

57871

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇİNKO-ALÜMİNYUM ESASLI ALAŞIMLARIN VE
BU ALAŞIMLARDAN İMAL EDİLEN KAYMALI
YATAKLARIN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Mak. Yük. Müh. Hamdullah ÇUVALCI

57871

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“ Doktor ”
Ünvanının Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 4 . 1 . 1996

Tezin Savunma Tarihi : 16 . 4 . 1996

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

T. Savaşkan

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI

S. Kayalı

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Aydın BIYIKLIOĞLU

A. Biyiklioğlu

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN

F. Arslan

Nisan 1996
TRABZON

ÖNSÖZ

Mühendislikte kullanılan makina elemanlarının güvenli çalışmalarını sağlamak ve kullanım ömürlerini arttırmak için bunların üstün özelliklere sahip malzemelerden imal edilmeleri gerekmektedir. Geleneksel malzemelerin yerine bunlardan daha üstün özelliklere sahip ve aynı zamanda ekonomik yeni malzemelerin geliştirilmesi çalışmaları, günümüzde yoğun bir şekilde sürdürülmektedir.

Bu çalışmada, üretilen çinko-alüminyum esaslı alaşımların ve bu alaşımlardan imal edilen kaymalı yatakların tribolojik özellikleri incelendi. Çalışma sonucunda, çinko-alüminyum esaslı alaşımların, geleneksel bir yatak malzemesi olan bronzlardan daha üstün tribolojik özelliklere sahip oldukları ve bu alaşımlardan imal edilen kaymalı yatakların da, bronz yataklardan daha üstün tribolojik özelliklere sahip oldukları belirlendi.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde kendisinden her türlü yardımı ve fedakarlığı gördüğüm sayın hocam Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca, olumlu fikirleri ile teze katkıda bulunan sayın hocalarıma, mesai arkadaşlarıma ve özellikle Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU'na teşekkür ederim. Çalışmayı mali yönden destekleyen KTÜ Araştırma Fonu yetkililerine ve Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu yetkililerine müteşekkirim. Ayrıca, katkılarından dolayı KTÜ Müh. Mim. Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü teknisyenlerine teşekkür ederim.

Hamdullah ÇUVALCI

Trabzon, Ocak 1996

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
TABLO LİSTESİ.....	VI
1.GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Tarihi Gelişimi	2
1.3.Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Faz Diyagramları.....	3
1.3.1. İkili Çinko- Alüminyum Faz Diyagramı.....	3
1.3.2. Üçlü Zn-Al-Cu Faz Diyagramı.....	4
1.3.3. Üçlü Zn-Al-Si Faz Diyagramı.....	6
1.4. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri.....	7
1.4.1. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri.....	7
1.4.2. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri.....	9
1.5. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri.....	13
1.5.1. Tribolojinin İlkeleri.....	13
1.5.2. Sürtünme ve aşınma.....	14
1.5.2.1. Adhesif Aşınma	16
1.5.2.2. Abrazif Aşınma	16
1.5.2..3. Yorulma Aşınması.....	16
1.5.2.4. Korozyon Aşınması	17

1.5.3. Kaymalı Yatakların Tribolojik Özellikleri	18
1.5.4. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların ve Bu Alaşımlardan İmal Edilen Yatakların Tribolojik Özellikleri.....	20
1.6. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	22
2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DENEY DÜZENEKLERİ.....	23
2.1. Alaşımların Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi.....	23
2.1.1. Alaşımların Dökümü	23
2.1.2. İçyapı İncelemeleri.....	24
2.1.3. Yoğunluk Ölçümleri.....	24
2.1.4. Mekanik Deneyler.....	24
2.1.4.1. Sertlik Deneyi.....	24
2.1.3.1. Çekme Deneyi.....	24
2.2. Deney Düzenekleri ve Triboloji Deneyleri.....	26
2.2.1. Disk-Çubuk Esaslı Aşınma Deney Düzenegi.....	26
2.2.1.1. Zn-Al Esaslı Alaşımların Sürtünme ve Aşınma Deneyleri.....	29
2.2.2. Kaymalı Yatakların Sürtünme Deney Düzenegi.....	32
2.2.2.1. Zn-Al Esaslı Alaşımlardan İmal Edilen Kaymalı Yatakların Sürtünme Deneyleri	34
2.2.3. İmal Edilen Kaymalı Yataklar İçin Aşınma Deney Düzenegi.....	38
2.2.3.1. Zn-Al Esaslı Alaşımlardan İmal Edilen Kaymalı Yatakların Aşınma Deneyleri.....	39
3. BULGULAR.....	43
3.1. Kimyasal Analiz Sonuçları.....	43
3.2. Alaşımların İçyapıları.....	43
3.3. Mekanik Deney Sonuçları.....	47
3.4. Alaşımların Sürtünme ve Aşınma Deneyi İle İlgili Sonuçlar.....	48
3.5. İmal Edilen Kaymalı Yatakların Sürtünme Deneyleri İle İlgili Sonuçlar.....	60
3.6. İmal Edilen Yatakların Aşınma Deneyleri İle İlgili Sonuçlar.....	66

4.İRDELEME.....	69
5.SONUÇLAR	76
6.ÖNERİLER.....	78
7.KAYNAKLAR.....	79
8. ÖZGEÇMİŞ.....	86



ÖZET

Değişik kimyasal bileşimlerde bir dizi üçlü çinko-alüminyum-bakır, dörtlü çinko-alüminyum-bakır-silisyum ve beşli çinko-alüminyum-bakır-silisyum-antimon alaşımı kokil döküm yöntemi ile üretildi. Alaşımların içyapı ve mekanik özellikleri incelendikten sonra, kimyasal bileşim oranının bu özelliklere etkileri belirlendi. Söz konusu alaşımların tribolojik özelliklerini incelemek için yeni bir deney düzeneği imal edildi ve bu düzenek yardımıyla söz konusu alaşımların sürtünme katsayıları ile aşınma miktarlarının basınç, hız ve yağ debisi gibi parametrelere göre değişimleri belirlendi. Ayrıca, alaşımlardan imal edilen kaymalı yatakların, sürtünme davranışları bir sürtünme deney makinasında, aşınma davranışları ise, yataklar için imal edilen yeni bir aşınma deney düzeneği yardımıyla incelenerek, söz konusu yatakların Stribeck diyagramları ve aşınma eğrileri elde edildi.

Bakırdan başka, metallere arası bileşik tozu katkılarının da çinko-alüminyum esaslı alaşımların mukavemet değerlerini arttırdığı görüldü. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların, genelde geleneksel bir yatak malzemesi olan CuSn12 bronzundan daha üstün tribolojik özelliklere sahip oldukları gözlemlendi. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan imal edilen kaymalı yatakların çoğunun da, bronz yataklardan daha üstün tribolojik özelliklere sahip oldukları görüldü. İncelenen alaşımların sürtünme katsayılarının; malzeme özelliklerinden başka, basınç, hız ve yağ debisi gibi çalışma koşullarına da bağlı olduğu belirlendi. Basınç, hız ve radyal boşluk gibi çalışma ve tasarım parametrelerinin, bu alaşımlardan imal edilen kaymalı yatakların Stribeck diyagramlarını önemli ölçüde etkiledikleri ve yatak basıncı ile radyal boşluk arttıkça, söz konusu yatakların sürtünme katsayılarının düştükleri gözlemlendi.

Yapılan çalışmalar sonucunda; düşük oranlarda silisyum içeren çinko-alüminyum-bakır alaşımlarından imal edilen kaymalı yatakların, pek çok uygulamada bronz yatakların yerine başarılı bir şekilde kullanılabilecekleri kanıtlandı.

Anahtar Kelimeler : Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlar, Kaymalı Yataklar, Triboloji, Sürtünme ve Aşınma, Stribeck Diyagramı.

AN INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ZINC-ALUMINUM BASED ALLOYS AND THE BEARINGS PRODUCED FROM THESE ALLOYS

SUMMARY

A series of ternary zinc-aluminum-copper, quaternary zinc-aluminum-copper-silicon and quinary zinc-aluminum-copper-silicon-antimony alloys were produced by permanent mould casting. Their microstructure and mechanical properties were investigated as a function of chemical composition. Friction and wear behaviour of the alloys were investigated using a new wear test apparatus which was built for this work. The coefficient of friction and wear rate of the alloys were determined as a function of operating conditions including pressure, speed and oil flow rate. Stribeck diagrams and wear curves of the bearings produced from these alloys were determined, using a bearing friction test machine and a bearing test rig.

It was observed that the additions of copper or intermetallic powder increased the mechanical properties of the zinc-aluminum based alloys. Zinc-aluminum based alloys were found to be more wear resistant than the conventional bearing bronze (CuSn12). In addition, the tribological properties of most of the the bearings produced from these alloys were also found to be superior to those of bronze bearing. The coefficients of friction of the alloys were found to be affected by operating conditions including pressure, speed and oil flow rate. The design parameters and the operating conditions including load, rotational speed and radial clearance were found to be effective on the Stribeck diagrams of the bearings, produced from these alloys and the coefficient of friction of the bearings found to be decreased with increasing bearing pressure and radial clearance.

As a result of this work, it was concluded that the bearings produced zinc-aluminum-copper based alloys containing small amount of silicon, can substituted for bronze bearings successfully in a wide range of applications.

Key Words : Zinc-aluminum Based Alloys, Plain Bearings, Tribology, Friction and Wear, Stribeck Curve.

Şekil 1. Çinko-alüminyum faz diyagramı.....	3
Şekil 2. Zn-Al-Cu alaşım sisteminin 350° C sıcaklıktaki izotermal kesiti.....	5
Şekil 3. Tipik bir aşınma eğrisi.....	15
Şekil 4. Stribeck eğrisi.....	19
Şekil 5. Çubuk-disk esaslı aşınma deney düzeneğinin şematik resmi.....	27
Şekil 6. Çubuk-disk esaslı aşınma deney düzeneğinin genel görünümü.....	28
Şekil 7. Aşınma deney düzeneğine ait disk ve numunenin yakından görünümü.....	28
Şekil 8. Aşınma deneylerinde kullanılan numunenin teknik resmi.....	31
Şekil 9. Sürtünme kuvveti ölçümünde kullanılan yük hücresi için kalibrasyon doğrusu.....	31
Şekil 10. Kaymalı yatak sürtünme deney düzeneğinin şematik resmi.....	33
Şekil 11. Kaymalı yatak sürtünme deney düzeneğinin genel görünümü.....	34
Şekil 12. Sürtünme deneylerine tabi tutulan kaymalı yatakların teknik resmi.....	36
Şekil 13. Sürtünme deneylerine tabi tutulan kaymalı yatakların genel görünümü.....	36
Şekil 14. Kaymalı yatak sürtünme deneylerinde kullanılan Shell Tellus 15 yağının viskozitesinin sıcaklığa göre değişimi.....	37
Şekil 15. Sürtünme momenti ölçüm levhası için kalibrasyon doğrusu.....	37
Şekil 16. Kaymalı yataklar için aşınma deney düzeneğinin mil eksenine paralel kesit resmi.....	40
Şekil 17. Kaymalı yataklar için aşınma deney düzeneğinin mil eksenine dik kesit resmi.....	41
Şekil 18. Kaymalı yataklara ait aşınma deney düzeneğinin genel görünümü.....	41
Şekil 19. Kaymalı yataklar için imal edilen aşınma deney düzeneğinin yakından görünüşü.....	42
Şekil 20. Aşınma deneyine tabi tutulan yatakların görünüşü.....	42
Şekil 21. ZnAl5Cu1 alaşımının içyapısı.....	44

Şekil 22. ZnAl ₂₇ Cu ₁ alaşımının içyapısı.....	45
Şekil 23. Şekil 22 'de gösterilen yapı içerisindeki intermetalik tozların yüksek büyültmedeki görünümü.....	45
Şekil 24. ZnAl ₆₀ Cu ₂ alaşımının içyapısı	46
Şekil 25. ZnAl ₂₇ Cu ₂ Si ₂ alaşımının içyapısı.....	46
Şekil 26. ZnAl ₁₅ Cu ₁ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	50
Şekil 27. ZnAl ₂₇ Cu ₁ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	51
Şekil 28. ZnAl ₂₇ Cu ₂ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	51
Şekil 29. ZnAl ₂₇ Cu ₂ Si ₁ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	52
Şekil 30. ZnAl ₂₇ Cu ₂ Si ₂ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	52
Şekil 31. ZnAl ₂₇ Cu ₃ Si ₃ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	53
Şekil 32. ZnAl ₂₇ Cu ₃ Si ₃ Sb ₃ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	53
Şekil 33. ZnAl ₂₇ Cu ₅ Si ₃ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	54
Şekil 34. ZnAl ₄₀ Cu ₂ Si ₁ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	54
Şekil 35. ZnAl ₄₀ Cu ₄ Si ₂ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	55
Şekil 36. ZnAl ₆₀ Cu ₂ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	55

Şekil 37. CuSn12 bronzunun alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	56
Şekil 38. ZnAl27Cu2Si2 alaşımının sürtünme katsayısının kayma hızına göre değişimi.....	56
Şekil 39. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile CuSn12 bronzunun sürtünme katsayılarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	57
Şekil 40. ZnAl27Cu2 ve ZnAl27Cu2Si2 alaşımlarının sürtünme katsayılarının yağ debisine göre değişimi.....	57
Şekil 41. İncelenen alaşımların aşınma miktarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	58
Şekil 42. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ve CuSn12 bronzunun aşınma miktarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	58
Şekil 43. ZnAl40Cu2Si1 alaşımının aşınma yüzeyinin elektron mikroskopunda elde edilen SEM görüntüsü.....	59
Şekil 44. CuSn12 bronzunun aşınma yüzeyinin elektron mikroskopunda elde edilen SEM görüntüsü.....	59
Şekil 45. ZnAl27Cu2 alaşımından imal edilen yatağın değişik basınçlardaki sürtünme katsayılarının çevre hızına göre değişimini gösteren eğriler.....	61
Şekil 46. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile CuSn12 bronzundan imal edilen yataklardan 0.1 Mpa'lık basınç altında elde edilen Stribeck eğrileri.....	62
Şekil 47. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile CuSn12 bronzundan imal edilen yataklardan 0.3 Mpa'lık basınç altında elde edilen Stribeck eğrileri.....	62
Şekil 48. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile CuSn12 bronzundan imal edilen yataklardan 0.7 Mpa'lık basınç altında elde edilen Stribeck eğrileri.....	63

Şekil 49. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile CuSn12 bronzundan imal edilen yataklardan 1.1 Mpa'lık basınç altında elde edilen Stribeck eğrileri.....	63
Şekil 50. ZnAl27Cu2Si2 alaşımından imal edilen yataktan sabit basınç (0.1 MPa) ve değişik radyal boşluk değerlerinde elde edilen Stribeck eğrileri.....	64
Şekil 51. ZnAl27Cu2Si2 alaşımından imal edilen yataktan sabit basınç (0.3 MPa) ve değişik radyal boşluk değerlerinde elde edilen Stribeck eğrileri.....	64
Şekil 52. ZnAl27Cu2Si2 alaşımından imal edilen yataktan sabit basınç (0.7 MPa) ve değişik radyal boşluk değerlerinde elde edilen Stribeck eğrileri.....	65
Şekil 53. ZnAl27Cu2Si2 alaşımından imal edilen yataktan sabit basınç (1.1 MPa) ve değişik radyal boşluk değerlerinde elde edilen Stribeck eğrileri.....	65
Şekil 54. ZnAl27Cu2Si1 alaşımından imal edilen yatağın sıcaklığının çalışma zamanına göre değişimini gösteren eğri.....	67
Şekil 55. İncelenen alaşımlardan ve bronzdan imal edilen kaymalı yataklarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	67
Şekil 56. ZnAl40Cu2Si1 alaşımından imal edilen yatağın aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	68
Şekil 57. CuSn12 bronzundan imal edilen yatağın aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	68

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1. Çinko-alüminyum faz diyagramındaki önemli dönüşümler.....	4
Tablo 2. Düşük oranlarda bakır içeren Zn-Al-Cu sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri.....	6
Tablo 3. Ticari Zn-Al alaşımları ve bazı döküm alaşımlarının fiziksel özellikleri.....	8
Tablo 4. Ticari Zn-Al alaşımları ile bazı döküm alaşımlarının mekanik özellikleri.....	10
Tablo 5. Ticari ZA alaşımlarında dendrit kol aralığı ile çekme mukavemeti arasındaki bağıntılar.....	11
Tablo 6. Bazı ticari çinko-alüminyum alaşımlarının yorulma özellikleri.....	13
Tablo 7. İncelenen alaşımların kimyasal bileşimleri.....	43
Tablo 8. İncelenen alaşımların bazı mekanik ve fiziksel özellikleri.....	47

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Metal piyasasında, üretici firmalar arasında ortaya çıkan kuvvetli rekabet, bu firmaları geleneksel malzemelerden daha üstün özelliklere sahip ve ekonomik malzemeler geliştirmeye yöneltmiştir. Araştırmacılar, özellikle savunma havacılık, uzay, elektronik ve tıp alanlarındaki hızlı gelişmelere paralel olarak ortaya çıkan malzeme ihtiyacını karşılamak amacıyla yoğun çalışmalar yürütmektedirler [1]. Günümüzde kaymalı yatak uygulamalarında yaygın olarak kullanılan beyaz metal (babbit), bronz ve dökme demir gibi malzemelerin yerini almak üzere, üstün özelliklere sahip yeni yatak alaşımlarının geliştirilmesine ilişkin çalışmalar halen sürdürülmektedir. Son yıllarda, çinko-alüminyum esaslı alaşımların geliştirilmesi ve uygulama alanlarının yaygınlaştırılması amacıyla yoğun araştırma çalışmaları yürütülmektedir. Bu alaşımlara gösterilen ilgi, bunların ekonomik avantajlarının yanında, üstün mekanik ve tribolojik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. 1986 yılında, yalnız Kuzey Amerika'daki çinko-alüminyum esaslı alaşımların pazar payının, toplam döküm malzemesi hacminin % 1,3'ünü teşkil eden 180.000 ton olması, bu alaşımların oldukça geniş uygulama alanlarında kullanıldığını göstermektedir [1].

Yapılan araştırmalar, çinko-alüminyum esaslı yatak alaşımlarının, geleneksel yatak malzemelerine göre pekçok üstünlüklere sahip olduklarını göstermiştir [2-5]. Bu üstünlüklerin başında; alaşımların aşınma dayanımlarının ve özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması, alaşım elementlerinin kolaylıkla ve ucuza temin edilebilmesi, değişik ısıl işlemlere elverişli olmaları gelmektedir. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar, pek çok uygulamada beyaz metal, bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerini almaktadır [6-8]. Söz konusu alaşımlardan imal edilen yataklar, kablolu krenlerde, değişik iş makinelerinde, taş kırma makinelerinde ve hidrolik sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.2. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Tarihsel Gelişimi

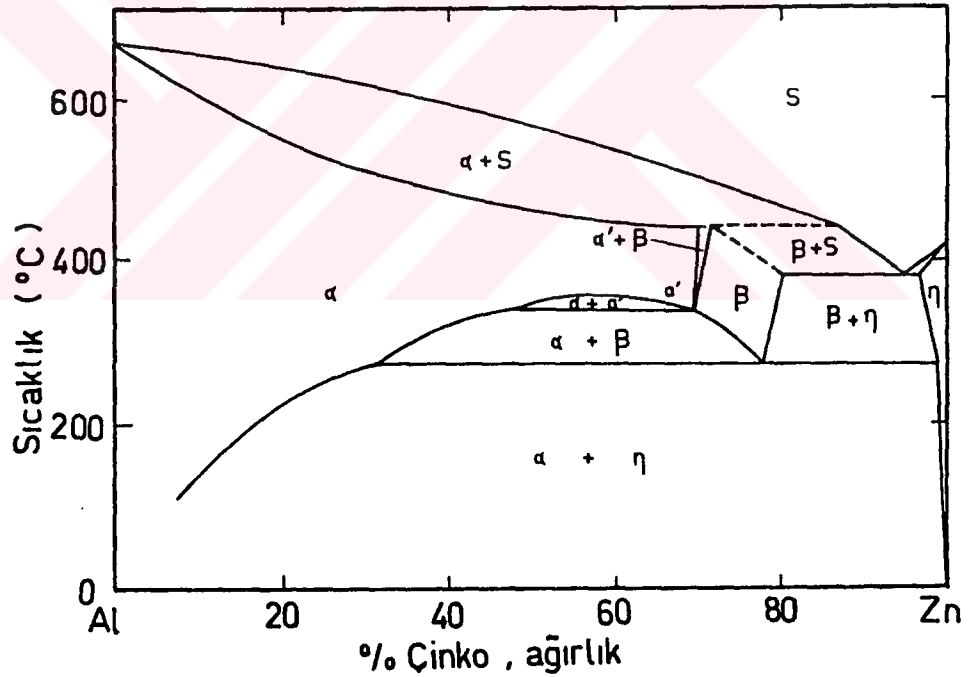
Yüksek oranlarda alüminyum içeren çinko alaşımları, özellikle İkinci Dünya Savaşı sırasında, Almanya'da bakır ve kalayın son derece az bulunması ve çok pahalı olmaları nedenleriyle, bronzun yerine kullanmak amacıyla geliştirildi [9]. Alman araştırmacılar [9], bu alaşımların teknik uygulama imkânları ve özellikleri üzerinde yoğun araştırmalar yaptılar. Bu çalışmalar sayesinde, Almanya'da, 1939-1943 yılları arasında çinko alaşımlarının kullanımı 7 kat artarak, yıllık 7.800 tondan 49.000 tona yükseldi [10]. Bu yıllarda, % 10-30 oranında alüminyum içeren bir grup çinko-alüminyum alaşımı, bronzların yerine kaymalı yatak malzemesi olarak kullanıldı ve bu alaşımlar piyasada beyaz bronz olarak adlandırıldı [11].

Savaştan sonra, pekçok kaymalı yatak imalâtında tekrar geleneksel yatak malzemeleri kullanılmaya başlandı [12]. Ancak, az sayıda da olsa bazı firmalar yüksek oranda alüminyum içeren çinko alaşımlarını üretme ve geliştirme çalışmalarını sürdürdüler. 1960'lı yılların sonunda, Uluslararası Kurşun Çinko Araştırma Kurumu (ILZRO) tarafından desteklenen bir araştırma programı sonucunda, % 12 alüminyum içeren yeni bir çinko alaşımı, basınçsız döküm yöntemiyle üretilerek geliştirildi. Bu alaşım, önce ILZRO-12 daha sonra da ZA-12 olarak adlandırıldı [13]. Bunu izleyen yıllarda, Noranda araştırma merkezi ve St. Joe Minerals Corporation firmaları tarafından yürütülen araştırma çalışmaları sonucunda, ticari adları sırası ile ZA-8 ve ZA-27 olan çinko-alüminyum alaşımları geliştirildi [14]. Aynı yıllarda, Voest Alpine AG of Linz adlı Avusturya firması tarafından Alzen olarak adlandırılan Zn-Al-Cu alaşımları geliştirildi [15]. Bunlardan, Alzen-305 (ZnAl30Cu5) olarak bilinen ticari alaşım, bugün İngiltere'de Fry's Metals firması tarafından üretilmekte ve yatak imalâtında kullanılmaktadır [16]. Günümüzde; Alzen, Kayem ve Main Metall adları altında üretilen çinko-alüminyum esaslı alaşımlar Avrupa 'da yaygın olarak kullanılmaktadır [17,18].

1.3. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Faz Diyagramları

1.3.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı

Çinko-alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklıkları ve katılaşma aralıkları içerdikleri alüminyum oranına bağlıdır. Çinko-alüminyum faz diyagramı, Şekil 1'de verilmiştir. Bu diyagramda, alüminyumca zengin faz bölgesi α , çinkoca zengin faz bölgesi ise η olarak adlandırılmaktadır [19]. Çinko, alüminyum içerisinde % 80 Zn oranına kadar çözünerek α , α' ve β olarak adlandırılan, yüzey merkezli kübik yapılı faz bölgeleri oluşturmaktadır [20].



Şekil 1. Çinko-alüminyum faz diyagramı

Söz konusu faz diyagramında, 382 °C sıcaklıkta ve % 95 Zn bileşim oranında ötektik nokta yer almaktadır. Ötektik dönüşüm sonucunda, yüzey merkezli kübik yapı α ile sıkı düzenli hegzagonal yapı η fazlarını içeren bir yapı oluşmaktadır. Alüminyumun η fazı içerisindeki katı çözünürlüğü, ötektik sıcaklık çizgisinde % 5 iken, bu değer sıcaklık düştükçe azalmakta ve 20°C sıcaklıkta % 0.05 Al oranına kadar düşmektedir. β fazı, 275°C den daha düşük sıcaklıklarda, alüminyumca zengin α ile çinkoca zengin η fazlarına dönüşmektedir [21]. Çinko-alüminyum faz diyagramında ortaya çıkan önemli faz dönüşümleri Tablo 1’de verilmiştir.

