

35418

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

RULMANLI YATAKLARDAKİ AŞINMA VE YORULMA
MEKANİZMALARININ İNCELENMESİ

35418

Mak. Yük. Müh. Tefik KÜÇÜKÖMEROĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"Doktor"

Ünvanının Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19.12.1994
Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 30.03.1995

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Temel SAVAŞKAN

T. Savaşkan

Jüri Üyesi : Prof.Dr. Fazlı ARSLAN

F. Arslan

Jüri Üyesi : Doç.Dr. Mehmet DEMİRKOL

M. Demirkol

Enstitü Müdürü : Prof.Dr. Temel SAVAŞKAN

T. Savaşkan

ARALIK 1994

TRABZON

35418

ÖNSÖZ

Sanayide önemli bir yeri olan rulmanlı yataklar, en kolay hasarlanan kritik makina elemanlarından. Çeşitli makinalarda kullanılan rulmanlar, yanlış kullanım, imalât hataları ve uygun olmayan malzeme seçimi gibi nedenlerden dolayı, daha kısa sürede hasarlanarak büyük maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu durum ise, Ülkemiz ekonomisinde büyük zararlara yol açmaktadır.

Bu çalışmada rulmanlı yatakların aşınma ve yorulma mekanizmaları, K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümünde kurulan rulmanlı yatak test düzeneği ile incelenmiştir.

Bu konuda çalışmama sebep olan, çalışmalarımın her aşamasında yakın ilgisi ve değerli fikirleri ile beni yönlendiren sayın Hocam Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca, bu çalışma sırasında yardımlarını gördüğüm tüm araştırma görevlisi ve teknisyen arkadaşlarıma müteşekkirim.

Yapılan çalışmayı 1989.003.02 kod numaralı proje ile destekleyen, K.T.Ü. Araştırma Fonu yetkililerine teşekkür ederim.

Aralık 1994

Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	11
ÖZET	1V
SUMMARY	V
ŞEKİL LİSTESİ	VI
TABLO LİSTESİ	XI
SEMBOL LİSTESİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Rulmanlı Yatak Malzemeleri	5
1.3. Rulmanlı Yatakların imalâtı	9
1.4. Rulmanlı Yatak Tipleri	13
1.5. Rulmanlı Yatakların Çalışma İlkeleri ve Kullanım Alanları	17
1.6. Rulmanlı Yataklarda Gerilmelerin Hesaplanması	18
1.7. Rulmanlı Yataklarda Aşınma ve Yorulma	26
1.7.1. Yuvarlanma Yorulması	28
1.7.1.1. Yüzey Yorulması	28
1.7.1.2. Yüzey Altı Yorulması	30
1.7.2. Literatürün Özeti ve Çalışmanın Amacı	35
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	37
2.1. Deney Düzeneginin Tasarım ve İmalâtı	37
2.2. Düzenegın Çalışma İlkeleri ve Kalibrasyonu	45
2.3. Deneylerin Yapılışı	47
3. BULGULAR	51
3.1. Deneylerde Kullanılan Rulmanlarla İlgili Bulgular	51
3.2. Deneylerden Elde Edilen Bulgular	55
3.3. Metalografik İncelemelerden Elde Edilen Bulgular	60
4. İRDELEME	84
5. SONUÇLAR	91
6. ÖNERİLER	94
7. KAYNAKLAR	95
8. EKLER	102
9. ÖZGEÇMİŞ	103

ÖZET

Bu çalışmada, rulmanlı yataklardaki aşınma ve yorulma mekanizmalarını incelemek amacıyla yeni bir deney düzeneği tasarlanarak imal edildi. Söz konusu deney düzeneğinde, tek sıralı sabit bilyalı rulmanların aşınma ve yorulma davranışları farklı yük, mil hızı ve yağ debisi şartlarında incelendi. Sözü edilen rulmanların çalışma sıcaklıklarının, radyal yüke, yağ debisine ve devir sayısına göre değişimleri belirlendi. Deney rulmanları ışık (optik) ve elektron metalografisi, X-ışınları mikroanaliz yöntemleri ve mikrosertlik ölçümleriyle incelendi.

Yapılan deneylerde, yağlama yağının ve rulmanların çalışma sıcaklıklarının uygulanan yük ve mil hızı ile doğru orantılı, yağ debisi ile ters orantılı olarak değiştikleri gözlemlendi. Yüksek hızlarda çalışan rulmanlı yataklarda, ilk hasarın kafeste meydana geldiği gözlemlendi. Ağır yük, yüksek mil hızı ve yetersiz yağlama gibi aşırı şartlar altında çalışan rulmanların elemanlarında bazı yapısal değişimler ile aşınma ve yorulma belirtilerine rastlanıldı. Söz konusu değişimlerin, rulman elemanlarının yüzeylerinde sert ve gevrek bir martenzit tabakası ile bunun altında yer alan aşırı menevişlenmiş martenzit bölgesinin oluşumuna neden oldukları görüldü. Söz konusu yapısal değişimlerin, metal-metal sürtünmesi ile meydana gelen aşırı ısınma ve soğumadan kaynaklandığı sonucuna varıldı. Rulmanlı yatak elemanlarının yüzeylerinde meydana gelen yapısal değişimlerin, elemanlar arasındaki sertlik dengesini bozarak, aşırı aşınmaya ve hasara yol açtığı gözlemlendi.

Bunlardan başka, rulmanların iç bilezikleri ile yuvarlanma elemanlarının yüzeylerinin altında, kayma gerilmelerinin en büyük değere ulaştığı derinlikte, siyah dağlama bölgeleri içerisinde uzayarak yönlenmiş yapılar ile bazı kalıntıların etrafında kelebek şeklini almış dönüşüm ürünlerine rastlanıldı. Söz konusu yapısal değişimlerin gerilme etkisiyle meydana geldikleri ve çatlak oluşumuna neden oldukları sonucuna varıldı.

Yapılan değerlendirme sonucunda, rulmanlı yataklarda yüzeyde ve yüzey altında meydana gelen yapısal değişimlerin aşınma ve yuvarlanma yorulması mekanizmalarını hızlandırarak, söz konusu yatakların çalışma ömürlerini önemli ölçüde kısalttıkları belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Rulmanlı yataklar, aşınma, yuvarlanma yorulması, yatak deney düzeneği.

AN INVESTIGATION OF WEAR AND FATIGUE MECHANISMS OF ROLLING BEARINGS

SUMMARY

In this study, a new bearing test rig was designed and built to investigate wear and fatigue mechanisms in rolling bearings. Wear and fatigue behaviour of a number of ball bearings were investigated under different operating conditions of loading, speed and lubrication. The temperature of the bearings were monitored as a function of radial loading, rotational speed and oil supply rate. Microstructure of the bearing components were investigated using optical light and electron metallography, X-ray microanalysis techniques and microhardness measurements.

The temperatures of both bearings and lubricating oil were found to be proportional to the applied radial load and rotational speed of the shaft, but inversely proportional to the oil flow rate. It was also observed that, at high speeds the failure of the bearings started from the cage. Microstructural changes were observed in the surface material of the bearings operated under extreme running conditions. These changes resulted in the formation of a hard martensitic layer and a overtempered martensite on some surface areas of the bearing components. Thus, It was concluded that the observed structural changes, related to thermal effects can upset the hardness balance between the bearing components and result in excessive wear leading to failure.

In addition, some stress-induced structural changes including band formation in dark etching regions, and butterfly formation around non metallik inclusions were observed in both rolling elements and inner rings of the bearings at the depths to maximum shear stresses. These subsurface, microstructural changes resulted in initiation of cracks.

It was concluded that, the observed structural changes and initiation of cracks may seriously shorten the life of the rolling bearings by accelerating the rolling contact fatigue.

Key words: Rolling bearings, wear, rolling contact fatigue, bearing test rig.

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa no

Şekil 1. Rulmanlı yatakların imalât aşamaları	12
Şekil 2. Rulmanlı yataklarda kullanılan yuvarlanma ele- manları [8]	14
Şekil 3. Rulmanlı yatakların sınıflandırılması	15
Şekil 4. Sabit bilyalı rulmanın montaj resmi	16
Şekil 5. Silindirik makaralı rulmanın montaj resmi	16
Şekil 6. Boşluksuz ve radyal yönde yüklenmiş rulmanlı ya- taklardaki yük dağılımı [36]	22
Şekil 7. Bilyalı rulmanlarda boşluğun ve ön yüklemenin yük dağılımına etkisi [8]	23
Şekil 8. Rulman elemanlarının temas bölgelerindeki eğri- liklerinin gösterilişleri	23
Şekil 9. a) Bilyalı ve b) makaralı rulmanların temas alanlarında oluşan basınçların dağılımları [8] ...	24
Şekil 10. Temas alanının yüzeyi altındaki gerilmelerin değişimi [32]	25
Şekil 11. Silindirik makaralı rulmana ait bir makaranın bileziklerden birinin yüzeyinin altında oluş- turduğu kayma gerilmesi bileşenleri [9]	34
Şekil 12. Deney düzeneğinin mil eksenine paralel kesit görünüşü	40
Şekil 13. Deney düzeneğinin mil eksenine dik kesit görü- nüğü	41
Şekil 14. Deney rulmanının hidrolik yükleme devresi	42
Şekil 15. Yataklama rulmanlarının yağlama devresi	43
Şekil 16. Deney düzeneğinin genel görünümü	44
Şekil 17. Deney rulmanı ve yatak yuvalarının genel görü- nümü	44

Şekil 18. Yükleme kalibrasyonu düzeneğinin görünümü	46
Şekil 19. Yükleme kalibrasyonunun eğrisi	46
Şekil 20. Deney rulmanının, a) teknik resmi, b) fotoğrafı .	49
Şekil 21. Rulman çeliğinin metalografik yapısının, a) ışık mikroskobu, b) SEM ile elde edilen görüntüsü	52
Şekil 22. Deney rulmanlarına ait kafeslerden birinin iç yapısı	53
Şekil 23. Avrupalı firmalar tarafından imal edilen rulmanlara ait bir iç bileziğin yuvarlanma yolunun görünümü	54
Şekil 24. SSCB'de imal edilen rulmanlara ait bir iç bileziğin yuvarlanma yolunun görünümü	54
Şekil 25. Sabit devir sayısında çalışan rulmanların rejim durumundaki sıcaklıklarının, radyal yüke göre değişimlerini gösteren eğriler	56
Şekil 26. Sabit yağ debisinde çalışan rulmanların, rejim durumundaki sıcaklıklarının radyal yüke göre değişimlerini gösteren eğriler	57
Şekil 27. Sabit devir sayısında çalışan rulmanların kararlı durumdaki rejim sıcaklıklarının yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler	58
Şekil 28. Sabit mil hızında çalışan rulmanlı yatakların çalışma ömürlerinin, uygulanan radyal yüke göre değişimlerini gösteren eğriler	59
Şekil 29. 33 kN'luk yük altında ve 0,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın hasara uğrayan iç bileziğinin görünümü	68
Şekil 30. 33 kN'luk yük altında ve 0,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın hasara uğrayan elemanları	68
Şekil 31. 52 kN'luk yük altında ve 1,0 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın aşırı zorlama sonucunda hasara uğrayan iç ve dış bilezikleri	69

- Şekil 32. 22 kN'luk yük ve 2,0 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmana ait bir yuvarlanma elemanının yüzeyinin görünümü69
- Şekil 33. 30 kN'luk yük ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın hasara uğrayan bir bilyasının yüzeyinin görünümü70
- Şekil 34. 40 kN'luk yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 0,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın bir bilyasının yüzeyinde meydana gelen soyulma belirtileri70
- Şekil 35. 40 kN'luk yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 0,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın bir bilyasının yüzeyinde meydana gelen sürtünme izleri ile çatlakların görünümü71
- Şekil 36. 26 kN'luk yük ve 2,0 l/dak'lık yağ debisinde çalışan bir rulmana ait iç bileziğin yuvarlanma yolunun görünümü71
- Şekil 37. 30 kN'luk yük altında çalışan rulmanın iç bileziğinin yuvarlanma yolunun görünümü72
- Şekil 38. Şekil 37'de görülen yuvarlanma yolunun bir bölgesine ait ayrıntıların görünümü72
- Şekil 39. 30 kN'luk yük altında, yağsız olarak çalıştırılmış bir rulmanın iç bileziğinin yuvarlanma yolu üzerinde görülen sürtünme, çizilme, aşınma ve yorulma izleri73
- Şekil 40. 30 kN'luk yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 2,0 l/dak'lık yağ debisinde çalışan bir rulmana ait dış bileziğin yuvarlanma yolunun görünümü73
- Şekil 41. 30 kN'luk radyal yük, 3800 dev/dak'lık mil hızı ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın iç bileziğinde meydana gelen yapısal değişimler .74

- Şekil 42. 30 kN'luk radyal yük altında çalışan rulmana ait iç bileziğin sertliğinin yüzeyden olan derinliğe göre değişimi74
- Şekil 43. 30 kN'luk radyal yük altında çalışan bir rulmanın iç bileziğinin metalografik yapısının SEM görüntüsü75
- Şekil 44. Şekil 43'deki fotoğrafta görülen beyaz dağlama bölgesinin ayrıntılı SEM görüntüsü75
- Şekil 45. Şekil 43'deki fotoğrafta yer alan siyah dağlama bölgesinin yapısal ayrıntılarını gösteren SEM görüntüsü76
- Şekil 46. 33 kN'luk radyal yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 0,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın iç bileziğinde oluşan açık beyaz dağlama bölgesinin (ABDB) görünümü76
- Şekil 47. Yüzeyinde yalnız siyah dağlama bölgesi oluşan bir iç bileziğin sertliğinin derinliğe göre değişimi77
- Şekil 48. 29 kN'luk radyal yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın iç bileziğinde oluşan, bant biçiminde uzamış fazların SEM görünümü77
- Şekil 49. Şekil 46'daki bölgede bulunan bant şeklinde uzamış fazların ayrıntılarını gösteren SEM fotoğrafı78
- Şekil 50. 14 kN'luk radyal yük altında, yağsız olarak çalışan rulmanın iç bileziğindeki yönlenmiş bantların görünümü78
- Şekil 51. Rulmanlara ait bilyalarda oluşan yönlenmiş yapıların tipik görünümü79
- Şekil 52. Rulmanlara ait bilyalarda oluşan yönlenmiş yapıların ayrıntılarını gösteren SEM fotoğrafı79

- Şekil 53. 26 kN'luk radyal yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın iç bileziğindeki bir kalıntı (enklüzyon) etrafında meydana gelen yapısal değişimler80
- Şekil 54. Şekil 53'deki yapısal değişimlerin SEM görüntüsü80
- Şekil 55. Şekil 53 ve 54'de görülen yapısal değişimlerin ayrıntılarını gösteren SEM fotoğrafı81
- Şekil 56. 26 kN'luk radyal yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın iç bileziğinde rastlanılan kısmi siyah dağlama bölgesi81
- Şekil 57. Şekil 56'deki fotoğrafta görülen koyu siyah dağlanmış bölgenin SEM fotoğrafı82
- Şekil 58. Şekil 57'deki fotoğrafta görülen koyu siyah dağlanmış bölgenin ayrıntılı SEM görüntüsü82
- Şekil 59. 33 kN'luk radyal yük altında ve 6000 dev/dak'lık mil hızında çalışan rulmanın iç bileziğinde meydana gelen çatlakların görünümü83
- Şekil 60. 40 kN'luk radyal yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 2,0 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın bilyasında aşırı zorlanmadan kaynaklanan çatlakların görünümü83

TABLO LİSTESİ

Sayfa no

Tablo 1. Rulmanlı yatak elikleri8

Tablo 2. Deney rulmanlarının çalışma şartlarına ilişkin
parametreler ve yük tekrar sayıları50

Tablo 3. İncelenen rulman çeliğinin analiz sonucu51

SEMBOL LİSTESİ

- ABDB - Açık beyaz dağlama bölgesi
BDB - Beyaz dağlama bölgesi
NDB - Normal dağlama bölgesi
SDB - Siyah dağlama bölgesi
- A - Alan
- a,b - Temas alanının yarı eksen uzunlukları
- E - Elastiklik modülü
- e - Rulmanlı yataktaki radyal boşluk
- F - Yük
- F_t - Toplam yük
- k - Rulmanlı yatağın boşluk veya sıklılığını ifade eden katsayı
- P - Yüzey basıncı
- P_{maks} - En büyük yüzey basıncı
- R - Yarıçap
- Z - Yuvarlanma elemanı sayısı
- z - Yüzeyden itibaren derinlik
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - Asal eksen yönlerindeki gerilmeler
- τ - Kayma gerilmesi
- τ_{maks} - En büyük kayma gerilmesi
- μ, α - Rulman elemanlarının boyut ve şeklllerine bağlı katsayılar
- ν - Poisson oranı
- f - elemanların eğrilik yarıçapı
- θ - Asal eksen düzlemleri arasındaki açı

1. GENEL BİLGİLER

1. 1. Giriş

Rulmanlı yataklar, taşınmak istenilen yük ile taşıyıcı destek arasındaki yük iletimini, yuvarlanma elemanları aracılığıyla sağlayan makina elemanlarıdır [1]. İç bilezik, dış bilezik, yuvarlanma elemanları ve kafesten meydana gelen rulmanlı yataklar, dönme hareketi yapan makinalarda en çok kullanılan yataklama elemanları arasında yer alırlar [2-5].

Rulmanlı yataklar, önceleri enerjiden tasarruf etmek isteyen işletmelerde, karayolu taşıt araçlarında ve gemilerde kullanılmıştır. Günümüzde ise, uçaklar ve uzay araçları dahil olmak üzere, hemen hemen bütün geleneksel ve modern iş makinalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

Rulmanlı yataklarla, kaymalı yataklar arasındaki rekabet, içinde bulunduğumuz yüzyılın başlarına kadar bu yatakların yan yana kullanılmalarını engellemiştir [6]. Ancak, sonradan kaymalı ve rulmanlı yatakların, pek çok tribolojik uygulamada, birbirlerinin eksik yönlerini tamamladıkları görülmüştür [6,7]. Rulmanlı yataklara ait ilk patent 1802 yılında, Frankreich tarafından, aksenel-dönmeli yataklar adı altında alınmıştır [6]. Silindirik makaralı rulmanlar ise, ilk kez 1811 yılında, Hachette tarafından bir makaranın yataklanmasında kullanılmıştır [6].

Endüstriyel gelişmelere paralel olarak ortaya çıkan yataklama ihtiyaçlarını karşılamak için, rulmanlı yataklar çok farklı şekillerde tasarlanarak imal edilmiştir. Rulmanlı yatakların üretimi için kaliteli malzemenin bulunamaması,

tasarım ve imalât yöntemlerinde yeterli ilerlemenin kaydedilememesi gibi nedenlerden dolayı, bu yatakların geliştirilmesi ve kullanımlarının yaygınlaştırılması çok uzun süre alınmıştır.

Rulmanlı yataklarda ömür kavramı, ilk kez Palmgren [6] tarafından, 1924 yılında ortaya atılmıştır. Palmgren, imal edilen rulmanların %90'nın, belirlenen süre (ömür) kadar sağlıklı çalışmalarının, hem üreticiler, hemde kullanıcılar açısından ekonomik yararlar sağlayacağını ileri sürmüştür. Keyfi olarak öne sürülen %90 oranı, ancak sekiz yıl sonra bilimsel esasa oturtulmuş ve böylece, nominal ömür kavramı oluşturulmuştur [6].

Rulmanlı yatakların standartlaştırma çalışmaları, ilk kez Alman standartları kurulu DNA (Deutschen Normen Ausschuss) tarafından, 1927 yılında başlatılmıştır [6,8]. Bu çalışmalar sayesinde, değişik firmalar tarafından imal edilen rulmanlı yatakların birbirlerinin yerine kullanılabilecekleri anlaşılmış ve sonuçta, bu yatakların fiyatlarında büyük düşmeler sağlanmıştır [1,8]. Söz konusu standartlara uygun olarak imal edilen rulmanlı yataklarla ilgili bilgiler üretici firmaların kataloglarında verilmektedir. Genel amaçlı uygulamalar için, rulman seçiminde rulman kataloglarından yararlanılmaktadır. Ancak, bazı uygulamalar için halâ özel olarak imal edilmiş rulmanlı yataklara ihtiyaç duyulmaktadır [9-12].

Uzun yıllardan beri sürdürülen çalışmalar sayesinde, rulmanlı yatakların, gerek malzemelerinde, gerekse tasarım ve imalât tekniklerinde büyük gelişmeler sağlanmış olmasına rağmen, bu yataklar halen, hemen hemen bütün makinalarda ilk önce bozulan veya hasara uğrayan elemanlar olma özelliğini korumaktadırlar.

Kataloglarda öngörülen, yük ve hız şartlarında çalışan

ve yeterli ölçüde yağlanan rulmanlı yataklarda sürtünme ve aşınmanın meydana gelmeyeceği kabul edilmektedir [8,13-16]. Ancak, aşırı yükleme, yüksek hız, yetersiz yağlama gibi uygun olmayan çalışma şartları, rulmanlı yataklarda aşınma ve yorulmaya neden olmaktadır [2,4,17]. Söz konusu aşınma ve yorulma mekanizmaları rulmanlı yatakların çalışma ömürlerini büyük ölçüde azalttığı gibi, ani hasarlara da yol açmaktadır [2,18].

Rulmanlı yataklardaki aşınma, yetersiz veya uygun olmayan yağlama durumundan kaynaklanır [2-4]. Yetersiz yağlama, yuvarlanma elemanlarının bilezik yüzeyleri üzerinde kaymasına ve dolayısıyla metal-metal sürtünmesine yol açar. Yuvarlanma elemanlarının kayma hareketi ile ortaya çıkan sürtünme ısı, rulman elemanlarının yüzeylerinde bazı yapısal değişimlere neden olabilir [2,4,9,19]. Söz konusu değişimler, rulman elemanları (yuvarlanma elemanları ve bilezik yüzeyleri) arasındaki sertlik dengesini bozarak aşınmaya ve sonuçta hasara yol açabilir [4,20,21].

Aşırı yükleme durumunda ortaya çıkan yuvarlanma yorulması, rulmanlı yataklarda yüzeyden ve yüzey altından başlayan hasarlara neden olabilir [9,22]. Rulman elemanlarının yüzeylerinde oluşan Hertz basınçlarının etkisiyle, belirli devir sayıları sonunda, çatlama veya çukurlaşma şeklinde kendini gösteren yüzey yorulması meydana gelebilir [3,7,9,23]. Yüzey altında oluşan kayma gerilmesinin en yüksek değerinin, rulman çeliğinin elastik sınırını aşması durumunda ise, yüzeyaltı yorulmasının meydana gelmesi beklenir [2-5]. Söz konusu yorulma olayı, yüzey altında bazı yapısal değişimlerin meydana gelmesi ile başlayıp, çatlak oluşumu, ilerlemesi ve yüzeye ulaşarak yüzeyden parça koparması şeklinde kendini gösterir [9,24].

Rulmanlı yatak imalatında kullanılan çelik malzemelerde

bulunan oksit ve nitrür gibi sert kalıntılar (enklüzyon) gerilme yığılmasına neden olurlar [9,24,25]. Sözü edilen gerilme yığılması, kalıntıların etrafında bazı yapısal değişimlerin meydana gelmesine ve çatlak oluşumuna yol açabilir. Oluşan çatlaklar, rulmanların çalışması sırasında ilerleyerek belirli çevrim sayısı sonunda yüzeye ulaşırlar ve böylece, kırılmaya veya rulman elemanlarının yüzeylerinden parça kaybına sebep olabilirler. Ancak, günümüzde rulman imalâtında temiz çelik kullanıldığından, malzeme hatalarından kaynaklanan hasarlar büyük ölçüde azaltılmıştır [19,26-29]. Diğer taraftan, yuvarlanma elemanlarının düzenli çalışmasını sağlayan kafesin bozulması veya parçalanması durumu da, rulmanların aniden hasara uğramalarına yol açabilir [3,17,30].

Rulmanlı yatakların erken hasara uğraması, pek çok uygulamada üretimin aksamasına, zaman kaybına ve üretim maliyetinin artmasına yol açar [3,9]. Diğer taraftan, aniden meydana gelen rulman hasarları, aynı makinada çalışan başka elemanların da aşırı zorlanarak hasara uğramalarına neden olabilir. Bu nedenle, rulmanlı yatakların çalışma ömürünü uzatmak, ekonomik ve güvenlik açılarından pek çok yararlar sağlar. Rulmanlı yatakların çalışma ömürünü uzatabilmek için, çalışma şartlarının kontrol edilmesi ve hasara neden olan aşınma ve yorulma mekanizmalarının ayrıntılı olarak incelenerek ortaya konulması gerekmektedir. Ayrıca, rulmanların çalışma ömürlerini etkileyen önemli elemanlardan biri olması nedeniyle, kafeslerin de daha kaliteli malzemeden üretilmesi, tasarım ve imalât teknolojisinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu nedenlerle, rulmanlı yataklarda hasara neden olan aşınma ve yorulma mekanizmalarının incelenerek, bu yatakların ömürlerinin uzatılabilmesi için gerekli çalışma şartlarının belirlenmesi pek çok bakımdan yararlı olacaktır.

1.2. Rulmanlı Yatak Malzemeleri

Rulmanlı yatak imalâtında kullanılan malzemelerin sertlik ve mukavemet değerleri ile aşınma, yorulma ve korozyon dayanımlarının yüksek olması istenir [9,27]. Ayrıca, söz konusu malzemelerin kararlı yapısal ve mekanik özelliklere sahip olması gerekir.

Rulmanlı yataklarda, yuvarlanma elemanlarının yüzeyleri ile yuvarlanma yolları arasındaki temas alanlarının çok küçük olmaları nedeniyle, rulman elemanlarının yüzeylerinde oldukça yüksek basınçlar oluşur [8,9,31,32]. Rulmanlı yataklarda en yüksek yüzey basınçları, yuvarlanma elemanları ile iç bileziğin yüzeylerinde meydana gelir [8,32]. Oluşan basınçlar, rulman elemanlarının yüzeylerinde deformasyona, aşınmaya ve/veya yorulmaya neden olabilirler. Ağır yükler altında çalışan rulmanlı yataklarda aşırı plastik deformasyonun meydana gelmesini önlemek için, rulman malzemenin elastiklik sınırı ile sertliğinin yüksek olması gerekir [9,26,33,34]. Söz konusu özelliklerin elde edilebilmesi için, genelde farklı iki faz içeren çelik malzemeler kullanılır. Rulman imalâtında kullanılan çelik malzemeler, nispeten yumuşak olan menevişlenmiş martenzitik bir matris ile bunun içerisinde homojen olarak dağılmış, küçük boyutlu sert metal karbürlerden oluşan bir yapıya sahiptirler.

Rulmanlı yatak malzemelerinde aranan, bütün özellikleri bünyesinde bulunduran bir malzeme bulmak mümkün olmayabilir. Yirminci yüzyılın başlarında, Stribeck [8], geniş araştırmalardan sonra, rulmanlı yataklar için gerekli özellikleri kısmen sağlayan, alaşımlı bir çelik geliştirdi. Yaklaşık % 1,0 oranında karbon ve % 2,5 oranında krom içeren ve yeterli sertlik ve tokluğa sahip olan bu çelik, rulmanlı yatak imalâtında uzunca bir süre, yaygın olarak kullanıldı. 1920'li

yıllardan beri de, rulman endüstrisinde, benzer bileşime sahip olan AISI 52100 (TS 100 Cr6) çeliği, standart bir malzeme olarak kullanılmaktadır [3,8,9,27]. Ancak, özel amaçlı bazı uygulamalar için farklı malzemelerden imal edilen rulmanlar kullanılmaktadır. Örneğin, günümüzde, rulmanlı yatakların bazılarının imalâtında, takım çelikleri, yüksek hız çelikleri, yüzeyi sertleştirilebilen çelikler ve yüksek alaşımlı çelikler kullanılmaktadır [8,29,35].

Rulmanlı yatak imalâtında yaygın olarak kullanılan çelik malzemeler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1a, tüm kesiti sertleştirilebilen, farklı bileşimlerdeki düşük alaşımlı çelikleri içermektedir. Bu grupta yer alan çelikler ortalama % 1,0 oranında karbon ve değişik oranlarda alaşım elementi içermektedirler. Bu alaşım elementleri sayesinde, kalın kesitli parçalar bile üniform olarak sertleştirilebilirler. Örneğin, ince kesitli elemanların imalâtında 100 Cr6 çeliği kullanılırken, daha kalın kesitli elemanların (14 mm'den kalın bilezik ve 22 mm'den büyük çaplı makara) imalâtında, homojen olarak sertleştirilebilen, yüksek oranda mangan içeren 100 CrMo 6 ve 100 CrMnMo 8 gibi çelikler kullanılmaktadır [8,9,35].

Tablo 1b' de yer alan malzemeler ise, yüzeyi sertleştirilebilen çelikleri içermektedir. Bu çelikler tüm kesiti sertleştirilebilen, krom içeren çeliklerle birlikte, özellikle, fıçı, konik ve silindirik makaralı rulmanların imalâtında kullanılırlar [8]. Bu tabloda yer alan, yüzeyi sertleştirilebilen malzemelerden; 17 MnCr5 çeliği ince kesitli parçalar için, 17 NiCrMo14 çeliği ise daha kalın kesitli parçalar için kullanılmaktadır [8].

Tablo 1 c'de verilen malzemeler, ağır iş makinelerinde ihtiyaç duyulan, büyük boyutlu rulmanların imalâtında kullanılan ve yüzeyleri alev ya da indüksiyonla sertleştirilebilen çelikleri içermektedir.

Korozif ortamlarda çalışan rulmanlı yataklar, paslanmaz

çeliklerden, yüksek sıcaklıklarda çalışan rulmanlar ise, sıcak iş takım çeliklerinden imal edilirler [8,35]. Tablo 1 d ve 1 e'de bu tür malzemeler yer almaktadır. Örneğin, asit pompasında kullanılan rulmanlar, korozif etkilerden dolayı paslanmaz çeliklerden imal edilirken, uzay araçlarında kullanılan rulmanların imalâtında yüksek sıcaklığa dayanıklı, temiz çelikler kullanılır [9].

Yüksek sıcaklıklarda kullanılan rulmanlı yataklarda çalışma emniyeti çok önemli olduğundan, bu rulmanların imalâtında kullanılan çelik malzemelerin vakumda ergitilerek temizlik derecesi arttırılır [8,9,29]. Özel amaçlı bazı rulmanlar ise, manyetik olmayan çelik, seramik, plastik ve sinterlenmiş malzemelerden imal edilmektedirler [9].

