text{Yağ hacmi}}{\text{Parça hacmi}} \times 100 \quad (1.1)$$

Diğer yandan, kendi kendini yağlayan yataklarda yük taşıma kapasitesi PV formülü ile hesaplanır (Norbert, 1998).

$$PV = \frac{F_n}{L.d} \times \pi d n \quad (1.2)$$

Burada;

P: Yatak kesit alanına düşen basınç (MPa)

V: Milin çevresel hızı, (m/d)

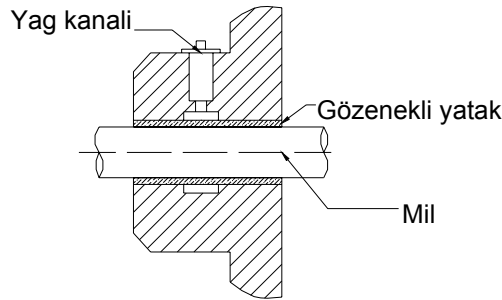
$F_n$ : Yatak yükü, (N)

L: Yatak uzunluğu, (mm)

n: Dönme sırasında milin hızı, (d/d)

d: Yatağın iç çapı, (mm)

Toz metal yataklarda hacmin %15-30'unu dolduran gözenekler, birbirlerine binlerce kılcal boşluklar ile bağlanırlar ve bu özellik sayesinde yatağın kendisi bir yağ deposu gibi görev yapar. Yağlamada en iyi performansın alınabilmesi, gerek yatağın yeterince yağ emmesi, gerekse ısı dağılımının uygun olabilmesi için yatağın dış çapının iç çapından en az %25 daha büyük olması gerekir. Gözenekli toz metal yataklarda yağ kaybı çok küçüktür. Genellikle ilave yağlama gerektirmezler. Bu yataklar, yatak ömrüne yetecek kadar yağ bulundururlar. Bazı ağır çalışma şartlarında yatağın dışarıda yağ ile beslenmesi gerekebilir. Bu durumda Şekil 1.14'de gösterildiği gibi yağ beslemeli konstrüksiyonlar kullanılır (Norbert, 1998).



Şekil 1.14. Yağ beslemeli gözenekli yatak konstrüksiyonu (Norbert, 1998)

Toz Metalurjisi yöntemi ile üretilen gözenekli kaymalı yataklar üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar sinterlenmiş bronz yataklar, demir esaslı sinterlenmiş yataklar ve demir-bronz sinterlenmiş yataklardır (Saritaş, 1994).

Temel bileşim elemanları bakır, kalay ve grafit olan bronz yataklar, American Society for Testing and Materials (ASTM) B 438'de standartlaştırılmıştır. Bu yataklar farklı grafit miktarlarına göre Çizelge 1.1.'de üç sınıfta toplanmıştır. Yoğunluklarına göre; 1. ve 2 sınıftaki kompozisyonlara sahip sinter yataklar dört, 3. sınıftaki kompozisyona sahip sinter bronz yataklarda iki tipte standartlaştırılmıştır (Çizelge 1.2).

Çizelge 1.1. Kendinden yağlamalı sinterlenmiş bronz yatakların kimyasal kompozisyonu ASTM B 438.

Element	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3
Bakır	87.2-90.5	85.7-90.2	83-88.5
Kalay	9.5-10.5	9.5-10.5	9.0-10.0
Grafit	0-0.3	0.5-1.8	2.5-5.0
Demir, max	1.0	1.0	1.0
Diğer elementler	1.0	1.0	1.0

Çizelge 1.2. Bronz yatakların yoğunlukları ASTM B 438.

Sınıf 1 ve Sınıf 2			Sınıf 3		
Tip	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Minimum Yağ Kapasiteleri Hacim %	Tip	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Minimum Yağ Kapasiteleri Hacim %
1	5.8-6.2	27	1	5.8-6.2	25
2	6.4-6.8	19	2	6.2-6.4	17
3	6.8-7.2	12			
4	7.2-7.6	9			

Demir esaslı sinter yataklar ASTM B439'da dört sınıfta standartlaştırılmıştır (Çizelge1.3). Sınıf 1 ve sınıf 2 demir-karbon malzeme, sınıf 3 ve sınıf 4 demir-bakır malzeme olarak belirtilmiştir. Her bir sınıfın yoğunlukları ve minimum yağ kapasiteleri Çizelge 1.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.3. Demir-bakır-Karbon yatakların kimyasal kompozisyonu ASTM B 439.

Element	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3	Sınıf 4
Bakır	0-1.5	0-1.5	9.0-11.0	18.0-22.0
Demir	Geri kalan	Geri kalan	Geri kalan	Geri kalan
Diğer elementler, max	2.0	2.0	2.0	2.0
Karbon	0.3 max	0.3-0.6	0.3 max	0.3 max

Çizelge 1.4. Demir-bakır-karbon yatakların yoğunlukları ve yağ kapasiteleri. ASTM B 439

Sınıf	Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>		Yağ kapasitesi, %hacim
	Min	Max	
1 ve 2	5.6	6.0	21
3. ve 4	5.8	6.2	19

Çizelge 1.5. Gözenekli Yatakların Tipik Özellikleri (Kurt, 1994)

Özellikler	Birim	Bronz	Demir	Demir-Bakır
Yoğunluk	Gr/cm <sup>3</sup>	5,7 – 6,7	5,7 – 6,7	5,3 – 6,3
Max. Çekme	Mpa	82,7 – 96,5	-	82,7 – 206,8
Max. Basma	Mpa	457,7	-	-
Basmada Orantı Sınırı	Mpa	72,5	84,1	120,7
Sertlik	BHN	30 – 40	40 – 50	-
Max. Statik Yük	Mpa	51,7 – 68,9	55,1 – 68,9	103,4 – 137,9
Max. Hız	m/dak	457,2	243,8	-
Max. PV	Mpa.m/dak	105 – 126	84 – 105	73,5 – 126
Max. Çalışma Sıcaklığı	°C	65	65	-
Lineer Genleş. Kat.	m/m/°C	15 x 10 <sup>-6</sup>	15 x 10 <sup>-6</sup>	-

### 1.7. Zorlanma ve Yüklenme Tipleri

Kuvvet ve momentler ve bunlara bağlı olan gerilmeler zamana göre statik ve değişken(dinamik) olabilirler. Statik gerilmeler, kuvvetler veya momentler zaman göre sabit veya çok uzun zaman zarfında çok az değişen gerilmelerdir. Dinamik gerilmeler maksimum (üst) ve minimum (alt) iki değer arasında sürekli değişen

gerilmelerdir. Değişken gerilmelerde maksimum gerilme  $\sigma_{\max}$ , minimum gerilmeye  $\sigma_{\min}$  ile gösterilirse, bu değerler bağlı olarak; ortalama gerilme

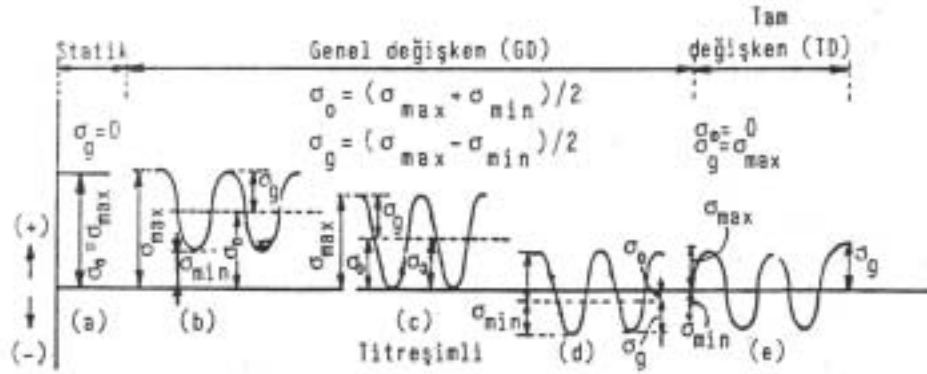
$$(\sigma_o = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}) \quad (1.3.)$$

ve gerilme genliği;

$$(\sigma_g = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}) \quad (1.4.)$$

ile ifade edilmektedir.

Dinamik zorlanmalar;  $\sigma_o$  değerine göre Şekil 1.18'de gösterildiği gibi tam değişken ( $\sigma_o=0$ ) ve genel değişken ( $\sigma_o \neq 0$ ) olmak üzere iki guruba ayrılabilir. Genel değişken zorlanmanın özel bir hali titreşimli yüklemedir ( $\sigma_{\min}=0$ ,  $\sigma_o = \sigma_g = \sigma_{\max}/2$ ).



Şekil 1.15. Yükleme tipleri (Akkurt, 1990)

Makine elemanları genellikle değişken gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu bakımdan, değişken zorlanmaların özelliklerinin bilinmesi ve makine elemanlarının hesap tarzlarının bu özelliklere göre yapılması, teknik ve ekonomik bakımdan büyük önem taşımaktadır (Akkurt, 1990).

## 2.YORULMA

Genel kullanımı itibarıyla yorulma kelimesi malzemelerin statik gerilme veya uzamalar altındaki davranışlarından farklı olarak, tekrarlı gerilme veya uzamaların söz konusu olduğu durumlardaki davranışlarını belirtmek üzere kullanılmaktadır. Yorulma, ASTM E 206-72’de şöyle tarif edilmektedir; “Bazı nokta veya noktalardaki tekrarlı gerilme veya uzama şartlarına maruz malzemelerde görülen, yeterli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine veya tamamen kırılmaya sebep olan lokalize sürekli gelişen kalıcı yapı değişikliği olayıdır”. Tanımlamada üzerinde durulan dört önemli özellik; olayın sürekli gelişmesi, lokalize olması, çatlakların büyümesi ve sonuçta kırığın ortaya çıkmasıdır. (Varol, 2001).

### 2.1.Metallerin Yorulma Olayı

Metallerin, tekrarlanan yüklemelerde çekme dayanımından daha düşük seviyelerdeki gerilmelerde hasara uğrayabildiği 19. yüzyılın ortalarından beri bilinmektedir. Bu tür tekrarlanan gerilmeler altında oluşan hasara “yorulma” adı verilmektedir. Teknolojideki hızlı gelişme; makine parçalarının daha ağır zorlanma şartlarında çalışmasını gerekli kılmış, bu ise günümüzde rastlanılan hasarların % 80 ile % 90 'nının yorulma hasarı olmasına neden olmuştur. Ayrıca bu hasar türü, oluşmasından önce herhangi bir uyarıcı işaret **vermediğinden** hayati önem taşıyan tasarımlar için büyük tehlike oluşturmaktadır. Emniyetli bir tasarım için kullanılacak malzemenin tekrarlanan yükler altında ve değişik ortamlarda ne zaman hasara uğrayabileceği sorusunun cevaplanması gerekmektedir. Bu bilgi kısmen de olsa malzemelerin değişik gerilme seviyelerinde hasar tekrar sayılarını veren Wöhler eğrilerinden elde edilebilmektedir.

Uygulamalarda statik zorlanmalara ender olarak rastlanmaktadır. Makinelere ve dolayısıyla makine parçalarına, genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli veya düzensiz olarak sürekli değişen kuvvetler ile eğme ve burulma momentleri etki ederler. Değişen zorlanmalardan dolayı kırılma, söz konusu malzemenin akma sınırının çok altındaki

gerilmelerde oluşabilir. Bu tür kırılmalara yukarıda da değinildiği gibi “yorulma kırılması” adı verilir.

Mukavemet ve elastisite bilgisinin gelişmesi, giderek daha düşük güvenlik katsayılarının seçimi ve yüklerin daha kesin olarak tahmin edilmesi ile malzeme değişikliğine gidilmeden de makine ve elemanlarının daha küçük kesitli olarak boyutlandırılabilmesini mümkün kılmıştır. Ancak bu durumda gerilmelerin akma sınırını aşmamasına yeterince özen gösterildiği halde, işletme sırasında makine parçalarında kırılmalar gözlenmeye başlanmıştır. Herhangi bir şekil değiştirme oluşturmadan ortaya çıkan bu kırıkların, yüksek yüklerin bir kez ve tek yönde uygulanması ile oluşan kırılma yüzeylerinden, görünüşleri bakımından tamamıyla farklı olduğu saptanmıştır. Bu gözlemlere dayanarak kısa bir süre sonra yüklerin veya momentlerin büyüklüğü ve yönünde zamanla değişmelerin söz konusu olduğu durumlarda, statik deneylerle saptanan mukavemet değerlerinin malzemenin davranışını belirtmekte yetersiz kaldığı anlaşılmıştır. Bütün bu deneyler "Sonsuz sayıda tekrarlanmasına rağmen, kırılmaya neden olmayan en yüksek gerilme" yani yorulma dayanımı kavramının doğmasına., neden olmuş ve deneysel olarak yorulma dayanımının, statik dayanım değerinden çok daha düşük düzeyde olduğu saptanmıştır. Ancak işletme yüklerine göre hesaplanan gerilmeler, kullanılan malzemenin düzgün yüzeyli ve parlatılmış deney parçaları yardımı ile bulunan yorulma dayanımının çok altında kalmasına rağmen, makine parçalarının genel hasara uğradığı gözlenmiştir. Bunun üzerine yapılan deneylerle, şekil, yüzey durumu, kuvvet iletimi, makine parçasının bulunduğu ortamı ve malzemenin iç yapısı gibi değişik iç ve dış etkenlerin yorulma dayanımını değiştirdiği; dolayısıyla bu etkenleri dikkate almadan bulunan yorulma değerlerinin mukavemet hesaplarında aynen kullanılmayacağı anlaşılmıştır. Metalik parçanın yorulma direncini ve yorulma ömrünü arttırmak için, etkili faktörleri en zararsız halde bulunduracak çok iyi bir tasarıma ihtiyaç vardır. Ancak küçük bir yorulma deneyi numunesi üzerinde yapılan deney sonuçlarının karmaşık bir parça veya konstrüksiyon dizaynında kullanmak oldukça güçtür. Laboratuarda, standart boyut ve belirli yüzey özelliğindeki numuneye, belirli türde sabit gerilmeler uygulanarak deney yapılır: Endüstride kullanılan parça da ise koşulların hepsi değişiklik gösterirler. Karmaşık olmalarından dolayı bu koşulların analizi de güçtür. Bu nedenle yorulma

deneyi sonuçları, mühendislik uygulamalarında çekme deneyi sonuçları gibi kesin ve tam güvenilir şekilde kullanılamazlar. Yorulma deneyi sonuçları belirli koşullar için fikir verir ve benzer koşulların bulunabileceği parça dizaynında gerekli önlemlerin alınmasında yardımcı olur.

Temelde, konstrüktörler değişen yükler ile zorlanan parçaların tasarımında verilere bağlı olarak şu değişik hesaplama yöntemlerini izleyebilirler;

a) Konstrüksiyonu belirleyen şekil, boyutlar, malzeme ve zorlama gibi büyüklükler verilmiş ise sadece kritik kesitlerde yorulmaya karşı güvenliğin yeterli olup olmadığının kontrolü gereklidir. Güvenliğin yeterli olmadığı durumlarda özel yöntemler ile malzemenin yorulma dayanımı yükseltilmeye çalışılır. Bunlar yüzeylerin sertleştirilmesi, parlatma v.s. gibi işlemler olabilir.

b) Sadece malzeme ve zorlama şeklinin belirli olduğu durumlarda, parça gerekli güvenlik sağlanacak şekilde boyutlandırılır.

c) Eğer parçanın şekli ve boyutları belirli ise o zaman gerekli güvenlik sağlanacak şekilde malzeme ve zorlama üst sınırı saptanır.

Büyükluğu ve yönü düzenli ya da düzensiz bir şekilde sürekli değişen kuvvet veya gerilme veya momentlerin eğme ve burulma etkimesi “**yorulma zorlaması**” olarak adlandırılır. Yorulma zorlamasında yük zamana bağlı olarak nasıl değiştiğinden çok, en alt ve en üst sınır değerlerinin büyüklüğü önemli olup, yük değişimi genellikle sinüzoidal olarak kabul edilebilir. Birim zamandaki çevrim sayısı çok düşük, örneğin, saatte birkaç çevrim veya malzemenin ısınmasına neden olacak kadar çok yüksek olmamak koşulu ile yorulma ömrünü önemli ölçüde etkilemez. Kuvvetin veya momentin en küçük ve en büyük değerleri sıfır konumuna göre ters veya aynı işaretli olabilir. Yorulma zorlanmasının iki hali için özel isimler verilmiştir: Kuvvet veya moment aynı büyüklükte, fakat biri artı diğeri eksi işaretli iki sınır değeri arasında



değişiyor ise “**değişken zorlama**” ve malzeme dayanımı bakımından değişken “**yorulma dayanımı**” değeri söz konusudur. Kuvvet veya moment sıfır değeri ile belirli bir diğer sınır arasında değişiyor ise “**dalgalı zorlama**” ve malzemenin dayanımı bakımından dalgalı “**yorulma dayanımı**” değeri deyimleri kullanılır. Yorulma zorlaması sadece dış kuvvetlerin değil, örneğin sıcaklık farkları nedeni ile oluşan iç kuvvetlerin etkimesi ile de görülebilir(Turhan, 1998).

Parçanın şekli, yüzey kalitesi, ortamın korozif etkisi, kuvvet iletiminin türü, ön gerilme, malzeme hatası, mikro yapının büyük ölçüde heterojen olması gibi nedenler ile yerel gerilme yığılmaları oluşur. Yorulma çatlakları gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgelerde başlar.

Yorulma olayı eleman ömrü ve elemanın yükleme başlangıcında ön çatlak içerip içermediğine göre dört ana grupta incelenebilir;

**a) Ön Çatlaksız Elemanların Yorulması :** Elemanda başlangıçta herhangi bir ön çatlak mevcut değildir. Örnek olarak rulman bilyeleri, dişliler, miller, krank milleri gibi makine elemanları verilebilir.

**b)Ön Çatlaklı Elemanların Yorulması :** Bu elemanlarda ön çatlaklar mevcuttur. Tüm büyük boyutlu elemanlar özellikle kaynak içeren elemanlar, köprüler, gemiler, basınç kapları gibi.

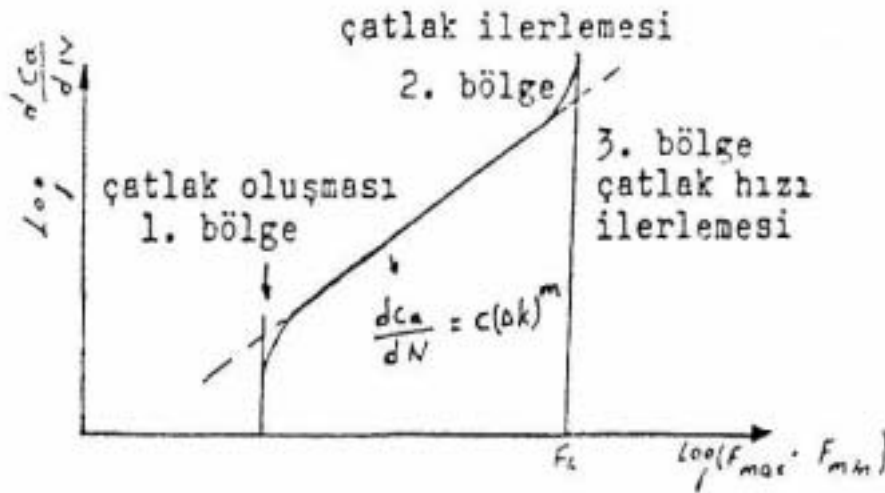
**c) Uzun Ömürlü Yorulma :** Genel olarak akma mukavemetinden daha küçük gerilmelerdeki yorulmadır(yorulma ömrü  $\geq 10^4$  çevriminden daha büyük). Örnek tüm titreşen sistemler, tekerlekler, miller ve motor elemanları.

**d) Kısa Ömürlü Yorulma :** Yorulma akma sınırından daha büyük gerilmeler nedeni ile meydana gelir. (Eleman ömrü  $\leq 10^4$  çevrimdir.) Örnek, nükleer

reaktör çekirdek elemanları, hava araç ve taşıttan, türbin elemanları, ara sıra da olsa aşırı yüklere maruz kalan tüm elemanlar.(Onur, 1984).

## 2.2. Yorulmanın Oluşumu

Araştırmalar yorulma hasarının üç aşamada meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 2.1'de şematik olarak gösterildiği üzere çatlak başlaması(çekirdeklenme), çatlak yayılması (büyümesi) ve bunun sonunda yorulma kopmasının meydana gelmesi olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 2.1 Yorulma ile çatlak ilerlemesinin şematik gösterilimi(Onur, 1984)

Yorulma olayının oluşumunu etkileyen faktörler üç ana grupta incelenebilir. Bunlar eleman malzemesi, tekrarlanan zorlama ve ortam üçlüsüdür: Bu üçlünün atom mikroskobik ve makroskobik yapısında meydana getirdiği değişiklikler sonucu elemanda yorulma nedeni ile beklenen kopma meydana gelmektedir. Bu olayda, yapıda meydana gelen çatlaklar, yüzeyler üzerindeki gerilme yığılmalarının, korozyon etkilerinin, veya mikro yapısal kusurların mevcut olduğu yerlerden başlar. Mikro yapıdaki düzensizliklerden yorulma oluşmasına katkıda bulunan faktörlerin bazıları;

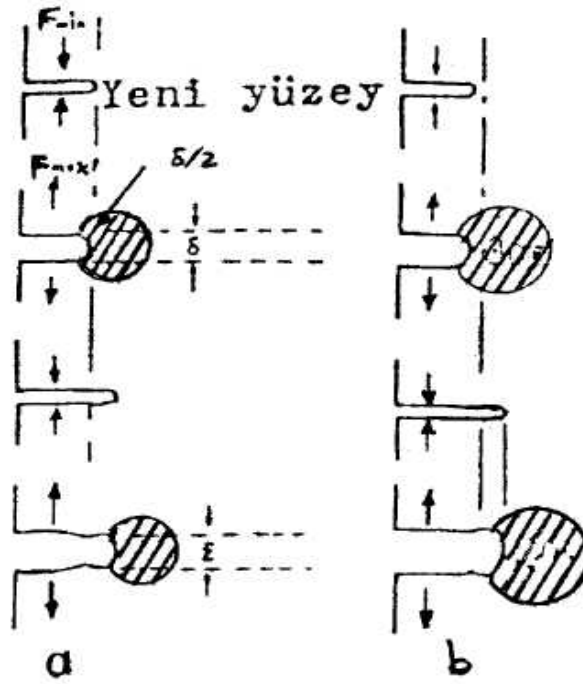
Tane yapısı, kritik gerilmelerde tane düzeninde farklar, borüsler, korbüsler, nitrüsler, sülfidler gibi safsızlık zerreciklerinin neden oldukları mikro gerilme yoğunlaşmaları (konsantrasyonlar), anizotropi. deformasyon sertleşmesindeki katsayılar sıralanabilir.

Çatlağın başlaması aşamasında, elemanlar arasındaki bağların kopması kayma deformasyonlarına yol açar ki bu deformasyonlar düzlemsel ve dalgalı kayma deformasyonları olmak üzere ikiye ayrılır. Düzlemsel kayma deformasyonların düzlemsel dizilimler içerisinde meydana geldikleri kayma tipi olup daha küçük gerilmelerden etkilenir. Buna karşılık dalgalı kayma deformasyonları, düzlemsel olmayan dislokasyon düzenleri ve bir genel yüzey buruşması gösterip büyük gerilmelerden daha çok etkilenir. Kayma tipi deformasyonlar için kontrol eden sıcaklık ve çevrim frekansı olmak üzere iki ana faktör vardır. Düzlemsel kayma  $0.4 T_m$  sıcaklığına kadar önlenebilir. Burada  $T_m$  malzemenin Kelvin cinsinden ergime sıcaklığıdır.  $0.4 T_m$  'den sonra termik aktivasyon dislokasyonların kaymayı geçerek orjinal kayma düzlemlerinin dışına tırmanmasına izin verir ve dalgalı kaymaya yol açar. Çevrim frekansı  $0.4 T_m$  'den büyük sıcaklıklarda önem kazanır. Yüksek sıcaklıklarda yüksek frekanslar düzlemsel kaymalar meydana getirebilir. Bunun nedeni dislokasyon tırmanma ve çapraz kayma süreçlerinin zamana bağımlı süreçler olmasıdır.(Tekin, 1992).

Çatlağın yayılma aşaması, çatlak başlamasından sonra yer alır. Birinci aşama çatlak büyümesi, kayma düzlemleri boyunca ve maksimum kayma gerilmesi yönlerinde meydana gelir. Bu çatlak büyüme tipi, düzlemsel çatlakların başlamasına elverişli şartlar olan düşük periyodik gerilmeler, düşük sıcaklıklar ve yüksek sıcaklıklardan etkilenir. Öte yandan ikinci aşama çatlak büyümesi, asal gerilmeye dik olan yönde meydana gelir ve özellikle değişken kayma çatlak başlangıcına elverişli olan ortalama çekme gerilmesi, yüksek sıcaklıklar ve düşük frekanslardan etkilenir.

### 2.3.Yorulma Mekanizmaları

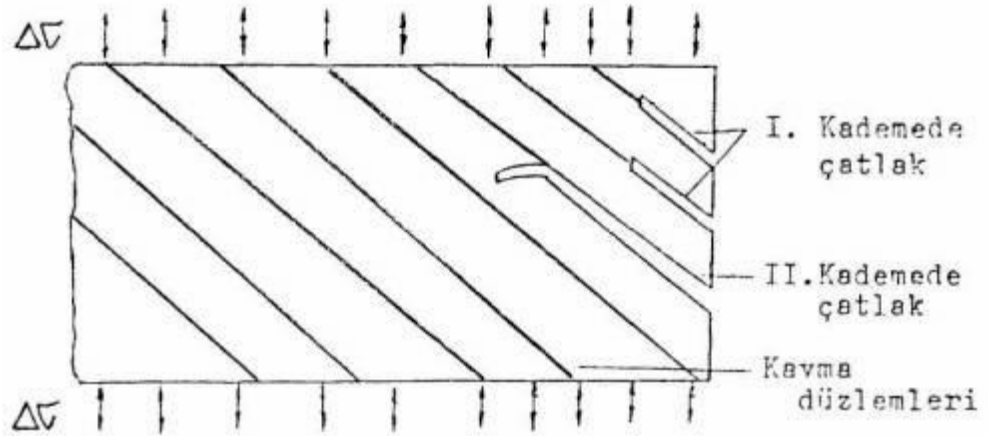
Yorulma olayının oluşumu tam olarak bilinmemekle beraber burada elemanda meydana gelen şekil değişimlerinin gerilme yoğunluğu ve sıcaklığın önemli rol oynadığı kabul edilmektedir. Yorulma mekanizmalarının açıklanmasında elemanın başlangıçta herhangi bir çatlakla sahip olup olmaması önemli rol oynar. Başlangıçta çatlak içeren bir elemanda bu çatlak Şekil 2.2' de görüldüğü üzere büyür. Metal veya polimerlerde bu büyüme, çekme şeklindeki yük çevriminde çatlak ağzı yeni bir plastik bölge oluşacak şekilde  $\delta$  kadar açılır. Basınç şeklindeki yük çevriminde ise çatlak kapanır ve yeni yüzey çatlak derinliğini yaklaşık  $\delta$  kadar büyültür, takip eden yük çevrimlerinde ise aynı durum tekrarlanır ve çatlak bir yük tekrarıda yaklaşık  $da / dN = \delta$  kadar büyür. Burada  $da$ , diferansiyel çatlak boyunu ve  $N$  ise yük tekrarını verir.



Şekil 2.2 Yorulma çatlaklarının büyümesi (Pıhtılı, 1984)

Genel olarak tüm mühendislik alaşımları, iç yapılarında esas metal atomlarıyla ilave malzeme atomlarının kimyasal reaksiyonları neticesi küçük kimyasal reaksiyonları içerir. Plastik bölge içerisinde böyle bileşimler varsa plastik akımlar bu tanecikler etrafında oluşarak bu bölgelerde çürüme boşluklarına neden olur. Bu durumda çatlak bu boşlukların yardımıyla bir önceki durumdan daha hızlı olarak büyüme gösterir.

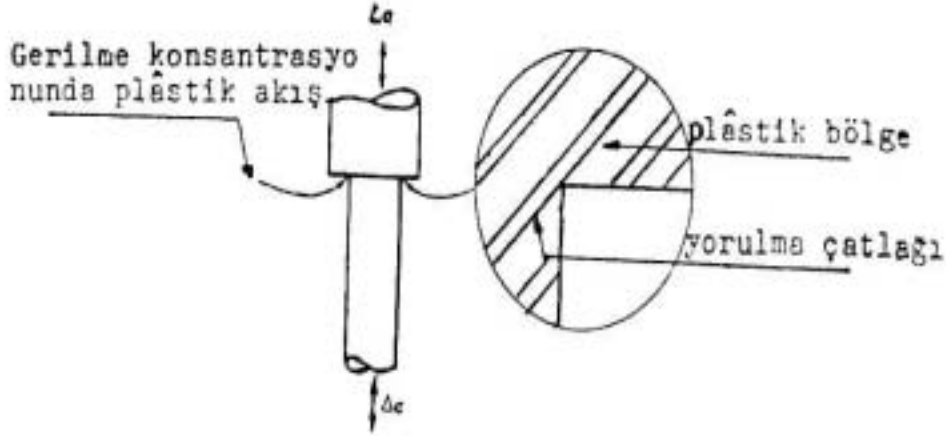
Yukarıda anlatılanlar ön çatlak içeren yapıların yorulma ömürlerini belirler(Şekil 2.3.). Eğer eleman başlangıçta herhangi bir çatlak taşıyorsa ve kısa ömürlü yorulma etkisinde ise plastik şekil değişimleri eleman yüzeyini çabukça sertleştirir ve çatlak bu yüzeyde önceleri kayma yüzeyi boyunca daha sonra ön çatlaklı elemanlarda açıklanan şekilde büyüme gösterir.



Şekil 2.3 Kısa ömürlü yorulmada çatlak büyümesi(Yıldırım, 1994)

Ön çatlak içermeyen elemanların uzun ömürlü yorulmalarında ise durum farklıdır. Bu durumda gerilmelerin malzemelerin akma mukavemetinin altında olması nedeni ile eleman ömrünün hemen hemen tamamında çatlak oluşması devam eder. Elemanda genel plastisite olmamasına rağmen kertik, çizik veya ani kesit değişimlerinin olduğu bölgelerde gerilme yığılmaları nedeni ile yerel plastisiteye rastlanır. Şekil 2.4' de görüldüğü gibi belirli bir süre sonra bu bölgelerde çatlaklar meydana gelir. Başlangıçta yavaş olan çatlak oluşumu sonra hızlanır ve eleman tamamen deforme

olana kadar yayılır. Bu nedenle ani kesit değişimleri ve çizikler uzun ömürlü yorulma açısından oldukça tehlikelidir ve yorulma ömrünü on kat daha kısaltılabirler. Şekil 2.4.' de oluşum ve gelişim gösteren çatlak, geride kalan kesit alanı yükü taşımayacak kritik bir değere ulaştığında gevrek malzemelerdeki gibi kopma meydana gelir.(Turhan, 1998).



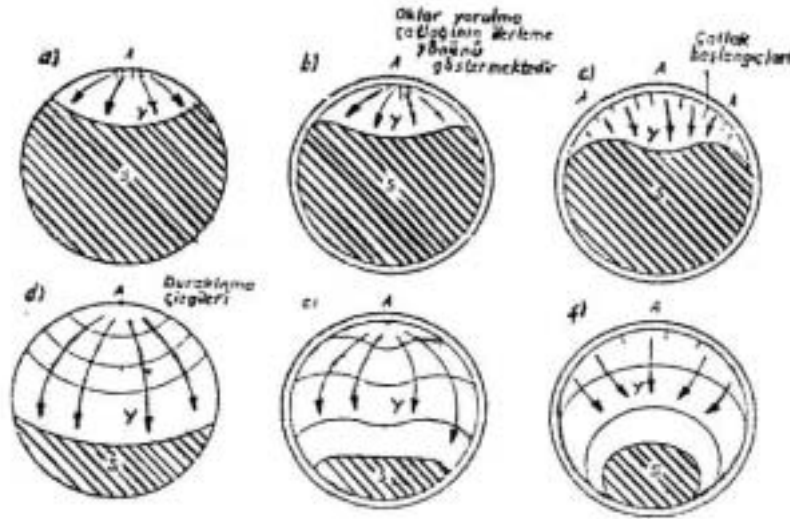
Şekil 2.4 Uzun ömürlü yorulmada çatlak oluşumu (Turhan, 1998)

#### 2.4.Yorulma Kırıklarının Görünümü ve Oluşum Şekilleri

Yorulma kırıklarının görünümü, özellikle çelikler için, hemen hemen her yorulma olayında zorlamanın şekli ve seviyesi ile zorlamanın zamanla değişimi hakkında bilgiler verebilir. Kırılmanın başladığı yerler çoğunlukla saplanabilir ve yorulma kırılmasının ilerleyişinden de noktasal ve çevresel çentik etkilerinin var olup olmadığı anlaşılabilir.

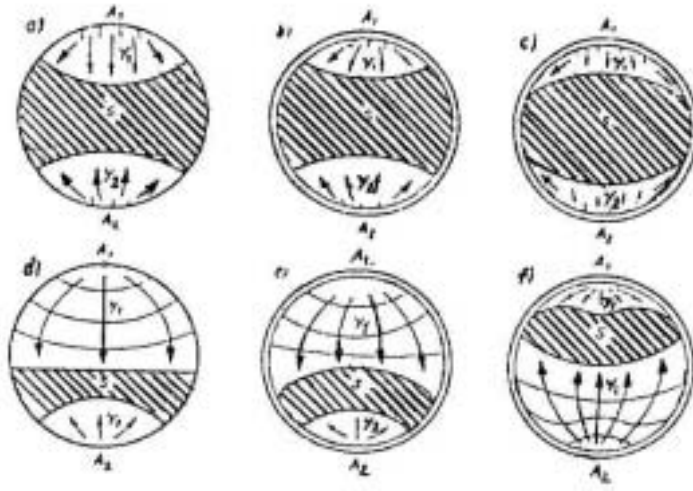
Yorulma çatlaklarında zorlamanın durdurulduğu aralıklar veya zorlama seviyesinin değişimi nedeni ile ağaçlarda görülen yaş halkalarına benzer duraklama çizgileri bulunabilir. Duraklama çizgileri yorulma kırılmasının kesin bir işaretidir ve bu çizgilerin şeklinden yorulma kırılmasının başlaması ile ilerlemesi hakkında bilgiler elde edilir. Şekil 2.5 a...f 'de çekme zorlamaları ile tek taraflı eğme zorlamasının ortak etkimesi sonucu görülebilecek yorulma kırılmalarının oluşum şekilleri şematik olarak gösterilmiştir. Şekillerde yorulma kırılmasının oluşum şekilleri kolaylık bakımından

dairesel kesitte gösterilmiş ve çevresel çentik etkisinin bulunduğu durumlar çift daire ile belirtilmiştir.



Şekil 2.5 a...f Çekme zorlamaları ile tek taraflı eğilme zorlanmalarının ortak etkimesi sonucu yorulma kırıklarının oluşum şekilleri : Y: Yorulma çatlakları, S ; son kırılma yüzeyi (Yıldırım, 1987)

- a) Çekme zorlaması altında yorulma kırılması : Anma gerilmesi yüksek, yerel çentik etkisi zayıf.
- b) Çekme zorlaması altında yorulma kırılması : Anma gerilmesi yüksek tüm çevrede zayıf bir çentik etkisi, çatlak cephesinin kenarları daha hızlı ilerliyor.
- c) Çekme zorlaması altında yorulma kırılması : Anma gerilmesi yüksek, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi cephe kenarları daha hızlı ilerliyor,
- d) Çekme düşük anma gerilmesi küçük bir yerel çentik etkisi bulunan düzgün parça, çatlak cephesi A etrafında daireler şeklinde ilerliyor.
- e) Çekme düşük anma gerilmesi düşük fakat çevresel olan çentik etkisi nedeniyle çatlak cephesi kenarları hızlı ilerliyor.
- f) Çekme düşük anma gerilmesi düşük, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi var ve son kırılma yüzeyi hemen hemen tümüyle yorulma çatlakları ile çevrilmiş.

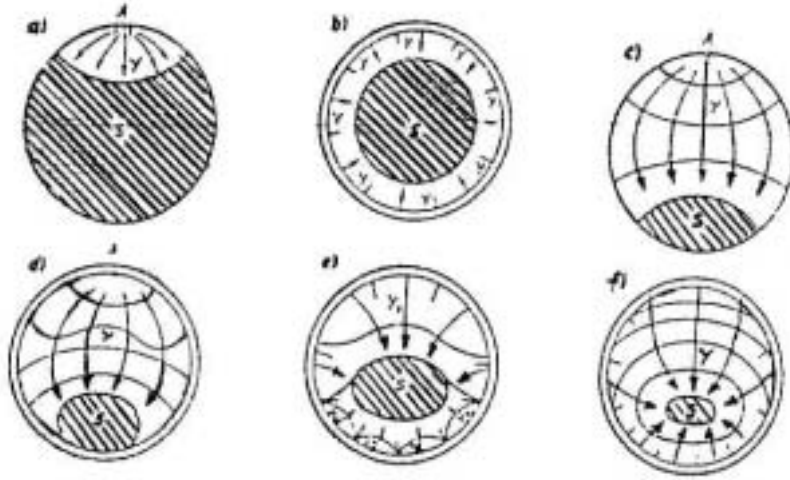


Şekil 2.6 a-f çift taraflı eğme zorlamaları altında yorulma kırıklarının oluşumu(Yıldırım, 1987)

- a) Anma gerilmesi yüksek, yerel çentik etkisi zayıf.
- b) Anma gerilmesi yüksek, çevresel çentik etkisi zayıf.
- c) Anma gerilmesi yüksek, çevresel çentik etkisi kuvvetli.
- d) Anma gerilmesi düşük, zayıf yerel çentik etkisi bulunan, düzgün parça.
- e) Anma gerilmesi düşük, tüm çevrede zayıf çentik etkisi.
- f) Anma gerilmesi, düşük tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi.

Şekil 2.5-2.7. de görüldüğü üzere bu yorulma kırılmalarında işletme gerilmelerinin yüksek olması halinde son kırılma yüzeyleri kesitin arkasında oluşmaktadır. Düşük anma gerilmelerinde ise ikinci çatlağın oluşumu birinciye göre gecikme gösterdiğinden son kırılma yüzeyi genellikle ortada değildir. Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğme) sonucu oluşan yorulma çatlaklarının temel şekillen Şekil 2.7 a-f 'de gösterilmiştir. Bu şekiller çekme veya tek taraflı eğmeye çok benzer olabilirler, ancak çatlağın ilerlemesi her ikisinden de daha hızlıdır.