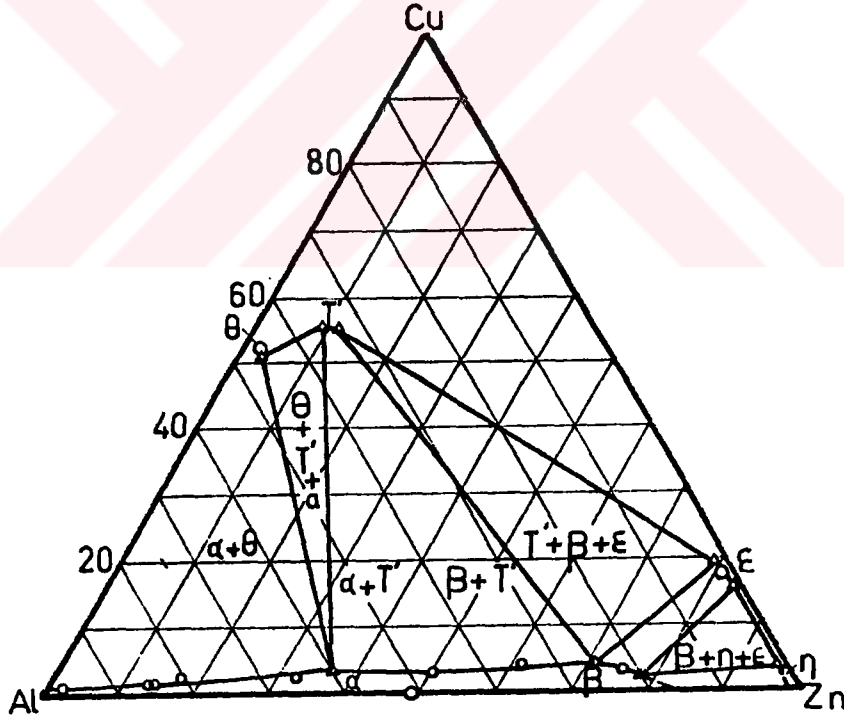
Tablo 1. Çinko-alüminyum faz diyagramındaki önemli dönüşümler [21]

Dönüşüm	Çinko oranı (%)	Sıcaklık (°C)
Ötektik $S \rightleftharpoons \beta + \eta$	95	382
Ötektoid $\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	78	276
$\alpha / \alpha' \rightleftharpoons \alpha + \beta$	52	340
Peritektik $\alpha + S \rightleftharpoons \beta$	71.6	443

1.3.2. Üçlü Zn-Al-Cu Faz Diyagramı

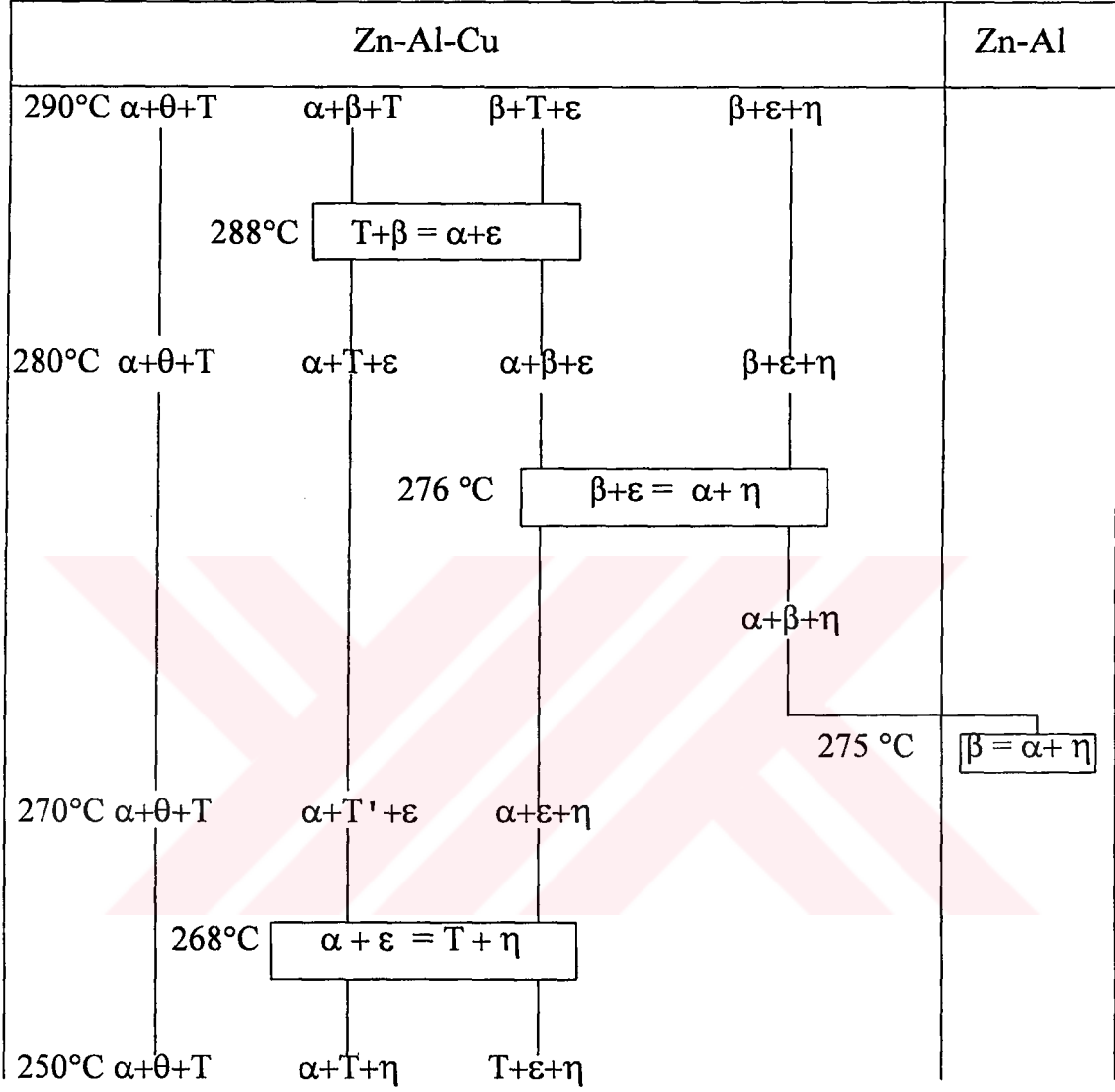
Çinko-alüminyum-bakır alaşımlarında; θ (CuAl₂), ε (CuZn₄) ve T'(Al₄Cu₃Zn) gibi metallerearası (intermetalik) bileşiklerin oluşması nedeniyle, faz dönüşümleri ikili çinko-alüminyum alaşım sistemine göre çok daha karmaşık olup, bu dönüşümlerin tamamlanması uzun süre almaktadır [22]. Faz dönüşümlerini

büyük ölçüde yavaşlatan bakır katkısı, aynı zamanda kalıcı bir hacımsal büyüme yol açmaktadır [23]. Zn-Al-Cu alaşımlarında görülen bu hacımsal büyümenin, katılaşıma sırasında oluşan kararsız dengeli (metastabil) fazların kararlı fazlara dönüşmesi sonucunda meydana geldiği belirlenmiştir [24]. Dörtlü faz dönüşümü olarak bilinen $\alpha+\epsilon \rightleftharpoons T'+\eta$ reaksiyonu sonucunda % 4,5 oranında kalıcı bir hacımsal büyümenin meydana geldiği belirlenmiş bulunmaktadır [25]. Üçlü alaşım sistemine ait faz diyagramı henüz tam olarak belirlenememiş olmakla birlikte, sistemin düşük oranlarda bakır içeren bölümü Murphy [26] tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Murphy tarafından belirlenen Zn-Al-Cu faz diyagramının, 350 °C sıcaklıktaki izotermal kesiti Şekil 2' de, bu sistemde meydana gelen katı hal dönüşümleri de Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Zn-Al-Cu alaşım sisteminin 350 °C sıcaklıktaki izotermal kesiti [26].

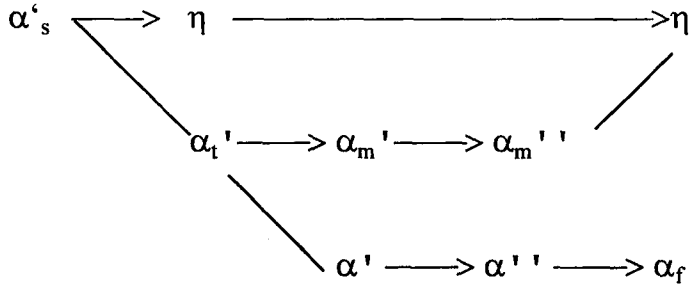
Tablo 2. Düşük oranlarda bakır içeren Zn-Al-Cu sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri [26].



1.3.3. Üçlü Zn-Al-Si Faz Diyagramı

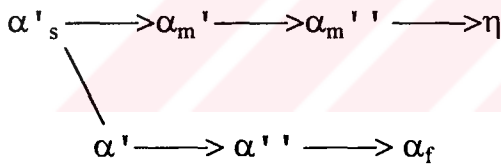
Çinko-alüminyum-silisyum faz diyagramı henüz tam olarak belirlenmemiş olmakla birlikte, bu sistemdeki faz dönüşümleri değişik araştırmacılar tarafından incelenmiştir [27-29]. Bu çalışmalar sonucunda, silisyumun, çinko-alüminyum alaşımları içerisindeki katı çözünürlüğünün çok az olması nedeniyle, faz dönüşümlerini pek etkilemediği görülmüştür. Çözündürme işlemi sonrası su

verilen $ZnAl_{35}Si_5$ alaşımında , yaşlandırma sırasında aşağıda verilen faz dönüşümlerinin ortaya çıktığı belirlenmiştir ;



Söz konusu işlem sırasında, ilk önce Guiner-Preston bölgeleri oluşmakta ve bunları çinkoca zengin α'_t ve α' geçiş fazları izlemekte ve dönüşümün sonucunda çinkoca zengin η fazı ile alüminyumca zengin α fazını içeren yapı elde edilmektedir.

Aynı işleme tabi tutulan üçlü $ZnAl_{65}Si_5$ alaşımında ise, aşağıda verilen faz dönüşümlerinin ortaya çıktığı belirlenmiştir ;



Su verme işlemi ile her iki alaşımda elde edilen α'_s aşırı doymuş katı çözeltilisi yaşlandırma sonucunda, alüminyumca zengin α ve çinkoca zengin η fazlarına dönüşmektedir. Ancak, yüksek oranda alüminyum içeren $ZnAl_{65}Si_5$ alaşımı, daha düşük oranda alüminyum içeren $ZnAl_{35}Si_5$ alaşımından daha yavaş dönüşüme uğramaktadır [28].

1.4. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Özellikleri

1.4.1. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri

Çinko-alüminyum alaşımlarının yoğunlukları, bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin yoğunluklarından daha düşük olup, özgül

mukavemetleri ise bu malzemelerinkinden daha yüksektir. Yoğunluklarının düşük olması nedeniyle, parça ağırlığının önemli olduğu uygulamalarda bu alaşımlar tercih edilmektedir. Alüminyum oranı arttıkça, söz konusu alaşımların yoğunlukları azalmakta ve dolayısıyla birim maliyeti düşmektedir.

Tablo 3. Ticari Zn-Al alaşımları ve bazı döküm alaşımlarının fiziksel özellikleri [30]

Alaşım	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime sıcaklık aralığı (°C)	Isıl genleşme katsayısı (m/mK)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Elektrik iletkenliği % IACS
ZA-8 Dökülmüş durumda	6.3	375-404	23.2	115	27.7
ZA-12 Dökülmüş durumda	6.03	377-432	24.1	116	28.3
ZA-27 Dökülmüş durumda	5.0	378-484	----	126	29.7
Alüminyum alaşımı 356-T6	2.69	555-615	21.5	151	39
Alüminyum alaşımı No 380	2.74	540-595	21.8	96.2	27
Basınçlı dökümle üretilen çinko alaşımı No 5	6.7	380-386	27.4	109	26
SAE-40 pirinci 85-5-5-5	8.83	855-1010	18	72	15
SAE-660 bronz 83-7-7-3	8.93	855-975	18	59	12
Kır dökme demir C30	6.94	1232	11.9	----	6

Tablo 3’de bazı ticari çinko-alüminyum alaşımları ile birlikte, yaygın olarak kullanılan döküm alaşımlarının bazı fiziksel özellikleri verilmiştir. Çinko-

alüminyum alaşımlarının ısı iletkenlik , ısı genleşme ve elektriksel iletkenlik katsayıları, alüminyum alaşımları dışındaki geleneksel döküm alaşımlarına göre daha yüksek olup, bu katsayılar artan alüminyum oranı ile doğrusal olarak artmaktadır [30] .

Üçlü çinko-alüminyum-bakır alaşımlarında, katılma sırasında oluşan metastabil fazların, yaşlandırma sırasında kararlı fazlara dönüşmesi sonucunda hacımsal büyüme meydana gelmektedir [31] . Bakır oranı arttıkça, Zn-Al-Cu alaşımlarındaki hacımsal büyüme oranının da arttığı belirlenmiştir [32] .

1.4.2. Çinko–Alüminyum Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

Çinko-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin birçok uygulama için yetersiz olduğu bilinmektedir [33].Yapılan araştırmalar, bakır, magnezyum ve silisyum gibi element katkılarının, ikili çinko-alüminyum alaşımlarının mukavemet değerlerini arttırdığını göstermiştir [34] . Özellikle bakır katkısı , ikili alaşımların mukavemet, korozyon ve aşınma dayanımlarını büyük ölçüde arttırmaktadır [35] . Ancak, % 2 oranının üzerindeki bakır katkılarının alaşımların mukavemet değerlerini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir [36] . Ayrıca, bakır katkısı arttıkça, üçlü alaşımlarda ortaya çıkan hacımsal büyüme oranının da arttığı bilinmektedir [37] . Bu nedenlerle, üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarındaki bakır oranının % 2 civarında tutulmasının; hem boyutsal kararlılık, hem de mekanik özellikler açısından uygun olacağı ileri sürülmektedir [38] .

Çinko-alüminyum alaşımları ile birlikte bazı döküm alaşımlarının mekanik özellikleri Tablo 4'de verilmiştir . Bu tablodan, çinko-alüminyum alaşımlarının, genelde geleneksel döküm alaşımlarından daha üstün mukavemet değerlerine sahip oldukları görülmektedir.

Tablo 4. Ticari Zn-Al alaşımları ile bazı döküm alaşımlarının mekanik özellikleri [40].

Alaşım	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı % 0.2 (MPa)	Young modülü (GPa)	Kopma uzaması (%)	Brinell sertlik değeri (BSD)	Darbe dayanımı (J)
ZA-8 Dökülmüş durumda	221-255	200-214	85.5	1-2	85-90	13-18*
ZA-12 Dökülmüş durumda	310-345	250-275	83	1.5-2.5	85-95	17-22*
ZA-27 Dökülmüş durumda	428-455	358-393	----	2-3	110-117	25-40*
Alüminyum alaşımı 356-T6	262	186	72.4	5.0	80	---
Alüminyum alaşımı No 380	324	158	71	3.5	80-85	---
Basınçlı dökümle üretilen çinko alaşımı No 5	331	269	---	7	91	---
SAE-40 pirinci 85-5-5-5	255	117	83	30	60	15**
SAE-660 bronz 83-7-7-3	240	124	100	20	65	8***
Kır dökme demir C30	214	124	90-113	----	210	---

* Çentiksiz numune

** Çentikli Charpy numunesi

*** Izod deney numunesi

Çinko-alüminyum alaşımlarında içyapı-mekanik özellik ilişkileri, dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumlarda pekçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Skenazi

ve arkadaşları [39], dökülmüş durumdaki ZA adlı ticari alaşımların içyapılarındaki dendrit kol aralığı azaldıkça bu alaşımların çekme mukavemetinin arttığını gözlediler. Ayrıca, bu araştırmacılar söz konusu alaşımlarda dendrit kol aralığı ile (d) çekme mukavemeti (R_m) arasında Tablo 5 'de verilen bağıntıların geçerli olduğunu belirlediler. Bu bağıntılarda R_m 'nin birimi MPa, d'nin birimi ise μm olarak alınmıştır.

Tablo 5. Ticari ZA alaşımlarında dendrit kol aralığı ile çekme mukavemeti arasındaki bağıntılar [39].

Alaşım no	Bağıntı
ZA-8	$R_m=49+ 857 d^{-1/2}$
ZA-12	$R_m=240+400 d^{-1/2}$
ZA-27	$R_m=370+200 d^{-1/2}$

Çinko-alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklıklarının düşük ve katılaşma aralıklarının oldukça geniş olması, içyapıda gözeneklerin (mikroboşluk) oluşmasına neden olmaktadır [41]. Katılaşma sırasında, içyapıda oluşan gözeneklerin alaşımların mukavemet değerlerini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Bu nedenle, dökümden önce, katılaşmayı etkileyen bütün faktörlerin (döküm sıcaklığı, kokil sıcaklığı, soğuma hızı, kokil biçimi ve boyutları , besleyiciler, çıkıcılar ve yolluklandırma sistemi) kontrol edilerek, gözenek oluşumunun önlenmesi ya da en aza indirilmesi gerekmektedir [42].

Çinko-alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklıklarının düşük olması, döküm maliyeti açısından önemli bir avantaj olmakla birlikte, bu durum sözü edilen alaşımları sıcaklığa duyarlı hale getirmektedir. Sıcaklık arttıkça, söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemet değerleri önemli ölçüde düşerken, süneklik değerleri artmaktadır [42]. Bu nedenle , ticari ZA-27 alaşımının 120°C'lik

sıcaklığın, ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarının ise 90 °C'nin altındaki sıcaklıklarda kullanılması tavsiye edilmektedir [43].

İkili çinko-alüminyum ve üçlü çinko-alüminyum-bakır alaşımlarının sürünme davranışı Savaşkan ve Murphy [44,45] tarafından incelenmiş ve bakır katkılarının çinko-alüminyum alaşımlarının sürünme direncini büyük ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca, dökülmüş durumdaki alaşımların, yaşlandırılmış alaşımlardan daha yüksek sürünme dayanımı sergiledikleri görülmüştür. Başka bir çalışmada ise, çinko-alüminyum esaslı ticari ZA-8 alaşımının ZA-27 alaşımından daha üstün sürünme davranışı sergilediği belirlenmiştir [46].

Çinko-alüminyum alaşımlarının darbe dayanımının, genelde artan alüminyum oranı ile arttığı gözlenmiştir [47]. Nitekim, ticari ZA alaşımları içerisinde en yüksek darbe dayanımı, alüminyum oranı en yüksek olan ZA-27 alaşımından elde edilmiştir. Çinko-alüminyum alaşımlarının çentik duyarlılığının oldukça yüksek olduğu yapılan incelemeler sonucunda anlaşılmıştır [48].

Literatürde, çinko-alüminyum alaşımlarının yorulma özellikleri hakkında yeterli ve ayrıntılı bilgiye rastlanılmamıştır. Bununla birlikte, yapılan bir çalışmada değişik döküm şartlarında üretilen bazı ticari çinko-alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımları belirlenmiş olup bu değerler Tablo 6'da verilmiştir [40]. Bu tablodaki yorulma dayanımı değerleri oda sıcaklığında ölçülen değerler olup, 5×10^8 çevrim sayısına karşılık gelmektedir. Söz konusu tablodaki değerler karşılaştırıldığında; basınçlı döküm yöntemiyle üretilen ZA-8 alaşımının yorulma dayanımının, kokil döküm yöntemiyle üretilen ZA-8 alaşımının yorulma dayanımının hemen hemen iki katına eşit olduğu ve kum dökümü yöntemiyle üretilen ZA-27 alaşımının, basınçlı döküm yöntemiyle üretilen ZA-27 alaşımından daha üstün yorulma dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Başka bir çalışmada, çinko-alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerleri arttıkça, yorulma dayanımlarının da arttığı belirlenmiştir [49].

Tablo 6. Bazı ticari çinko-alüminyum alaşımlarının yorulma özellikleri [40].

Alaşım	Döküm yöntemi	Yorulma dayanımı (MPa)
ZA-8	Kum döküm	-
	Kokil döküm	52
	Basınçlı döküm	103
ZA-12	Kum döküm	103
	Kokil döküm	-
	Basınçlı döküm	-
ZA-27	Kum döküm	172
	Kokil döküm	-
	Basınçlı döküm	145

1.5. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri

1.5.1. Tribolojinin İlkeleri

Triboloji, genel anlamıyla, temas halinde bulunan ve genelde hareket eden yüzeyler arasındaki etkileşimi inceleyen bilim ve teknoloji dalı olarak tanımlanmaktadır [51]. Sürtünme, aşınma ve yağlama gibi konuları içeren triboloji, makina ve malzeme mühendisliği gibi bilim dallarını yakından ilgilendirmektedir. Tribolojik çalışmaların amacı, temas eden hareketli yüzeyler arasındaki sürtünme ve aşınmayı en aza indirerek, malzeme ve enerji kayıplarını düşürmek ve aynı zamanda, sistemin verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktır [51].

Gelişmiş ülkelerde, triboloji bilimine büyük önem verilmekte ve bu konudaki çalışmalara geniş mali kaynaklar ayrılmaktadır. 1977 yılında yapılan istatistiksel bir çalışma sonucunda, triboloji ilkelerinin geliştirilmesi ve yaşama geçirilmesi ile, yalnız Amerika Birleşik Devletlerinde (A.B.D) toplam enerji tüketiminin % 11'i olan 16 milyar dolarlık bir tasarruf sağlanabileceği belirlenmiştir [52]. Böyle bir program için gerekli olan araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin toplam maliyetinin

ise, yalnız 24 milyon dolar düzeyinde olduğu hesaplanmıştır. Bu parasal rakamlar, triboloji bilimi ile ilgili araştırma ve geliştirme çalışmalarının, ülkelerin ekonomilerine yapacağı katkıları göstermesi bakımından dikkate değer niteliktedir.

1.5.2. Sürtünme ve Aşınma

Birbirine temas eden iki cisimden biri diğeri üzerinde kaydırıldığında, temas yüzeylerine teğet ve harekete ters yönde sürtünme kuvveti meydana gelir. Kaymayı başlatan kuvvet (F_s) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (F_n) arasında; $F_s = \mu_s F_n$ bağıntısı mevcuttur. Burada; μ_s statik sürtünme katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Kayma başladıktan sonra, sürtünme kuvvetinde bir azalma meydana gelir ve hareket sırasında sürtünme kuvveti; $F_k = \mu_k F_n$ bağıntısı ile hesaplanır. Burada μ_k ; kinetik veya dinamik sürtünme katsayısı olup, bu katsayı genelde statik sürtünme katsayısından daha düşüktür [53]. Kuru sürtünme durumdaki dinamik sürtünme katsayısı, sürtünen malzeme çiftinin kayma mukavemeti ve akma mukavemeti gibi mukavemet değerlerine bağlıdır [54].

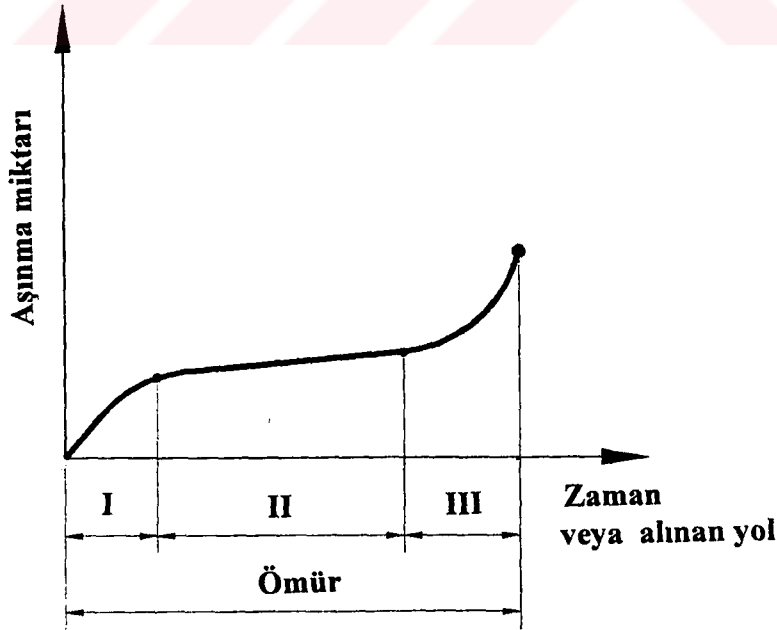
Tornalama, taşlama ve lepleme gibi geleneksel yüzey hazırlama yöntemleriyle hiçbir zaman tam anlamıyla pürüzsüz ve düzgün yüzey elde edilmesi mümkün değildir ve hemen hemen bütün yüzeyler, mikroskobik ölçekte pürüzlüdürler [55]. Metaller parlatıldıklarında bile yüzey pürüzlerinin tamamen giderilmesi mümkün değildir. Metal yüzeyleri, atmosferik ortamda tam olarak temiz ve kuru olmayıp, genellikle oksit, yağ, su buharı gibi tabakalar içerirler [56]. Adsorbsiyon ile oluşan ve ancak elektron mikroskobu ile varlığı kanıtlanabilen yüzey tabakaları, metal yüzeyine kuvvetli bağlandıklarından, ancak çok etkin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle temizlenebilirler. Söz konusu yüzey tabakalarının, çalışma sırasında malzemelerin sürtünme davranışını etkilediği bilinmektedir [57].

Aşınma, tribolojik etkiler nedeniyle katı yüzeylerde sürekli olarak meydana gelen istenmeyen malzeme kaybı olarak tarif edilmektedir [58]. Aşınma temas eden yüzeylerin ilk şeklinin değişmesine ve yüzeyler arasındaki boşluğun

artmasına neden olduğundan, kullanılan araç, gereç ve makinaların çalışma ömrünü olumsuz yönde etkiler.

Malzemelerin aşınma davranışları, aşınma miktarının alınan yola ya da çalışma zamanına göre değişimini gösteren eğriler yardımıyla gösterilebilir. Malzemelerin aşınma miktarının alınan yola veya çalışma zamanına göre değişimini gösteren tipik bir aşınma eğrisi Şekil 3'de verilmiştir. Söz konusu eğri, üç farklı aşınma safhasını göstermektedir. Rodaj olarak adlandırılan ilk safha hareketli parçaların birbirine alıştırılması dönemi olup, bu dönemde aşınma hızı çok yüksektir. Kararlı aşınma devresi olarak adlandırılan ikinci safhada meydana gelen aşınma hızı, alıştırma dönemindeki aşınma hızına göre daha düşüktür. Ancak, bu hız parçanın çalışma ömrünü etkileyen en önemli parametredir. Üçüncü safhada, aşınma hızı aşırı ölçüde artarak parçanın hasara uğramasına neden olur. Bu nedenle, üçüncü aşınma devresine ulaşmadan önce aşınan parça ya değiştirilmeli ya da bakıma alınmalıdır.

Aşınma mekanizmaları esas itibariyle, adhesif aşınma, abrazyon aşınması, yorulma aşınması ve korozyon aşınması olmak üzere dört grupta toplanabilir [59].



Şekil 3. Tipik bir aşınma eğrisi [55]

1.5.2.1 Adhesif Aşınma

Teknik bakımdan en iyi şekilde işlenmiş olsalar bile, yüzeyler hiç bir zaman tam anlamıyla pürüzsüz değildir ve çalışmanın başlangıcında, yüzeyler arasındaki temas yüzey pürüzlerinin tepe noktalarında meydana gelmektedir. Bu noktalardaki basınç değerinin, malzemenin akma sınırını aşması durumunda, pürüzlerde önce plastik şekil değişimi meydana gelmekte ve daha sonra kaynak bağları oluşmaktadır [60]. Birbiri üzerinde kayan yüzeylere ait pürüzlerin, birbirlerini kesmesi sonucunda malzeme kaybının meydana gelmesine adhesif aşınma denir.

Adhesif aşınmanın azaltılması için; pürüzlerin tepelerinde meydana gelen temas alanlarının azaltılması gerekir [60]. Bu durum, yükün azaltılması veya malzemenin sertlik ve akma mukavemetinin artırılması ile sağlanabilir [61]. Öte yandan, adhesif aşınma, önemli ölçüde yüzeylerin temizliğine bağlıdır. Rutubet, gaz ve oksit içeren ortamlarla yağlayıcı maddeler adhesif aşınmayı azaltıcı yönde etki ederler [61].

1.5.2.2. Abrazyon Aşınması

Bu aşınma, yüzeylerin birbiri üzerindeki hareketi sırasında yumuşak yüzeylerin sert yüzeyler tarafından kesilmesi veya kazınması ya da yüzeyler arasına giren sert parçacıkların yüzeyleri kesmesi sonucunda ortaya çıkar [62]. Çevreden gelen toz ve kum parçacıkları ile çalışma sırasında oksitlenen aşınma parçacıkları yüzeyler arasına girerek, abrazyon aşınmasına neden olabilirler. Bu tür aşınmanın azaltılması için, yüzeylerin çevreden çok iyi yalıtılması ve yağlama sistemine filtre gibi ek donanımların takılması gerekmektedir [62].

1.5.2.3. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, daha çok yuvarlanma hareketi yapan rulmanlar, dişli çarklar ve kam mekanizmaları gibi makina elemanlarında görülen bir aşınma mekaniz-

masıdır [59]. Yüzeyler tamamen bir yağ filmi tarafından ayrılırsalar bile, yorulma aşınması meydana gelebilir. Bu elemanlarda temas alanları küçük olduğundan, yüzeyde Hertz basınçları meydana gelir ve yüzeyin hemen altında kayma gerilmeleri oluşur [59]. Yuvarlanma sırasında, yüzey altında oluşan kayma gerilmesinin en büyük değerinin, malzemenin akma sınırını aşması durumunda yorulma çatlakları meydana gelmektedir [59]. Bu çatlakların zamanla ilerleyip yüzeye ulaşmaları durumunda da, yüzeyde küçük çukurcuklar (pit) oluşmaktadır. Yorulma aşınması, büyük ölçüde kayma gerilmelerinin büyüklüğüne ve malzemenin sertlik ve mukavemetine bağlıdır [59]. Nitekim, yüzeyaltı yuvarlanma yorulmasının, yüzeyaltında oluşan kayma gerilmesinin en yüksek değerinin malzemenin elastik sınırını aşması durumunda meydana geldiği bilinmektedir [59]. Bu nedenle, yuvarlanma yorulmasının önlenmesi için uygulanan yükün azaltılması, yüksek mukavemetli malzeme seçilmesi ve malzeme yüzeyinin sertleştirilmesi alınacak tedbirlerin başında gelmektedir.