Rulmanlı yatakların kafesleri, yük taşıyan eleman olmadıklarından, ikinci derecede öneme sahiptirler. Rulman kafesleri çoğunlukla, çelik, bronz, pirinç veya plastik malzemelerden imal edilirler. Küçük ve orta boyutlu yataklardaki kafesler, genellikle çelik veya pirinç sacdan presle şekillendirilerek imal edilirler. Sactan imal edilen kafesler hafif ve dayanıklı olurlar. Büyük boyutlu rulmanlarda ise, ekonomik nedenlerden dolayı, çoğunlukla masif kafesler kullanılır. Bu kafesler genellikle pirinçten imal edilirler. Ancak, bazı durumlarda, rulman kafesleri çelik veya küresel grafitli dökme demirden de imal edilmektedirler.

Bazı rulmanlarda ise, plastik kafesler kullanılmaktadır. Örneğin, çift sıralı sabit bilyalı, oynak bilyalı ve silindirik makaralı rulmanlarda plastik kafesler kullanılmaktadır [1,8,9]. Plastikler, yoğunluk ve sürtünme katsayılarının düşük, esnekliklerinin yüksek olması nedeniyle, tercih edilmektedirler. Plastik kafeslerin ısıl kararlılığı cam elyaf takviyesiyle arttırılabilir [9,10]. Bu malzemelerden imal edilen kafesler, -40°C ila 120°C sıcaklıkları arasında sürekli, 130°C ila 140°C sıcaklıkları arasında ise, kısa süreli olarak çalıştırılabilir.

Tablo 1. Rulmanlı yatak çelikleri

Çeliğin Kısa Gösterimi	Kimyasal Bileşim (% Ağırlık)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	W	Cu	
a)												
100 Cr 6	0,90 - 1,05	0,15 - 0,35	0,25 - 0,45	0,030	0,025	1,35 - 1,65	-	en çok 0,30	-	-	0,30	
100 CrMn 6	0,90 - 1,05	0,50 - 0,70	1,00 - 1,20	0,030	0,025	1,40 - 1,65	-	en çok 0,30	-	-	0,30	
100 CrMo 73	0,90 - 1,05	0,20 - 0,40	0,60 - 0,80	0,030	0,025	1,65 - 1,95	0,20 - 0,35	en çok 0,30	-	-	0,30	
100 CrMnMo 8	0,90 - 1,05	0,40 - 0,60	0,80 - 1,10	0,030	0,025	1,80 - 2,05	0,50 - 0,60	en çok 0,30	-	-	0,30	
b)												
17 MnCr 5	0,14 - 0,19	en çok 0,40	1,00 - 1,30	0,035	0,035	0,80 - 1,10	-	-	-	-	0,30	
19 MnCr 5	0,17 - 1,22	en çok 0,40	1,10 - 1,40	0,035	0,035	1,00 - 1,30	-	-	-	-	0,30	
16 CrNiMo 6	0,15 - 0,20	en çok 0,40	0,40 - 0,60	0,035	0,035	1,50 - 1,80	0,25 - 0,35	1,40 - 1,70	-	-	0,30	
17 NiCrMo 14	0,15 - 0,20	en çok 0,40	0,40 - 0,70	0,035	0,035	1,30 - 1,60	0,15 - 0,25	3,25 - 3,75	-	-	0,30	
c)												
Cf 54	0,50 - 0,57	en çok 0,40	0,40 - 0,70	0,025	0,035	-	-	-	-	-	0,30	
44 Cr 2	0,42 - 0,48	en çok 0,40	0,50 - 0,80	0,025	0,035	0,40 - 0,60	-	-	-	-	0,30	
43 CrMo 4	0,40 - 0,46	en çok 0,40	0,60 - 0,90	0,025	0,035	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30	-	-	-	0,30	
48 CrMo 4	0,46 - 0,52	en çok 0,40	0,50 - 0,80	0,025	0,035	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30	-	-	-	0,30	
d)												
X 45 Cr 13	0,42 - 0,50	en çok 1,00	en çok 1,00	0,040	0,030	12,5 - 14,5	-	en çok 1,00	-	-	0,30	
X 102 CrMo 17	0,95 - 1,10	en çok 1,00	en çok 1,00	0,040	0,030	16,0 - 18,0	0,35 - 0,75	en çok 0,50	-	-	0,30	
X 89 CrMoV 18 1	0,85 - 0,95	en çok 1,00	en çok 1,00	0,045	0,030	17,0 - 19,0	0,90 - 1,30	-	0,07 - 0,12	-	0,30	
e)												
80 MoCrV 42 16	0,77 - 0,85	en çok 0,25	en çok 0,35	0,015	0,015	3,75 - 4,25	4,00 - 4,50	-	0,90 - 1,10	-	-	
X 82 WMoCrV 6 5 4	0,78 - 0,86	en çok 0,40	en çok 0,40	0,030	0,030	3,80 - 4,50	4,70 - 5,20	-	1,70 - 2,00	6,00 - 6,70	-	
X 75 WCrV 18 4 1	0,70 - 0,78	en çok 0,45	en çok 0,40	0,030	0,030	3,80 - 4,50	en çok 0,60	-	1,00 - 1,20	17,5 - 18,5	-	

1.3. Rulmanlı Yatakların İmalâtı

Rulmanlı yataklar; yuvarlanma elemanları, bilezikler ve kafesten meydana gelir. Rulmanların bilezikleri, yuvarlak çubuk veya boru şeklindeki çelik malzemelerden imal edilirler. Dış çapı 42 mm'den küçük olan bilezikler, çubuk biçimindeki malzemelerden, dış çapı 42 mm'den büyük olan bilezikler ise, boru şeklindeki malzemelerden imal edilirler [8].

Söz konusu malzemeler, ilk aşamada, imal edilecek bileziklere uygun genişlikte kesilirler. Çubuk şeklindeki malzemedен kesilen dolu parçalar torna tezgahında özel kesme kalemleriyle, her iki tarafından aynı anda işlenerek, iç ve dış bilezikler kaba bir şekilde elde edilirler. Elde edilen bileziklerin yan yüzeyleri temizlenip, çapakları alındıktan sonra, bir seri yarı otomatik torna tezgahlarında 0,2 - 0,3mm fazlalık bırakılarak işlenirler. Torna ile işlenen bilezikler, üzerlerindeki çapak ve yağ gibi istenmeyen parçacıkların ve maddelerin giderilmesi için yıkanarak temizlenirler. Temizlenen bilezikler, ısıtıl işlem fırınlarında 830 - 860°C arasındaki bir sıcaklıkta, bilezik kalınlığına göre belirlenen bir süre (0.5 - 1 saat) tavlandıktan sonra, yağ banyosunda su verilerek sertleştirilirler [1,8].

Sertleştirilen bilezikler, gevrekliklerinin giderilip, tokluklarının arttırılması için, 160 - 180°C arasındaki bir sıcaklıkta 1 veya 2 saat gibi bir süre menevişlenirler. Menevişleme işlemi sonucunda, bileziklerin sertlik değerinin 60-64 RSD-C arasında olması sağlanır.

Sertleştirilen bilezikler, özel aşındırıcı bir taş havuzuna yerleştirilerek üzerlerindeki çapak ve tufal tabakası temizlenir. Temizlenen bileziklerin önce yanakları, yanak taşlama tezgahlarında, dış yüzeyleri puntasız taşlama tezgahlarında ve iç yüzeyleri ise, delik taşlama tezgahlarında taşlanır. Ayrıca, bileziklerin yuvarlanma yolları, özel yuvarlanma yolu tezgahlarında, aynı profile sahip taşlarla, hassas bir şekilde taşlanırlar. Son olarak, bileziklerin yuvarlanma yolları, yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek için, çok ince taneli elastik aşındırıcı taşlarla hassas taşlama işlemine tabi tutulurlar [8]. İmalâtı tamamlanan bileziklerin boyutları ve yüzey pürüzlüğü kontrol edilir ve toleransları uygun olmayan bilezikler, hatalı mamul gurubuna ayrılırlar. Toleransları uygun olan bilezikler, uygun çözücüler içerisinde temizlenip üzerlerindeki bütün yabancı maddelerden arındırıldıktan sonra, montaja hazır hale getirilirler.

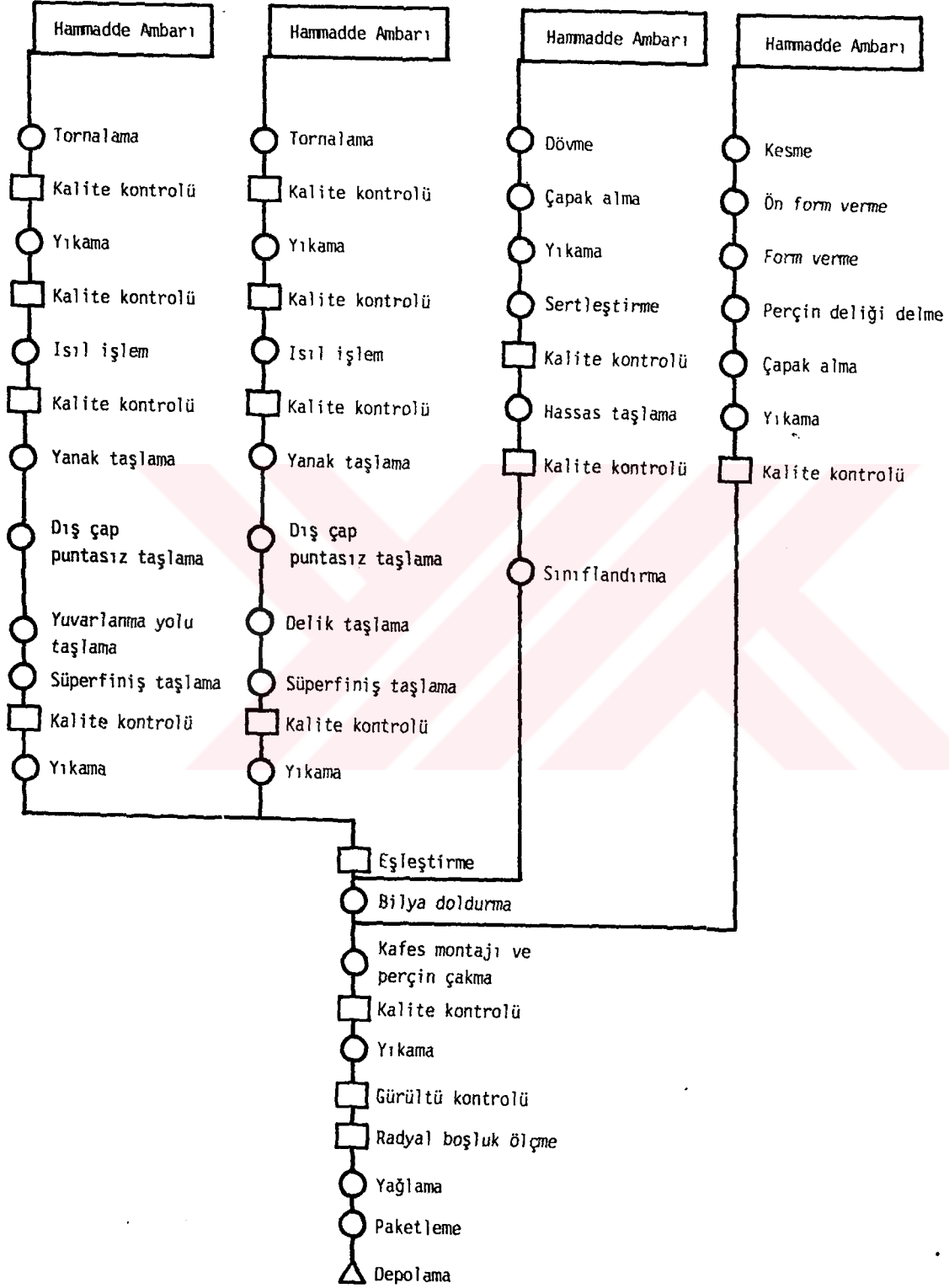
Rulmanlı yatakların, bilya dışındaki yuvarlanma elemanları klasik tezgahlarda işlenir ve taşlanırlar. Bilyalar ise, özel işlemlerle imal edilirler [8]. Bilya imalâtında, önce yuvarlak çubuklardan uygun parçalar kesilir. Bu parçalardan küçük çaplı olanlar soğuk, büyük çaplı olanlar ise, sıcak olarak preslenerek, ilk bilya şekli elde edilir. Söz konusu bilyalar, presleme sırasında oluşan iç gerilmelerin giderilmesi için, gerilme-giderme tavına tabi tutulurlar. Daha sonra, aksi yönde dönen yuvalı büyük plakalar arasında yağ ve zımpara tozu yardımıyla, 0,01-0,02 mm'lik bir fazlalık kalacak şekilde işlenirler. Bilyalar, 830 - 860°C arasındaki bir sıcaklıkta tavlandıktan sonra, yağda su

verilerek sertleştirilen bilyalar, tam çapa gelecek şekilde taşlanıp, parlatılarak, boyutlarına göre sınıflandırılırlar [1,8]. Aynı rulmanlı yatakta kullanılacak bilyalar arasında, 10 mm'lik çapa kadar $0.25\mu\text{m}$, 10 mm'den büyük çaplar için ise, $0.5\mu\text{m}$ 'lik bir ölçü farkına müsaade edilmektedir [10,12].

Montaj aşamasında, rulmanlı yataklardan istenilen radyal boşlukların elde edilebilmesi için, iç ve dış bileziklerin yuvarlanma yollarının boyutları tekrar ölçülerek, uygun çaplı yuvarlanma elemanları (bilya veya makara) ile eşleştirilirler [8].

Montajı tamamlanan rulmanlı yataklar, kalite kontrolü ve sınıflandırma işlemine tabi tutulurlar. Rulmanlı yatakların radyal ve aksel boşlukları özel düzeneklerle ölçülerek, tolerans sınırları dışında kalanlar hatalılar gurubuna ayrılırlar. Tolerans sınırları içerisinde kalanlar ise, radyal boşluklarına ve gürültü seviyelerine göre sınıflandırılarak, markalanırlar.

Üretim ve kontrolleri yapılan rulmanlı yataklar, koruyucu yağ ile yağlanırlar. Kapaklı olarak sevk edilecek olan rulmanlı yataklar, gresle doldurularak kapakları takılır. Açık olarak sevk edilecek yataklar ise, yağlandıktan sonra naylonlanıp, kutulanarak piyasaya arz edilirler. Rulmanlı yatakların imalât aşamaları şematik olarak Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Rulmanlı yatakların imalât aşamaları

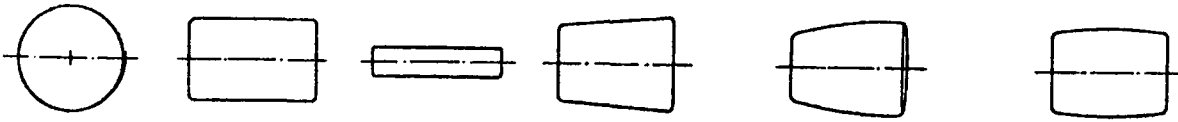
1.4. Rulmanlı Yatakların Tipleri

Rulmanlı yataklar, farklı uygulamalar için, farklı tiplerde imal edilirler. Rulmanlı yataklar, taşıdıkları ana yükün doğrultusuna göre, radyal veya aksenal rulmanlar olarak adlandırılırlar. Ayrıca, yuvarlanma elemanlarının standartlaştırılmış tiplerine göre de, genelde bilyalı ve makaralı olarak iki ana guruba ayrılırlar. Rulmanlarda, yaygın olarak kullanılan yuvarlanma elemanlarının türleri Şekil 2'de verilmiştir. Rulmanlı yatakların, taşıdıkları yükün doğrultusuna ve kullanılan yuvarlanma elemanlarının tipine göre sınıflandırılması ise Şekil 3'de görülmektedir. Bu sınıflandırmada, rulmanlı yataklar, yuvarlanma elemanlarının hareket kabiliyetlerine göre, sabit veya oynak, yükü iletme biçimlerine göre de, eğik, dört nokta temaslı ve konik rulmanlar olarak adlandırılırlar.

Söz konusu sınıflandırmada yer alan sabit bilyalı rulmanlar, tek sıralı ve iki sıralı olarak imal edilirler. Bu rulmanların her iki bileziğinin üzerinde de, yarıçapları bilya yarıçapından az daha büyük olan, derin kanallar bulunur. Bu rulmanlarda, doldurma kanalı olmaması ve yuvarlanma yolu ile bilya yarıçaplarının birbirlerine yakın olmaları nedeniyle, bilyalar, yuvarlanma yolları tarafından daha iyi desteklenirler [8,12]. Böylece, sabit bilyalı rulmanlar, yüksek devir sayılarında bile, hem radyal, hem de aksenal yükleri taşıyabilirler. Bu rulmanlar, yüksek devir sayılarında çalışmaya uygun olup, diğer rulmanlar kadar bakım gerektirmezler. Bu özelliklerinden dolayı, sabit bilyalı rulmanlar, en çok kullanılan rulman türlerinden birini oluştururlar. Tek sıralı, sabit bilyalı bir rulmanlı yatağın montaj resmi Şekil 4'de verilmiştir.

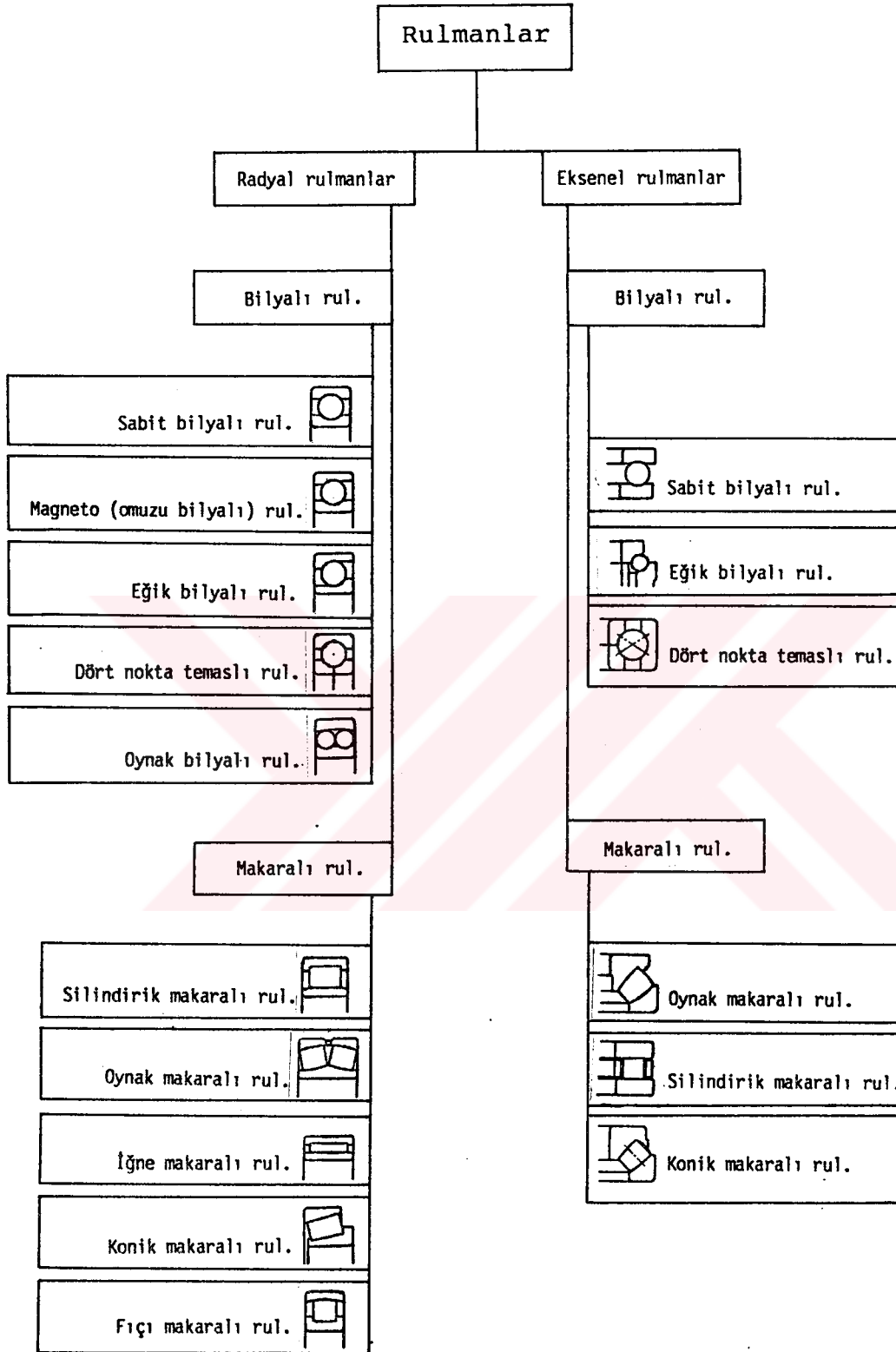
İki sıralı, sabit bilyalı rulmanlarda ise, doldurma kanalı bulunur. Bu kanal sayesinde, bu tür rulmanlara radyal yönde ağır yük taşıma özelliği sağlayan, tek sıralı bilyalı rulmana göre, daha çok sayıda bilyanın yerleştirilmesi mümkün olmaktadır. Bu tür rulmanların, radyal yük taşıma kapasitelerinin yüksek olmalarına rağmen, ekstenel yük taşıma kapasiteleri oldukça düşüktür [1,10,12]. Ayrıca, bu rulmanlar, milde meydana gelen küçük değerdeki açısal sapmalara bile izin vermezler [12].

Ağır yük ve yüksek mil hızlarının söz konusu olduğu uygulamalarda, genellikle silindirik makaralı rulmanlar kullanılır [8,12]. Bu rulmanların yuvarlanma elemanları, bileziklerinden birindeki sabit iki fatura arasında yer alan kafes tarafından bir arada tutulan, makaralardan oluşur. Silindirik makaralı bir rulmanın montaj resmi Şekil 5'de verilmiştir. Silindirik makaralı rulmanlar, tek sıralı ve çift sıralı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Tek sıralı silindirik makaralı rulmanların, yük taşıma kapasiteleri yüksek olup, bu rulmanlar yüksek hızlarda çalışan makinalarda kullanılırlar [10,12]. İki sıralı silindirik makaralı rulmanlar ise, mil ekseninde, ancak 2 ilâ 4 dakika arasındaki bir eğriliğe müsaade ettiklerinden, özellikle hassas tezgâh millerinin rijit bir şekilde yataklanmasında kullanılırlar [8].

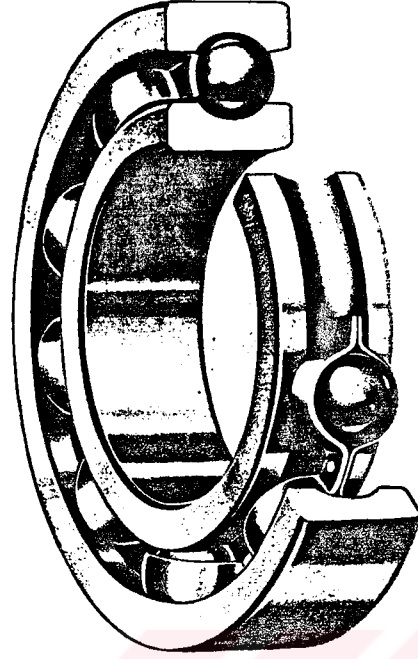


Bilya Silindirik İğneli Konik Küresel Fıçı Tipi
Makara Makara Makara Konik Makara Makara

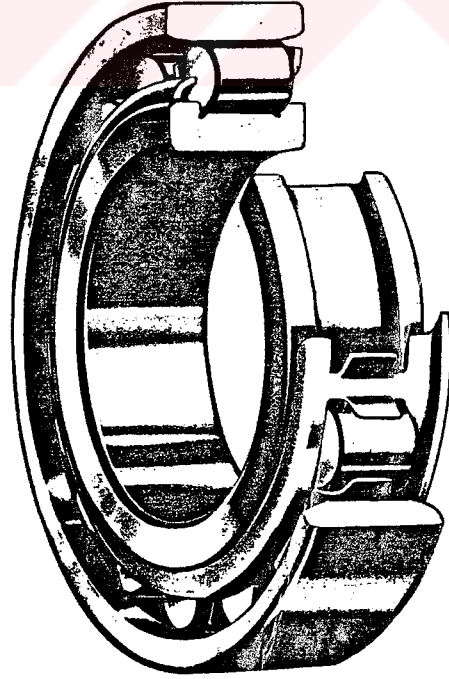
Şekil 2. Rulmanlı yataklarda kullanılan yuvarlanma elemanları [8].



Şekil 3. Rulmanlı yatakların sınıflandırılması.



Şekil 4. Sabit bilyalı rulmanın montaj resmi



Şekil 5. Silindirik makaralı rulmanın montaj resmi

1.5. Rulmanlı Yatakların Çalışma İlkeleri ve Kullanım Alanları

Rulmanlı yataklar, yük iletimini yuvarlanma elemanları ile gerçekleştiren makina elemanlarıdır [1,36]. Rulmanlı yatakların sürtünme katsayıları, kaymalı yataklara göre, çok daha düşük olduğundan, çok az enerji kaybına sebep olurlar [1,8].

Rulmanlı yatakların, yük taşıma kapasiteleri yüksek olup, yüksek dönme hızlarında rahatlıkla kullanılabilirler. Bu yataklar, genelde belirli değerlerdeki aksenal ve radyal yükleri taşıyabilirler. Ayrıca, yataklama işlemi için aksenal yöndeki dar aralıklarda kullanılabilirler [10].

Rulmanlı yataklarda genellikle, iç bilezik hareketli olup, dış bilezik sabittir. İç bilezik, mil presle sıkı olarak monte edilir ve çalışma sırasında mil ile birlikte döner, dış bilezik ise, yatak yuvasına tutuk geçme ile yerleştirilir ve hareketsizdir. Yuvarlanma elemanları hem iç bilezik etrafında, hem de kendi ekseni etrafında dönme hareketi yaparlar. Kafes, yuvarlanma elemanlarını iç bilezik etrafında, belirli bir konumda tutarak, birbirlerine değmeden, bir düzen içerisinde çalışmalarını sağlayan önemli bir elemandır. Ayrıca, kafes, bilezikleri ayrılabilen rulmanlarda, yuvarlanma elemanlarının bileziklerden birinin etrafında durmalarını sağlar [8].

Rulmanlı yataklar, günümüzde, en basit makinadan en gelişmiş makinaya kadar bütün araçlarda kullanılmaktadır. Bu yataklar, hafif yük ve düşük hızlarda kullanıldıklarında gresle yağlanırlar. Ağır yük ve/veya yüksek mil hızlarında kullanıldıklarında ise, sıvı yağlayıcı veya yağ sisi ile yağlanırlar [8,20].

1.6. Rulmanlı Yataklardaki Gerilmelerin Hesaplanması

Radyal olarak yüklenmiş rulmanlı yataklarda, yuvarlanma elemanlarına farklı büyüklükte yük etki eder. Bunun tipik bir örneği Şekil 6'da görülmektedir. Uygulanan yük doğrultusunda yer alan yuvarlanma elemanı, en büyük yükü taşımaktadır [8,36,40]. Bu yükün değeri (F);

$$F = \frac{k \cdot F_t}{z} \dots \dots \dots (1)$$

bağıntısıyla hesaplanır [8]. Burada; F_t rulmanlı yatağa gelen toplam yük, z rulmanlı yataktaki yuvarlanma elemanları sayısı, k ise, rulmanlı yatağın boşluk veya sıkılığıının tek bir yuvarlanma elemanına düşen yüke etkisini gösteren boşluk parametresidir. Boşluksuz olarak imal edilmiş rulmanlı yataklarda, çalışma sırasında herhangi bir sıkışma meydana gelmiyorsa, $k=4,37$ olarak alınır [8,40]. Rulmanlı yatakların, boşluklu veya ön yüklemeli (sıkı) durumda kullanılması halinde, k katsayısının değeri, Şekil 7'de verilen eğriden hesaplanabilir [8]. Uygulamada ise, rulman elemanları arasındaki boşluğun yük dağılımını etkilemesi nedeniyle, k katsayısı 5 olarak alınır [36,40].

Yüklenmiş durumdaki rulmanlı yatakların yuvarlanma elemanlarının yüzeyleri ile bileziklerinin yuvarlanma yolları üzerindeki temas bölgelerinde deformasyonlar meydana gelir [32]. Gerçek temas alanı, rulman elemanlarının şekline, boyutuna ve uygulanan yüke bağlıdır [8,32,37,38]. Rulmanlı yataklarda yuvarlanma elemanı ile bileziklerin yüzeyleri arasındaki temas alanları çok küçük olduklarından, rulman elemanlarının yüzeylerinde oldukça yüksek düzeyde basınçlar

oluşabilir [31,32,36]. Yuvarlanma elemanlarının yüzeyleri ile bileziklerin yuvarlanma yolları üzerinde, elastik temas sonucunda meydana gelen basınçlar, Hertz teorisi yardımıyla hesaplanabilir [32,37,38]. Hertz teorisinin uygulanabilmesi için, temas eden rulman elemanlarının homojen ve izotrop malzemelerden imal edilmiş olmaları, temas alanlarının rulman elemanlarının boyutlarına göre çok küçük olmaları, temas bölgelerinde meydana gelen deformasyonların elastik şekil değiştirme sınırlarını aşmamaları ve temas eden yüzeylerde kayma gerilmelerinin meydana gelmemesi gerekmektedir [32,33,37,39]. Söz konusu gerilmelerin belirlenebilmeleri için, temas yüzeylerinin geometrisi ile rulman malzemesinin elastiklik modülü, poisson oranı, elastiklik sınırı, akma sınırı ve kayma modülü gibi elastiklik sabitlerinin bilinmesi gerekir [31-33].

Rulmanlı yataklarda, temas alanlarının şekli yuvarlanma elemanlarının şekline bağlıdır. Teorik olarak, bilyalı rulmanlarda noktasal temas, makaralı rulmanlarda ise çizgisel temas meydana gelmektedir. Rulmanlı yataklar yüklendiğinde, elemanlarının temas bölgelerinde meydana gelen deformasyonlardan dolayı, noktasal temas elips, çizgisel temas ise dikdörtgen şeklini alır [8,32,37,40].