Şekil 2.7 a-f Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğilme) sonucu oluşan yorulma kırıkları (Yıldırım, 1987)

- a) Yüksek anma gerilmesi, yerel çentik etkisi,
- b) Yüksek anma gerilmesi tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi,
- c) Düşük anma gerilmesi, yerel çentik etkisi,
- d) Düşük anma gerilmesi, tüm çevrede zayıf çentik etkisi,
- e) Düşük anma gerilmesi, tüm çevrede zayıf çentik etkisi, çok yayışla çatlak başlangıcı,
- f) Düşük anma gerilmesi, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi.

Bu tür zorlamalar sonucu meydana gelen yorulma kırılması yüzeyleri, görüntüleri bakımından çekme ve eğme zorlaması kırıklarından çok farklıdır. Düzgün şekilli gevrek malzemelerde ve düzgün şekilli olmakla birlikte enine delikleri veya yüzeyinde basma kuvvetlerinin etkidiği bölmeler bulunan sünek malzemelerle burulma, yorulma çatlağı mil eksenine  $45^\circ$  eğimle başlar. Çatlak ilerlemesi spiral şeklinde devam edebilir veya malzemenin kayma duyarlılığı ile zorlama durumuna bağlı olarak parça eksenine dik ya da paralel yöne dönebilir. Çentik etkisinin çevresel olarak yüksek olduğu durumlarda ise (kanallar) kesitler, derin oyuklar kırılma,

gevrek ve sünek malzemelerin her ikisinde de eksene dik düzlemlerde oluşur (Yıldırım, 1987).

## 2.5.Yorulma Dayanımının Saptanması ve Gösterimi

Yorulma dayanımı deyiminden düzgün veya çentikli parçalarda, belirli bir ortalama gerilme için parçanın kırılmadan veya belirli bir şekil değiştirmeyi aşmadan sonsuz çevrim sayısında taşıyabileceği gerilme genliği anlaşılır. Müsaade edilebilir şekil değiştirmenin miktarı yorulma deneyinin yapıldığı şartlara (örneğin deney sıcaklığı) veya deney malzemesi cinsine bağlıdır. Sonsuz sayıda yük tekrarını kırılmadan veya aşırı şekil değişimine uğramadan taşıyabilen bir yapı elemanı, **yorulmaya karşı dayanıklıdır** denir. Taşınabilir en büyük anma gerilmesi genliği de yapı elemanının yorulma dayanımı olarak adlandırılır. Bir yapı elemanının yorulma dayanımı sadece bir malzeme özelliği olmayıp, bunun yanında parçaların büyüklüğü, biçimi ve üretim şekline bağlı olduğundan, anma gerilmesi ile verilen yorulma dayanımı, belirli bir biçim ve yüzey kalitesindeki parçanın konstrüktif dayanımı diye de tanımlanır.

Malzemelerin yorulma dayanımlarının saptanması için eksene paralel doğrultuda mekanik veya elektrolitik olarak parlatılmış düzgün deney parçaları kullanılır. Çentik duyarlılığının araştırılması için de, çentik katsayıları belirli çentikli deney parçalarından yararlanılır. Günümüzde kullanılan yorulma deney makinaları; çekme, çekme basma, çevresel eğme, ileri-geri eğme ve burma yanında bileşik zorlamaları da mümkün kılmaktadır. Bu makinaların deney frekansları, yapılarına bağlı olarak 500-15000 d/dak (8...250Hz) arasındadır. Söz konusu aralık için çelikten yapılmış düzgün parçaların yorulma dayanımları frekansa bağlı değildir. Ancak hafif metallerde ve çentikli çelik parçalarda yorulma davranışı frekansla değişir ve bu değişim süreli yorulma durumunda daha fazladır. Deney parçası örneğin asit içermeyen bir yağla soğutulmazsa, ısınma nedeni ile zamanından önce çatlayabilir. Süreli yorulma zorlamasında frekansın çok düşük veya çok yüksek olması, çeliklerde de düz veya çentikli tüm parçaların yorulma ömürlerinin azalmasına neden olur.

Yorulma dayanımı normal olarak Wöhler Yöntemi ile bulunur. Bir deney serisinde çoğunlukla 6 - 10 adet parça gereklidir. Belirli bir deney parçası için başlangıçta ayarlanan yorulma zorlaması deney sırasında değiştirilemez, yani tek kademeli yorulma deneyi söz konusudur. Buna rağmen çok kademeli yorulma deneyinde zorlama sistematik olarak deney sırasında değiştirilir. Her bir zorlama kademesi belirli çevrim sayıları arasında sabit kalır; zorlamaların sırası istenildiği gibi seçilebilir, yani giderek artabilir, azalabilir veya karışık olabilir. Sadece iki zorlama seviyesinin bulunduğu deneyler iki kademeli yorulma deneyi olarak adlandırılır. Yorulma deneyi zaman zaman durdurulursa düzgün deney parçalarında toparlanma olayı görülür ve böylece aralıksız olarak yapılan deneyden daha yüksek yorulma dayanımları elde edilir. Çentikli deney parçalarında malzeme bünyesindeki değişik mekanizmalara bağlı böyle bir toparlanma olayının etkisi görülmez.(Yıldırım, 1994).

İstatistiksel olarak güvenli yorulma dayanımı değerleri elde etmek için "Merdiven yöntemi" olarak adlandırılan yaklaşım kullanılabilir. Bu yöntemde, saptanması istenen büyüklüğün beklenen dağılma bölgesi, örneğin yorulma dayanımı veya süreli yorulma bölgesinde belirli bir çevrim sayısına tekabül eden gerilme genliği basamaklara bölünür, deneyler beklenen dağılma bölgesinin ortasındaki bir zorlama ile başlar. Deney parçası kırılırsa, bir sonraki deney bir alt basamağın gerilmesi ile yapılır; parça kırılmazsa bir üst basamağın gerilmesine geçilir. Başlangıç deneyi dışında bütün deneylerde uygulanacak gerilme genliği bir önceki deney sonucuna göre seçilir. Gerilme genliği bu şekilde değiştirilecek belirli sayıda deney yapıldıktan sonra sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilir. Bu yöntemin üstünlüğü tüm deneylerin hepsinin kendiliğinden ortalama değer etrafında toplanmasıdır. Bu arada her deney parçası sadece bir kez kullanılır. Sınır çevrim sayısı da dahil olmak üzere, çeşitli çevrim sayılarında dağılma bandının saptanması için en az kırk deney parçası gereklidir. Yöntem, çentikli parçalar ve hasar çizgisine de uygulanabilir. (Turhan, 1998).

## 2.6. Yorulma Ömrü

Bir deney parçası veya yapı elemanının yorulma ömrü, yorulma dayanımından daha yüksek bir gerilmede kırılmanın olduğu çevrim sayısıdır. Yorulma ömrünün gösteriminde ortalama gerilme  $\sigma_{ort}$  ve gerilme genliği  $\sigma_g$ , söz konusu kırılma çevrim sayısına indis olarak eklenir. Örneğin :

$$N(+8 \pm 14) = 2.2 \cdot 10^6 \quad (2.1.)$$

gösterimi ile  $\sigma_{ort} = +80 \text{ N/mm}^2$  ve  $\sigma_g = \pm 140 \text{ N/mm}^2$  olan bir zorlamada, kırılmanın  $2.2 \cdot 10^6$  çevrim sayısında olduğu anlaşılmaktadır. Yani yorulma ömrü kısaca belirli bir gerilim altında numunenin kırılma gösterdiği çevrim sayısı olarak da tanımlanabilir (Pıhtılı, 1984).

## 2.7. Yorulma Ömrüne Etki Eden Faktörler

Makine elemanlarında yorulmaya etki eden faktörler Çizelge 2.1.'de verilmektedir. Çizelgede de görüldüğü üzere malzemeye, yükleme tipine ve çalışma ortamına bağlı olarak etki eden faktörler sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.1. Yorulmaya Etki Eden Faktörler

Malzemeye bağlı olan Faktörler	Yükleme durumu	Ortam
Kimyasal bileşim	Yükleme tipi	Sıcaklık
Hatalar	Gerilme Genliği	Korozyon
Yapı hataları (dislokasyon, kayma düzlemleri)	Yükün şiddeti	Radyasyon Vakum
Eleman geometrisi (boyutlar, çentik)		
Yüzey durumu (pürüzlülük, kaplamalar)		
İşlemler(ısıtma işlemleri,soğuk çekime, artık gerilmeler)		

### **2.7.1 Malzemeye Bağlı Olan Faktörler**

İç yapı durumuna ve işletme şartlarındaki duruma çok bağlıdır, parçanın kırılması, malzemenin mukavemeti ve deforme olabilme kabiliyetine bağlıdır. Malzemenin akma sınırı aşılnca yani kritik kayma gerilmeleri nedeni ile kristallerin kayması sonucu kalıcı deformasyonlar meydana gelir. Bir malzeme ısı durumuna göre ve belirli işleme şartlarında deforme olmaksızın kırılabilir.(Çapa, 1984).

#### **2.7.1.1. Kimyasal Bileşim**

Yüksek sıcaklıklarda mukavemet çoğu kez çökeltme sertleşmesi sureti ile elde edilir. Hem çözelti işlemi ve hem de yaşlandırma işleminin yüksek sıcaklıktaki mekanik özellikler üzerine önemli bir etkisi vardır. Çözelti işlemi sonucu malzemenin tane büyüklükleri değişir. Malzeme üretim metodunun malzemenin tane büyüklüğü üzerinde önemli bir etkisi vardır.

#### **2.7.1.2.Hatalar**

İmalatçı tarafından, talaşsız şekillendirme sırasında şekillendirme metoduna bağlı olarak hatalar yapılmış olabilir. Şekil verme ile ilgili diğer hasar nedenleri yüzeydeki katlanmalardır. Fazla sıkışma sonucu aşırı yüklenmeler hasarlar meydana getirebilir.

#### **2.7.1.3 Yapı Hataları**

##### **2.7.1.3.1 Dislokasyonlar**

Yorulmanın sönüm tekniği ile yapılan incelemelerinde direkt yorulma mukavemeti incelemelerine kıyasla çok daha fazla faydalı bilgi elde edildiği görülmüştür. Araştırmalar sönümdeki değişikliklere esas itibariyle dislokasyonların sebep olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu araştırmalar ve yapılan deneyler sonucunda yorulma

çatlaklarının yüzeyde başlamasının muhtemel olduğu ve malzemelerin yorulma özelliklerini geliştirmek için dislokasyon kaynaklarının hareketlerinin önlenmesinin lazım geldiği neticesini ortaya çıkmıştır.

### **2.7.1.3.2 Kayma Düzlemleri**

Şekil değiştirmeler malzemenin kristal kafesi tarafından tam elastik olarak karşılanabildikleri sürece tehlikeli değildir. Kalıcı şekil değiştirmeleri kristal kafesin çarpılması ile değil kafesi değişik bölümlerinin yeni bir denge durumu sağlanıncaya kadar ötelenmesi yoluyla oluşurlar. Kafes kısımlarının birbirlerine göre ötelenmelerine kayma adı verilir. Yorulma zorlaması uygulanan malzemelerde yapılan metalografik incelemeler, pekleşme sonucu yapı değişikliklerinin oluştuğunu kanıtlamıştır. Tekrarlanan şekil değiştirmeler kristal kafes tarafından sürekli olarak taşınmadığı için yorulma zorlamasının pekleşme dışında hasar etkisi de vardır.

### **2.7.1.4. Eleman Geometrisi**

#### **2.7.1.4.1. Boyut Etkisi**

Yapılan kapsamlı araştırmalar makine parçaların boyutlarının eğme ve burma yorulma dayanımlarını önemli oranda etkilediğini göstermiştir. Büyük parçaların yorulma dayanımları küçük parçalarinkinden daha düşüktür. Boyut etkisi  $K \leq 1$  gibi bir sayı ile dikkate alınmaktadır.

#### **2.7.1.4.2. Çentik Duyarlılığı ve Yorulma Çentik Katsayısı**

Yorulma zorlamaları altında biçim ve yüzey etkilerine karşı olan duyarlılık malzemedan malzemeye farklıdır. Söz konusu davranış (ölçülü olarak) yorulma çentik katsayısı  $\beta_{çen}$  gibi bir sayı ile tanımlanır. Bu kat sayı düzgün şekilli parlatılmış dolu bir çubuğun yorulma dayanımının çentikli bir parçanın yorulma dayanımına oranıdır.

$$\beta_{\text{çen}} = \sigma_{\gamma_{\text{çentiksiz}}} / \sigma_{\gamma_{\text{çentikli}}} \quad (2.2.)$$

Yorulma dayanımı  $\sigma_y$  olarak, yorulma üst gerilmesi  $\sigma_{\text{üst}}$  alınır.  $\sigma_{\text{ort}} = 0$  ise  $\sigma_{\text{üst}}$  aynı zamanda değişken yorulma dayanımı olacağından bu özel durum için ;

$$\beta_{\text{çen}} = \sigma_{D_{\text{çentiksiz}}} / \sigma_{D_{\text{çentikli}}} \quad (2.3.)$$

olmaktadır.

Çentikli parçalarda yorulma dayanımı olarak bu şekilde saptanan yorulma değerine, anma gerilmesi veya hesaplanan gerilme adı verilir. Statik çekme, eğme veya burmada kolay pekleşen sünek malzemeler için çentik etkisi ile statik dayanım değerleri genellikle yükselir. Gevrek malzemelerde ise azalır. Çentiksiz malzemenin statik dayanımının çentikli malzemenin statik dayanımına oranı düşük sıcaklıklarda artar. Uygun biçimlendirme ve yüzey işlemleri ile parçanın konstrüktif yorulma dayanımı önemli ölçüde iyileşebilir.

### 2.7.1.5. Yüzey Durumu

Dinamik zorlanmalarda kırılma, yüzeyden başladığı için özellikle eğilme ve burulma zorlanmalarında, yüzeylerin işlenme durumu yorulma ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir.

Parçaların dinamik mukavemetleri, bazı metotlarla yükseltilebilir. Bunun için yüzey pürüzlülüğü azaltılır. Yüzeye yakın yerlerde, yükleme yönüne ters yönde iç artık gerilmeler meydana getirilir(Anik,1996). Bu artık gerilmeler bilyalı dövme gibi metotlarla yapılabilir. Yorulma mukavemeti artırmak için yüzeyde bası gerilmesi oluşturmak olumlu etki yapmaktadır.

### **2.7.1.6. İşlemler**

#### **2.7.1.6.1. Isıl İşlemler**

Çeliğin suya sokulması sırasında düzgün olmayan sıcaklık dağılımı nedeni ile kesit içinde ısıl gerilmeler doğmaktadır. Ayrıca iç yapı değişikliği nedeniyle meydana gelen gerilmeler, ısı gerilmeleri ile birlikte iç gerilme olarak yorulma ömrünü etkilerler.

#### **2.7.1.6.2. Soğuk Çekme**

Haddelenmiş veya dövülmüş çeliklerde statik dayanım değerleri gibi yorulma dayanımını da, parçaların akma çizgilerine göre konumuna bağlıdır. Akma çizgileri doğrultusuna dik yönde alınan parçalar en düşük, paralel yönde alınanlar ise en yüksek yorulma dayanımına sahiptirler.

#### **2.7.1.6.3. Artık Gerilmeler**

Artık gerilmelerin yorulma dayanımı üzerinde etkileri şöyle sıralanabilir :

- a) Artık gerilmelerde aynı değişken yüklemeler sonucu oluşan gerilmeler gibi yorulma dayanımını etkilerler.
- b) Özellikle sertleştirilmiş malzemeler için basınç türündeki büyük-gerilmeler faydalı, çekme türündeki gerilmeler zararlıdır.
- c) Uygulanan gerilmeler yorulma dayanımına yakın ise artık gerilmeler sabit kalır.
- d) Uygulanan gerilmeler yorulma dayanımından daha büyük ise artık gerilme gevşemesi meydana gelir ve bu nedenle yorulma mukavemeti yük uygulaması başlangıcındaki artık gerilmelerden fazla etkilenmez.
- e) Eğilmede önemli olan çekme veya basma olmasına bakılmaksızın yüzeye yakın bölgedeki artık gerilmelerin uç değerleridir.



### **2.7.2.Yükleme Durumu ve Ortalama Gerilme**

Düşük sıcaklıklarda üst yüklenme sınırının sabit kalarak, alt sınırın negatif değerlere geçişi hasarın daha erken ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Yorulma çatlakları gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgelerde başlar.

Yapılan deneylerin kombinasyonunda ortaya çıkan durum, malzemede yorulma dayanımının ortalama gerilme ve gerilme genliğine oldukça fazla bağlı olduğu ve bunların deneyler sonucunda çizilen Wöhler diyagramlarından kontrol edilerek malzemelerin kullanılabilceğidir.(Turhan, 1998).

### **2.7.3. Ortam**

#### **2.7.3.1. Oksitlenme ve Vakum**

Hasarın oluşmasında diğer etkilerin yanında, oksidasyonunda katkıda bulunduğu açıkça görülmüştür. Eğer oksit tabakası kırılabilir ise uygulanan şekil değişimleri neticesinde koruyucu özelliğini yitirmekte ve ortamın etkisi sünek bir oksit tabakasına sahip malzemelerden çok daha fazla olmaktadır.

#### **2.7.3.2. Sıcaklık**

Sabit plastik deformasyon değerleri aralığında malzemenin yorulma özellikleri, artan sıcaklık ile azalmaktadır. Sıcaklığın artırılması ile dislokasyonlar ara boşlukları dolduran bu atomlardan ve karbon atomlarından geçici olarak kurtulsalar da karbon bunlara tekrar difüze olur (yayınır) ve sonunda kilitleme meydana gelir. Artan sıcaklık düzlemsel kaymanın eğilimini artırır ki bu da sonuç olarak daha düzelmiş malzeme yorulma özelliklerini ortaya çıkarır.

### **2.7.3.3. Korozyon**

Makine elemanları, malzemeler yüzeyleri korunmadan havada veya nemli yerlerde saklanırsa, paslanma ve karıncalanma nedeni ile gerilmesiz ön korozyon oluşabilir. Bu nedenle yorulmaya maruz kalacak ve özel bir yüzey koruması uygulanmamış çelik parçaların, depolama sırasında yağ veya gres yardımı ile geçici olarak korunması zorunludur. Sıvı korozif ortamlarda kimyasal inhibitörlerin yardımı ile korozyon yorulması engellenebilir. İnhibitör olarak kromat, sülfat, nitrat v.s. kullanılabilir. Bunların dışında yüzeyde oluşturulan basma iç gerilmeleri de korozyon yorulmasını engeller. Ayrıca yüzey sertleştirme de korozyon yorulmasını azaltır(Anik,1996).

### **2.7.3.4. Radyasyon Etkisi**

Pek çok yapı alaşımına radyasyonun etkisi alaşımın mukavemetini arttırıcı, sünekliğini azaltıcı yöndedir. Ancak bu etki yalnızca birkaç alaşım için yüksek sıcaklıklarda dikkate alınacak boyutlardadır(Anik,1996).

### 3. KAYMALI YATAKLARDA YÜZEY YORULMASI

#### 3.1. Giriş

Beyaz madenler yataklama özellikleri nedeniyle endüstride yatak malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yataklarda ortaya çıkan zorlanma hali çok kere değişken (dinamik) bir zorlanma olduğundan, bunun sonucu olarak yatak yüzeyinde kılcal çatlaklar oluşabilmektedir. Yatakta yüzey yorulması olarak adlandırılan bu olay genellikle yüksek gerilme yığılmalarının bulunduğu noktalarda bir kılcal çatlama şeklinde başlar ve ilerleyen kılcal çatlaklar arasında kalan yatak alaşımları zarf yüzeyinden koparak uzaklaşırlar.

Yüzey üzerinde, belli noktalarda, çeşitli nedenlerden ötürü ortaya çıkan gerilme yığılmaları, ilk kılcal çatlamalara sebep olmaktadır. Oluşan kılcal çatlaklar önce yatak alaşımı kalınlığı boyunca çelik zarf yüzeyine erişinceye kadar ilerler. Bundan sonra çatlak yön değiştirerek alaşım, zarf ortak yüzeyi boyunca çelik zarf üzerinde ince bir alaşım tabakası bırakarak, ikinci bir çatlakla karşılaşınca kadar ilerler. Bu şekilde çatlaklar arasında kalan malzeme adacığı koparak yağlayıcı içinde sürüklenir veya yüzeyler arasında ezilir. Bazen de başka bir noktada yüzeylerden birine kayar. Yatak yüzeyinden kopan malzemenin bıraktığı boşluk yağ filmi oluşmasını ve basınç dağılımını tedirgin ettiğinden yatağın yük taşıma kapasitesi düşer, film kalınlığı azalır, sıcaklık yükselir, yağlayıcının viskozitesi düşer. Birbirine bağlı olarak zincirleme gelişen kötü koşullar, sıcaklığın malzemenin dayanabileceği sınırın üstüne çıkmasına veya metalin metale değmesiyle birlikte yatağın tamamen görev yapamaz duruma gelmesine neden olur(Hacıfazlıoğlu, 1996, Bıyıklıoğlu, 1986).

#### 3.2.Yüzey Yorulması Nedenleri ve Gerilme Kaynakları

Lang ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmalarında; birbirinin aynı olan yatakları değişik dinamik yükler (bir eksen doğrultusunda sinüzoidal olarak tam değişken, titreşimli yük ve çevresel olarak dönen merkezkaç kuvvet etkisi) altında denemişler

ve yatak yüzeyinde oluşan salt mekanik yorulma dışında bölgesel aşırı ısınmalar, basınç yığılmaları, malzemenin ısıl özellikleri ve korozyon direncinin önemine dikkat çekmekte, yatak yüzeyinde oluşan yorulma çatlaklarının ise (çevresel dönen yük hariç) ana yük bölgesinde olduğunu belirtmişlerdir.

Hirano ve Goto yorulma probleminin karmaşıklığını vurguladıktan sonra, yatak alaşım kalınlığı ve radyal boşluğun yanı sıra değişken yük ve hızdan ötürü ortaya çıkan sürtünme kuvvetlerinin etkili olduğunu ileri sürmektedir. Buna karşın bazı araştırmacılar ise yorulma başlangıcını, baskı gerilmeleri ve bölgesel eğilme gerilmelerine bağlamaktadırlar. Beyaz madenin mekanik özelliklerinin artan sıcaklıkla değişmesiyle, farklı ısıl genleşmelerden ötürü, beyaz madenin akma sınırına denk bir mertebedeki gerilmelerinin ortaya çıkabileceğine işaret etmektedirler(Hacıfazlıoğlu, 1996, Bıyıklıoğlu, 1986)..

Heisel dinamik yük altında çalışan kaymalı yatağın yağlayıcı yağı içerisine belli oranlarda hava karıştırarak yaptığı film basıncı ölçümlerinde, küçük eksantrisite değerlerinde dahi, tepe basınçlarına rastlanabildiğini, bununda yatağın yorulma dayanımını düşürebileceğini belirtmektedir(Hacıfazlıoğlu, 1996, Bıyıklıoğlu, 1986).

Gyde ise yatakta yorulma çatlaklarının oluşumunu yağ filmi kavitasyonunun meydana geldiği noktalarda gerilmelerin periyodik olarak yön değiştirmesine bağlamaktadır. Bu olayı ise şöyle açıklamaktadır. Milin yatak içerisindeki hareketi sırasında yatak yüzeyinden hızla uzaklaştığı an (kavitasyon oluşması) yağ filmi içinde habbecik şeklinde boşluklar oluşur. Normal olarak bir yük periyodu boyunca iki yüzey arasında hacmi değişen bir yağ kaması oluşur. Bu hacmin büyümesi esnasında oluşan boşlukların yağla doldurulması gerekir. Oysa milin uzaklaşma hareketi ani olursa o hızda doldurulma gerçekleşemediğinden yüzeyler sürekli bir yağ filmi ile örtülemez ve yer yer adacıklar kalır. Yağlayıcıdan ayrılan gazlar bu boşlukları doldurmaya zorlanabilir. Yatağın çevresindeki kavitasyonun oluşum bölgesinde yatak yüzeyi yağ ile doldurulamaması nedeniyle bu bölgede oluşmuş yağ adacıklarının temas ettiği yatak yüzeyi baskı gerilmeleri altında iken adacığın

çeperleri çeki gerilmesi altındadır. Yükün periyodik olarak değişmesi nedeniyle kavitasyon bölgesindeki yatak yüzeyinde gerilmelerde çeki ve baskı gerilmeleri olarak değişirler. Yön değiştiren gerilmeler malzeme yüzeyinin bu noktalarda yorulmasına neden olur(Hacıfazlıoğlu, 1996, Bıyıklıoğlu, 1986).

Benzer bir kavitasyon olayının oluşumunun filmi, İngiliz firması Glacier Co. tarafından kendi imal ettikleri saydam bir yatakta çekilmiş ve kavitasyon hep aynı noktalar civarında olduğu görülmüştür.

Gyde çalışmasında denenen yataklarda gerilmenin hep bası gerilmesi olarak kaldığı durumlarda yorulmaya rastlanmadığını ve çalışma sıcaklığının dinamik yükün genliği üzerinde son derece etkili olduğunu göstermektedir. Örneğin çalışma sıcaklığı 140 °C dan 90 °C'a düşürüldüğünde aynı ömür için yükün genliği iki kat büyütülebilmektedir(Hacıfazlıoğlu, 1996, Bıyıklıoğlu, 1986).

Yukarıda özetlenen bilgiler ışığında dinamik yükler altında çalışan yataklarda yorulma çatlaklarına neden olan gerilmeler iki grup altında toplanabilir.

### **3.3.Mekanik Kökenli Gerilmeler**

Yatakta gerilmelerin ortaya çıkmasına neden olan önemli etkenlerden birisi yağ filmi basıncıdır. Yatakta oluşan yağ filmi basıncı etkisi altında radyal doğrultuda bası gerilmeleri, yüksek basınç bölgesi çevresinde ise çeki gerilmeleri oluşur. Dinamik yüklü yataklarda, yükün zamanla değişimi nedeniyle gerilmeler değişken karakter gösterirler. Sürtünme kuvvetlerinin oluşturduğu gerilmeler daha çok sınır yağlama koşullarında önem kazanan gerilme kaynaklarıdır.

Mekanik gerilmelere neden olan diğer bir gerilme kaynağının da yatak zarfının ve yuvasının form rijitliğinin zayıf olması gösterilmektedir. Üzerinde birleşilen diğer bir

husus taşıyıcı kabuk üzerindeki yatak alaşımı kalınlığı azaldıkça yorulma direncinin arttığıdır.

### 3.4. Sıcaklığın Oluşturduğu Isıl Gerilmeler

Kaymalı yatakların yük taşımaları sırasında yatakta ortaya çıkan sıcaklık nedeniyle yatak alaşımının fiziksel özellikleri kötüleşmekte ve bunun neticesi olarak yatağın yorulma ömrü azalmaktadır.

Thompson, Kenneford ve Seager, 0,5 mm kalınlığında dikdörtgen şeklindeki çelik şeritler üzerine özel kalıplar içinde ve 400 °C da 4,3 mm kalınlığında beyaz maden dökerek elde ettikleri deney parçalarını soğumaya terk ettiklerinde parçaların gözle görülür bir şekilde eğilmiş olduklarını gördüler. Eğilme beyaz maden iç bükey tarafta kalacak şekilde olmuştur. Bu da yatak alaşımı üzerindeki gerilmenin çeki gerilmesi olduğunu gösterir. Eğilen şeridin eğrilik yarıçapı (1680 mm) ölçülerek yapılan hesaplarda çeki gerilmesinin  $86 \text{ N/mm}^2$  ye ulaştığı görülmüştür. Gerilmelerin nedeni iki malzemenin farklı ısıl genleşme özelliklerine sahip olmaları olduğundan, deneyler farklı zarf ve yatak malzemeleri için sürdürülmüş genleşme özellikleri birbirine yakın malzemeler kullanıldığında (Alüminyum–Beyaz maden) ısıl gerilmelerin küçüldüğü gözlenmiştir. Bu araştırmacılar, çeki gerilmeleri çalışma esnasında mil vurması ve yağ filmi basıncından doğan değişken baskı gerilmeleriyle birlikte bulunduğu zaman yorulma çatlamlarının ortaya çıkacağı görüşündedirler. Mac Naughton herhangi bir yolla alaşım üzerindeki çeki gerilmeleri büyütüldüğünde, aynı koşullarda yorulmanın hızlandığını göstererek yukarıdaki görüşü güçlendirmiştir. Russel sıcaklığın bölgesel olarak değişmesiyle iç gerilmelerin önemli boyutlara ulaşabileceğini söylemekte, Boas ve Honey – Combe ise kalay kadmiyum ve çinko malzemelerin hiç yüklenmeden sadece periyodik olarak 30 – 150 °C arasında ısıtılıp soğutulmuş çatlatabileceklerini belirtmektedir. Isıl yorulma adı verilen bu olayda da gerilme kaynağının yine farklı genleşmeler olduğu savunulmuştur.

İbrahim ve Mccollion, kuramsal çalışmalarında, göz önüne aldıkları bir yatak modeli boyunca gerilme dağılımını;

- a) Yağ filmi basıncından,
- b) Yatağın yuva tarafından sıkıştırılması ve yuvanın hatalı oluşundan,
- c) Sıcaklık gradyanı ve farklı ısıl genleşmelerden doğan koşullar için ayrı ayrı belirlemişlerdir.

Alınan sonuçların karşılaştırılmasından yüzey yorulmasına yol açabilecek gerilmelerin büyüklük olarak en önemlilerinin yuva rijitliğinin yetersizliğinden ve farklı ısıl genleşmelerden ötürü ortaya çıkan gerilmeler olduğu görülmektedir. Ele alınan modelde gerilmelerin sıfır olduğu varsayılan başlangıç noktasından alınarak 100 °C ısıtıldığı düşünülmektedir. Daha büyük ısıl genleşme katsayısına sahip beyaz maden çeliğe göre daha fazla genleşmekte, bunun sonucu olarak beyaz maden bası çelikte çeki gerilmeleri doğmaktadır. En büyük bası gerilmeleri orta eksen üzerinde, en büyük çeki gerilmeleri kenarlarda ve en büyük kayma gerilmeleri orta yüzey üzerinde serbest kenarlara yakın yerlerde bulunmuştur.

Sıcaklığın yorulma ömrü üzerinde etkili bir parametre olduğundan hiç kuşku yoktur. Sıcaklığın periyodik olarak değişmesiyle birlikte gerilmelerin yön değiştirmesi söz konusu olabildiğinden yorulma için en elverişli ortam doğmuş olur(Hacıfazlıoğlu, 1996, Bıyıklıoğlu, 1986).

#### 4. KAYNAK ÖZETLERİ

Sinter bronz kaymalı yataklar 1930'lerden bu yana kullanılmalarına rağmen, bu yataklar hakkında, son 50 yıl içinde önemli araştırmalar yapılmıştır. Sinter kaymalı yatak üretiminde zararlı parametrelerin belirlenmesi ve önceden giderilmesi, hatasız yatakların üretimini sağlamıştır. Tane boyutu ve tane dağılımı, yağ emdirme metodu, PV faktörü, boyut toleransları, yüzey bitirme işlemleri, vb. faktörler, yatakların kalitesini ve aşınma özelliklerini etkileyen birincil etkenler olduğu için bu konularda yapılan araştırmalar önem kazanmıştır.

Yalçın vd (2004) yük ve hız sabit kalmak şartı ise Toz Metal esaslı yataklarda aşınmanın yola bağımlı olduğunu, yük sabit kaldığında aşınmanın hız ile artığını belirtmektedirler.

Sarıtaş (2003) Toz metal çeliklerin yorulma özelliklerini incelemiş ve yorulma özelliklerini en etkili sınırlayıcının gözenekler olduğunu belirtmiştir. Ayrıca yorulma özelliklerini geliştirmek için amaç yoğunluğu artırmak olduğunu belirtmektedir.

Durak (2003) yaptığı çalışmada Toz Metalurjisi esaslı sinter bronz yataklardaki sürtünme katsayısının sabit yükte titreşimli yüklemeye göre daha stabil olduğunu, baz yağlı numunelere göre diğer formüle edilmiş yağların daha iyi sürtünme ve aşınma özellikleri gösterdiğini deneysel olarak elde etmiştir.

Tüfekci (2003), yaptığı yüksek lisans çalışmasında Toz Metalurjisi esaslı yatakları ile oda sıcaklığında yaptığı deneylerde, PV değerinin bronz burçlar için 78 MPa m/d, demir esaslı burçlar için 52 MPa m/d olduğu durumda en düşük sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Bu değerlerin üzerine çıkıldığında ise sürtünme katsayılarının artışa geçtiği belirlenmiştir. Eğer yüksek PV değerlerde çalışılması gerekiyorsa burçlara dışarıdan yağ takviyesi yapılması gerektiği düşünölmektedir.



Kurbanoglu vd. (2001), değişken yüklü Toz Metalurjisi esaslı radyal kaymalı yatakta oluşan sürtünme kuvvetini ölçebilen ve elde edilen verileri bilgisayara aktarabilen bir deney düzeneği gerçekleştirmişlerdir. Söz konusu deney seti ile Toz Metalurjisi esaslı yatakların aşınma ve sürtünme gibi tribolojik özelliklerine yağın ve yağ katıklarının, yağ debisinin, yağ sıcaklığının, yağ besleme basıncının, yükün ve mil hızı gibi faktörlerin etkisini incelemek mümkün olmaktadır, yaptıkları ilk deneylerde, 200N'luk yatak kuvvetinde sinter bronz yatakların sıvı sürtünme bölgesinde çalıştığını bulmuşlardır.

Varol (2001), yaptığı çalışmada Toz Metalurjisi yöntemiyle üretilen %85 yoğunluğa sahip bronz ve demir esaslı kendi kendini yağlayan yatakların aşınma özelliklerini, farklı hız ve yükleme şartlarında incelemiştir. Demir ve bronz esaslı Toz Metalurjisi yataklar için çevresel hız sabit tutulduğunda, yatak yükü büyüdükçe yağa bağlı olarak aşınma miktarının arttığını, 25 N'luk yük için demir esaslı Toz Metalurjisi yatakların aşınma miktarının bronz Toz Metalurjisi yataklardan daha fazla olduğunu bulmuştur.

Tunay (2001), yaptığı yüksek lisans çalışmasında Toz Metalurjisi esaslı sinter bronz yatakların tribolojik özelliklerini tam değişken gerilme altında deneysel olarak incelemiştir. Hem sürtünme hem de aşınma deneylerinde Toz Metalurjisi esaslı kendinden yağlamalı sinter bronz yataklarda, dışarıdan yağ beslemesi yapılmadığı durumlarda düşük sürtünme katsayıları tespit etmiştir.

Krisnalcant vd. (1998), premix Nu-bronzunu ile premix bronzların sinterlemesinde, sinterleme parametrelerinin mikro yapıyı nasıl etkilediğini ve bu malzemelerde çentik faktörünü incelemiştir. Çalışmalarında Nu-bronzunda üretilen sinter yataklarda çentik faktörünün % 15-45 oranında yüksek çıktığını ve sinterleme süresinin artması ile yapıdaki  $\alpha$  fazında artmanın görüldüğünü belirlemiştir.

Arslan vd. (1996), yaptıkları çalışmalarında, toz metal bronz yatak imalinde premix toz, saf kalay ve ön alaşımlı kalay (Cu-Sn<sub>3</sub>) tozları kullanılarak imal edilen bronz yataklarda presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresinin, yatak özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Presleme basıncının artması ile ham yoğunluk ve radyal kırılma dayanımının arttığı; ön alaşımlı kalay tozu kullanılan bronz yataklarda kırılma dayanımının önemli ölçüde yüksek olduğu ve tüm numunelerde 810°C civarındaki sıcaklıklarda yapılan sinterlemenin ani boyut değişimine yol açtığı; ön alaşımlı kalay tozunun kullanıldığı bronz yataklarda bu tane irileşmesinin daha belirgin olduğunu gözlemişlerdir.

Kurt vd. (1996), kendinden yağlamalı bronz ve bakır yatakların aşınma davranışlarını belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmada bronz ve bakır tozlarından iki grup yatak üretmişlerdir. Ham ve sinterlenmiş yoğunlukları tespit edilen yataklara St50 çeliğinde yapılan aşındırıcı mil ve dik üzerinde aşındırılmıştır. Deneyler sonucu belli bir sıkıştırma basıncına kadar, bronz yatakların bakır yataklardan, yağ emdirilmiş yatakların, yağ emdirilmemiş yataklardan daha iyi aşınma davranışı gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Haşhımato ve Kaneko (1995), %90 Cu-%8 Sn-%2 C kompozisyonundaki bronz yatakların statik yük altında karışık ve hidrodinamik yağlama şartlarında sürtünme parametresi olan  $\mu$  ile yağlama literatüründe yaygın kullanılan Sommerfeld sayısı ile değişimini incelemiştir. Deneyleri, basınçlı yağ ortamında ve düşük PV şartlarında gerçekleştirmişlerdir. Hidrodinamik yağlamada Sommerfeld sayısı ile birlikte karışık sürtünme bölgesinde düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Deney sonuçları ile teorik hesaplama sonuçları çok yakın bulunmuştur.

Kurt, (1992) Bronz yatakların üretim parametreleri ve aşınma özellikleri üzerine bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada, toz metal bronz yataklar ile tam yoğun bronz yatakların, aşınma ve mekanik özelliklerini karşılaştırmış ve sonuçta toz metal bronz yatakların aşınma özelliklerin, tam yoğun bronz yataklara nazaran daha iyi olduğunu belirlemiştir.

Kurt vd. (1992), toz metal bronz yatak malzemelerin özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada bronz tozundan üretilen kendi kendini yağlayan yatak malzemelerinin üretimi gerçekleştirilmiş ve mekanik-tribolojik özellikleri incelenmiştir. Malzemelerden hazırlanan aşınma numuneleri pim-disk tipi aşınma deney setinde test edilmiştir. Çalışmanın son kısmında, toz metal bronz yatak malzemeleri eşdeğer döküm bronzu ile karşılaştırılmış ve aşınma davranışının daha üstün olduğu görülmüştür.

Backensto (1988), premix bronz tozlardaki, Cu (bakır) ve Sn (kalay) tane büyüklüğünün ve kullanılan katı yağlayıcı cinsinin, sinterleme sonrası boyut değişimini nasıl etkilediğini incelemiştir.

Murali vd. (1988), elektrolitik ve atomizasyon yoluyla üretilmiş bronz numunelere pim-disk deney setinde aşınma deneyleri uygulamışlardır. Yağlayıcı olarak kullanılan sentetik grafitin,  $MOS_2$  kullanılan yataklara göre aşınmasının üç kat daha az olduğunu belirlemiştir.

Bose vd. (1984) yaptıkları çalışmalarında, bronz yatakların vakum sinterlemesinde, sinterleme parametrelerinin ve ham yoğunluğunun, sinterleme sonrası porozitenin dağılımını nasıl etkilediğini belirlemiştir.

Cenk (1983), kalay içerisine eklenen nikelin etkilerini araştırmıştır. Yüksek mukavemetli kaymalı yataklarda düşük işlem sıcaklıklarının ve daha iyi PV değerlerinin elde edilmesinde nikel ilavesinin etkisini incelemiştir.