1.5.2.4. Korozyon Aşınması

Sıvı veya gaz içeren korozif bir ortamda sürtünme olduğunda, yüzeylerde bazı reaksiyonlar meydana gelir. Bu reaksiyonların ürünleri yüzeye zayıf olarak bağlandıklarından, sürtünme ile yüzeyden ayrılabilirler [56]. Bu şekilde meydana gelen aşınma, çalışma sırasında sürekli olarak devam eder. Korozyon mekanizması, endüstriyel ortamlarda veya nem oranı yüksek olan denize yakın bölgelerde, temiz ve kuru hava ortamına göre daha hızlı bir şekilde meydana gelmektedir [56].

Söz konusu aşınma türlerinden başka, özellikle titreşimli hareketin söz konusu olduğu durumlarda; titreşimli aşınma (fretting) ve sıvı akışkanın kendisinin veya içerisindeki katı parçacıkların yüzeye çarpması sonucunda; erozyon aşınması meydana gelebilir.

Bazı durumlarda, aynı anda birden fazla aşınma mekanizmasının ortaya çıkması nedeniyle, aşınma karmaşık bir hal alabilir. Örneğin, korozyon aşınmasında

oksitlenmiş yüzey tabakalarının yüzeyden uzaklaşması sonucunda oluşan sert oksit parçacıkları, yüzeyler arasına girerek abrazif aşınmaya neden olabilir [63].

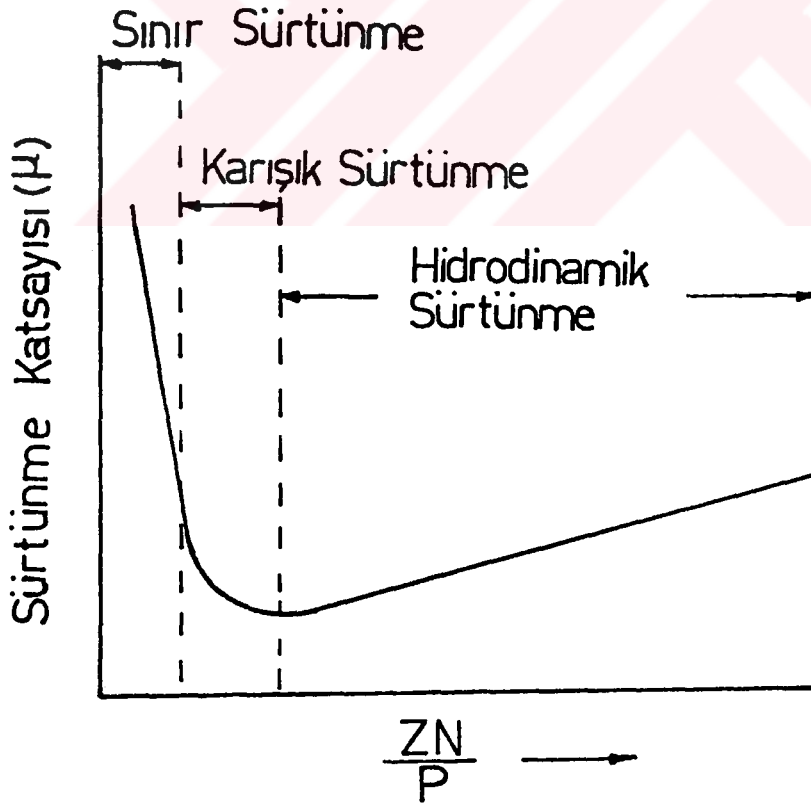
1.5.3. Kaymalı Yatakların Tribolojik Özellikleri

Yataklar, makinalarda ortaya çıkan kuvvetlerin karşılanmasında kullanılan destekleme elemanlarıdır. Kaymalı yataklarda, mil ile yatak arasında sürekli bir kayma hareketi meydana gelir. Kaymalı yatakların tercih edilmelerinin başlıca sebepleri olarak, darbelere ve titreşimlere dayanıklı olmaları, ağır yük altında güvenle kullanılabilmeleri ve nisbeten gürültüsüz çalışmaları gibi hususlar sayılabilir [64].

Kaymalı yatak malzemelerinde aranan özelliklerin başında, üstün aşınma dayanımı, yüksek yorulma dayanımı ve korozyon direnci ile birlikte ekonomiklik gelmektedir. Metalik yatak malzemeleri, genel olarak biri yumuşak diğeri sert olmak üzere, iki farklı faz içeren yapıya sahiptirler. Sert parçacıklar uygulanan yükü taşıırken, yumuşak matris kayma hareketini kolaylaştırır [65].

Kaymalı yatakların yüzeyi ile mil arasındaki sürtünme katsayısının (μ) yatak parametrelerine (ZN/P) göre değişimi Stribeck diyagramı ile gösterilmektedir. Yağlanmış bir yatak-mil sistemine ait tipik bir Stribeck diyagramı Şekil 4'de verilmiştir. Söz konusu diyagram; sınır yağlama, karışık yağlama ve hidrodinamik (sıvı) yağlama olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Yatak parametresinde yer alan Z yağın dinamik viskozitesini, N milin dönme hızını, P ise yatak basıncını göstermektedir. Stribeck diyagramının sınır sürtünme veya sınır yağlama olarak adlandırılan devresinde, yüzeyde yalnız birkaç yağ molekülünü içeren bir yağ tabakası oluşmakta ve bu tabaka yüzey pürüzlerini örtmek için yeterli olmamaktadır. Sınır yağlama durumu daha çok, düşük hız ve yüksek basınç şartlarında çalışan kaymalı yataklarda meydana gelmektedir. Sınır yağlama durumunda ortaya çıkan metal-metal teması, sürtünme katsayısının yükselmesine ve buna paralel olarak da aşınmanın artmasına neden olmaktadır. Hidrodinamik yağlama şartlarında ise, yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filmi

oluşmakta ve metal-metal teması meydana gelmemektedir. Bu nedenle, hidrodinamik yağlama şartlarında harekete karşı gösterilen direnç, sadece yağlayıcı akışkanın molekülleri arasında meydana gelen iç sürtünmesinden kaynaklanmaktadır. [66]. Hidrodinamik yağlama bölgesinde metal-metal teması olmadığından, teorik olarak aşınmanın meydana gelmemesi gerekir. Ancak, uygulamada bu durum her zaman geçerli değildir [67]. Karışık yağlama ise, sınır yağlama ve hidrodinamik yağlama arasında bir geçiş durumudur. Karışık yağlama durumunda, yatak yükü kısmen yağ filmi ile kısmen de yüzeyler arasındaki metal-metal teması ile taşınmaktadır. Hidrodinamik yağlamanın oluşmadığı durumlarda meydana gelen sınır veya karışık yağlama şartları, hareketin başlaması ve durması sırasında da ortaya çıkabilir [67].



Şekil 4. Stribeck eğrisi [54]

1.5.4. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların ve Bu Alaşımlardan İmal Edilen Yatakların Tribolojik Özellikleri

Günümüzde, çinko-alüminyum esaslı alaşımlar, genellikle düşük hızlarda ve ağır yük altında çalışan kaymalı yatakların imalâtında yaygın olarak kullanılmaktadır [68]. Yatak imalâtından başka, pekçok mühendislik alanında da bu alaşımlardan yararlanılmaktadır [69].

Yapılan araştırmalar, söz konusu alaşımların, bronz ve pirinç gibi geleneksel yatak malzemelerinden daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olduklarını göstermiştir [70]. Murphy ve Savaşkan tarafından yapılan deneyler sonucunda; silisyum içeren $ZnAl_{13}Si_2$ alaşımının, dökme demir ve fosfor bronzundan daha üstün aşınma dayanımı sergilediği belirlenmiştir [71]. Bu durum, söz konusu araştırmacılar tarafından, içyapıdaki yük taşıyıcı sert silisyum parçacıklarının varlığına dayandırılarak açıklanmıştır. Benzer şekilde, Lee ve arkadaşları [72] tarafından yapılan bir çalışmada, silisyum içeren Zn-Al esaslı alaşımların aşınma dayanımı bakımından, Alzen 305 ($ZnAl_{13}Cu_5$) ve SAE 660 fosfor bronzundan daha üstün oldukları görülmüştür. Risdon [73] tarafından, 6,9 MPa yatak basıncı ve 0,15 m/s'lik kayma hızında yapılan deneyler sonucunda; kum döküm yöntemiyle üretilen ZA-27 alaşımında 0,13 mg/saat'lik bir aşınma hızı elde edilirken, aynı döküm yöntemiyle üretilen kurşun bronzundaki (C93200) aşınma hızının 3.9-9.6 mg/saat değerleri arasında yer aldığı belirlenmiştir. Aynı çalışmada, ZA-27 alaşımının sürtünme katsayısının ortalama değerinin 0,01, bronzun sürtünme katsayısının ortalama değerinin ise 0,18 olduğu belirlenmiştir.

Marczak ve Ciach [9] tarafından, 175 N'dan daha düşük yükler altında yapılan aşınma deneyleri sonucunda, üçlü $ZnAl_{13}Cu_2$ alaşımının, CuPb30 bronzundan daha üstün tribolojik davranış sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, söz konusu alaşımın aşınma yüzeyinde çinko ve alüminyum oksitlerinin oluşumuna dayandırılarak açıklanmıştır. Bu çalışma sonucunda, sert alüminyum oksit tabakasının

yük taşıma görevi yaparak aşınma direncini arttırdığı, hegzagonal kristal yapıya sahip, yumuşak çinko oksit tabakasının ise, yağlayıcı görevi yaparak kaymayı kolaylaştırdığı ileri sürülmüştür.

Döküm yönteminin çinko-alüminyum esaslı alaşımların yapı ve mekanik özelliklerinden başka, aşınma özelliklerini de önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Nitekim, Risdon ve arkadaşları [73] tarafından yapılan bir çalışmada; santrifüj (savurma) döküm yöntemiyle üretilen ZA-27 alaşımı 0,55 mg/saat değerinde bir aşınma hızı sergilerken, kokil döküm yöntemiyle üretilen ZA-27 alaşımının aynı şartlar altındaki aşınma hızının 1,4-4,5 mg/saat arasında olduğu belirlenmiştir.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan imal edilen kaymalı yataklar, yetersiz yağlama ve aşırı yükleme şartlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Kalay esaslı yatak malzemelerinin, yağlanmış durumdaki ortalama sürtünme katsayıları 0,1 civarında iken, çinko-alüminyum esaslı alaşımların aynı durumdaki sürtünme katsayıları 0,04-0,07 değerleri arasında yer almaktadır [74].

Öte yandan, mil malzemesinin sertliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan imal edilen yatakların aşınma dayanımını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür [75]. Milin ortalama yüzey pürüzlülüğünün 50 µm'den daha düşük olması durumunda, yatağın aşınma direncinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, ticari ZA-27 alaşımından imal edilen yataklarda en üstün aşınma dayanımı, milin sertliğinin 45 RSD-C olması durumunda elde edilmiştir [75].

Yapılan araştırmalar, çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan imal edilen yatakların , hem maliyet, hem de performans bakımından, bronz yataklardan çok daha üstün olduklarını göstermiştir [76]. SAE-64 bronzundan imal edilen ve lokomotiflerde kullanılan yataklar, normal olarak 18-24 aylık çalışma süresi sonunda, aşırı aşınma nedeniyle değiştirilirken, ZA-12 adlı ticari çinko-alüminyum esaslı alaşımdan imal edilen yataklarda, 20 aylık bir çalışma süresi sonunda önemli bir aşınma belirtisine rastlanılmamıştır [70].

1.6. İlgili Literatürün Özeti ve Çalışmanın Amacı

Kaymalı yatak malzemelerinin temel alaşım elementlerinden olan kalay ve bakırın pahalı ve kısıtlı miktarda bulunan metaller olması, araştırmacıları kalaysız veya çok az kalay ve/veya bakır içeren yatak malzemeleri geliştirmeye yöneltmiştir. Bu nedenle, günümüzde beyaz metal, bronz ve pirinç gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerini almaları için, hem ekonomik, hem de üstün tribolojik ve mekanik özelliklere sahip yeni yatak malzemeleri geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Uygulama alanı gittikçe artan çinko-alüminyum esaslı yatak alaşımlarının özelliklerinin ve bu alaşımlardan imal edilen parçaların performanslarının iyileştirilmesi amacıyla, günümüzde yoğun araştırma çalışmaları yürütülmektedir. Bu çalışmalar, söz konusu alaşımların kullanımlarını kısıtlayan faktörlerin ortadan kaldırılması ve kullanım alanlarının daha da arttırılması hususları üzerine yoğunlaştırılmıştır.

İkili çinko-alüminyum alaşımlarının özelliklerinin, pek çok uygulama için yeterli olmadığı anlaşılmış ve bu alaşımların özelliklerini iyileştirmek amacıyla, bakır, magnezyum, silisyum gibi alaşım elementleri katılarak, bunların etkileri incelenmiştir. Ancak, bakır içeren alaşımlarda önemli ölçüde boyutsal kararsızlık sorunu ortaya çıkmıştır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için, alaşım elementi olarak, bakır yerine silisyum kullanılmış ancak, silisyumun söz konusu alaşımların mukavemet değerlerini yeterince yükseltmediği görülmüştür. Bu durum, araştırmacıları en uygun kimyasal bileşimi belirleme çalışmalarına yöneltmiştir. Çinko-alüminyum esaslı ikili ve üçlü alaşımların içyapıları ve özellikleri pek çok araştırmacı tarafından incelenmiş olmasına rağmen, özellikle bakır ve silisyum içeren dördü alaşımların içyapıları ve mekanik özellikleri yeterince incelenmemiştir. Ayrıca, bu alaşımların aşınma ve sürtünme özellikleri de henüz ayrıntılı olarak araştırılmamıştır. Öte yandan, söz konusu alaşımlardan imal edilen kaymalı yatakların tribolojik özellikleri yeterince incelenmemiş ve mühendislik uygulamaları için çalışma koşulları henüz tam olarak belirlenmemiştir.

Bu nedenlerle, bu tezin amacı; geleneksel yatak malzemelerinden daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip çinko-alüminyum esaslı, yeni yatak alaşımları geliştirmek ve bu alaşımlardan imal edilen kaymalı yatakların tribolojik davranışlarını ayrıntılı biçimde inceleyerek, bunların tasarım ve kullanım parametreleri hakkında bilgi edinmektir.



2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DENEY DÜZENEKLERİ

2.1. Alaşımların Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi

2.1.1. Alaşımların Dökümü

Bu çalışmada, üç adet üçlü Zn-Al-Cu, yedi adet dörtlü Zn-Al-Cu-Si ve bir adet de beşli Zn-Al-Cu-Si-Sb alaşımı kokil döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımların üretiminde, % 99.99 saflıkta çinko, % 99.99 saflıkta elektrolitik bakır, ticari saflıkta (% 99.7) alüminyum ve % 99.5 saflıkta antimon kullanıldı. Silisyum içeren alaşımların üretiminde Etial-140 (AlSi12) alaşımı, bakır içeren alaşımların üretiminde ise, intermetalik bakır-alüminyum alaşımı (AlCu50) kullanıldı. Ergitme işlemi, sıcaklığı kontrol edilebilen elektrikli bir pota fırınında gerçekleştirildi. Ergitilen alaşımlar, kimyasal bileşim oranına göre, 480°C ile 700 °C arasındaki uygun bir sıcaklıktan, 300 °C sıcaklığa kadar ısıtılan, bir kokil kalıba dökülerek katılaştırıldı. Kokil kalıp 45x60x200 mm boyutlarında olup, yönlendirilmiş katılaştırmanın ve beslenmenin sağlanması için konik olarak imal edildi. Üçlü ZnAl27Cu1 ve dörtlü ZnAl27Cu5Si3 alaşımlarının üretimi, sıvı durumdaki Zn-Al alaşımlarına toz halindeki intermetalik $Cu_{32}Al_{19}$ bileşiği katılarak gerçekleştirildi. Bunun için, önceden hazırlanan intermetalik $Cu_{32}Al_{19}$ bileşiği öğütülerek toz haline getirildi ve tane boyutu 125 μm 'nin altında kalan tozlar sıvı durumdaki Zn-Al alaşımına katılıp, iyice karıştırıldıktan sonra kokile dökülerek katılaştırıldı. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri atomik absorpsiyon ve enerji dispersif spektrometresi (EDS) yöntemleriyle belirlendi.

2.1.2. İy yapı İncelemeleri

Dökülmüş durumdaki alaşımlardan alınan numuneler, standart metalografi yöntemi ile hazırlandıktan sonra, % 25'lik Nital (25 ml nitrik asit ile 75 ml etil alkol) içerisinde dağlanarak, hem ışık mikroskopunda, hem de taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelendi ve iy yapıları gösteren fotoğraflar çekildi. Alaşımların iy yapılarında bulunan fazların kimyasal bileşimleri ise, enerji dispersif

spektrometresi yardımıyla belirlendi. Ayrıca bu alaşımlardan alınan aşınma numunelerinin ve imal edilen kaymalı yatakların aşınma yüzeyleri de SEM'de incelenerek önemli bölgelerin fotoğrafları çekildi.

2.1.3. Yoğunluk Ölçümleri

Alaşımların yoğunluklarını tayin etmek için, talaşlı işleme hazırlanan numunelerin boyutları ± 0.01 mm hassasiyetindeki bir mikrometre yardımıyla ölçüldükten sonra hacimleri hesaplandı. Numunelerin ağırlıkları, ± 0.01 mg'lık hassasiyete sahip bir terazide ölçüldükten sonra, alaşımların yoğunlukları belirlendi.

2.1.4. Mekanik Deneyler

2.1.4.1. Sertlik Deneyi

Alaşımlardan alınan numunelerin, yüzeyleri birbirine paralel olacak şekilde, talaşlı yöntemle işlendikten sonra yüzeyleri parlatıldı. Sertlik ölçümleri Brinell sertlik ölçme yöntemi ile 31,25 kg'lık yük altında ve 2,5 mm çapında uç kullanılarak gerçekleştirildi. Her numune üzerinde beş sertlik ölçümü yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alındı.

2.1.4.2. Çekme Deneyi

Üretilen alaşımlardan, talaşlı imalat yöntemi ile TS 138 A standardına uygun olan çekme numuneleri hazırlandı. Çekme deneyleri 13×10^{-2} mm/s'lik sabit çekme hızında yapılarak, alaşımların çekme dayanımları ve kopma uzaması değerleri belirlendi.

2.2. Deney Düzenekleri ve Triboloji Deneyleri

2.2.1. Disk-Çubuk Esaslı Aşınma Deney Düzenegi

Üretilen alaşımların sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemek için laboratuvarında disk-çubuk (pin-on-disc) esaslı yeni bir aşınma deney düzeneginin konstrüksiyon ve imalatı gerçekleştirildi. Konstrüksiyon yapısı Şekil 5'de gösterilen aşınma deney düzenegi; 3 kW gücündeki bir elektrik motoru, mil, disk, numune tutucusu, yükleme kolu, yağlama sistemi ve sürtünme kuvveti ölçüm devresinden oluşmaktadır.

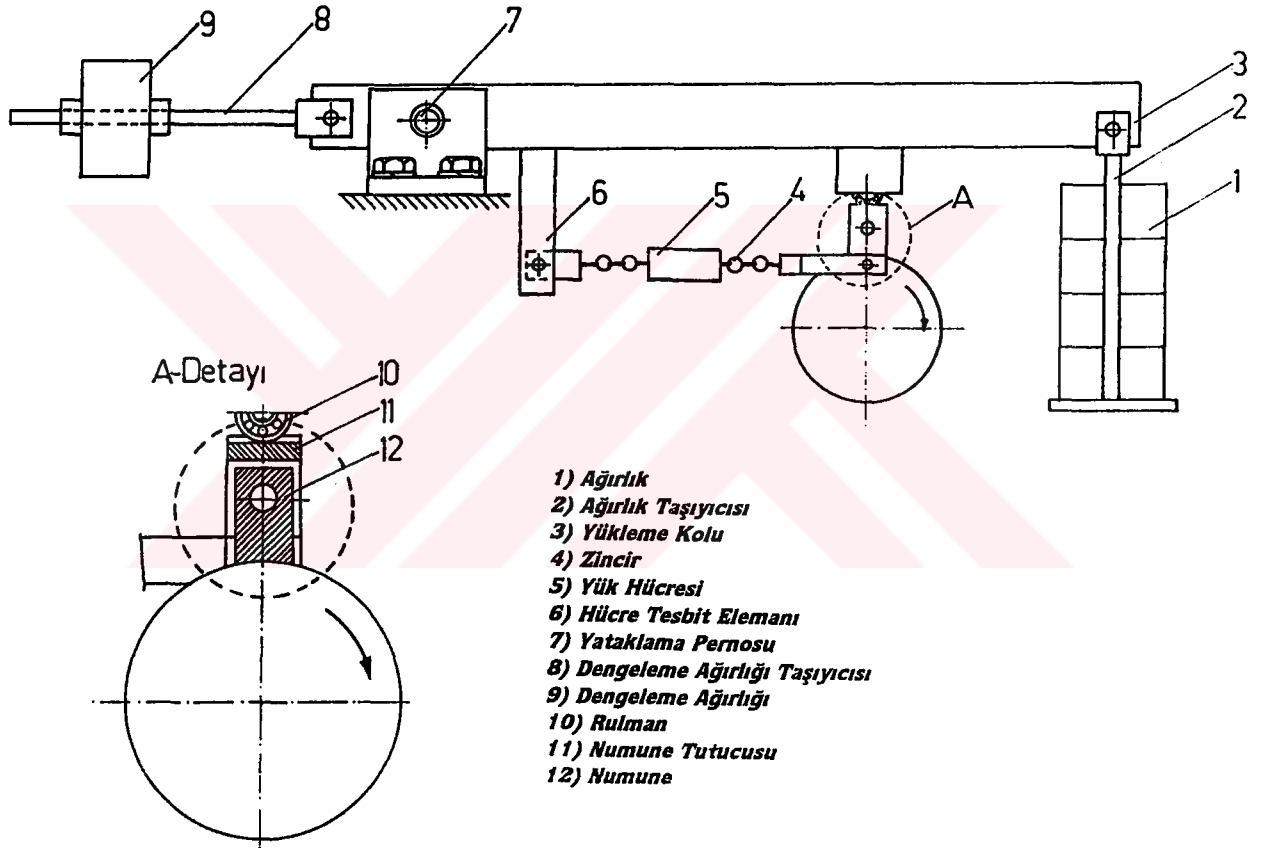
Düzenekte kullanılan disk, bir kaymalı yatak ünitesinde mili, numune ise yatağı temsil etmektedir. Motorun devir sayısı (milin dönme hızı), sisteme monte edilen bir hız kontrol ünitesi vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Yükleme işlemi, numune tutucusunun bağlı olduğu yükleme kolunun ucuna ağırlık asmak suretiyle gerçekleştirilmektedir. Yükleme kolu sabit bilyalı bir rulman ile yataklanmış olup, üzerindeki dengeleme ağırlığı vasıtası ile dengelenmektedir. Aşınma deney düzeneginin genel görünümü Şekil 6'da verilmiştir.

Sürtünme kuvvetini ölçmek için numune tutucusu ile sabit mesnet arasına K-25 tipi, 20 kg kapasiteli bir yük hücresi yerleştirilmiştir. Hücreden alınan sinyal bir gösterici (strain indicator) vasıtasıyla kuvvetlendirilerek, göstericinin ekranında dijital olarak sergilenmektedir. Gösterici çıkışından alınan sinyal, bir yazıcıya aktarılarak, sürtünme kuvvetinin çalışma zamanına göre değişimi sürekli olarak kaydedilmektedir.

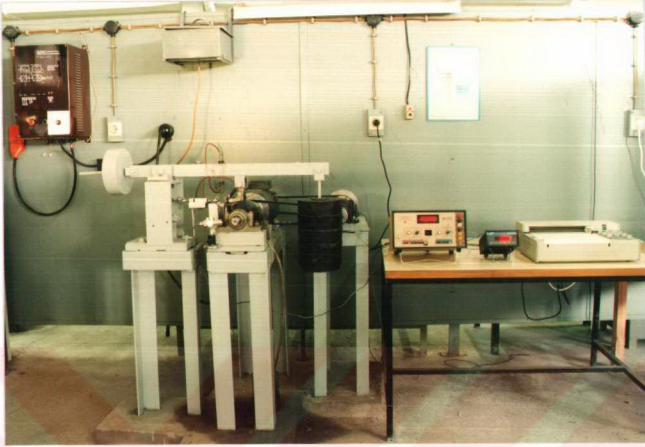
Numunenin disk üzerindeki ileri-geri hareketine, en az sürtünme ile izin vermek ve numunenin disk üzerine tamamen oturmasını sağlamak için numune tutucusunun üzerine oynak bilyalı bir rulman yerleştirilmiştir. SAE 4140 çeliğinden imal edilen 150 mm çapındaki disk, su verme işleminden sonra, 200 ° C sıcaklıkta 2 saatlik bir süre menevişlenerek 55 RSD-C değerine kadar sertleştirildi. Sertleştirilen diskin yüzeyi taşlandıktan sonra, 600 numaralı zımpara ve 0.5 µm büyüklü-

ğündeki alümina ile parlatıldı. Şekil 7'deki fotoğrafta disk ve numunenin yakından görünümü yer almaktadır.

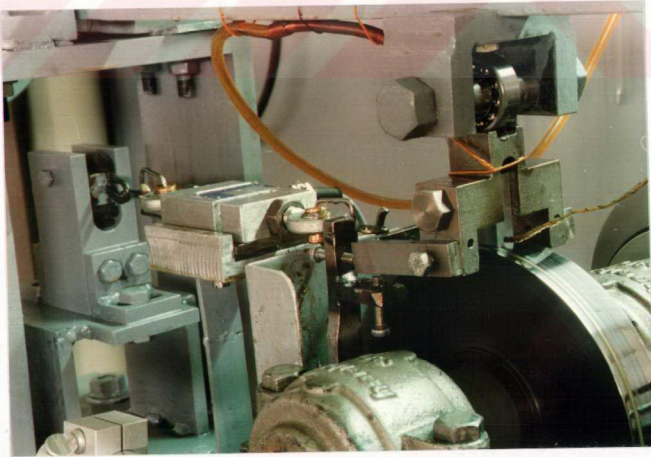
Deneylerde SAE 20W/50 motor yağı kullanıldı. Yağlama işlemi, yüksek bir yere yerleştirilen yağ deposundan, ince bir hortum aracılığı ile alınan yağın, bir debi ayarlayıcısından geçirildikten sonra, disk üzerine damlatılması suretiyle gerçekleştirildi.



Şekil 5. Çubuk disk esaslı aşınma deney düzeneğinin şematik resmi



Şekil 6. Çubuk disk esaslı aşınma deney düzeneğinin genel görünümü



Şekil 7. Aşınma deney düzeneğine ait disk ve numunenin yakından görünümü

2.2.1.1. Çinko-alüminyum Esaslı Alaşımların Sürtünme ve Aşınma Deneyleri

Alaşımlardan, talaşlı imalat yöntemi ile 10x15x35 mm boyutlarında sürtünme ve aşınma numuneleri hazırlandı. Numune yüzeyi ile disk yüzeyinin tam olarak birbiri ile temas etmesini sağlamak için; numune yüzeyi, iç çapı diskin çapına eşit olan bir kalıpta işlendi ve işlenen yüzey 600 numaralı zımpara ve 0.5 µm'lik alümina kullanılarak parlatıldı. Deneylere başlamadan önce, numuneler ultrasonik bir temizleyici yardımıyla karbontetraklorür ve aseton-alkol karışımından oluşan kimyasal çözücüler içerisinde temizlendi. Deneylerde kullanılan numunenin teknik resmi Şekil 8'de verilmiştir.