Söz konusu temas alanlarının şekli ve büyüklükleri, rulman elemanlarının boyutlarına, şekillerine ve uygulanan yüke bağlıdır. Bilyalı rulmanlarda oluşan elips şeklindeki temas alanının eksen uzunlukları,

$$2a = 2\mu \sqrt[3]{\frac{3[1-(1/\nu^2)]}{E \cdot \Sigma \rho}} F \dots\dots\dots(2)$$

$$2b = 2\sigma \sqrt[3]{\frac{3[1-(1/\nu^2)]}{E \cdot \Sigma \rho}} F \dots\dots\dots(3)$$

bağıntılarıyla hesaplanabilir [8,32]. Bu bağıntılarda; a ve b elips şeklindeki temas alanının yarı eksen uzunlukları, μ ve α rulman elemanlarının boyut ve şekline bağlı katsayılar, E rulman malzemesinin elastiklik modülü, ν rulman malzemesinin poisson oranı, F kuvvet doğrultusundaki yuvarlanma elemanına etkiyen en büyük yük, $\Sigma \rho$ ise temas eden rulman elemanlarının eğrilik yarıçaplarının toplamıdır. Rulman elemanlarının eğrilik yarıçaplarının asal eksen yönlerine göre gösterilişleri Şekil 8'de verilmiştir. Buradaki, μ ve α katsayılarının belirlenebilmeleri için, önce, temas eden rulman elemanlarının asal eğrilik düzlemleri arasındaki θ açısının değeri;

$$\Sigma \rho = \rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22} \dots \dots \dots (4)$$

$$\cos \theta = \frac{\rho_{11} - \rho_{12} + \rho_{21} - \rho_{22}}{\Sigma \rho} \dots \dots \dots (5)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Bulunan her $\cos \theta$ değerine karşılık gelen μ ve α katsayıları Ek 1'de verilen tablodan okunabilir. Bu bağıntılarda, eğrilik yarıçaplarını gösteren ρ değerleri, eğrilik merkezlerinin elemanın içerisinde kalması durumunda pozitif, elemanın dışarısında kalması durumunda ise, negatif olarak alınır [8,32,40].

Rulmanların yuvarlanma elemanları ile bilezikleri arasında oluşan, elips şeklindeki temas alanı;

$$A = \pi \cdot a \cdot b \dots \dots \dots (6)$$

formülü ile hesaplanır. Söz konusu temas bölgesinde oluşan yüzey basıncı P, uygulanan yük F ve temas alanı A olmak üzere,

$$P = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (7)$$

şeklinde yazılabilir.

Basınç, temas alanının şekline göre dağılım gösterir ve temas alanının belirli bir noktasında en büyük değere ulaşır [32,37,40]. Bilyalı rulmanlarda, Şekil 9a'da görüldüğü gibi, yarım elipsoid şeklinde bir dağılım gösteren, basınç, elips şeklindeki temas alanının merkezinde en büyük değere ulaşır. Söz konusu basıncın değeri (P_{maks}),

$$P_{maks} = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi ab} = 1,5 P \dots\dots\dots(8)$$

bağıntısı ile hesaplanır [8,37].

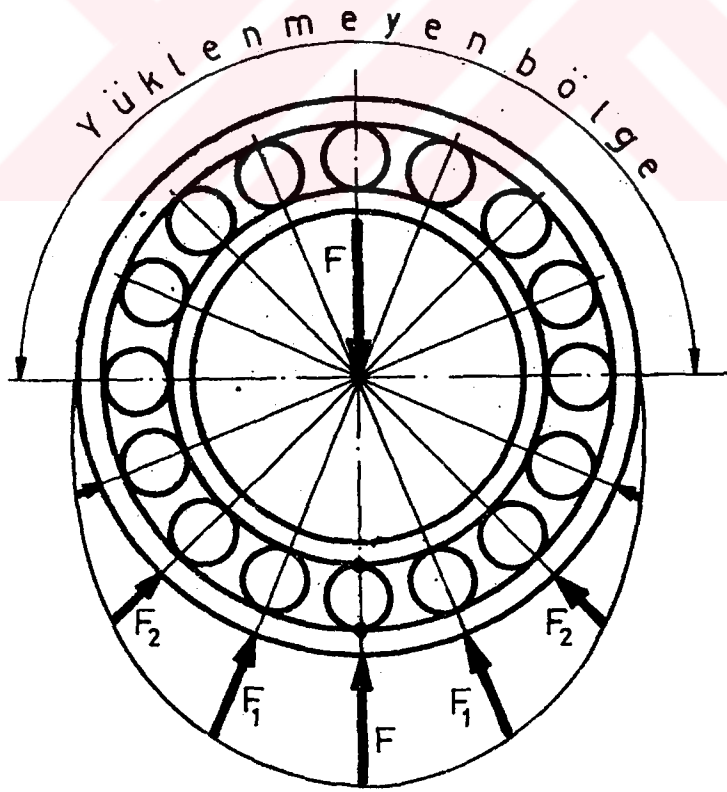
Silindirik makaralı rulmanlarda ise, yuvarlanma elemanları ile bilezik yüzeyleri arasındaki temas alanı dikdörtgen şeklinde olur. Bu durumda, dikdörtgen şeklindeki temas alanında yarım silindir şeklinde bir basınç dağılımı meydana gelirken, yüzey basıncının en büyük değeri, Şekil 9b'de görüldüğü gibi, temas alanının merkezinden geçen x ekseninin üzerinde oluşur [8,36,40].

Temas alanlarındaki basınç dağılımlarının bilinmesi durumunda, elemanların temas bölgelerinin herhangi bir noktasındaki gerilmeler hesaplanabilir [8,32,39,40]. Rulmanlı yataklarda, nokta, çizgi ve elips şeklindeki temas alanları için, yüzey altında aynı tür gerilmeler oluşur [32,37,40]. Rulman elemanlarının yüzeylerinin altında oluşan gerilmelerin değişimleri, Şekil 10'da verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi, yüzey altındaki asal gerilmeler, derinliğin artması ile değişik şekillerde azalmaktadır. Yüzey altında oluşan kayma gerilmesi (τ) ise, distorsiyon enerjisi, maksimum kayma gerilmesi ve değişken kayma gerilmesi hipotezleri ile hesaplanabilir [32,37-40]. Yüzey altındaki bu kayma

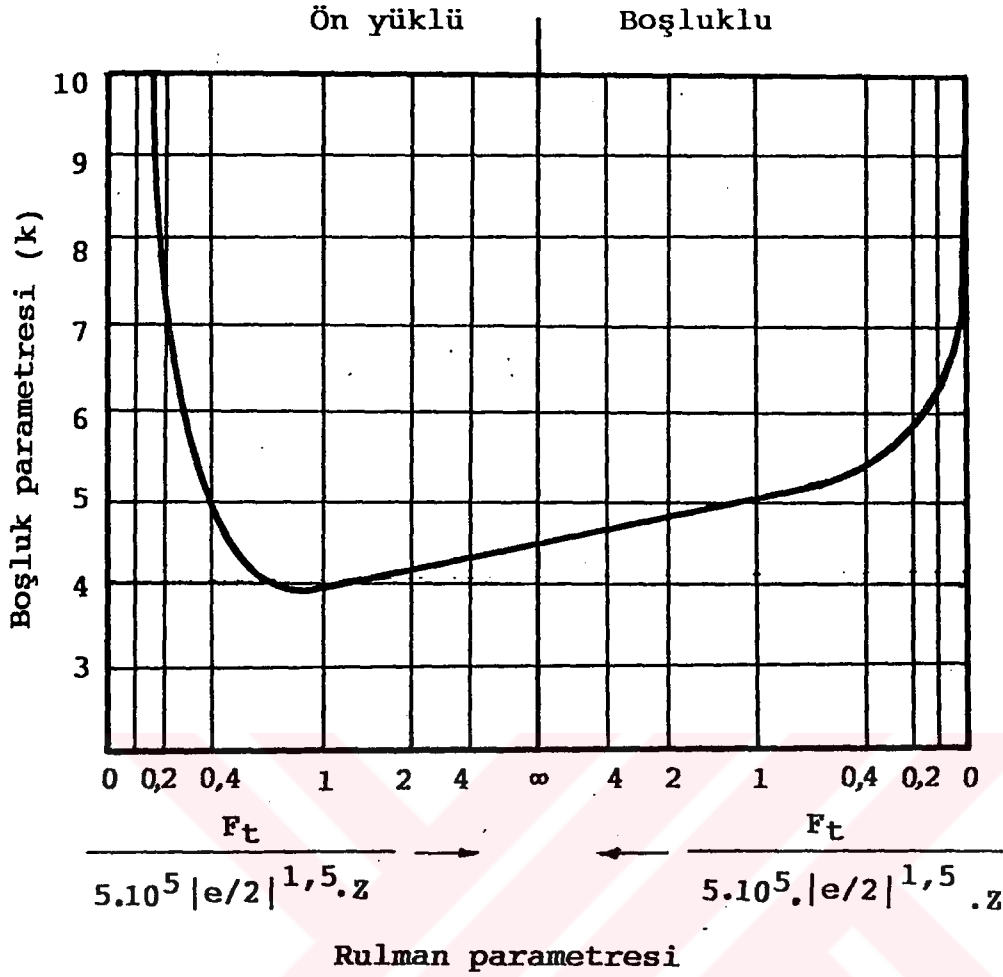
gerilmesinin değeri,

$$\tau = (\sigma_z - \sigma_y) / 2 \dots\dots\dots(9)$$

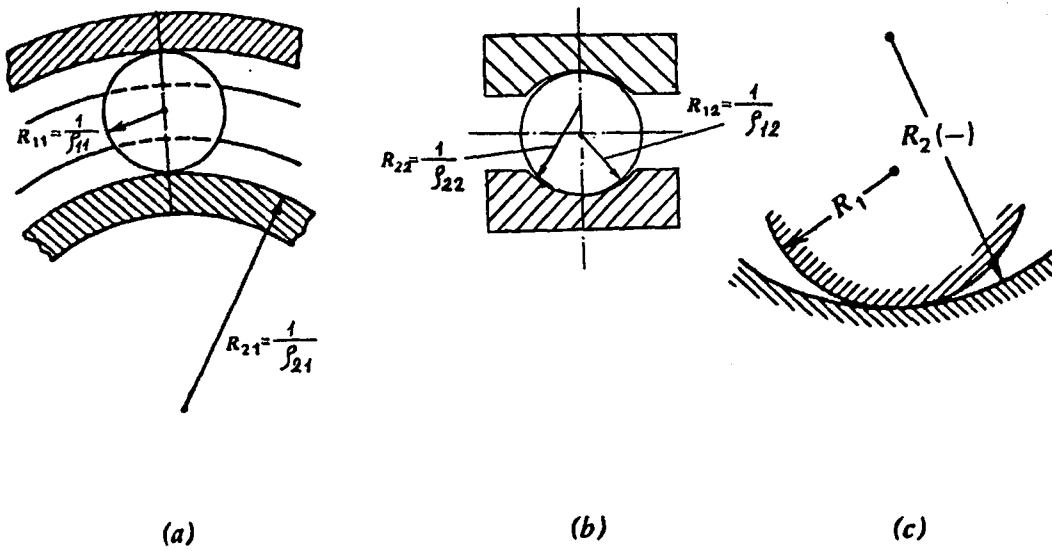
bağıntısıyla verilmiştir [37-40]. Kayma gerilmesi (τ), şekil 10'da görüldüğü gibi, z eksenî yönünde, yüzeyden itibaren artarak, belirli bir derinlikte en büyük değere ulaştıktan sonra, yavaşca azalmaya başlamaktadır. Kayma gerilmesinin en büyük değeri (τ_{maks}), temas alanına ait eksen uzunluklarının oranına (b/a) bağlı olarak, belirli bir derinlikte meydana gelir [8,40].



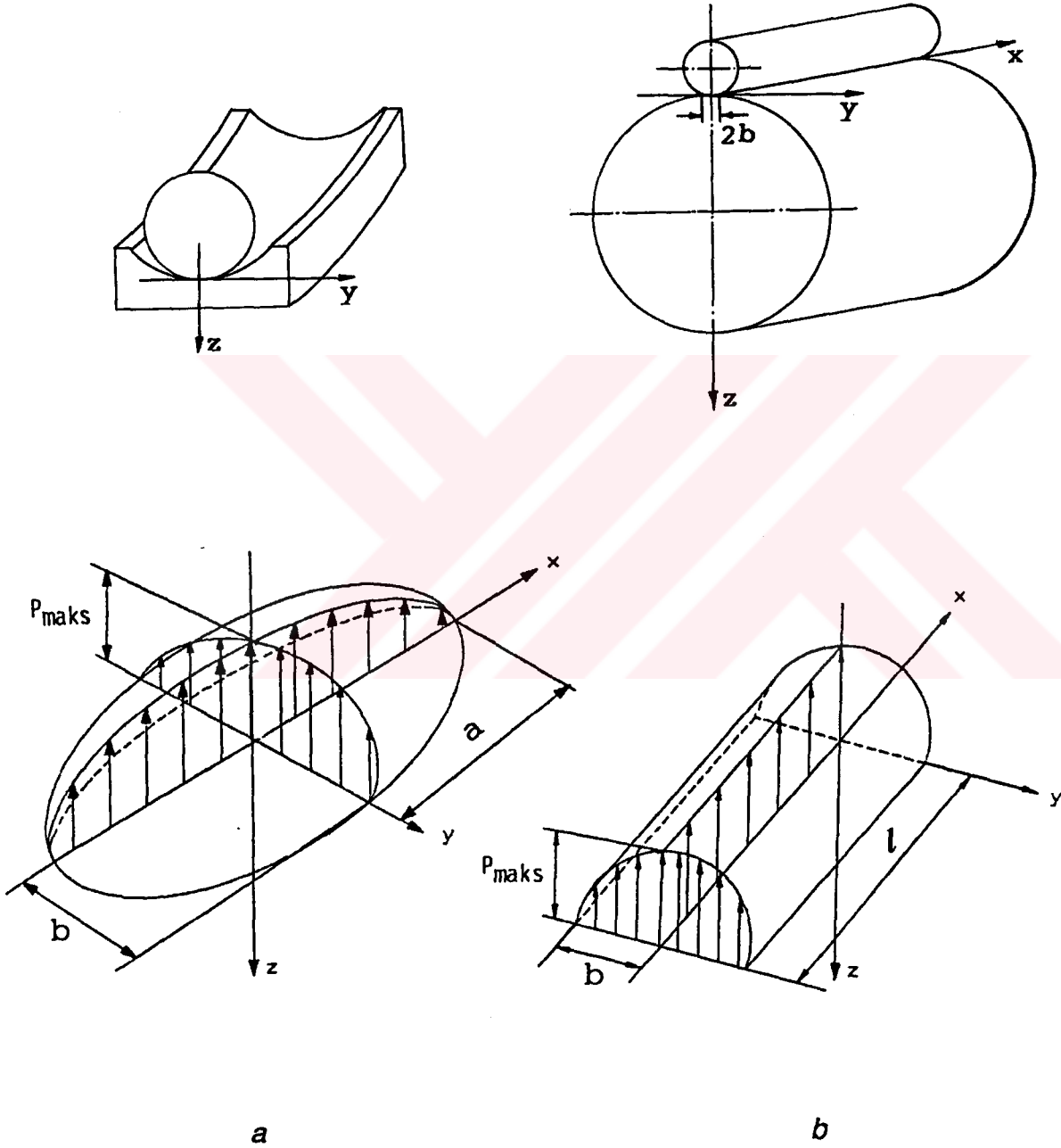
Şekil 6. Boşluksuz ve radyal yönde yüklenmiş rulmanlı yataklardaki yük dağılımı [36].



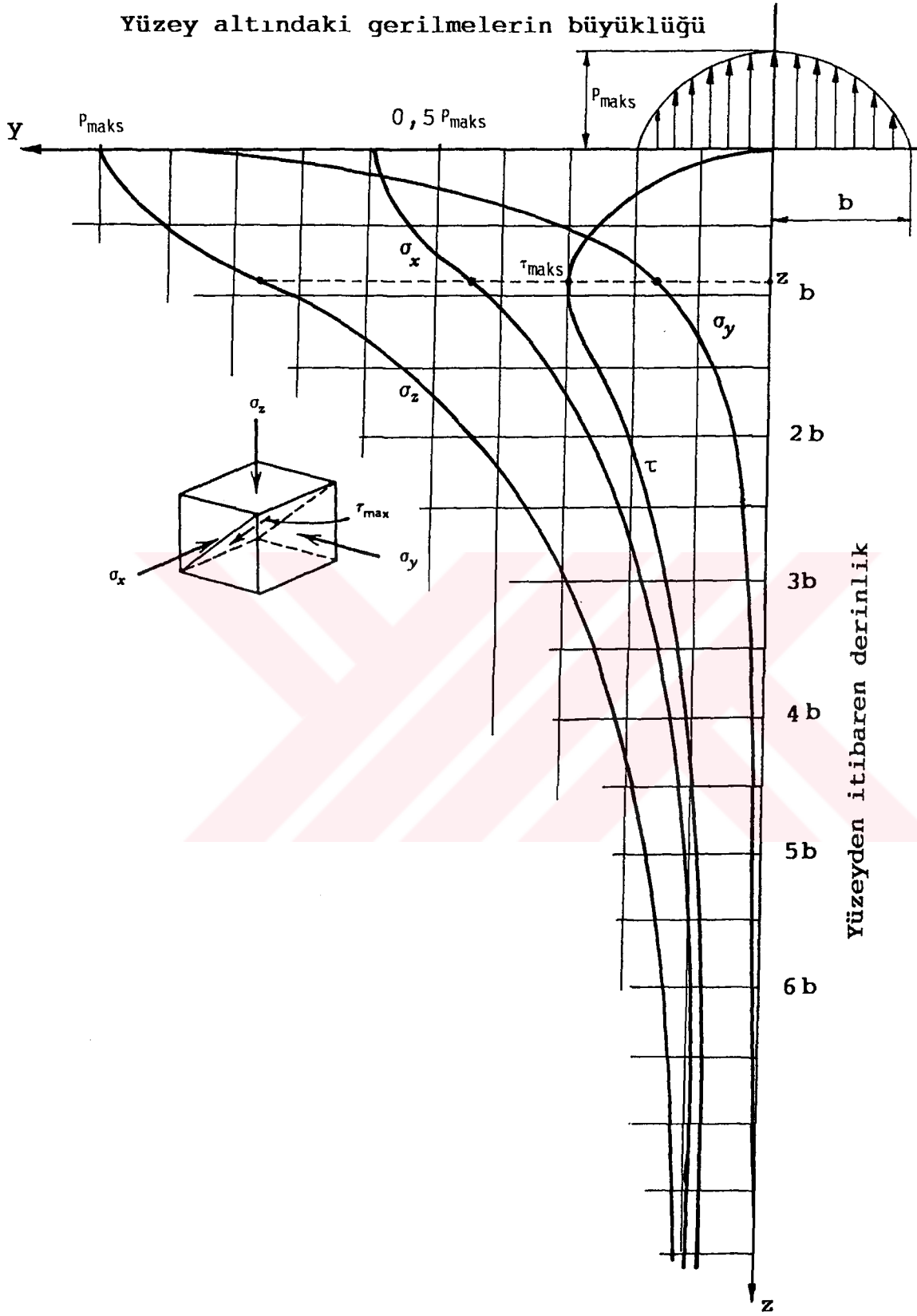
Şekil 7. Bilyalı rulmanlarda boşluğun ve ön yüklemenin yük dağılımına etkisi [8].



Şekil 8. Rulman elemanlarının temas bölgelerindeki eğriliklerin gösterilişi



Şekil 9. a) Bilyalı ve b) makaralı rulmanların temas alanlarındaki basınç dağılımları [8].



Şekil 10. Rulmanlı yataklarda temas eden yüzey alanlarının altında oluşan gerilmelerin değişimi [32].

1.7. Rulmanlı Yataklarda Aşınma ve Yorulma

Aşınma, temas eden yüzeylerde tribolojik etkileşimler sonucunda meydana gelen, istenmeyen malzeme kaybı olarak tanımlanır [25]. Aşınma mekanizmaları, adhesif (adhesive) aşınma, abrasif (abrasive) aşınma, korozyon aşınması ve yorulma aşınması olmak üzere dört ana başlık altında toplanabilir [23,25,34].

Adhesif aşınma, iki katı yüzey arasındaki kayma sürtünmesinden kaynaklanan yaygın bir aşınma türü olup, adhezyonla (adhesion) birbirlerine kaynamış yüzey pürüzlerinin, kayma hareketi sırasında, makaslanma ile kesilmesi sonucunda, yumuşak parçadan, sert parça yüzeyine malzeme transferi şeklinde meydana gelir [23,34]. Tebeşir ile tahtaya yazma işleminde, yumuşak tebeşirin, daha sert tahta yüzeyine geçmesi, bu tür aşınmaya örnek olarak verilebilir.

Abrasif aşınma ise, yüzeylerin birbiri üzerindeki hareketi sırasında, yumuşak yüzeylerin sert yüzeyler tarafından kesilmesi veya kazınması ya da yüzeyler arasına giren sert parçacıkların yüzeyleri kesmesi şeklinde ortaya çıkar [23,34].

Korozyon aşınması, çalışma ortamının kimyasal veya elektro kimyasal etkileriyle, parça veya elemanlarının yüzeylerinde, oksitlenme, çukurlaşma, çatlama veya pullanma şeklinde meydana gelir [9].

Yorulma aşınması ise, tekrarlı yük etkisiyle rulmanlı veya kaymalı yatak elemanlarının yüzeylerinde veya yüzeylerinin altında yapısal değişimlerle başlayıp, çatlama, çukurlaşma veya pullanma şeklinde meydana gelen bir hasar mekanizmasıdır [25,41].

Bütün makina elemanları gibi, rulmanlı yatakların da çalışma ömürleri bir takım faktörlerle sınırlandırılmıştır [9]. Rulmanlı yatakların çalışma ömürlerini olumsuz yönde etkileyen faktörlerin başında, yetersiz veya uygun olmayan yağlama, aşırı ve/veya darbeli yükleme, aşırı titreşim, uygun olmayan ortamda (kirli, tozlu veya korozif) çalışma gibi durumlar gelmektedir [8,9,41]. Bu nedenlerden birinin veya birkaçının birlikte ortaya çıkması sonucunda, yatak yüzeylerinde çukurcuk, soyulma, pullanma, çatlama, kırılma gibi, hasara yol açan aşınma ve yorulma belirtileri meydana gelebilir [8,9,23,25]. Rulmanlı yataklarda meydana gelen hasarların nedenlerinin belirlenebilmesi için, yatakların tasarım ve imalâtı ile çalışma şartlarının iyi analiz edilmesi gerekmektedir [9,42,43].

Rulmanlı yataklarda, teorik olarak, sürtünme ve aşınmanın meydana gelmemesi gerekir [9,14,20]. Ancak, yetersiz veya uygun olmayan yağlama durumunda, rulman elemanları arasında metal-metal sürtünmesi meydana gelebilir [2,23]. Söz konusu sürtünme nedeniyle, rulman elemanlarının bazı yüzey bölgeleri yüksek sıcaklıklara kadar ısınabilir. Ac_1 çizgisinin üzerindeki sıcaklıklara kadar ısınan yüzey bölgelerinin, yağlayıcı yağın ve eleman kütlelerinin etkisiyle, ani olarak soğuması sonucunda martenzitik yapı oluşur. Elemanların, Ac_1 çizgisinin altında kalan sıcaklıklara kadar ısınan yüzey bölgelerinin, aşırı menevişlenmesi sonucunda ise, yumuşak bir bölge veya tabaka oluşur [2-5,41]. Rulman elemanlarının yüzeylerinde, sertlikleri farklı olan tabakaların oluşumu, yüzey basıncı, yüzey sıcaklığı, milin devir sayısı (dönme hızı) ve elemanların kütlesi gibi etkenlere bağlıdır [2-5]. Isınma ve soğuma sonucunda meydana gelen yapısal değişimler, rulman elemanları arasındaki sertlik dengesinin bozulmasına neden olurlar [2,25,41]. Bunun sonucunda da, yüzeyi sertleşen eleman, birlikte çalıştığı,

yüzeyi yumuşamış elemanı keserek aşındırabilir. Ayrıca, ortamda bulunan veya çalışma sırasında oksitlenme ya da korozyon etkisiyle oluşan sert parçacıklar da, elemanların yüzeylerinin aşınmalarını hızlandırır [2,3,23,44].

1.7.1. Yuvarlanma Yorulması

Makina parçalarının pek çoğu, tekrarlı gerilmeler veya titreşimler altında çalışırlar. Tekrarlı gerilmeler altında çalışan parçalarda, gerilmelerin en büyük değerlerinden çok, periyodik tekrarları daha etkili olmaktadır [9,29,32,45]. Tekrarlı gerilmeler, makina elemanlarının statik mukavemetlerinden daha düşük olmaları durumunda bile, belirli bir tekrar sayısı sonunda, elemanlarda çatlamaya ve bunu izleyen kırılma veya kopmaya neden olabilirler [2,4,9].

Yuvarlanma yorulması, tekrarlı gerilmelerin etkisiyle, rulman elemanlarının yüzeylerinde veya yüzeylerinin altında, belirli çevrim sayıları sonunda, çatlak oluşumu ile başlayıp çukurlaşma, kırılma ve kopmaya yol açan bir hasar mekanizması şeklinde meydana gelir [8,18]. Yuvarlanma yorulması, rulman elemanlarının yüzeylerinde, çatlama, çukurlaşma ve pullanma şeklinde meydana gelirken, yüzey altında da, yapısal değişimler ile başlayıp, bunu izleyen çatlak oluşması şeklinde kendini gösterir [9,41,46]. Bu nedenle, rulmanlı yataklarda meydana gelen yorulma, yüzey ve yüzey altı yuvarlanma yorulması olmak üzere iki gruba ayrılır [23].

1.7.1.1. Yüzey Yorulması

Rulmanlı yatakların çalışma ömrü, elemanların yüzeylerinde meydana gelen aşınma ve yorulma hasarlarının büyüklüğüne bağlıdır. Rulmanlı yataklardaki yüzey yorulması,

elemanların yüzeylerinde oluşan gerilme yığılması ve kayma gerilmesinin etkisi ile meydana gelir [9,41]. Gerilme yığılmaları, elemanların imalât yönteminden kaynaklanan yüzey pürüzlülüğü, çizik, çentik, keskin köşe ve artık gerilmeler gibi etkenler ile, çalışma sırasında elemanlarda meydana gelen plastik deformasyondan kaynaklanır [9,23,28,41]. Rulman elemanlarının yüzeylerinde oluşan basınç, temas alanının merkezinde en yüksek değere ulaşırken, kenarlarda sıfır değerine düşer [23]. Ayrıca, elemanların birbirine temas eden yüzeylerinde, kayma sürtünmesinin etkisi ile ısıl gerilmeler meydana gelir [25,41]. Rulman malzemesinin, plastik deformasyona elverişli olmaması durumunda, çalışma sırasında oluşan gerilmelerin etkisiyle elemanların yüzeylerinde çatlaklar oluşur [23,41]. Gerilme yığılması sonucunda oluşan en büyük gerilme değerinin, rulman malzemesinin akma sınırını aşması durumunda, elemanların yuvarlanma yollarında plastik deformasyon ve/veya çatlaklar meydana gelir [2,41,47].

Rulman elemanlarının yüzeylerinde oluşan çatlaklara giren sıvı yağlayıcı, yuvarlanma elemanlarının çatlağın üzerinden geçmesi sırasında, çatlak içerisindeki hidrostatik basıncı artırarak çatlağın ilerlemesine neden olur [9,19,48]. Buna ilaveten, ısınan yağın bozulması sonucunda oluşan organik asitler veya değişik korozif sıvılar, çatlaklara girerek çatlakların ilerleme hızını arttırabilirler [9,23,48].

Söz konusu çatlaklar, çalışma sırasında, birbirleriyle birleştikleri gibi, yük tekrarının artmasıyla ilerleyerek yüzeye ulaşabilirler. Yüzeye ulaşan çatlaklar, belirli çevrim sayıları sonunda, yüzeyden parça kopmasına ve dolayısıyla, çukurlaşmaya veya pullanmaya yol açabilirler [7,19,23]. Elemanların yüzeylerinden kopan parçacıklardan bazıları, rulman elemanlarının yüzeyleri arasına girip, çalışma sırasında kesme (abrasif) etkisi yaparak elemanların aşınmalarını hızlandırabilirler [9,23,48].