Cusano vd. (1973), yaptıkları çalışmada kendinden yağlamalı gözenekli yatakların tribolojik özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Farklı basınç ve hızlarda yaptıkları deneylerde PV değerinin 33000 psi ft/min değerlerinde en düşük sürtünme katsayısını elde etmişlerdir. PV=50000 psi ft/min değerinde ise yatağın kendi bünyesinde bulunan yağın yağlama işlemi için yeterli olmadığını görmüşlerdir.

## 5. MATERYAL VE METOD

### 5.1. Deney Setinin Özellikleri

Radyal kaymalı yatakların sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı, aşınma gibi tribolojik özelliklerinin araştırılması için tasarlanıp imal edilen deney seti Şekil 5.1'de gösterilmiştir(Tunay, 2001, Aslan, 2001, Tüfekci, 2002).

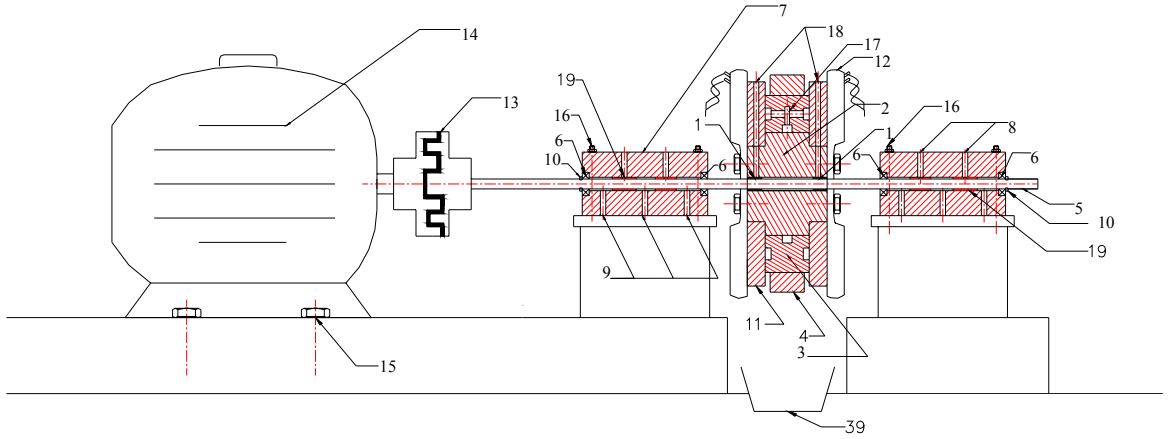


Şekil 5.1. Deney setinden genel bir görünüş

Deney setinde, kaymalı yatakların tribolojik özelliklerine etki eden, yatak yükü, ortam sıcaklığı, çalışma hızı, yağlama hızı gibi parametreler belirli sınır değerleri arasında istenildiği gibi değiştirilebilmektedir.

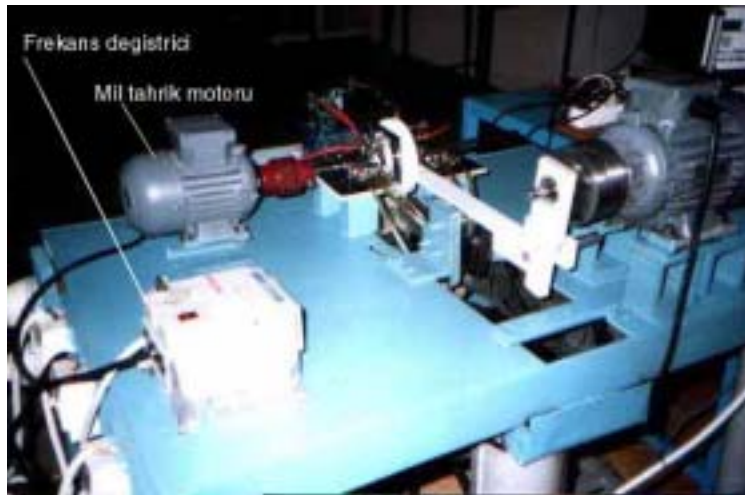
Şekil 5.2'de deney setinin mil eksenine boyunca enine kesiti gösterilmektedir. Deney mili(5) SAE 1050 malzemesinde hassas taşlanarak imal edilmiştir. Deney milini direkt olarak tahrik eden 0.9 kW güç ve 1400 d/d hıza sahip elektrik motoru(14) zemine civatarla tespit edilmiştir(15). Milin(5), mil tahrik motorunda(14) oluşacak titreşimlerden etkilenmemesi veya en az seviyede etkilenmesi için birbirlerine elastik

kavrama(13) ile bağlanmıştır. Mil tahrik motorunun devri, Şekil 5.3’de gösterilen Schneider marka frekans değiştirici ile 0-1400 d/d aralığında istenilen bir değerde sabitlenebilmektedir. Frekans değiştirme ayarı ile mil devri bir takometre yardımıyla kalibre edilmiştir.

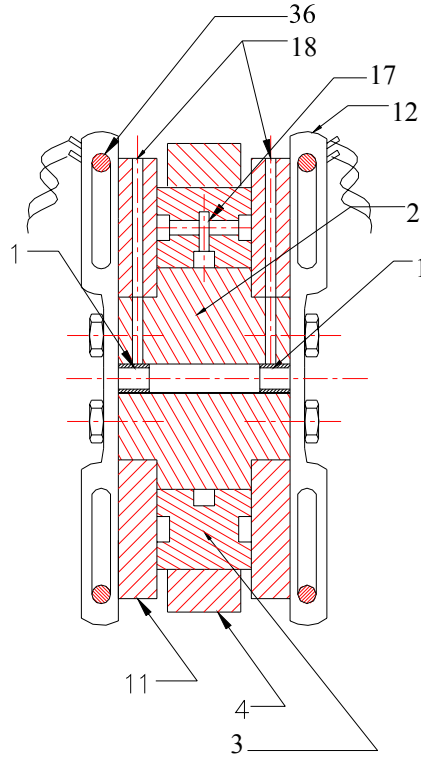


- |  |                                 |                                       |
|--|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1- Test yatağı                           | 2- Yatak kepi                   | 3- Yükleme bileziği                   |
| 4- Yükleme kolu                          | 5- Mil ( $\phi 12$ )            | 6- O-ring (40171)                     |
| 7- Destek yatak gövdesi                  | 8- Destek yatağı yağ girişleri  | 9- Destek yatağı yağ çıkışları        |
| 10- Segman                               | 11- Kuvvet ölçüm diskleri       | 12- Isıtıcılar                        |
| 13- Elastik kavrama                      | 14- Deneysel mili tahrik motoru | 15- T. Motoru tespit civataları (M14) |
| 16- Destek yatağı tespit civataları (M6) | 17- Squeeze film yağ kanalları  | 18- Sıcaklık ölçüm kanalları          |
| 19- Destek yatağı bronz burcları         | 36- Resistanslar                | 39- Yağ toplama kabı                  |

Şekil 5.2. Deney düzeneğinin kesit resmi (Tüfekci, 2002)



Şekil 5.3. Frekans değiştirici ve mil tahrik motoru (Tüfekci, 2002)



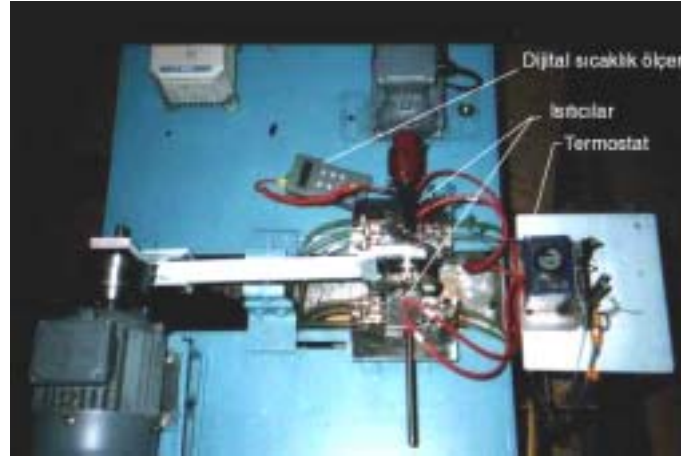
Şekil 5.4. Yatak ana gövdesi (Tüfekci, 2002)

Mili her iki taraftan destekleyen, yatağı besleyen iki yağ giriş(8) ve yatak bölgesinden yağları tahliye eden üç yağ çıkış(9) kanalına sahip destek yatak gövdelerinin(7) içerisine ikişer adet bronz burç(19) yerleştirilmiştir. Bu burçlar, aşınma ve sıcaklık artışlarının engellenmesi için sürekli yağlanmaktadır. Çıkış kanalından alınan yağ, bir toplama kabına(39) alınarak hidrolik donanım sistemine gönderilmektedir. Destek yataklarının her iki tarafına, yağ sızmalarını önlemek amacıyla O-ring'ler(6) yerleştirilmiştir. Ayrıca deney miline, destek yatağına giriş ve çıkış noktasında segman kanalları açılmış olup bu kanallara, çalışma sırasında milin aksel olarak yer değiştirmesini engellemek için segmanlar(10) yerleştirilmiştir.

Ana gövde, içerisine gözenekli test yataklarının yerleştirildiği yatak kepi(2), yükleme bileziği(3) ve yatak kepine sıkı geçirilen iki adet kuvvet ölçüm diskinden(11) meydana gelmiştir. Yükleme bileziği(3), yükleme kolundan(4) gelen

normal kuvvetin, sıkışan yağ filmi tabakası üzerinden test yataklarına iletilmesini sağlar. Sıkışan yağ filmi oluşturmak için yükleme bileziğinin iç ve yan yüzeylerine yağ kanalları açılmıştır. Kuvvet ölçüm diskleri ve yatak kepine açılan 3 mm derinliğindeki kanallara(18), dijital sıcaklık ölçüm cihazının termokulp uçları sokularak yatak sıcaklıklarını takip etmek mümkün olmaktadır.

Deney yataklarının bulunduğu ortamı ısıtmak için içerisine rezistanlar(36) yerleştirilmiş, 1200W ısıtma gücüne sahip kapalı kalıplı ısıtıcılar (12) kullanılmıştır. M5 civatalarla yatak kepine tespit edilen bu ısıtıcılar  $\pm 2$  °C hassasiyetli 0-160 °C aralığında çalışan bir termostat ile kontrol edilmektedir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Isıtıcılar, termostat ve dijital sıcaklık ölçer (Tüfekci, 2002).

Destek yatakları ve sıkışan yağ filmi için gereken yağ, hidrolik donanım sisteminden sağlanmaktadır (Şekil 5.6). Hidrolik donanım sistemi beş litre kapasiteli bir yağ deposu, 1.5 kW gücünde 1390 d/d hızlı AC elektrik motoru, 16 litre/dakika debili bir dişli pompa, filtre ve debi ayar vanalarından meydana gelmektedir.

## 5.2. Sürtünme Kuvvetinin Ölçülmesi

Sürtünme kuvvetinin ölçülmesi için tasarlanan sistem Şekil 5.7’de verilmektedir. Sistem çalışmaya başlayıp, Şekil 5.7’deki gibi  $F_n$  kuvveti uygulandığında mil ile test yatağı arasında sürtünme kuvveti ( $F_s$ ) meydana gelir.  $F_s$  kuvveti, yatakla(1) birlikte yatak kepini(2) ve bunlara rijit bağlı kuvvet ölçüm diskini(3) milin dönme yönünde



Şekil 5.6. Hidrolik donanım sistem (Tüfekci, 2002).

harekete zorlamaktadır. Kuvvet ölçüm diskisi ince bir tel(40) ile yay çeliği malzemesinden yapılmış ölçüm plakasına(41) bağlanmıştır. Mil ile yatak arasında oluşan sürtünme kuvveti bu tel üzerinde “F<sub>ç</sub>” ile isimlendirilen bir kuvvetin doğmasına neden olur. F<sub>ç</sub> kuvveti ölçüm plakasını, dolayısıyla ölçüm plakasına yapıştırılmış strain-gaugeleri(42) eğmeye çalışır. Strain-gaugelerdeki birim şekil değiştirme miktarı (ε), strain-gauge indikatöründen (Şekil 5.8) mili-volt (mV) cinsinden okunur. Şekil 5.9’da ölçüm plakasına uygulanan kuvvet ile strain-gauge indikatöründen okunan ε değerleri arasındaki doğrusal ilişki gösterilmiştir. İndikatörden okunan ε değerleri “12 bitlik AD-DA” bir kart (Şekil 5.8) vasıtasıyla bilgisayara çok kısa zaman aralıklarında aktarılabilmektedir.

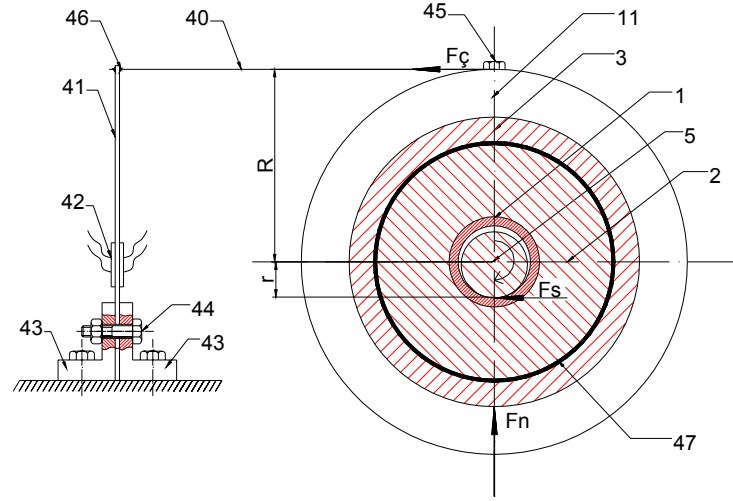
F<sub>ç</sub> ve F<sub>s</sub> kuvvetlerinin milin merkezine göre oluşturdukları momentler eşit olacağından;

$$M_{ç}=M_s \Rightarrow F_{ç} \cdot R=F_s \cdot r \Rightarrow F_s = \frac{F_{ç} \cdot R}{r} \quad (5.1)$$

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (5.2)$$

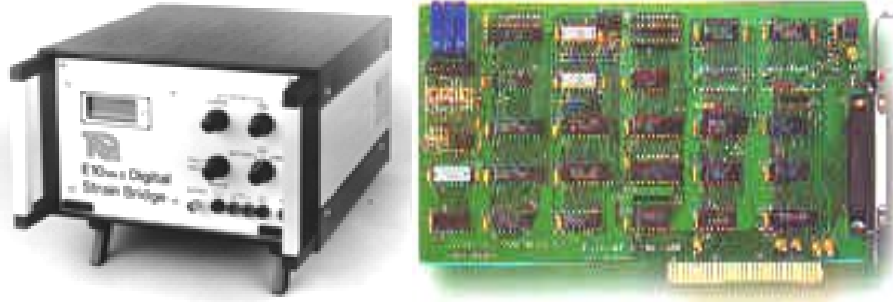
Bağıntıları ile sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı hesaplanmaktadır.



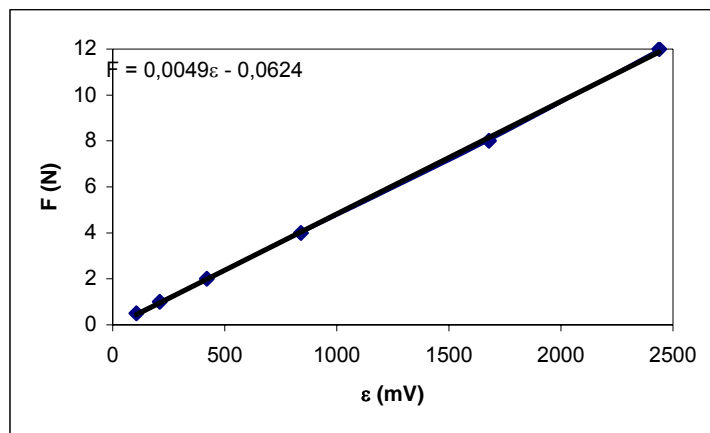


- 40- Çektirme teli                      41- Ölçüm plakası                      42- Strain-gauge  
 43- L profilli destekler              44- Ölçüm plakası tespit civatası    45- Çektirme teli tespit civatası  
 46- Yapıştırma bağlantısı           47- Sıkışan yağ filmi

Şekil 5.7. Sürtünme kuvveti ölçüm sistemi



Şekil 5.8. Strain-gauge indikatarü ve 12 bit AD-DA kart

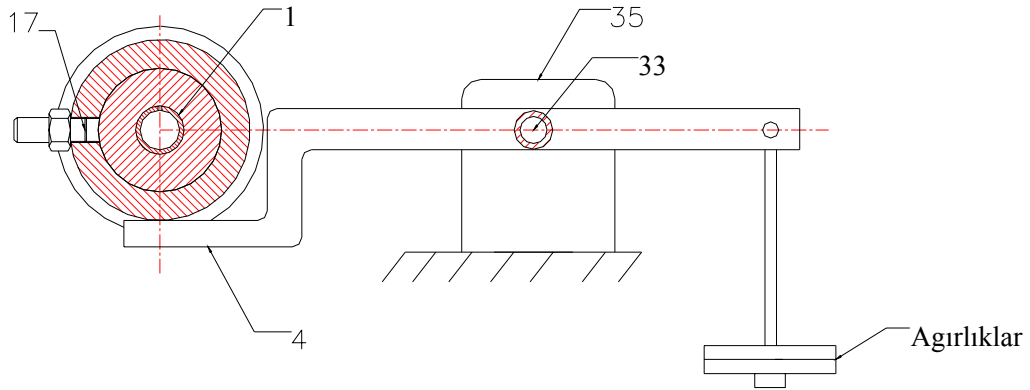


Şekil 5.9. Sürtünme kuvvetinin ölçümünde kullanılan kalibrasyon eğrisi

Sürtünme kuvvetinin doğru ölçülebilmesi için, uygulanan  $F_n$  kuvvetinin yükleme bileziği(3) ile yatak kepini(2) bloke etmemesi gereklidir. Bunun için; yüzeyleri hassas taşlanmış yatak kepi ile yükleme bileziği ve kuvvet ölçüm diskleri arasında 0.04 mm kalınlığında sıkışan yağ film tabakası oluşturmak üzere basıncılı yağ gönderilmektedir.

### 5.3. Yükleme Sistemi

Kullanılan deney seti vasıtasıyla kaymalı yataklar üzerine statik veya dinamik yükleme yapmak mümkün olmaktadır. Statik yük şekil 5.10'da gösterildiği gibi yükleme kolu(4) üzerine ağırlıklar asmak suretiyle uygulanmaktadır. Asılan bu ağırlıkların test yatakları üzerinde oluşturduğu yatak kuvveti basit manivela bağlantısından hesaplanabilir.



1- Test yatağı  
33- Perno

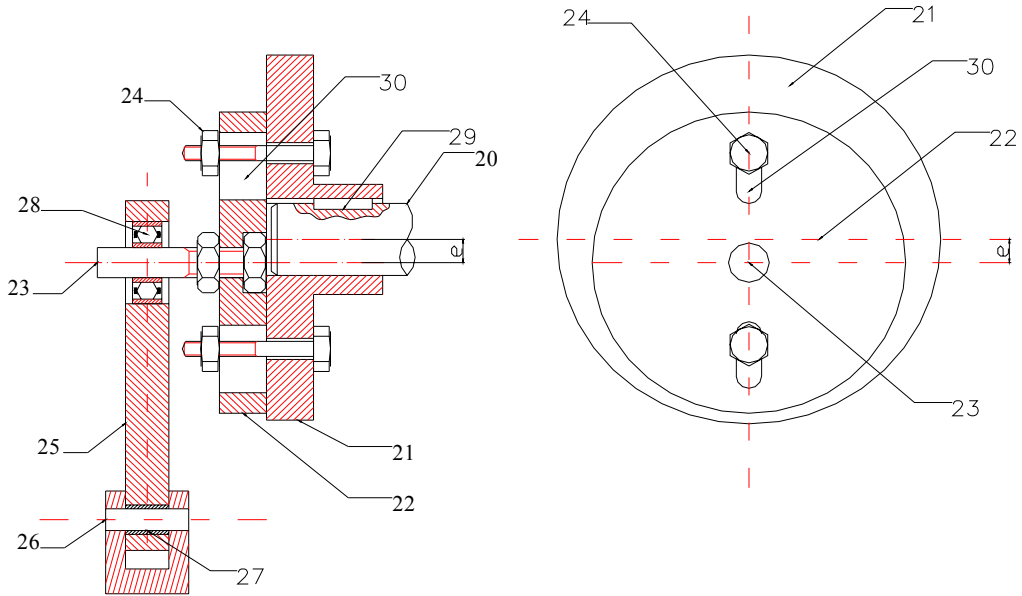
4- Sabit yükleme kolu  
35- Yükleme çubuğu destek plakaları

17- Squeeze film yağ kanalları

Şekil 5.10. Statik yükün uygulanması (Tüfekci, 2002)

Yataklar üzerine dinamik yük uygulayabilmek için bir eksantrik kavrama(Kurbanoğlu, 1997) imal edilmiştir. Eksantrik kavrama; eksantrik disk(22),

destek diski(21) ve öngerilmeli civatalardan (24) meydana gelmektedir. Destek diski(21), yükleme motoru miline(20) bir feder (29) ile bağlanmıştır. Üzerine eksantrik ayar kanalları(30) açılmış olan eksantrik disk, destek diskine iki adet eksantrik ayar civatasıyla(24) tespit edilmiştir. Destek diski ile eksantrik diskinin merkezleri arasındaki mesafe “e” ile gösterilmiş olup dinamik yükün büyüklüğü “e” mesafesi ayarlanarak değiştirilebilir (Şekil 5.11). Yatak üzerine uygulanması gereken yükün büyüklüğüne göre, kalibrasyonu Şekil 5.12’de verilen “eksantriklik mesafesi-yatak kuvveti” arasındaki bağıntıya bağlı olarak “e” mesafesi tayin edilir. Sistemde “e” mesafesi 0-15 mm arasında istenilen bir değere ayarlanabilmektedir (Tüfekci, 2002).



20- Yükleme motoru mili  
23- Yükleme pimi ( $\phi 16$ )  
26- Perno ( $\phi 16$ )  
29- Feder

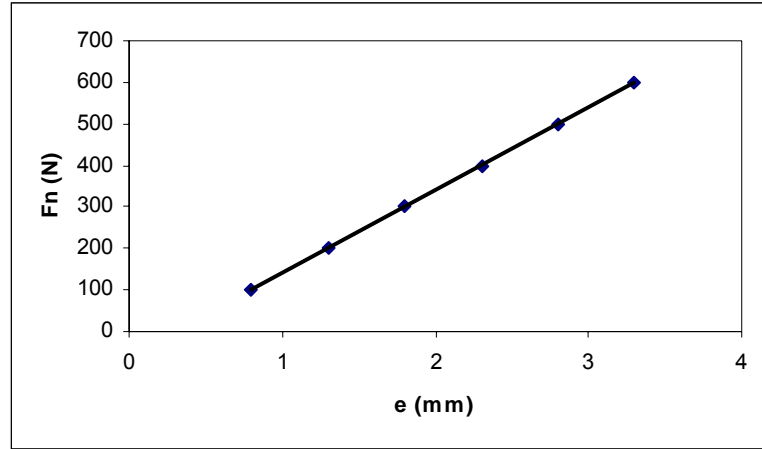
21- Destek diski  
24- Eksantrik ayar civataları (M8)  
27- Bronz burç  
30- Eksantrik ayar kanalı

22- Eksantrik disk  
25- Eksantrik yükleme kolu  
28- Rulman (830702)

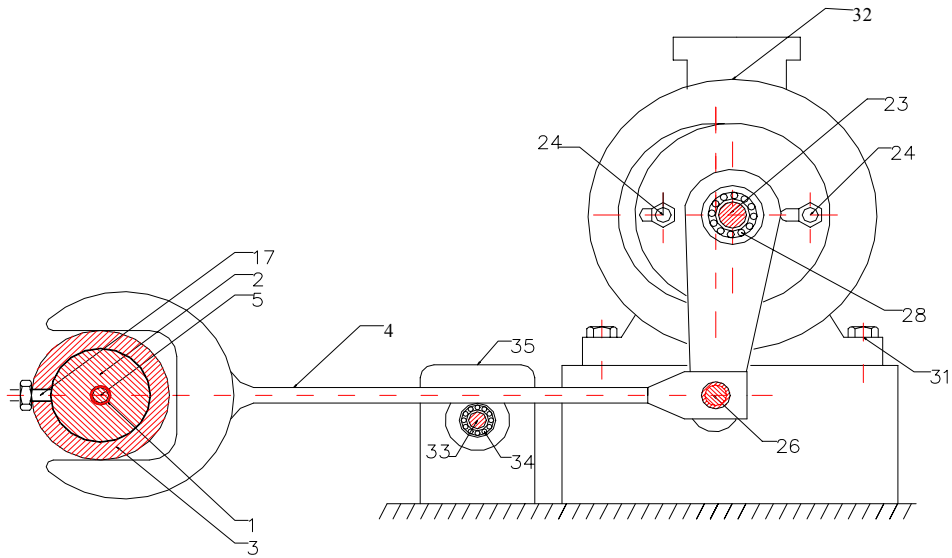
Şekil 5.11. Dinamik yükün değiştirilmesi (Tüfekci, 2002)

Yükleme sisteminin tamamı Şekil 5.13’de gösterilmiştir. Yükleme piminin(23) bir ucu eksantrik diske rijit olarak bağlanmıştır. Diğer ucu ise; bir yuvarlanmalı yatağın(28) iç bileziğine sıkı geçirilmiştir. Yuvarlanmalı yatağın(28) dış bileziği ise eksantrik yükleme(25) koluna sıkı geçmektedir. 1380 d/d hız ve 1.1 kW güce sahip

yük tahrik motoru(32) çalıştırıldığında oluşan moment, destek diski(21) ve eksantrik disk(22) üzerinden yükleme pimine(23) iletilir.



Şekil 5.12. Eksantriklik mesafesi “e” ile yatağa uygulanan  $F_n$  kuvvetine ait kalibrasyon eğrisi



- |                                 |                                       |  |
|---------------------------------|---------------------------------------|--|
| 1- Test yatağı                  | 2- Yatak kepi                         | 3- Yükleme bileziği                    |
| 4- Yükleme kolu                 | 5- Deney mili ( $\phi 12$ )           | 17- Squeeze yağ kanalları              |
| 23- Yükleme pimi ( $\phi 16$ )  | 24- Eksantrik ayar civataları (M8)    | 26- Perno ( $\phi 16$ )                |
| 28- Yuvarlanmalı yatak (830702) | 31- Y. Motoru tespit civataları (M16) | 32- Yükleme motoru                     |
| 33- Perno ( $\phi 16$ )         | 34- Yuvarlanmalı yatak (830702)       | 35- Yükleme kolu destekleri (L profil) |

Şekil 5.13. Dinamik yükün uygulanması (Tüfekci, 2002)

Yükleme pimi, mil merkezleri arasındaki “e” eksantrikliğinden dolayı yükleme motoru milinin merkezi etrafında e yarıçaplı bir yörünge üzerinde dairesel harekete

zorlanır. Bu hareket; piston-biyel mekanizmalarında olduğu gibi, eksantrik yüklem kolunu(25) yüklem koluna(4) bağlayan pernoyu (26) yukarı-aşağı yönde öteleme hareketine zorlayarak test yatakları üzerinde tam değişken gerilmeyi oluşturur. Tam değişken gerilme oluşturmak için imal edilen ve Şekil 5.13.'de gösterilen yüklem kolu(4) L profilli plakalar(35) arasında boşluksuz olarak mesnetlenmiştir. Şekil 5.13.'de (4) ile gösterilen yüklem kolunu, statik yük uygulamak için imal edilen ve Şekil 5.11.'de (4) ile gösterilen yüklem kolu ile değiştirilerek sistemin titreşimli yük altında çalışması da sağlanabilir.

#### 5.4. Test Yatağı

Deneylerde yatak malzemesi olarak Toz Metalurjisi yöntemiyle genel amaçlar için üretilmiş bronz esaslı burçlar kullanılmıştır. Bronz burçlar  $6.8 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahiptir. Deneyler boyunca yataklara yağ beslemesi yapılmamıştır. Yataklara emdirilen yağın viskozite indeksi 105,  $38^\circ\text{C}$ 'deki viskozitesi 400 st,  $99^\circ\text{C}$ 'deki viskozitesi 60st, parlama noktası  $240^\circ\text{C}$ 'dir. Test yataklarına ve deney miline ait diğer bazı özellikler Çizelge 5.1'de verilmiştir (Tüfekci, 2002).

Çizelge 5.1. Test yatağı ve milinin bazı özellikleri

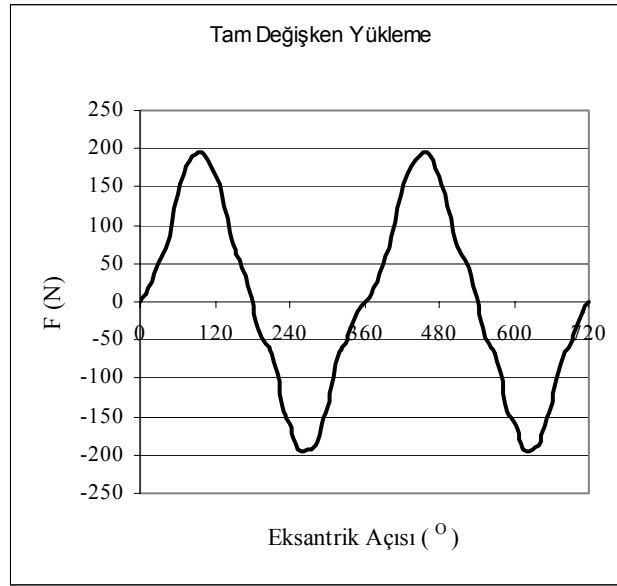
Yatak iç ve dış çapları, yatak genişliği	12,013 mm, 15 mm, 12 mm
Mil çapı	12 mm
Deney öncesi Bronz yatak yüzey pürüzlülüğü ( $R_a, R_{max}, R_z$ )	2.6, 19.6, 14.6
Deney sonrası Bronz yatak yüzey pürüzlülüğü ( $R_a, R_{max}, R_z$ )	1.2, 9.5, 10.6
Demir esaslı yatak yüzey sertliği	HRC15
Mil yüzey pürüzlülüğü (Çevresel) ( $R_a, R_{max}, R_z$ )	0,2, 4.3, 1.0
Mil yüzey pürüzlülüğü (Eksenel) ( $R_a, R_{max}, R_z$ )	0,5, 3.7, 3.1
Mil yüzey sertliği	HRC22

## 6. ARAŞTIRMA BULGULARI

Deneyleerde toz metal teknolojisini ile üretilmiş bronz esaslı ticari olarak piyasada satılan yataklar kullanılmıştır. Deneyleerde kullanılan yataklar elektrik motorlarında, küçük gıda ve tarım makinalarında özellikle öteleme hareketini yapan konstrüksiyonlarda yatak elemanı olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu yataklar uygulamada değişken yüklerle yüklenmektedir. Bu nedenle toz metal esaslı yatakların değişken yük altında sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı, aşınma gibi tribolojik özellikleri ile yorulma özelliklerinin araştırılması oldukça büyük öneme sahiptir.

Deneyleerde test yataklarına dışarıdan yağ beslemesi yapılmamıştır. Yani yataklarda üretim sırasında emdirilen yağlar ile yağlama gerçekleştirilmiştir. Her deneyde daha stabil bir çalışma performansı için, yatak kepi içerisine iki adet yatak (burç) yerleştirilmiş ve yatak basınçları bu durum göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Deneyleer oda sıcaklığında (yaklaşık 25-28 °C ) gerçekleştirilmiştir. Yatak test yükleri olarak  $\pm 250$  N,  $\pm 350$  N ve  $\pm 200$  N, mil devir sayıları 830 d/d, 1000 d/d, 1200 d/d olarak seçilmiştir. Yatak yükleme tipi tam değişken formunda olup örnek yatak yükü ve değişimi Şekil 6.1.'de verilmektedir. Sürtünme kuvvetleri ve katsayılarını, aşınma miktarlarını belirlemek için yapılan deneyleer üçer defa tekrarlanmış ve grafikler bu üç değerin ortalamaları alınarak çizilmiştir.

Kaymalı yatakların yük taşıma kabiliyetleri Bölüm 1.7'de anlatılan PV formülü ile belirlenmektedir. Deneyleerde değişken parametre olarak seçilen; yatak yükü ve mil devir sayısına bağlı olarak denklem 1.2'den hesaplanan PV değeri Çizelge 6.1'de verilmektedir.



Şekil 6.1. Test düzeneğinde örnek yük değişimi (Test 3).

Çizelge 6.1. Bronz yataklar için yatak yükü ve mil devir sayısına bağlı olarak hesaplanan PV (MPa m/dak) değerleri

	PV (MPa m/dak)
Test no 1 (F= ± 250 N, n=1000(d/d) )	60
Test no 2 (F= ± 350 N, n=830(d/d) )	70
Test no 3 (F= ± 200 N, n=1200(d/d) )	58

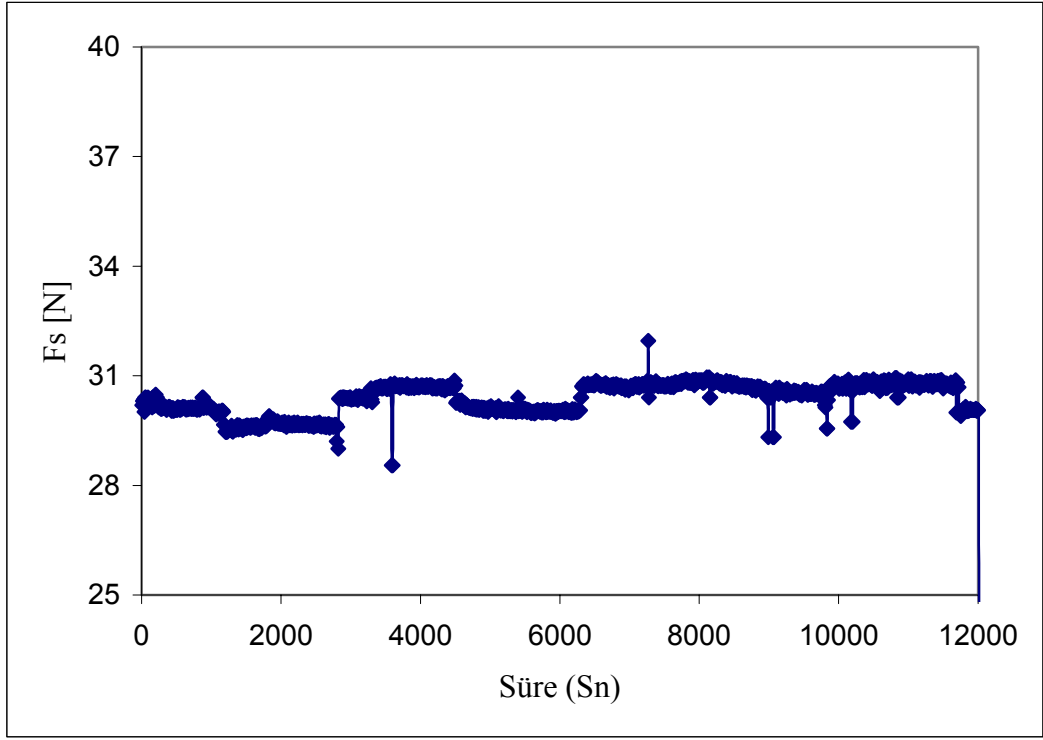
Sürtünme katsayısı; deneylerde değişken parametre olarak seçilen mil devir sayısı, yatak yüküne bağlı olduğu gibi, yatak sıcaklığı, yatak malzemesi, milin yüzey pürüzlülüğü, yatağın yüzey pürüzlülüğü, mil-yatak toleransı, malzemelerin sertlikleri, sinter yatakların gözeneklilik durumları, emdirilen yağın özellikleri gibi daha pek çok özelliğe bağlıdır. Bununla birlikte deneyler boyunca bu değerlerin sabit kaldığı kabul edilmiştir.

### 6.1. Sürtünme Kuvveti ve Sürtünme Katsayıları Deneyleri

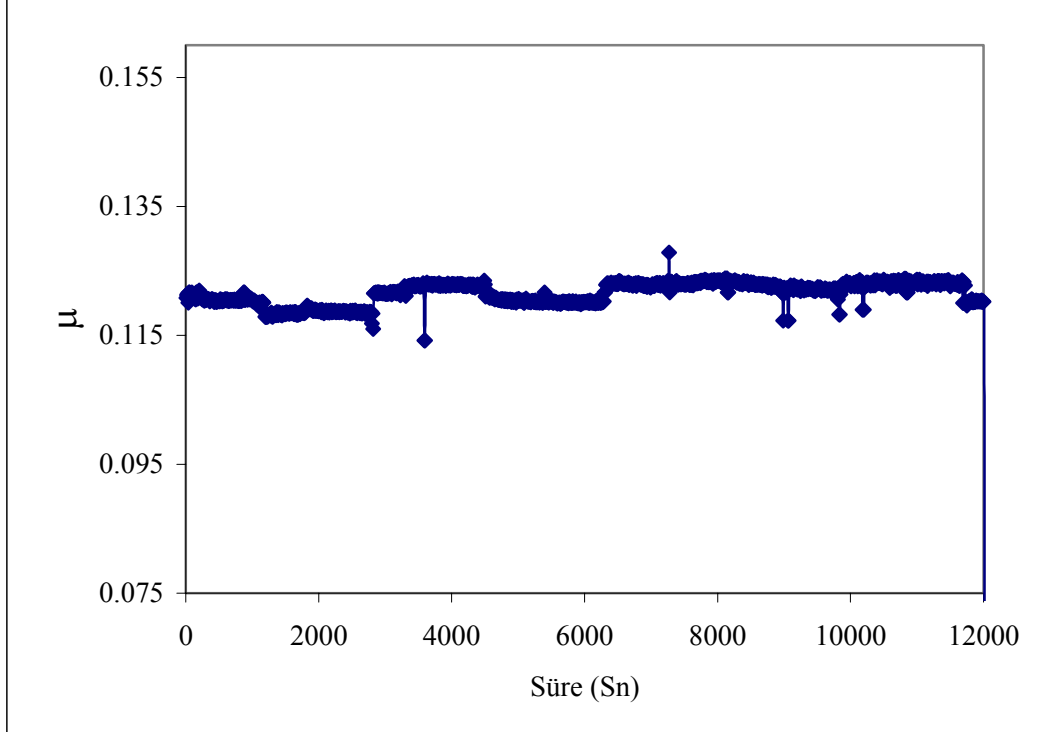
Yorulma testleri için üç ayrı deney şartlarında ( $\pm F=250$  N,  $n=1000$  d/d,  $\pm F=350$  N  $n=830$  d/d,  $\pm F=200$  N  $n=1200$  d/d ) ve söz konusu bu deneylerin her bir deney üçer defa tekrar edilerek, sürtünme kuvvetleri ve katsayıları ölçülerek bilgisayara kaydedilmiştir. Aşınma deneyleri için ise her bir numune deney öncesi hegzan ile yıkanıp, kurutulduktan sonra darası ve deney sonuçlarında ağırlıkları 0.001 gram hassasiyetli terazi ile tartılarak aşınma kayıp miktarları ölçülmüştür. Sürtünme, aşınma ve yorulma testleri için her bir numune için 1 000 000 – 1 400 000 çevrim esas alınmıştır. Her bir 200 000 çevrimde numuneler sökölüp hem göz ile muayene edilerek herhangi bir hasarın başlayıp başlamadığı kontrol edilmiş hem de her bir 200 000 çevrim de oluşan aşınma kayıpları yataklar temizlenip kurutulduktan sonra tartılarak belirlenmiştir. Sürtünme kuvveti ve katsayıları deney sonuçları da her bir numune için 200 000 çevrim için ayrı ayrı grafik halinde Şekil 6.2. – Şekil 6.37’de verilmiştir.