Sürtünme kuvvetinin ölçümünde kullanılan yük ölçüm hücresinin kalibrasyon işlemi, hücreye belirli ağırlıklar asılarak elde edilen verilerin değerlendirilmesi suretiyle gerçekleştirildi. Göstericiden alınan ve yazıcıya aktarılan gerilimin, uygulanan yüke göre değişimini gösteren kalibrasyon doğrusu Şekil 9'da verilmiştir.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların ve CuSn12 bronzunun sürtünme katsayılarının zamana göre değişimini belirlemek için; her alaşıma ait numune, aşınma deney düzeneğinde yaklaşık olarak 20 saat'lik bir süre sürtünme deneyine tabi tutuldu. Çalışma süresi boyunca, bir yazıcı tarafından sürekli olarak kaydedilen sürtünme kuvvetine ait sinyal, kalibrasyon doğrusu yardımıyla sürtünme kuvvetine çevrildi. Daha sonra, bu değer normal yüke bölünerek, sürtünme katsayısı değerleri elde edildi. Bu deneyler, 2.16 m/s'lik (275 d/dk.) kayma hızı, 6 MPa'lık yüzey basıncı ve 2 cm³/saat'lik yağ akış hızında gerçekleştirildi.

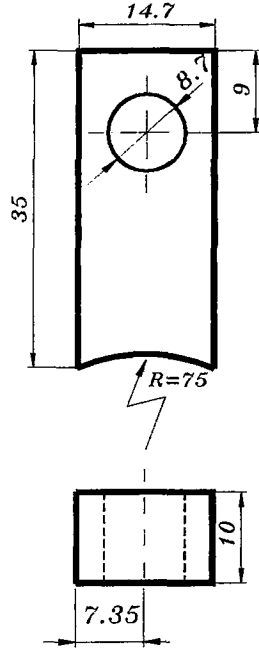
Sürtünme deneyleri sırasında, numunelerin sıcaklığı demir-konstantan'dan yapılmış bir termoeleman çifti (termokupl) yardımıyla ölçüldü. Termoelemanın ucu numunenin aşınma yüzeyinin 2 mm yukarısına açılan bir deliğe yerleştirildi ve çıkış uçları bir yazıcıya bağlanarak, çalışma sırasında numune sıcaklığının zamana göre değişimi kaydedildi. Kullanılan termoelemançifti, deneylerden önce sabit sıcaklık banyoları yardımıyla kalibre edildi.

Yüzey basıncının, alaşımların sürtünme katsayılarına etkisini belirlemek için; sürtünme numuneleri 1-7 MPa arasındaki değişik basınç değerlerinde, 30 dakika süreli sürtünme deneyine tabi tutuldu. Bu deney, 2.16 m/s'lik kayma hızı ve 2 cm³/saat'lik debide yapıldı. Benzer şekilde, numuneler, aşınma deney düzeneğinde değişik kayma hızlarında 30 dakika süreli deneylere tabi tutularak, kayma hızının sürtünme katsayısına etkisi belirlendi. Bu deneyler de 5 MPa 'lık basınç altında ve 2 cm³/saat'lik debi değerinde yapıldı.

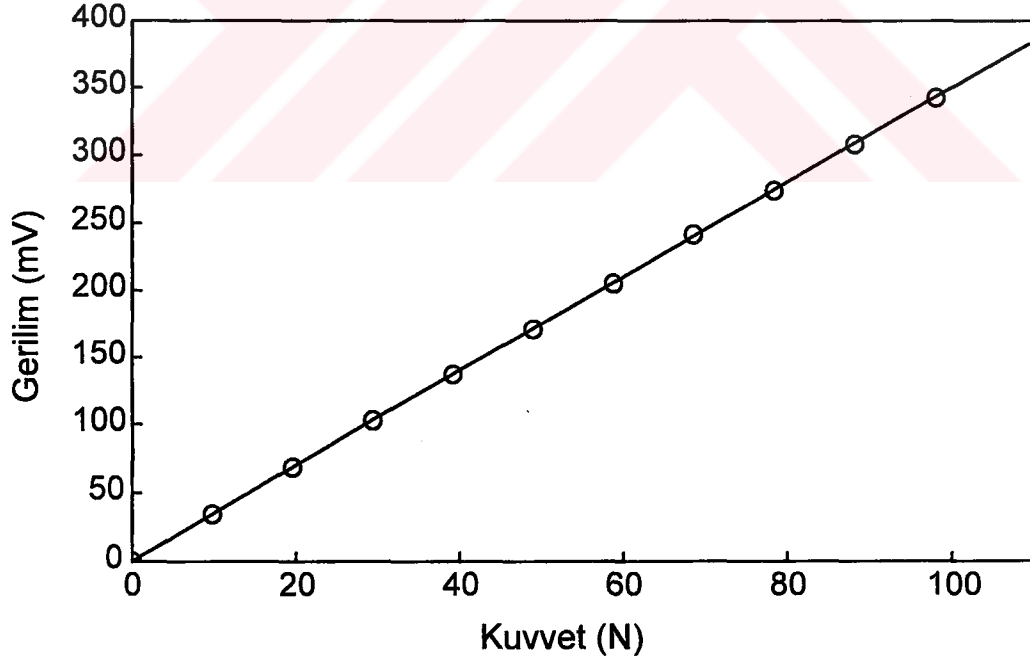
Yağ debisinin sürtünme katsayısına etkisini belirlemek için de, söz konusu numuneler, değişik debi değerlerinde 30 dakika süreli sürtünme deneyine tabi tutuldu. Söz konusu deney, 5 MPa'lık basınç , 2,16 m/s'lik kayma hızı ve 0-86 cm³/saat 'lık yağ debisi değerlerinde gerçekleştirildi.

Aşınma deneylerinden önce, kimyasal çözücüler içerisinde temizlenen numunelerin ağırlıkları, 0.01 mg hassasiyetindeki bir terazi yardımıyla ölçüldü. Söz konusu numuneler, deney düzeneğindeki numune tutucusuna yerleştirildikten sonra, gerekli şartlar ayarlanarak deneyler yapıldı. Aşınma miktarını belirlemek için; 155 km'lik yola karşılık gelen, her 20 saatlik çalışma süresi sonunda, numuneler sökülüp kimyasal çözücüler içerisinde yeniden temizlendikten sonra, tartılarak ağırlık kayıpları belirlendi. Bu işleme, her numune için alınan toplam yol 1240 km'ye ulaşınca kadar devam edildi. Yatak uygulamalarında mil ile yatak arasında, oluşan boşluk aşınmayı ifade etmektedir. Bu nedenle, ölçülen ağırlık kayıpları alaşımların yoğunluklarına bölünerek, aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları belirlendi. Aşınma deneyleri, 6 MPa'lık yüzey basıncı, 275 dev/dak'lık (2.16 m/s) devir sayısı ve 2 cm³/saat'lik yağ akış hızında gerçekleştirildi.

Yüzey basıncının alaşımların aşınma davranışına etkisini belirlemek için; numuneler 2 ila 11 MPa arasındaki değişik basınçlarda, 2 saat süreli aşınma deneyine tabi tutuldu. Bu deneyler, 300 dev/dak'lık devir sayısı (2.36 m/s) ile 2cm³ /saat'lik yağ akış hızında yapıldı. Ölçülen ağırlık kayıpları alaşımların yoğunluklarına bölünerek, aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları belirlendi.



Şekil 8. Aşınma deneylerinde kullanılan numunenin teknik resmi



Şekil 9. Sürtünme kuvveti ölçümünde kullanılan yük ölçüm hücresi için kalibrasyon doğrusu

2.2.2. Kaymalı Yatakların Sürtünme Deney Düzenegi

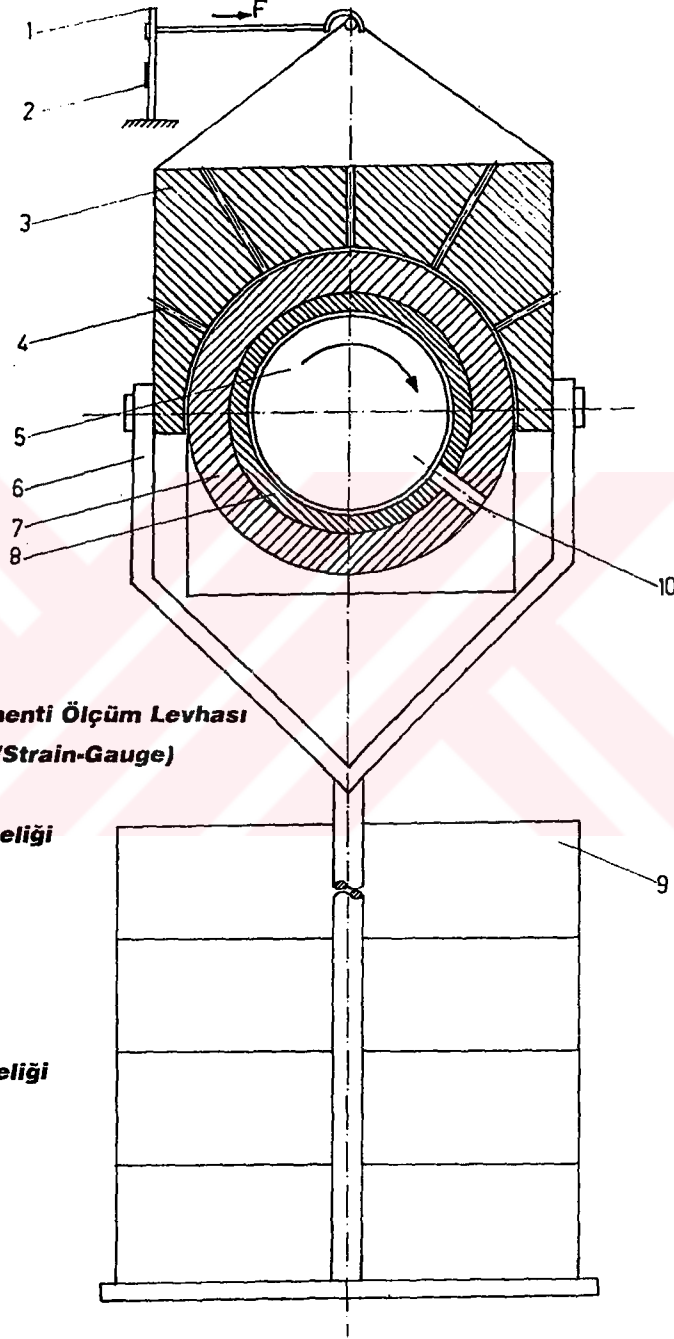
Alaşımlardan talaşlı imalât yöntemi ile imal edilen, ince cidarlı kaymalı yatakların Stribeck diyagramlarını belirlemek için, bu yataklar bir kaymalı yatak deney düzeneginde incelendi. Bu düzenegin şematik resmi ve genel bir fotoğrafı, sırası ile Şekil 10 ve 11'de verilmiştir.

Söz konusu düzenek, basınçlı yağlama sistemi, hız kontrol ünitesi, moment ölçme devresi, kaymalı yatak yuvası, yatak mili, hidrostatik yastık, doğru akım motoru ve yük askısı gibi elemanlardan oluşmaktadır. Yatak yuvası dökme demirden imal edilmiş olup, ince cidarlı kaymalı yatağın yerleştirilmesi için yatak deliği hassas bir şekilde honlanmıştır. İki parçalı olarak imal edilmiş olan yatak yuvası, mil ile yatak arasında oluşan sürtünme kuvvetinin etkisiyle serbestçe dönebilecek şekilde yataklanmaktadır. Yatağın yüklenmesi, yatak yuvası üzerindeki honlanmış yüzeye oturan hidrostatik yastığa bağlı askı koluna ağırlık asılması suretiyle gerçekleştirilmektedir. Hidrostatik yastık, yatak yuvasının serbestçe dönmesine izin vermekte ve yuvanın hareketi sırasında, yükün radyal olarak yuvaya iletilmesini sağlamaktadır. Bunun için, hidrostatik yastık ile yatak yuvası arasındaki oturma yüzeylerine sürekli olarak 1,2 MPa'lık basınç altında yağ gönderilmektedir. Uygulanan yük, gönderilen yağın oluşturduğu basınçlı yağ yastığı vasıtasıyla yatak yuvasına iletilmektedir.

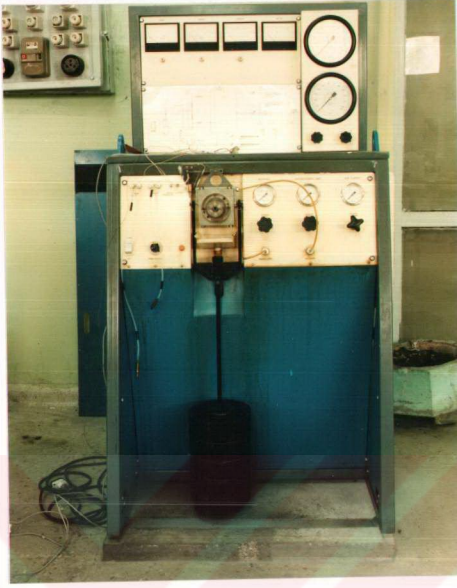
Deney milleri, soğuk iş takım çeliğinden (C 105 T1) imal edilerek, 800 VSD değerine kadar sertleştirilmiştir. Milin devir sayısı, doğru akım hız kontrol ünitesi vasıtası ile 0-1100 dev/dak aralığında ayarlanmaktadır. Cihaz üzerindeki ibreli göstergeden okunan devir sayısı, ayrıca el tipi başka bir takometre vasıtası ile de kontrol edilmektedir.

Bu düzenekteki yağlama işlemi, yatak zarfının alt kısmındaki delikten basınçlı olarak gönderilen yağ vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Kaymalı yatak ve hidrostatik yastıktan sızan yağ, toplama tablası vasıtasıyla toplama tankına gönderilmekte

ve toplanan yağ tekrar bir pompa vasıtasıyla sisteme verilerek, yağın sürekli sirkülasyonu sağlanmaktadır.



Şekil 10. Kaymalı yatak sürtünme deney düzeneğinin şematik resmi



Şekil 11. Kaymalı yatak sürtünme deney düzeneğinin genel görünümü

2.2.2.1. Çinko-alüminyum Esaslı Alaşımlardan İmal Edilen Kaymalı Yatakların Sürtünme Deneyleri

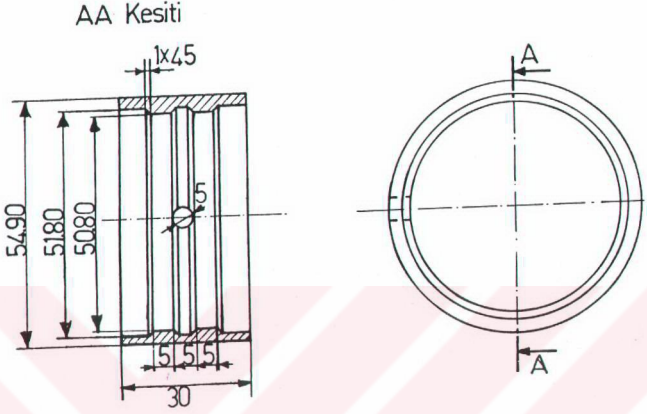
Alaşımlardan imal edilen ince cidarlı yataklar önce, yatak gövdesine kaygan geçme toleransında monte edildi. Daha sonra, yatak yuvası üzerindeki saplamalar sıkılarak, yatak yuvaya tesbit edildi. Şematik resmi Şekil 12’de verilen kaymalı yatağın, orta kısmında yağın iyice dağılmasını sağlayan dairesel bir yağ kanalı bulunmaktadır. Deneylerde kullanılan kaymalı yatakların genel görünümü Şekil 13’de verilmiştir. Bu deneylerde, yağlayıcı olarak Shell Tellus 15 yağı kullanıldı ve yağ sıcaklığı deney süresince bir termometre yardımıyla ölçüldü. Yağlama yağının viskozitesinin sıcaklığa göre değişimini gösteren eğri Şekil 14’de verilmiştir. Bütün deneylerde, yağın sıcaklığının 25-30 °C, dinamik viskozitesinin ise 0,0168-0,0138

kg/m.s arasında değiştiği gözlemlendi. Ölçülen yağ sıcaklığına karşılık gelen viskozite değerleri Şekil 14'deki eğriden belirlenerek, hesaplarda kullanıldı.

Sürtünme momenti, uzama ölçerlerden kurulan Wheston köprüsünün devresinden yararlanılarak ölçüldü. Bunun için; 5x50x2 mm boyutlarındaki yay çeliğinden imal edilen ölçüm levhasının alt ve üst yüzeylerine yapıştırılan aktif uzama ölçerler, diğer 2 adet pasif uzama ölçer ile tam köprü yapılarak bir gösterici devresine bağlandı. Göstericiden alınan sinyal bir yazıcıya aktarılarak, çalışma sırasında sürtünme momentine ait sinyalin zamana göre değişimi kaydedildi.

Tornalama yöntemiyle işlenen yatak yüzeyleri, deneylerden önce alıştırma işlemine tabi tutuldu. Bu işlem, her yatağın 1.1 MPa'lık basınç altında, yarım saatlik bir süre çalıştırılması suretiyle gerçekleştirildi. Alıştırma işleminden sonra, yatakların Stribeck eğrilerinin elde edilmesi için, sürtünme momenti ölçüm levhası ile yatak yuvası birbirine tespit edildi. Daha sonra, yatağa gönderilen yağ basıncı 0.01 MPa, hidrostatik yastık basıncı ise 1.2 MPa olacak şekilde ayarlandı. Yatak basıncı olarak alt sınır değeri olan 0.1 MPa seçildi ve milin devir sayısı 25 dev/dak'dan (0.066 m/s) başlayarak, kademeli olarak 1100 dev/dak' ya (2.93 m/s) kadar arttırıldı. Sistem, seçilen her dönme hızında 5 dakika süre ile çalıştırıldı ve oluşan momente ait sinyal, bir yazıcı vasıtasıyla sürekli olarak kaydedildi. Sinyal değerleri, daha önce elde edilen bir kalibrasyon doğrusu yardımıyla sürtünme momenti değerlerine çevrildi. Moment ölçüm devresine ait kalibrasyon doğrusu Şekil 15'de verilmiştir.

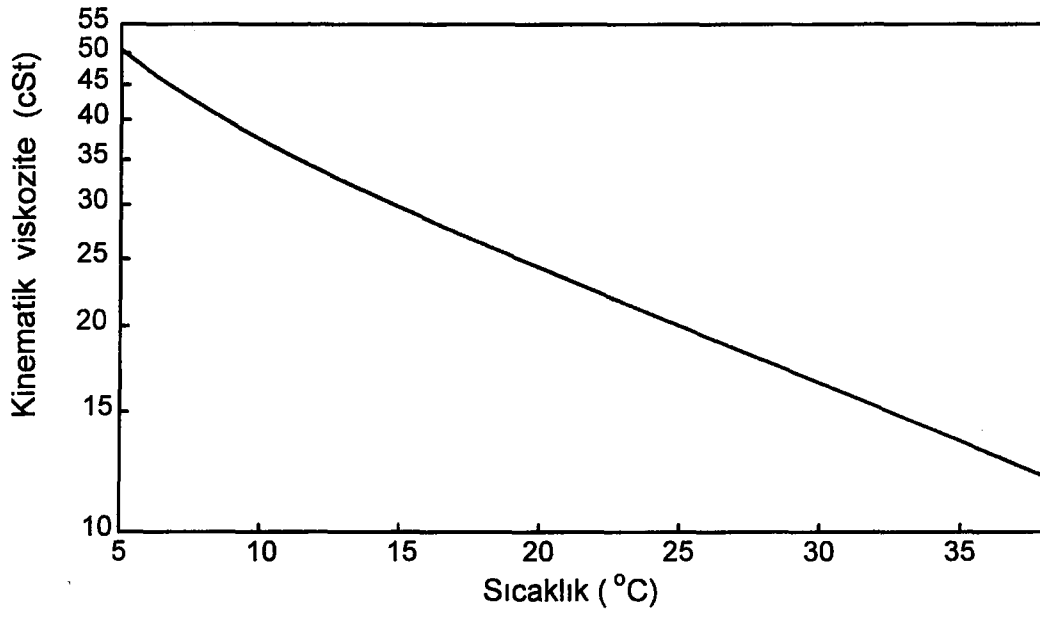
Yatak basıncının Stribeck eğrisine etkisini belirlemek için; yatak boşluğu sabit tutularak, 0.1, 0.3, 0.7 ve 1.1 MPa değerindeki basınçlar altında, sürtünme deneyleri yapıldı. Öte yandan, radyal boşluğun Stribeck eğrisine etkisinin araştırılması için de radyal boşluğu 40, 66 ve 100 µm olacak şekilde imal edilen yataklar sürtünme deneylerine tabi tutuldu.



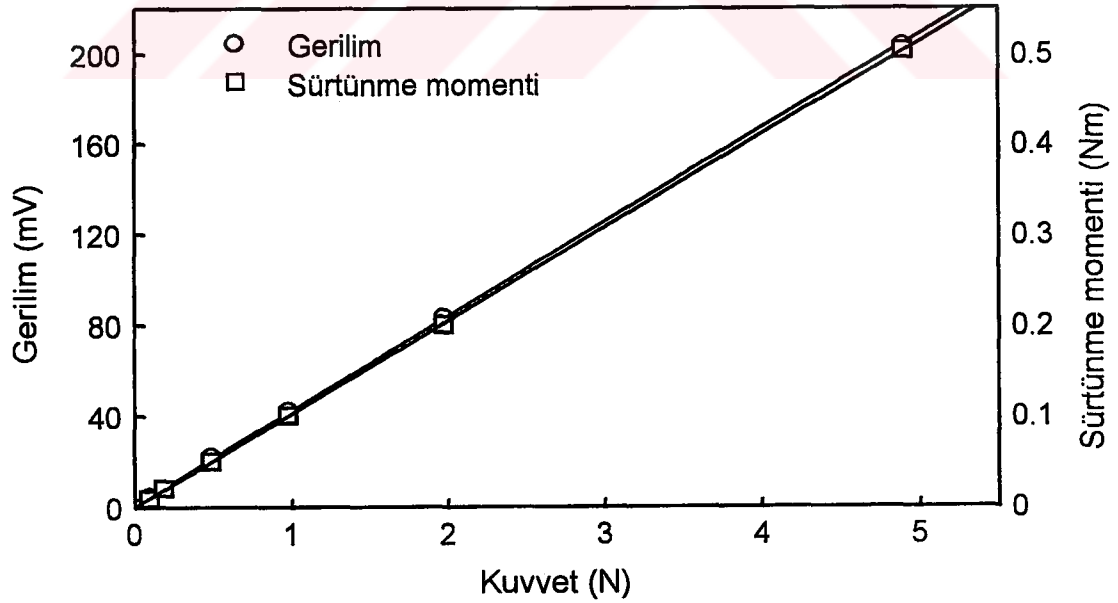
Şekil 12. Sürtünme deneylerine tabi tutulan kaymalı yatakların teknik resmi



Şekil 13. Sürtünme deneylerine tabi tutulan kaymalı yatakların görünümü



Şekil 14. Kaymalı yatakların sürtünme deneylerinde kullanılan Shell Tellus 15 yağının viskozitesinin sıcaklığa göre değişimi



Şekil 15. Sürtünme momenti ölçüm levhası için kalibrasyon doğrusu

2.2.3. İmal Edilen Kaymalı Yataklar İçin Aşınma Deney Düzenegi

Alaşımlardan imal edilen kaymalı yatakların aşınma özellikleri, laboratuvarında imal edilen başka bir deney düzenegi yardımı ile incelendi. Söz konusu düzenek kaymalı ve rulmanlı yatakların aşınma ve yorulma davranışlarını incelemek amacıyla tasarlanarak imal edilmiş olup, mil eksenine paralel ve dik kesit resimleri Şekil 16 ve 17'de verilmiştir.

Deney düzenegi, deney mili, deney yatağı, yatak yuvası, yataklama rulmanları, hidrolik yükleme silindiri, 3 kW gücünde bir alternatif akım motoru, kayış kasnak düzenegi, yağ pompaları, vanalar, manometreler, filtreler, termoeleman çifti ve yazıcı gibi elemanlardan oluşmaktadır. Deneyde kullanılan mil Fe 42 çeliğinden imal edilmiş olup, bunun yüzeyi sementasyon işlemi ile sertleştirilmiş ve ± 3 μ m'lik bir hassasiyetle taşlanmıştır. Yüzeyi sertleştirilen mil, her iki taraftan oynak makaralı rulmanlar ile yataklanmıştır. Yatak yuvasına tutuk geçme toleransında geçirilen deney yatağının aksenal ve radyal yöndeki hareketi bir pim kullanılarak önlenmiştir.

Tahrik mili, 5.5 kW gücündeki bir alternatif akım motoru tarafından tahrik edilmektedir. Deney yatağının yüklenmesinde kullanılan hidrolik devre, 1.5 kW gücündeki bir elektrik motoru ile tahrik edilen bir dişli pompası, basınç sınır vanası, yön kontrol vanası, küresel vana, hidrolik akümülatör, manometre ve çift tesirli bir hidrolik silindir gibi elemanlardan oluşmaktadır. Söz konusu hidrolik devre ile tahrik edilen ve hidrolik silindir içerisinde yer alan piston kolunun uyguladığı kuvvet, bir bilya vasıtasıyla doğrudan yatak yuvasına iletilmektedir. Böylece, radyal ve aksenal sapmalar önlenmekte ve yükün radyal yönde iletilmesi sağlanmaktadır. Hidrolik ünitenin yağ deposu içerisine, su sirkülasyonlu bir soğutucu yerleştirilerek, devredeki yağın aşırı ısınması önlenmektedir. Düzenekte kullanılan rulmanların ve deney yatağının yağlanması için iki adet yağ deposu, iki adet yağ pompası, emme ve basma hatları için filtreler, basınç sınır vanaları, debi ayar vanaları ve manometreler

kullanılmaktadır. Deney yatağının yağlanması, yatak yuvasının üst kısmına açılan 2 mm çapındaki yağ kanalı ve yatak zarfına çevresel olarak açılan yağlama kanalı vasıtası ile sağlanmıştır. Yatağa gönderilen yağın debisi, bir ayar vanası yardımıyla sürekli olarak aynı değerde tutulmaktadır. Söz konusu deney düzeneğini gösteren fotoğraflar, Şekil 18 ve 19'da verilmiştir.