1.7.1.2. Yüzey Altı Yorulması

Yüzey altı yorulması, rulman elemanlarının yüzeylerinin altında oluşan kayma gerilmeleri ve gerilme yığılmalarının etkisi ile meydana gelen yapısal değişimler ile bunları izleyen, çatlak oluşumu, oluşan çatlakların ilerlemesi ve yüzeye ulaşan çatlakların yüzeyden parça koparması şeklinde kendini gösteren bir hasar mekanizmasıdır [2,9,22,44]. Yüzey altında oluşan gerilmelerden en önemlileri, kayma gerilmelerinin en büyük değerleri ile elemanların yuvarlanma hareketi sırasında, yönü değişen kayma gerilmesi bileşenleridir [9,29,31]. Bu gerilmelerin, malzemenin elastiklik sınırını aşması durumunda, yüzey altındaki kayma gerilmesinin en büyük değere ulaştığı derinlikte, yapısal değişimler meydana gelir [2-4,29,49]. Söz konusu yapısal değişimler, önce siyah dağlama bölgesinin (SDB) oluşumu ile başlayıp, belirli bir yük tekrar sayısından sonra da, yuvarlanma yoluna göre belirli açılarda yönlenmiş bantların ortaya çıkması şeklinde meydana gelirler [9,22,29,41,49]. Rulmanlı yatak malzemelerinin matrisini oluşturan menevişlenmiş martenzit, tam olarak kararlı bir yapı değildir [41,49]. Bu nedenle, çalışma sırasında, uygulanan gerilmenin etkisi ile menevişlenmiş martenzit içerisinde karbon diffüzyonu meydana gelir [41,45,46,49]. Söz konusu diffüzyon, bir çevrim için ihmal edilebilir seviyede olmasına karşın, gerilme tekrarının 10^7 veya 10^8 gibi yüksek çevrim sayılarına çıkması durumunda önemli büyüklüklere ulaşır [45-47,49]. Karbon diffüzyonu sonucunda, martenzitik matris aşırı menevişlenerek siyah dağlama bölgesi (SDB) oluşabilir [22,24,45-49]. Siyah dağlama bölgesi, rulman malzemesinin elastiklik sınırına yakın gerilme değerlerinde 10^9 çevrimden sonra oluşmaya başlarken, akma sınırına yakın gerilmeler altında 10^7 civarındaki çevrim

sayılarında meydana gelir [9,45,49]. Gerilme etkisi ile yüzey altında meydana gelen siyah dağlama bölgesi, farklı araştırmacılar tarafından, trostit, beynit veya ferrit olarak adlandırılmıştır [41,45-49]. Bu farklılıklar, genelde, araştırmacıların farklı metalografik ve kristalografik inceleme yöntemleri kullanmalarından kaynaklanmıştır. Ancak, elektron mikroskobu ve özellikle elektron difraksiyonu yöntemiyle yapılan ayrıntılı incelemeler sonucunda, söz konusu dönüşüm ürünleri daha doğru biçimde tanımlanmıştır. Nitekim, elektron difraksiyonu çalışmaları sonucunda, yüzey altındaki siyah dağlama bölgelerinin aşırı menevişlenmiş martenzit ve bu bölgelerin içerisinde oluşan bant şeklindeki yönlenmiş beyaz bölgelerin ise, ferrit fazı oldukları anlaşılmıştır [9,22,45]. Söz konusu bantlar, farklı araştırmacılar tarafından, ince gri çizgiler, deformasyon bantları veya dağlanmamış beyaz bantlar olarak adlandırılmıştır [29,45,49]. Yük tekrar sayısının belirli değerleri aşması durumunda, yüzeylerin teğetleriyle 30° 'lik açı yapan bantlardan başka, aynı bölgede, yuvarlanma yoluyla 80° 'lik açı yapan kalın, bant şeklinde, yönlenmiş yapıların oluştuğu gözlenmiştir [9,45,46,49]. Bu yapısal değişimlerin, kayma gerilmesinin etkisiyle meydana gelen plastik deformasyon ve karbon difüzyonundan kaynaklandığı ileri sürülmüştür [29,45]. Söz konusu dönüşüm sonucunda oluşan yapının, ferrit bantları ile bu bantlar arasına sıkışmış bulunan karbür disklerinden meydana geldiği belirlenmiştir [29,45-49].

Rulman çeliklerinin, günümüzde modern yöntemlerle üretilmelerine rağmen, iç yapılarında çeşitli kalıntılara (enklüzyon) rastlanılmaktadır [24,41]. Söz konusu kalıntılar, genellikle, metalik alaşım elementleri ile oksijen, azot, karbon, fosfor ve kükürt elementleri tarafından oluşturulan, oksit, nitrür, sülfür ve karbür enklüzyonları şeklinde görülmürler [24,27,41,45,50]. Rulman elemanlarının iç yapılarında

bulunan enklüzyonlar, çalışma sırasında gerilme yığılmalarına neden olurlar [24-29]. Gerilme yığılması etkisiyle meydana gelen en yüksek gerilme değerleri, kalıntıların şekillerine, boyutlarına ve dağılımlarına göre değişirler [9,41]. Rulman elemanlarının yüzeylerinin altında, gerilme yığılmalarına neden olan enklüzyonların etrafında, tekrarlı gerilmelerin etkisiyle kelebek şeklinde bazı yapısal değişimlerin meydana geldiği bilinmektedir [24,29,45,50]. Bu kelebeklerin, oksit, nitrür, karbür ve silikat gibi sert enklüzyonların etrafında oluşturdukları görülmüştür [9,24,29,50]. Ancak, yumuşak sülfür enklüzyonlarının etrafında, sözü edilen kelebek oluşumuna rastlanılmamıştır. Böylece, rulman elemanlarının yüzeyleri altında meydana gelen yapısal değişimlerden bazılarının, rulman çeliğinin içerisindeki kalıntılardan (enklüzyon) kaynaklandığı ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, rulmanlı yatak imalatında, enklüzyon oranı en aza indirilmiş, temiz çelik kullanmak suretiyle, rulmanların yorulma dayanımları ve çalışma ömürleri büyük ölçüde arttırılabilir [9,41].

Rulmanlarda, yüzey altında oluşan kayma gerilmelerinin en büyük değerlerinin, rulman malzemesinin akma sınırını aşması durumunda, elemanların yüzeyleri altında, kayma gerilmelerinin en yüksek değere ulaştıkları derinliklerde, plastik deformasyondan başka, yapısal değişimler ve çatlama meydana gelebilir [22,41,51]. Oluşan çatlaklar, elemanların yüzeylerinin altında, mukavemeti daha düşük olan siyah dağlama bölgesi içerisinde, yuvarlanma yoluna paralel olarak ilerledikten sonra, yüzeye ulaşarak, yüzeyden parça kopmasına neden olabilir [9,41,47].

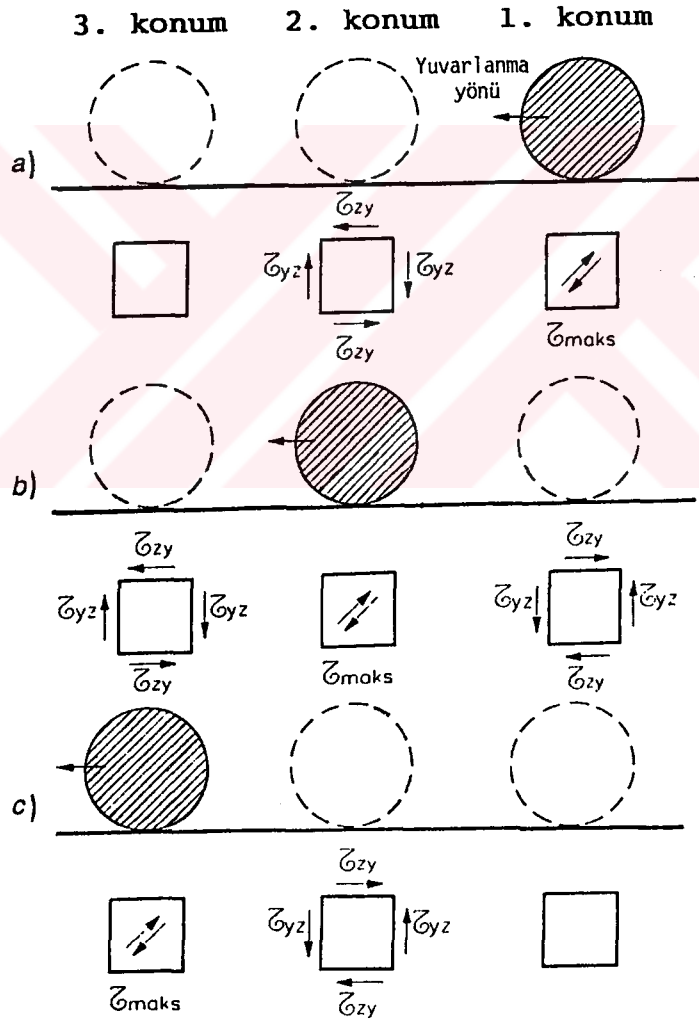
Rulmanlı yataklarda, yuvarlanma elemanlarının şekli nasıl olursa olsun, kayma gerilmeleri yüzey altında aynı mekanizma ile oluşur. Bu nedenle, rulmanlı yataklarda yüzey altı kayma gerilmelerinin oluşumunu açıklamak için yaygın olarak kullanılan silindirik makaralı rulmanlar tipik bir

örnek olarak alınabilir. Silindirik makaralı bir rulmanın bileziklerinden birinin yuvarlanma yolu üzerinde, sağdan sola doğru yuvarlanan silindirik bir makaranın, bilezik yüzeyinin altında oluşturduğu kayma gerilmesi bileşenleri, şematik olarak Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekil 11 a'nın birinci konumunda, makaranın altında x, y ve z eksenleri yönündeki kayma gerilmesi bileşenlerinin sıfır olmalarına rağmen, en büyük kayma gerilmesinin (τ_{maks}), koordinat eksenleriyle 45° 'lik açı yapan doğrultuda meydana geldiği görülmektedir. Makaranın solunda yer alan ikinci konumda ise, koordinat eksenleri yönünde, τ_{zy} ve τ_{yz} kayma gerilmelerinin oluştuğu görülmektedir. Makaradan biraz daha uzaktaki, üçüncü konumunda ise, yük ortadan kalkmakta ve dolayısıyla kayma gerilmeleri oluşmamaktadır. Makara, Şekil 11 b'nin ikinci konumuna geldiğinde, makaranın bulunduğu konumun altında, koordinat eksenleriyle 45° 'lik açı yapan kayma gerilmesi en büyük değerine ulaşırken, makaranın sağında ve solunda yer alan birinci ve ikinci konumlarda ise, birbirlerine ters yönde τ_{zy} ve τ_{yz} kayma gerilmesi bileşenleri oluşmaktadır. Şekil 11 c'de en büyük kayma gerilmesi, üçüncü konumunda bulunan makaranın altında meydana gelmekte, makaranın ikinci konumunda τ_{zy} ve τ_{yz} kayma gerilmesi bileşenleri oluşmaktadır. Aynı şeklin birinci konumunda ise, yüklü bölgeden yeterince uzaktaki yüksüz bölgede, kayma gerilmeleri ortadan kalkmaktadır.

Şekil 11, genel olarak incelendiğinde; kayma gerilmelerinin, yuvarlanma elemanının her geçişinde tekrarlandıkları görülmektedir. Ayrıca, Şekil 11 b'de yuvarlanma elemanının sağında ve solundaki konumların altında oluşan kayma gerilmesi bileşenlerinin, mutlak değerleri aynı olup, birbirine ters yönde, $-\tau_{zy}$ 'den $+\tau_{yz}$ 'e kadar değişmeleri nedeniyle, koordinat eksenleri doğrultusundaki kayma gerilmesi bileşeninin mutlak değeri $|2\tau_{zy}|$ olur. Söz konusu kayma gerilmesi, kayma gerilmesinin en büyük değeri olan

τ_{maks} 'dan daha büyüktür ($2\tau_{zy} > \tau_{maks}$) [5,11]. Yüzey altında oluşan kayma gerilmesinin en büyük değeri, uygulanan yük ve yüzeylerin geometrisine göre değişir [8,32,41].

Yüzey altında meydana gelen yapısal değişimlerin, her zaman çatlak oluşturduğuna dair literatürde kesin bir ifadeye rastlanılmamıştır [9,41]. Ancak, rulman elemanlarının yüzeyleri altında oluşan kayma gerilmelerinin, rulman malzemesinin akma sınırını aşmaları durumunda, yüzey altında plastik deformasyon ve çatlama meydana geldiği gözlenmiştir [9,38,46].



Şekil 11. Silindirik makaralı rulmana ait bir makaranın bileziklerden birinin yüzeyinin altında oluşturduğu kayma gerilmesi bileşenleri [9].

1.7.2. Literatürün Özeti ve Çalışmanın Amacı

Rulmanlı yataklar, değişik uygulamalar için, değişik tiplerde imal edilirler. Rulmanlı yataklar, çalışma sırasında meydana gelen çeşitli sebeplerden ötürü hasara uğrayabilirler. Bu sebeplerin başında, malzeme hataları, aşınma, yuvarlanma yorulması ve aşırı zorlanma gelir.

Aşırı yükleme durumunda ortaya çıkan yuvarlanma yorulması, rulmanlı yataklarda gerek yüzeyden ve gerekse yüzey altından başlayan hasarların meydana gelmesine neden olabilir. Rulman elemanlarının yüzeyleri altında oluşan en büyük kayma gerilmesinin, rulman çeliğinin elastiklik sınırını aşması durumunda, elemanların yüzeylerinin altında bazı yapısal değişimler meydana gelir. Bu değişimler, çatlak oluşumuna neden olabilirler ve oluşan çatlaklar, ilerleyip yüzeye ulaşarak yüzeyden malzeme kaybına ve/veya hasara yol açabilirler. Yorulma ile oluşan çatlaklar, sonuçta rulmanlı yatakların çalışma ömrünü büyük ölçüde kısaltabilirler.

Rulmanlı yataklardaki aşınma, yetersiz ve/veya uygun olmayan yağlama durumundan kaynaklanan metal-metal teması sonucunda ortaya çıkar. Yuvarlanma elemanlarının kayma hareketi ile ortaya çıkan sürtünme ısı, rulman elemanlarının yüzeylerinde sürtünme tabakaları adı verilen, yüzey katmanları oluşturur. Bu yüzey tabakalarının oluşumu, rulman elemanları arasındaki sertlik dengesini bozarak sertleşen yüzeyin, yumuşayan yüzeyi aşındırmasına neden olabilir.

Gerek tasarım ve imalât yöntemlerinde yapılan gelişmeler, gerekse temiz ve kaliteli malzeme kullanımı sayesinde, rulmanlı yatakların çalışma ömürleri büyük ölçüde uzatılmış olmasına rağmen, rulmanlı yataklar halen ilk önce bozulan veya hasara uğrayan makina elemanları olma özelliğini

korumaktadırlar. Rulmanlı yatakların erken hasara uğraması, pek çok uygulamada zaman kaybına, üretim maliyetlerinin artmasına ve başka elemanların da zarara uğramasına yol açar. Örneğin, 22 Ocak 1994 günü uzaya fırlatılan Türksat 1A uydusunu yörüngeye taşıyan roketin, motorundaki rulmanlardan birinin hasara uğraması sonucunda, infilak ederek düştüğü bilinmektedir [52]. Ayrıca, 1994 yılında Türkiye'ye ithal edilen, Skoda marka otomobillerin hareket sisteminde kullanılan rulmanlardan birinin hatalı olmasından dolayı, bu otomobillerin hepsi toplanarak hatalı rulman değiştirilmiştir [53]. Günümüzde (1994 yılı) karşılaşılan bu iki durum, rulmanlı yataklarda meydana gelen sorunların sebep olduğu zarar veya kayıpların büyüklüğünü göstermeye yeterlidir. Ayrıca, hava taşıtlarında kullanılan rulmanlar, uçuş esnasında meydana gelebilecek arıza riskini azaltmak için, nominal ömürlerinin çok altındaki bir uçuş süresi sonunda, yenileriyle değiştirilir. Bu uygulama, uçakların rulman masraflarını büyük ölçüde arttırmaktadır. Bütün bu sorunlar, halen rulmanlı yataklarla ilgili, araştırılıp geliştirilmesi gereken pek çok önemli hususun bulunduğunu göstermektedir.

Bu nedenlerle, bu çalışmanın amacı, rulmanlı yataklardaki aşınma ve yorulma mekanizmalarını ayrıntılı biçimde inceleyerek, bu mekanizmaların rulmanlı yatakların çalışma ömürlerine etkilerini belirlemek ve ayrıca, rulmanlı yatakların çalışma ömürlerini arttırma çarelerini araştırmaktır.

Bunun için, laboratuvarında gerçek çalışma şartlarını sağlayacak bir deney düzeneği imal edilerek, bu düzeneğe değişik şartlar altında yapılacak deneyler ile rulmanlı yataklardaki aşınma ve yorulma mekanizmaları hakkında yararlı bilgiler elde edilmeye çalışılacaktır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Deney Düzeneğinin Tasarım ve İmalâtı

Rulmanlı yatakların aşınma ve yorulma davranışlarını incelemek amacıyla bir deney düzeneği tasarlanarak imal edildi.

Sözkonusu düzenek, mil, deney rulmanı, yataklama rulmanları, rulmanlı yatak yuvaları, hidrolik yükleme silindiri, 5,5 kW gücünde bir alternatif akım motoru, 7,5 kW kapasiteli hız kontrol ünitesi, kayış kasnak sistemi, tahrik mili, yağ pompaları, vanalar, manometreler ve filtreler gibi elemanlardan oluşmaktadır. Düzenek yüzeyi, taşlanmış çelik bir tabla üzerinde monte edilmiştir. Deney düzeneğinin, mil eksenine paralel ve dik kesitlerinin görünüşleri Şekil 12 ve 13' de verilmiştir.

Rulmanlı yatakların kolayca sökülüp takılabilmeleri için, düzenekteki yatak yuvaları iki parçalı olarak imal edildi. Diğer taraftan, kullanılan bütün rulmanlı yatakların aynı eksende olmalarını sağlamak için, yatak yuvaları rijit bir şekilde birbirlerine bağlandıktan sonra, oturma yüzeyleri birlikte işlendi.

Deneylerde kullanılan miller, 42CrMo4, Ck45 ve Fe 42 standartlarına uygun çeliklerden imal edildi ve bunların bazılarının yüzeyleri sementasyon işleminden sonra su verilerek sertleştirildi. Bazı miller ise, ostenitleme işleminden sonra su verilerek sertleştirildi. Sertleştirilen millerin yüzeyleri $\pm 3\mu\text{m}$ 'lik bir hassasiyetle taşlandı. Deney mili, düzenekte her iki taraftan aynı tip ve boyutlardaki oynak makaralı rulmanlar ile yataklandı. Düzeneğin milinin yataklanmasında kullanılan sağ taraftaki oynak makaralı

rulman sabit, sol taraftaki rulman ise serbest olarak monte edildi. Deney rulmanı bir yükleme burcu içerisine yerleştirilip sabitleştirildikten sonra, yataklama rulmanlarına eşit mesafede olacak şekilde, mile presle monte edildi. Çalışma sırasında rulmanın sarmasını (sıkışma) ve boşluk oluşumunu önlemek amacıyla, sözkonusu rulmanın gerek burca ve gerekse mile montajında seçilen tolerans değerleri, rulman boşluğu ve çalışma sıcaklığı dikkate alınarak belirlendi.

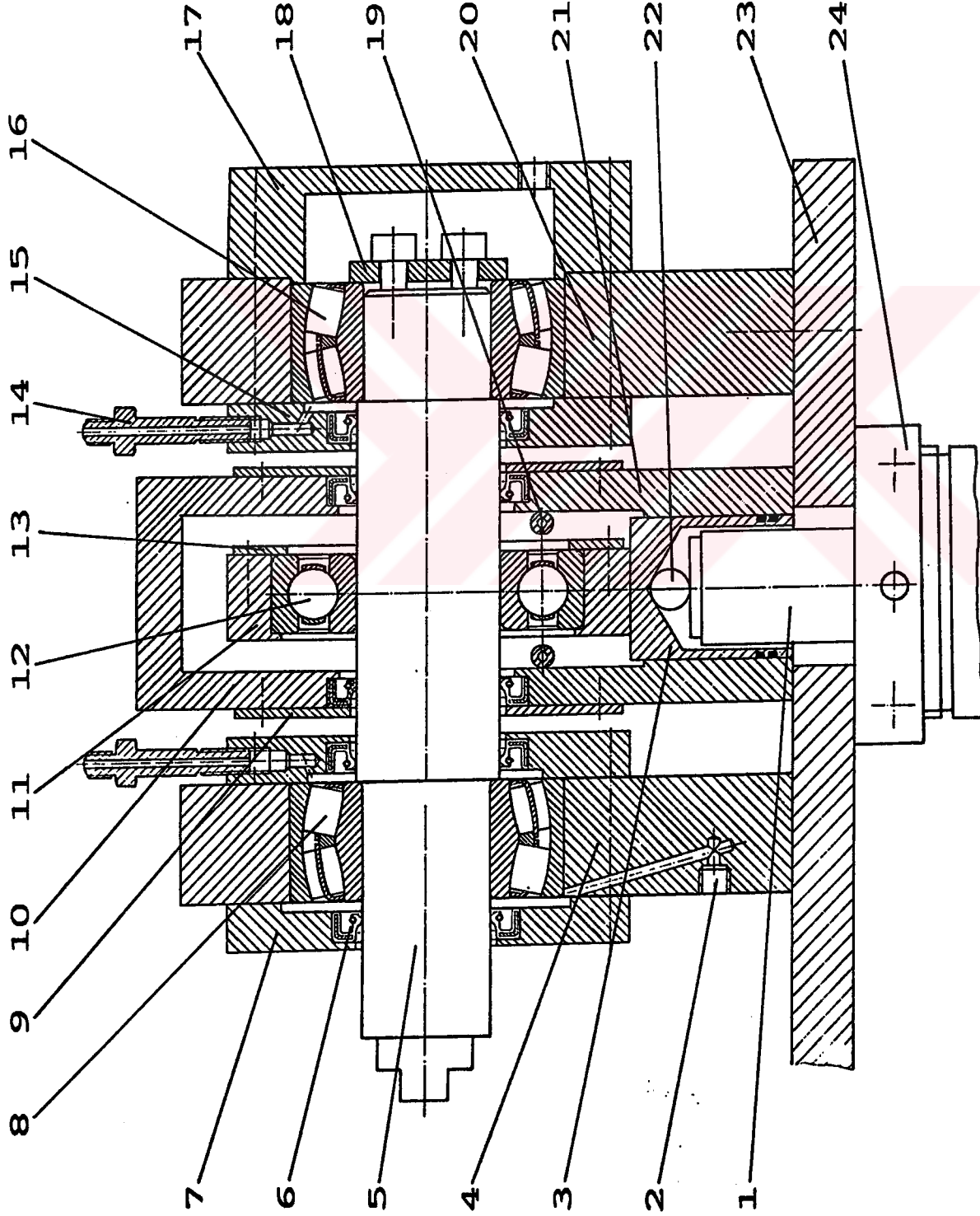
Düzeneğin mili, tahrik miline elastik bir kavrama ile bağlandı. Elastik kavrama, düzeneğe meydana gelen titreşimlerin ve aksel sapmaların deney miline iletilmesinin önlenmesi için, tercih edildi. Tahrik mili, bir kayış kasnak sistemi aracılığı ile gücü 5,5 kW olan bir alternatif akım (AC) motoru tarafından tahrik edilmektedir. Söz konusu elektrik motoru ile deney milinin devir sayısı, 7,5 kW kapasiteli bir hız kontrol ünitesi ile kontrol edilmektedir.

Deney rulmanın yüklenmesinde, prensip şeması Şekil 14'de görülen bir hidrolik devre kullanılmaktadır. Bu hidrolik devre, 1,5 kW'lık bir elektrik motoruyla tahrik edilen bir dişli pompası, basınç sınır vanası, yön kontrol vanası, küresel vana, hidrolik akümülatör, manometre ve çift tesirli bir hidrolik silindirden oluşmaktadır. Söz konusu hidrolik silindir, deney düzeneğinde ana tablanın altına monte edilerek, piston kolunun uyguladığı kuvvet, bir bilya ve yükleme pistonu aracılığı ile deney rulmanının burcuna iletilmektedir. Deney rulmanına, yalnız radyal yöndeki yükün etkimesini sağlamak için, yükleme pistonu, rulmanın yükleme burcunun mil eksenine paralel olarak imal edilen yüzeyine, alttan bastırılmaktadır. Hidrolik yükleme devresinde oluşan basınç dalgalanmalarını en aza indirmek amacıyla, devreye yaylı bir hidrolik akümülatör takılmıştır. Hidrolik silindirde

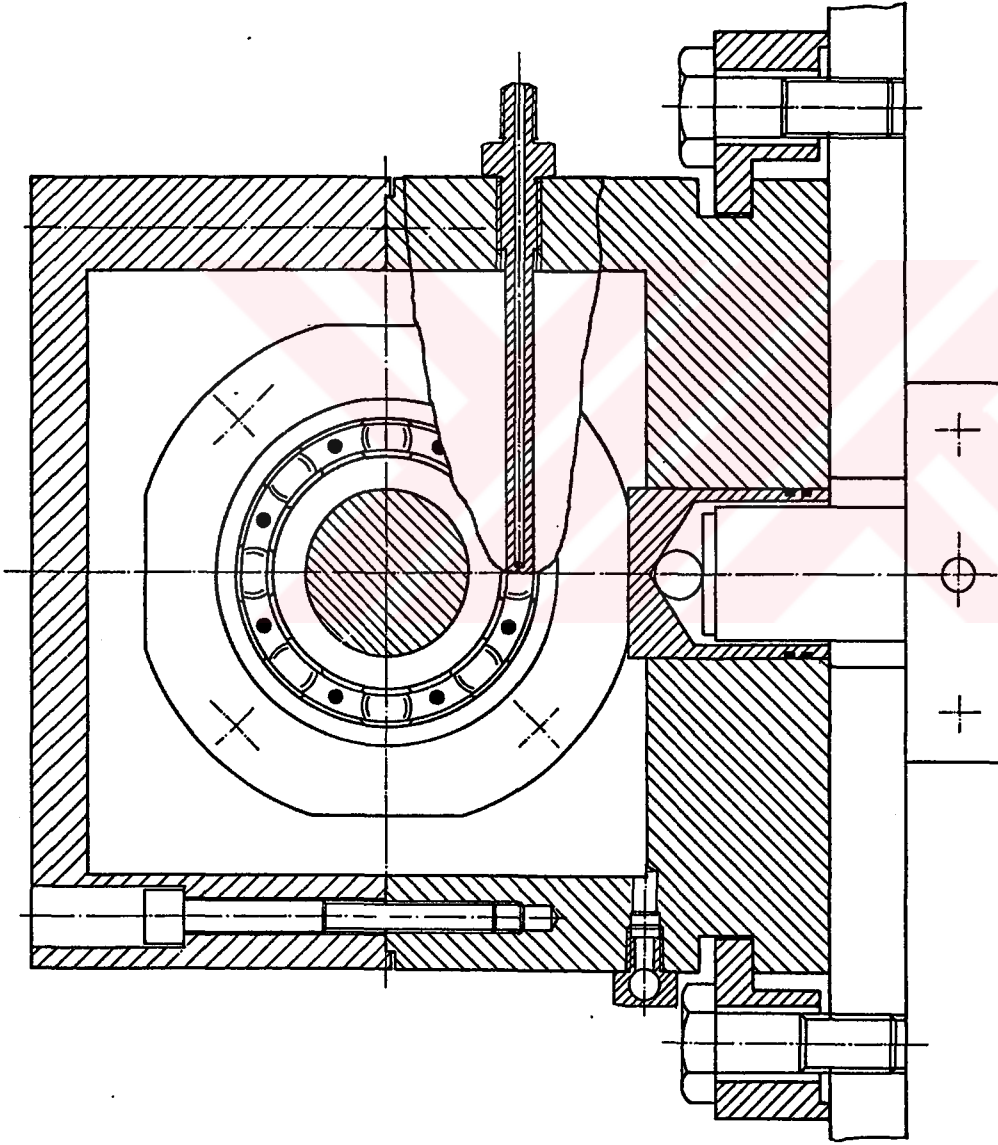
oluşturulan basınç, bir yağ manometresi ile 0,05 MPa'lık bir duyarlılıkla ölçülmektedir. Hidrolik ünitesinin yağ deposu içerisine, su sirkülasyonlu bir soğutucu yerleştirilerek, devredeki yağın aşırı ısınması önlenmektedir.

Düzenekte kullanılan bütün rulmanlar, prensip şeması Şekil 15'de verilen bir yağlama devresi yardımıyla yağlanmaktadır. Söz konusu devre, üç adet yağ deposu, üç adet yağ pompası, emme ve basma hattı filtreleri, basınç sınır vanaları, debi ayar vanaları ve manometrelerden oluşmaktadır. Yağlama devresi, deney rulmanı ile yataklama rulmanlarına gönderilen yağın birbirlerine karışmasını önlemek amacıyla, üç ayrı yağ sirkülasyonu devresini içerecek şekilde imal edildi. Her devre 35 litrelik yağ kapasiteli depolarla beslenmektedir. Dişli pompa girişlerini kontrol etmek amacıyla, depo çıkışlarına küresel vanalar takıldı. Devredeki yağın temizlenmesi için, pompa çıkışlarına göz açıklığı 10µm olan basınç hattı filtreleri monte edildi. Ayrıca, deney rulmanı hattına, ikinci bir filtre, seri olarak monte edilerek yağın güvenli bir şekilde temizlenmesi sağlanmaktadır. Filtrasyon işleminden sonra, basıncı ve debisi vanalarla ayarlanan yağ, yatak yuvalarına gönderilmektedir. Deney rulmanının yağlama işlemi, yatak yuvasına monte edilen püskürtücüler yardımıyla, yuvarlanma elemanlarına her iki taraftan yağ püskürtülerek gerçekleştirilmektedir. Yataklama rulmanları ise, yatak yuvasının üstünde bulunan yağ girişinden gönderilen yağın, rulman bilezikleri arasından zorunlu olarak geçirilmesiyle yağlanmaktadır. Yağ örneklerinin kolayca alınabilmesi için yataklardan gelen yağ depoya üstten akıtılmaktadır. Söz konusu deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 16'da, deney rulmanı ve yatak yuvalarını yakından görünümü ise, Şekil 17'de verilmiştir.