Cusano ve Phelan (1973) yağ beslemesiz sadece emdirilmiş yataklarla pratik şartlara uygun deneyler gerçekleştirmiştir. Deneylerde PV değeri 105 MPa.m/dakika gibi yüksek değerlerde hidrodinamik yağlamanın gerçekleşmesi için yetersiz olduğu, bu değerlerde sadece sınır yağlamanın gerçekleştiğini deneysel olarak tespit etmişlerdir. Bununla beraber, 70 MPa.m/dakika gibi daha düşük değerlerde hidrodinamik yağlamanın gerçekleştiğini deneysel olarak tespit etmişlerdir. Sunulan çalışmada ise, PV değeri yaklaşık olarak 60, 70, ve 58 MPa.m/dakika olarak hesaplanmıştır. Bu değer bronz sinter yataklar için verilen değerden (105 -126 MPa.m/dakika(Tunay, 2001, Durak ve diğerleri, 2002)) düşük olup testlerin emniyetli çalışma bölgesinde yapıldığını göstermektedir. Yatak ortalama basınçları ise Test 1 için  $P = 1.6$  MPa, Test 2 için  $P = 2.24$  MPa ve Test 3 için ise  $1.28$  MPa olarak hesaplanmıştır.

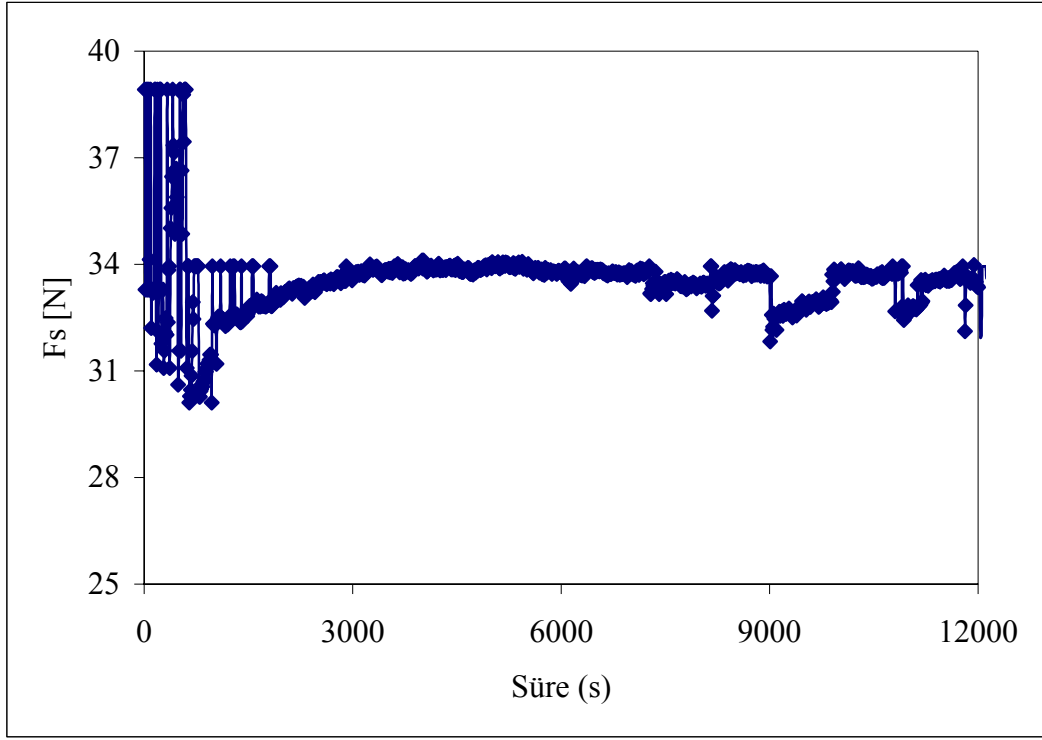




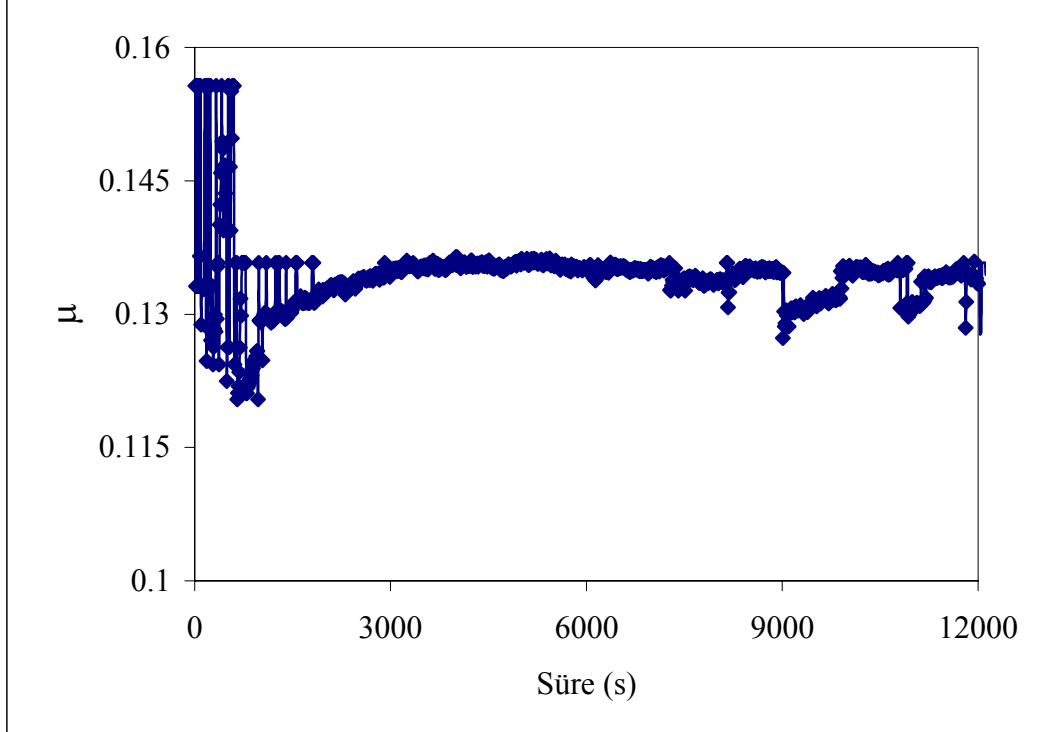
Şekil 6.2.  $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.1 sürtünme kuvveti değişimi



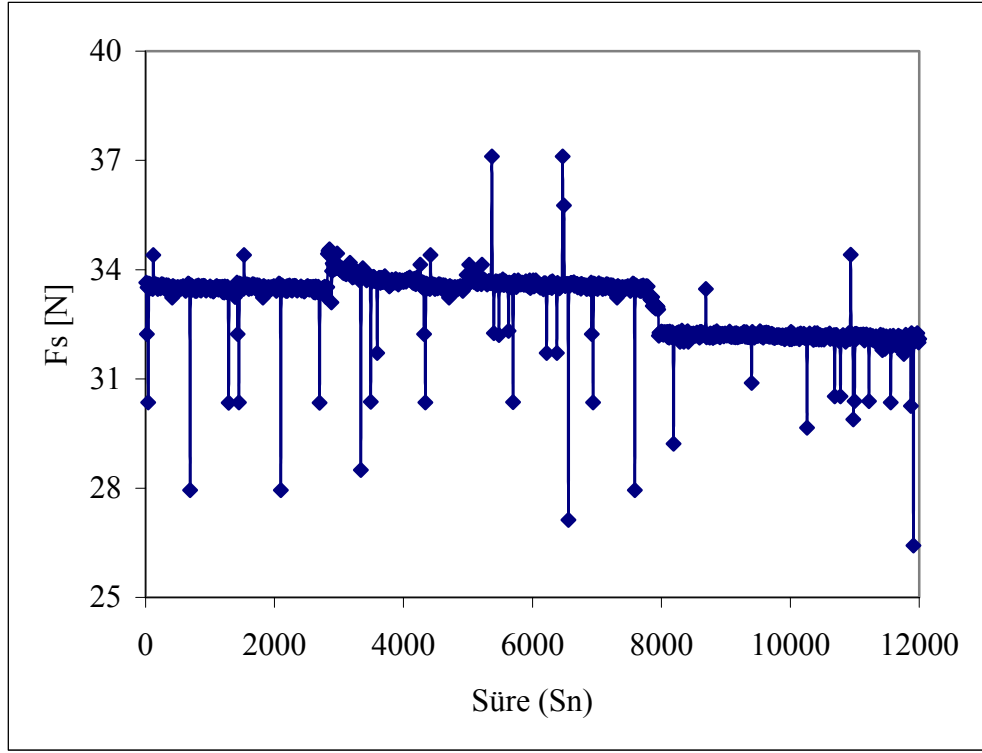
Şekil 6.3.  $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.1 sürtünme katsayısı değişimi



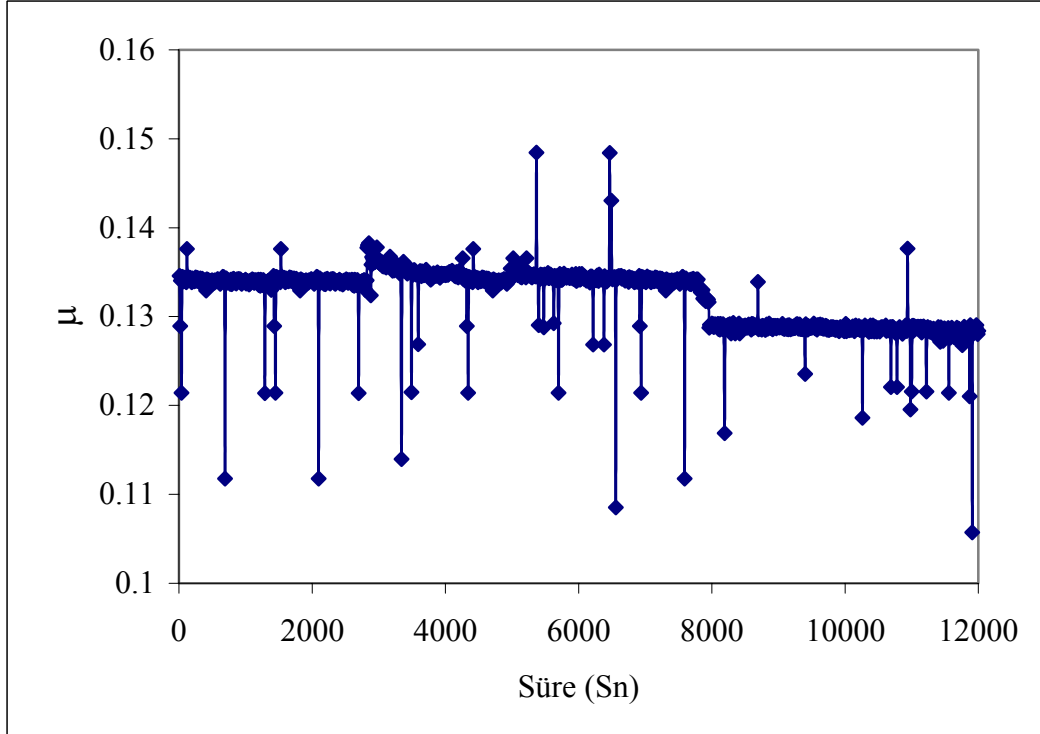
Şekil 6.4.  $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.2 sürtünme kuvveti değişimi



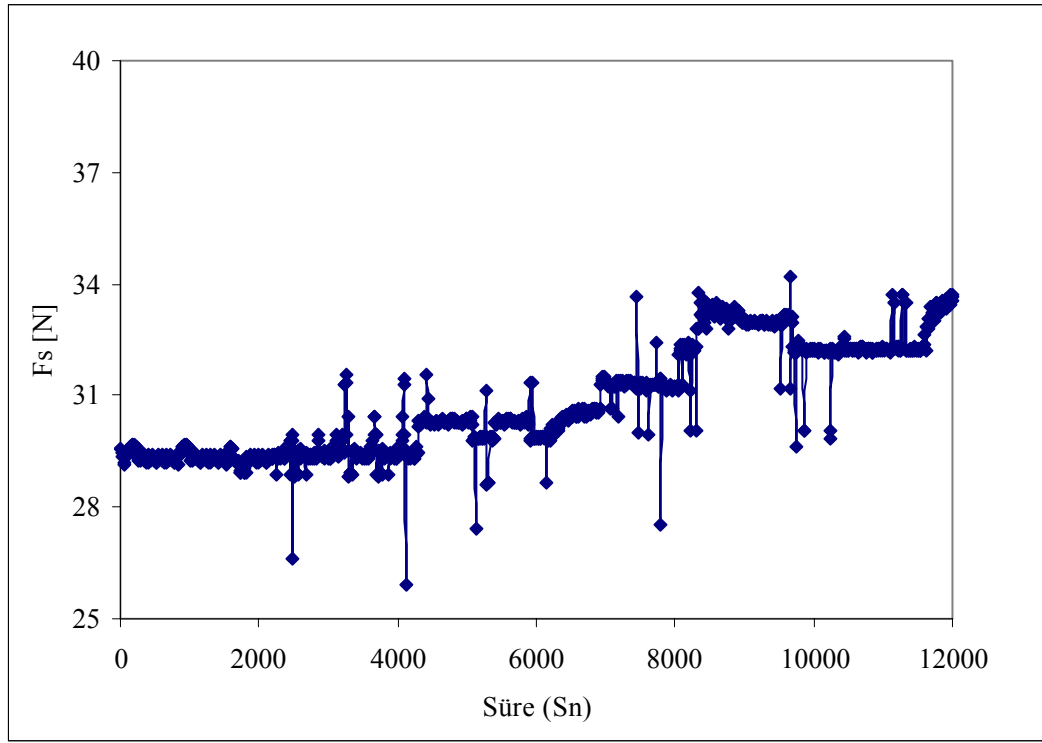
Şekil 6.5.  $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.2 sürtünme katsayısı değişimi



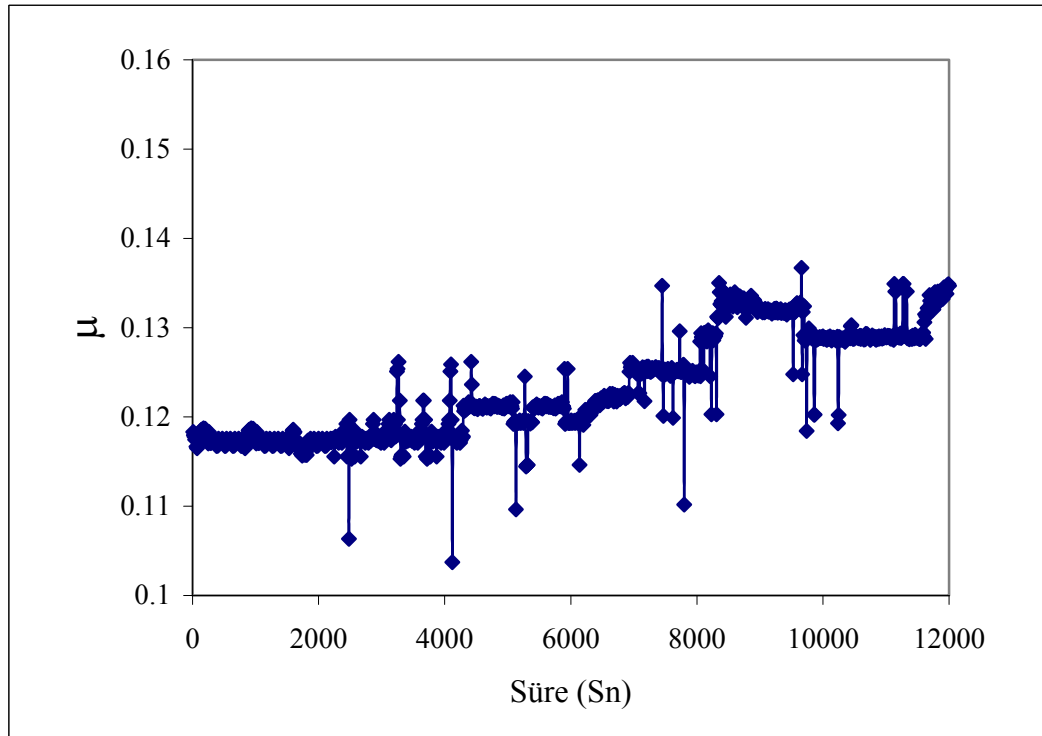
Şekil 6.6.  $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.3 sürtünme kuvveti değişimi



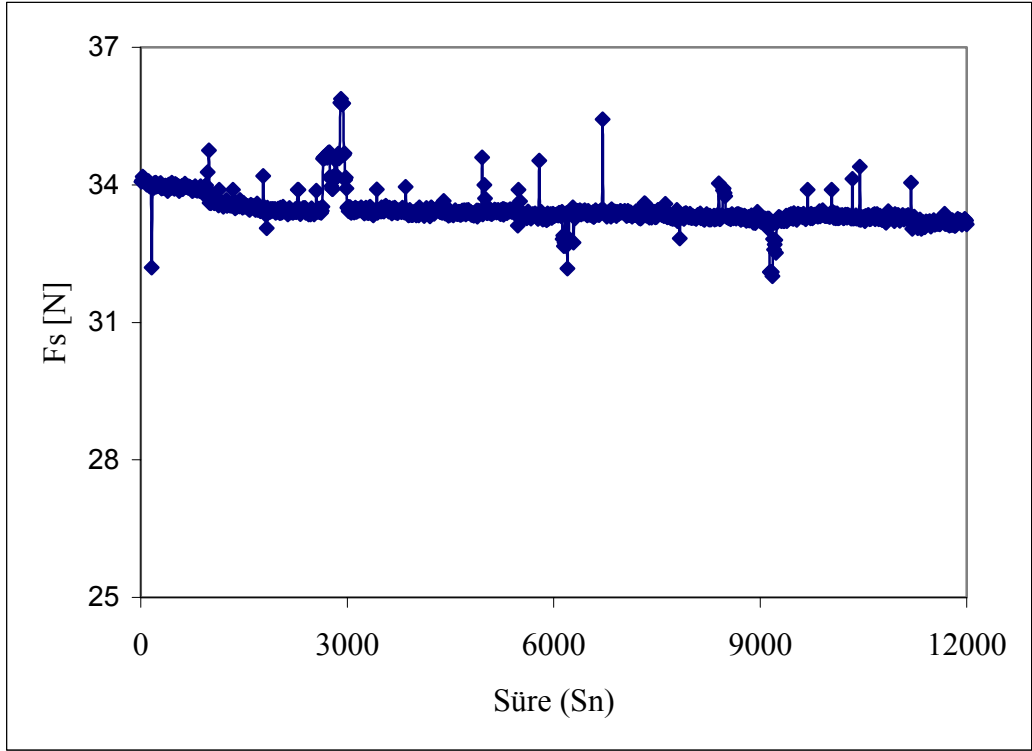
Şekil 6.7.  $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.3 sürtünme katsayısı değişimi



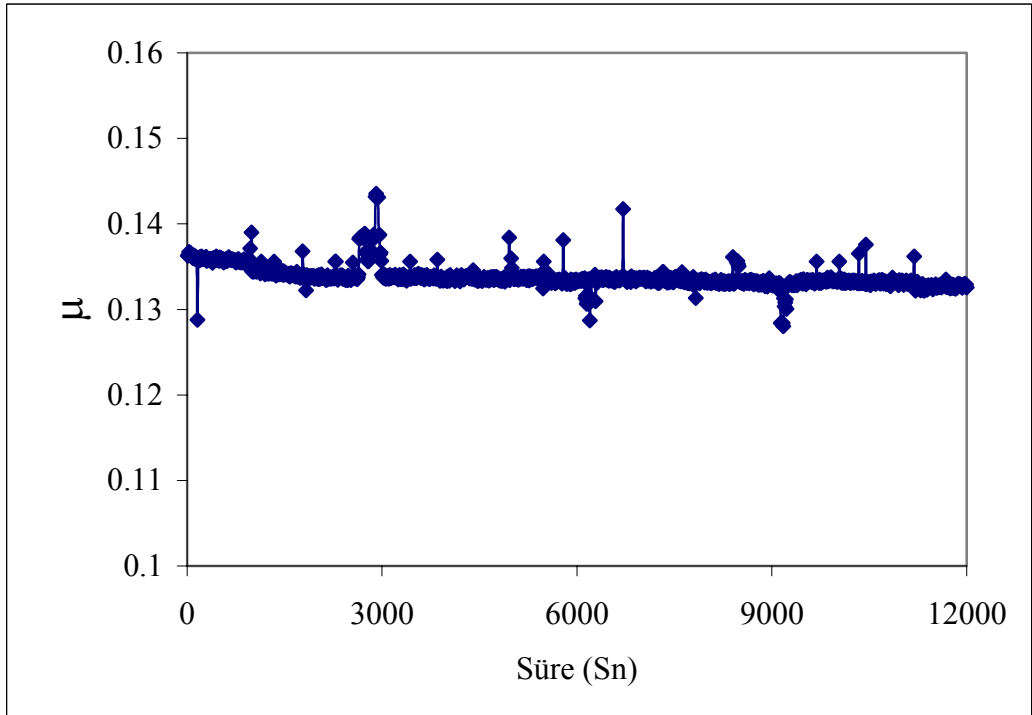
Şekil 6.8.  $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.4 sürtünme kuvveti değişimi



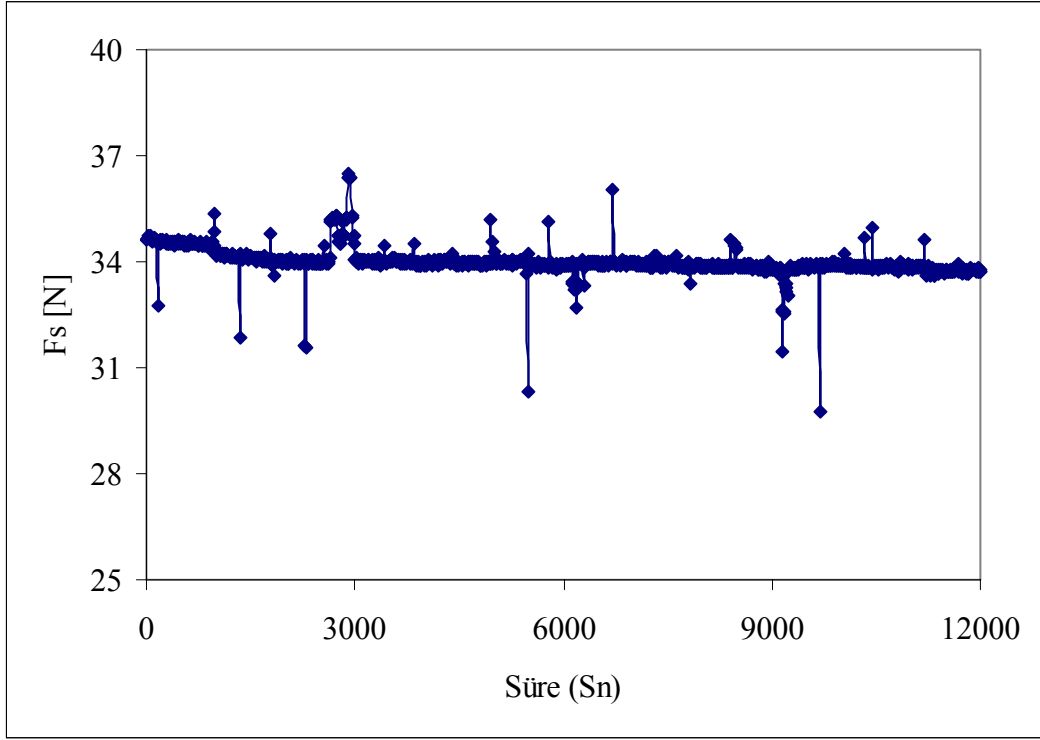
Şekil 6.9.  $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.4 sürtünme katsayısı değişimi



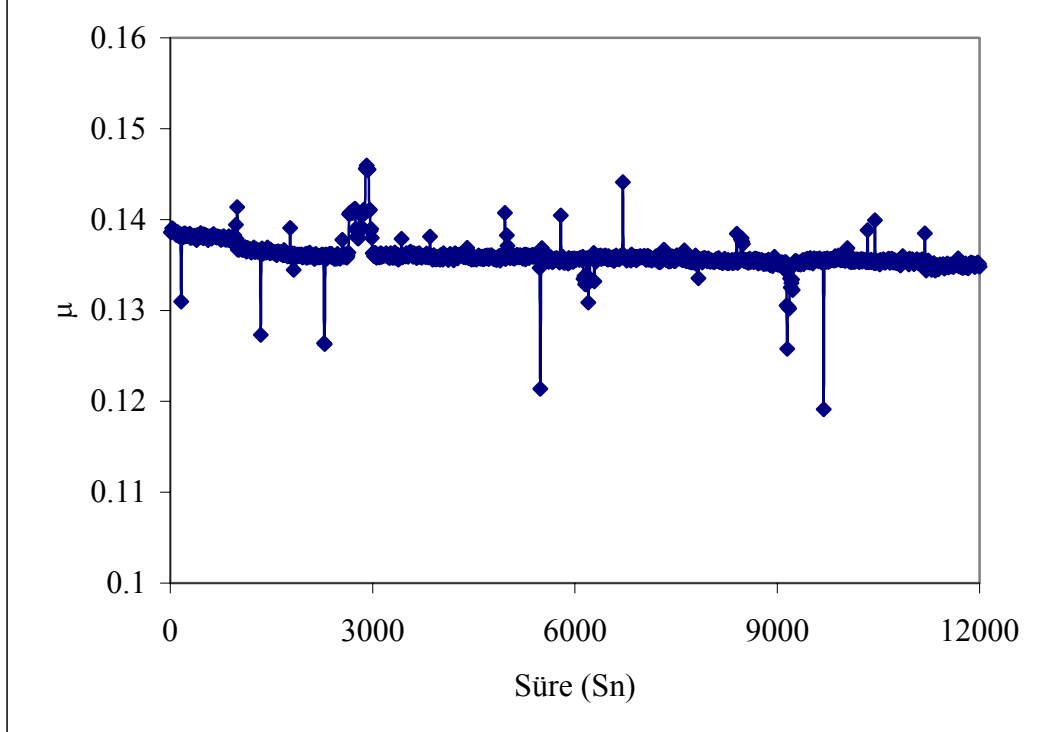
Şekil 6.10.  $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.5 sürtünme kuvveti değişimi



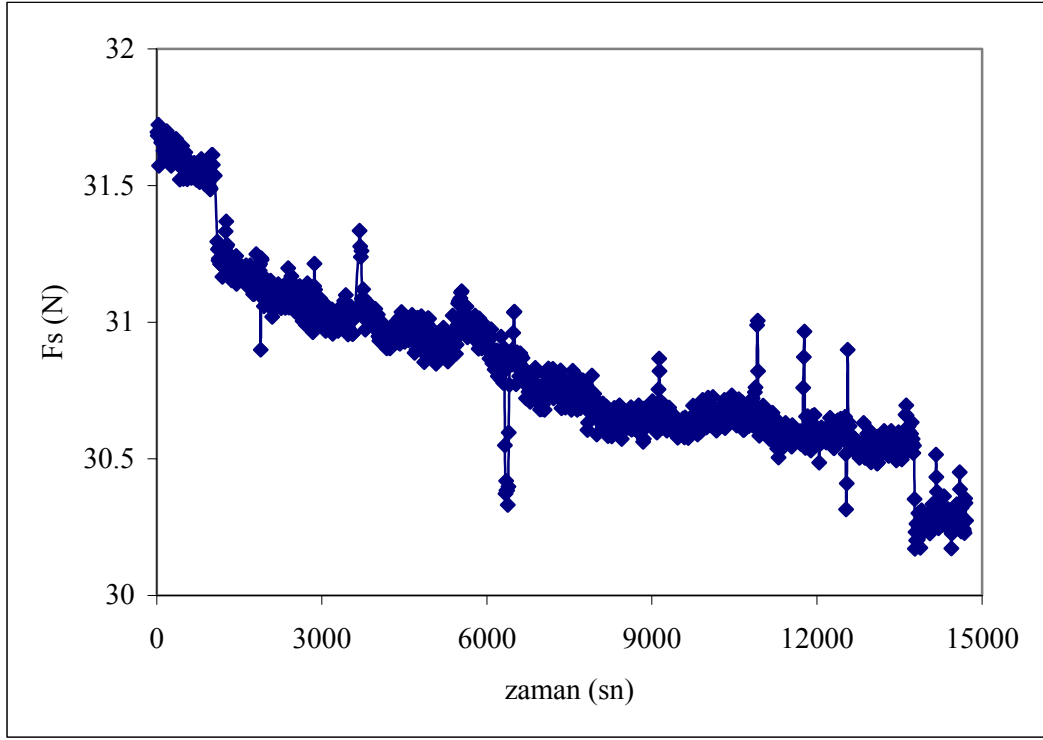
Şekil 6.11.  $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.5. sürtünme katsayısı değişimi



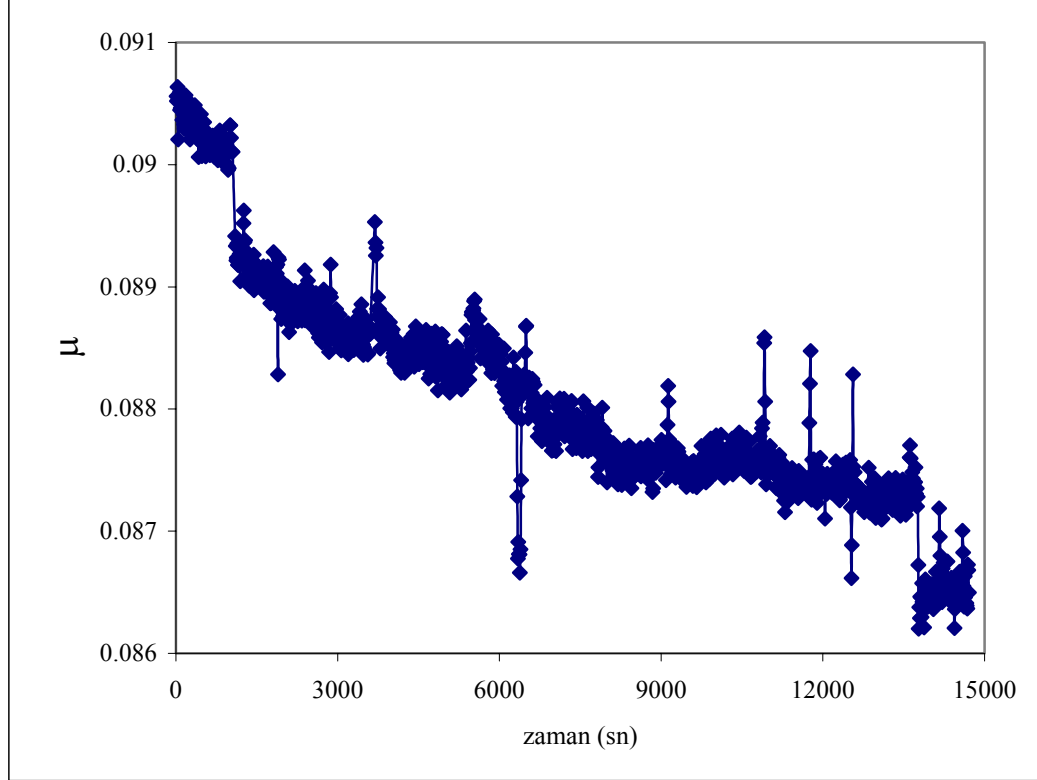
Şekil 6.12.  $\pm F = 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.6 sürtünme kuvveti değişimi



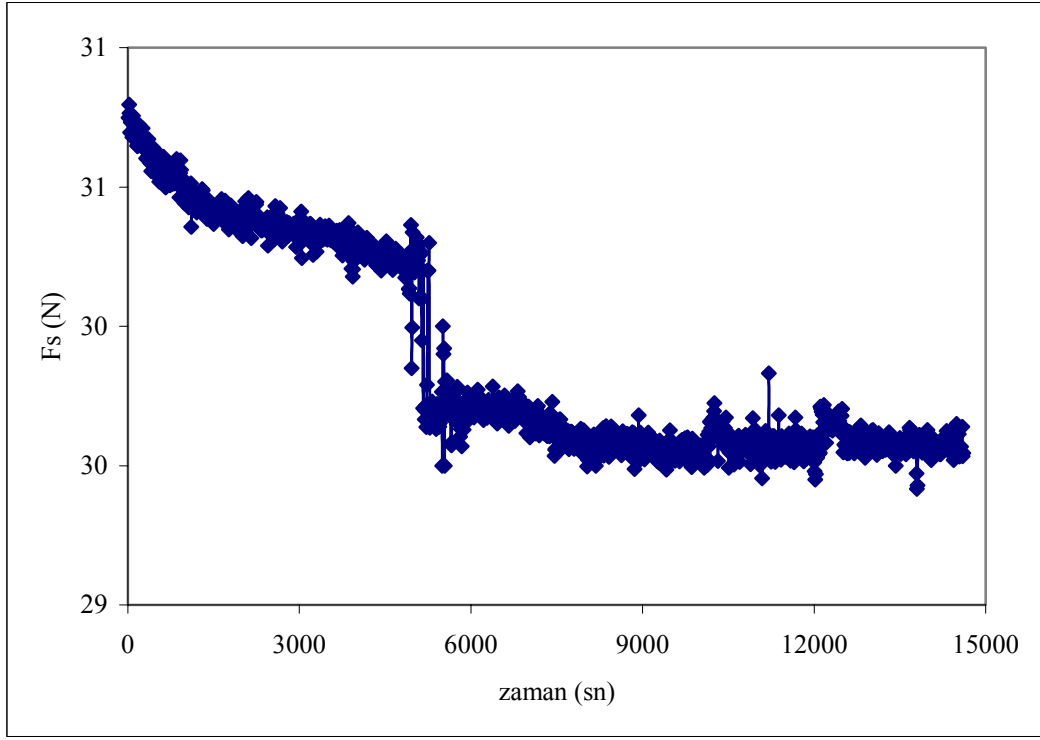
Şekil 6.13.  $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d Deney 1.6 sürtünme katsayısı değişimi



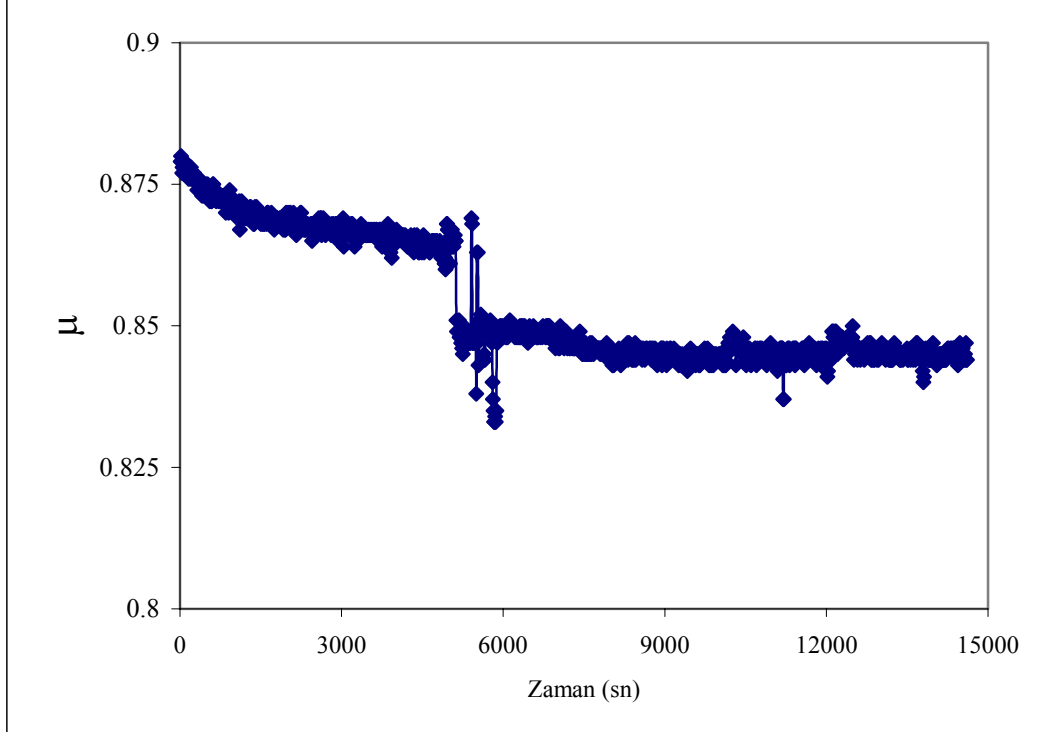
Şekil 6.14.  $F = \pm 350$  N ve  $n = 830$  d/d Deney 2.1 sürtünme kuvveti değişimi



Şekil 6.15.  $F = \pm 350$  N ve  $n = 830$  d/d Deney 2.1 sürtünme katsayısı değişimi