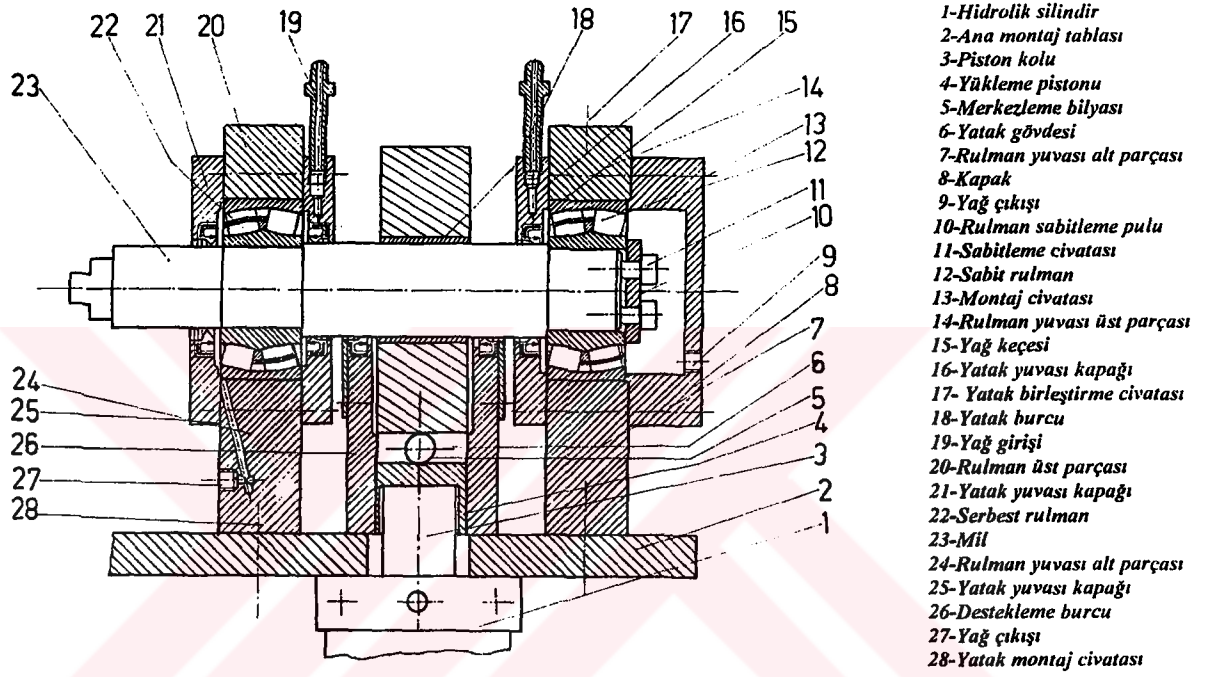
2.2.3.1. Zn-Al Esaslı Alaşımlardan İmal Edilen Kaymalı Yatakların Aşınma

Deneyleri

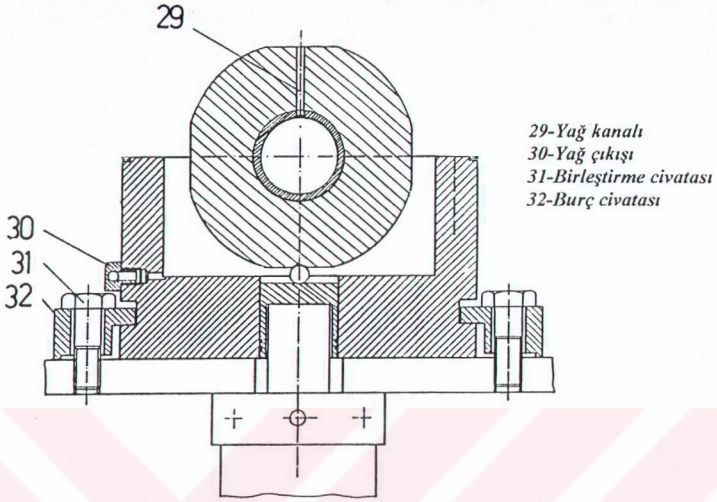
Bu çalışma için, çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan; 44, 59 mm çapında, 30 mm boyunda ve 3 mm et kalınlığında, talaşlı imalât yöntemi ile ince cidarlı yataklar imal edildi. Söz konusu yataklar, Şekil 20'deki fotoğrafta görülmektedir. Aşınma deneylerine başlamadan önce, diğer aşınma deneylerinde olduğu gibi, numuneler ultrasonik bir temizleyici yardımı ile kimyasal çözücüler karbondioksit ve aseton ile alkol karışımı içerisinde temizlendi ve 0.01 mg hassasiyetindeki bir terazide tartılarak ağırlıkları belirlendi. Daha sonra, yataklar yatak yuvasına yerleştirilerek, 17,3 MPa'lık basınç altında ve 1.83 m/s'lik hızda (785 dev/dak) deneylere tabi tutuldu. Yağlama ise, 0.025 l/dak'lık sabit akış hızında yapıldı ve her deney için SAE 20W/50 normuna uygun dört mevsim motor yağı kullanıldı. Yataklar, 100 km'lik yola karşılık gelen çalışma süresi sonunda sökülüp, kimyasal çözücüler içerisinde temizlendi ve daha sonra tartılarak aşınma ile meydana gelen ağırlık kayıpları belirlendi. Bu işleme, toplam 500 kilometrelik yol alınıncaya kadar devam edildi. Yataklarda meydana gelen aşınmanın, mil ile yatak yüzeyi arasında boşluk oluşumuna yol açtığı bilinmektedir. Bu nedenle, ölçülen ağırlık kayıpları, alaşımların yoğunluklarına bölünerek, aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları belirlendi.

Deney sırasında yatakların sıcaklığı; iç yüzeylerinden 2 mm uzaklığa açılan bir deliğe yerleştirilen demir-konstantan termo eleman çifti aracılığı ile algılanıp, bir

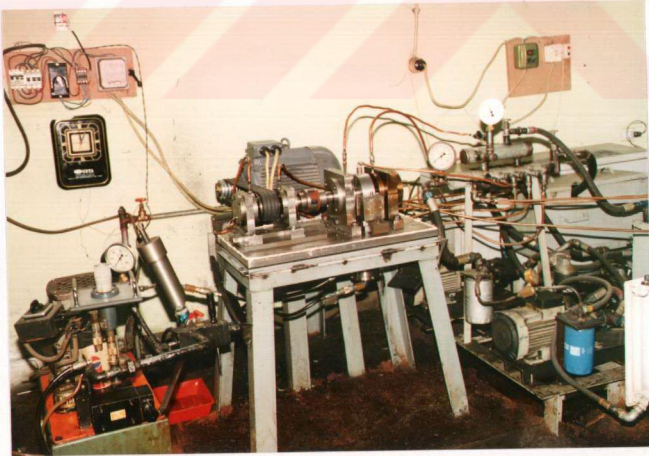
kaydedici yardımıyla sürekli olarak kaydedildi ve sonuçta, yatak sıcaklığının çalışma süresine göre değişimi belirlendi.



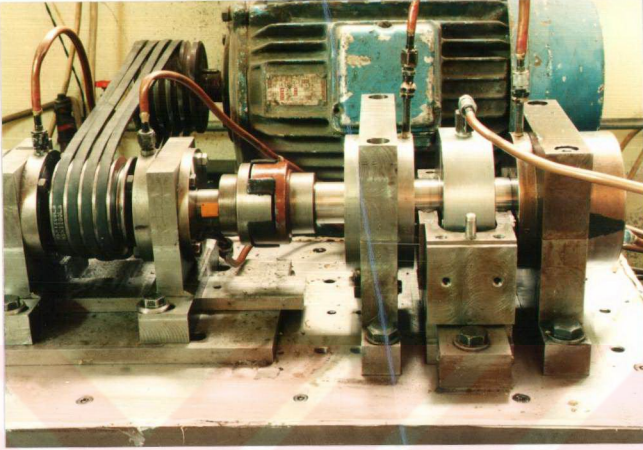
Şekil 16. Kaymalı yataklar için imal edilen aşınma deney düzeneğinin mil eksenine paralel kesit resmi



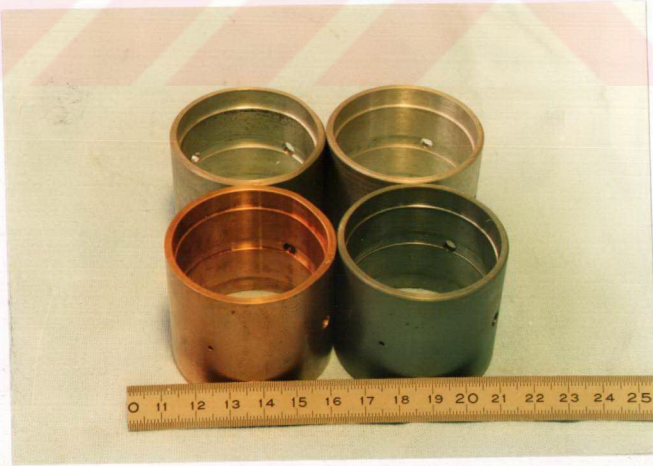
Şekil 17. Kaymalı yataklara ait aşınma deney düzeneginin mil eksenine dik kesit resmi



Şekil 18. Kaymalı yataklara ait aşınma deney düzeneginin genel görünümü



Şekil 19. Kaymalı yataklar için imal edilen aşınma deney düzeneğinin yakından görünüşü



Şekil 20. Aşınma deneyine tabi tutulan yatakların görünüşü

3. BULGULAR

3.1. Kimyasal Analiz Sonuçları

Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri belirlenerek Tablo 7 'de verilmiştir.

Tablo 7. İncelenen alaşımların kimyasal bileşimleri

Alaşım		Kimyasal bileşim (% ağırlık)				
No	Gösterim	Zn	Al	Cu	Si	Sb
1	ZnAl5Cu1	93.5	5.53	0.97	-	
2	ZnAl27Cu1	71.2	27.35	1.45	-	
3	ZnAl27Cu2	70.8	27.19	2.01	-	
4	ZnAl27Cu2Si1	69.4	27.58	1.97	1.05	
5	ZnAl27Cu2Si2	68.3	27.84	1.92	1.94	
6	ZnAl27Cu3Si3	65.6	28.65	2.9	2.85	
7	ZnAl27Cu3Si3Sb3	62.4	28.68	3.02	2.9	3.0
8	ZnAl27Cu5Si3	63.5	27.85	5.73	2.92	
9	ZnAl40Cu2Si1	56.3	40.84	1.91	0.95	
10	ZnAl40Cu4Si2	53.1	41.05	3.85	1.9	
11	ZnAl60Cu2	37.3	60.78	1.92	-	

Not : 2 numaralı alaşıma % 2 oranında, 8 numaralı alaşıma da % 5 oranında intermetalik toz katılmıştır.

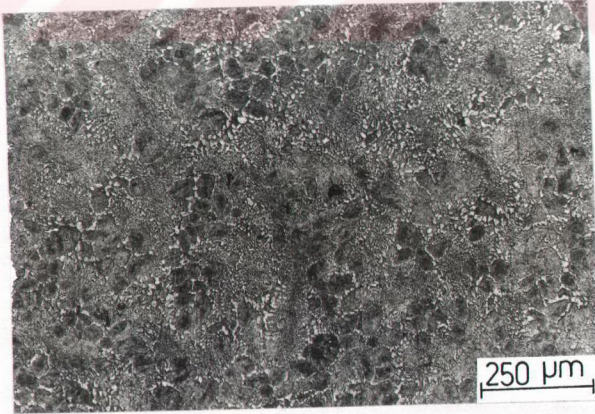
3.2. Alaşımların İçyapıları

Yüksek oranda çinko içeren ZnAl5Cu1 alaşımının, dökülmüş durumda, çinko ve alüminyumca zengin fazlardan oluşan lamelli bir yapıya sahip olduğu görüldü. Söz konusu yapı Şekil 21 'de verilmiştir.

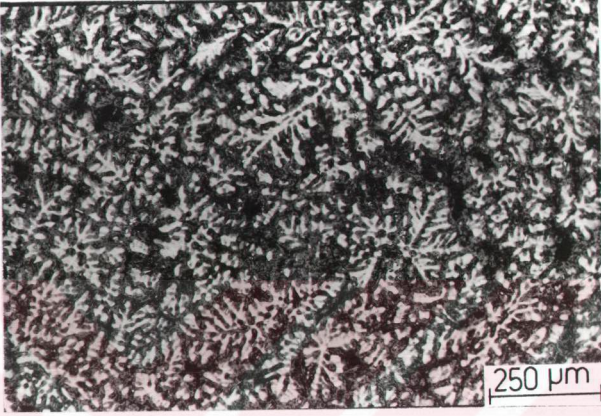
İntermetalik toz içeren ZnAl27Cu1 alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı, Şekil 22'de görüldüğü gibi, alüminyumca zengin α dendritleri ile bunların etrafını saran, çinkoca zengin η fazından oluşmaktadır. Dendritlerarası bölgelerde ayrıca, intermetalik toz parçacıklarının yer aldıkları görüldü, Şekil 23.

Yüksek oranda alüminyum içeren, monotektoid esaslı ZnAl60Cu2 alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı ise nisbeten daha geniş ve göbekli α dendritleri ile bunların arasındaki bölgelerde yer alan, çinkoca zengin η ve ϵ (CuZn_4) fazlarından oluşmaktadır, Şekil 24.

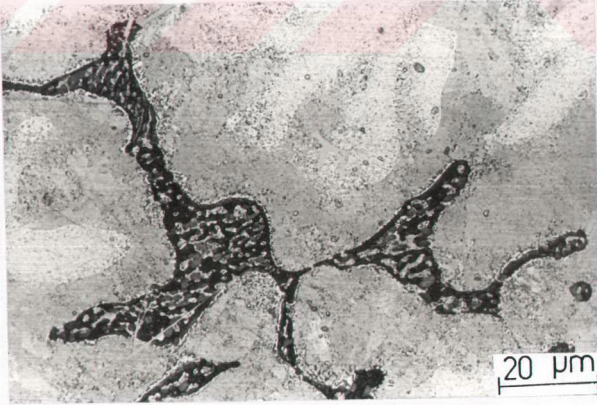
Dörtlü ZnAl27Cu2Si2 alaşımının iç yapısı da, α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin η ve ϵ fazları ile silisyum parçacıklarından oluşmaktadır, Şekil 25. Ayrıca, α dendritlerinin kenarlarında β fazının dönüşüm ürünlerinin yer aldığı görülmektedir.



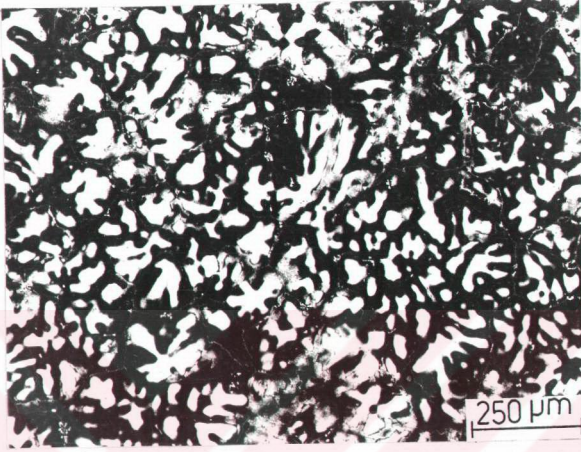
Şekil 21. ZnAl5Cu1 alaşımının iç yapısı



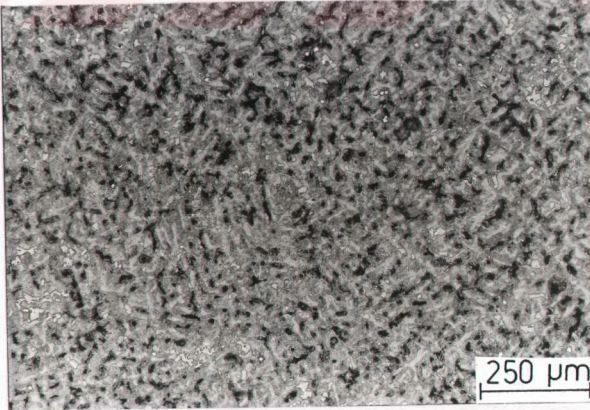
Şekil 22. ZnAl₂₇Cu₁ alaşımının içyapısı



Şekil 23. Şekil 22'de gösterilen yapı içerisindeki intermetalik tozların yüksek büyültmedeki görünümü.



Şekil 24. ZnAl60Cu2 alaşıminın içyapısı



Şekil 25. ZnAl27Cu2Si2 alaşıminın içyapısı

3.3. Mekanik Deney Sonuçları

Çekme deneyi ve sertlik ölçümleri sonucunda, söz konusu alaşımlardan elde edilen çekme mukavemeti, kopma uzaması ve sertlik değerleri Tablo 8'de verilmiştir. Aynı tabloda, ayrıca alaşımların yoğunluk değerleri de yer almaktadır. Bu tablodan, bakır ve silisyum katkılarının çinko-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmektedir.

Ötektoid esaslı, dörtlü $ZnAl_{27}Cu_3Si_3$ ve $ZnAl_{27}Cu_5Si_3$ alaşımlarının, üçlü $ZnAl_{27}Cu_2$ ve $ZnAl_{27}Cu_1$ alaşımlarından daha yüksek mukavemet değerlerine sahip oldukları belirlendi. Nitekim, bakır içeren, üçlü $ZnAl_{27}Cu_2$ alaşımının çekme dayanımı 314 N/mm^2 iken, silisyum içeren dörtlü $ZnAl_{27}Cu_3Si_3$ alaşımının çekme mukavemetinin 338 N/mm^2 olduğu görüldü. Diğer taraftan, intermetalik toz katma yönteminin de çinko-alüminyum esaslı alaşımların mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği görüldü. Nitekim, çekme dayanımı 338 N/mm^2 olan dörtlü $ZnAl_{27}Cu_3Si_3$ alaşımına, % 5 oranında intermetalik $Cu_{32}Al_{19}$ tozu katıldığında, çekme dayanımının % 10 oranında artarak 373 N/mm^2 değerine yükseldiği gözlemlendi.

Tablo 8. İncelenen alaşımların bazı mekanik ve fiziksel özellikleri

Alaşım no	Gösterim	Çekme mukavemeti (MPa)	Kopma uzaması (%)	Sertlik (BSD)	Yoğunluk (kg/m^3)
1	$ZnAl_5Cu_1$	206	2,2	109	6640
2	$ZnAl_{27}Cu_1$	338	1,2	139	4870
3	$ZnAl_{27}Cu_2$	314	1,0	117	4850
4	$ZnAl_{27}Cu_2Si_1$	287	2,0	97	4810
5	$ZnAl_{27}Cu_2Si_2$	325	0,8	125	4800
6	$ZnAl_{27}Cu_3Si_3$	338	0,85	140	4760
7	$ZnAl_{27}Cu_3Si_3Sb_3$	285	1,1	115	4300
8	$ZnAl_{27}Cu_5Si_3$	373	1,2	131	4100
9	$ZnAl_{40}Cu_2Si_1$	260	1,2	108	4110
10	$ZnAl_{40}Cu_4Si_2$	274	0,5	102	4120
11	$ZnAl_{60}Cu_2$	262	1,5	114	3590

3.4. Alaşımların Sürtünme ve Aşınma Deneyi İle İlgili Sonuçlar

Üretilen çinko-alüminyum esaslı alaşımların ve CuSn12 bronzunun sürtünme katsayıları ile çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler, aynı diyagram üzerinde çizilerek, sırası ile Şekil 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 ve 37'de verilmiştir. Bu eğrilerden görüldüğü gibi; genel olarak başlangıçta düşük olan sürtünme katsayısı değerleri, belirli süreler sonunda, aniden yükselip maksimum bir seviyelere (tepe) ulaştıktan sonra, hızlı bir şekilde düşerek kararlı değerlere erişmektedir. Sıcaklık eğrileri de, sürtünme katsayılarındaki değişimlere benzer davranışlar sergilemektedir. Başka bir deyişle alaşımların sürtünme katsayısı arttıkça çalışma sıcaklığı artmakta, sürtünme katsayısı azaldıkça çalışma sıcaklığı düşmektedir.

Kararlı çalışma devresinde en düşük sürtünme katsayısı (0.017) dördü ZnAl27Cu2Si2 alaşımından, en yüksek sürtünme katsayısı (0.038) ise, intermetalik toz içeren üçlü ZnAl27Cu1 alaşımından elde edildi. Diğer taraftan, alaşımların çalışma sırasındaki rejim sıcaklığının, kararlı devredeki sürtünme katsayısı ile doğru orantılı olarak değiştiği gözlemlendi. Nitekim; en düşük rejim sıcaklığı, sürtünme katsayısı en düşük olan ZnAl27Cu2Si2 alaşımından, en yüksek rejim sıcaklığı ise, sürtünme katsayısı en yüksek olan ZnAl27Cu1 alaşımından elde edildi.

Ötektoid esaslı ZnAl27Cu2Si2 alaşımının sürtünme katsayısının kayma hızına göre değişimini gösteren eğri Şekil 38'de verilmiştir. Elde edilen verilerin büyük ölçüde dağılım göstermelerine rağmen, bu eğri, dönme hızı arttıkça, söz konusu alaşımın sürtünme katsayısının düştüğünü göstermektedir.

Ötektoid esaslı ZnAl27Cu2Si2 ve ZnAl27Cu3Si3 alaşımları ile CuSn12 ticari bronzunun sürtünme katsayılarının, basınca göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 39'da verilmiştir. Bu eğrilerden görüldüğü gibi; sürtünme katsayısı, başlangıçta artan basınçla azalmakta, belirli bir basınç değerinden sonra ise, yükselmektedir.

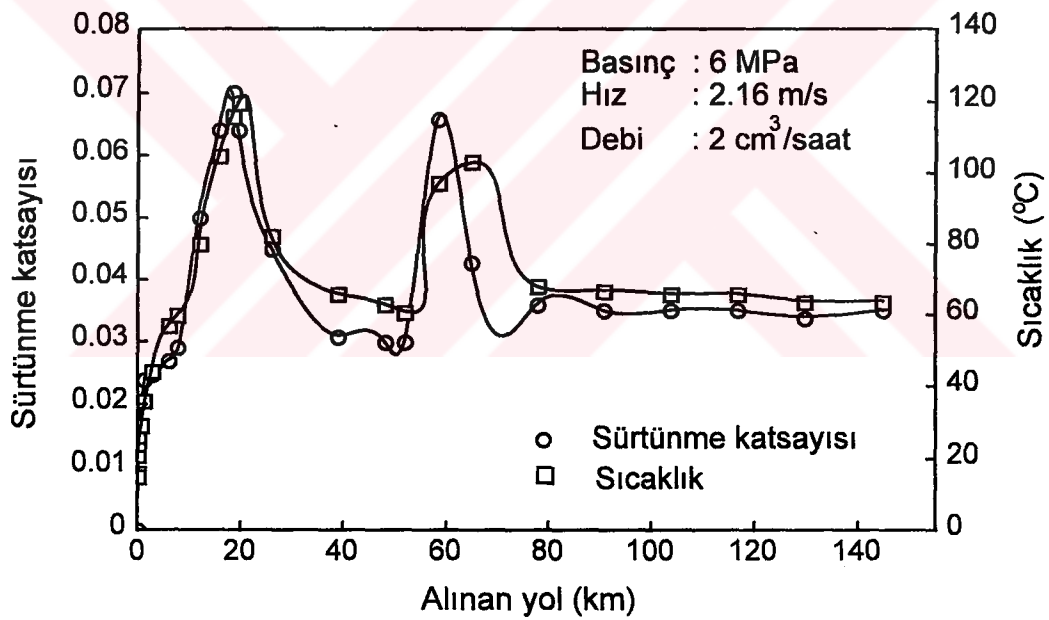
Ötektoid esaslı, üçlü ZnAl27Cu2 ile dörütlü ZnAl27Cu2Si1 alaşımlarının sürtünme katsayılarının yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler Şekil 40'da verilmiştir. Şekildeki eğrilerden, yağ debisinin sıfır olması durumunda, yani kuru sürtünme durumunda, alaşımlar yüksek sürtünme katsayısı değerleri (0.1-0.12) sergilerken, yüzeyler arasına 2 cm³/saat gibi düşük bir debide yağ gönderildiğinde, söz konusu alaşımların sürtünme katsayılarının hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Öte yandan, yağ debisi 2 cm³/saat değerinin üzerine çıkarıldığında, alaşımların sürtünme katsayılarının fazla değişmediği görüldü.

Aşınma deneyleri sonucunda, alaşımların aşınma miktarının, alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler belirlenerek Şekil 41'de verilmiştir. Alaşımların, ilk alıştırma devresinde yüksek olan aşınma hızlarının, zamanla azalarak, genelde sabit değerlere ulaştığı görüldü. Söz konusu deneyler sonucunda, dörütlü ZnAl40Cu2Si1 alaşımının en yüksek, ZnAl60Cu2 alaşımının ise en düşük aşınma dayanımına sahip oldukları belirlendi.

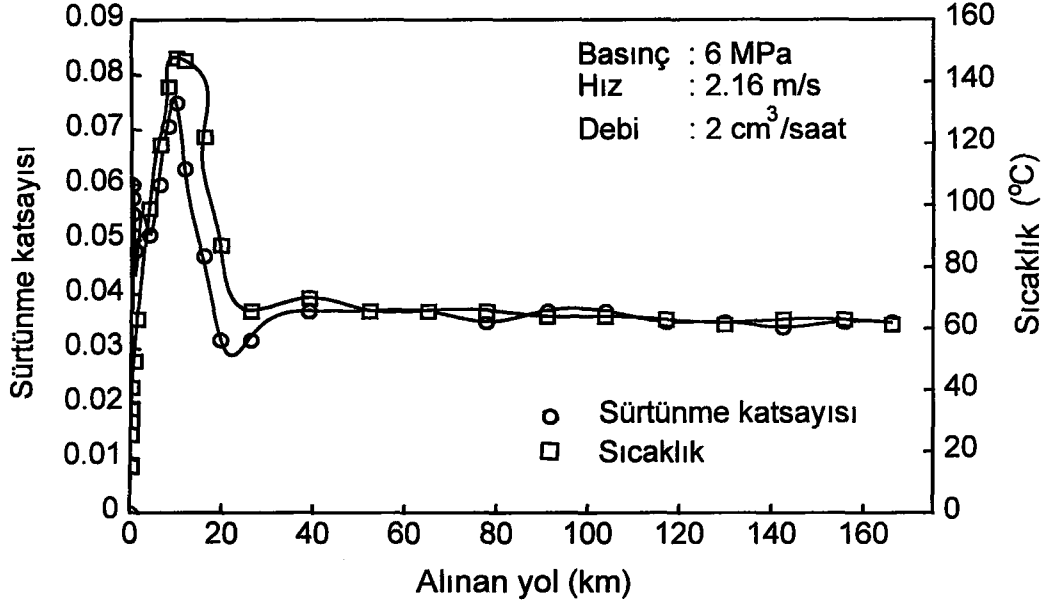
Yüzey basıncının, alaşımların aşınma miktarına etkisini gösteren eğriler ise, Şekil 42'de verilmiştir. Bu eğrilerden görüldüğü gibi, basınç değeri arttıkça aşınma miktarı da artmaktadır. Alaşımların aşınma miktarının, belirli bir basınç aralığında (8-11 MPa) önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Ötektik esaslı ZnAl5Cu1 alaşımı, 8 MPa'lık basınç değerine kadar, toplam 0.2 cm³ değerinde bir aşınma miktarı sergilerken, 11 MPa'lık basınç altında, aşınma miktarı 1.15 cm³ değerine yükselmektedir. Basınç deneyleri sonucunda, en düşük aşınma miktarı, ötektoid esaslı ZnAl27Cu3Si3 alaşımından, en yüksek aşınma miktarı ise ötektik esaslı ZnAl5Cu1 alaşımından elde edildi.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlara ait numunelerin aşınmış yüzeylerinin birbirine çok benzediği görüldü. Bu nedenle, söz konusu alaşımların aşınma deneyine tabi tutulan numunelerini temsilen yalnız ZnAl40Cu2Si1 alaşımının aşınma yüzeyinden elde edilen SEM görüntüleri verildi. Şekil 43'de, 6 MPa'lık basınç, 2,16m/s'lik hız ve 2cm³ /dak'lık debi değerinde sürtünme deneyine tabi tutulan ZnAl40Cu2Si1 alaşımının aşınma yüzeyine ait sekonder elektron görüntüsü

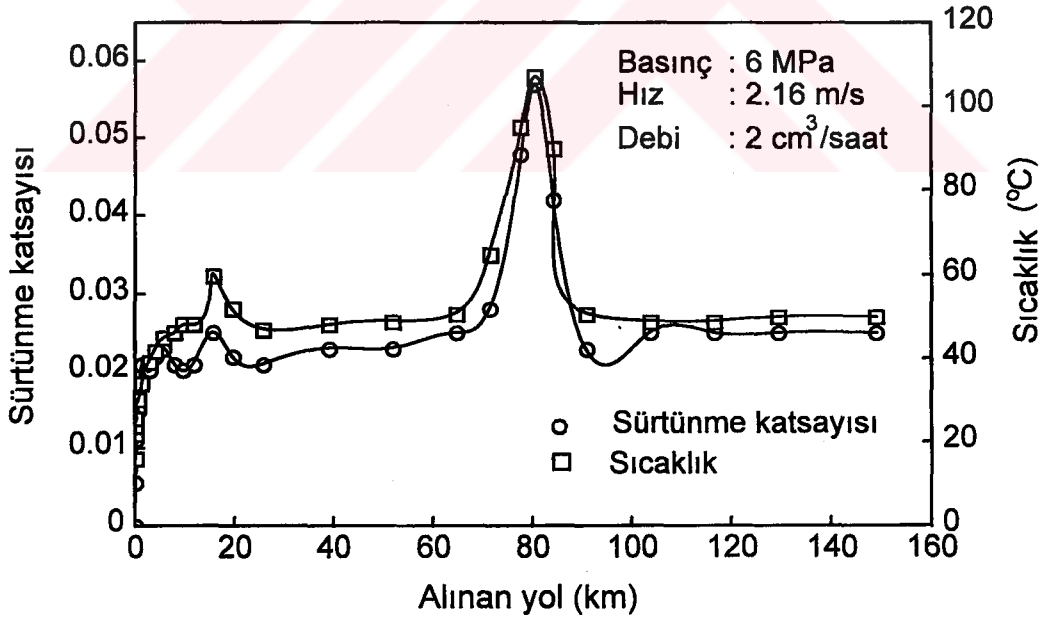
yer almaktadır. Bu fotoğraf, yüzeydeki hafif aşınma çizikleri ile yüzeye sıvanmış durumda bulunan sürtünme tabakasını göstermektedir. Başka bir deyişle; söz konusu alaşımda aşırı bir aşınma belirtisi meydana gelmemiştir. Aynı çalışma şartlarında deneye tabi tutulan CuSn12 bronzunun aşınma yüzeyine ait görüntü ise, Şekil 44'de verilmiştir. Bronz numunesinin aşınma yüzeyinde çok sayıda ve daha derin aşınma çizikleri ile çukurcukların oluştuğu gözlenmiştir. Bu inceleme sonucunda; bronzun, aynı şartlarda deneye tabi tutulan çinko-alüminyum esaslı alaşımların çoğundan daha fazla aşınmaya maruz kaldığı belirlenmiştir.