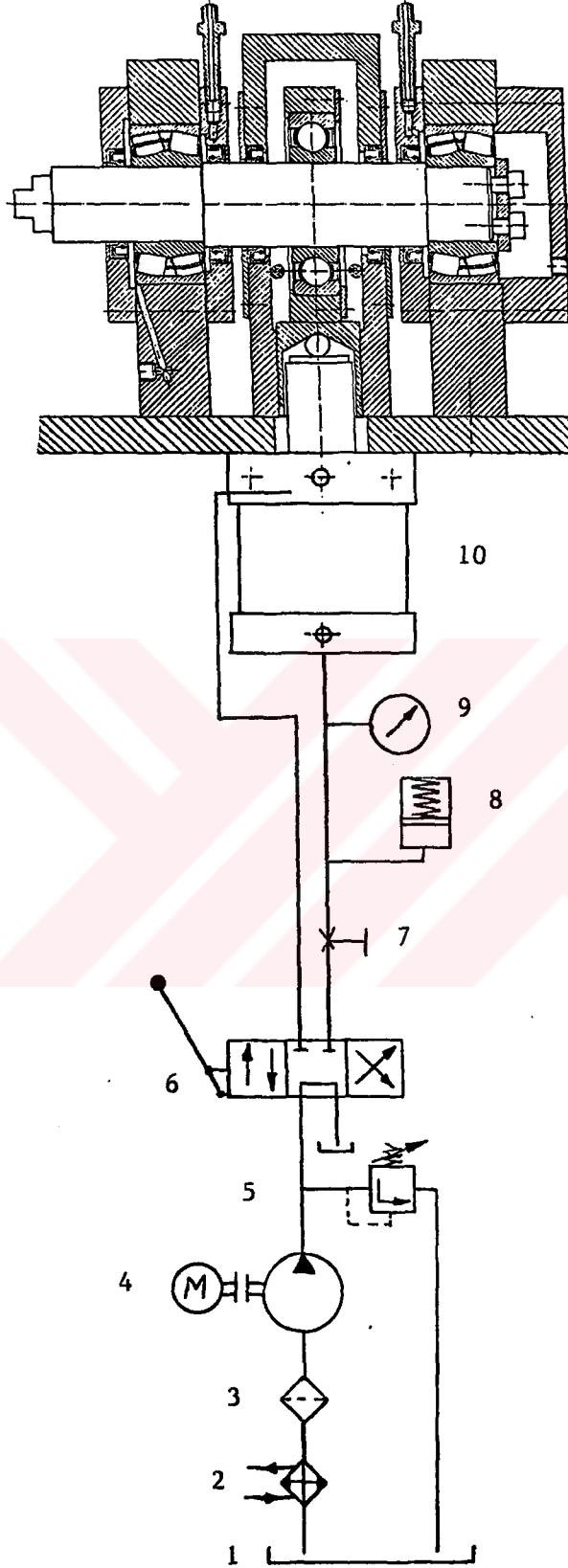
1. Hidrolik silindir piston kolu
2. Yağ çıkışı
3. Yükleme pistonu
4. Yataklama rulmanının yuvası
5. Deney mili
6. Yağ keçesi
7. Yatak yuvası kapağı
8. Yataklama rulmanı
9. Yağ keçesi desteği
10. Deney rulmanının yuvası
11. Yükleme burcu
12. Deney rulmanı
13. Deney rulmanının sabitleme pulu
14. Yağ girişi
15. Yatak yuvası kapağı
16. Yataklama rulmanı
17. Yatak yuvası kapağı
18. Yataklama rulmanının sabitleme pulu
19. Yağ püskürtücü
20. Rulman yuvası
21. Deney rulmanının yatak yuvası
22. Yükleme bilyası
23. Ana montaj tablası
24. Hidrolik yükleme silindiri



Şekil 12. Deney düzeneğinin mil eksenine paralel kesit görünüşü

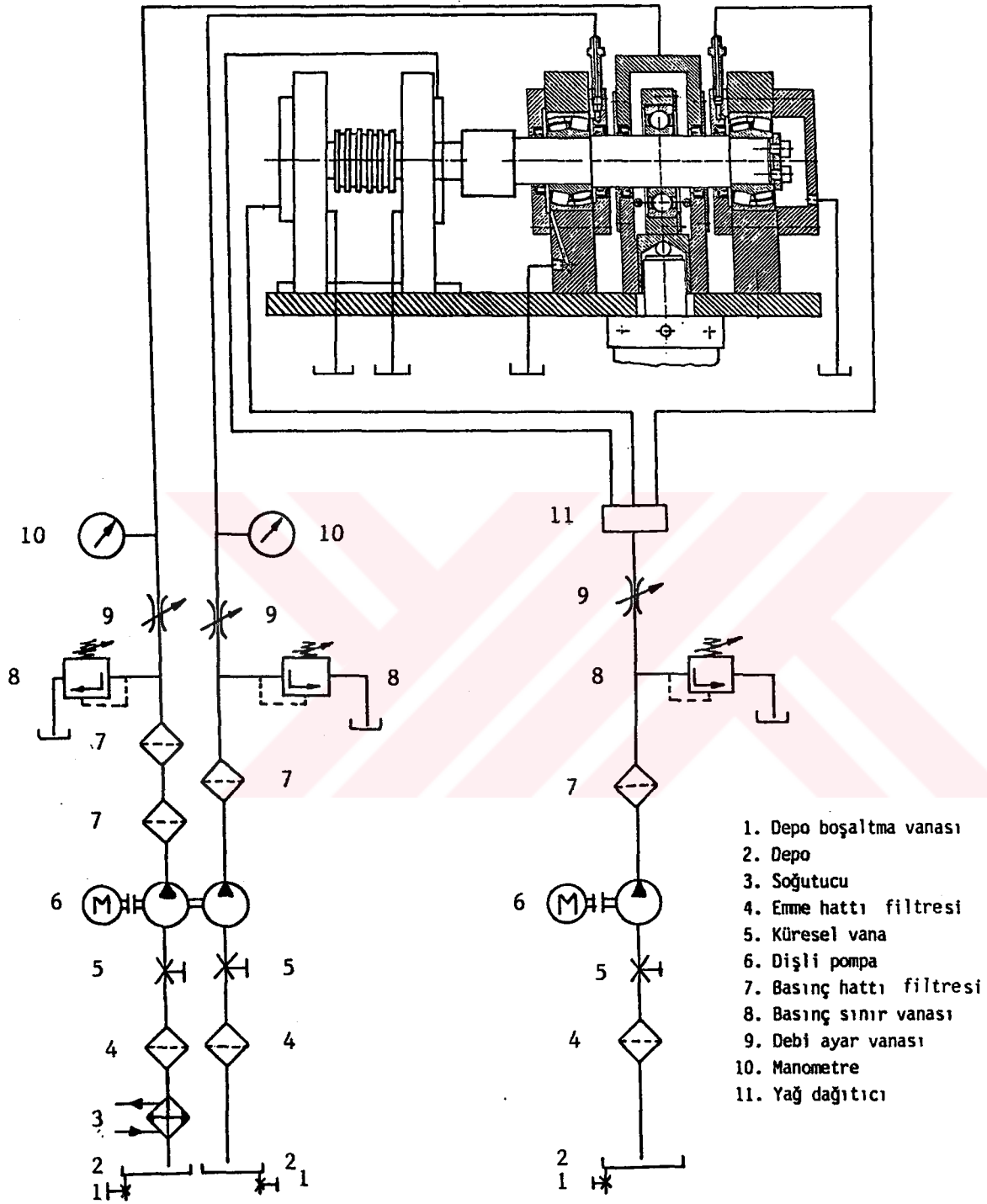


Şekil 13. Deney düzeneğinin mil eksenine dik kesit görünüşü

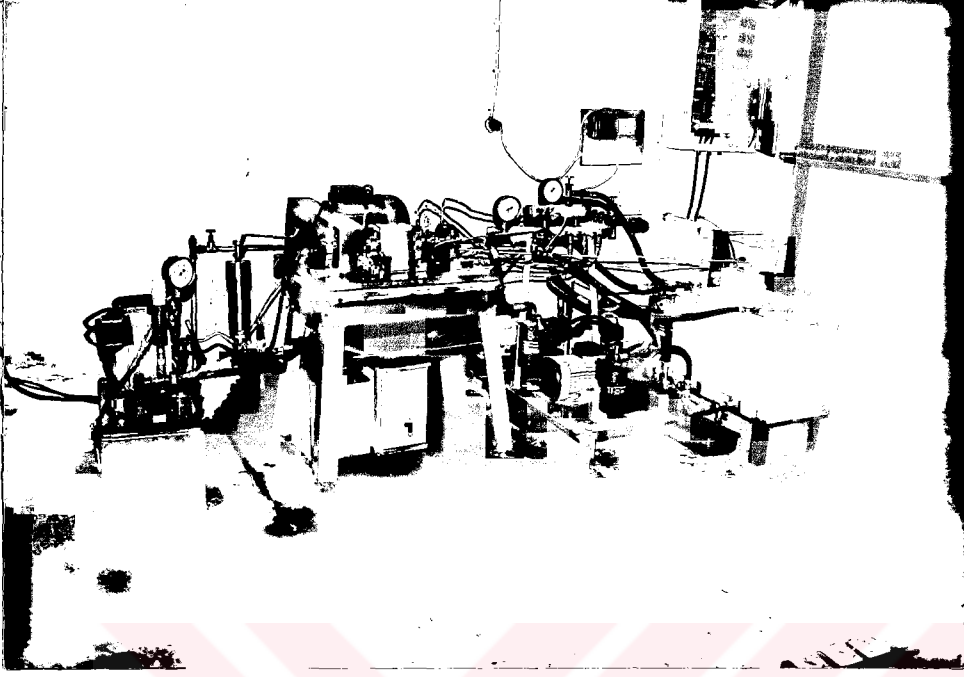


1. Yağ deposu
2. Soğutucu
3. Emme hattı
filtresi
4. Dişli pompa
5. Basınç sınır
vanası
6. Yön kontrol
vanası
7. Küresel vana
8. Yaylı akü
9. Manometre
10. Hidrolik silindir

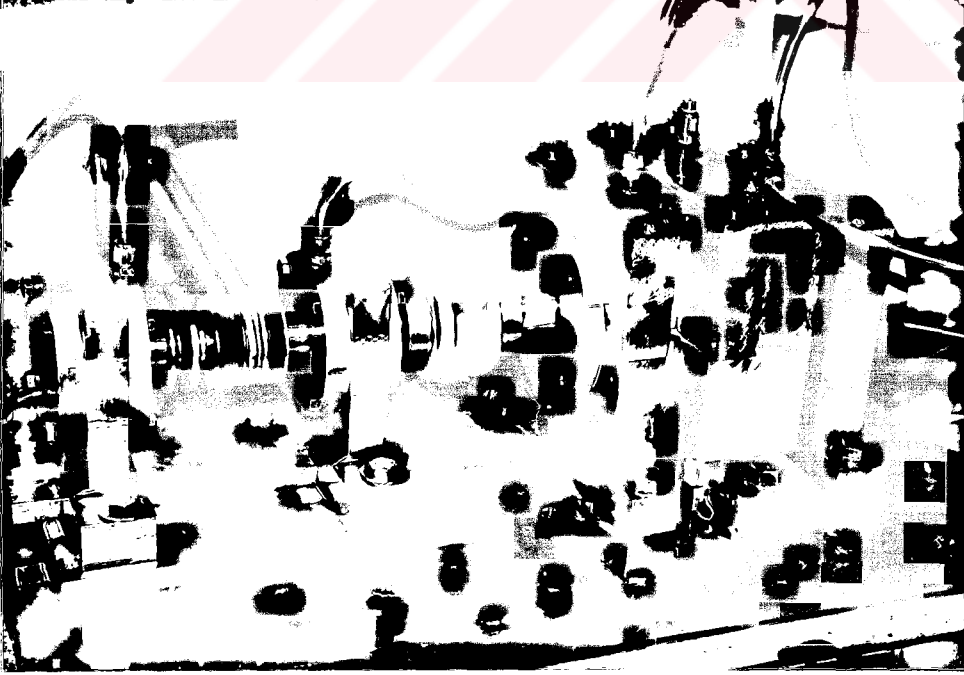
Şekil 14. Deney rulmanının hidrolük yükleme devresi



Şekil 15. Yataklama rulmanlarının yağlama devresi



Şekil 16. Deney düzeneğinin genel görünümü



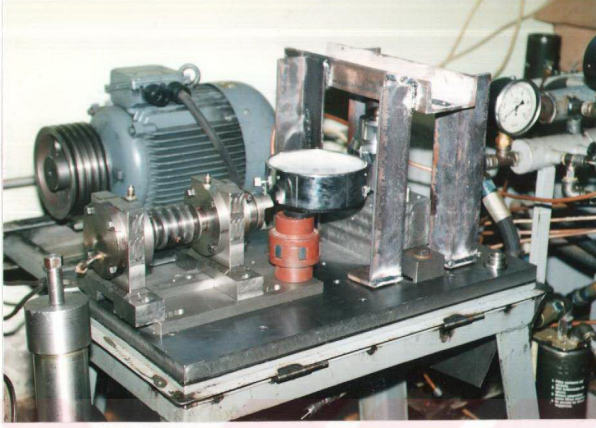
Şekil 17. Deney rulmanı ve yatak yuvalarının yakından görünümü

2.2. Deney Düzenekinin Çalışma İlkeleri ve Kalibrasyonu

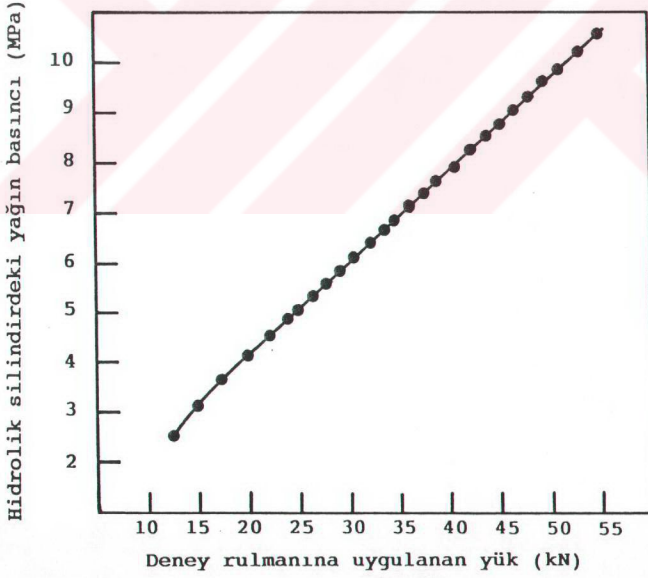
Deney düzenekği, iç çapları 30 ve 45 mm olan, bilyalı radyal rulmanlar için tasarlanmış ve imal edilmiştir. Ancak, bu düzenekte iç çapları aynı olmak koşulu ile dış çapları ve genişlikleri farklı olan rulmanlar da kullanılabilir. Seçilen deney rulmanı, uygun yükleme burcu ve mile geçirildikten sonra, iki parça halinde imal edilmiş olan yatak yuvasına kolayca monte edilebilmektedir. Söz konusu düzenekte kullanılan deney rulmanı ve yataklama rulmanları, debileri ayarlanabilen yağ pompaları ile ayrı ayrı yağlanabilmektedir. Deney mili, hız kontrol ünitesi yardımıyla, istenilen hızlarda döndürülebilmektedir. Deney rulmanının yükü ise, yatak yuvasının altına yerleştirilmiş olan hidrolik bir silindir tarafından 60000 N'a kadar çıkarılabilmektedir. Deney rulmanının dış bileziğinin sıcaklığı ve depodaki yağın sıcaklığı, kullanılan termoeleman çiftleri yardımıyla uç kanallı bir yazıcıda sürekli olarak kaydedilmektedir.

Deney rulmanının yükleme kalibrasyonu için, deney mili ve rulmanlar sökülerek, yatak yuvalarının üst parçaları çıkarılmaktadır. Kalibrasyon işleminden önce hidrolik sistem bir saat'lik süre çalıştırılarak, dengeye gelmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, deney rulmanının yuvası üzerine monte edilen sabit bir destek ile, yükleme pistonu arasına, Şekil 18'de görüldüğü gibi, basma kuvvetini ölçmek için 10 ton kapasiteli, sertifikası bulunan bir kalibrasyon cihazı yerleştirilmiştir. Kalibrasyon işlemi için, kalibrasyon cihazının hidrolik silindiri, yükleme sistemine ait hidrolik silindir ile yavaş yavaş yüklenecek, uygulanan basınç değerlerine karşı kalibrasyon cihazında oluşan kuvvet değerleri ölçülmektedir. Kalibrasyon cihazından ölçülen kuvvetin, uygulanan basınca göre değişimini gösteren kalibrasyon eğrisi belirlenerek, Şekil 19'da verilmiştir.

Yapılan ölçümlerde, hidrolik devresindeki yağın sıcaklığının kalibrasyon eğrisini etkilemediği görülmüştür.



Şekil 18. Yükleme kalibrasyonu düzeneğinin görünümü



Şekil 19. Yükleme kalibrasyonu eğrisi

2.3. Deneylerin Yapılışı

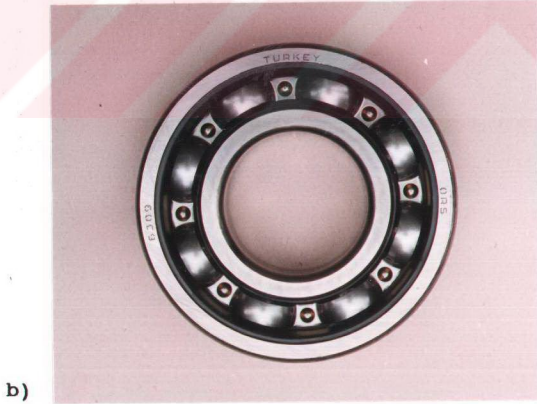
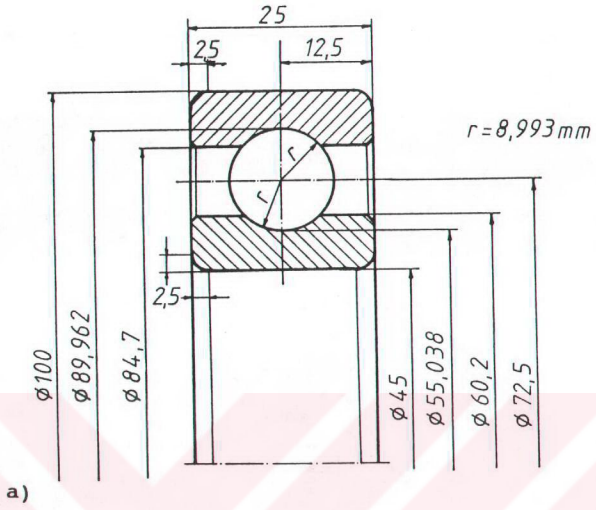
Bu çalışma için, piyasadan tedarik edilen 6309 seri numaralı, tek sıralı ve sabit bilyalı rulmanların aşınma ve yorulma mekanizmaları, imal edilen deney düzeneğinde, değişik çalışma koşullarında incelendi. Deneyler, yatak boşluğu C3 olan rulmanlarla gerçekleştirildi.

Deneylerde kullanılan rulmanlardan birinin ölçülendirilmiş teknik resmi Şekil 20 a'da, fotoğrafı ise Şekil 20 b'de verilmiştir. Deney rulmanları, yükleme burcuna K6 toleransında presle, tatlı sıkı olarak yerleştirildikten sonra, deney düzeneğinin miline k5 toleransında presle sıkı olarak geçirildi. Böylece, rulmanlarda, çalışma şartlarına uygun radyal boşluk sağlanmış oldu. Yükleme burcundaki konumu belirlenen deney rulmanı, diğer yataklama rulmanları ile birlikte yuvalarına yerleştirildi. Deney rulmanları, yuvarlanma elemanlarının temas bölgelerinde, 3000 ile 4000 MPa değerleri arasında, en büyük yüzey basınçları oluşturacak şekilde, değişik büyüklükteki radyal yüklerle yüklendi ve deney süresince yük sabit tutuldu. Deneyler; 3800, 5000 ve 6000 dev/dak'lık sabit mil hızlarında yapıldı. Bütün rulmanlarda yağlayıcı olarak, SAE J183a standartına uygun Petrol Ofisi Regal 68(R+0) yağı kullanıldı. Deney rulmanlarını yağlamak için, 3,5 l/dak'dan daha düşük debilerde yağ gönderildi ve her deney için yağ debisi sabit tutuldu. Deney sırasında, deney rulmanlarının dış bileziklerinin sıcaklığı ve yağ deposundaki yağın sıcaklığı, 0,25 mm tel çapında T tipi (bakır-konstantan) termoeleman çiftleri kullanılarak ölçüldü ve sıcaklık değerleri bir yazıcı ile sürekli kaydedildi.

Deney rulmanına gönderilen yağın aşırı ısınmasını önlemek amacıyla, yağ deposunun çıkışına, 1,38 J/s'lik soğutma kapasitesine sahip, doğal konveksiyonlu bir radyatör monte edildi. Söz konusu radyatör tarafından soğutulan yağlama

yağının sıcaklığının, deney şartlarına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak, 65-70°C sıcaklık değerleri arasında rejime gelmesi sağlandı. Deneyler, farklı şartlarda çalıştırılan rulmanların, aşırı gürültülü bir şekilde çalışmaya başlamasına kadar veya rulmanların tamamen hasarlanması sonucunda, hız kontrol ünitesinin korumaya geçerek, tahrik motorunu durdurmasına kadar sürdürüldü. Deney süresi ve milin devir sayısı dikkate alınarak, her deney süresince deney rulmanının maruz kaldığı yük tekrar sayısı (çevirim sayısı) belirlendi. Yapılan deneylerle ilgili, yük, yüzey basıncı, milin dönme hızı ve yağ debisi gibi parametreler ile yük tekrar sayıları Tablo 2'de verilmiştir.

Her deneyin sonunda, hasara uğrayan deney rulmanı yatak yuvasından söküldükten sonra, ultrasonik yöntem ile uygun kimyasal çözücüler içerisinde temizlendi. Rulman elemanlarının aşınma yüzeyleri, önce ışık mikroskopunda, daha sonra da taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi. Metalografik incelemeler için, rulman elemanları uygun boyutlarda kesilerek örnekler çıkarıldı. Rulman elemanlarının yüzey tabakalarının korunması ve düz yüzeyli metalografi numunelerinin elde edilebilmesi için, kesilen parçaların yüzeyleri yaklaşık 1 mm kalınlığına kadar nikel ile kaplandı. Kaplama işlemi elektroliz yöntemiyle, Watts banyosunda [19,54] gerçekleştirildi ve yüzeyleri kaplanan parçalar, yapısal değişime meydan vermemek için, elmas disk yardımıyla kesildi ve daha sonra soğuk bakalite alındı. Bakalite alınan örnekler, standart metalografi yöntemiyle taşlanıp parlatıldıktan sonra, % 2'lik Nital (nitrik asit ile alkol karışımı) içerisinde dağlandı. Elde edilen yapılar, ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi. İç yapıdaki fazlar ve yapısal değişimler enerji dispersif spektrometresi ve mikrosertlik ölçüm yöntemleri ile tanımlandı.



Şekil 20. Deneysel rulmanın a) teknik resmi ve b) fotoğrafı

Tablo 2. Deney rulmanlarının çalışma şartlarına ilişkin parametreler ve yük tekrar sayıları

Deney No	Radyal Yük F_t (kN)	Bilya Yüklü F (kN)	a (mm)	b (mm)	En Büyük Yüzy Basıncı P_{maks} (MPa)	En Büyük Kayma Gerilmesi τ_{maks} (MPa)	z (mm)	Milin Dönme Hızı (dev/dak)	Yağ Debisi (l/dak)	Yük Tekrar Sayısı ($\times 10^{-7}$)
1	14	7,88	3,82	0,33	2919	905	0,26	3800	0,0	0,61
2	15	8,44	3,91	0,34	2987	925	0,26	6000	0,5	9,12
3	20	11,25	4,31	0,38	3288	1018	0,29	6000	3,5	12,40
4	22	12,38	4,44	0,39	3394	1051	0,30	5000	2,0	10,45
5	22	12,38	4,44	0,39	3394	1051	0,30	6000	0,5	7,40
6	26	14,63	4,70	0,41	3588	1111	0,31	6000	2,0	8,17
7	26	14,63	4,70	0,41	3588	1111	0,31	6000	3,5	9,32
8	27	15,19	4,75	0,42	3634	1126	0,32	6000	2,0	8,67
9	28	15,75	4,82	0,42	3678	1139	0,32	5000	2,0	8,38
10	28	15,75	4,82	0,42	3678	1139	0,32	6000	0,5	2,34
11	29	16,31	4,87	0,43	3723	1154	0,33	3800	2,0	7,40
12	29	16,31	4,87	0,43	3723	1154	0,33	6000	2,0	5,30
13	29	16,31	4,87	0,43	3723	1154	0,33	6000	3,5	15,66
14	30	16,88	4,93	0,43	3764	1165	0,33	3800	3,5	10,74
15	30	16,88	4,93	0,43	3764	1165	0,33	5000	0,5	3,18
16	30	16,88	4,93	0,43	3764	1165	0,33	5000	2,0	5,16
17	30	16,88	4,93	0,43	3764	1165	0,33	6000	0,0	0,01
18	30	16,88	4,93	0,43	3764	1165	0,33	6000	2,0	4,80
19	33	18,56	5,09	0,45	3885	1203	0,35	3800	0,5	2,38
20	33	18,56	5,09	0,45	3885	1203	0,35	6000	0,5	0,70
21	33	18,56	5,09	0,45	3885	1203	0,35	6000	2,0	3,70
22	33	18,56	5,09	0,45	3885	1203	0,35	6000	3,5	3,83
23	38	21,38	5,33	0,47	4072	1261	0,36	3800	3,5	5,74
24	38	21,38	5,33	0,47	4072	1261	0,36	6000	3,5	4,20
25	40	22,50	5,42	0,48	4142	1282	0,37	3800	3,5	2,00
26	40	22,50	5,42	0,48	4142	1282	0,37	6000	2,0	1,00
27	46	25,88	5,68	0,50	4340	1345	0,38	3800	1,0	1,30
28	46	25,88	5,68	0,50	4340	1345	0,38	6000	2,0	1,11
29	52	29,25	5,92	0,52	4521	1402	0,40	3800	1,0	0,38
30	52	29,25	5,92	0,52	4521	1402	0,40	3800	3,5	0,97

a: Temas alanının (Elips) yarı eksen uzunluğu

b: Temas alanının (Elips) yarı eksen uzunluğu

z: Kayma gerilmesinin en büyük değere ulaştığı derinlik

3. BULGULAR

3.1. Deneylerde Kullanılan Rulmanlarla İlgili Bulgular

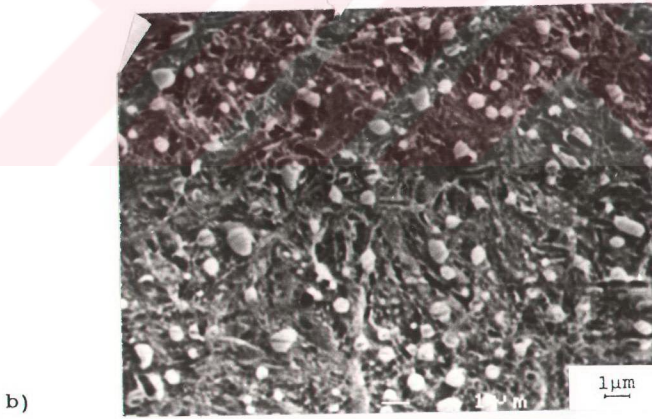
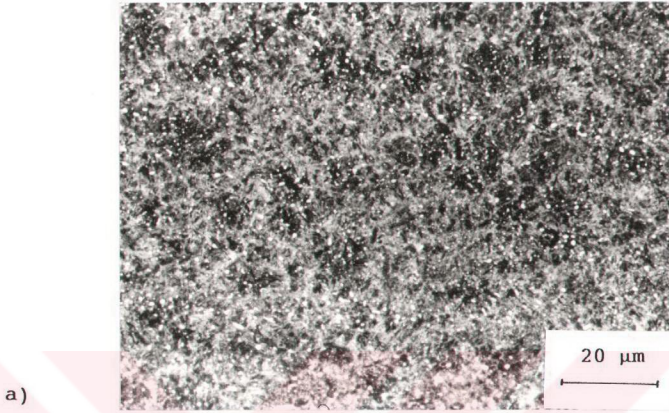
Deneylerde kullanılan rulmanlı yataklara ait elemanların analizleri sonucunda elde edilen kimyasal bileşimlerinin ortalama değerleri Tablo 3'de verildi. Belirlenen bu değerlerden bileziklerin ve yuvarlanma elemanlarının SAE 52100 (TS 100Cr 6) çeliğinden imal edildiği anlaşıldı. Söz konusu çeliğin iç yapısının, menevişlenmiş martenzitik bir matris ile, bunun içerisinde homojen olarak dağılmış küre biçimindeki $(Fe,Cr)_3C$ karbürlerinden oluştuğu gözlemlendi. Rulman çeliğinin iç yapısının, ışık mikroskobu ile elde edilen görüntüsü Şekil 21a'da, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen görüntüsü ise Şekil 21b'de verilmiştir. İncelenen rulmanlara ait kafeslerin ise, metalografik yapısı Şekil 22'de görülen, Ck 10 (SAE 1010) çeliğinden imal edildikleri belirlendi.

Tablo 3. İncelenen Rulman Çeliğinin Analiz Sonucu

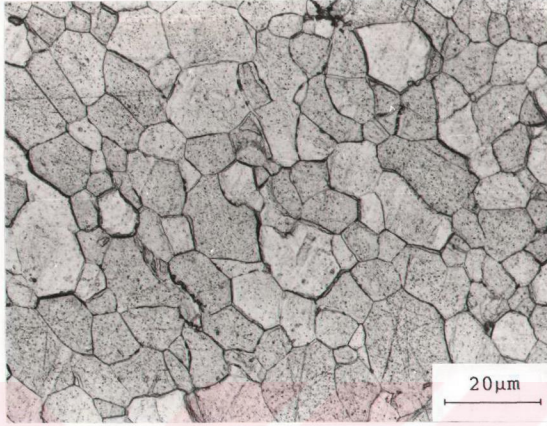
Kimyasal Bileşim (% Ağı.)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
1.00	0.25	0.30	0.01	0.02	1.50	0.10	Kalan

Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda, kullanılan bütün deney rulmanlarının yuvarlanma elemanlarının sertlik değerleri 60,5 RSD-C (710 VSD), bileziklerin ortalama sertlik değerlerinin ise 61,4 RSD-C (730 VSD) oldukları görüldü. Ölçülen bu sertlik değerlerinin literatürle uyduğu belirlendi [2]. Söz konusu çelik malzemenin, normalize edilmiş durumdaki akma sınırının 958 MPa ve çekme dayanımının 1275 MPa değerinde olduğu, sertleştirildikten sonra 62,5 RSD-C değerine kadar menevişlendiğinde ise, akma sınırının 1172 MPa, çekme dayanımının 1723 MPa olduğu belirlendi [25,28].