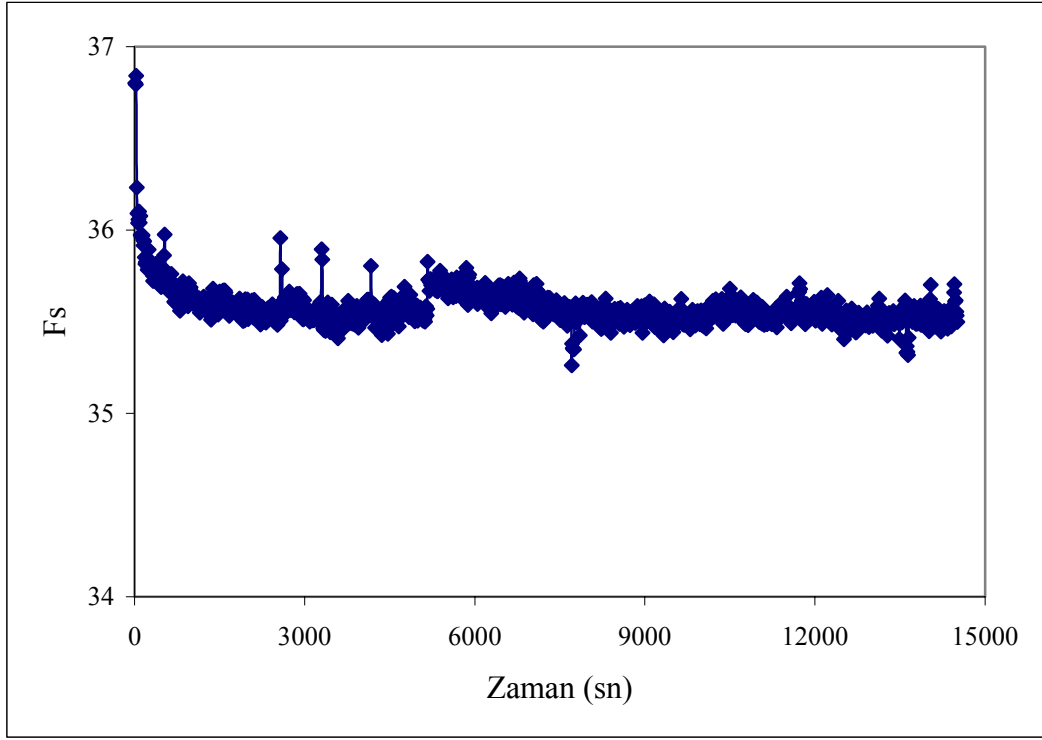


Şekil 6.16.  $F = \pm 350$  N ve  $n = 830$  d/d Deney 2.2 sürtünme kuvveti değişimi

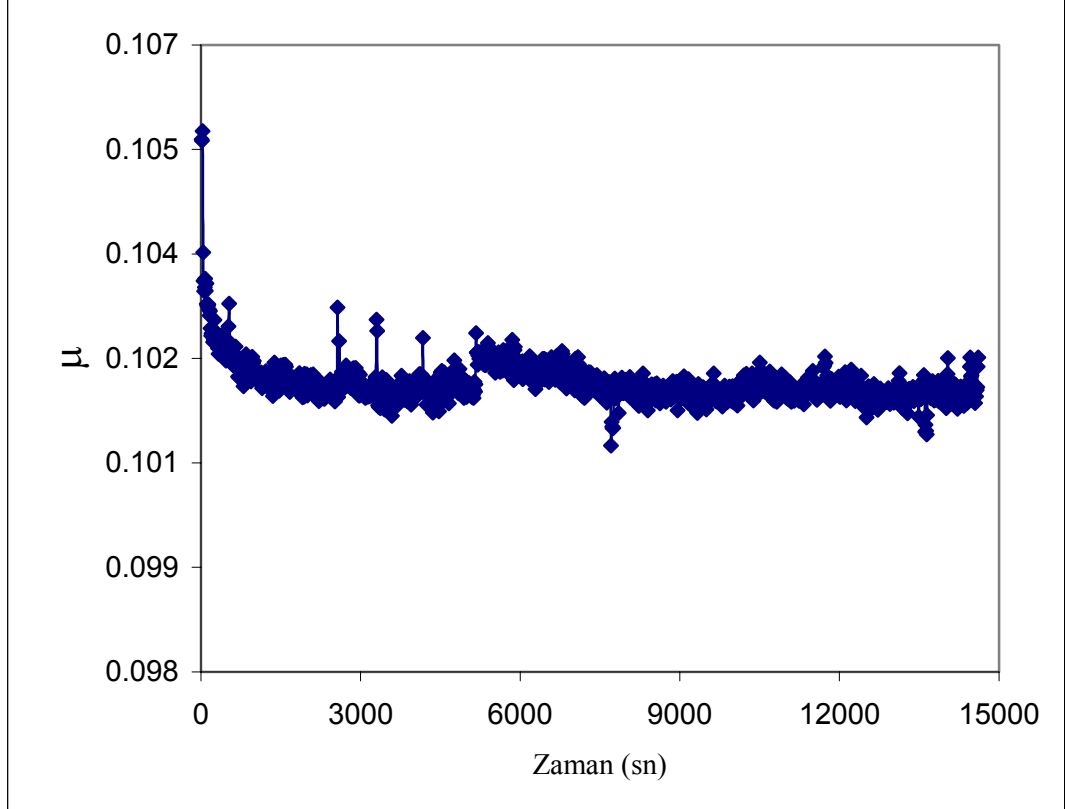


Şekil 6.17.  $F = \pm 350$  N ve  $n = 830$  d/d Deney 2.2 sürtünme katsayısı değişimi

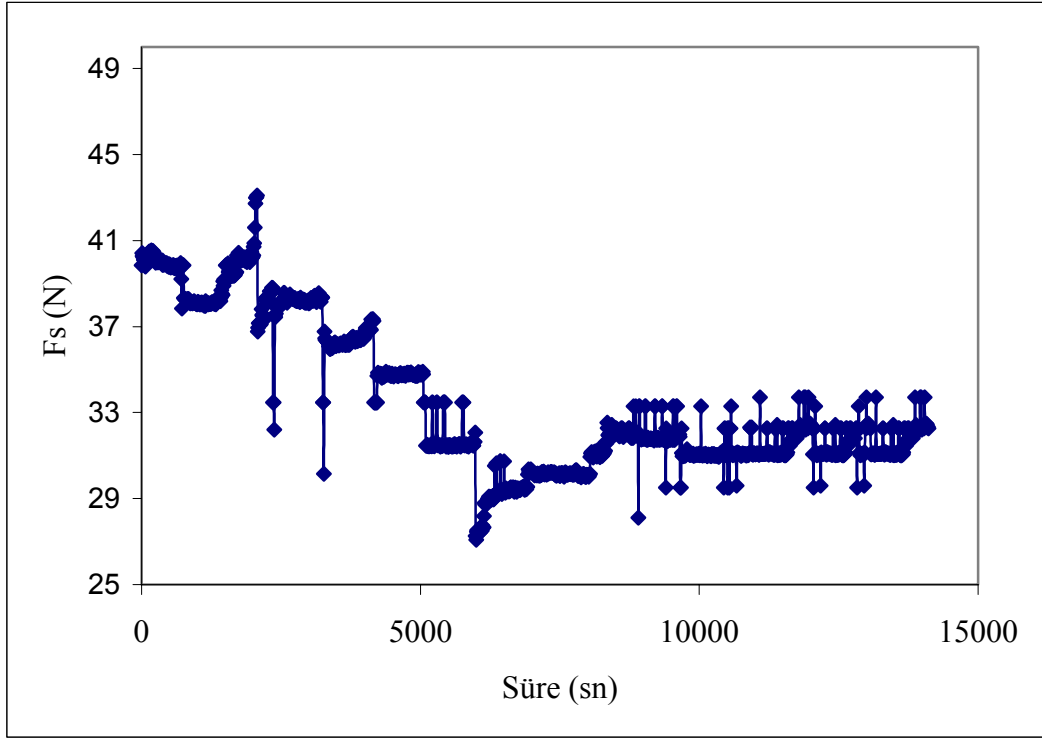




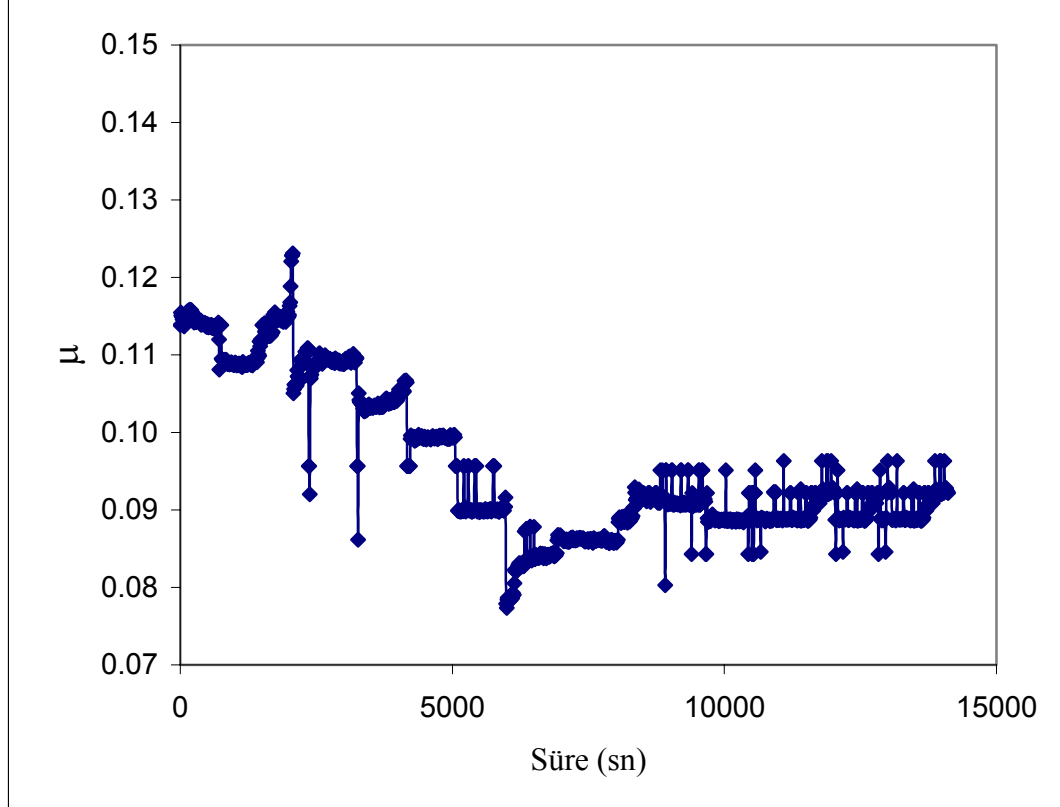
Şekil 6.18.  $F = \pm 350 \text{ N}$  ve  $n = 830 \text{ d/d}$  Deney 2.3 sürtünme kuvveti değişimi



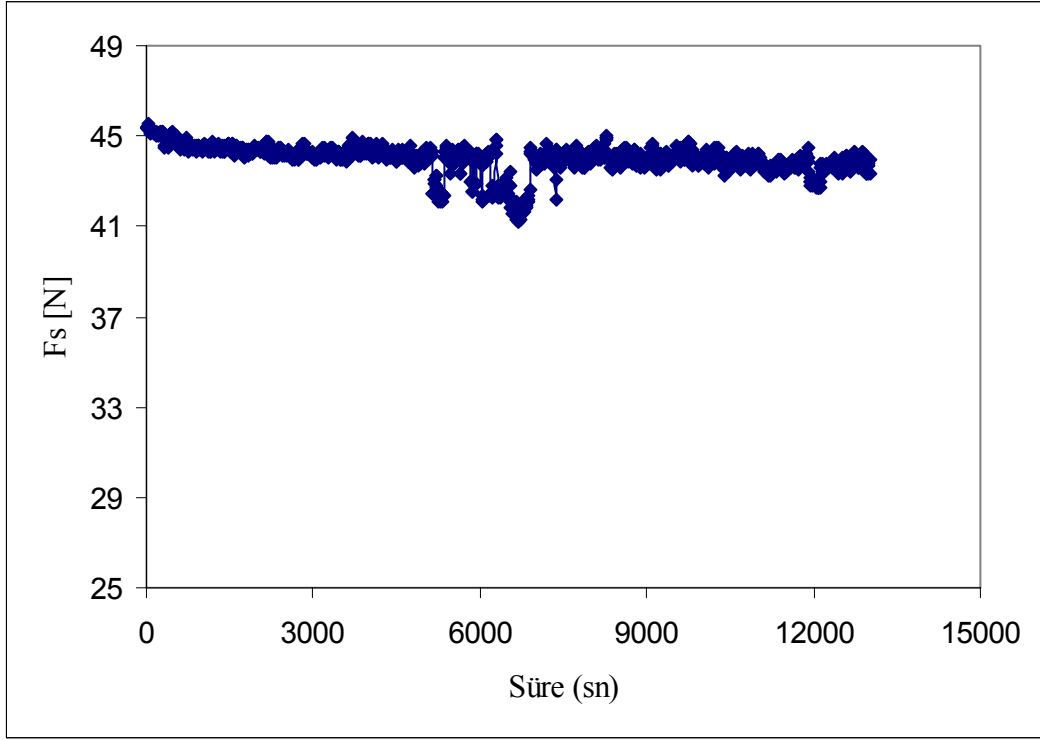
Şekil 6.19.  $F = \pm 350 \text{ N}$  ve  $n = 830 \text{ d/d}$  Deney 2.3 sürtünme katsayısı değişimi



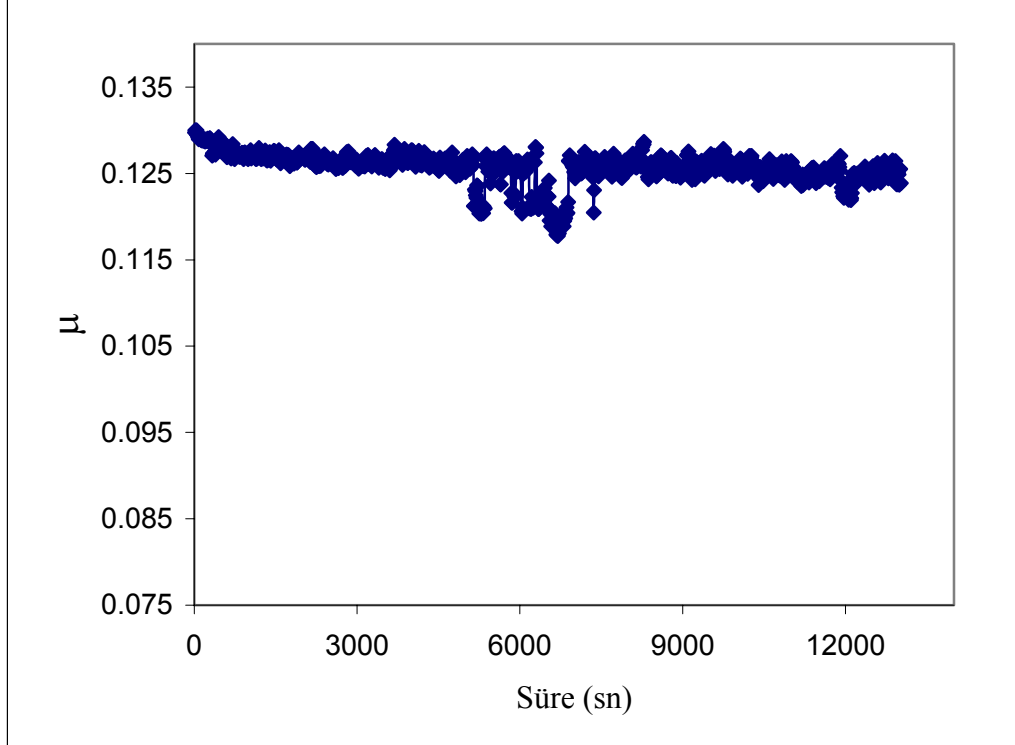
Şekil 6.20.  $F = \pm 350$  N ve  $n = 830$  d/d Deney 2.4 sürtünme kuvveti değişimi



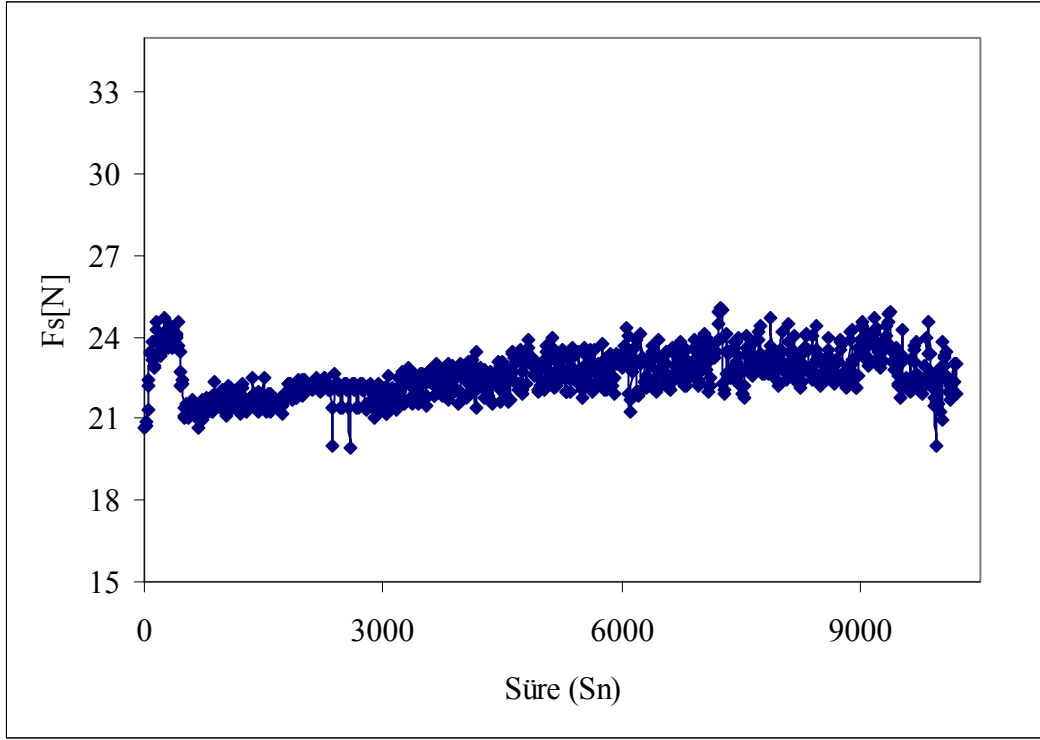
Şekil 6.21.  $F = \pm 350$  N ve  $n = 830$  d/d Deney 2.4 sürtünme katsayısı değişimi



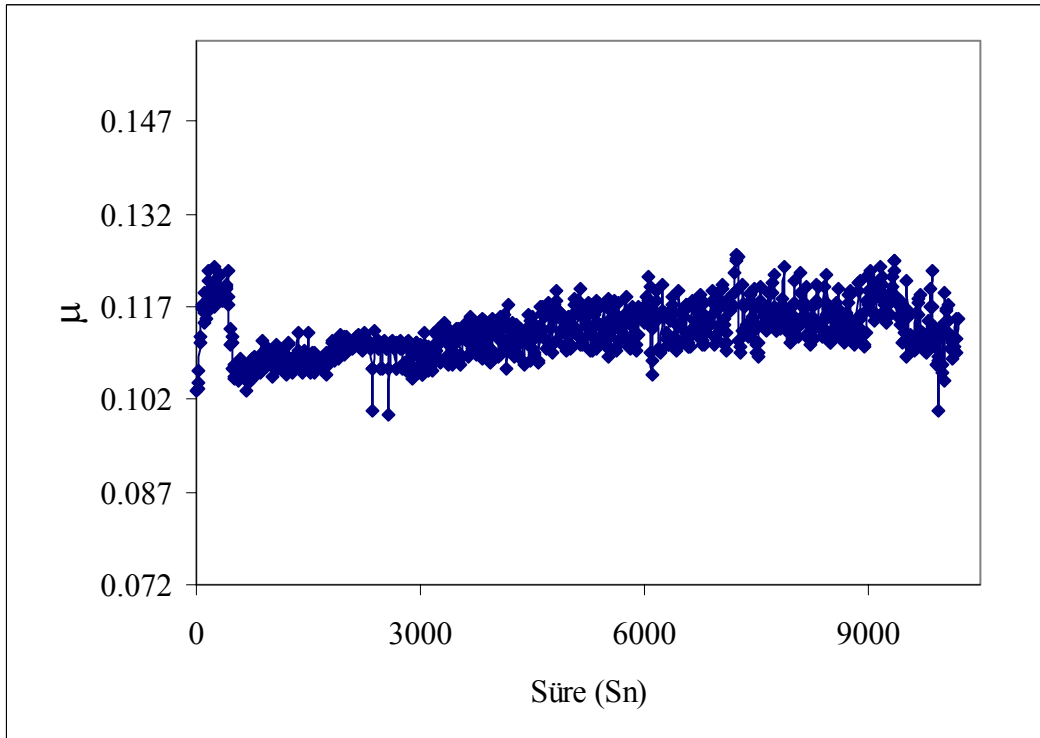
Şekil 6.22.  $F = \pm 350$  N ve  $n = 830$  d/d Deney 2.5 sürtünme kuvveti değişimi



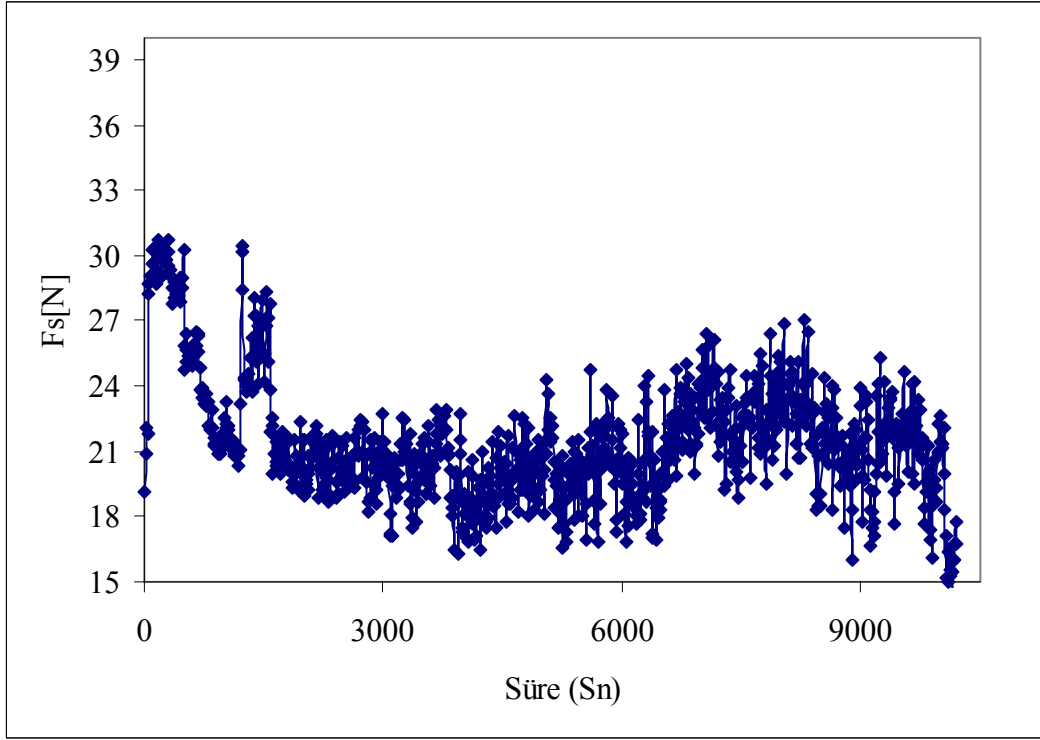
Şekil 6.23.  $F = \pm 350$  N ve  $n = 830$  d/d Deney 2.5 sürtünme katsayısı değişimi



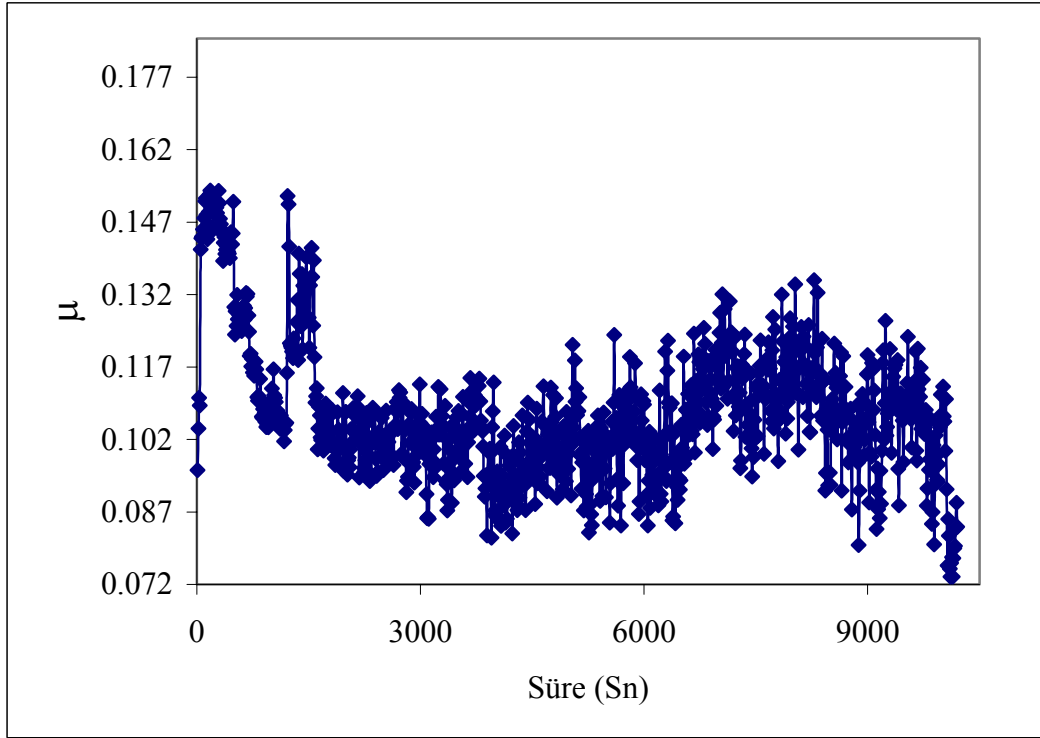
Şekil 6.24.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.1. sürtünme kuvveti değişimi



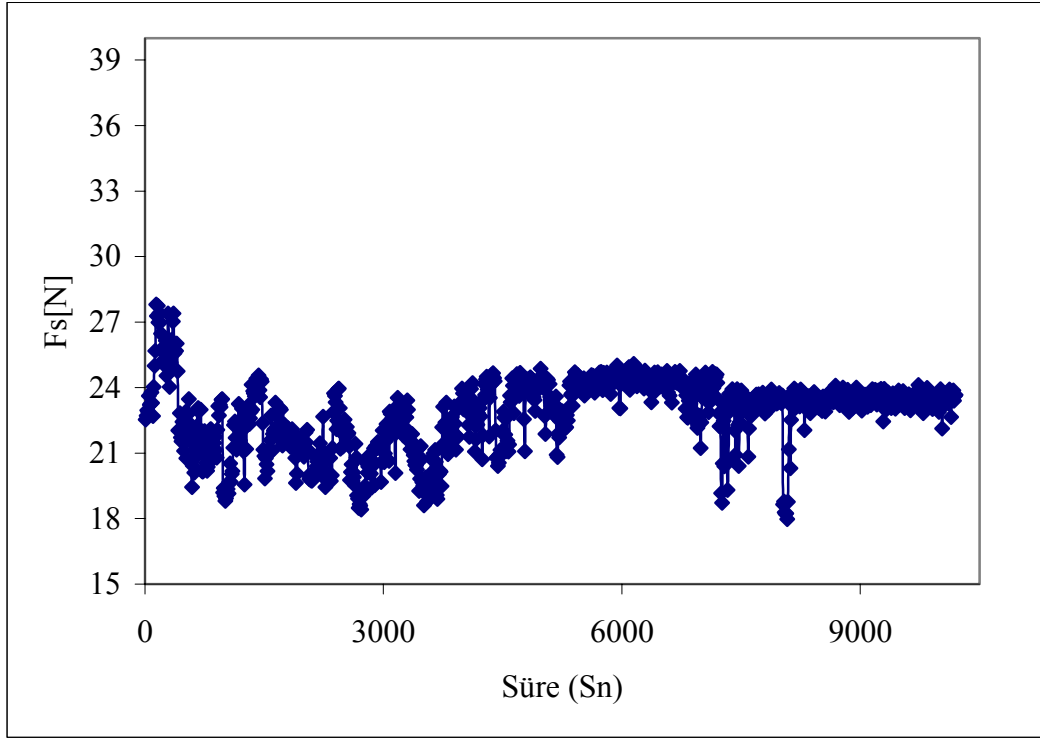
Şekil 6.25.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.1. sürtünme katsayısı değişimi



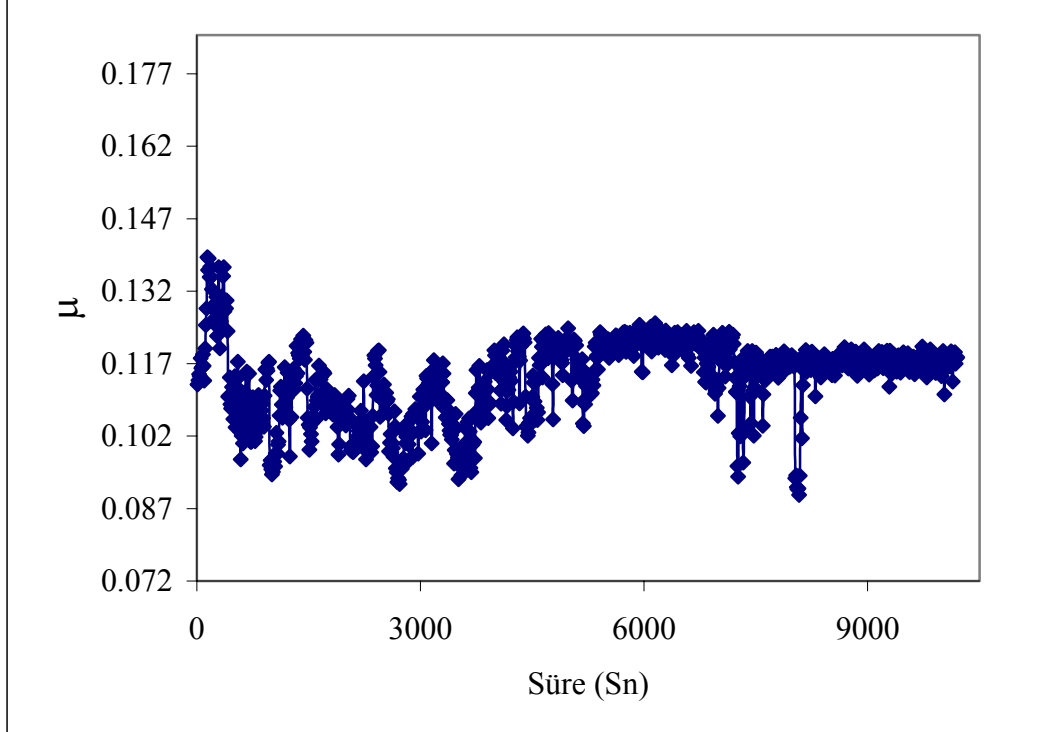
Şekil 6.26.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.2. sürtünme kuvveti değişimi



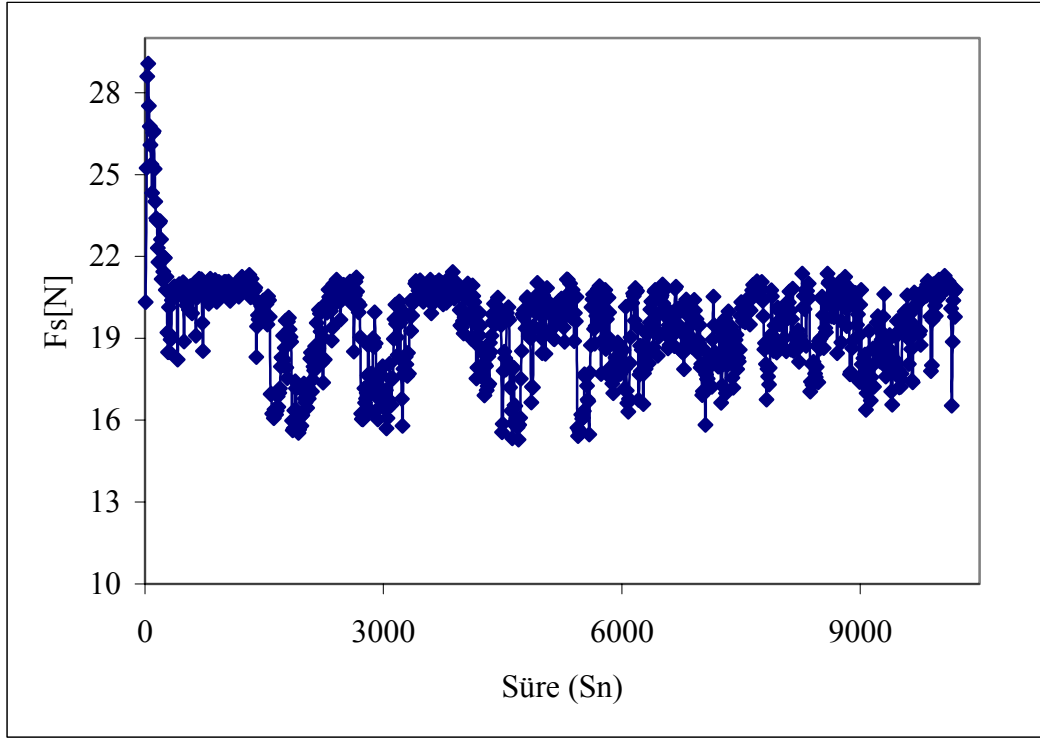
Şekil 6.27.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.2. sürtünme katsayısı değişimi



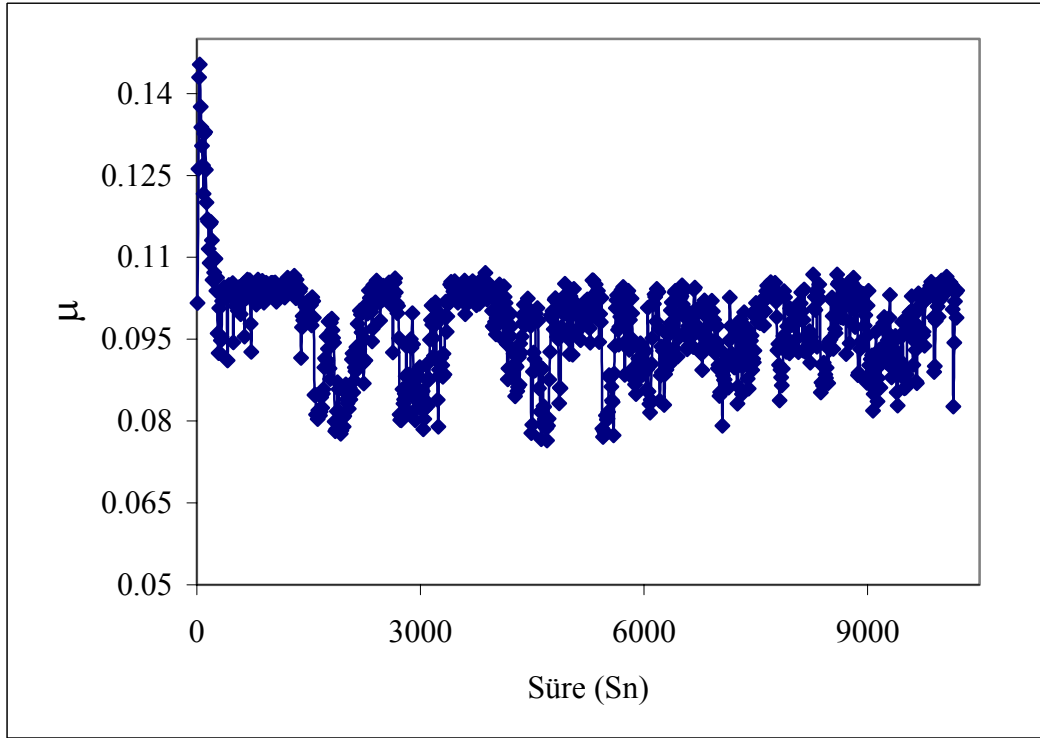
Şekil 6.28.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.3. sürtünme kuvveti değişimi



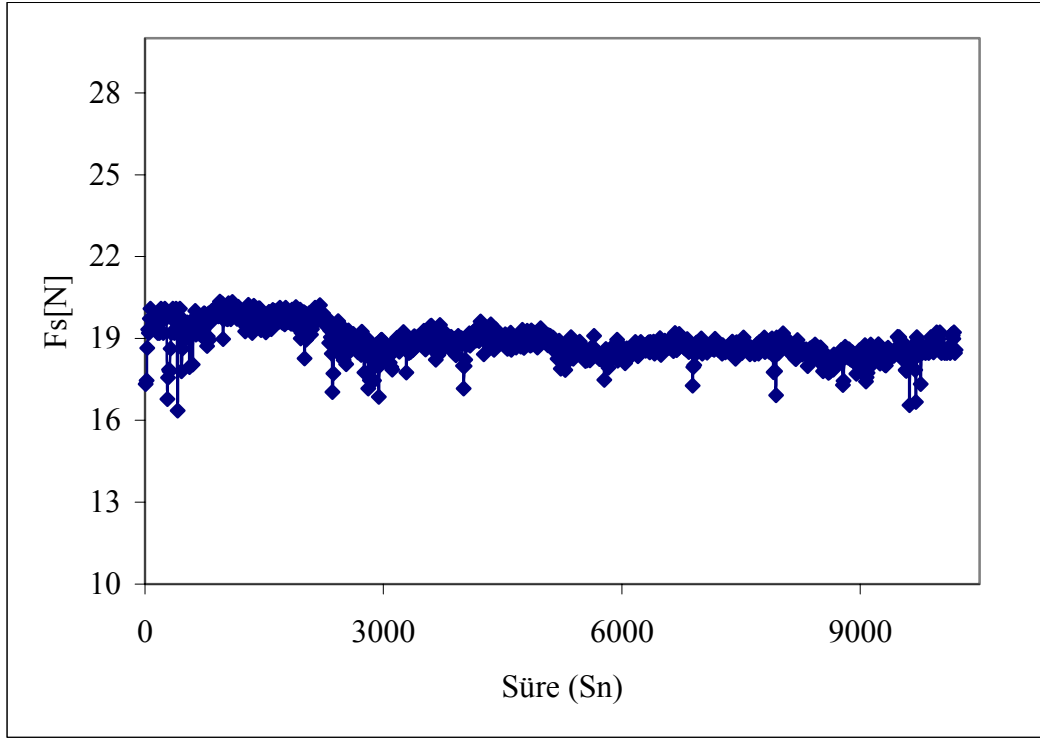
Şekil 6.29.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.3. sürtünme katsayısı değişimi