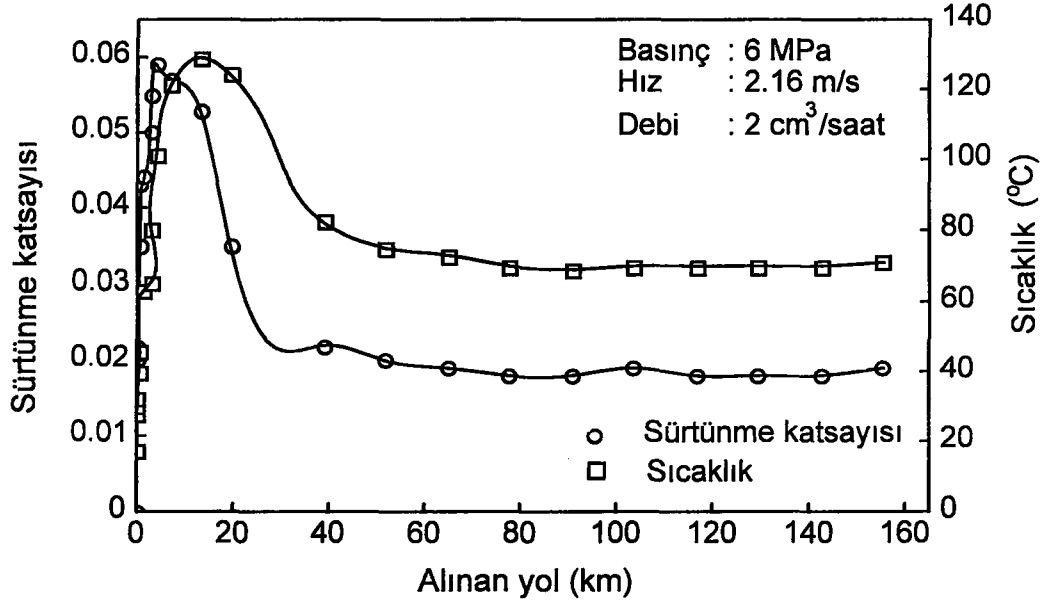
Şekil 26. ZnAl5Cu1 alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



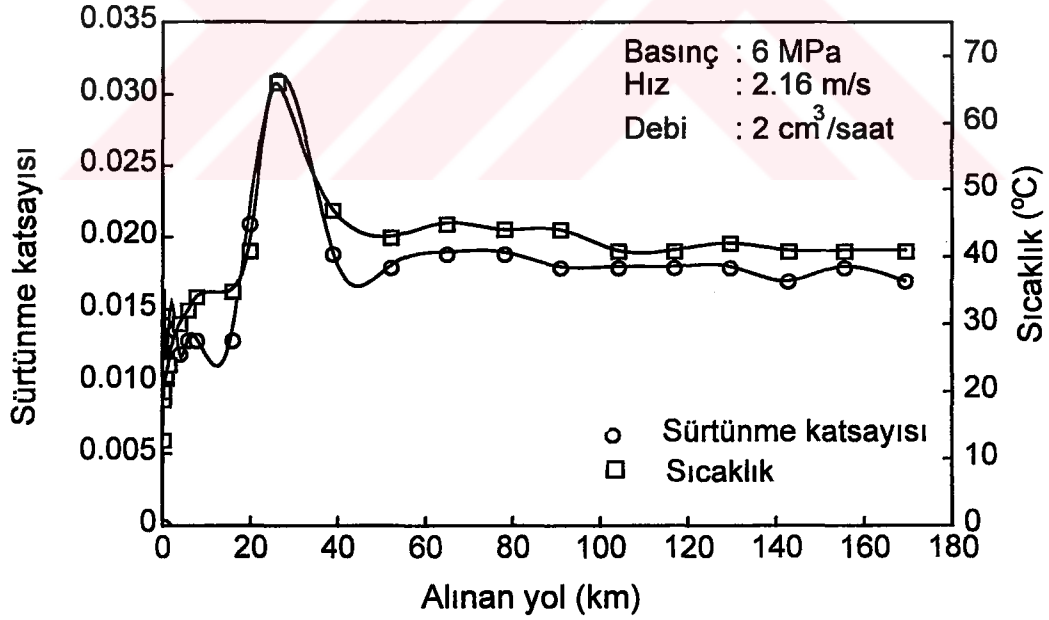
Şekil 27. ZnAl₂₇Cu₁ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



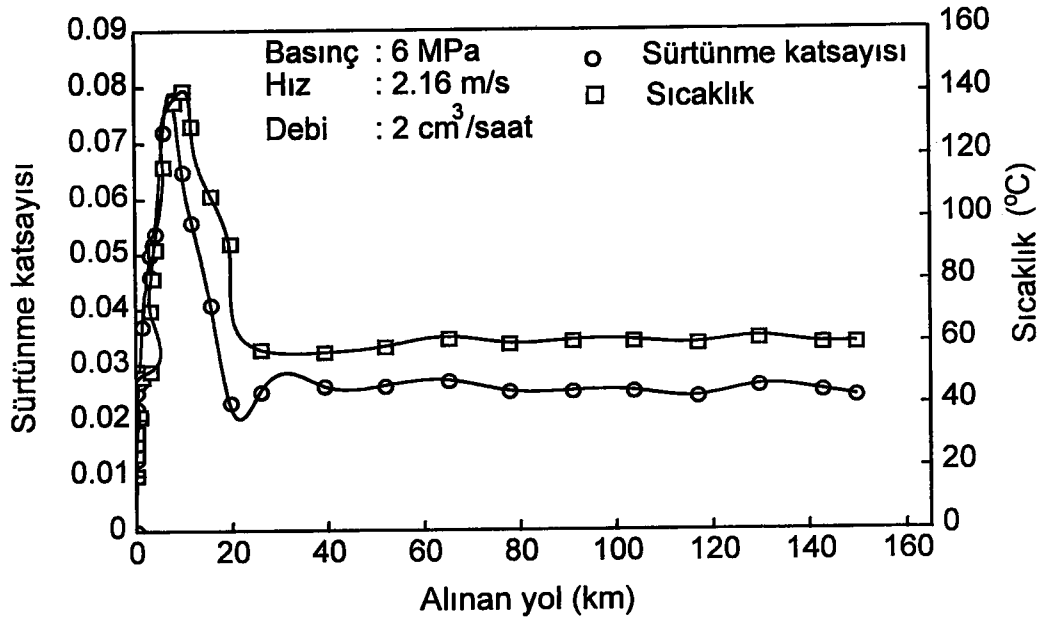
Şekil 28. ZnAl₂₇Cu₂ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



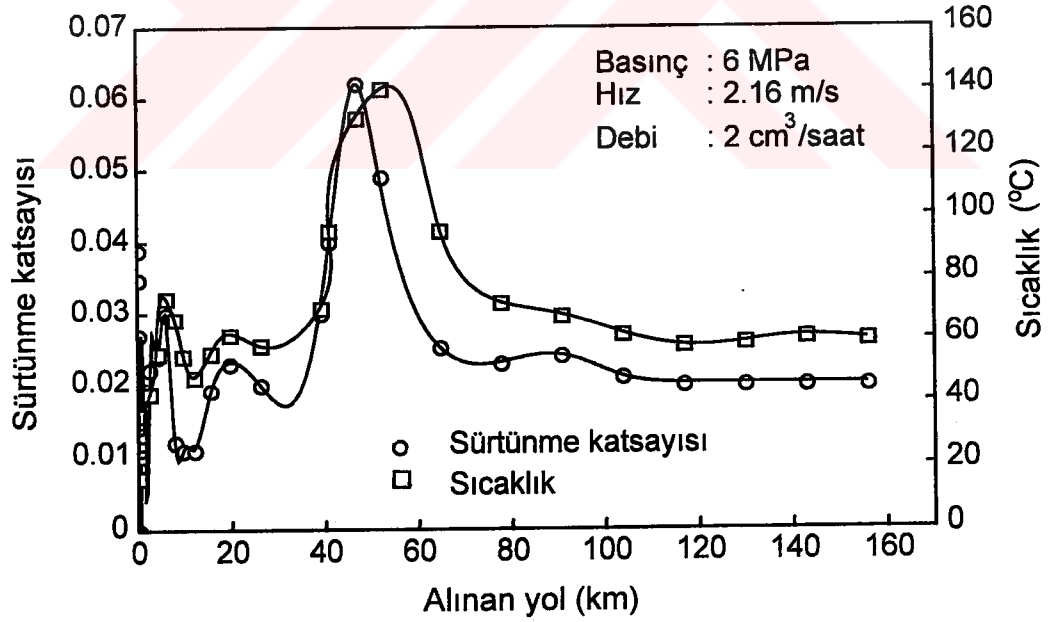
Şekil 29. ZnAl₂₇Cu₂Si₁ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



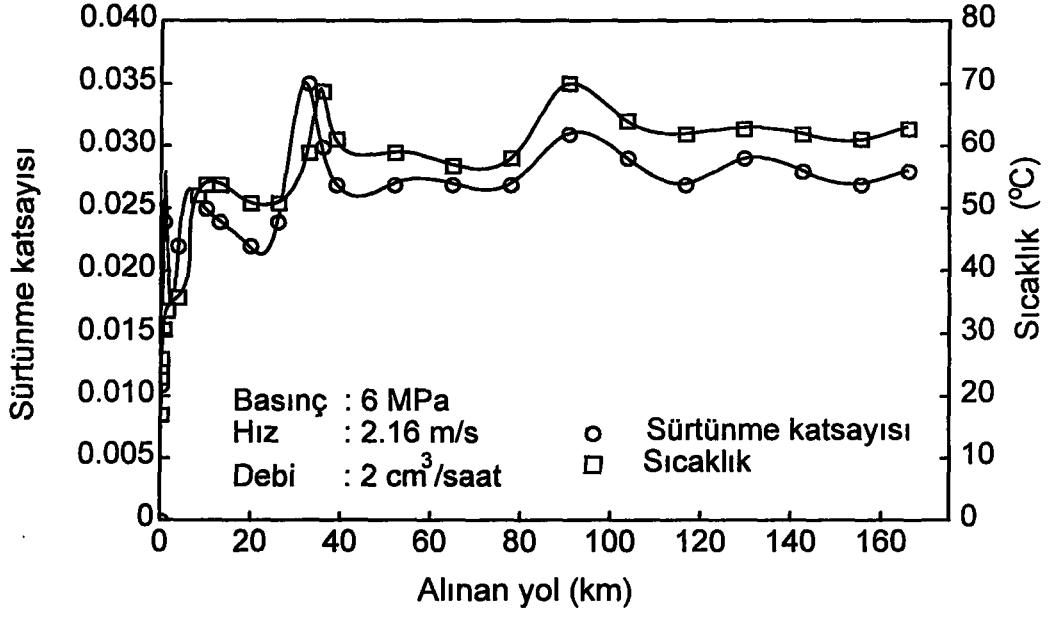
Şekil 30. ZnAl₂₇Cu₂Si₂ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



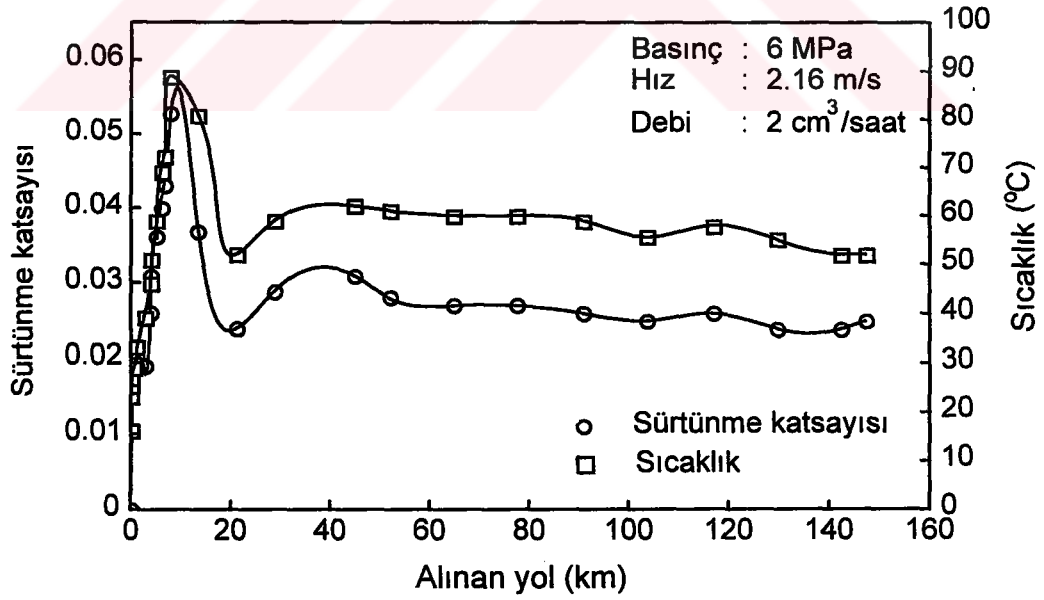
Şekil 31. ZnAl₂₇Cu₃Si₃ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



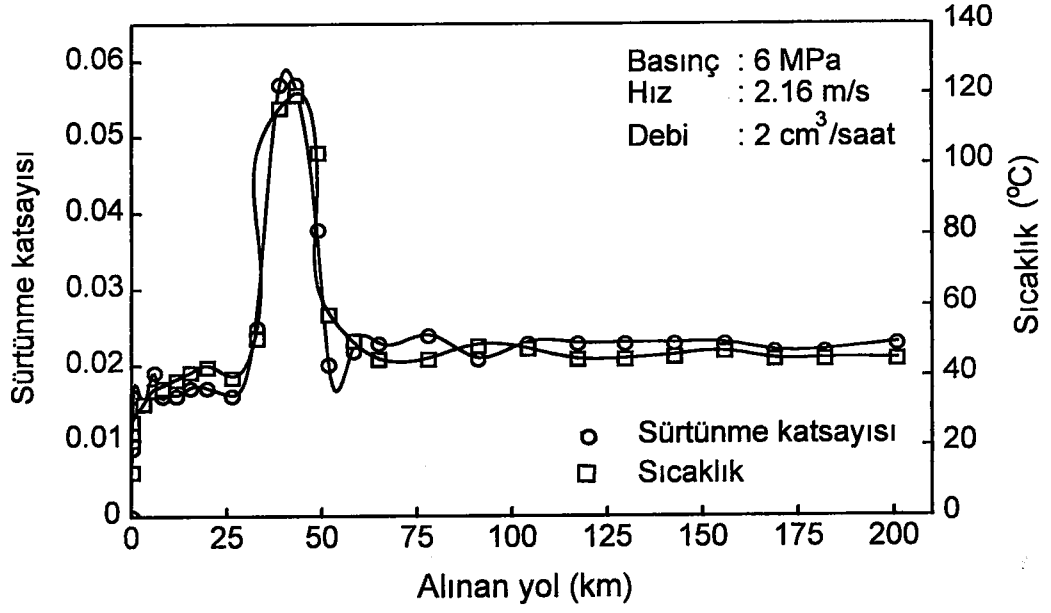
Şekil 32. ZnAl₂₇Cu₃Si₃Sb₃ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



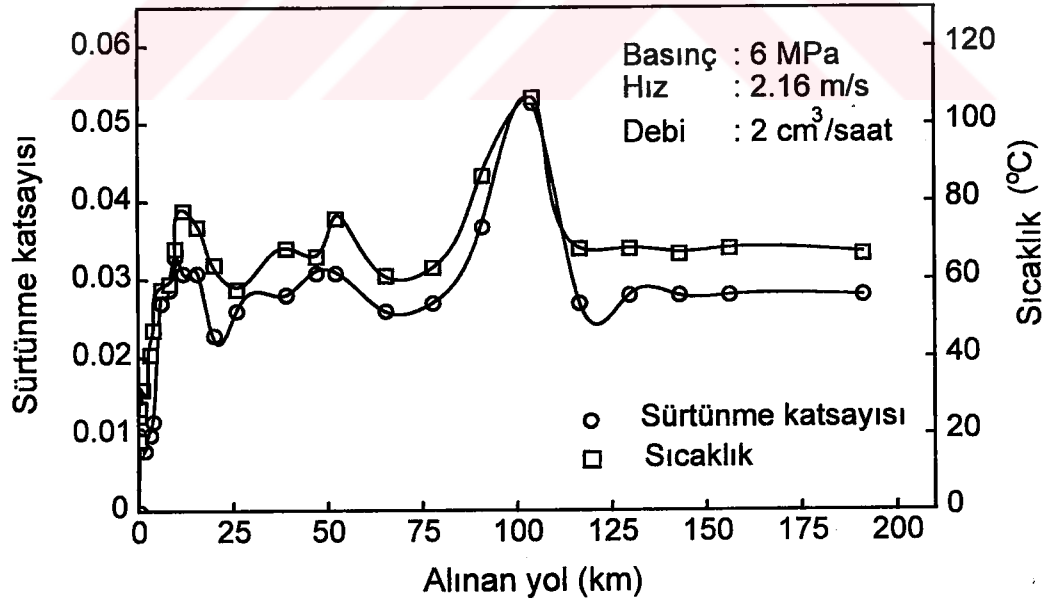
Şekil 33. ZnAl₂₇Cu₅Si₃ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



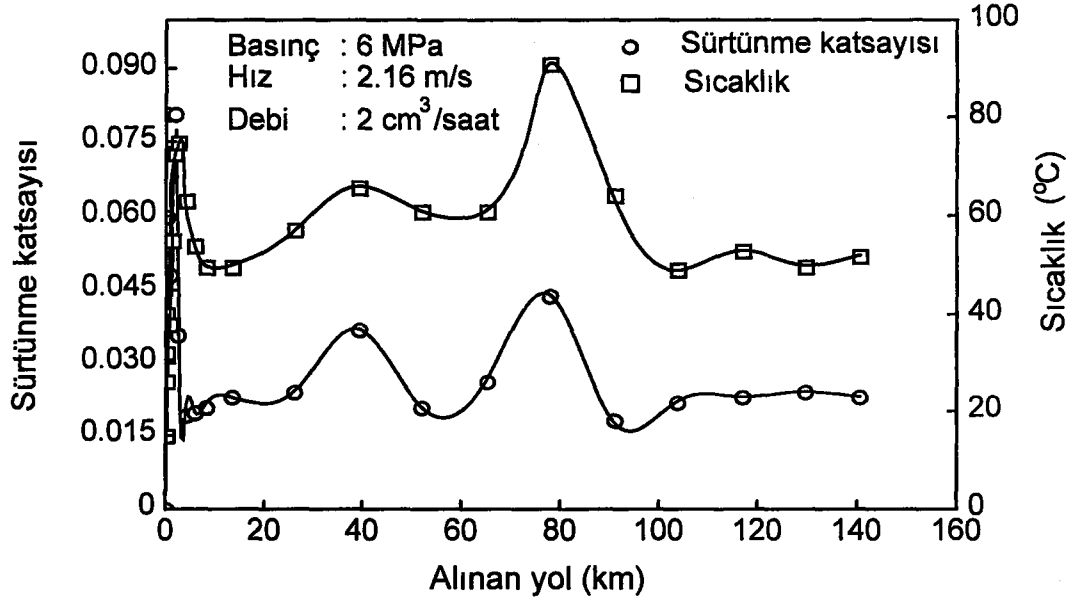
Şekil 34. ZnAl₄₀Cu₂Si₁ alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



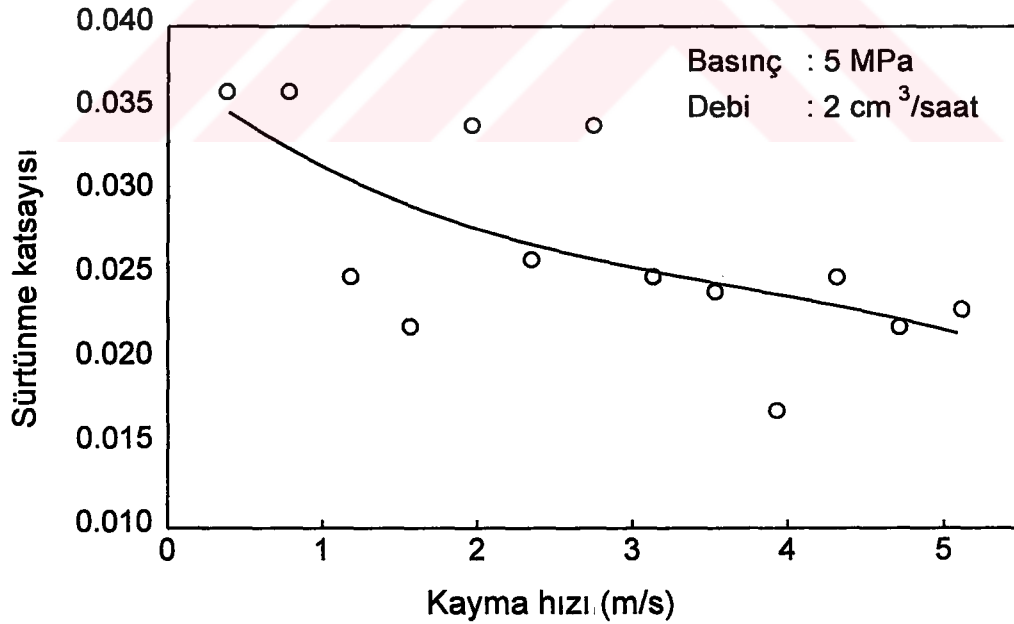
Şekil 35. ZnAl40Cu4Si1 alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



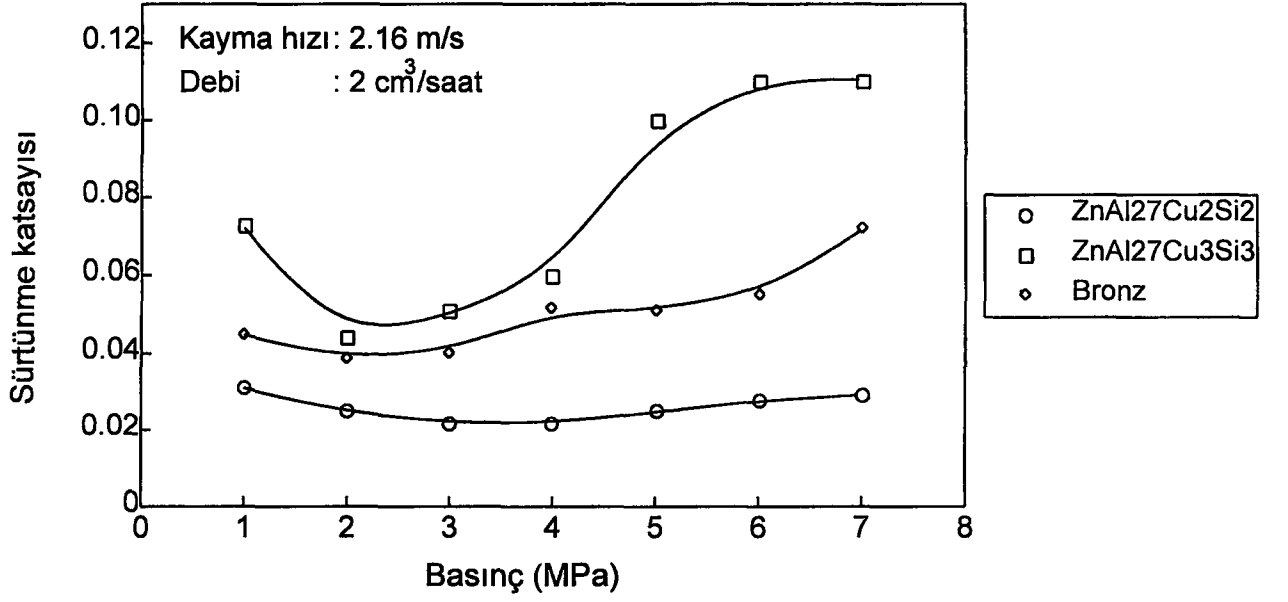
Şekil 36. ZnAl60Cu2 alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



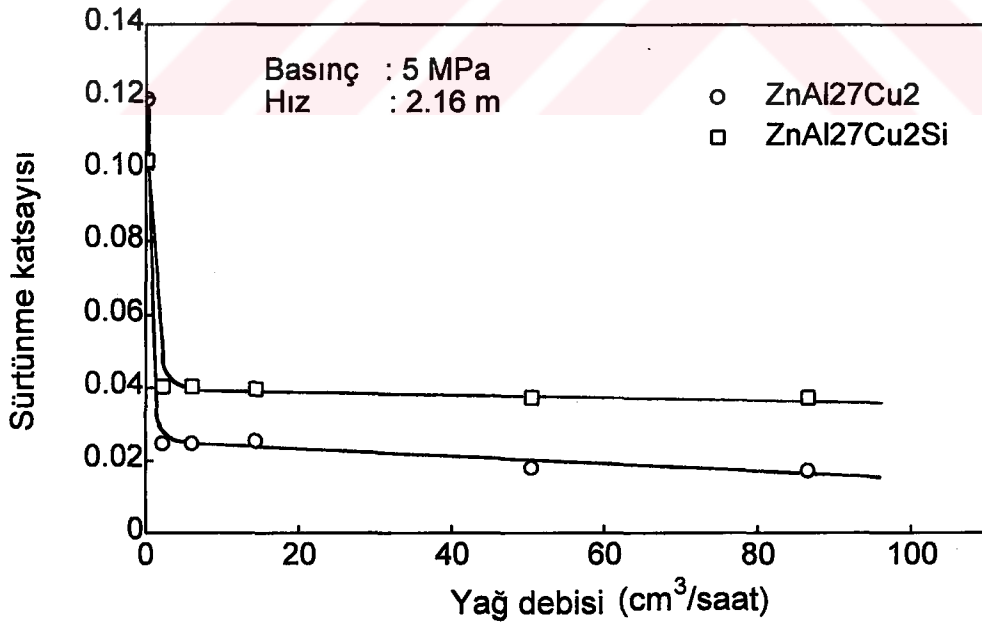
Şekil 37. CuSn12 bronzunun sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



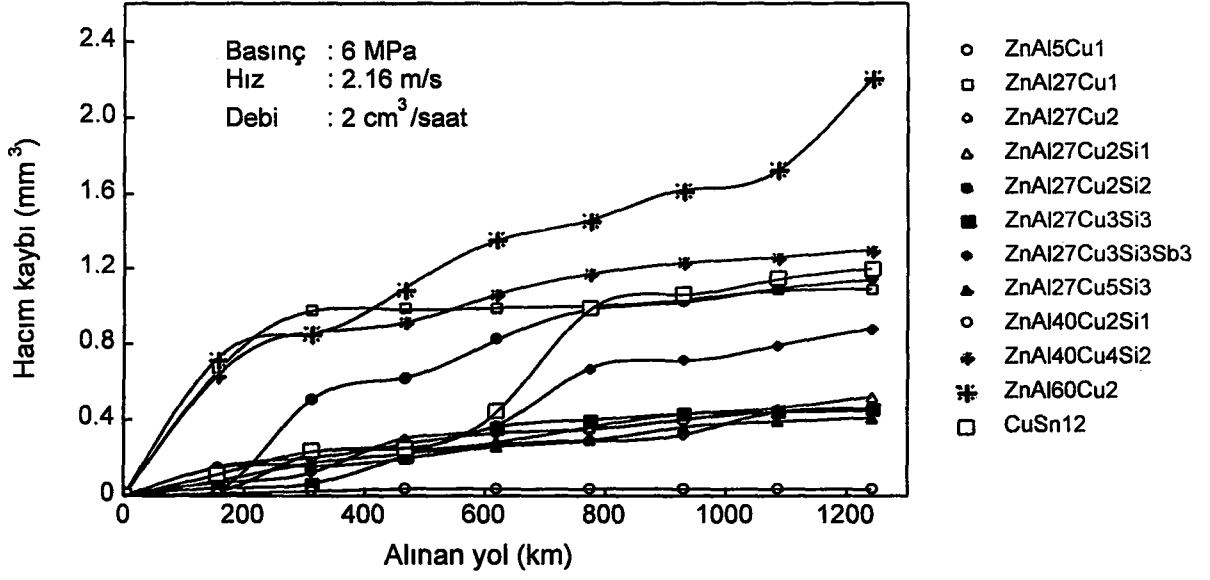
Şekil 38. ZnAl27Cu2Si2 alaşımının sürtünme katsayısının kayma hızına göre değişimi.