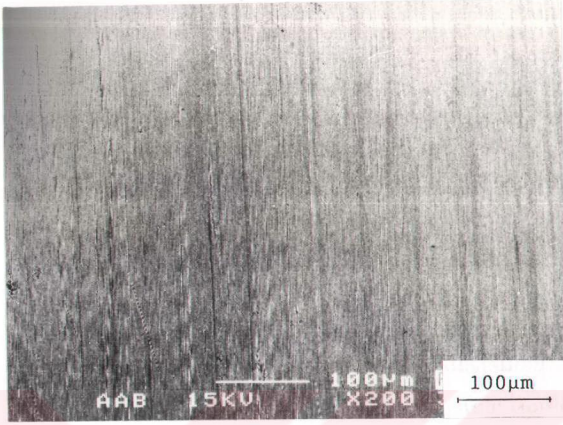


Şekil 21. Rulman çeliğinin metalografik yapısının a) ışık mikroskobu, b) SEM ile elde edilen görüntüsü

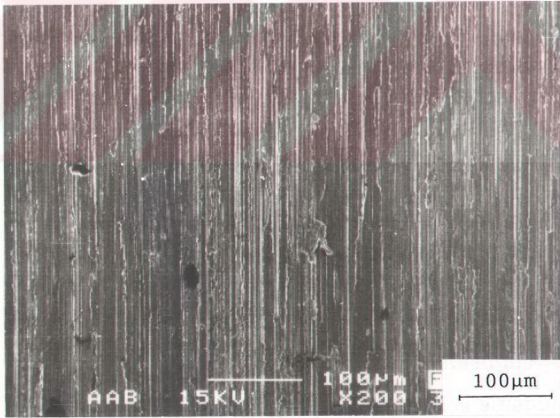


Şekil 22. Deney rulmanlarına ait kafeslerden birinin iç yapısı

Deneylerde çoğunlukla Avrupalı firmalar tarafından imal edilen rulmanlar kullanıldı. Ancak, karşılaştırma yapmak amacıyla, birkaç tane de, eski Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği'nde (SSCB) imal edilmiş rulman incelendi. Deney öncesi, rulmanlar üzerinde yapılan incelemelerde, Avrupalı firmalar tarafından imal edilen rulmanlar ile Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği'nde (SSCB) imal edilmiş rulmanların kimyasal bileşimleri ve sertlik değerlerinin aynı olmalarına rağmen, Avrupalı firmalar tarafından imal edilen rulmanların, yüzey kalitesi ve imalât tekniği bakımından SSCB'de imal edilen rulmanlardan çok daha üstün oldukları görüldü. Avrupalı firmalar tarafından imal edilen rulmanlara ait elemanların, tipik yüzey özelliklerini gösteren SEM fotoğrafı Şekil 23'de, SSCB'de üretilen rulmanların yüzey kalitesini gösteren SEM fotoğrafı ise, Şekil 24'de verilmiştir. Bu iki SEM fotoğrafı karşılaştırıldığında, Avrupalı firmalar tarafından imal edilen rulmanların, yüzey kalitesi bakımından daha üstün oldukları görülmektedir.



Şekil 23. Avrupalı firmalar tarafından imal edilen rulmanlara ait bir iç bileziğin yuvarlanma yolunun kullanılmadan önceki görünümü



Şekil 24. SSCB'de imal edilmiş rulmanlara ait bir iç bileziğin yuvarlanma yolunun kullanılmadan önceki görünümü

3.2. Deneylerden Elde Edilen Bulgular

Deneylerden elde edilen verilerden yararlanarak, deney değişkenleri arasındaki ilişkiler incelendi. İncelemeler sonucunda, rulman sıcaklığının, yüke, yağ debisine ve mil hızına göre değişimleri ile rulmanın çalışma ömrünün, yüke göre değişimlerini gösteren eğriler elde edildi. Sabit mil hızında çalışan rulmanların rejim durumundaki sıcaklarının, radyal yüke göre değişimlerini gösteren eğriler, Şekil 25'de verilmiştir. Bu şekilden, sabit bir dönme hızında çalışan rulmanların sıcaklarının, radyal yük ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Diğer taraftan, yağ debisi arttıkça, söz konusu doğrusal grafiklerin eğimleri azalmaktadır. Bu durum, yağ debisi arttıkça, rulmanların sıcaklığının radyal yüke bağımlılığının azaldığını göstermektedir.

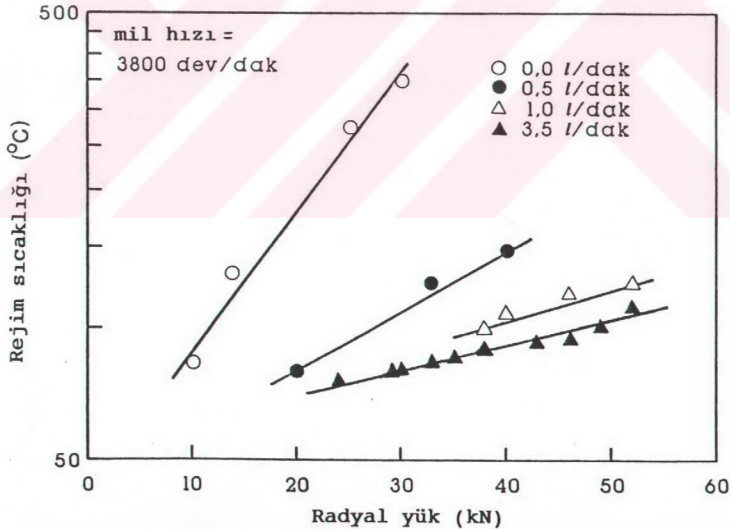
Sabit yağ debisinde çalışan rulmanların rejim durumundaki sıcaklıklarının, radyal yüke göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 26'da verilmiştir. Söz konusu eğriler, sabit yağ debisinde çalışan rulmanların sıcaklığının, uygulanan radyal yük ile doğru orantılı olarak değiştiğini göstermektedir. Ayrıca, devir sayısı arttıkça rulman sıcaklığının arttığı ancak, farklı devir sayılarındaki değişimi gösteren doğruların hemen hemen birbirine paralel oldukları gözlemlendi.

Sabit devir sayısında çalışan rulmanlı yatakların sıcaklarının, yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler ise, Şekil 27'de verilmiştir. Bu şekilden, rulmanların sıcaklığının, başlangıçta artan yağ debisi ile hızlı bir şekilde düştüğü, belirli bir değerden sonra ise, düşme hızının azalarak sabit kabul edilebilecek bir değere ulaştığı görülmektedir.

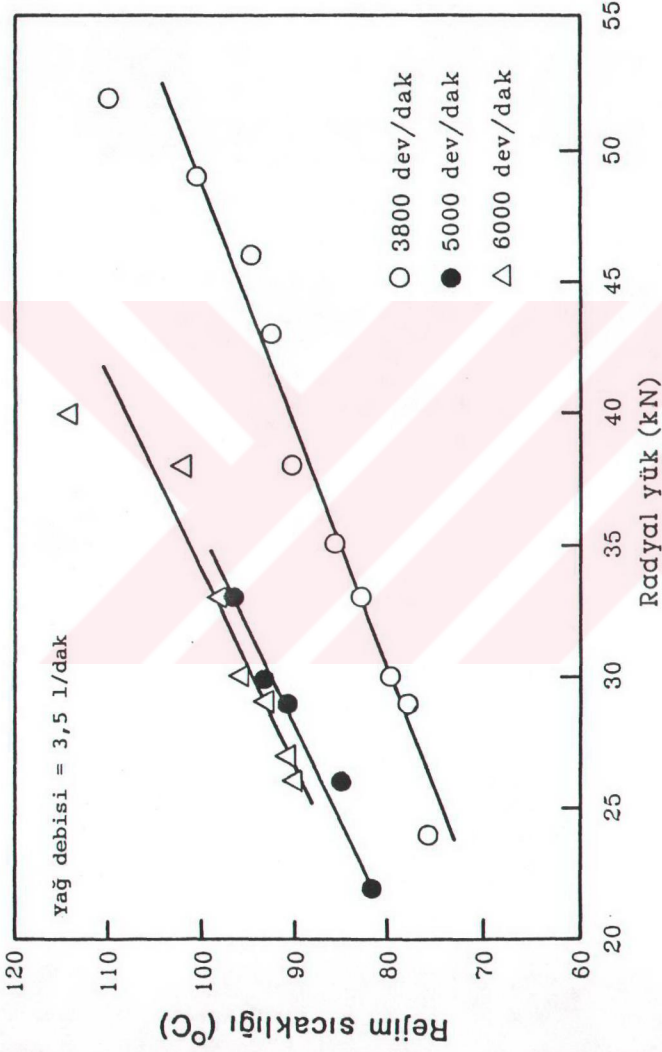
Sabit devir sayısında çalışan rulmanların çalışma ömürlerinin, uygulanan radyal yüke göre değişimlerini gösteren eğriler de, Şekil 28'de verilmiştir. Bu eğrilerden, radyal yük arttıkça rulmanların çalışma ömürlerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca, Avrupalı firmalar tarafından imal edilen rulmanların çalışma ömürlerinin, aynı çalışma şartlarında, eski Sovyet Sosyalist Cumhuriyetleri Birliği'nde

(SSCB) üretilmiş rulmanların çalışma ömürlerinin yaklaşık 10 katı olduğu görülmektedir. Bu durum, Avrupa firmaları tarafından imal edilen rulmanlı yatakların, yüzey kalitesi bakımından, SSCB'de imal edilmiş rulmanlı yataklardan çok daha üstün olmasından ve ayrıca, tasarım ve imalâtlarının daha üstün teknoloji ile hassas bir şekilde yapılmasından kaynaklanmış olabilir.

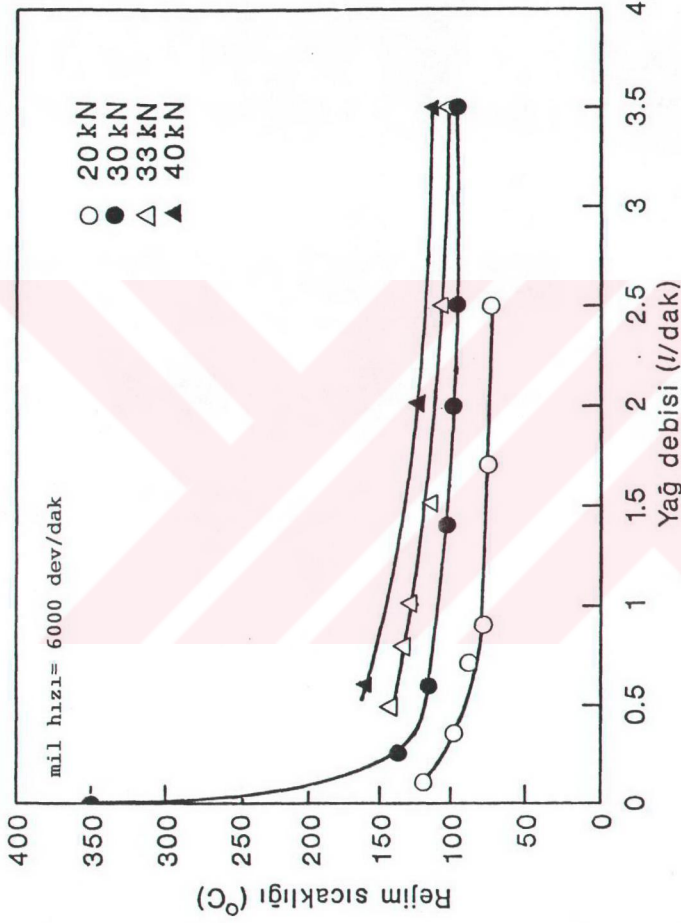
Deney rulmanlarının, uygun şartlar altında, kontrollü olarak, kataloglarda verilen formüllerle hesaplanan nominal ömür değerlerinden çok daha uzun süre çalışabilecekleri görüldü. Örneğin, Tablo 2'te verilen 13 numaralı rulmanın, ilgili kataloğa göre $0,39 \times 10^7$ çevrime dayanması beklenirken, söz konusu rulmanın çalışma ömrünün, bu değer 40 katı olan $15,66 \times 10^7$ çevrim sayısına ulaştığı gözlemlendi. Yapılan değerlendirme sonucunda, söz konusu rulmanların, kontrollü şartlar altında, kataloglarda verilen ömür değerlerinin 20 katına varan süreler kadar çalıştırılabilecekleri görüldü.



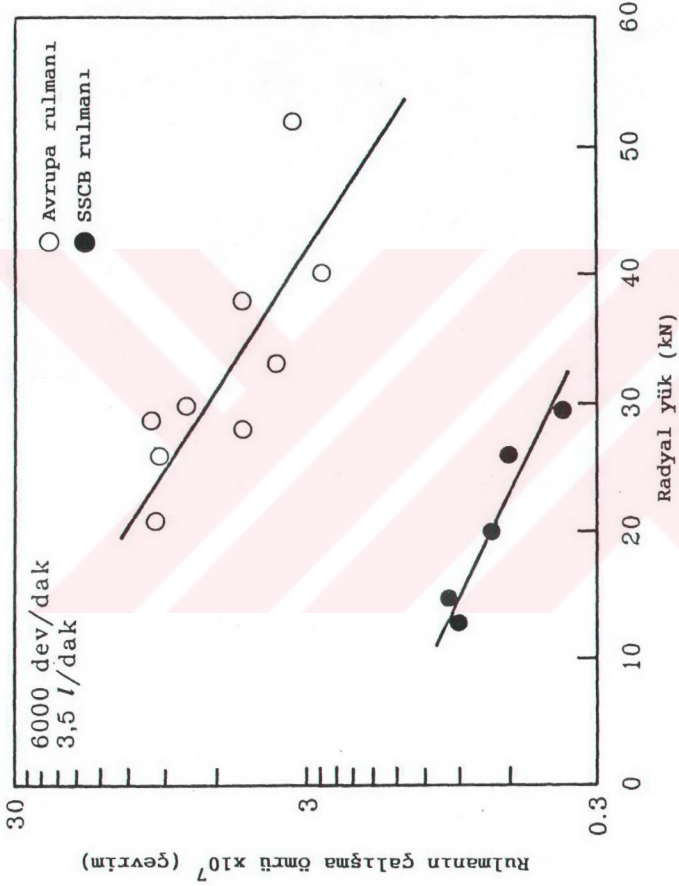
Şekil 25. Sabit devir sayısında çalışan rulmanların rejim durumundaki sıcaklıklarının, radyal yüke göre değişimlerini gösteren eğriler.



Şekil 26. Sabit yağ debisinde çalışan rulmanların, rejim durumundaki sıcaklıklarının radyal yüke göre değişimlerini gösteren eğriler.



Şekil 27. Sabit devir sayısında çalışan rulmanların kararlı durumdaki (rejim) sıcaklıklarının yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler.



Şekil 28. Sabit mil hızında çalışan rulmanlı yatakların çalışma ömürlerinin, uygulanan radyal yüke göre değişimlerini gösteren eğriler.

3.3. Metalografik İncelemelerden Elde Edilen Bulgular

Yapılan deneyler sonucunda, hasara uğrayarak bozulan rulmanların bazılarında, gözle görülebilecek önemli bir şekil değişimine rastlanmadığı halde, bazılarında soyulma, çatlama, çukurlaşma ve kırılma belirtileri görüldü. Yapılan incelemelerde, rulman hasarlarının yük, devir sayısı ve yağ debisi gibi deney değişkenlerine bağlı olduğu gözlemlendi. Örneğin, düşük radyal yük ve yüksek devir sayılarında çalışan rulmanlarda, en büyük hasar kafeste meydana gelirken, radyal yük artırıldığında, rulman elemanlarının da hasara uğradıkları görüldü. Nitekim, 22 kN'luk radyal yük ve 6000 dev/dak gibi oldukça yüksek mil hızında çalışan rulmanın kafesi deney sonunda parçalanmış olmasına rağmen, rulman elemanlarında önemli bir hasar meydana gelmediği görüldü. 33 kN gibi nispeten daha yüksek bir yük altında çalışan rulmanda ise, hasarın, daha çok iç bilezik ve yuvarlanma elemanlarında meydana geldiği gözlemlendi, Şekil 29. Yük arttıkça, kafesten başka diğer rulman elemanlarında da çatlama ve kırılma şeklinde, önemli hasarların meydana geldiği görüldü, Şekil 30. Nitekim, 52 kN'luk radyal yük altında çalışan rulmanın dış bileziğinde, çatlama ve kırılma şeklinde ortaya çıkan hasar Şekil 31'de görülmektedir.

Deneye tabi tutulan rulmanların SEM ile incelenmesi sonucunda, yuvarlanma elemanlarının yüzeylerinde çukurcuk (pit), soyulma, çatlama ve malzeme kaybı gibi aşınma ve yorulma belirtilerine rastlanıldı. Ancak, söz konusu hasar belirtileri, düşük yüklerde çalışan rulmanların bilyalarında görülmedi. Nitekim, 22 kN'luk yük altında çalışan rulmanın yuvarlanma elemanlarının yüzeyinde, Şekil 32'de görüldüğü gibi, aşınma ve yorulma belirtilerine rastlanılmadı. Ancak,

uygulanan radyal yük 30 kN değerine çıkartıldığında, söz konusu rulmanın bilyalarında soyulma, çukurlaşma ve çatlama şeklinde kendini gösteren belirgin hasar izlerine rastlanıldı. Bu hasar belirtileri Şekil 33'de görülmektedir. Yük arttırılıp, yağ debisi düşürüldüğünde, yüzeyde soyulma ve sürtünme aşınması izlerine rastlanıldı. 40 kN'luk radyal yük altında ve 6000 dev/dak'lık devir sayısında çalıştırılan ve debisi 0,5 l/dak olan yağ ile yağlanmış rulmana ait bir yuvarlanma elemanının yüzeyinde, metal-metal sürtünmesi sonucunda oluşan soyulma izlerini gösteren fotoğraf Şekil 34'de verilmiştir. Aynı bilyanın yüzeyinden elde edilen SEM fotoğrafı (Şekil 35) ise, oluşan çatlaklar ile aşırı sürtünme izlerini göstermektedir. Buradan, yük arttırılıp, yağ debisinin azaltılması durumunda, aşınmanın önemli bir hasar mekanizması olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Rulmanların bilyalarının yüzeylerinde görülen hasar belirtilerinden başka, iç bileziklerin yuvarlanma yolu üzerinde de çukurlaşma, soyulma ve çatlama şeklinde kendini gösteren aşınma ve yorulma izlerine rastlanıldı. Bunun tipik bir örneği, 26 kN'luk yük altında çalışarak, hasara uğrayan bir rulmanın iç bileziğinin yuvarlanma yolu üzerinden elde edilen SEM fotoğrafında görülmektedir, Şekil 36. Yük 30 kN'a çıkarıldığında, yüzeyde daha büyük boyutlu çukurcuklar ile kırılma ve kopmalar görüldü. Bunun tipik bir örneği de Şekil 37'de verilmiştir. Bu fotoğrafta yorulma izlerini gösteren bölgenin daha ayrıntılı SEM görüntüsü ise, Şekil 38' de verilmiştir. Bu fotoğrafta, yorulma çatlaklarının ilerleme ve duraklama izleri görülmektedir.

30 kN'luk yük altında, yağsız olarak çalışan başka bir rulmanda ise, sürtünme, çizilme, aşınma ve yorulma izlerine rastlanıldı. Bu izler, Şekil 39'da verilen SEM fotoğrafında

görülmektedir. Buradan, uygulanan yük artırıldığında iç bileziğin yüzeyinde oluşan çatlama, çukurlaşma ve kopma izlerinin belirgin hale geldiği, yağ debisinin azalması durumunda ise, metal-metal temasından kaynaklanan sürtünme ve aşınma etkilerinin arttığı görülmektedir. Söz konusu rulmanların, yuvarlanma elemanları ile iç bileziklerinin yüzeylerinde, ciddi hasar belirtileri görülmesine rağmen, dış bileziğin yuvarlanma yüzeyinde, bütün deney şartlarında, önemli bir aşınma ve yorulma belirtisine rastlanılmadı. Nitekim, 30 kN'luk radyal yük altında ve 6000 dev/dak'lık devir sayısında çalışan bir rulmanın dış bileziğinin yuvarlanma yolu üzerinde önemli bir aşınma ya da yorulma belirtisi görülmedi. Söz konusu bileziğin yuvarlanma yolunun SEM görüntüsü Şekil 40'da verilmiştir.

Yapılan metalografik incelemelerde, deneyeye tabi tutulmuş rulmanların bazı elemanlarında yapısal değişimlere rastlanıldı. Söz konusu yapısal değişimlerin, tipik bir örneği, Şekil 41'de görülmektedir. Bu şekil, 30 kN'luk radyal yük altında, 3800 dev/dak'lık devir sayısında ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın iç bileziğinde meydana gelen değişimleri göstermektedir. Bu fotoğraftan, yüzeyde beyaz dağlama bölgesi (BDB), onun altında siyah dağlama bölgesi (SDB) ve daha derinde ise, değişime uğramamış, normal dağlama bölgesi (NDB)'nin yer aldığı görülmektedir. Söz konusu bölgelerden, elde edilen sertlik profili (sertliğin derinliğe göre değişimini gösteren eğri) ise, Şekil 42'de verilmiştir. Elemanların mikrosertliklerinin ölçümlerinde birbirlerine yakın olan sertlik izleri dikkate alınmamıştır. Değişik kesitler üzerinde yapılan mikrosertlik ölçümleri sonucunda, beyaz dağlama bölgesinin 1000 VSD, siyah dağlama bölgesinin 500 VSD ve normal dağlama bölgesinin ise, 730 VSD ortalama sertlik değerlerine sahip oldukları belirlendi. Buradan, beyaz dağlama bölgesinin rulman çeliğinin

başlangıçtaki yapısından çok daha sert, siyah dağlama bölgesinin ise, çok daha yumuşak olduğu görülmektedir. Aynı bölgeden elde edilen SEM görüntüsü ise, Şekil 43 'de verilmiştir. Söz konusu bölgelerin, ışık mikroskobunda farklı renkte görülmelerine rağmen, ince yapılı yüzey tabakası beyaz dağlama bölgesine, bunun hemen altında yer alan, daha kaba yapılı bölge ise, siyah dağlama bölgesine karşılık gelmektedir. Bu resimdeki beyaz ve siyah dağlama bölgelerinin yapısal ayrıntılarını gösteren SEM fotoğrafları, sırasıyla Şekil 44 ve 45'de verilmiştir. Söz konusu yapısal değişimlerden başka, 33 kN'luk radyal yük altında ve 6000 dev/dak'lık devir sayısında çalışan bir rulmanın iç bileziğindeki beyaz dağlama bölgesinin içerisinde, daha açık beyaz görünümlü bir bölgeye rastlanılmış ve bu bölge açık beyaz dağlama bölgesi (ABDB) olarak adlandırılmıştır. Bu açık beyaz dağlama bölgesinden ışık mikroskobu ile elde edilen görüntü Şekil 46'da verilmiştir. Bazı rulman elemanlarının yüzeylerinde açık beyaz ve beyaz dağlama bölgelerine rastlanılırken, bazılarında sadece siyah dağlama bölgesinin oluştuğu görüldü. 30 kN'luk radyal yük altında ve 6000 dev/dak'lık devir sayısında, yağsız olarak çalışan bir rulmanın iç bileziğinden elde edilen sertlik profili Şekil 47'de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi, iç bileziğin yüzeyindeki siyah dağlama bölgesinin oluşması ile yaklaşık 460 VSD değerine kadar düşen sertlik, yüzeyden itibaren derinlik arttıkça artarak normal dağlama bölgesinde 730 VSD değerine erişmektedir. Buradan, yapısal değişimler sonucunda bazı rulman elemanlarının yüzeyleri sertleşirken, bazılarının yüzeylerinin yumuşadığı ortaya çıkmaktadır.

Enerji dispersive spektroskopisi (EDS) yöntemi ile yapılan analizler sonucunda, değişime uğramış bölgelerin (BDB, ABDB

ve SDB) kimyasal bileşimlerinde herhangi bir değişim meydana gelmediği ve rulman çeliği ile aynı kimyasal bileşime sahip oldukları belirlendi. Yapısal değişime uğramış bölgelerin, sertlik değerleri, kimyasal bileşimleri ve yapısal özellikleri, beyaz ve açık beyaz dağlama bölgelerinin martenzit, siyah dağlama bölgesinin ise, aşırı menevişlenmiş martenzit olduğuna işaret etmektedir. Öte yandan, incelenen rulmanlarda, söz konusu beyaz ve siyah dağlama bölgelerinin, artan yük değeri ve yük tekrar sayısı ile genişledikleri görüldü. Yuvarlanma elemanlarında meydana gelen beyaz dağlama bölgelerinin, iç bileziklerde oluşan beyaz dağlama bölgelerinden, genelde daha ince olduğu ve hattâ bazı bölgelerde hiç oluşmadığı gözlemlendi. Buna karşılık, siyah dağlama bölgesinin iç bilezikte görüldüğü gibi, daha geniş alanlarda yer aldığı gözlemlendi. Bu durum, yuvarlanma elemanlarının yüzeylerinde meydana gelen sıcaklık artışının ve/veya soğuma hızının, martenzit oluşturmaya yeterli olmadıklarını göstermektedir.

Öte yandan, yapılan incelemelerde, siyah dağlama bölgesi içerisinde beyaz renkli, bant şeklinde uzamış fazları içeren bazı bölgelerin oluştuğu gözlemlendi. Bunun tipik bir örneği, Şekil 48'da görülmektedir. Buradaki yönlenmiş bantların, 29 kN'luk radyal yük altında ve 6000 dev/dak'lık mil hızında çalışan rulmanın iç bileziğinde, $15,6 \times 10^7$ çevrim sayısı sonunda oluştuğu görüldü. Sözü edilen beyaz renkli, yönlenmiş bantların, siyah dağlama bölgesi içerisinde kayma gerilmesinin en büyük değere ulaştığı derinlikte meydana geldiği ve yüzeyle yaklaşık 30° 'lik açı yaptığı belirlendi. İncelenen bölgenin yapısal ayrıntılarını gösteren SEM fotoğrafı Şekil 49'da verilmiştir. Bu fotoğraftan da, yönlenmiş çizgilerin birbirlerine paralel ve belirli bir doğrultuda uzamış, beyaz renkli bantlar oldukları görülmektedir. Ayrıca, daha yüksek yük altında çalışan rulmanlarda, aynı bantların daha düşük çevrim sayıları sonunda oluştuğu gözlemlendi. Yapılan

incelemeler sonucunda, söz konusu bantların oluşumunun, yüzey basıncı ile yük tekrar sayısına bağlı olduğu görüldü. Bu bantların; yüksek yük altında, düşük çevrim sayılarında, düşük yüklerde ise, yüksek çevrim sayılarında oluştuğu görüldü. Ancak, bu değişimlerin, düşük yük altında ve düşük devir sayılarında çalışan rulmanlarda oluşmadığı görüldü. Söz konusu yönlenme bantlarına, yağsız çalışan rulmanların iç bileziğinde de rastlanıldı. Bunun tipik örneği, Şekil 50'de görülmektedir. Bu fotoğraf, 14 kN'luk radyal yük altında ve 3800 dev/dak'lık mil hızında yağsız olarak çalışan rulmanın, iç bileziğinde $0,61 \times 10^7$ çevrim sayısı sonunda meydana gelen yönlenmiş yapıları göstermektedir. Bu elemanın hem yüzey malzemesinde, hem de yüzeyinin altında bulunan siyah dağlama bölgesi içerisinde birbirinden farklı yapısal yönlenmelere rastlanıldı. Yüzey malzemesindeki yönlenme çizgileriyle, siyah dağlama bölgesindeki yönlenme çizgileri arasında, yaklaşık 45° 'lik açı olduğu görüldü. Burada, yüzey malzemesindeki yönlenmenin, sürtünme kuvvetinin etkisiyle, yüzey altındaki yönlenmenin ise, kayma gerilmesinin etkisiyle meydana gelen plastik deformasyondan kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

İncelenen bazı rulmanların bilyalarında da benzer yapısal yönlenmelere veya bant oluşumuna rastlanıldı. Bilyalarda meydana gelen bu tür değişimleri gösteren ışık mikroskobu görüntüsü, Şekil 51'de verilmiştir. Bu fotoğraftaki yönlenmiş bölgenin ayrıntılarını gösteren SEM fotoğrafı ise, Şekil 52'de verilmiştir. Söz konusu bölgelerdeki yönlenme çizgilerinin, bilya yüzeyinin teğeti ile, yaklaşık 30° 'lik açı yaptığı görüldü. Bilyalardaki yapısal yönlenmelerin iç bilezikte meydana gelen yönlenmelere çok benzedikleri görüldü.

Diğer taraftan, rulman elemanlarının yüzeyleri altında, özellikle en büyük kayma gerilmesinin meydana geldiği derinlikte, daha küçük boyuttaki yapısal değişimlere

rastlanıldı. Bunun tipik bir örneği, 26 kN'luk radyal yük altında, $9,3 \times 10^7$ çevrim yapmış bir rulmanın iç bileziğinde görüldü, Şekil 53. Bu değişim, iç bileziğin yüzeyi altındaki, siyah dağlama bölgesinde yer alan, siyah görümlü yuvarlak bir kalıntının (enklüzyon) bir kısmını çevreleyen yarım bilezik şeklinde ve açık beyaz olarak kendini göstermektedir. Bu bölgeden elde edilen SEM fotoğrafı, açık beyaz halkadaki karbür yoğunluğunun çok az olduğunu ve siyah yuvarlak bölgenin ise, dağlama sırasında eklüzyonun çıkarılmasıyla oluşan çukur olduğunu göstermektedir, Şekil 54 Aynı bölgeden, daha yüksek büyültmede elde edilen SEM fotoğrafı Şekil 55'de verilmiştir. Bu fotoğraf, beyaz halka ile siyah bölgenin ayrıntılarını göstermektedir. Yapısal değişimle meydana gelen beyaz halka şeklindeki bölge, martenzitik bir yapının görünümünü andırmaktadır. Öte yandan, söz konusu değişimin, hemen hemen en büyük kayma gerilmesinin olduğu derinlikte, meydana geldiği belirlendi. Bu gözlemlerle birlikte sözü edilen beyaz bölgenin fotoğrafta görülen enklüzyonun çevresinde elemanın yuvarlanma yoluna bakan tarafında oluşması bu değişimin gerilme etkisiyle meydana geldiğine işaret etmektedir.

Diğer taraftan, söz konusu elemanın bazı bölgelerinde keskin sınırlarla belirlenmiş siyah dağlama bölgelerinin meydana geldiği görüldü, Şekil 56. SEM ile yapılan incelemelerde Şekil 57'de görüldüğü gibi, siyah dağlama bölgelerinin orta kısmında yer alan beyazımsı bölgelerde çatlaklara, siyah kısımda ise, uzayarak yönelmiş yapıya rastlanıldı. Merkez bölgesinden, elde edilen SEM görüntüsü Şekil 58'da verilmiştir. Bu fotoğrafta görülen yapı, aşırı kuraktan çatlamış toprağı andırmaktadır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, söz konusu çatlakların, kayma gerilmesinin en büyük olduğu derinlikte meydana geldiği görüldü. Ayrıca, rulmanın iç bileziğinin yüzeyi altında meydana gelen en büyük kayma gerilmesinin (1111 MPa), rulman çeliğinin elastiklik

sınırının (700 MPa) [3,25] üzerinde olduğu belirlendi. Buradan, yüzey altındaki yapısal değişimlerin, ısı etkilerden başka, rulman elemanlarının yüzeyleri altında oluşan en büyük kayma gerilmesi değerinin, rulman çeliğinin elastiklik sınırını aşması durumunda meydana geldikleri ortaya çıkmaktadır.