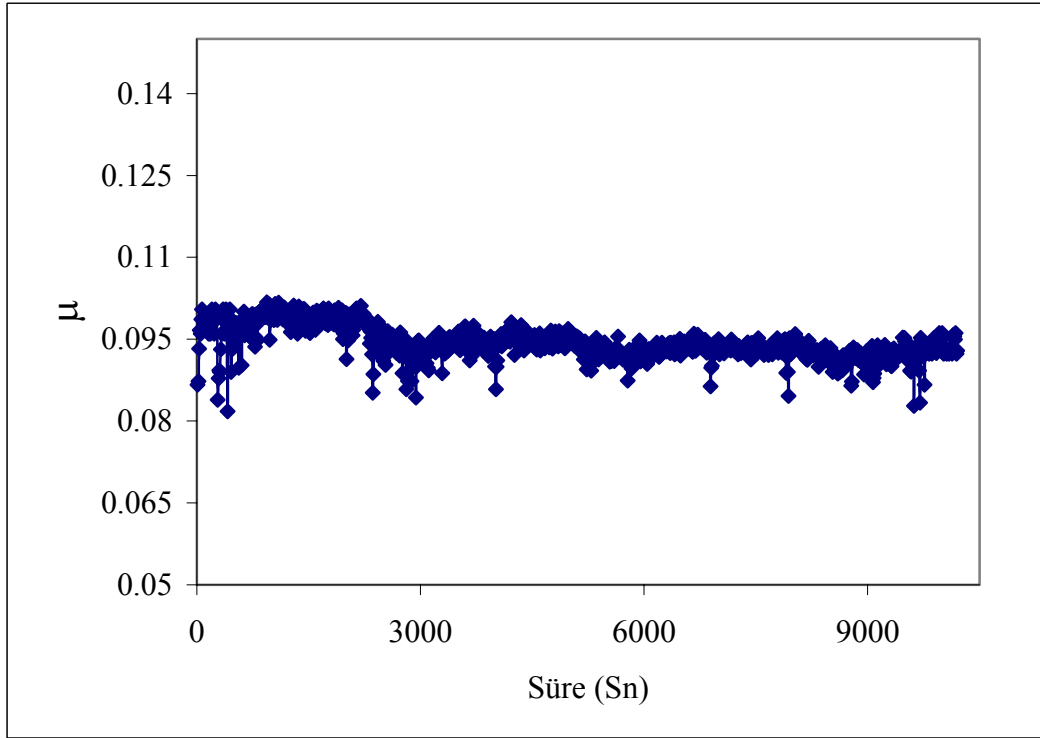
Şekil 6.30.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.4. sürtünme kuvveti değişimi



Şekil 6.31.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.4. sürtünme katsayısı değişimi

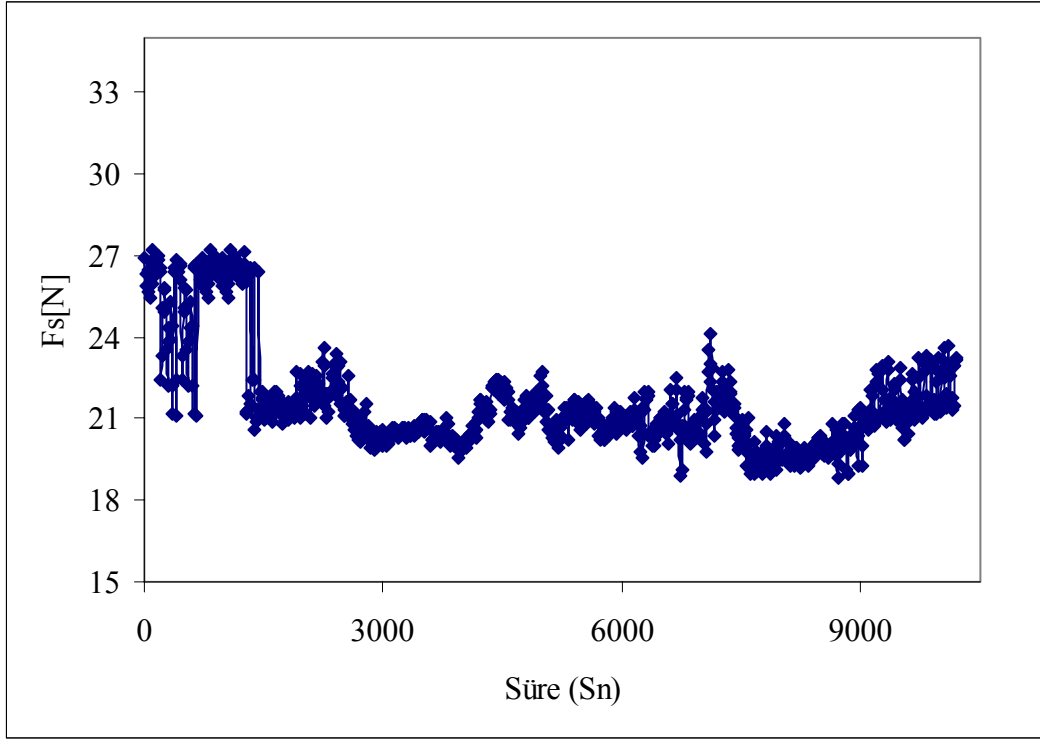


Şekil 6.32.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.5. sürtünme kuvveti değişimi

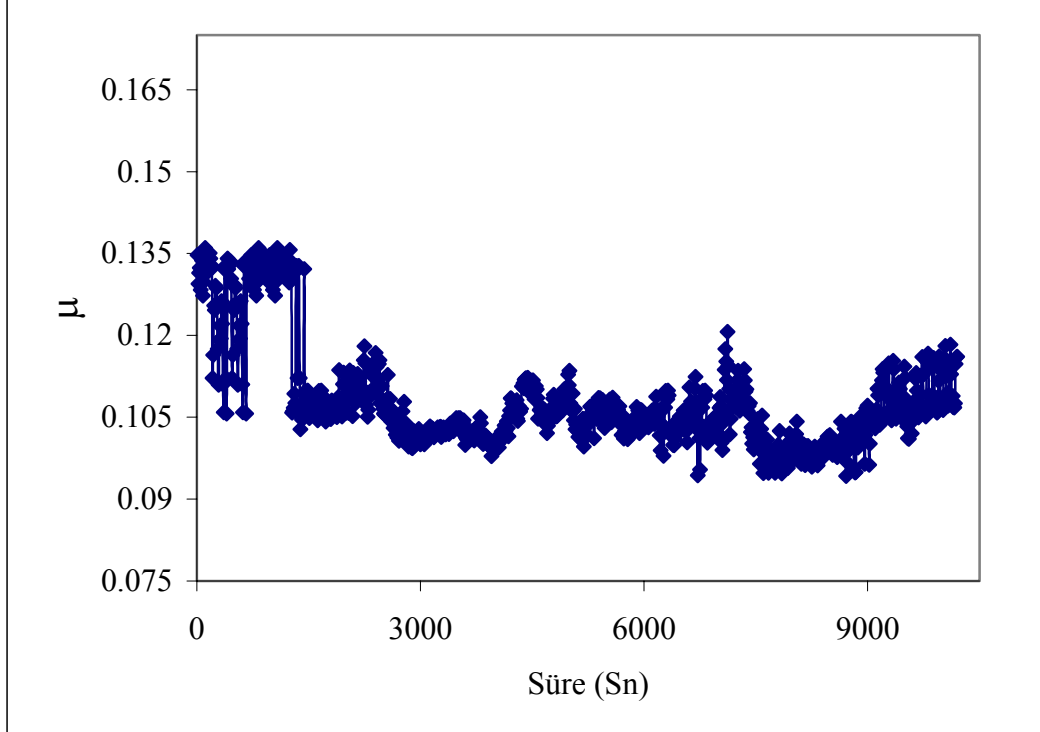


Şekil 6.33.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.5. sürtünme katsayısı değişimi

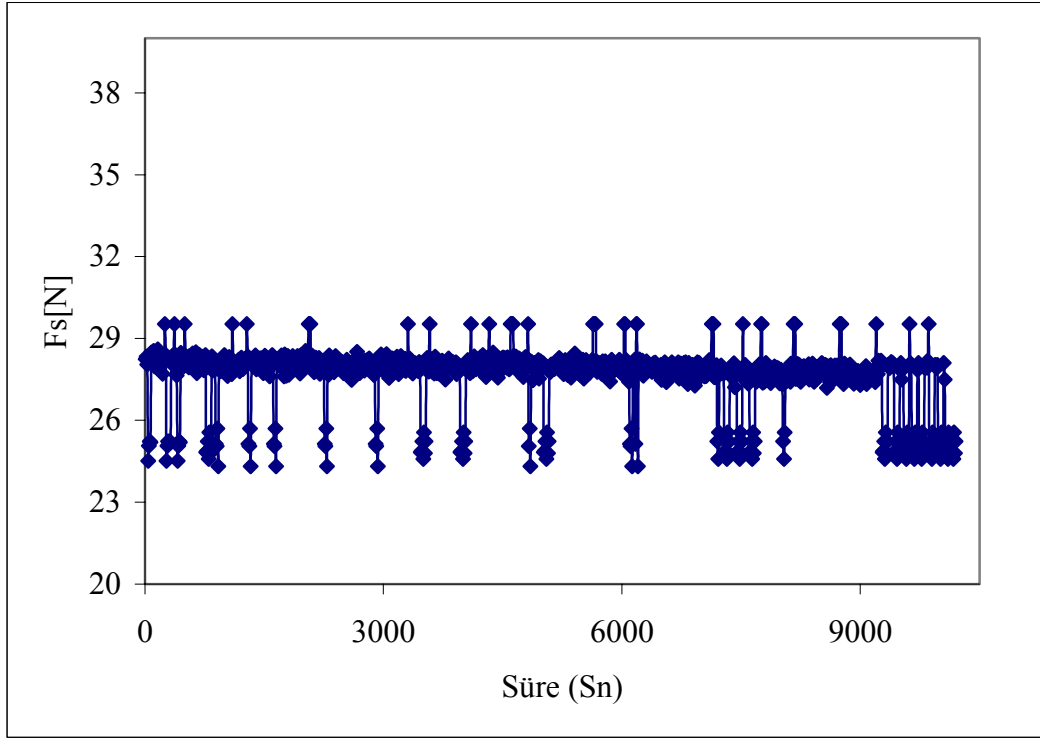




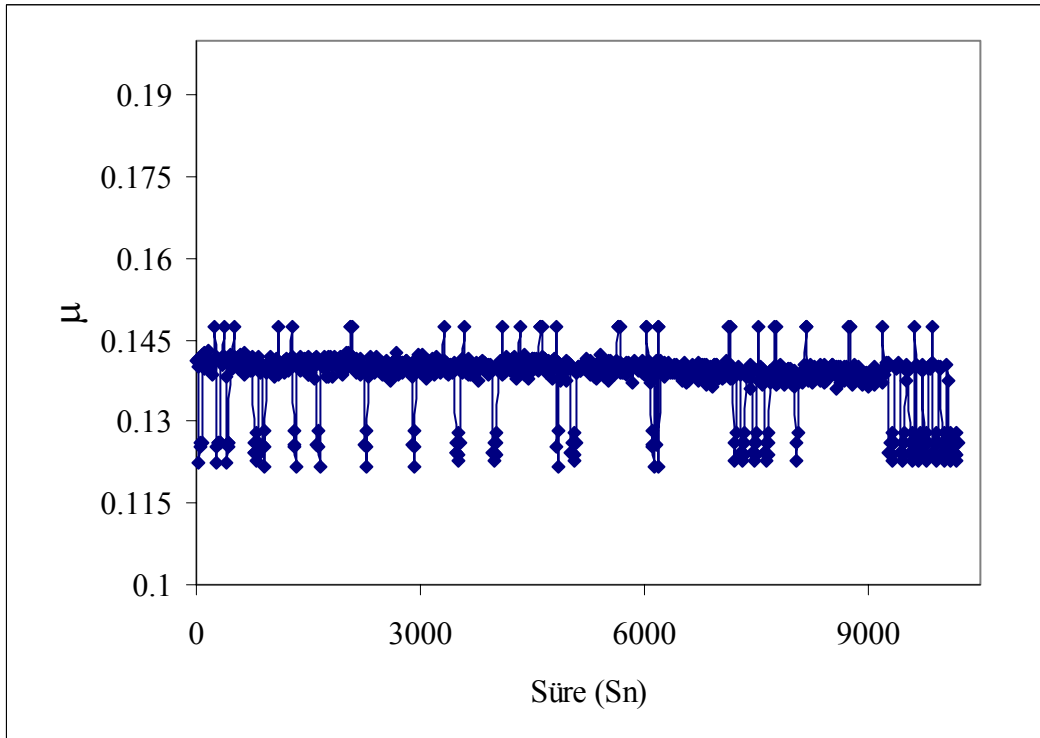
Şekil 6.34.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.6. sürtünme kuvveti değişimi



Şekil 6.35.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.6. sürtünme katsayısı değişimi



Şekil 6.36.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.7. sürtünme kuvveti değişimi



Şekil 6.37.  $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d Deney 3.7. sürtünme katsayısı değişimi

Yükleme tam değişken olduğu için sürtünme kuvvetinin dolayısıyla sürtünme katsayısının seçilen test süresinde değişken olması normal bir sonuçtur. Genelde grafiklerden de (Şekil 6.2.-6.37) görüldüğü üzere sürtünme kuvvetleri ve katsayıları deney başlangıcında büyük mil ve yatak sıcaklığı artıkça emilen yağ kılcal etki ile çalışma yüzeyine doğru hareket edince arada tam ve/veya kısmi yağlama sağlayarak sürtünme kuvvet ve katsayısında düşüşler başlamıştır. Testlerde genelde (Test 1-3) test sonlarına doğru sürtünme katsayısında tekrar bir artışın olması da yatağa emilen yağ miktarında oluşan buharlaşma, akma sonucu yatağa emdirilen yağın eksilmesi, yağın özelliğinde kayıpların (fiziksel ve yağlama özelliklerinde olumsuz gelişmelerin olması vb.. gibi ) oluşabilmesi, gözeneklere aşınma partiküllerinin girip gözeneklerin tıkanması vb. gibi nedenlerden kaynaklanmış olabilir.

Tam değişken yükte yapılan deneylerde elde edilen her 200 000 çevrimdeki sürtünme kuvvetleri ve sürtünme katsayıları bu çevrim aralığındaki değişimlerinin ortalaması hesaplanarak Çizelge 6.2.'de verilmiştir. Belli bir çalışma süresinden sonra sürtünme katsayılarındaki artış Çizelge 6.2.'de verilen ortalama sürtünme katsayılarında da rahatlıkla anlaşılabilir.

Günümüzde kendinden yağlamalı sinter yataklar otomotiv sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ağır diesel motorlarında supap sistem elemanlarında (supap kayıtları, supap tablaları, kolları, ve kam izleyicileri vb..) yetersiz yağlamanın gerçekleştiği ve/veya yağsız çalışma şartlarında kendinden yağlamalı yataklar için yeni uygulama alanları bulmuştur(Gimondo ve diğerleri, 1997). Bu tip sistemlerde yükler değişken karakterlidirler. Bu nedenle çalışmada gerçek çalışma şartlarına uygunluk olması nedeniyle dinamik yük çeşitlerinden titreşimli ve tam değişken yüklemelerde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca otomotiv parçaları gibi benzer uygulamalarda makine elemanları yağlama devresi ile bağlantılı olmasına rağmen bazen yeterli olarak yağlanamamaktadır. Yataklarda milin ilk harekete başladığı veya durduğu anda olduğu gibi genellikle pompalarda aynı güç kaynağı ile tahrik edildiğinden yeterli yağ gönderilmemekte ve yüzeyler arasında yeterli yağ filmi oluşmamaktadır. Ayrıca PM esaslı kendinden yağlı yataklarda da ise belli bir çalışma süresinden sonra emilen yağ miktarında bir kayıp meydana

gelmektedir. Bu yağ miktarının azalması da sürtünme katsayılarının ve aşınmanın artmasına neden olacağı bir beklenen bir olaydır. Bu nedenle taşıtlarda olduğu gibi şiddetli çalışma şartlarına sahip uygulamalarda yatağa zaman zaman çok düşük debili de olsa yağ ile beslenmesi sürtünme ve aşınma yönünden olumlu bir uygulama olacaktır.

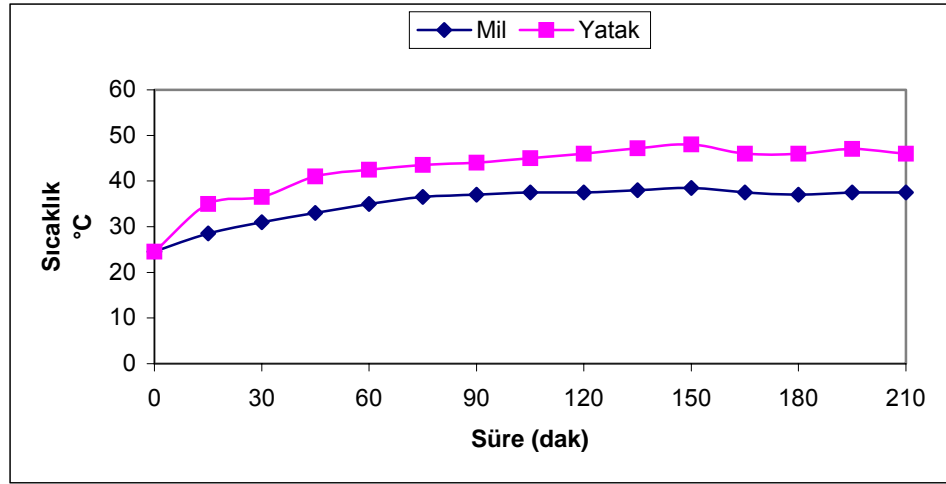
Çizelge 6.2. Deneylere ölçülen sürtünme kuvvetleri ve sürtünme katsayılarının ortalama değerleri

Deney No	Ortalama Sürtünme Kuvveti ( $F_{S_{ort}}$ [N])	Ortalama Sürtünme Katsayısı ( $\mu_{ort}$ )
1.1	30.287	0.1211
1.2	33.552	0.134
1.3	33.036	0.132
1.4	30.810	0.123
1.5	33.44	0.133
1.6	33.99	0.136
2.1	30.835	0.0881
2.2	29.89	0.0854
2.3	35.56	0.1016
2.4	33.504	0.0957
2.5	43.987	0.1250
3.1	22.575	0.1128
3.2	21.486	0.1074
3.3	22.792	0.1139
3.4	19.416	0.0970
3.5	18.853	0.0940
3.6	21.579	0.1078
3.7	27.548	0.1377

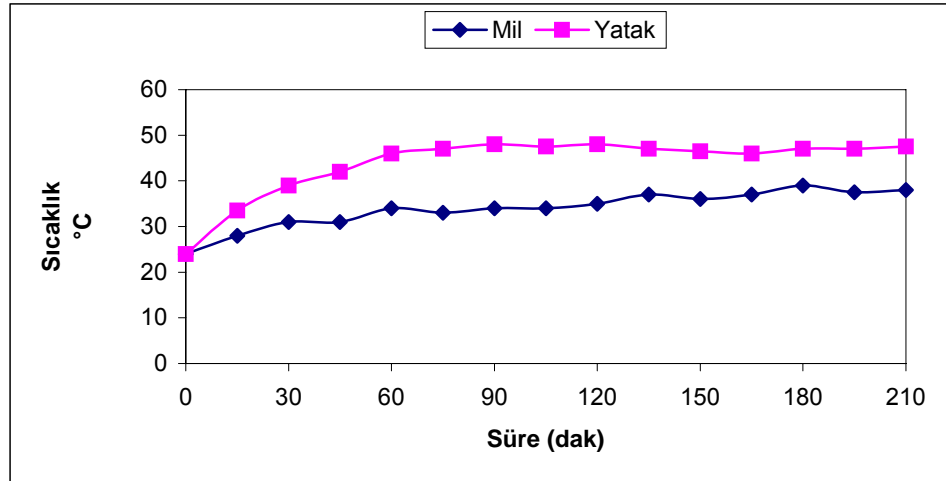
Çizelge 6.2.'deki ortalama sürtünme katsayıları dikkate alındığında söz konusu deney şartlarının sınır ve/veya karışık film sürtünme bölgesinde olduğu aşikardır. Yani yatak ile mil yüzeyi arasında tam sıvı filmin oluşmadığı anlaşılmaktadır.

## 6.2. Mil ve Test Yatak Sıcaklık Ölçümleri

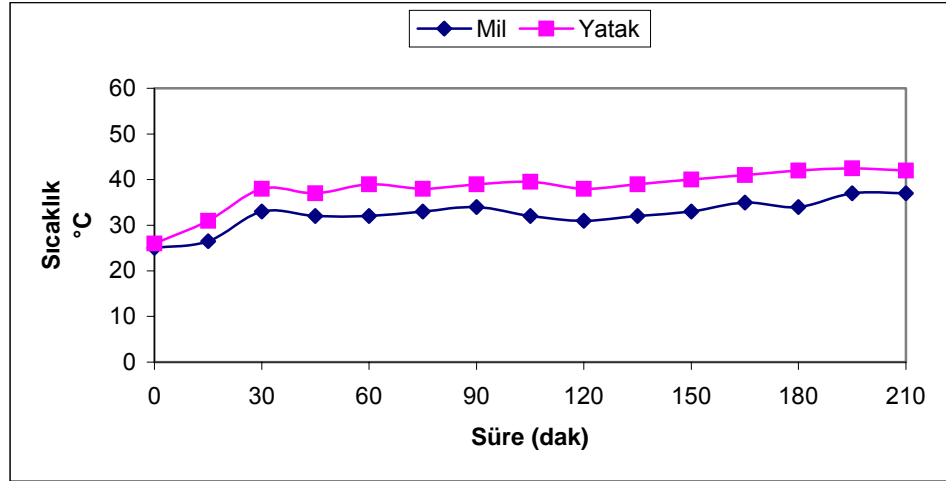
Kuvvet ölçüm diskleri ve yatak kepine açılan 3 mm derinliğindeki kanallara(18), dijital sıcaklık ölçüm cihazının termokupol uçları sokularak yatak sıcaklıklarını ve gövdenin hemen yanında da mil sıcaklıklarını takip etmek mümkün olmaktadır. Deneysel boyunca hem yatak sıcaklıkları hem de mil sıcaklıkları da ölçülerek grafik halinde Şekil 6.38-6. 55. de verilmiştir.



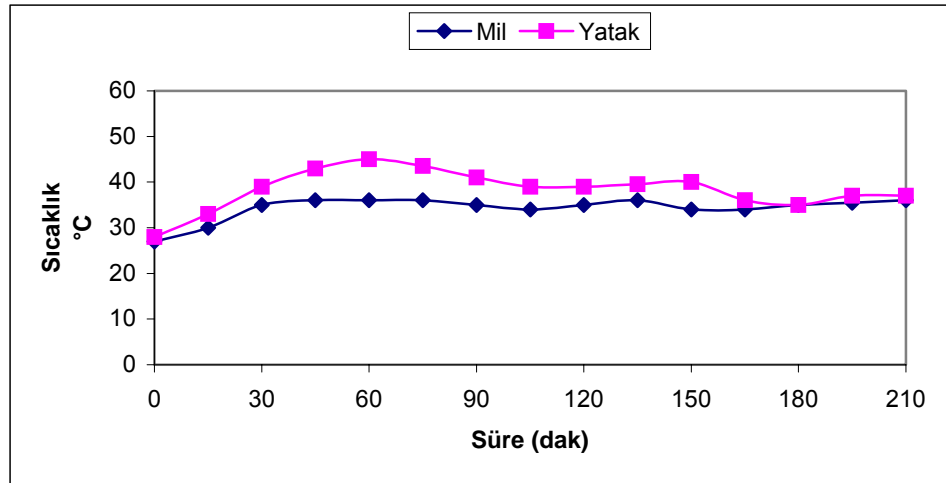
Şekil 6.38. Deney 1.1 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



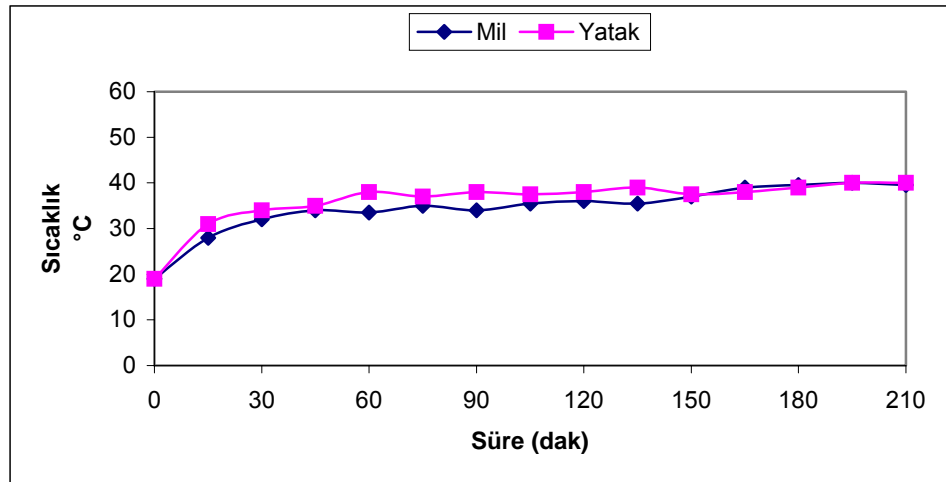
Şekil 6.39. Deney 1.2 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



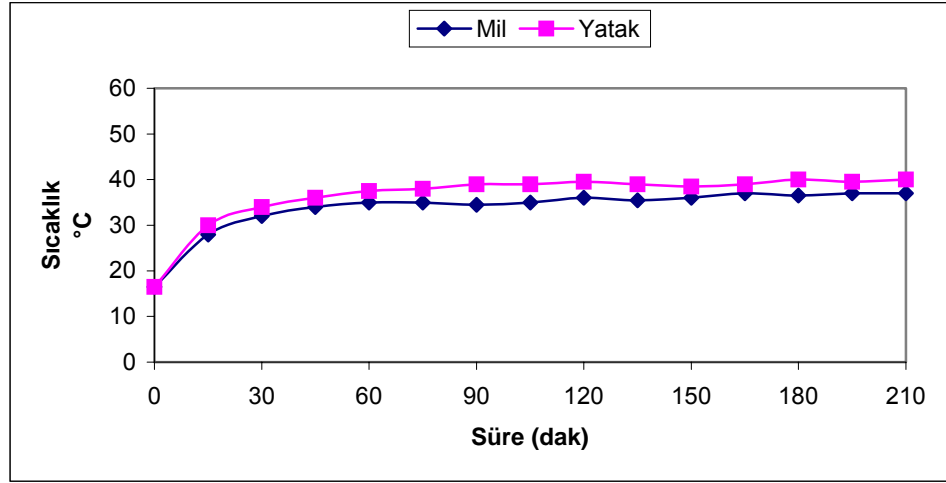
Şekil 6.40. Deney 1.3 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



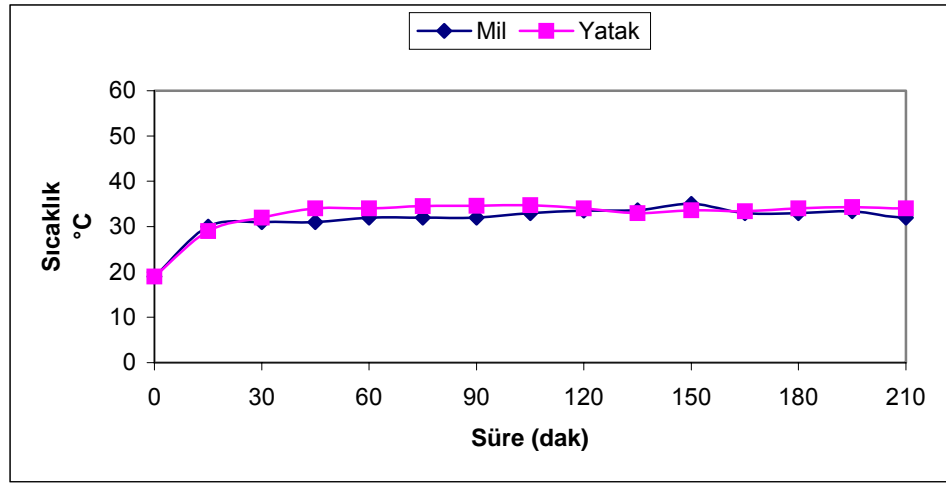
Şekil 6.41. Deney 1.4 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



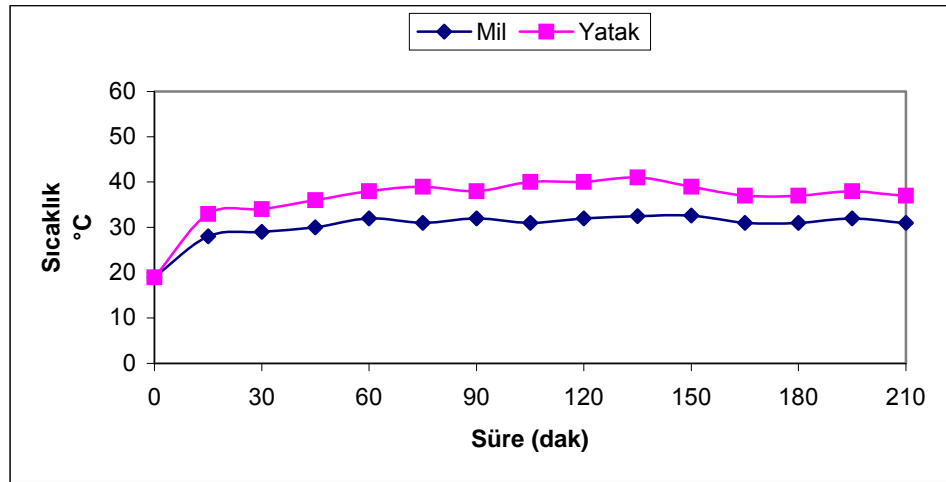
Şekil 6.42. Deney 1.5 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



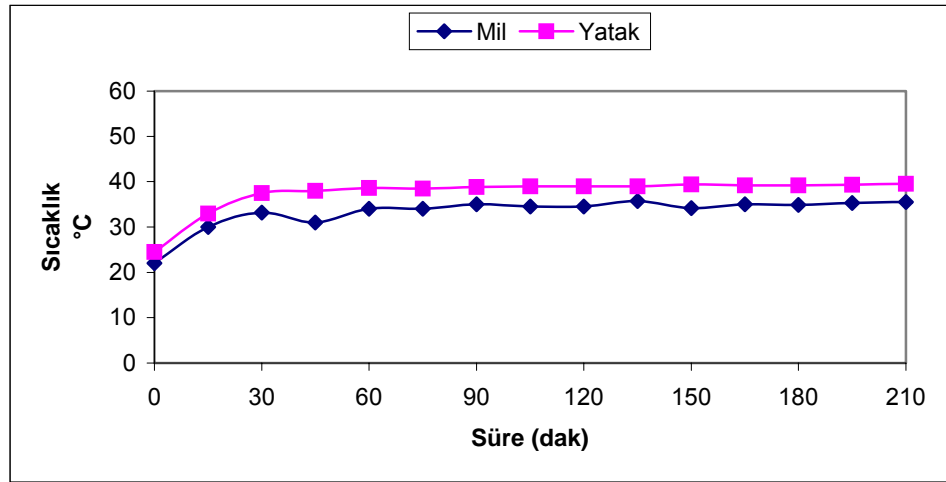
Şekil 6.43. Deney 1.6 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



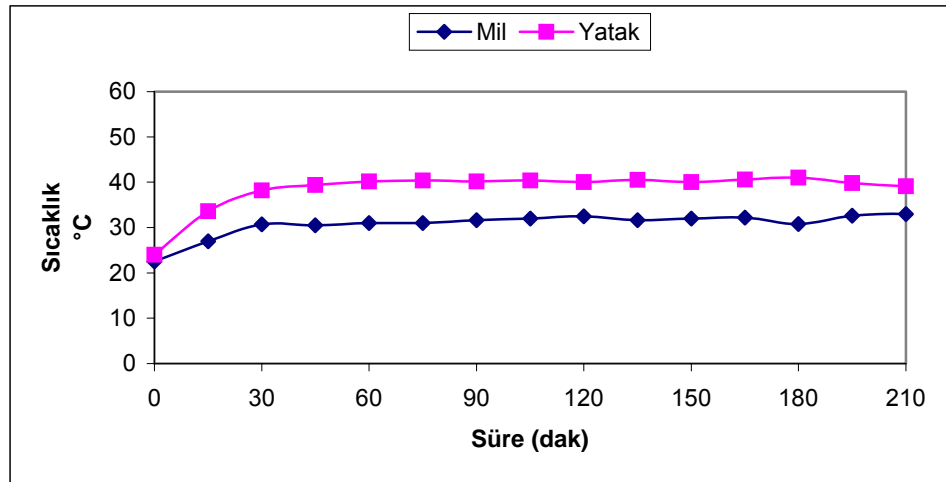
Şekil 6.44. Deney 2.1 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



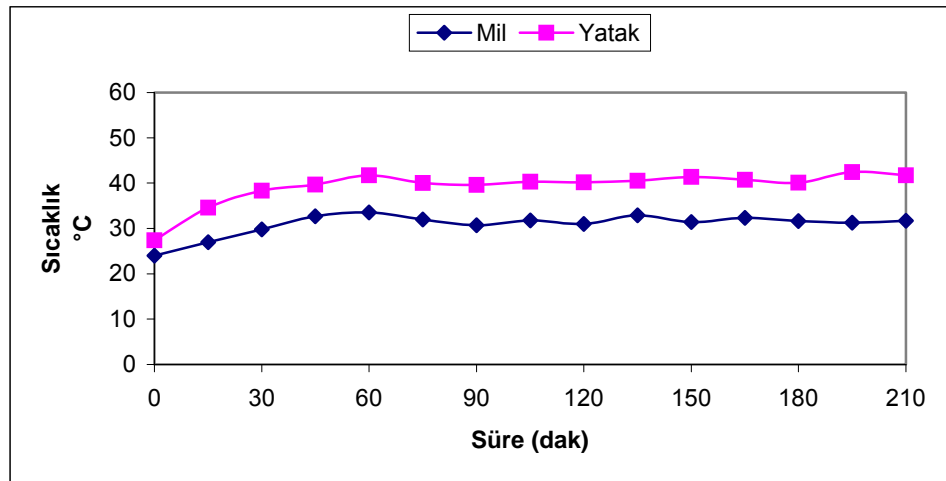
Şekil 6.45. Deney 2.2 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



Şekil 6.46. Deney 2.3 için mil ve yatak sıcaklık değişimi

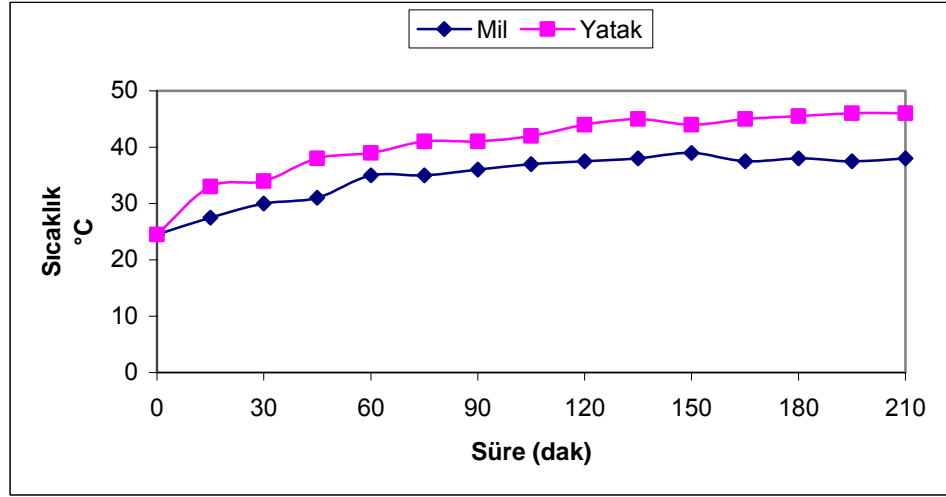


Şekil 6.47. Deney 2.4 için mil ve yatak sıcaklık değişimi

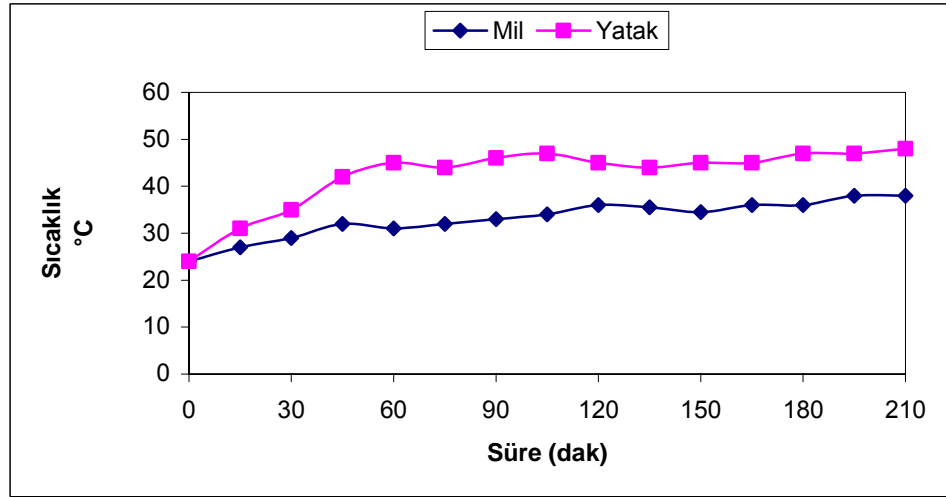


Şekil 6.48. Deney 2.5 için mil ve yatak sıcaklık değişimi

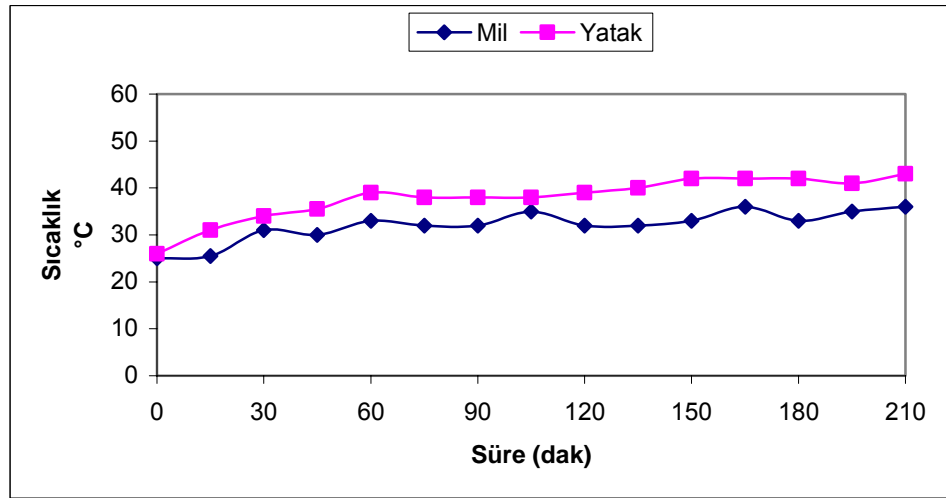




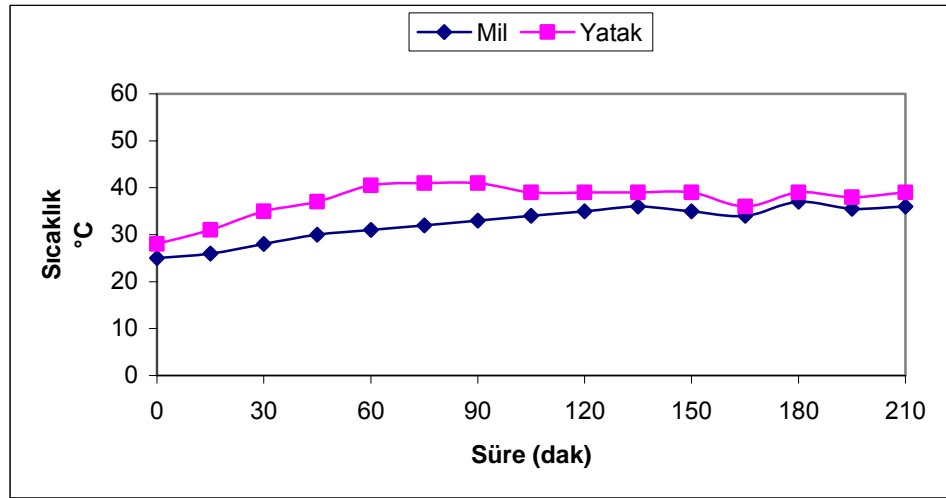
Şekil 6.49. Deney 3.1 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