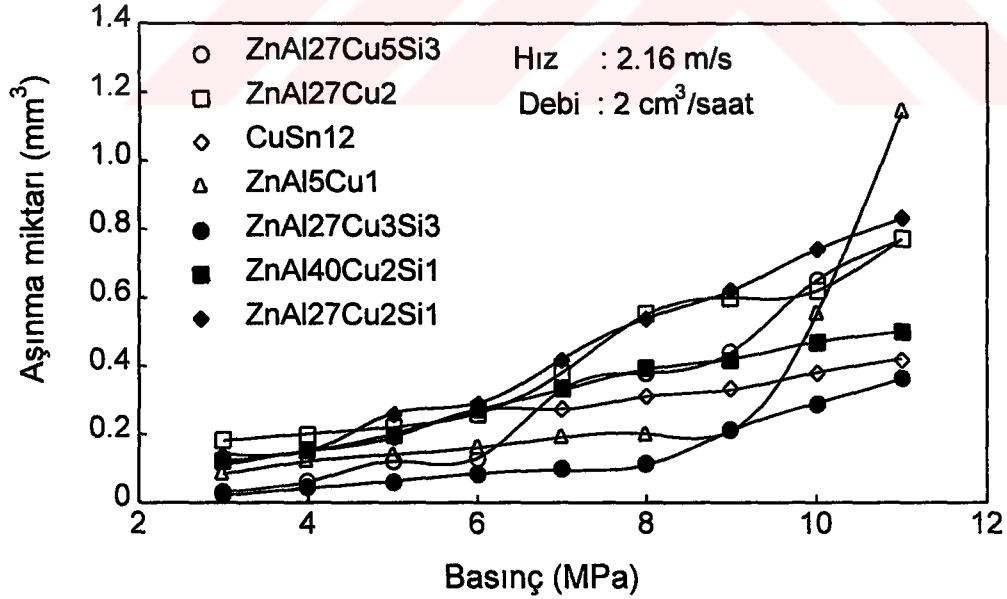
Şekil 39. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile CuSn12 bronzunun sürtünme katsayılarının basınca göre değişimini gösteren eğriler



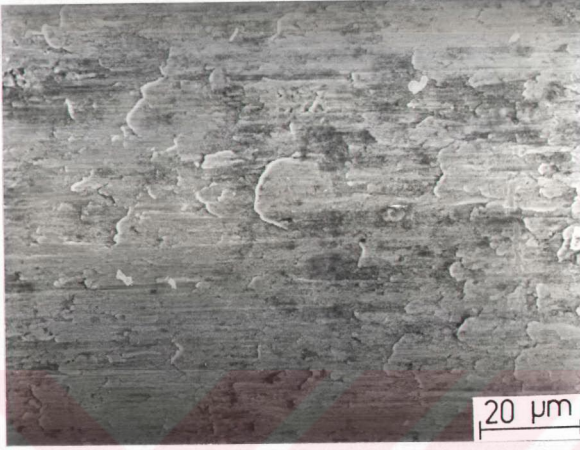
Şekil 40. ZnAl27Cu2 ve ZnAl27Cu2Si2 alaşımlarının sürtünme katsayılarının yağ debisine göre değişimi



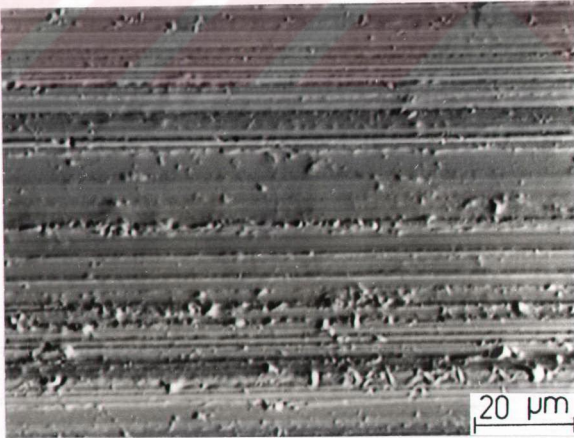
Şekil 41. İncelenen alaşımların aşınma miktarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 42. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların ve CuSn12 bronzunun aşınma miktarının basınca göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 43. 6 MPa'lık basınç altında ve 2.16 m/s ' lik sabit kayma hızında deney tabi tutulan ZnAl40Cu2Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 44. 6 MPa'lık basınç altında ve 2.16 m/s ' lik sabit kayma hızında deney tabi tutulan CuSn12 bronzunun aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

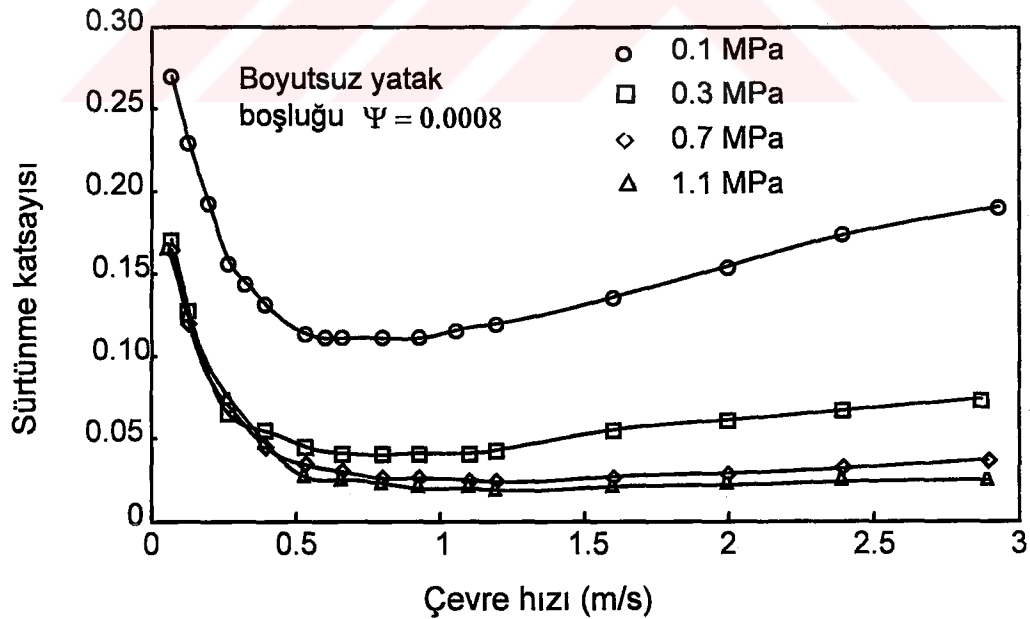
3.5. İmal Edilen Kaymalı Yatakların Sürtünme Deneyleri İle İlgili Sonuçlar

Çinko-alüminyum esaslı üçlü $ZnAl_{27}Cu_2$ (ZA-27) ve dörtlü $ZnAl_{27}Cu_2Si_1$, $ZnAl_{27}Cu_2Si_2$ ve $ZnAl_{40}Cu_2Si_1$ alaşımları ile ticari $CuSn_{12}$ bronzundan imal edilen kaymalı yataklarla yapılan sürtünme deneylerinden elde edilen verilerden yararlanılarak, sürtünme katsayısının çevre hızına göre değişimini gösteren eğriler belirlendi. Söz konusu eğriler Stribeck eğrilerine çok benzediklerinden, burada örnek olarak yalnız $ZnAl_{27}Cu_2$ (ZA-27) alaşımından elde edilen eğriler verilmiştir. Şekil 45’de verilen bu eğrilerden görüldüğü gibi; sürtünme katsayısı başlangıçta artan dönme hızı ile hızlı bir şekilde düşerek, bir minimum değere ulaşmakta ve bu noktadan sonra dönme hızı ile doğru orantılı olarak, yavaş bir şekilde artmaktadır. Hidrodinamik yağlama bölgesinde yatak basıncı arttıkça, sürtünme katsayısı değerlerinin düştüğü görülmektedir. Söz konusu bölgede; 750 d/dak’lık sabit bir devir sayısında (2 m/s), en düşük sürtünme katsayısı değeri (0.022 olarak) en yüksek yatak basıncı olan 1.1 MPa’ da elde edilirken, aynı devir sayısında en yüksek sürtünme katsayısı değeri (0.16) ise, en düşük yatak basıncı olan 0.1 MPa’da elde edildi.

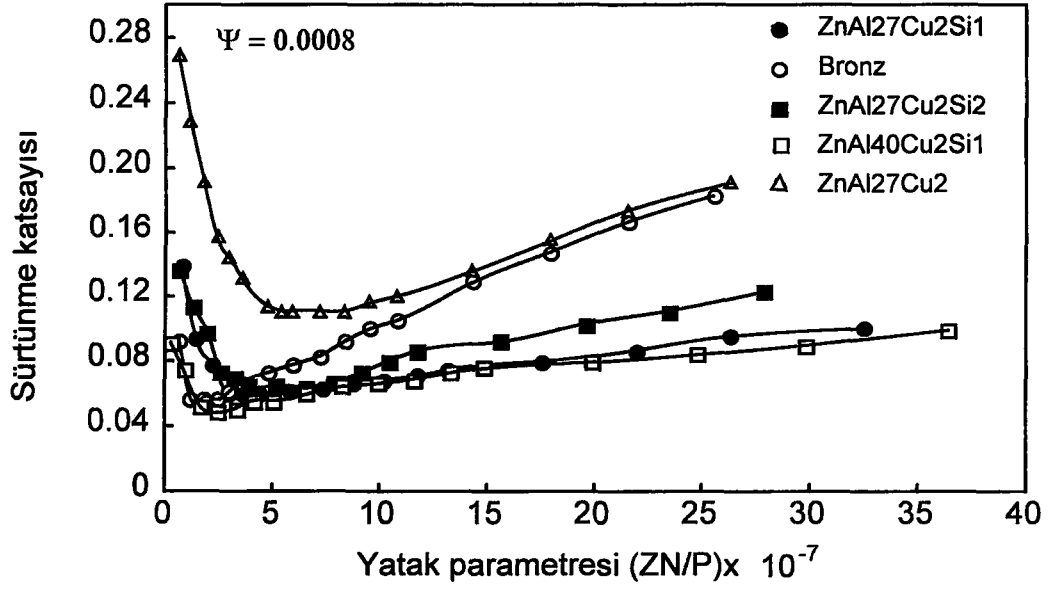
Sürtünme deneyine tabi tutulan yatakların, sürtünme katsayılarının, yatak parametresine göre (ZN/P) değişimini gösteren Stribeck eğrileri belirlenerek, Şekil 46, 47, 48 ve 49’de verilmiştir. Bu eğrilerden, sınır sürtünme devresi olarak adlandırılan dönemde, sürtünme katsayısının artan yatak parametresi ile ters orantılı olarak, hızlı bir şekilde düşerek minimum bir değere ulaştığı ve bu değerden sonra yavaş yavaş yükseldiği görülmektedir. Ancak, bu durumun tersine, $ZnAl_{27}Cu_2Si_2$ alaşımından imal edilen yatağın sürtünme katsayısı; 0.7 ve 1.1 MPa’lık yatak basınçlarında artan yatak parametresi ile düşmektedir.

Genelde, basınç arttıkça, yatakların sürtünme katsayılarının düştüğü gözlemlendi. Öte yandan, yatak basıncı arttıkça Stribeck eğrilerinin hidrodinamik yağlama bölgesine karşılık gelen, doğrusal kısmının eğiminin azaldığı görüldü.

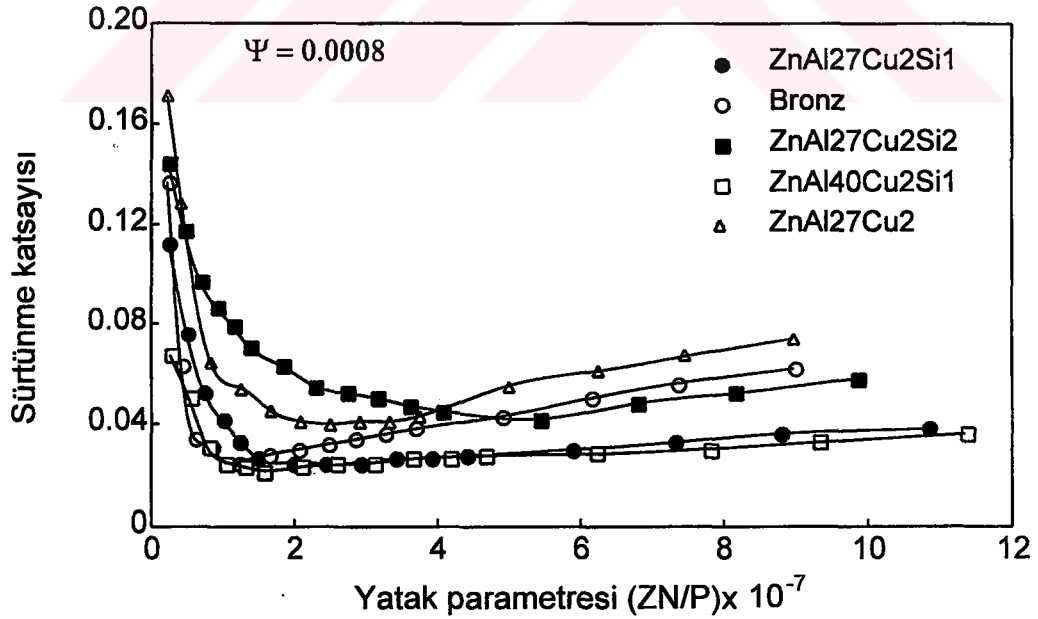
Yatak boşluğunun, söz konusu yatakların sürtünme katsayılarına etkisini incelemek için, yalnız ZnAl27Cu2 (ZA 27) alaşımından, boşlukları 40 μm ($\Psi=0.0008$), 66 μm ($\Psi=0.0013$) ve 100 μm ($\Psi=0.0020$) olan üç değişik yatak imal edildi ve bu yataklar sürtünme deneylerine tabi tutuldu. Burada, Ψ bağıl yatak boşluğunu göstermektedir. Söz konusu yataklardan elde edilen Stribeck eğrileri sırasıyla Şekil 50, 51,52 ve 53'de verildi. Bu eğrilerden görüldüğü gibi; yatakların radyal boşluğu arttıkça sürtünme katsayıları düşmektedir. Bu durum, özellikle 0.1 ve 0.3 MPa gibi düşük yatak basınçlarında daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, radyal boşluğun artması; karışık yağlama devresinin kısalarak, hidrodinamik yağlamanın daha düşük yatak parametrelerinde ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Nitekim; 0.1 MPa'lık yatak basıncı altında çalışan ve 40 μm 'lik radyal boşluğa sahip yatakta, yatak parametresi 10 iken, 66 μm 'lik radyal boşluğa sahip yatak için bu parametrenin 3 olduğu gözlemlendi.



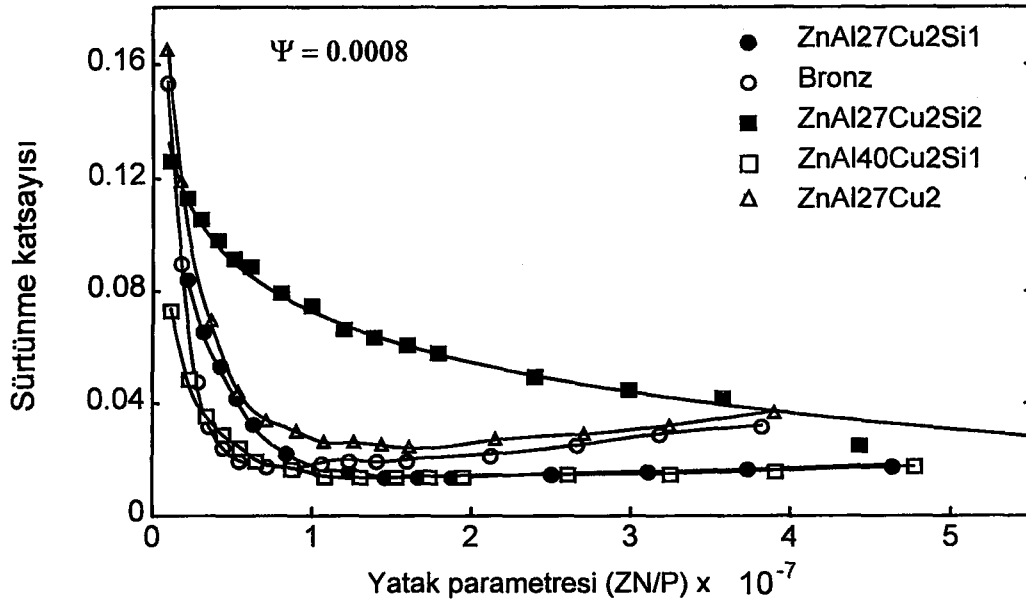
Şekil 45. ZnAl27Cu2 alaşımından imal edilen yatağın, değişik basınçlardaki sürtünme katsayılarının çevre hızına göre değişimini gösteren eğriler



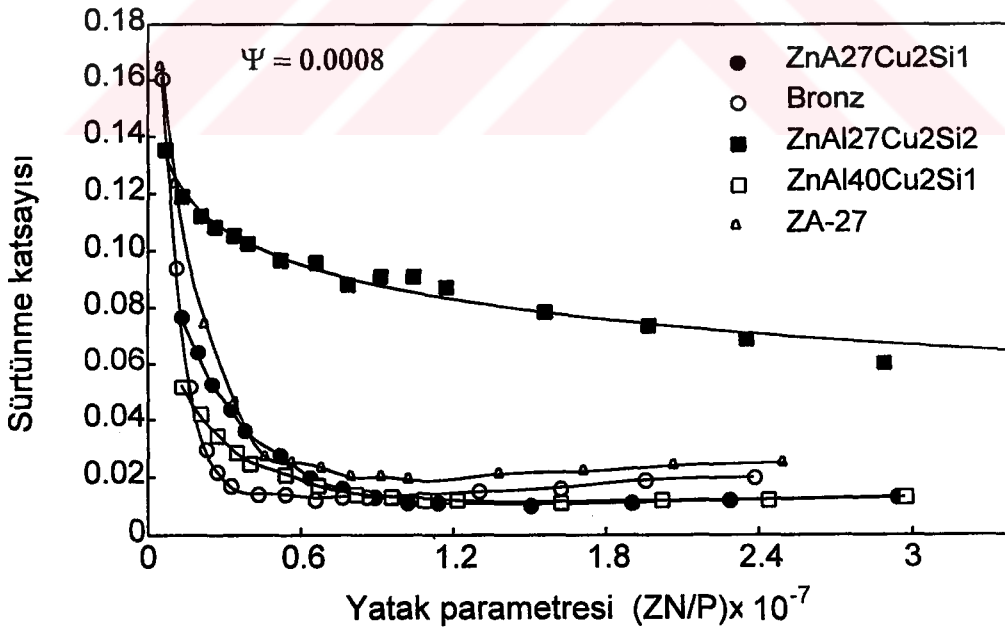
Şekil 46. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile CuSn12 bronzundan imal edilen yataklardan, 0.1 MPa'lık sabit basınç altında elde edilen Stribeck eğrileri



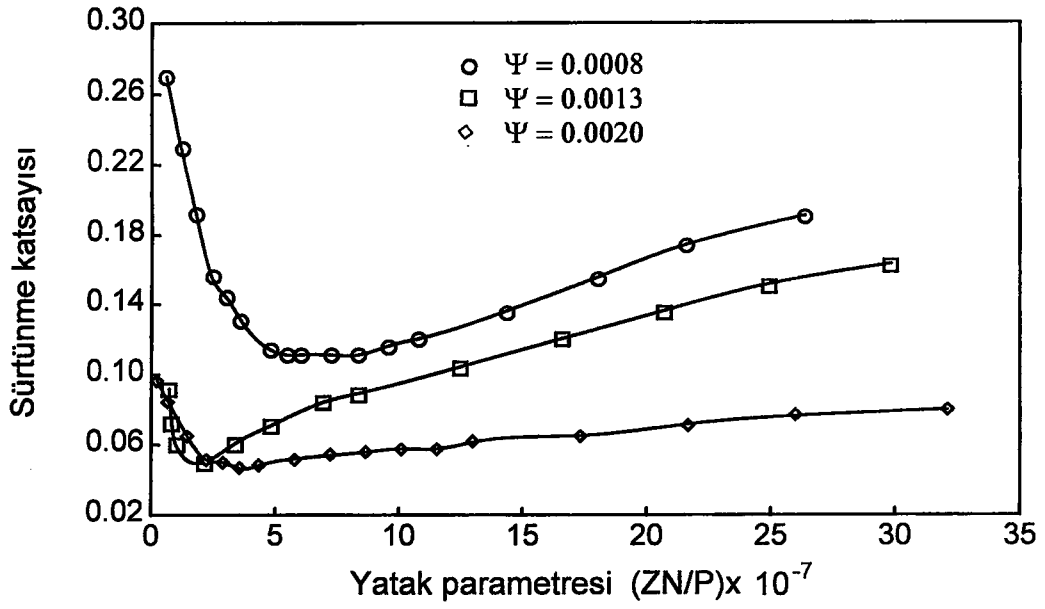
Şekil 47. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile CuSn12 bronzundan imal edilen yataklardan, 0.3 MPa'lık sabit basınç altında elde edilen Stribeck eğrileri



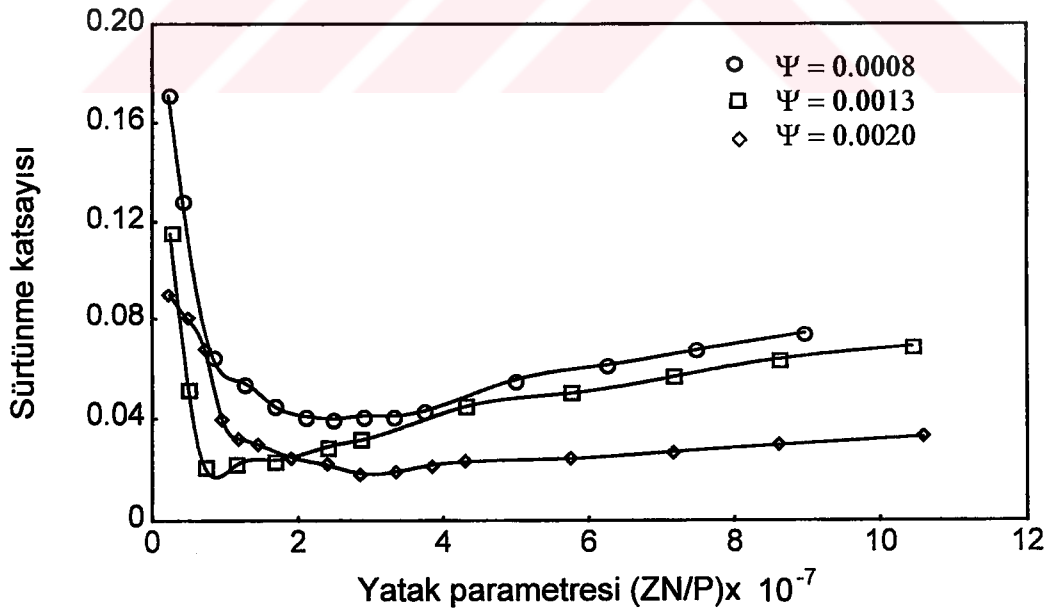
Şekil 48. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile CuSn12 bronzundan imal edilen yataklardan, 0.7 MPa'lık basınç altında elde edilen Stribeck eğrileri



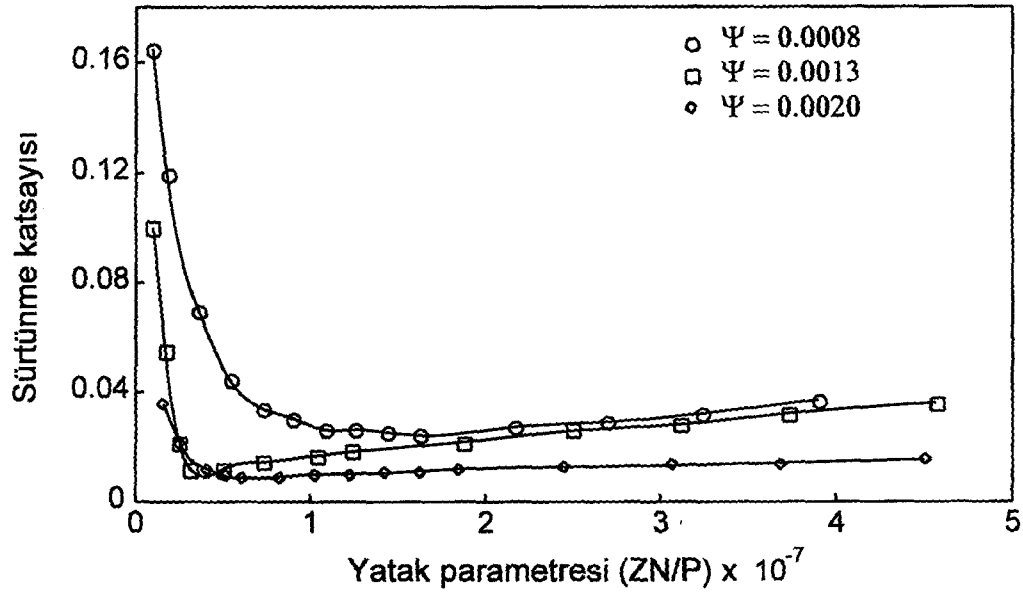
Şekil 49. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile CuSn12 bronzundan imal edilen yataklardan, 1.1 MPa değerindeki basınç altında elde edilen Stribeck eğrileri