Aşırı yük altında çalışan rulmanların elemanlarının yüzeyleri altında, yapısal değişimlerden başka, oldukça büyük boyutlu çatlaklara da rastlanıldı. Söz konusu çatlak ve yapısal değişimleri gösteren fotoğraf Şekil 59'da verilmiştir. Bu fotoğraf, 33 kN'luk radyal yük ve 6000 dev/dak'lık mil hızında çalışan iç bileziğin, beyaz ve siyah dağlama bölgeleri ile siyah dağlama bölgesinde oluşan yönlenmiş yapıyı ve yüzeye paralel bir çatlağı göstermektedir. Söz konusu çatlağın, en büyük kayma gerilmesinin meydana geldiği derinlikte olduğu gözlemlendi. Buradaki en büyük kayma gerilmesi değerinin, rulman çeliğinin akma sınırının üzerinde olduğu hesaplandı. Ayrıca, ağır yük altında çalışan rulman elemanlarının yüzeyleri altında büyük boyutlu (uzun ve geniş) çatlaklara rastlanıldı. Söz konusu çatlaklara ait tipik bir örnek, 40 kN'luk radyal yük altında çalışan bir bilyadan elde edilen ışık mikroskobu fotoğrafında görülmektedir, Şekil 60. Bu çatlaklar, yüzey altında kayma gerilmesinin en büyük olduğu derinlikte meydana gelmelerine rağmen, yapılan incelemelerde bunların yüzey altı yuvarlanma yorulması etkisinden çok, aşırı zorlanmadan kaynaklandığı belirlendi. Böylece, yüksek yük altında çalışan rulmanlarda yapısal değişimlerden başka, kayma gerilmesinin en büyük olduğu derinlikte, gerilme etkisiyle çatlakların olduğu ortaya çıkmaktadır.



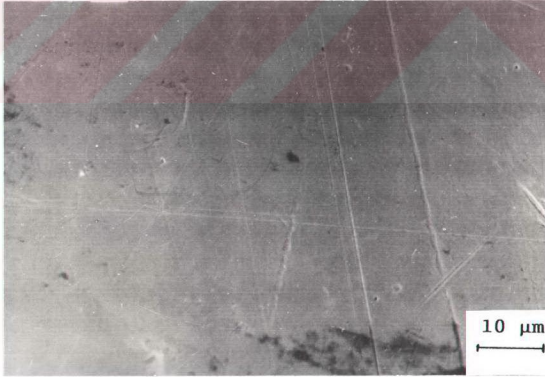
Şekil 29. 33 kN'luk yük altında ve 0,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın hasara uğrayan iç bileziğinin görünümü



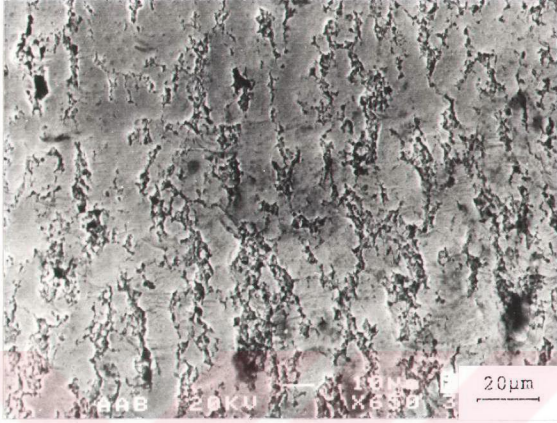
Şekil 30. 33 kN'luk yük altında ve 0,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın hasara uğrayan elemanları



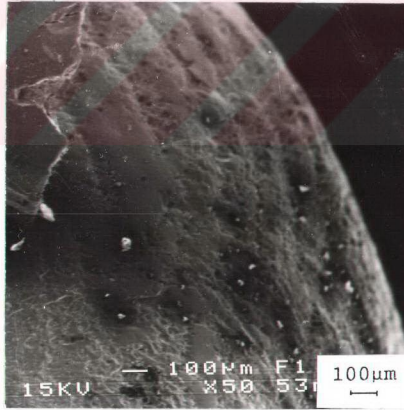
Şekil 31. 52 kN'luk yük altında ve 1,0 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın aşırı zorlama sonucunda hasara uğrayan iç ve dış bilezikleri



Şekil 32. 22 kN'luk yük ve 2,0 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmana ait bir yuvarlanma elemanının yüzeyinin görünümü



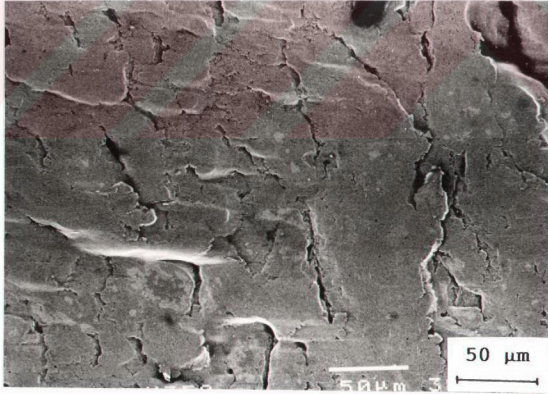
Şekil 33. 30 kN'luk yük ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın hasara uğrayan bir bilyasının yüzeyinin görünümü



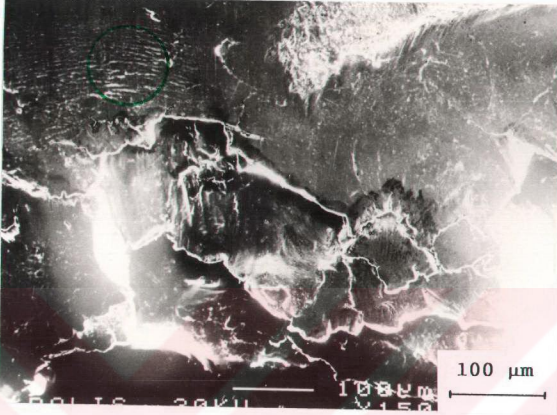
Şekil 34. 40 kN'luk yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 0,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın bir bilyasının yüzeyinde meydana gelen soyulma belirtileri



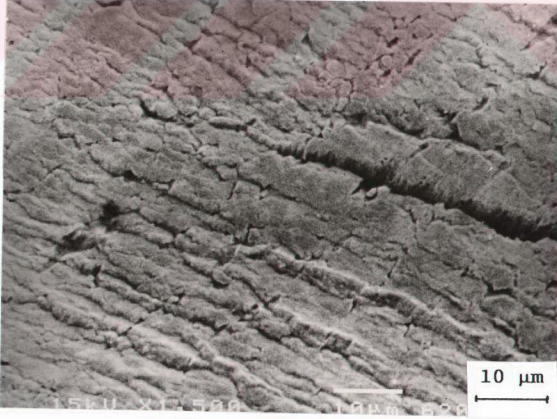
Şekil 35. 40 kN'luk yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 0,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın bir bilyasının yüzeyinde meydana gelen sürtünme izleri ile çatlakların görünümü



Şekil 36. 26 kN'luk yük ve 2,0 l/dak'lık yağ debisinde çalışan bir rulmana ait iç bileziğin yuvarlanma yolunun görünümü



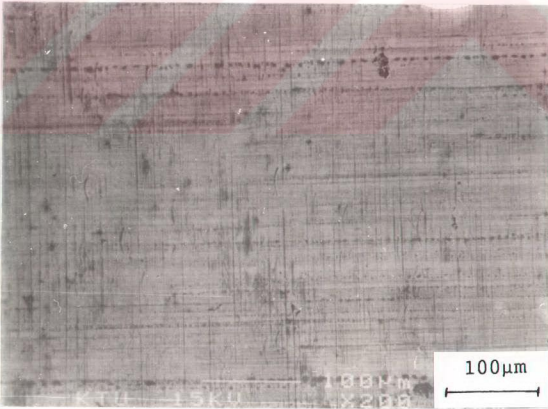
Şekil 37. 30 kN'luk yük altında çalışan rulmanın iç bileziği-
nin yuvarlanma yolunun görünümü



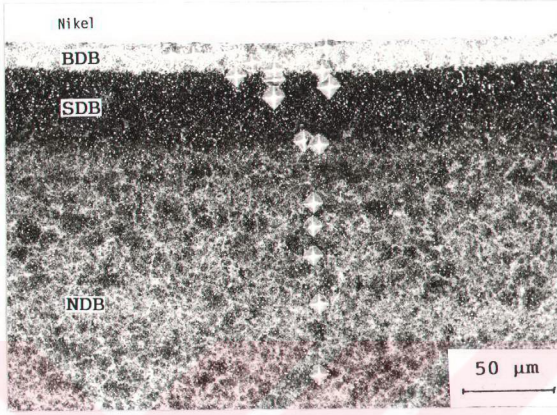
Şekil 38. Şekil 37'de görülen yuvarlanma yolunun işaretli
bölgesine ait ayrıntıların görünümü



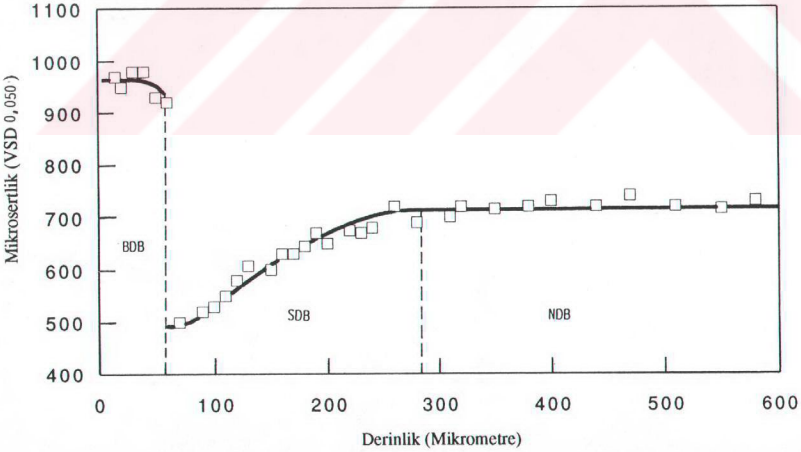
Şekil 39. 30 kN'luk yük altında, yağsız olarak çalıştırılmış bir rulmanın iç bileziğinin yuvarlanma yolu üzerinde görülen sürtünme, çizilme ve aşınma izleri



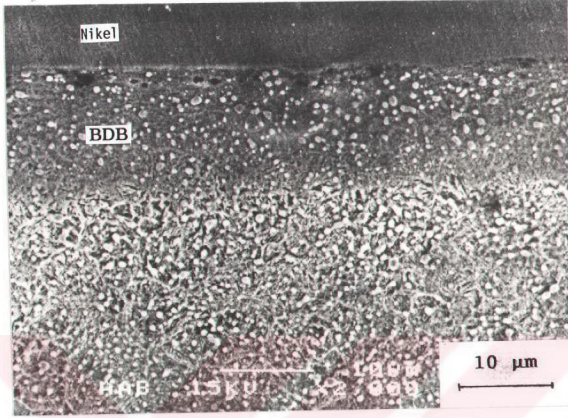
Şekil 40. 30 kN'luk yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 2,0 l/dak'lık yağ debisinde çalışan bir rulmana ait dış bileziğin yuvarlanma yolunun görünümü



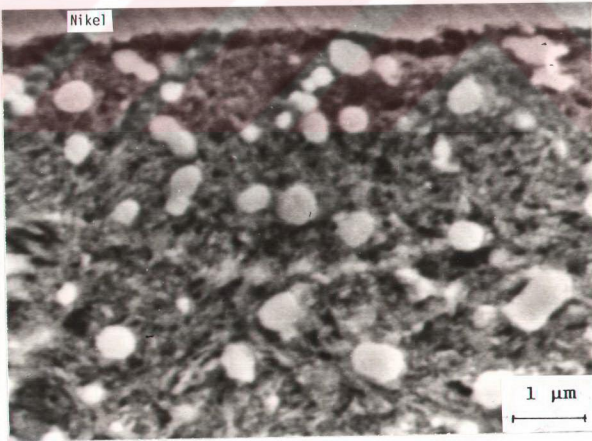
Şekil 41. 30 kN'luk radyal yük, 3800 dev/dak'lık mil hızı ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın iç bileziğinde meydana gelen yapısal değişimler



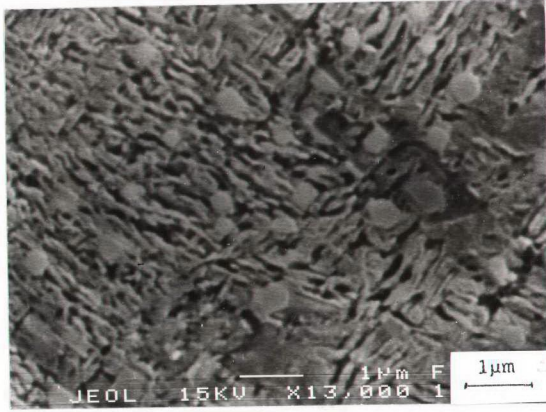
Şekil 42. 30 kN'luk radyal yük altında çalıştırılan rulmana ait iç bileziğin sertliğinin yüzeyden olan derinliğe göre değişimi



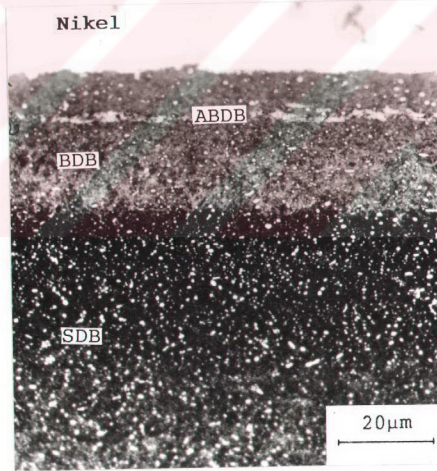
Şekil 43. 30 kN'luk radyal yük altında çalışan bir rulmanın iç bileziğinin metalografik yapısının SEM görüntüsü



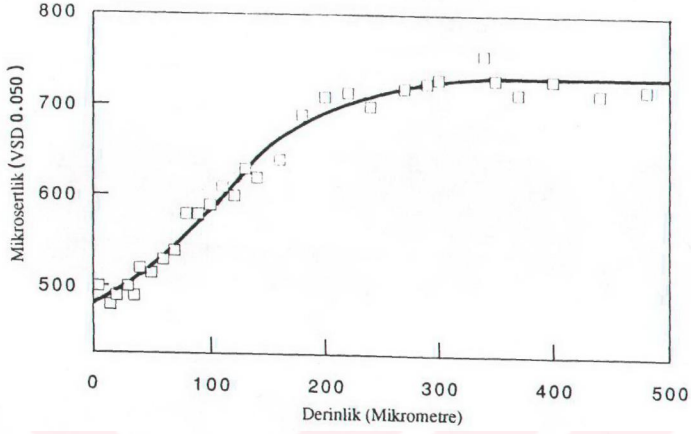
Şekil 44. Şekil 43'deki fotoğrafta görülen beyaz dağlama bölgesinin ayrıntılı SEM görüntüsü



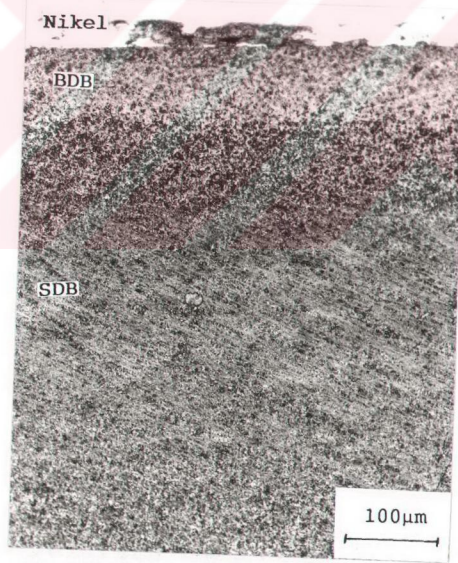
Şekil 45. Şekil 43'deki fotoğrafta yer alan siyah dağlama bölgesinin yapısal ayrıntılarını gösteren SEM fotoğrafı



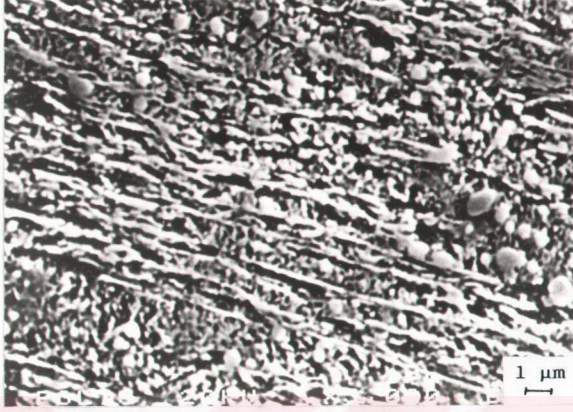
Şekil 46. 33 kN'luk radyal yük 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 0,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın iç bileziğinde oluşan açık beyaz dağlama bölgesinin (ABDB) görünümü



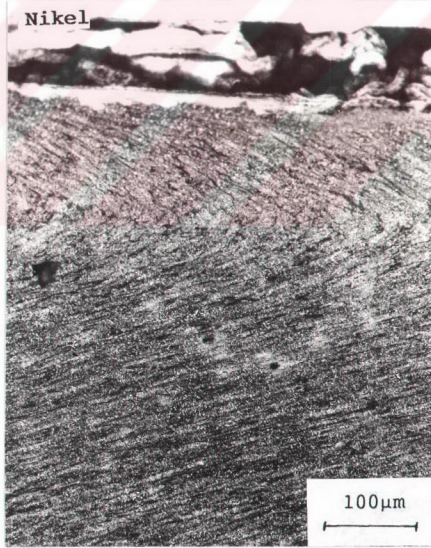
Şekil 47. Yüzeyinde yalnız siyah dağlama bölgesi oluşan bir iç bileziğin sertliğinin derinliğe göre değişimi



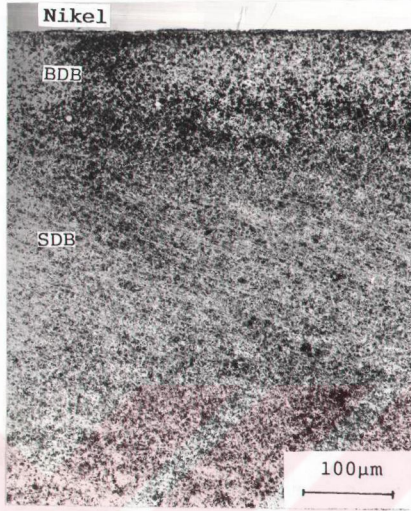
Şekil 48. 29 kN'luk radyal yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan bir rulmanın iç bileziğinde oluşan, bant biçiminde uzamış fazların SEM görünümü



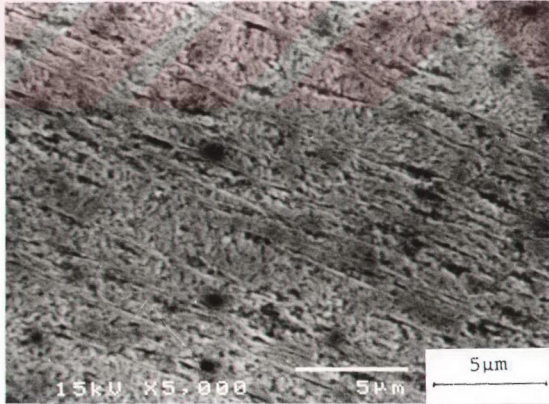
Şekil 49. Şekil 46'daki bölgede bulunan bant şeklinde uzamış fazların ayrıntılarını gösteren SEM fotoğrafı



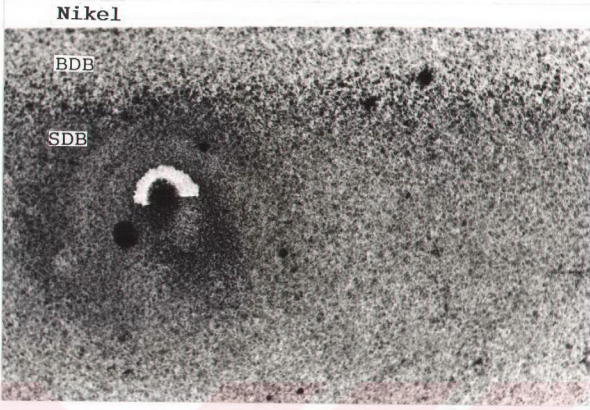
Şekil 50. 14 kN'luk radyal yük altında, yağsız olarak çalışan rulmanın iç bileziğindeki yönlenmiş bantların SEM görünümü



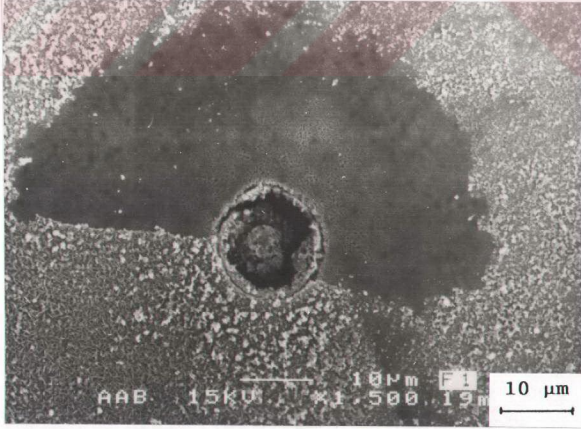
Şekil 51. Rulmanlara ait bilyalarda oluşan yönlendirilmiş yapıların tipik görünümü



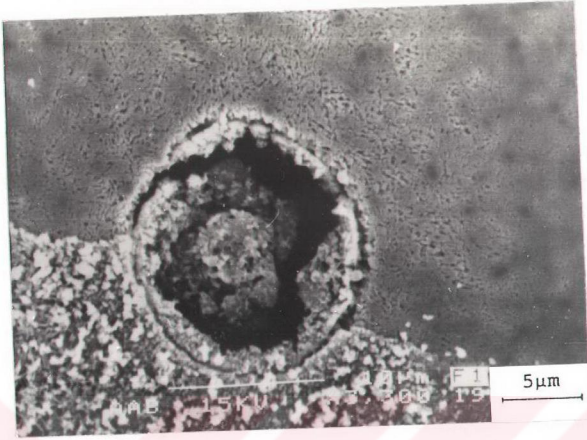
Şekil 52. Rulmanlara ait bilyalarda oluşan yönlendirilmiş yapıların ayrıntılarını gösteren SEM fotoğrafı



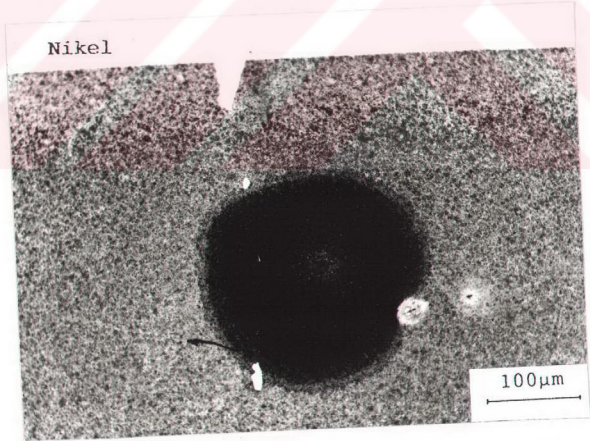
Şekil 53. 26 kN'luk radyal yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın, iç bileziğindeki bir kalıntı (enklüzyon) etrafında meydana gelen yapısal değişimler



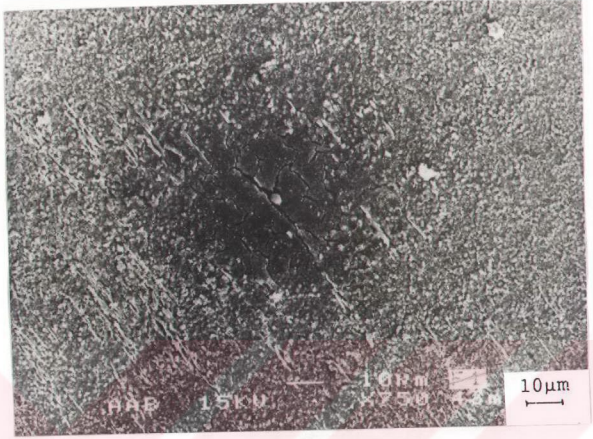
Şekil 54. Şekil 53'deki yapısal değişimlerin SEM fotoğrafı



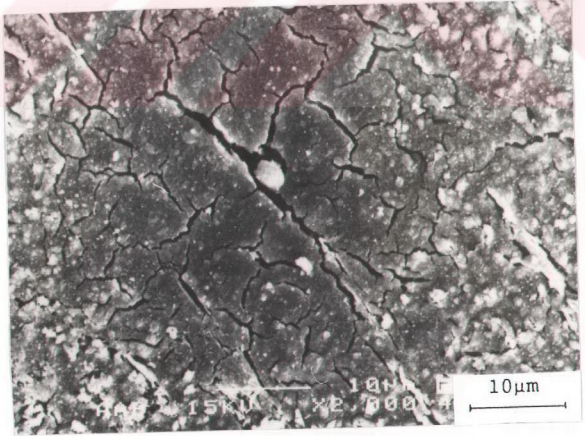
Şekil 55. Şekil 53 ve 54'de görülen yapısal değişimlerin ayrıntılı SEM görüntüsü



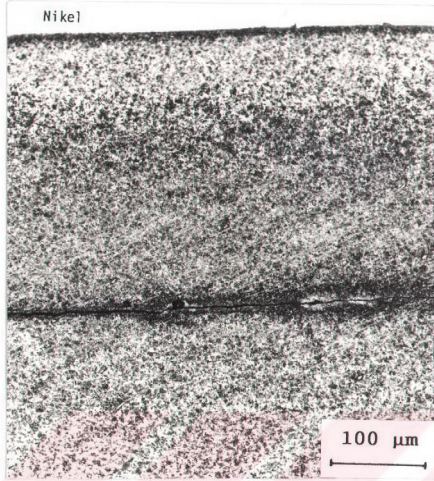
Şekil 56. 26 kN'luk radyal yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın, iç bileziğinde rastlanılan kısmi siyah dağlama bölgesi



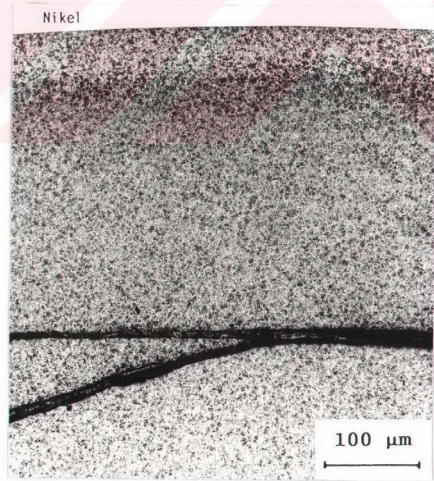
Şekil 57. Şekil 56'daki fotoğrafta görülen koyu siyah dağlama bölgesinin SEM fotoğrafı



Şekil 58. Şekil 57'deki fotoğrafta görülen koyu siyah dağlama bölgesinin ayrıntılı SEM görüntüsü



Şekil 59. 33 kN'luk radyal yük altında, 6000 dev/dak'lık dönme hızında ve 3,5 l/dak'lık yağ debisinde çalışan rulmanın iç bileziğinde meydana gelen çatlakların görünümü



Şekil 60. 40 kN'luk radyal yük, 6000 dev/dak'lık mil hızı ve 2,0 l/dak'lık yağ debisinde çalışan bir rulmanın bilyasında aşırı zorlanmadan kaynaklanan çatlakların görünüm

4. İRDELEME

Deneylerden elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonucunda, rulmanlı yatakların çalışma sıcaklıklarının, radyal yük ve devir sayısı ile doğru orantılı, yağ debisi ile ters orantılı olarak değiştikleri görüldü, Şekil 25, 26 ve 27. Rulman sıcaklığının artan yük ile artması, elemanlar arasındaki sürtünme kuvvetinin artmasından kaynaklanmaktadır [2-5]. Rulman sıcaklığının devir sayısı ile lineer olarak artması durumu ise, hız arttıkça artan merkezkaç kuvvetlerinin, rulmana gelen yağı savurarak, yeterli kalınlıkta yağ filmi oluşmasını engellemesi nedeniyle meydana gelmiş olabilir. Buna benzer bulgulara, literatürde rastlanılmıştır [2,3,11,55,56]. Rulman sıcaklığının, artan yağ debisi ile azalması ise, yüzeylerde yeterli kalınlıkta yağ filminin oluşması ile metal-metal temasının önlenmesi ve ayrıca, yağlayıcı yağın soğutucu etki yapmasından kaynaklanmaktadır [2,55].

Bu çalışmada, kataloglarda tavsiye edilen şartlarda, kontrollü olarak çalıştırılan rulmanların çalışma ömürlerinin, literatürde verilen formüllerle hesaplanan ömür değerlerinin 20 katına kadar çıkabileceği görüldü. Bu durum, SKF firması tarafından geliştirilen yeni bir ömür teorisi ile uyuşmaktadır [11,12,57,58].

Ayrıca, Avrupalı firmalar tarafından imal edilen rulmanlı yatakların, aynı çalışma şartlarında eski Sovyet Sosyalist Cumhuriyetleri Birliği'nde (SSCB), aynı malzemeden imal edilmiş rulmanlardan 10 kat daha uzun süre çalışabilecekleri görüldü. Değişik ülkelerde, aynı malzemeden imal edilen

rulmanlı yatakların çalışma ömürleri arasındaki bu büyük farklılık, söz konusu rulmanların çalışma boşlukları, imalât toleransları, kafes tasarımı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin farklı olmasından kaynaklanmış olabilir [41,59,60]. Nitekim, yapılan incelemelerde, Sovyet Sosyalist Cumhuriyetleri Birliği'nde imal edilmiş rulmanların yüzey kalitesinin kötü, boyut toleranslarının çok büyük ve kafes ceplerinin çok geniş oldukları belirlendi. Günümüzde kullanılan rulmanlı yataklar, optimum çalışma boşluğu, tolerans ve yüzey pürüzlülüğüne sahip olacak şekilde imal edilirler [10,12,17]. Dolayısıyla, yukarıda belirtilen rulmanların çalışma ömürleri arasındaki farkın, bunların tasarım ve imalâtından kaynaklandığı söylenebilir.