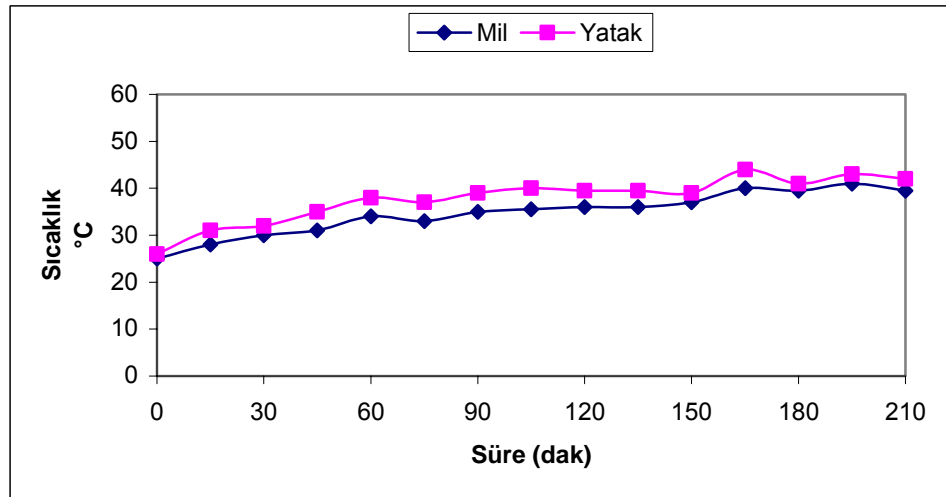
Şekil 6.50. Deney 3.2 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



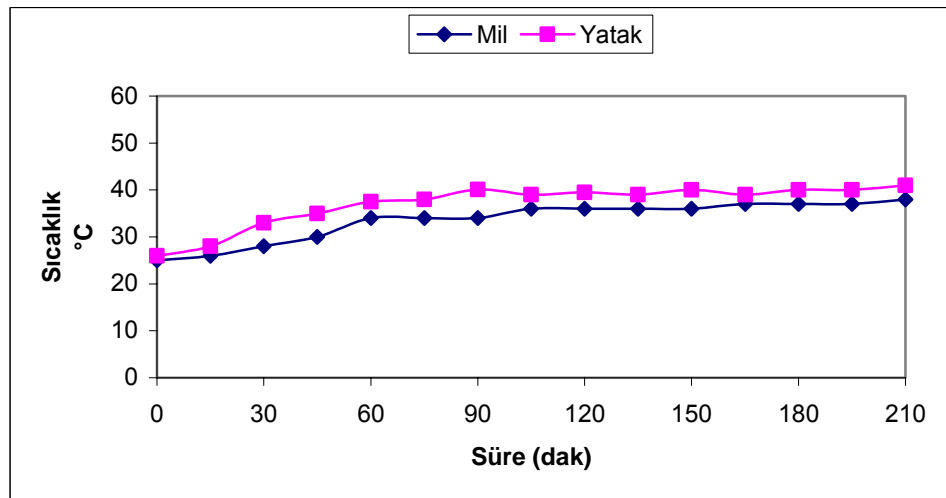
Şekil 6.51. Deney 3.3 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



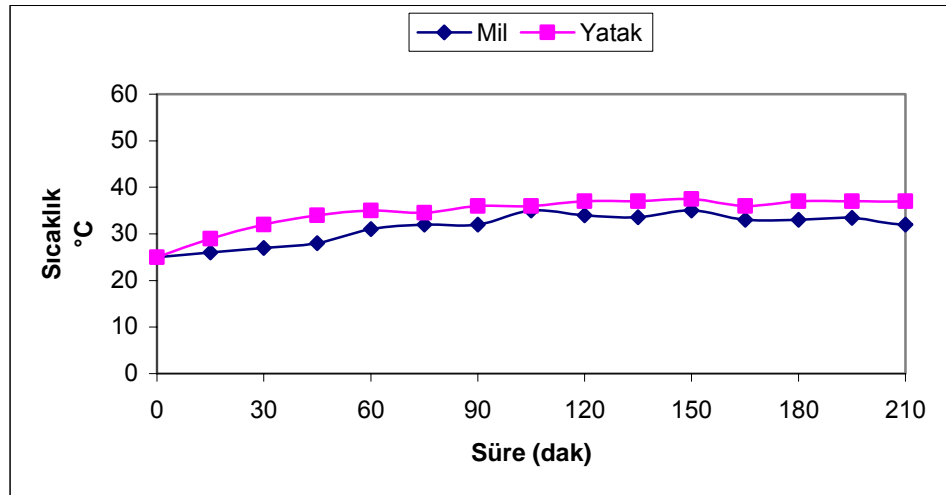
Şekil 6.52. Deney 3.4 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



Şekil 6.53. Deney 3.5 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



Şekil 6.54. Deney 3.6 için mil ve yatak sıcaklık değişimi



Şekil 6.55. Deney 3.7 için mil ve yatak sıcaklık değişimi

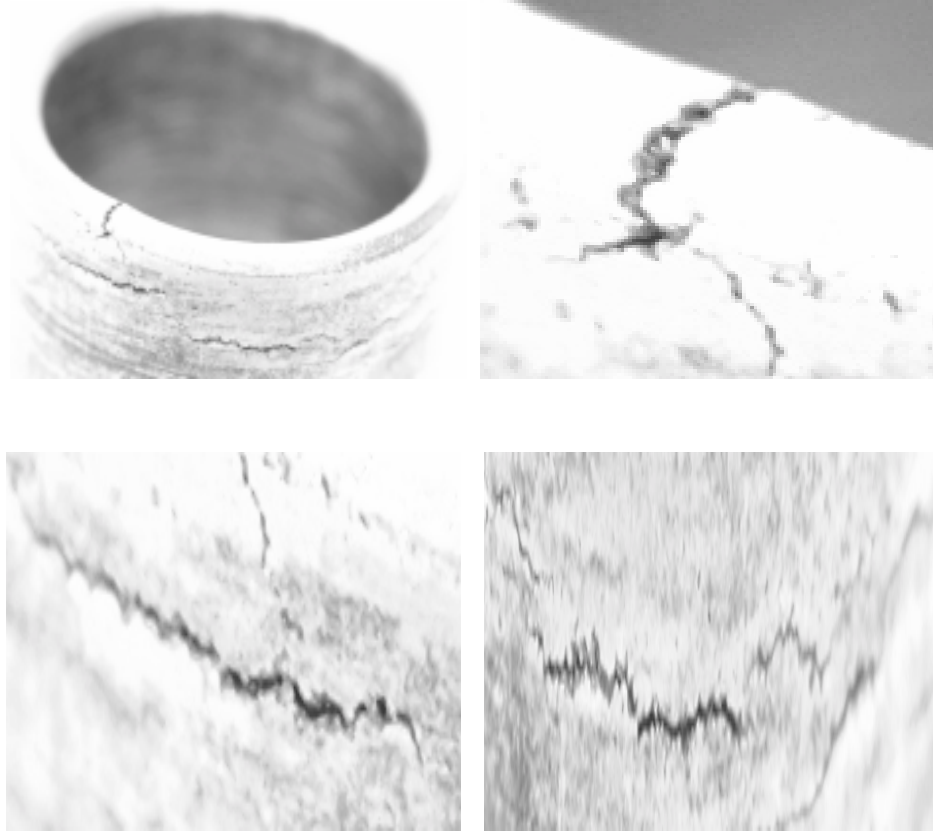
Grafiklerden de anlaşılacağı üzere yatak sıcaklıkları mil sıcaklıklarından az da olsa bir miktar yüksek değerler almaktadır. Ayrıca hem mil hem yatak sıcaklıklarında önce ani bir artış daha sonra sabit yakın bir değer alıp bu değerde çok az bir değişim göstermektedir. Mil sıcaklıklarının farklı olması milin hareketli, daha uzun boyutlu olması ve ısı transferi nedenlerinden kaynaklanabilmektedir. Maksimum sıcaklık olarak yaklaşık tüm deneylerde 35-40°C civarına kadar yükselmekte ve bu sıcaklıklarda daha sonra genellikle sabit kalmaktadır.

### 6.3. Yatak Yüzey İncelemeleri

Bronz esaslı toz metal ile üretilmiş test numunelerinin deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları Şekil 6.56 ve 6.57. görülmektedir.



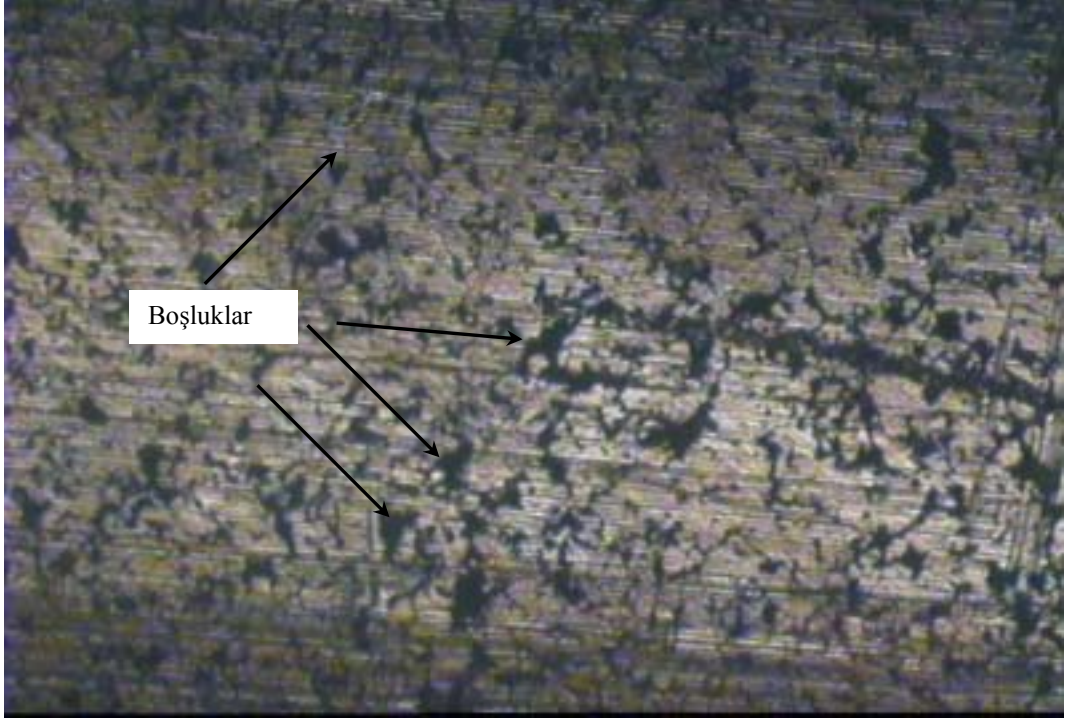
Şekil 6.56. Test yataklarının deneyden önceki ve sonraki görünümleri



Şekil 6.57. Hasara uğrayan örnek test numunelerindeki hasar ve çatlakların fotoğrafları

Test numunelerinin deney öncesi yüzey filmleri Şekil 6.58. ve 6.59'da görülmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere yapıdaki gözeneklikler oldukça homojen şekilde dağılmış görülmektedir. Yağlar üretim sırasında bu boşluklara hapsedilmekte, işletme sırasında sıcaklık ve basıncı etkisiyle yağlar buradan yatak yüzeyine doğru hareket ederek bu yüzeylerde uygun bir yağlama görevi yapmaktadır. Deney sonrası yüzey filmleri ve oluşan çatlakların filmleri Şekil 6.60-6.71.'lerde görülmektedir. Deney numunelerinde Test 1 de 1 200 000 çevrimde hasar hem gözle hem de iç yapı fotoğrafları ile tespit edilmiştir. Test 2 de ise yükün şiddeti biraz daha büyük olduğundan 1 000 000 çevrimde hasar tespit edilmiştir. Test 3 de ise 1 400 000 çevrimde herhangi bir hasar tespit edilmediğinden deneye son verilmiştir. Yüzey filmleri incelendiğinde genellikle çatlaklar yatakların dış yüzeylerinde görülmüştür. Ayrıca bir çatlak ilerlerken aradaki gözenekler çatlakın ilerlemesini kolaylaştırması muhtemeldir. Çünkü burada kesit küçüleceğinden, oluşan gerilmeler daha kolay hasarın meydana gelmesine neden olabilecektir. İncelenen numunelerdeki hasarlı

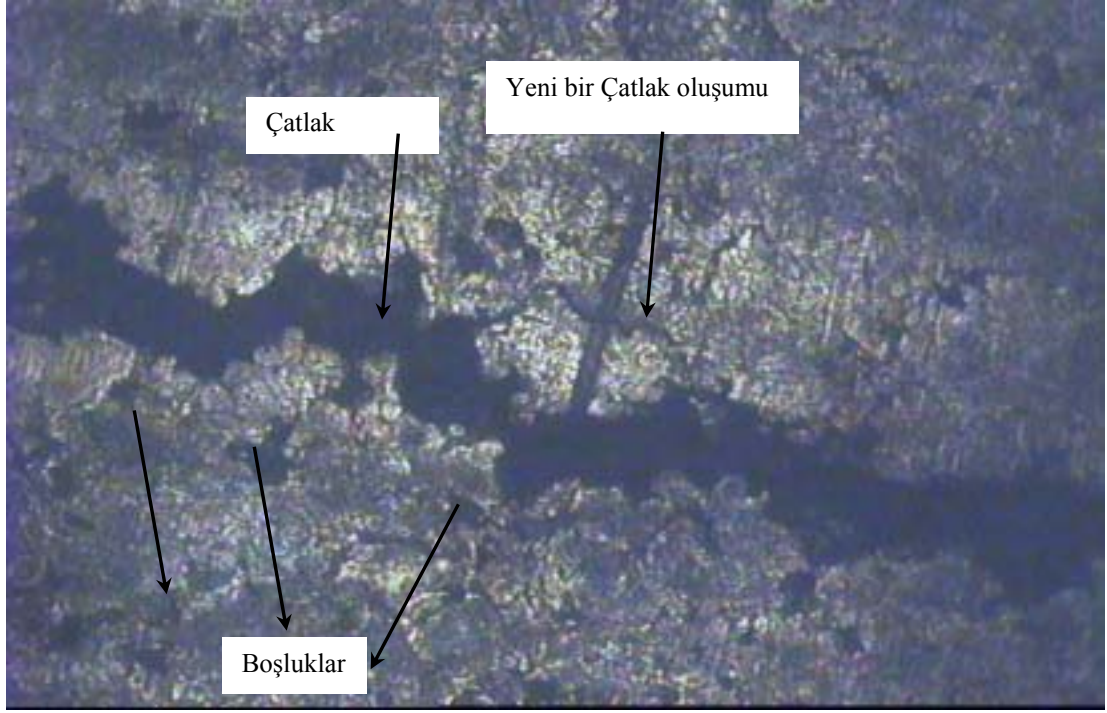
bölgelerde çatlaklar daha çok tanelerin birbirine yapışma yerlerinde ilerlediği yüzey fotoğraflarında görülebilmektedir.



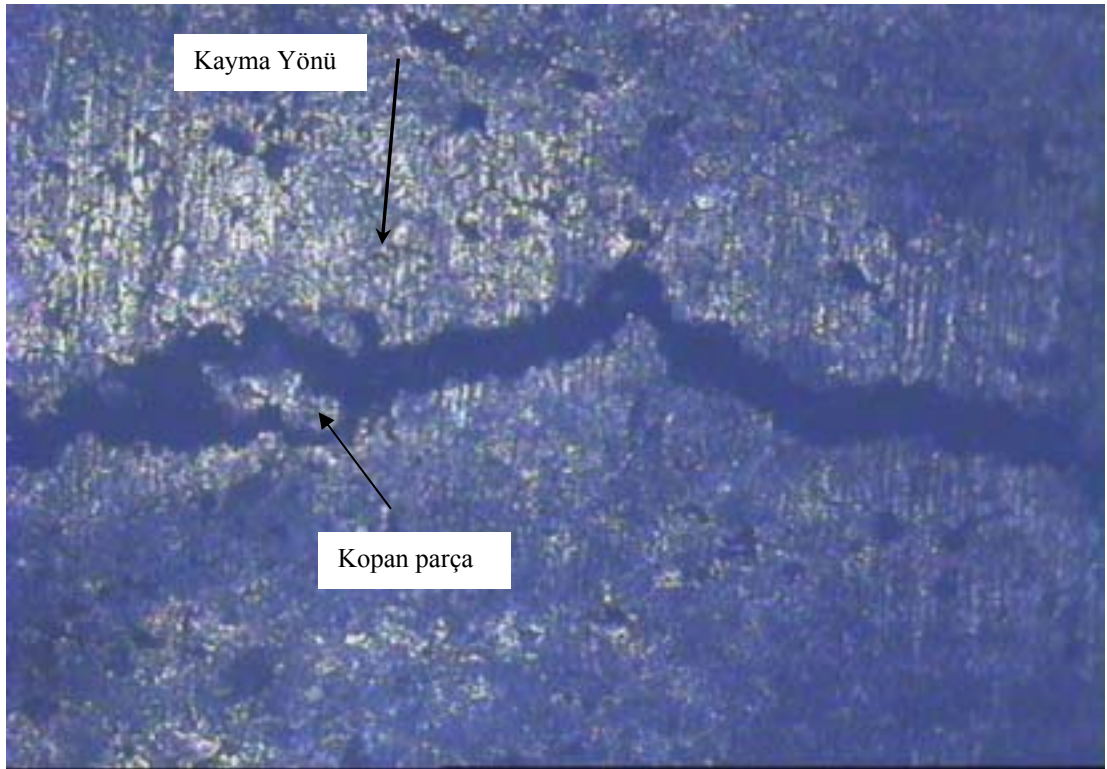
Şekil 6.58. Kullanılmamış yeni yatak numunesinin yüzey görünümü(—|12  $\mu\text{m}$ )



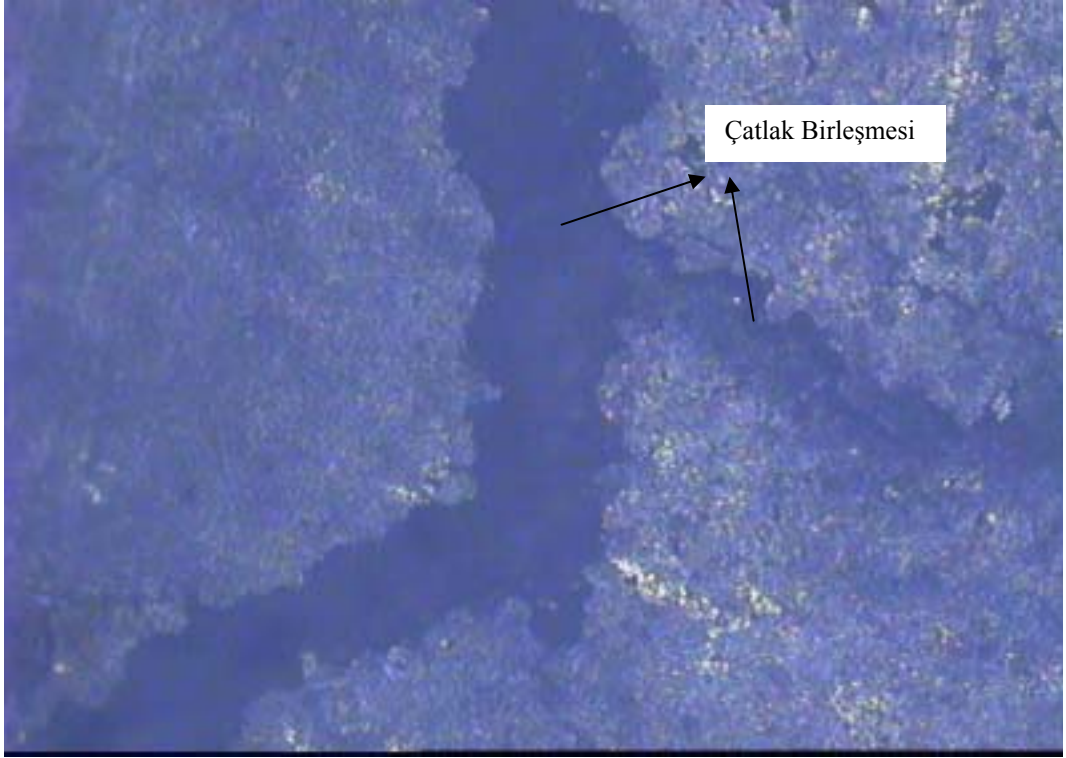
Şekil 6.59. Kullanılmamış yeni yatak numunesinin yüzey görünümü(—|12  $\mu\text{m}$ )



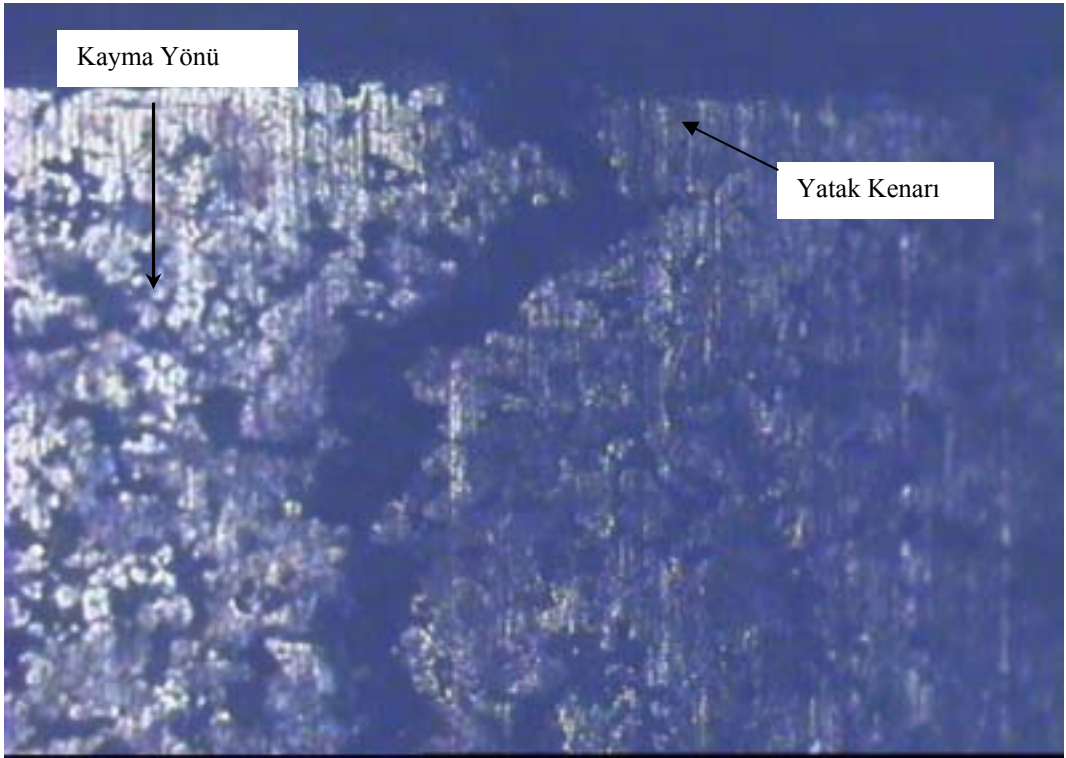
Şekil 6.60. 1 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d) çatlak görünümü (12 μm)



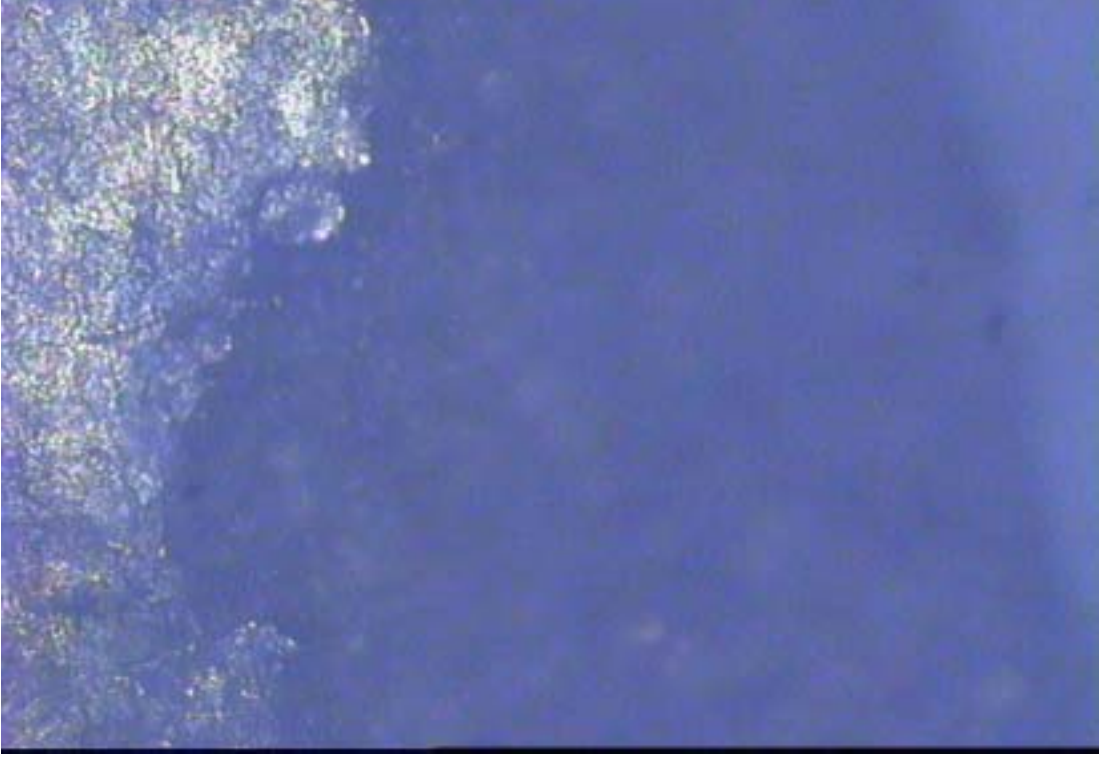
Şekil 6.61. 1 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 250$  N ve  $n = 1000$  d/d ) çatlak görünümünün devamı (12 μm)



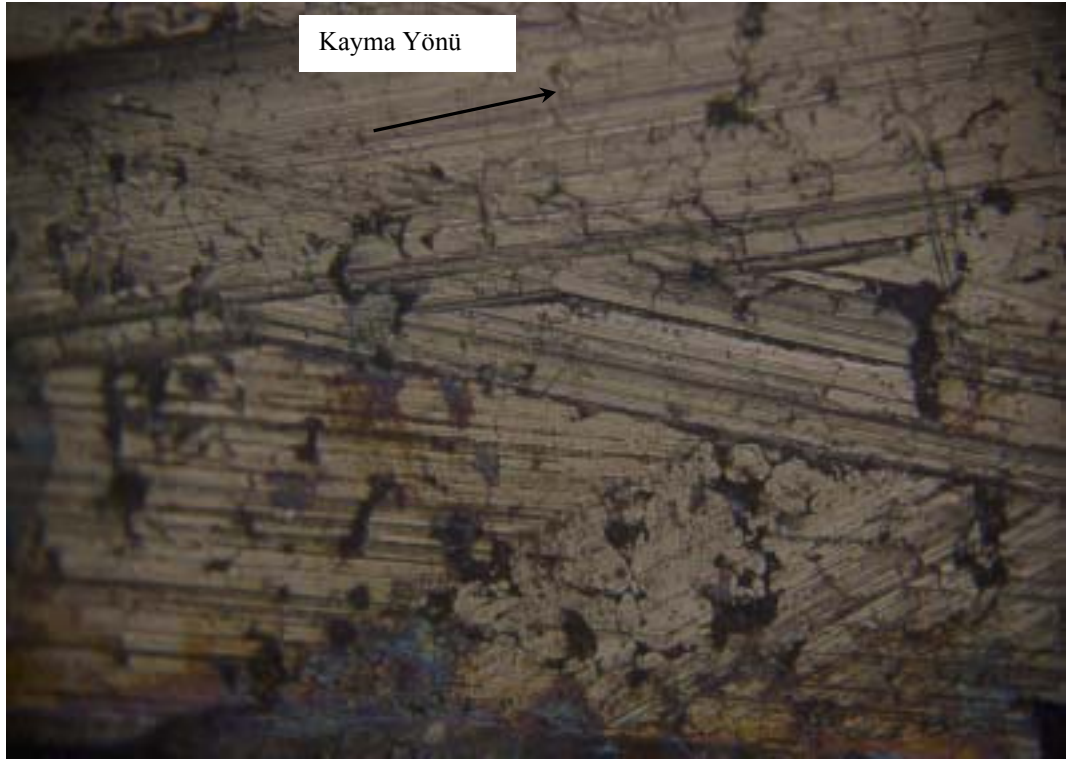
Şekil 6.62.1. nolu deney numunesinin ( $F = \pm 250$  N,  $n = 1000$  d/d) diğer bir çatlak görünümü (|—|12  $\mu$ m)



Şekil 6.63. 2 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 350$  N ve  $n = 830$  d/d ) çatlak görünümü (|—|12  $\mu$ m)

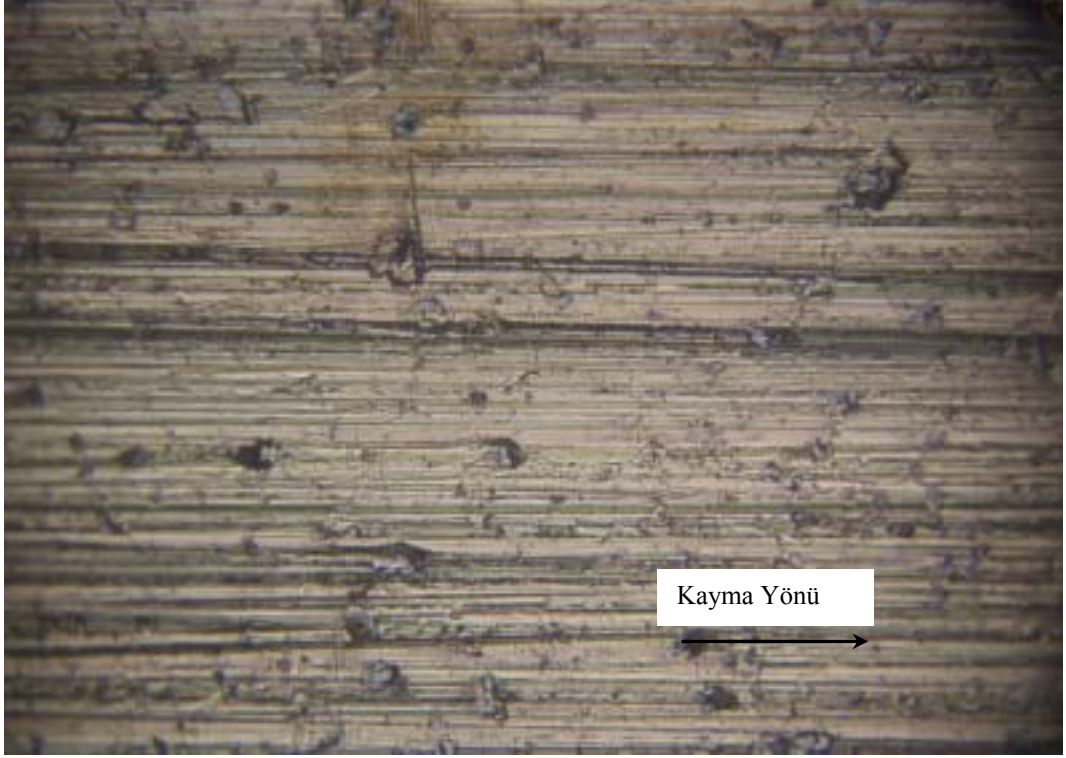


Şekil 6.64. 2 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 350$  N ve  $n = 830$  d/d) yatak kenarında hasar sonucu kopan kısım (←—→ 12  $\mu$ m)

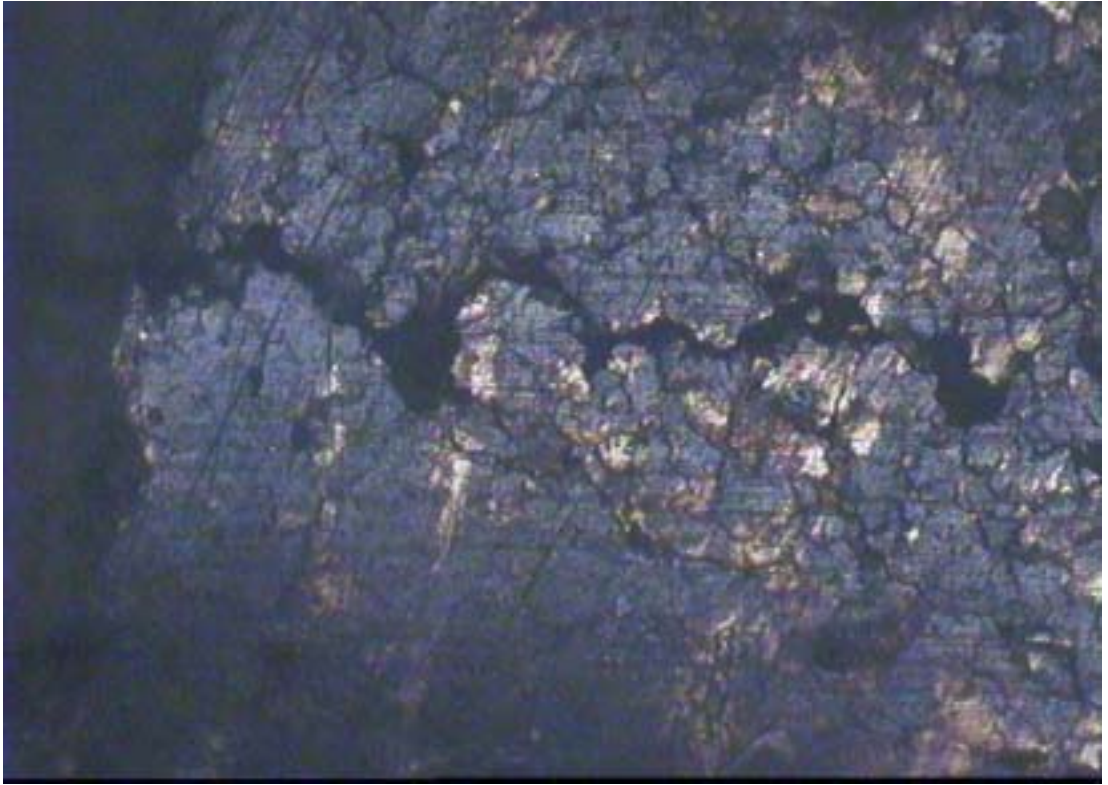


Şekil 6.65. 3 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d) yüzey filmi aşınma izleri (←—→ 12  $\mu$ m)

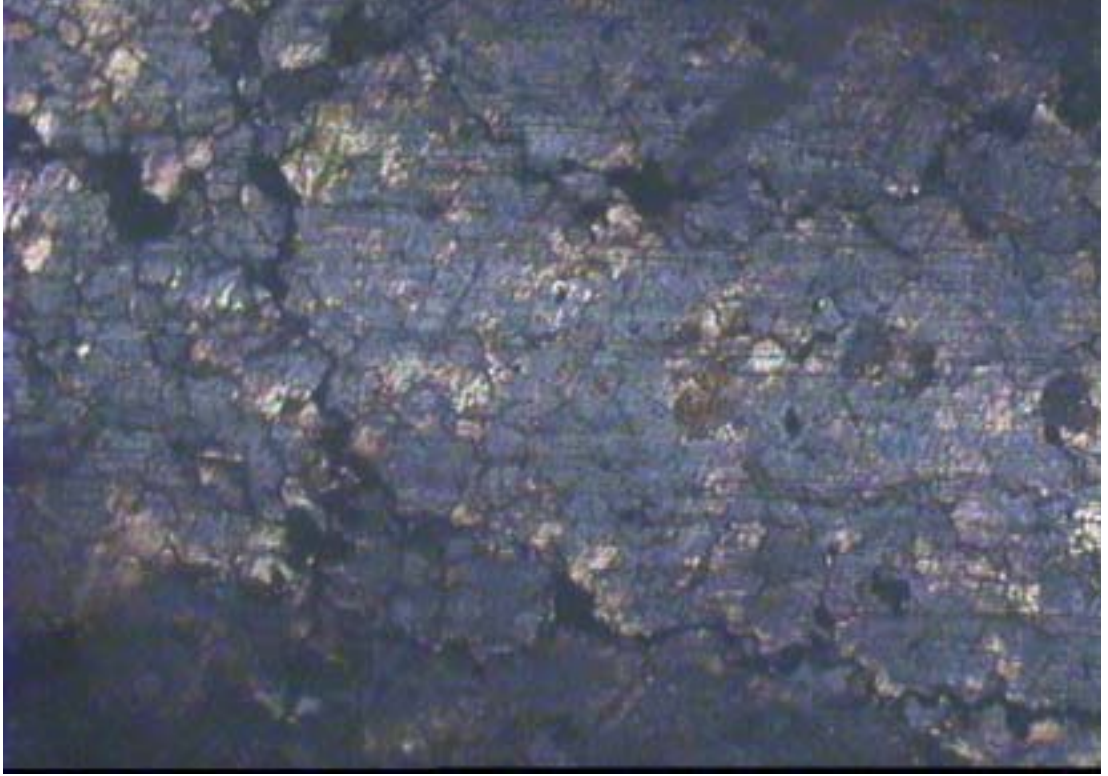




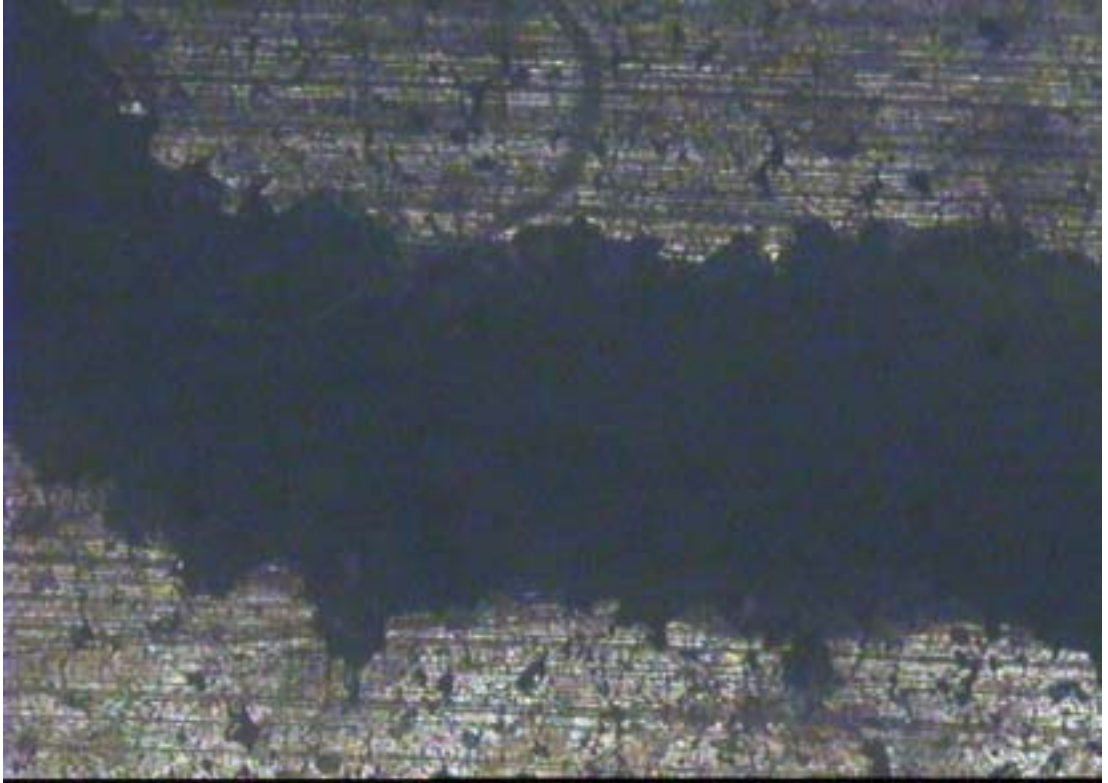
Şekil 6.66. 3 nolu deney numunesinin ( $F = \pm 200$  N ve  $n = 1200$  d/d) aşınma izleri (|—|12  $\mu$ m)