İncelenen rulmanların, genelde, çalışma şartlarına göre değişen süreler sonunda, gürültülü bir çalışma devresinden sonra hasara uğradıkları görüldü. Yüksek hızlarda çalışan rulmanların, kafeslerinin aniden parçalanması sonucunda, hasara uğradıkları gözlemlendi. Yükün arttırılması durumunda ise, hasarın daha çok rulman elemanlarında ortaya çıktığı görüldü. Normal çalışma şartları altındaki rulmanlarda, kafes yük taşımayan eleman olmasına rağmen, yüksek hız ve normal yük altında çalışan rulmanlara ait elemanların yüzeylerinde yeterli yağ filmi oluşmadığından, bu elemanlar arasında, kayma sürtünmesi meydana gelmektedir. Bilyalar aracılığı ile kafese iletilen sürtünme kuvvetinin, kafes malzemesinin mukavemet değerini aşması durumunda, kafeste aşırı deformasyon, çatlama ya da kırılma meydana gelmektedir [2,17,61,62]. Öte yandan, uygun olmayan çalışma şartlarında, rulmanda meydana gelen aşırı büyüklükteki dinamik yükler de kafes hasarlarına katkıda bulunabilir [17,41,61].

Yükün arttırılması durumunda, kafeste meydana gelen

hasardan başka, rulman elemanlarının yüzeylerinde soyulma, çukurlaşma ve çatlama gibi aşınma ve yorulma izlerine rastlanıldı. Yüksek yük altında çalışan rulmanlara ait elemanların yüzeylerinde, yüksek yüzey basınçları oluşmaktadır [32,40,63,64]. Söz konusu yüzey basınçlarının, rulman çeliğinin akma sınırını aşması durumunda, rulman elemanlarının yüzeylerinde plastik deformasyon meydana gelmektedir. Plastik deformasyon nedeniyle yüzeyler pürüzleşmekte ve meydana gelen pürüzler gerilme yığılmasına sebep olmaktadır. Gerilme yığılması sonucunda oluşan yüksek değerdeki gerilmeler, belirli bir çevrim sayısı sonunda çatlak ve çukurcuk oluşturmaktadır [22,41,65,66]. Hem yüksek hız, hem de yüksek basınç altında çalışan rulmanlarda ise, daha çok çukurcuk ve çatlakların oluştuğu gözlemlendi. Bu durum, yüksek hız ve yüksek basınç şartları altında çalışan rulmanlara ait elemanların yüzey sıcaklıklarının artmasından dolayı rulman malzemesinin mukavemetinin düşmesinden kaynaklanmış olabilir.

Yağsız çalışma durumunda ise, rulman elemanlarında daha çok sürtünme ve aşınma belirtilerine rastlanıldı, Şekil 39. Söz konusu aşınma durumu, yüzeylerde yeterli yağ filmi oluşmaması nedeniyle meydana gelen metal-metal sürtünmesinden kaynaklanmaktadır [2,23,41]. Yağsız çalışma durumunda, kayma sürtünmesi ile ısınan eleman yüzeylerini soğutacak yağ olmadığından, martenzit oluşumu engellenmekte, bunun yerine ya aşırı menevişlenmiş martenzit veya perlitik yapı oluşmaktadır. Nitekim, söz konusu rulmanların elemanlarının yüzeylerinde beyaz dağlama bölgesinin oluşmadığı görüldü.

Rulmanların dış bileziğinin yuvarlanma yolu üzerinde ise, önemli ölçüde aşınma ve yorulma belirtilerine rastlanılmadı. Bu durum, bu elemanın geometrisinden dolayı yüzeyinde oluşan en büyük basıncın, diğer elemanların yüzeyinde oluşan

en büyük basınçlardan daha düşük olmasından ve yükleme bölgesinin, uygulanan yağlama yönteminden dolayı, sürekli yağ banyosu içerisinde tutulması nedeniyle, sürekli soğutulmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, aşırı aşınma durumunun, özellikle yağsız veya düşük yağ debilerinde çalıştırılan rulmanlarda meydana geldiği görüldü, Şekil 34 ve 35.

Deneylerden sonra incelenen rulmanların, özellikle iç bilezikleri ile yuvarlanma elemanlarında bazı yapısal değişimlere rastlanıldı. Söz konusu yapısal değişimlerin, yüzeylerde değişik kalınlıkta, beyaz dağlama bölgeleriyle bunların altında yer alan siyah dağlama bölgeleri oluşturdukları görüldü, Şekil 41. Bazı beyaz dağlama bölgelerinin içerisinde ise, karbür içermeyen ve daha beyaz görünümlü, açık beyaz dağlama bölgelerine (ABDB) rastlanıldı, Şekil 46. Söz konusu yapısal değişimler, yetersiz veya uygun olmayan yağlama nedeniyle, rulman elemanları arasında meydana gelen metal-metal sürtünmesinden kaynaklanmış olabilir. Rulmanlı yataklarda metal-metal teması ile ortaya çıkan sürtünme ısısı, elemanların yüzeylerinin aşırı ısınmasına neden olabilir [2,21]. Aşırı ısınan yüzeylerin, yağlayıcı yağın etkisi ile soğuması sonucunda da bazı yapısal değişimler meydana gelebilir [2-5]. Bu yapısal değişimlere ait beyaz dağlama bölgesi (BDB); Ac_1 ile Acm çizgilerinin arasındaki bir sıcaklığa kadar ısınıp, yağlama yağının soğutma etkisi ile aniden soğuyarak oluşan martenzitik yapıyı, açık beyaz dağlama bölgesi (ABDB) ise; Acm çizgisinin üzerindeki sıcaklıklara kadar ısınarak, karbürleri çözünmüş ve daha sonrada ani soğuma ile oluşan martenzitik yapıyı göstermektedir. Siyah dağlama bölgesi (SDB), Ac_1 çizgisinin altındaki sıcaklıklara kadar ısınarak, aşırı menevişlenmiş martenzitik yapıyı göstermektedir. Beyaz dağlama bölgesinde, martenzitik bir matris yapısı içerisinde karbürler yer alırken, açık beyaz dağlama bölgesinde karbürlerin bulunmadığı gözlemlendi. Beyaz dağlama bölgelerinin matris yapısında belirgin ayrıntı ve

kontrast bulunmamasına karşılık, siyah dağlama bölgelerinin, kalın ferrit ve sementit fazlarını içeren kaba bir yapıya sahip oldukları görüldü. Yapılan mikrosertlik ölçümleri, söz konusu bölgelerin farklı sertliklere sahip olduklarını gösterdi, Şekil 42. Beyaz dağlama bölgesinin, normal dağlama bölgesine göre çok daha sert, siyah dağlama bölgesinin ise çok daha yumuşak olduğu görüldü. Ancak, rulman elemanlarında meydana gelen yapısal değişimlerin homojen olmadığı görüldü. Nitekim, deney rulmanlarının yuvarlanma elemanları ve iç bileziklerinin yüzeylerinde beyaz, açık beyaz ve siyah dağlama bölgeleri meydana gelirken, dış bileziklerin yüzeylerinde yalnız siyah dağlama bölgesinin olduğu gözlemlendi. Beyaz dağlama bölgesinin sert, siyah dağlama bölgesinin çok yumuşak olduğu dikkate alındığında; söz konusu yapısal değişimlerin, rulman elemanları arasındaki sertlik dengesinin bozulmasına neden oldukları ortaya çıkmaktadır. Sertlik dengesinin bozulması ise, temas eden rulman elemanlarının birbirlerini aşındırmalarına ve hasara uğramalarına sebep olmaktadır [2-5,9,41].

Metalografik incelemeler sırasında, rulmanların iç bileziklerinde ve yuvarlanma elemanlarında oluşan siyah dağlama bölgeleri içerisinde ve kayma gerilmesinin en büyük değere ulaştığı derinlikte, iplik şeklinde uzamış, beyaz renkli ve yüzeyin teğetiyle 30° 'lik açı yapan dönüşüm ürünlerine rastlanıldı, Şekil 48 ve 49. Bu tür yapısal değişimlerin, 3885 MPa'dan daha yüksek yüzey basınçlarında ve 4×10^7 civarındaki çevrim sayısında olduğu görüldü. Bu durum, söz konusu değişimlerin, sıcaklığın etkisinden çok gerilme etkisiyle meydana geldiklerini göstermektedir. Benzer yapısal değişimlere pek çok araştırmacı tarafından rastlanılmış olup, uzamış beyaz bölgelerin, en büyük kayma gerilmesinin etkisiyle yönlenmiş ferrit fazı olduğu ileri sürülmüştür [9,22,45,49]. Ancak, bu tür yapısal değişimlerin rulmanlı yatakların çalışma ömürlerine etkileri, literatürde açıklana-

madığı gibi, bu çalışmada da tam anlamıyla belirlenememiştir.

Yağsız çalışan rulmanlarda ise, hem yüzeyde, hemde yüzey altında olmak üzere, uzayarak yönlenmiş farklı iki bölgeye rastlanıldı, Şekil 50. Bu iki farklı yönlenme doğrultuları arasında, 45° 'lik bir açı farkı olduğu görüldü, Şekil 50. Rulman elemanlarının yüzeylerindeki yapısal yönlenme, metal-metal sürtünmesinden, yüzey altındaki yönlenme ise, en büyük kayma gerilmesinin etkisiyle meydana gelen plastik deformasyondan kaynaklanmaktadır [9,22,25,41].

İncelenen rulmanlarda, sözü edilen sürtünme tabakalarından başka, özellikle yüzey altında yapısal dönüşüm ürünlerine de rastlanıldı. Örneğin, yüzey altında, kayma gerilmesinin en büyük değere ulaştığı derinlikte, bazı kalıntıların (enklüzyon) etrafında beyaz renkli, yarım halka biçiminde yapısal dönüşüm ürünleri gözlemlendi, Şekil 53, 54 ve 55. Rulmanlı yataklarda, kayma gerilmesinin en büyük değerinin, rulman çeliğinin elastiklik sınırını aşması durumunda, rulman elemanlarında beyaz dağlama bölgesi ve yönlenmiş bölgeleri içeren bazı yapısal değişimlerin meydana geldiği bilinmektedir [24,29,41,50]. Söz konusu değişimler, yüzey altında, genelde kayma gerilmesinin en yüksek değere ulaştığı derinlikte, ya da gerilme yığılmasına neden olan kalıntıların etrafında, gerilme etkisiyle meydana gelmektedir [24,26,50]. Ayrıca, yapısal değişim sonucunda oluşan söz konusu beyaz bölgenin, enklüzyonun eleman yüzeyine bakan tarafında yer alması da, bu görüşü doğrulamaktadır.

Bu çalışmada, normal yük altında çalışan rulmanlarda, 10^8 gibi yüksek çevrim sayısından sonra, kayma gerilmesinin en yüksek olduğu derinlikte, yapısal değişime uğramış bölgelerde çatlaklara rastlanıldı, Şekil 57. Yüzey altı yuvarlanma yorulmasının belirtisi olan bu çatlaklar yüzeye ulaşmadan önce rulmanlar hasara uğradığından, söz konusu çatlakların rulmanların yorulma davranışlarına etkileri tam olarak belirlenemedi.

Yükün arttırılması durumunda ise, özellikle kayma gerilmesinin en büyük olduğu derinlikte, yüzeye paralel durumda bulunan çatlaklar oluştuğu gözlemlendi, Şekil 59 ve 60. Söz konusu çatlakların, kayma gerilmesinin en yüksek değere ulaştığı derinlikte, yük tekrarından kaynaklanan yorulma sonucunda meydana geldiği bilinmektedir [9,45,46]. Bu çatlaklar, yüzey altındaki kayma gerilmesinin en büyük değerinin, rulman çeliğinin akma sınırının üzerine çıkması durumunda, yüzey altında yuvarlanma yorulması etkisi ile oluşmaktadır [2,23,29,41]. Uygulanan yük daha da arttırıldığında (aşırı yükleme durumu), yüzey altında oluşan kayma gerilmesinin en büyük olduğu derinlikte, hem aşırı zorlanma, hemde yuvarlanma yorulması etkileriyle çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar mukavemet değeri düşük olan siyah dağlama bölgesi içerisinde, yüzeye paralel olarak ilerledikten sonra yüzeye ulaşmaktadır.

Düşük yük ve mil hızlarında çalışan rulmanlı yataklar çok uzun bir süre sonunda hasara uğrarken, yüksek mil hızlarında çalışan rulmanların, kafeslerinin parçalanması nedeniyle aniden hasara uğradıkları ortaya çıkmaktadır. Rulmanlı yataklarda oluşan yüzey altı kayma gerilmesinin en büyük değerinin; rulman çeliğinin elastiklik sınırının altında olması durumunda, rulmanlı yatakların kataloglarda verilen nominal ömür değerlerinden çok daha uzun süre sorunsuz çalışabilecekleri, elastiklik sınırını aşması durumunda, yüzey altında gerilme etkisiyle bazı yapısal değişimlerin meydana geldiği ve bunların zamanla çatlak oluşturarak çalışma ömrünü olumsuz yönde etkiledikleri, akma sınırını aşması durumunda ise, hem aşırı zorlanma, hemde yuvarlanma yorulması etkisiyle oluşan çatlakların yüzeye ulaşarak çok kısa çalışma süreleri sonunda hasara neden oldukları ortaya çıkmış bulunmaktadır.

5. SONUÇLAR

1- Rulmanlı yatakların çalışma ömrü, uygulanan yük, yağ debisi ve milin dönme hızına bağlıdır. Radyal yük ve mil hızı artırıldığında, rulmanın çalışma ömrü büyük ölçüde azalmaktadır.

2- Rulmanlı yatakların çalışma sıcaklığı, uygulanan yük, yağlama yağı debisi ve milin dönme hızına bağlıdır. Rulmanların, rejim durumundaki sıcaklıkları, uygulanan radyal yük ve milin dönme hızı ile doğru, yağ debisi ile ters orantılı olarak değişmektedir.

3- Rulman elemanlarının yüzey kalitesi (yüzey pürüzlülüğü) ve toleransları rulmanlı yatakların ömrünü etkileyen önemli parametrelerdir.

4- Rulmanlı yatakların yuvarlanma elemanlarının ve iç bileziklerinin yüzeylerinde oluşan basınçların, dış bileziklerin yüzeylerinde oluşan basınçlardan daha yüksek olmaları nedeniyle, iç bilezikler ile bilya yüzeylerinde, dış bileziklerin yüzeylerine göre, daha fazla oranda aşınma ve yorulma meydana gelmektedir.

5- Yüksek hızlarda çalışan rulmanlar, genelde, kafesin parçalanması ile hasara uğrarlar. Bu nedenle, yüksek hızlarda çalışan rulmanlı yataklara ait kafeslerin, tasarım ve imalâtının daha dikkatli yapılması gerekmektedir.

6- Normal hız ve yüksek yükler altında çalışan rulmanlarda ise, en önemli hasar, genelde, iç bilezik ve/veya yuvarlanma elemanlarında meydana gelmektedir.

7- Yetersiz veya uygun olmayan yağlama şartlarında çalışan rulmanlarda, metal-metal sürtünmesi nedeniyle, rulman elemanlarında, beyaz dağlama bölgesi (BDB), açık beyaz dağlama bölgesi (ABDB) ve siyah dağlama bölgesi (SDB) şeklinde yapısal dönüşüm ürünleri oluşmaktadır. Açık beyaz dağlama bölgesi; Ac₁ sıcaklığının üzerine kadar ısınıp ani soğumayla oluşan martenzitik yapıyı, beyaz dağlama bölgesi; Ac₁ ile Ac_m çizgileri arasındaki bir sıcaklığa kadar ısınıp ani soğumayla oluşan martenzit yapısını ve siyah dağlama bölgesi ise; Ac₁ çizgisinin altındaki sıcaklıklara kadar ısınarak aşırı menevişlenmiş yapıyı göstermektedir.

8- Yağsız çalışan rulmanlı yataklarda, metal-metal sürtünmesi sonucunda elemanların yüzeylerinde beyaz veya açık beyaz dağlama bölgeleri oluşmayıp, sadece aşırı menevişlenmiş siyah dağlama bölgesi oluşmaktadır.

9- Rulmanlı yataklarda metal-metal sürtünmesi sonucunda meydana gelen yapısal değişimler, rulman elemanları arasındaki sertlik dengesini bozarak, elemanların abrazyon mekanizması ile aşınmalarına neden olur.

10- Rulman elemanlarının yüzeylerinin altında oluşan kayma gerilmelerinin en büyük değerinin, rulman çeliğinin elastik sınırını aşmaması durumunda, elemanların yüzeylerinde oluşan bazı hafif aşınma ve yorulma belirtilerinden başka, yüzey altında herhangi bir yapısal değişim veya yorulma meydana gelmemektedir.

11- Kayma gerilmelerinin en büyük değerinin, rulman çeliğinin elastiklik sınırını aşması durumunda, rulman elemanlarında bazı yapısal değişimler meydana gelmektedir. Söz konusu değişimlere ait dönüşüm ürünleri, kayma gerilmesinin en büyük değere ulaştığı bölgede yer almaktadır.

12- Rulman elemanlarında oluşan kayma gerilmelerinin en yüksek değere ulaştığı bölgede, gerilme etkisiyle meydana gelen yönlenmiş bant veya beyaz kelebek şeklindeki bazı yapısal değişimler, mikro çatlak oluşumuna yol açmaktadır.

13- Yüzey altı kayma gerilmesinin en büyük değerinin, rulman çeliğinin akma sınırını aşması durumunda ise, yüzey altında, bu gerilmenin meydana geldiği bölgede çatlaklar oluşmaktadır. Bu durum, rulman kataloglarında tavsiye edilen sınırların üzerindeki yükleme durumlarında ortaya çıkmaktadır.

14- Rulmanlı yataklar, ilgili kataloglarda belirtilen yük, hız, yağlama yöntemi ve yağ debisi şartlarında, kontrollü olarak çalıştırılarak, çalışma ömürleri, hesapla belirlenen nominal ömür değerinin yirmi katına kadar çıkartılabilir.

15- Avrupalı firmalar tarafından imal edilen rulmanlı yataklar, tasarım ve imalât tekniklerinin daha üstün olmaları nedeniyle, eski Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği'nde üretilen rulmanların çalışma ömürlerinin on katı kadar bir süre çalıştırılabilir. Bu durum, çalışma şartlarından başka, tasarım ve imalât yönteminin de rulmanlı yatakların çalışma ömürlerini etkileyen önemli faktörler olduklarını göstermektedir.

6. ÖNERİLER

1. Rulman malzemesinin, yüzey pürüzlülüğünün ve boyut toleranslarının, rulmanlı yatakların çalışma ömürlerine etkilerinin incelenmesini konu alacak bir çalışma sonucunda rulmanlı yatakların imalat teknolojisi ve uygulama alanları bakımından yararlı bilgiler elde edilebilir.

2. Kafes tasarımı, kafes malzemesi ve kafes imalatının, rulmanlı yatakların çalışma ömürlerine etkilerinin incelenmesi ile özellikle yüksek hızlarda çalışan rulmanlarda meydana gelen ani hasarların önlenmesi konusunda bilgiler elde edilebilir.

3. Çalışma sırasında rulmanlardan alınan yağ örnekleri, ferrografi ve/veya kimyasal analiz yöntemleriyle incelenerek rulmanlı yatakların aşınma ve yorulma davranışlarını izleme yöntemleri geliştirilebilir.

4. Çalışma sırasında, yük, milin ve kafesin dönme hızları, yağlama yağının debisi, yağın ve rulmanların çalışma sıcaklıkları gibi deney parametreleri bilgisayar yardımıyla sürekli izlenerek bu parametrelerin, rulmanların aşınma ve yorulma davranışlarına etkileri belirlenebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Wilcock, D.F. ve Booser, E.R.; Bearing Design and Application , First Edition, McGraw-Hill Book Co., New York, 1957
2. Savaşkan, T. ve Veinot, D.E.; On the Wear and Failure of High Speed Roller Bearings , Wear, 116 (1987) 361-380.
3. Savaşkan, T.; Yüksek Hız Rulmanlarındaki Aşınma ve Hasar Mekanizmalarının İncelenmesi , Mühendis ve Makina, 352 (1989) 5-17.
4. Savaşkan, T. ve Laufer, E.E.; Wear in a High Speed Roller Bearing , Metals Technology, 11 (1984) 530-534.
5. Savaşkan, T., Laufer, E.E. ve Veinot, D.E.; Wear of High Speed Roller Bearings , AGARD Conference Proceedings, No.394 (1986).
6. Albert, M.; Die Entwicklung des Wälzlagers , Steyr, Reinhold Schmidt-Verlag, Wien (1980) 1-9.
7. Albert, M., Köttriseh, H. ve Schildberger, A.; Rolling Bearing Defects , Steyr, Reinhold Schmidt-Verlag, Wien 3 (1982) 2-14.
8. Eschmann, P., Hasbargen, I. ve Weigand, K.; , Ball and Roller Bearings Theory, Design and Application , John Wiley and Sons Ltd., Norwich (1985).

9. Metals Handbook, Vol. 10, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 8th (1975) 416-436.
10. ORS-STEYR Rulman Kataloğu , 282 TR, Teknik El Kitabı, Ankara (1986).
11. Koch,H.; Moderne Wälzlager-vergrößertes Leistungsvolumen ausschöpfen , Konstruruktion, 42 (1990) 333-341.
12. SKF General Catalogue , 3200E, Elanders, Sweden (1989).
13. Savaşkan,T.; Yüksek Hızlı Rulmanlardaki Aşınma Mekanizmalarının Elektron Mikroskobu ile İncelenmesi , Metalurji Dergisi, Sayı 60 (1987) 42-47.
14. Tallian, T.E.; "Rolling Bearing Life Prediction. Corrections for Material and Operating Conditions Part I: General Model and Basic Life", Journal of Tribology, 110 (1988) 2-6.
15. Tallian, T.E.; Rolling Bearing Life Prediction. Corrections for Material and Operating Conditions Part II: The Correction Factors , Journal of Tribology, 110 (1988) 7-11.
16. Wuttkowski, J.G. ve Ioannides, E.; The New Life Theory and its Practical Consequences , Ball Bearing Journal Special'89 (1989) 6-11.
17. Koeber,H.J.; Design and Calculation of High Speed Engine Bearings , AGARD Conference Proceedings No:394 (1986).

18. Hoepflich, M.R.; Rolling Element Bearing Fatigue Damage Propagation, Journal of Tribology, 114 (1992) 328-333.
19. Metals Handbook, Desk Edition, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1985.
20. O'Connor, J.J. ve Boyd, J.; Standard Handbook of Lubrication Engineering, Mc Graw-Hill Book Company, New York (1968).
21. Holmberg, K.; The Mechanism of Lubrication in Low Speed Rolling Contacts, Journal of Tribology, 111 (1989) 703-707.
22. Voskamp, A.P.; Material Response to Rolling Contact Loading Journal of Tribology, 107 (1985) 359-366.
23. ASM Handbook, Volume 18, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International Handbook Chairman, USA (1992) 176-183.
24. Becker, P.C.; Microstructural Changes Around Non-Metallic Inclusions Caused by Rolling-Contact Fatigue of Ball-Bearing Steel, Metals Technology, (1981) 234-243.
25. Heinz, K.; Microstructure and Wear of Materials, Institute of Materials Technology, University of Siegen, Elsevier Science Publishers (1987) 80-115.
26. Åkesson, J. ve Lund, T.; SKF Rolling Bearing Steel-Properties and Processes, Ball Bearing Journal, 217 (1983) 32-44.
27. Kroon, A. ve Nützel, H.; Bearing Steel Development, Ball Bearing Journal Special '89 (1989) 40-47.

28. Chevalier, J.L., Zaretsky, E.V. ve Parker, R.J.; A New Criterion for Predicting Rolling-Element Fatigue Lives of Through-Hardened Steels , Journal of Lubrication Technology , (1973) 287-293.
29. Martin, J.A., Borgese, S.F. ve Eberhardt, A.D.; Microstructural Alternatives of Rolling-Bearing Steel Undergoing Cyclic Stressing , Journal of Basic Engineering, 59 (1966) 555-567.
30. Miller, B. ve Hester, D.; Designing Bearing Fatigue Life Tests for Improving the Use of Testing Resources , Journal of Testing and Evaluation, 17 (1989) 137-156.
31. Johnson, K.L.; The Strength of Surfaces in rolling Contact , Proceedings Institute Mechanical Engineering, 203 (1989) 151-163.
32. Johnson, K.L.; Contact Mechanics , University of Cambridge, London, 1895.
33. Çapan, L.; Plastisiteye Giriş , İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fak., İstanbul, 1986.
34. Çimenoğlu, H. ve Kayalı, E.S.; Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları , İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul, 1991.
35. Yatak Çelikleri, Bilyalı ve Silindirik Makaralı Rulmanlar için , Türk Standartları Enstitüsü, TS 5823, Nisan 1988.
36. Bosch, M.T.; (Çev. İleri, H.), Makina Elemanları Hesabı , İTÜ Kütüphanesi, İstanbul, 1972.

37. Timoshenko, S. ve Goodier, J. N. ; (Çev. Kayan, İ. ve Şuhubi,E.), Makina Elemanları Hesabı , İTÜ. Kütüphanesi, İstanbul, 1969.
38. Merwin, J.E. ve Johnson, K.L.; An Analysis of Plastic Deformation in Rolling Contact , Applied Mechanics Group, 177, 25 (1963) 676-690.
39. Broszeit, E. ve Zwirlein,O.; Internal Stresses and Their Influence on Material Stresses in Hertzian Contacts- Calculations with Different Stress Hypotheses , Journal of Tribology, 108 (1986) 387-393.
40. Boresi, A.P. ve Sidebottom, O.M.; Advanced Mechanics of Materials , John Wiley, London, 1985.
41. Tallian,T.E.; Rolling Contact Fatigue , Ball Bearing Journal, 217 (1983) 5-13.
42. Gross,R. ve Ioannides, E.; Performance Testing: Facilities and Opportunities , Ball Bearing Journal Special'89, (1989) 12-21.
43. Belek, H.T. ve Petersen, C.; Rulmanlı Yataklarda Arıza Belirleme ve Araştırma Yöntemleri , 5. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Eylül 1991, Bursa, 331-345.
44. Shishkin, S.V.; On Contact Stress Redistribution During Roller Bearing Run-in and Wear , Soviet Journal of Friction and Wear, 7 (1986) 72-81.
45. Voskamp, A.P., Österlund, R., Becker, P.C. ve Vingsbo,O.; Gradual Changes in Residual Stress and Microstructure During Contact Fatigue in Ball Bearings ,Metals Technology (1980) 14-21.

46. Österlund, R. ve Vingsbo, O., Phase Changes in Fatigued Ball Bearings , Metallurgical Transactions A, 11 (1980), 701-707.
47. Scott, D., Loy, B. ve Mills, G.H.; Metallurgical Aspects of Rolling Contact Fatigue , Proceedings Institute Mechanical Engineering 181 (1966-67), 94-103.
48. Scott, D., Seifert, W.W. ve Westcott, V.C.; The Particles of Wear , Scientific American, 5, 230 (1974) 88-97.
49. Swahn, H., Becker, P.C. ve Vingsbo, O.; Martensite Decay During Rolling Contact Fatigue in Ball Bearings , Metallurgical Transactions A, 7A (1976) 1099-1110.
50. Österlund, R., Vingsbo, O., Vincent, L. ve Guiraldenq, P., Butterflies in Fatigued Ball Bearings- Formation Mechanisms and Structure , Scandinavian Journal of Metallurgy, 11 (1982) 23-32.
51. Sayles, R.S. ve Ioannides, E.; Debris Damage in Rolling Bearings and Its Effects on Fatigue Life , Journal of Tribology, 110 (1988) 26-31.
52. Milliyet Gazetesi , Sayı 16583, 23 Ocak 1994.
53. Hürriyet Gazetesi , Sayı 16708, 19 Ekim 1994.
54. Yonar, İ.K.; Galvano Teknik , 27, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, 1979.
55. Ioannides, E. ve Jacobson, B.; Dirty Lubricants-Reduced Bearing Life , Ball Bearing Journal Special Issue-89, (1989) 22-27.

56. Olaru, D.N. ve Gafitanu, M.D.; Starvation in Ball Bearings Wear, 170 (1993) 219-234.
57. Simandiri, S.; Roller Bearing Fatigue Tester , Mechanical Engineering Transactions, 6 (1983) 1-7.
58. Leenders, P.; Endurance Testing in Practice , Ball Bearing Journal, 217 (1983) 24-31.
59. Kumar, A.M., Hahn, G.T. ve Rubin, C.A.; A Study of Crack Initiation Produced by Rolling Contact Fatigue , Metallurgical Transactions A, 24A (1993) 351-359.
60. Basu, S.K.; Design and Applications of Antifriction Bearings , Mechanical Engineering Bulletin, 17 (1986) 3-9.
61. Gupta, P.K., Dill, J.F.; Artuso, J.W. ve Forster, N.H., Ball Bearing Response to Cage Unbalance , Journal of Tribology, 108 (1986) 462-467.
62. Czyzewski, T. ve Titus, P.; Effects of End Relief for Arbitrarily Misaligned Self-Acting Gas Bearings , Journal of Tribology, 111 (1989) 553-560.
63. Gupta, P.K.; On the Geometrical Imperfections in Ball Bearings , Journal of Tribology, 110 (1988) 19-25.
64. Nowel, D. ve Hills, D.A.; Hertzian Contact of Ground Surfaces , Journal of Tribology, 111 (1989) 175-179.
65. Barquins, M.; Friction and Wear of Rubber-like Materials , Wear, 160 (1993) 1-11.
66. Marui, E., Hasegawa, N. ve Miyachi, R., Effects of Lubrication Upon Plastic-Metal Contact , Transactions of the ASME, 113 (1991) 192-197.

9. ÖZGEÇMİŞ

Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU; 1958 yılında Trabzon'da doğdu. 1975 yılında Trabzon Endüstri Meslek Lisesi'ni bitirdi. 1976 yılında İ.D.M.M.A Galatasaray Mühendislik Fakültesine girdi. 1981 yılında, bu okuldan Makina Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü Makina Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. 1982 yılında, K.T.Ü Makina Mühendisliği Bölümüne araştırma görevlisi olarak atandı. 1984 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayarak Makina Yüksek Mühendisi ünvanını aldı. Ağustos 1984-1986 yılları arasında askerlik görevini yaptı. 1986 bahar yarısında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında doktora çalışmasına başladı. Halen, aynı bölümde araştırma görevlisi olup, evli ve bir çocuk babasıdır.