Şekil 6.67. Yataklarda çatlak ilerlemesi (|—|12  $\mu$ m)



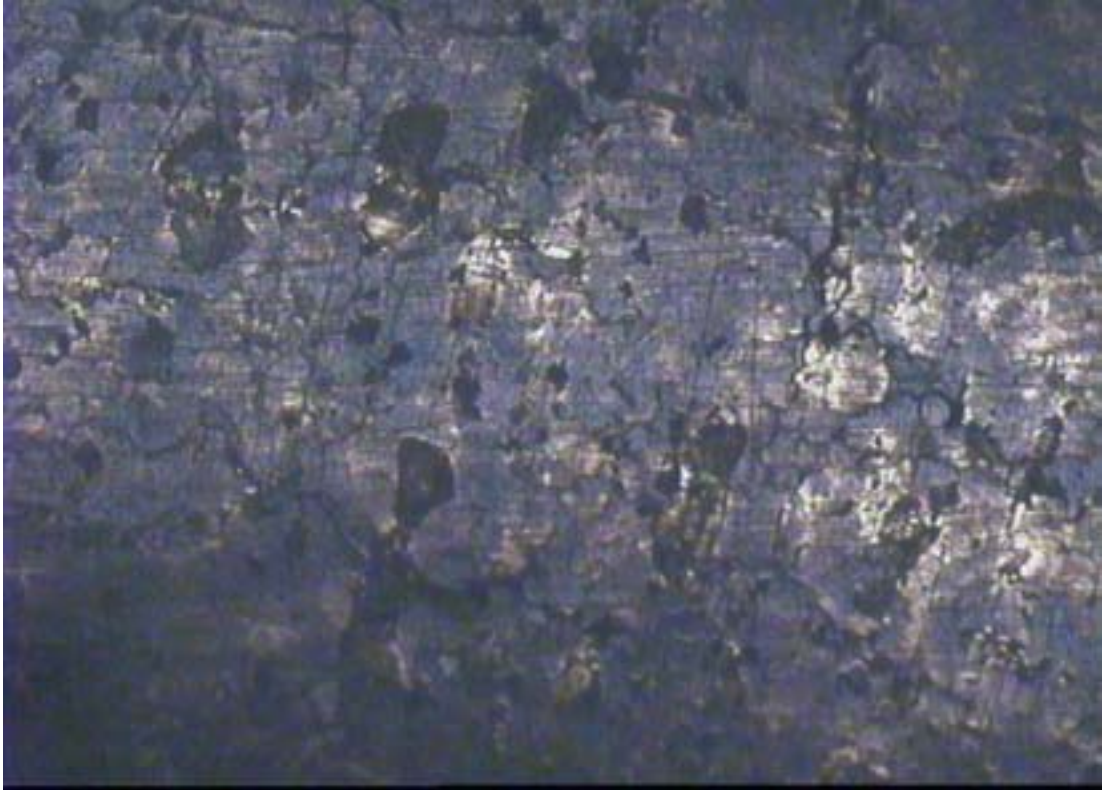
Şekil 6.68. Yataklarda farklı yönlerdeki çatlakların ilerlemesi (←—→12 µm)



Şekil 6.69. Yataklarda çatlak ilerlemesi sonucu yatağın parçalanması (←—→12 µm)



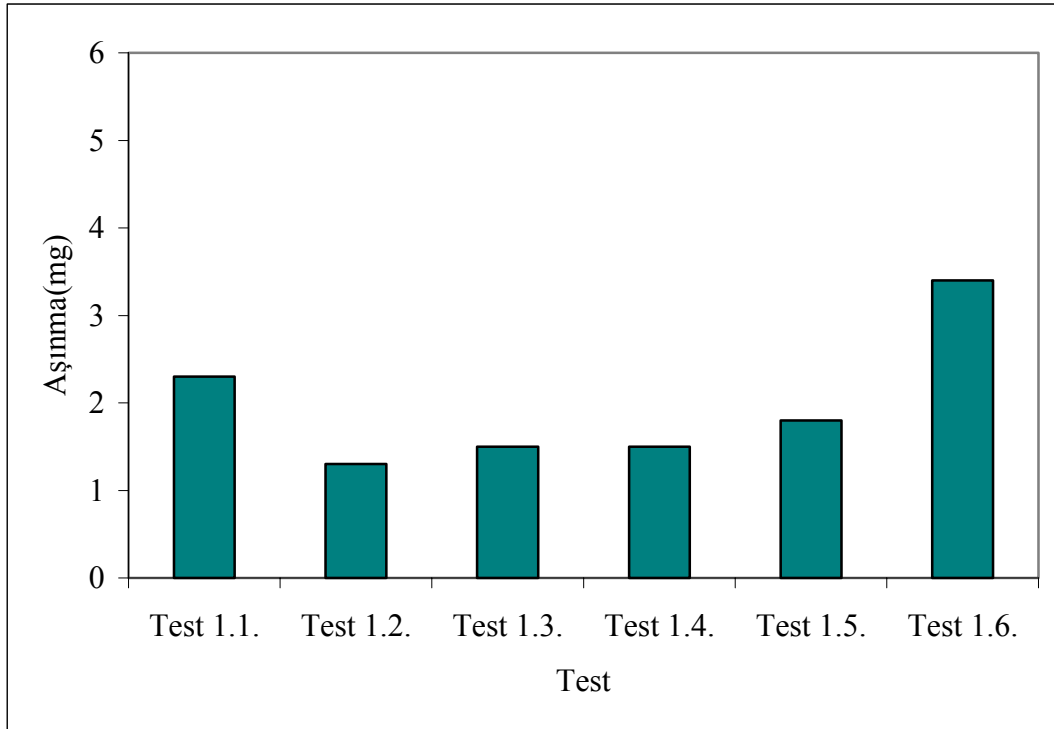
Şekil 6.70. Yataklarda ilk çatlakların oluşumu ilerlemesi (┆—┆12 μm)



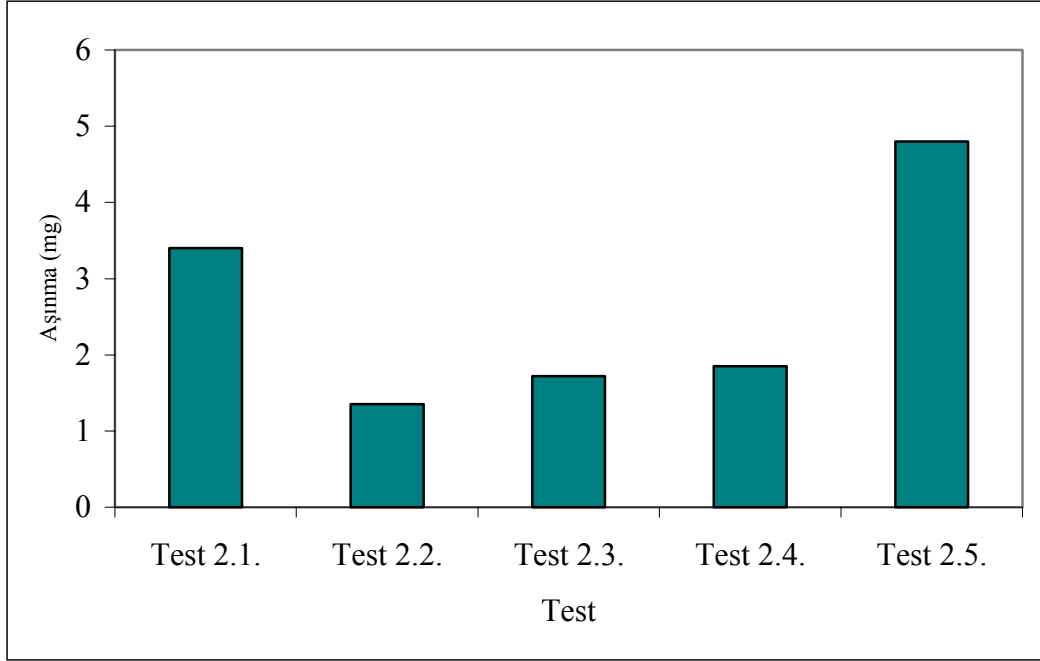
Şekil 6.71. Yataklarda ilk çatlakların oluşumu ilerlemesi (┆—┆12 μm)

#### 6.4. Aşınma Test sonuçları

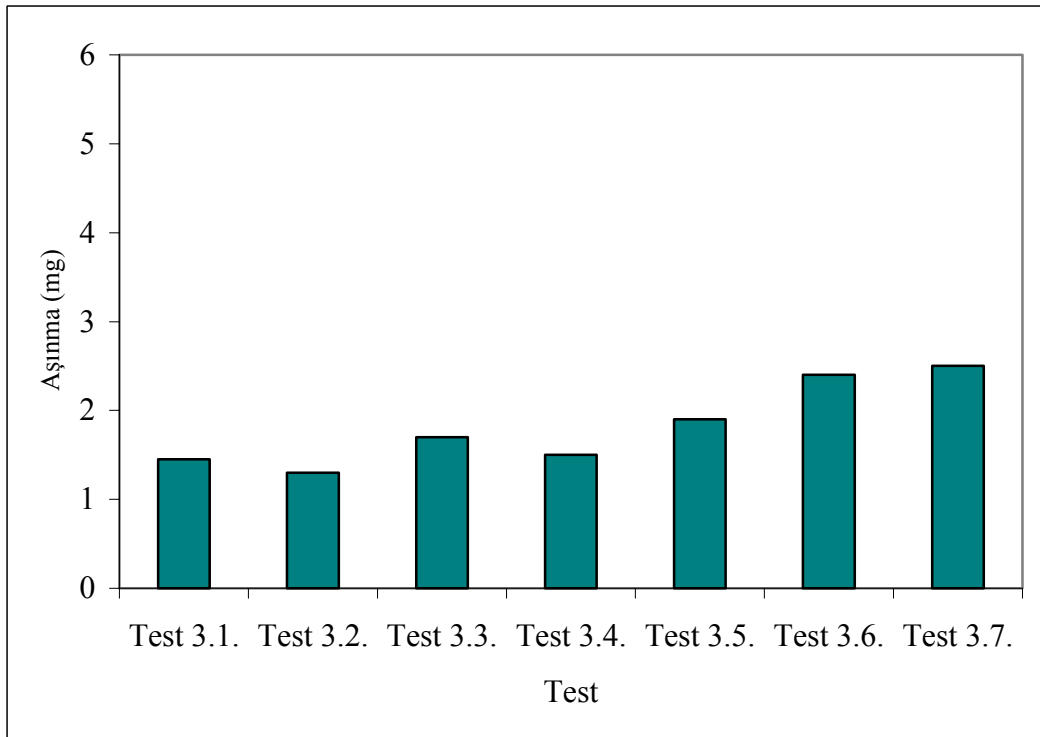
Aşınma deneyleri milin 200 000 çevrimine karşı gelen sürelerde yapılmıştır. Bu nedenle Test 1, 1200 000 çevrime tekabül eden 6 defa aşınma test ölçümü, Test 2, 1000 000 çevrimde 5 defa, Test 3 ise 1 400 000 çevrimde 7 defa aşınma miktarı ölçülmüştür. Aşınma miktarları mg olarak ağırlık kaybından belirlenmiştir. Numuneler deney öncesi hegzan ile temizlenip hava kurutucu ile kurutulmuştur. Daha sonra hassas terazi de tartılmıştır. Şekil 6.71.'de Test 1.'e ait aşınma miktarı, Şekil 6.72.'de Test 2.'e ait aşınma miktarı Şekil 6.73.'de Test 3'e ait aşınma miktarı grafik halinde verilmiştir. Şekildeki grafiklerde görüldüğü üzere ilk rodaj olarak adlandırılan alıştırma safhasında aşınma miktarları normal olarak oldukça yüksek değerler almakta, daha sonra normal çalışma süresinde normal aşınma değerleri ve hasara uğrayan Test 1 ve 2 nolu numunelerde aşırı bir aşınma meydana geldiği görülmektedir. Deneylerde elde edilen ortalama aşınma miktarları ise 1 000 000 çevrim için Şekil 6.74.'te grafik halinde verilmiştir. Diğer malzemeli yataklarda olduğu gibi Toz Metalurjisi esaslı yataklarda yapılan deneylerde aşınma davranışını üç safhada oluşmaktadır.



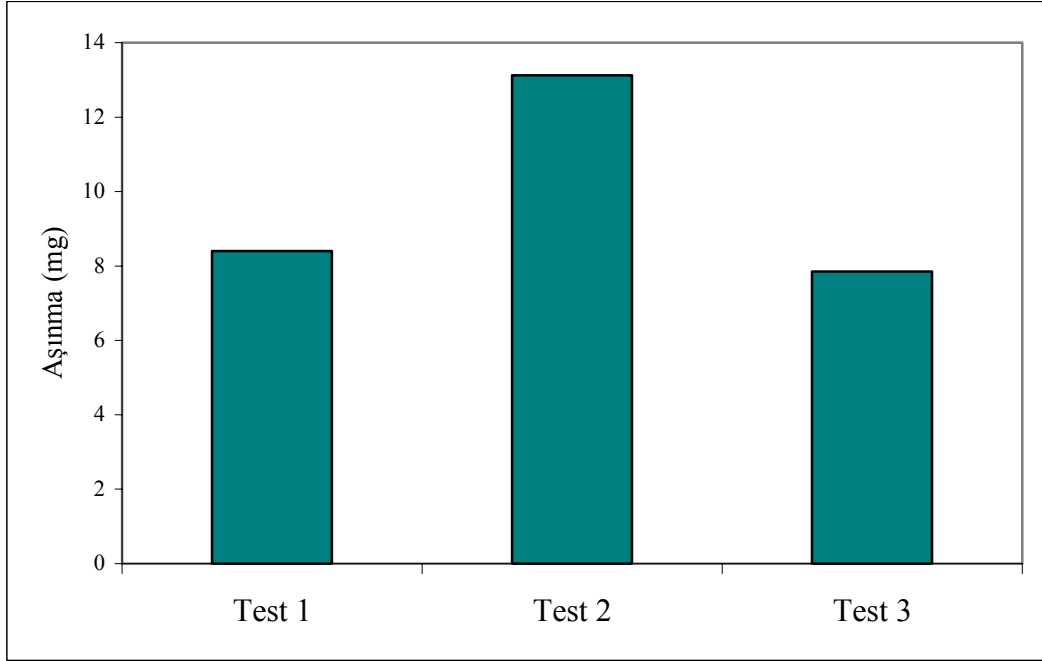
Şekil 6.71. Test 1'e ait aşınma sonuçları



Şekil 6.72. Test 2'e ait aşınma sonuçları



Şekil 6.73. Test 3'e ait aşınma sonuçları



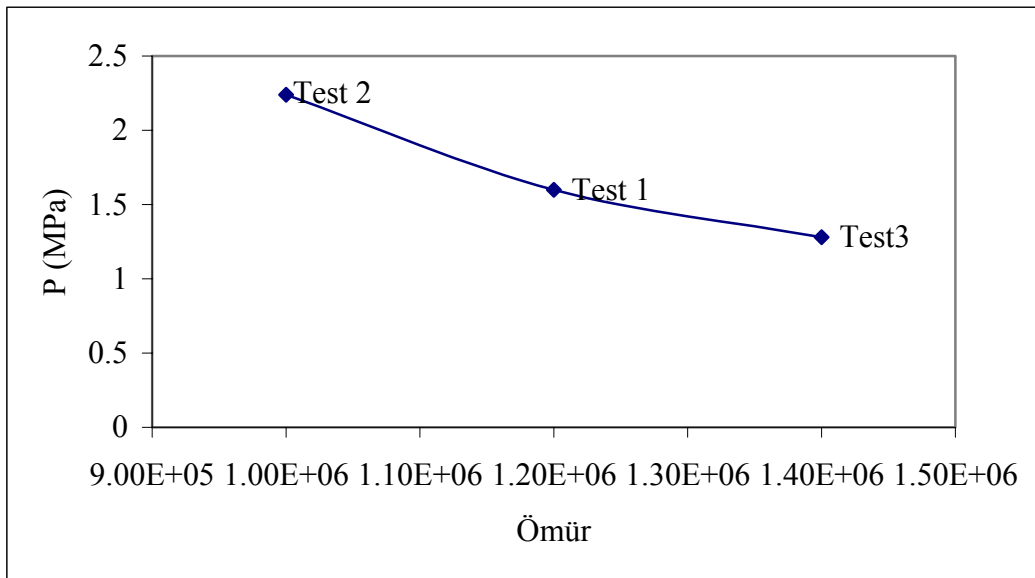
Şekil 6.74. Toplam aşınma miktarları

Test 1 için  $PV = 60 \text{ MPa m/dakika}$ , Test 2 için  $PV = 70 \text{ MPa m/dakika}$ , Test 3 için  $PV=58 \text{ MPa m/dakika}$  olarak hesaplanmıştı. 1 000 000 çevrime karşılık gelen aşınma miktarlarını gösteren Şekil 6.74.'deki grafikten de görüldüğü gibi PV büyük olan Test 2 toplam aşınma miktarı daha fazla, daha sonra Test 1 gelmektedir. Tüfekçi'nin yapmış olduğu (2002) çalışmasında da görüldüğü gibi düşük PV değerlerinde aşınma değerleri daha düşük olmaktadır. İlk alıştırma bölgesindeki aşınma miktarlarının büyük çıkması, yatak ve mil yüzeylerindeki pürüzlerden oluşmaktadır. Bir süre sonra pürüzlerin ezilmesi sonrasında ise normal adhezyon aşınması olayı yataklarda sık görülen aşınma türüdür. Üçüncü safhadaki aşınmanın artmasında ise adhezyon aşınmasına ilave olarak aşınan yatak ve mil partiküllerinin neden olduğu abrazyon aşınma tipi de oluşabilmektedir.

### 6.5. Yorulma Diyagramı

Makine elemanlarında pratikte sabit yüklemelere ender olarak rastlanmaktadır. Makinelere ve dolayısıyla makine parçalarına, genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli

veya düzensiz olarak sürekli değişen kuvvetler ile çekme, basma, eğme ve/veya burulma momentleri tek veya birlikte etki etmektedirler. Değişken zorlanmalardan dolayı kırılma, söz konusu malzemenin akma sınırının çok altındaki gerilmelerde oluşabilir. Yorulma zorlamasında yük zamana bağlı olarak nasıl değiştiğinden çok, en alt ve en üst sınır değerlerinin büyüklüğü yani gerilme genliği çok önemli olup, yük değişimi genellikle sinüzoidal olarak kabul edilebilmektedir. Birim zamandaki çevrim sayısı çok düşük, örneğin, saatte birkaç çevrim veya malzemenin ısınmasına neden olacak kadar çok yüksek olmamak koşulu ile yorulma ömrünü önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu çalışmada uygulanan tam değişken formundaki 3 farklı test yüklerinde elde edilen yatak numunelerinin Wöhler ömür eğrisi yatak ortalama basıncına göre hesaplanıp Şekil 6.75.'te grafik halinde sunulmuştur. Daha önce de bahsedildiği gibi Test 1 ve Test 2.'de yataklarda hasar meydana gelirken Test 3'te yatakta 1400 000 çevrimde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir.



Şekil 6.75. Yatakların Yorulma eğrisi

Sunulan çalışmada deneylerin uzun süre alması ve tekrar sayısından dolayı sadece 3 farklı yatak basıncında deneyler yapılmıştır. Şekil 6.75. 'teki grafikten de görüldüğü gibi Test 1 ve Test 2. deney numunelerinin hasara uğraması nedeniyle yorulma grafiğinde zaman mukavemeti (sürelilik mukavemet) bölgesinde, Test 3 ise herhangi bir

hasara uğramadığı ve grafikte eğrinin yatay bir eğim aldığı anlaşılabilirdi için sürekli mukavemet bölgesinde olabileceği tahmin edilmektedir. Çünkü literatürdeki çalışmalarda da toz metaller için (Sarıtış, 2003) yaklaşık  $1 \cdot 10^6$  -  $1 \cdot 10^7$  çevriminden sonra sürekli mukavemet bölgesinde olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada seçilen boyuttaki ve malzemedeki toz metal esaslı yatak için, Test 3 çalışma şartları hasarın oluşmaması ve yorulma açısından (sürekli mukavemet bölgesinde ) daha uygun olduğu söylenebilir. Bu çalışmada seçilen ortalama yatak basınçlarından farklı yatak yük değerleri seçilerek, bu çalışmada seçilen test yatakları için yorulma ömür ilişkisi ve yorulma diyagramı daha detaylı incelenebilir.



## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Bu çalışmada daha önceki çalışmalarda tasarlanıp imalatı (Tunay, 2001, Karaaslan, 2001, Tüfekçi, 2002, Durak, 2002) Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında gerçekleştirilen deney seti ile piyasadan hazır olarak alınan, iç çapı 12 mm olan Toz Metal esaslı kaymalı yatakların sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı, aşınma miktarı gibi tribolojik özellikleri ile yorulma özellikleri araştırılmıştır.

2. Toz Metal esaslı yatakların en önemli özelliği olan kendinden yağlama özelliğinin çalışma süresinin bir fonksiyonu olma özelliği yapılan deneylerle kolaylıkla görülmektedir. Sürtünme katsayıları deney başlangıcında önce büyük değerler almakta, zamanla yatak sıcaklığının artması ile yağın kılcal etkisi nedeniyle ile yüzeye yayılması ve yatak yüzeyi ile mil yüzeyinin birbirine alışması sonucunda daha düşük sürtünme katsayıları elde edilebilmektedir.

3. Seçilen her üç deney şartı da PV emniyeti açısından emniyetli bölgede olmasına rağmen ( $PV_{\text{testler}} < PV_{\text{em}}=105 \text{ MPa m/dakika}$ ) ölçülen sürtünme katsayılarının büyüklüğü, genelde sınır veya karışık sürtünme katsayılarına yakın değerlerdir. Ancak deneylerde geçicide olsa hidrodinamik sürtünme bölgelerinde de ulaşılmıştır. Sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayıları grafiklerinde de bu farklı sürtünme bölgelerine zaman zaman geçildiği deney sonuçlarındaki dalgalanmalardan da anlaşılabilir. Bu dalgalanmaya ayrıca yükün değişken olması, oluşan ve önlenemeyen titreşimlerinde etkisi göz ardı edilmemelidir.

4. Yataklarda oluşan sürtünme katsayılarının çalışma süresine bağlı olduğu yapılan deneysel çalışmalarda da anlaşılmaktadır. Zamanla yatağa emdirilen yağlarda meydana gelen eksilme (akma, buharlaşma vb..) ve/veya oluşan aşınma partikülleri, yağ artıklarının vb.. gibi yataklardaki gözenekleri tıkayabilmesi nedeni ile sürtünme katsayılarında artış meydana gelebilmektedir. Raman ve Babu (1984) yaptıkları deneysel çalışmada da zamanla meydana gelen yağ kaybı ise sürtünme katsayısı ve yatak sıcaklığında artışlar olabileceği, yatağa sadece ilave birkaç damla yağ

ilavesiyle sürtünme katsayısının tekrar düştüğünü belirtmektedirler. Böylece toz metalürji esaslı yataklarda oluşan sürtünme katsayısının çalışma süresinin bir fonksiyonu olduğu sonucu sunulan çalışma ile uyumaktadır.

5. Yataklardaki sıcaklık artışı, mildeki sıcaklık artışından daha fazla olarak tespit edilmiştir. Bu sıcaklık artışı yatağa emdirilen yağın çalışma sırasında yüzeyler arasına daha kolay girmesi açısından olumlu bir özellik olarak düşünülmektedir.

6. Diğer malzemeli yataklarda olduğu gibi Toz Metalürjisi esaslı yataklarda da aşınma davranışı üç safhadan oluşmaktadır. Aşınma (rodaj), normal çalışma aşınması ve şiddetli aşınma olarak deneylerde belirlenmiştir.

7. Tüfekci'nin (2002) de çalışmasında belirttiği gibi Toz Metalürjisi esaslı yataklarda PV değeri arttıkça aşınma miktarı da artmaktadır.

8. Yatak numunelerinin yüzey filmlerinden; oluşan çatlakların genellikle yatakların dış yatak gövdesi ile temas eden yüzeyinde daha fazla olduğu, ayrıca bir çatlak ilerlerken yüzeydeki gözenek boşluklarının çatlağın ilerlemesine katkıda bulunduğu tahmin edilmektedir.

9. Yapılan Test 1 ve Test 2 deney sonuçlarındaki yataklarda oluşan hasar nedeniyle yorulma diyagramının ( Sürekli Mukavemet diyagramı) süreli mukavemet bölgesinde, Test 3 ise herhangi bir hasarın oluşmaması nedeni ile sonsuz ömür bölgesinde olabileceği düşünülmektedir. Bundan dolayı yapılan deneysel çalışma ile seçilen malzemeli ve boyutlu yatak örneği için Test 3 deki deney şartlarının ( Yük, hız, ortalama yatak basıncı, ...) daha uygun olabileceği görülmektedir.

10. İleride yapılacak çalışmalarda; aynı malzeme ve boyuttaki yatakları, bu çalışmada seçilen yük değerleri haricindeki yükler alınarak (aynı emniyetli PV bölgesinde kalmak şartı ile) yorulma ömür diyagramını daha detaylı incelenmesi mümkündür. Ayrıca farklı özelliklere ve katkı maddesi içeren farklı yağlayıcıların yataklara emdirilmesi ile üretilen yeni yatakların yorulma ömrüne ve mukavemetine

etkileri de detaylı olarak incelenebilir. Daha farklı çalışma şartlarında ( Yük Şiddeti, hız, farklı sıcaklıktaki ortamlarda, vb.) Toz Metalürji esaslı yatakların karakteristikleri deneysel incelenirse, pratikte oldukça yaygın karŐılaŐılan bu alıŐma Şartları için önemli veriler ve bulgular elde etmek mümkün olacaktır. Çünkü bu metotla üretilen yataklar otomotiv, tarım makinaları, ev aletleri vb.. gibi uygulama alanlarında her geçen gün büyük bir hızla yaygınlaŐmaktadır.

## 8. KAYNAKLAR

- Akkurt, M., 1990. Makina Elemanları. Cilt I, Birsen Yayınevi, s. 440, İstanbul.
- Altorfer, K. J., 1982. Zinc Alloys Compete with Bronze in Bearings and Bushings, Metal Progress, s. 29-31.
- Anik, S., 1996. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Birsen Yayınevi, s. 254, İstanbul
- Arslan, F., Cinbat S., Dönmez A.G., 1996. Gözenekli Bronz Yatak İmalinde Üretim Parametrelerinin Yatak Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, "1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı", s. 429-440. Ankara.
- Aslanoğlu Z., Kara, H., Öveçoğlu M.L., 1996. Öğütme Ortamlarının Fe-C İkili Sisteminin Mekanik Alaşımlama Süreçlerine Etkisinin İncelenmesi, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 16-17 Eylül s.397-406, Ankara.
- ASTM, Standart Specification for Sintered Bronze Bearings (Oil – Impregnated) (Metric), B 438 M-84, s. 186-191, USA.
- Backensto, A.B., 1990. Effects of Lubricants on the Properties of Copper-Tin Powders and Compacts, N. Jersey, Advances in P/M, Proc. of PM Conf., APMI, s.303-314
- Beddow, J. K. 1978. Atomization, Heyden an Son Ltd., London, U.K.
- Bıyıklıoğlu, A., 1986, Dinamik Yüklü Yataklarda Yüzey Yorulması, Karadeniz Teknik Üni., Fen Bilimleri Enst., Doktora Tezi, Trabzon.
- Bradury, S., 1986. Powder Metallurgy Equipment Manual-3, N. Jersey, Powder Metallurgy Assoc. 1-191 ..
- Büyükdavraz, M., 2000. Sinter Bronz Yatakların Tribolojisi, Y. Lisans Tezi, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Cerit, M. A., 1994. Makine Mühendisliği El Kitabı, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayın No: 169, s.18-20, Ankara.
- Colton, C.S., 2001. Manufacturing Process and Engineering, Georgia Institute of Technology, USA.

- Cusano, C., Phelan, R.M., 1973. Experimental Investigation of Porous Bronze Bearings, *Journal of Lubrication Technology*, 95, s.173-180.
- Çapa, M., 1984. Metallerin Yorulma Teorileri ve Yorulma Ömrü Üzerine Tesir Eden Faktörler, *MMO, Mühendis ve Makine*, Sayı 16-188, s. 414. Ankara.
- Demir, A., Sarıtaş, S., 1993. Toz Metal Çeliklerin Mekanik Özellikleri, *A.Ü. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Dergisi*, Sayı 7, s.1-13. Isparta.
- Durak, E., 2003, Experimental Investigation Of Porous Bearings Under Different Lubricant and Lubricating Conditions, *KSME International Journal*, 17(9), 1276-1286, Korea.
- Durak, E., Kurbanoglu, C., Tüfekçi, K., Tunay, R.F., 2002, Farklı Yağlama Şartlarında Ve Yağlarda Toz Metalurjisi Esaslı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi”, 3. Uluslararası Toz Metalurjisi Kongresi, 1132-1142, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye.
- Ersümer, A., 1970. Toz Metalurjisi Sert Metal Sinterleme, *İTÜ Yayınları*, s.270, İstanbul.
- Er yürek, B., 1996. Metallerin Yorulma Mukavemetlerine Gerilme Birikmesinin Tesiri , *Mühendis ve Makine*, 17 (200), 434, Ankara.
- German, R.M., 1990. Powder Injection Molding, *MPIF*, New York
- Gimondo, P., Baudrocco, F., Bas, J.A., Penalfiel, J., Bolarin, A., 1997, Tribological Characterization of Composite Powder Metallurgy Valve Train Components For Heavy Duty Diesel Engines Under Starved or Unlubricated Conditions”, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 49-5, pp. 220-226.
- Gurganus, T.B., 1995. Aluminum powder applications, *Advanced Materials and Processes*, v.148, No:2, , p.57-58.
- Günther, B., Veltl, G., Kanazawa I., 1995. Self Lubricating Iron Base Materials by Mechanical Alloying, *EURO PM'95 Proceeding*, pp. 119-125, Birmingham.
- Hacıfazlıoğlu, Ş., 1996. Kaymalı Yataklarda Yüzey Yorulması ve Nedenleri II, *MMO, Mühendis ve Makine*, Cilt 35, Sayı 412, s. 23, Ankara.

- Hashimoto, Y., Kaneko, S., 1995. A Study Of the Mecanism Of Lubrication In Porous Journal Bearings Effect of Dimensionless Oil Feed Pressure on Frictional Charecterictics, Journal of Tribology, s. 291-296.USA.
- James, P.J., 1983. Principles of Isostatic Pressing, Isostatic Pressing Technology, Applied, Science Publishers, s.1-26, London.UK.
- Karaaslan, R., 2002. Sinter Bronz Yatakların Tribolojik Özelliklerinin Sabit ve Titreşimli Yüklerde Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Isparta.
- Karagöz, Ş., Zeren, M., 1996. Elmaslı Kesici Takımların Mikroyapısal Dizaynı Üzerine Araştırmalar, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, s.459-463, Ankara.
- Karataş, Ç., 1997, Metal Tozu Üretim Teknikleri ve Tozların Özellikleri, Makine Tasarım Teorisi ve Modern İmalat Yöntemleri Konferansı, Gazi Üniversitesi, T.E.F., s., 389-396, Ankara.
- Kurban, A.O., 1999. Metallerin Isıl Yorulma Ömrü ve Bunun Dizayn Açısından Etüdü, Denizli Bilim Günleri, MMO, Yayın No: 221, s.483-493. Ankara.
- Kurbanoğlu, C., 1997. Exenterkupplung zur Schwingungserzeugung In Arbeitsmaschinen, Konstruktion,1+2/1997, S. 49-50, G21736 Organder VDI-Gasselschaft EKV, Springer VDI-Verlag, Berlin.
- Kurbanoğlu, C., Durak E., Tunay R.F., Karaaslan R., 2001. Değişken Yüklü Toz Metalurjisi Esaslı Kaymalı Yataklardaki Sürtünme Kuvvetinin Ölçülmesi, TMMOB-IV. Ulusal Ölçümbilim Kongresi, 25-26 Ekim, s.33-46, Eskişehir.
- Kurt, A., 1992. Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerinin Özellikleri, Y.Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.F.B.E., Ankara.
- Kurt, A., Sarıtaş, S., 1992. Toz Metal Bronz yatak Malzemelerinin Özellikleri. 5. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi s.551-563, Ankara.
- Kurt, A.,Turker, M., Sarıtaş, S., 1996. Toz Metalurjisi metoduyla Üretilmiş Bakır Yatakların Aşınma Özellikleri, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, s. 419-427, Ankara.

- Morgan, V., T., 1970. Porous Metal Bearings, Friction and Antifriction Materials, MPIF, p.190-191, USA.
- Norbert, A.A., Schloder M., 1998. Powder Metal Technologies and Applications- PowderMetallurgy Bearing, s.1056, USA.
- Onaran, K., Altınbaş, S.,1986, Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, 143-155, Cilt 2, İTÜ, İstanbul.
- Onur, M., 1984. Makina Tasarımında Malzeme Yorulması Ve Hesapları, Mühendis ve Makine, 26 (302), 13, Ankara.
- Öveçoğlu, M.L., 1997. Toz Melaturjisi : Tarihsel gelişim, Üretim Aşamaları ve Son Eğilimler, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi s.449-475, İstanbul.
- Pıhtılı, K., Uzuner, B.,1984. Malzeme Yorulması, s.100-115, Elazığ.
- Raman, R., Babu, L.V., 1984, Tests on Sintered Bearings with Reduced Oil Contents, Wear, 95(1984), s. 263-269.USA.
- Sarıtaş S., 1985. Çelik Toz Dövmecilik, ODTÜ Uygulamalı Araştırmalar Dergisi, Cilt.3, No:11,s.1-26.Ankara.
- Sarıtaş S., 1994. Toz Metalurjisi, Makine Mühendisleri El Kitabı, 2. Baskı, I.Cilt, MMO., s.2/64 - 2/82. Ankara.
- Sarıtaş S., 1996. Bir Titreşimli Öğütücü İmalatı ve Metal Tozlarının Öğütmeye Bağlı Özelliklerinin Araştırılması, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı 16-17 Eylül, s.387-397, Ankara.
- Sarıtaş, S., 2003. Toz Metal Çeliklerin Yorulma Özellikleri, TMMOB Mühendis ve Makine Dergisi, 517, s.33-43, Ankara.
- Schatt W., Wieters. K.P., 1997. Powder Metallurgy, Processing and Materials, EPMA, s.492, Shrewsbury, U.K.
- Tekin, E., 1992. Mühendisler İçin Çelik Seçimi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2. Baskı, Yayın No: 119,s. 40-62, Ankara.

- Tunay, R.F., 2001. Tam Değişken Gerilmelerde Toz Metalurjisi Esaslı Radyal Yatakların Aşınma ve Sürtünme Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Turhan, H., 1998. Bronz Yatakların Aşınma ve Yorulma Davranışlarının Araştırılması, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Türk Toz Metalurjisi Derneği, 2003. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Tüfekci, K., 2003, Kaymalı Yatakların Konstrüksiyonel Gelişmesi ve Toz Metalurjisi Yataklarla Karşılaştırılması, S.D.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Ülğenci, Z., 1991. Metal Enjeksiyon Kalıplama, Makine Kimya Endüstrisi Dergisi, c.86, s.23., Ankara.
- Varol, R., 2001. Cu ve Fe esaslı Toz Metalurjisi Yatak Malzemelerinin Aşınma Özellikleri, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 3, Sayı 1, S.81-90, İzmir.
- Yalçın, B., Varol, R., Yılmaz, N. 2004, Demir Esaslı Toz Metal (T/M) aşınma Özelliklerinin Bulanık Mantıkla (BM) Modellenmesi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2004(4), s.1-8., ISSN 1304-4141, [www.teknolojikarastirmalar.org](http://www.teknolojikarastirmalar.org)
- Yıldırım, M.M., Nursoy, M., 1994. Toz Metalurjisi Yatak Malzemelerin Yorulma Davranışları, Fırat Üniversitesi, Fen ve Müh. Bilimleri Dergisi, 6(1), s.181-193. Elazığ.
- Yıldırım, M.M.,1987. Malzeme Bilgisi, Cilt II-III, Fırat Üniversitesi, Müh. Fak. Basımevi, s. 39-51, Elazığ.



**ÖZGEÇMİŞ**

Adı ve Soyadı : Fazlı DURAN

Doğum Yeri : Finike- ANTALYA

Doğum Yılı : 16.03.1977

**Eğitim ve Akademik Durumu :**

Lise : 1992-1995 Kumluca İHL. ANTALYA

Lisans : 1996-2000 Süleyman Demirel Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Makine Müh. Bölümü.

Y. Lisans : 2001- S.D.Ü. Fen Bilimleri Ens. Makine Müh. Anabilim Dalı

Y. Dil : İngilizce

İş Deneyimi : 2002'den beri Kumluca- Antalya'da Özel Firmalarda Şantiye Mühendisi olarak çalışmaktadır.