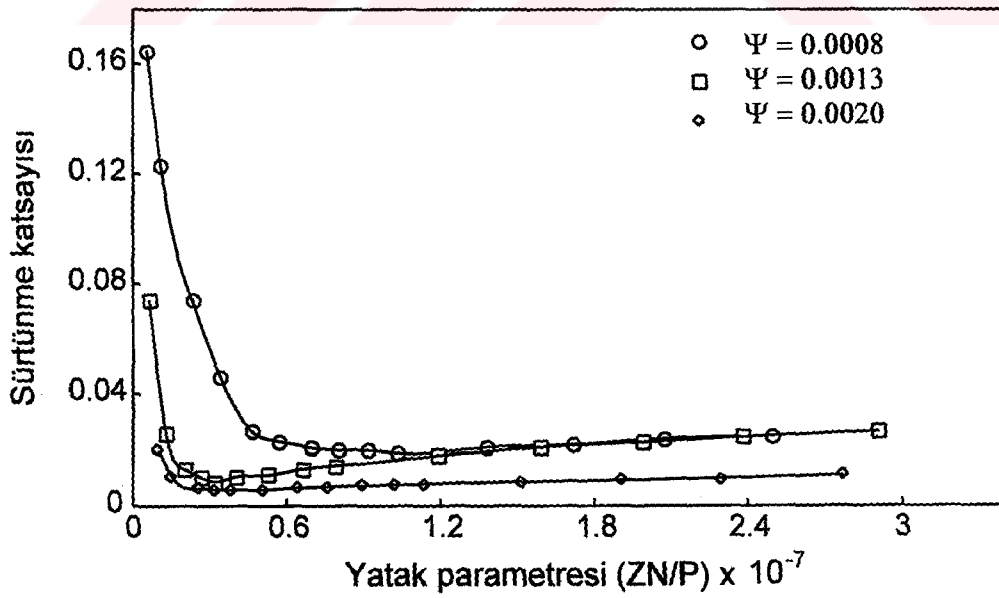
Şekil 50. ZnAl₂₇Cu₂ alaşımından imal edilen yataktan, sabit basınç (0.1 MPa) ve üç değişik radyal boşluk değerlerinde elde edilen Stribeck eğrileri



Şekil 51. ZnAl₂₇Cu₂ alaşımından imal edilen kaymalı yataktan, sabit basınç (0.3 MPa) ve üç değişik radyal boşluklarda elde edilen Stribeck eğrileri



Şekil 52. ZnAl₂₇Cu₂ alaşımından imal edilen yataktan 0.7 MPa'lık basınç ve üç değişik radyal boşlukta elde edilen Stribeck eğrileri



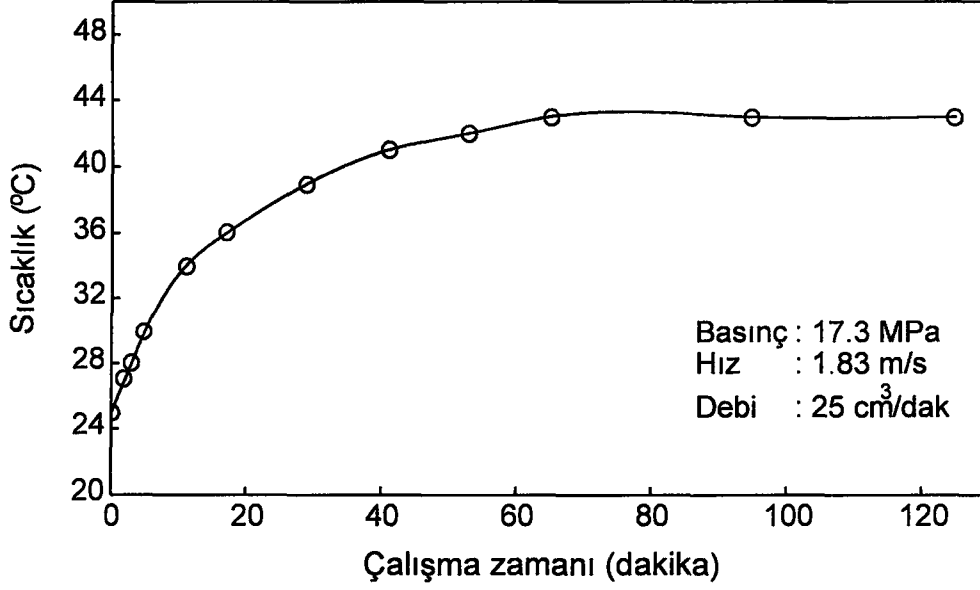
Şekil 53. ZnAl₂₇Cu₂ alaşımından imal edilen kaymalı yataktan 1.1 MPa'lık basınç ve değişik radyal boşluklarda elde edilen Stribeck eğrileri

3.6. İmal Edilen Yatakların Aşınma Deneyleri İle İlgili Sonuçlar

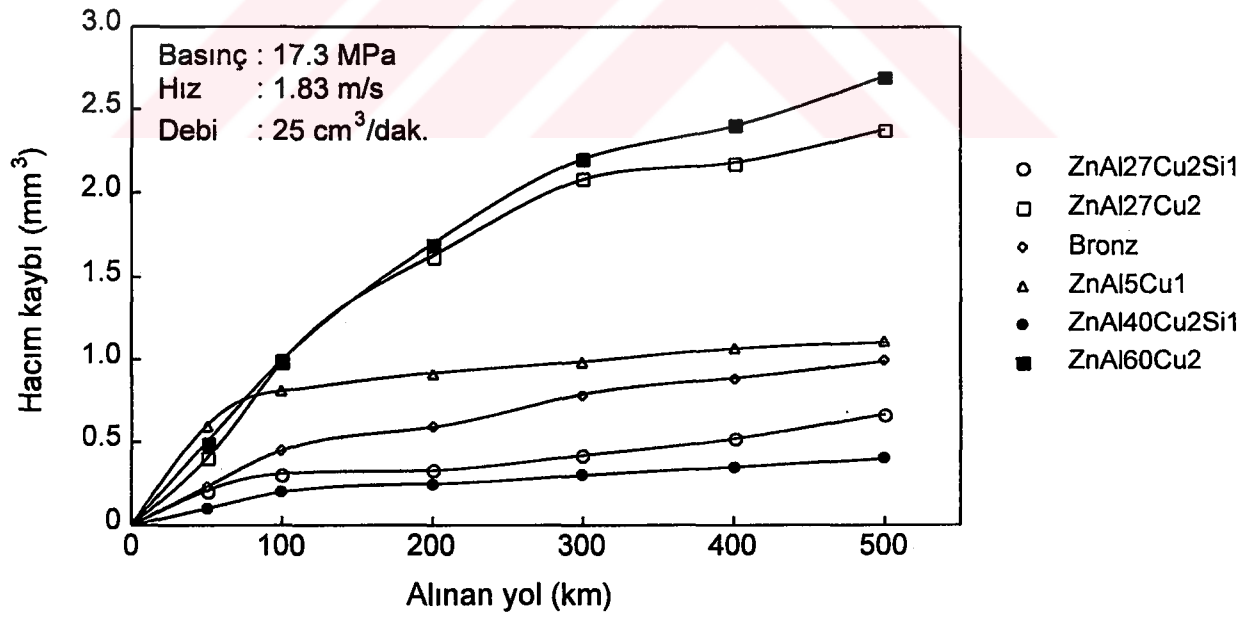
Çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan ve CuSn12 bronzundan imal edilen yatakların, çalışma sırasındaki sıcaklıklarının, birbirine çok yakın şekilde artarak 39-45 °C arasında rejime ulaştıkları görüldü. Ötektoid esaslı ZnAl27Cu2Si1 alaşımından imal edilen yatağın sıcaklığının, çalışma süresine göre değişimini gösteren eğri Şekil 54'de verilmiş olup, bu eğri diğer alaşımlardan imal edilen yataklar için de geçerlidir. Eğriden görüldüğü gibi; çalışmanın başlangıç safhasında, yatağın sıcaklığı hızlı bir şekilde yükselmekte ancak, ilerleyen zaman içerisinde sıcaklığın artış hızı azalarak, 70 dakikalık çalışma süresi sonunda sabit bir değere ulaşmaktadır.

Aşınma deneyi sırasında, yataklarda meydana gelen hacim kaybının, alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 55'de verilmiştir. Bu eğrilerden görüldüğü gibi; söz konusu yataklarda alıştırma devresinde, yüksek olan aşınma hızları, gittikçe azalarak, belirli süreler sonunda kararlı duruma ulaşmaktadır. Aşınma deneyine tabi tutulan yataklar içerisinde en yüksek aşınma miktarı ZnAl60Cu2 alaşımından imal edilen yatakta, en düşük aşınma miktarı ise, ZnAl40Cu2Si1 alaşımından imal edilen yatakta meydana geldiği görüldü.

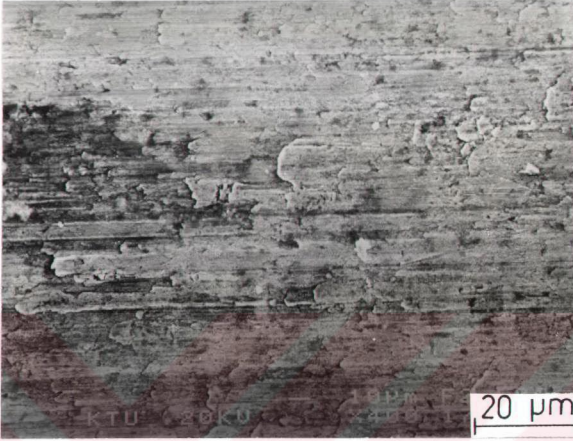
Taramalı elektron mikroskopunda yapılan inceleme sonucunda, gerek çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan, gerekse CuSn12 bronzundan imal edilen yatakların aşınma yüzeylerinin, söz konusu malzemelere ait numunelerinin aşınma yüzeylerine çok benzedikleri gözlemlendi. ZnAl40Cu2Si1 alaşımı ile CuSn12 bronzundan imal edilen ve 17.3 MPa'lık yatak basıncı ve 25 cm³/dak.'lık yağ debisinde, toplam 76 saat aşınma deneyine tabi tutulan yatakların aşınma yüzeylerinden elde edilen SEM aydınlık alan görüntüleri sırasıyla Şekil 56 ve 57'de verilmiştir. Bu fotoğraflardan, Zn-Al esaslı yatakta yüzeyde sıvama şeklinde hafif aşınma belirtileri gözlenirken, bronz yatağın yüzeyinde derin aşınma çizikleri ile çukurcukların oluştuğu görülmektedir. Bu durum bronz yatağın daha fazla aşınmaya maruz kaldığını göstermektedir.



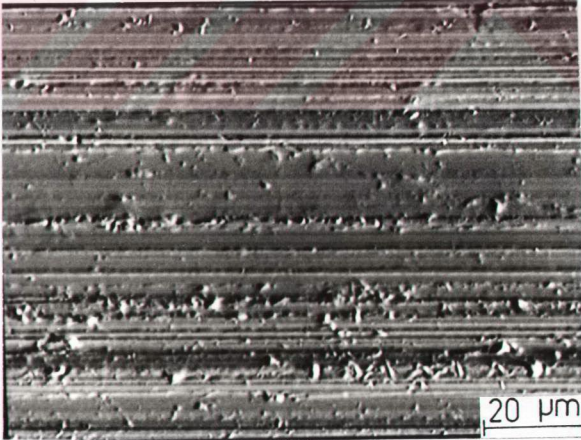
Şekil 54. ZnAl27Cu2Si1 alaşımından imal edilen yatağın sıcaklığının çalışma zamanına göre değişimini gösteren eğri



Şekil 55. İncelenen alaşımlardan ve bronzdan imal edilen kaymalı yataklarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 56. ZnAl40Cu2Si1 alaşımından imal edilen yatağın aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü. Çalışma koşulları; basınç : 17.3 MPa, hız : 1.83 m/s, debi : 25 cm³/dak.



Şekil 57. CuSn12 bronzundan imal edilen yatağın aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü. Çalışma koşulları; basınç : 17.3 MPa, hız : 1.83 m/s, debi : 25 cm³/dak.

4. İRDELEME

Malzemelerin mekanik özellikleri, kimyasal bileşimleriyle içyapılarına bağlıdır. İçyapılar ise, kimyasal bileşim oranından başka, ısı işleme göre de değişir. Bu çalışmada, ötektoid esaslı üçlü alaşımların ($ZnAl_{27}Cu_2$ ve $ZnAl_{27}Cu_1$), ötektik esaslı $ZnAl_{15}Cu_1$ alaşımından daha üstün mekanik özelliklere sahip oldukları görüldü. Bu durum, ötektoid esaslı alaşımların alüminyum oranlarının yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir. Nitekim, çinko-alüminyum esaslı alaşımların mukavemet değerlerinin, artan alüminyum oranı ile arttığı bilinmektedir [10]. Ancak, alüminyum oranının belirli bir değerin üzerine çıkması durumunda, söz konusu alaşımların mukavemet değerleri düşmektedir [10]. Bu çalışma için üretilen malzemelerden $ZnAl_{27}Cu_2$ alaşımının çekme mukavemetinin 314 MPa, $ZnAl_{60}Cu_2$ alaşımının çekme mukavemetinin ise 274 MPa olması bu gözlemi doğrulamaktadır.

Söz konusu alaşımlara intermetalik toz katıldığında, mukavemet değerlerinin belirgin şekilde arttığı gözlemlendi. Örneğin, dörtlü $ZnAl_{27}Cu_3Si_3$ alaşımına % 5 oranında intermetalik $Cu_{32}Al_{19}$ tozu katıldığında, çekme dayanımının 338 MPa 'dan 373 MPa değerine yükseldiği görüldü. Mukavemet değerlerinde gözlenen artışlar, alaşımlara katılan intermetalik tozların, ikinci bir faz oluşturarak dislokasyon hareketini engellemesinden kaynaklanmaktadır. Nitekim, dislokasyon hareketinin engellenmesinin veya zorlaştırılmasının malzemenin sertlik ve mukavemetini arttırdığı bilinmektedir [77,78].

Çubuk-disk esaslı aşınma düzeneğinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklığı değerlerinin, çalışmanın başlangıcında hızlı bir şekilde artarak belirli tepe değerlerine eriştiklerini ve daha sonradan düşmeye başlayarak, kararlı değerlere ulaştıklarını göstermiştir. Alıştırma devresi olarak adlandırılan, çalışmanın başlangıç safhasında, sürtünme katsayısı ve sıcaklıktaki artışlar, yüzeylerde yeterli kalınlıkta yağ filmi oluşmaması nedeniyle meydana gelen metal-metal sürtünmesinden kaynaklanmak-

tadır [56]. Bazı alaşımların, sürtünme katsayılarının, alıştırma devresi içerisindeki değişik zamanlarda bir kaç kez tepe noktalarına (peak) ulaştıkları görüldü. Söz konusu durum, yüzeylerde oluşan yağ filminin, belirli süreler sonunda yırtılması sonucunda meydana gelen metal-metal temasından kaynaklanmış olabilir. Nitekim, sıcaklık ile sürtünme katsayısının bu devrede birbirine paralel olarak değişerek aynı anda tepe noktalarına ulaşmaları, bu devrede metal-metal temasının meydana geldiğini göstermektedir. Alaşımların bazılarında görülen bu durum, alıştırma devresinde sürtünme katsayısının kararlı olmayıp, dalgalanma gösterdiğini ifade eden Blau'nun [79] gözlemleriyle uyumaktadır.

Alaşımların sürtünme katsayılarının, başlangıçta artan basınç ile düştüğü, daha sonra ise, arttığı görüldü. Bu durum, özellikle dörtlü $ZnAl_{27}Cu_3Si_3$ alaşımında belirgin olarak kendini gösterdi. Sürtünme katsayısının artan basınçla artması, yüksek basınç uygulanan yüzeyler arasındaki gerçek temas alanının artmasından ve yüzey pürüzleri arasında adhezyonla kuvvetli kaynak bağlarının oluşmasından kaynaklanmaktadır [79]. Diğer taraftan, kayma hızı arttıkça, alaşımların sürtünme katsayılarının düştüğü görüldü. Bu durum, yüksek devir sayılarında yüzeyler arasında yağ filmi oluşumunun kolaylaşmasından kaynaklanmış olabilir.

Yağlama işlemi sonucunda, çinko-alüminyum alaşımlarının kuru (yağsız) çalışma şartlarındaki sürtünme katsayılarının önemli ölçüde düştüğü gözlemlendi. Bu durum, beklenildiği gibi yağlanan yüzeyler arasındaki metal-metal temasının azalmasından kaynaklanmaktadır [55].

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların, ilk 150 km'lik yola karşılık gelen devredeki sürtünme katsayılarının 0,017-0,038 değerleri arasında değiştiği ve söz konusu alaşımların bu devredeki sürtünme katsayıları arttıkça aşınma miktarlarının arttığı gözlemlendi. Bu devrede, en düşük aşınma miktarı, sürtünme katsayısı en düşük (0,017) olan $ZnAl_{27}Cu_2Si_2$ alaşımından elde edildi. En yüksek aşınma miktarı ise, sürtünme katsayısı değeri 0,038 olan $ZnAl_{60}Cu_2$ alaşımından elde edildi. Bu sonuçlardan, diğer araştırmacılar [79] tarafından da ifade edildiği gibi, malzemelerin sürtünme katsayıları azaldıkça aşınma dayanımlarının arttığı ortaya çıkmaktadır.

Sürtünme deneyine tabi tutulan yatakların, hidrodinamik yağlama bölgesindeki sürtünme katsayılarının, artan basınç ile düştüğü gözlemlendi. Bu düşüş, basınç arttıkça, yüzeyler arasındaki yağ filminin incelmeye ve dolayısıyla yağın iç sürtünmesinin azalmasından kaynaklanmış olabilir. Nitekim, hidrodinamik yağlama bölgesinde, yağ içerisinde meydana gelen sürtünme kuvvetinin, yağ filmi kalınlığı ile ters orantılı olduğu bilinmektedir [66].

Yatakların sürtünme katsayılarının hidrodinamik yağlama bölgesindeki, düşük basınçlarda devir sayısı ile hızlı bir şekilde, yüksek basınçlarda ise yavaş bir şekilde arttığı görüldü. Basınç arttıkça, devir sayısının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin azaldığını gösteren bu durum, yüksek basınçlarda yağ filminin kalınlığının azalmasından kaynaklanmış olabilir [66].

Dökülmüş durumdaki ZnAl₂₇Cu₂Si₂ alaşımından imal edilen kaymalı yatağın, yüksek basınç altındaki sürtünme katsayısının, artan devir sayısı ile sürekli olarak düştüğü gözlemlendi. Bu durum, önceki araştırmacılar [67] tarafından da ileri sürüldüğü gibi; artan basınçla, karışık yağlama bölgesinin genişlemesinden kaynaklanmış olabilir. İncelenen yataklarda, karışık yağlama bölgesinin, basınç arttıkça, daha düşük yatak parametrelerinde meydana geldiği görüldü. Bu gözlem, artan basınç değeri (P) ile yatak parametresinin (ZN/P) azalmasından kaynaklanmaktadır. Öte yandan; basınç arttıkça yatakların sürtünme katsayılarının bütün yağlama bölgelerinde, düştüğü gözlemlendi. Bu gözlem de, önceden belirtildiği gibi, basınç arttıkça yağ filmi kalınlığının azalmasından kaynaklanmaktadır [66]

ZnAl₂₇Cu₂Si₁ alaşımından imal edilen yataktan 0.7 MPa ve 1.1 MPa basınçlar altında elde edilen Stribeck eğrilerinin karışık yağlama bölgelerinin çok geniş bir aralıkta meydana geldiği ve bu nedenle, hidrodinamik yağlama bölgelerinin hiç oluşmadığı gözlemlendi. Bunun sonucunda, ZnAl₂₇Cu₂Si₂ alaşımından imal edilen yataktan, yüksek basınç altında elde edilen Stribeck eğrisinin yalnız sınır ve karışık yağlama veya sürtünme bölgelerinden oluştuğu görüldü. Sözü edilen durum, artan yatak basıncı ile karışık yağlama bölgesinin genişlemesinden kaynaklanmaktadır [65]. Öte yandan, %1 oranında silisyum içeren ZnAl₄₀Cu₂Si₁ alaşımından imal

edilen yatak, hidrodinamik sürtünme bölgesinde, diğer yataklardan daha düşük sürtünme katsayısı değerine sahiptir.

Elde edilen Stribeck eğrilerinden, sıvı sürtünme bölgesinde sürtünme katsayısının 0.1 gibi yüksek değerlere ulaştığı görüldü. Özellikle, düşük basınçta çalışan yataklarda meydana gelen bu durum, söz konusu şartlar altında yağ filmi kalınlığının artmasından kaynaklanmış olabilir. Sıvı yağlama bölgesinde yağ filmi kalınlığının artması; yağ molekülleri arasındaki iç sürtünme nedeniyle, harekete karşı direncin artması anlamına gelmektedir [67]. Diğer taraftan; özellikle düşük basınçlar altında mil yörüngesinin kararlı olmaması sonucunda yağda çalkantı ve geri akışların oluşması, sürtünme katsayısının daha da yükselmesine yardımcı olmaktadır [54].

Yataklardaki radyal boşluğun, Stribeck eğrilerini etkilediği ve radyal boşluk arttırıldığında, yatakların bütün bölgelerdeki sürtünme katsayılarının az da olsa düştüğü gözlemlendi. Önceki araştırmacılar [55] tarafından da gözlenen bu durum, yatak boşluğu arttıkça metal-metal temasının azalmasından ve yağ filmi kalınlığının artmasından kaynaklanmış olabilir. Stribeck eğrilerinden, yataklardaki radyal boşluk arttıkça, karışık yağlama bölgesinin daraldığı görülmektedir. Radyal boşluğu fazla olan yataklarda, karışık yağlama bölgesine karşılık gelen çalışma döneminde, mil ile yatak yüzeyi arasına daha fazla yağ gönderildiğinden, daha az oranda metal-metal teması meydana gelir. Bu durum ise, sürtünme kuvvetinin ve dolayısıyla sürtünme katsayısının düşmesine neden olur [81].

Elde edilen aşınma eğrilerinden; alaşımların alıştırma devresinde yüksek olan aşınma hızlarının, zamanla azalarak, genelde sabit değerlere ulaştıkları görülmektedir. Aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar, bazı çinko-alüminyum alaşımlarının CuSn12 bronzundan daha üstün aşınma direncine sahip olduklarını gösterdi. Zn-Al esaslı alaşımların ve bronzun aşınma yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri de bu sonucu doğrulamaktadır. Nitekim, SEM ile yapılan incelemeler bronzun Zn-Al esaslı alaşımlardan daha fazla aşınmaya maruz kaldığını göstermiştir. Ancak, yüksek oranda alüminyum içeren ZnAl60Cu2 ile

ZnAl40Cu4Si2 alaşımlarının, bronzdan daha kötü aşınma davranışı sergiledikleri görüldü. Bronzdan daha sert ve mukavemetli olan bu alaşımların, bronzdan daha kötü aşınma davranışı sergilemeleri, malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin, bunların veya bunlardan imal edilmiş yatakların yağlanmış durumdaki aşınma davranışlarını belirlemede yeterli ölçü olmadıklarını göstermektedir. Metalik malzemelerin aşınma davranışı, fiziksel ve mekanik özelliklerinden başka, içyapılarına ve temas yüzeylerinde oluşan yağ filmi ile sürtünme tabakalarına da bağlıdır [80]. Yatak alaşımları, genellikle sertlikleri farklı olan fazlar içerirler ve yapıdaki sert faz yük taşıma görevi yaparken, yumuşak faz kaymayı kolaylaştırılmaktadır [80]. Aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlar içerisinde, en yüksek aşınma dayanımı, dörtlü ZnAl40Cu2Si1 alaşımından elde edildi. Bu durum, söz konusu alaşımların içyapısında bulunan sert silisyum parçacıklarının varlığından ve homojen olarak dağılımlarından kaynaklanmaktadır [71].

Basınç arttıkça, gerek Zn-Al esaslı alaşımların, gerekse CuSn12 bronzunun, aşınma hızlarının arttığı gözlemlendi. Bu davranış, artan basınçla sürtünme katsayısının artmasından kaynaklanmış olabilir [79]. Söz konusu durum, alaşımların sürtünme katsayılarının basınca göre değişimlerini gösteren eğrilerden de görülmektedir.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların bazılarında ve özellikle silisyum içeren alaşımlardan imal edilen yatakların, DIN 1705 (CuSn12) bronzundan imal edilen yataklardan daha üstün aşınma davranışı sergiledikleri görüldü. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan imal edilen yataklar içerisinde, en yüksek aşınma dayanımı ZnAl40Cu2Si1 alaşımından imal edilen yataktan elde edildi. SEM ile yapılan incelemeler sırasında, söz konusu yatağın aşınma yüzeyinde belirgin bir aşınma belirtisine rastlanmazken, bronzdan imal edilen yatağın aşınma yüzeyinde aşırı aşınmanın meydana geldiği görüldü. Silisyum içeren alaşımlardan imal edilen yatakların üstün aşınma davranışları, alaşımların yapılarındaki sert silisyum parçacıklarından ve bu parçacıkların dağılım biçimlerinden kaynaklanmaktadır [7]. Öte yandan Lee ve arkadaşları [72] tarafından yapılan bir çalışma sonucunda;

Zn-Al esaslı alaşımların kayma yüzeylerinde oluşan sürtünme tabakalarının yağlayıcı gibi davranarak, aşınmayı önlediği ileri sürülmüştür.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan imal edilen yataklarda, aynen bu alaşımların aşınma numuneleri gibi, alıştırma devresinde, yüksek bir aşınma hızı sergiledikleri görüldü. Ayrıca, sertlik ve mukavemetleri yüksek olan alaşımlardan imal edilen yataklar, alıştırma devresinde üstün aşınma dayanımları sergilediler. Sözü edilen durum, alıştırma devresindeki aşınma dayanımının, büyük ölçüde malzeme özelliklerine bağlı olduğunu göstermektedir. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan imal edilen yatakların üstün tribolojik özellikleri, bu malzemelerin ideal içyapıları ile aşınma yüzeylerinde oluşan çinko ve alüminyum oksit tabakalarına dayandırılarak açıklanmaktadır [9]. Sert alüminyum oksit tabakası yük taşıma görevi yaparken, daha yumuşak olan çinko oksit tabakası ise kaymayı kolaylaştırmaktadır.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların aşınma eğrileri ile bu alaşımlardan üretilen kaymalı yatakların aşınma eğrilerinin birbirlerine benzedikleri göze çarpmaktadır. Örneğin, yüksek aşınma direncine sahip olan çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan imal edilen yatakların da yüksek aşınma dayanımı sergiledikleri görüldü. Bu durum, çubuk-disk esaslı aşınma deney makinasından elde edilen sonuçlar ile kaymalı yatakların aşınma deney düzeneğinden elde edilen sonuçların uyum içerisinde olduklarını göstermektedir. Bu nedenle, çubuk-disk esaslı aşınma deney düzeneğinden elde edilen sonuçların, gerçek uygulama için de geçerli olabilecekleri ortaya çıkmaktadır.

Gerek alaşımların, gerekse bu alaşımlardan imal edilen yatakların aşınma yüzeyleri üzerinde yapılan SEM incelemeleri sonucunda; çinko-alüminyum esaslı alaşımlarda meydana gelen etkin aşınma mekanizmasının, bronzda ortaya çıkan etkin aşınma mekanizmasından farklı olduğu belirlenmiştir. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların aşınma yüzeylerinde sıvama veya yapışma şeklindeki sürtünme tabakalarının oluşumu, bu alaşımlarda adhesif aşınma mekanizmasının etkin olduğunu göstermektedir. CuSn12 bronzunun aşınma yüzeyinde oluşan derin çizik

ve kesilme izleri ise, bu malzemedeki etkin aşınma mekanizmasının abrazif aşınma olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, çinko-alüminyum esaslı alaşımların ve bu alaşımlardan imal edilen kaymalı yatakların, pek çok uygulamada bronz yatakların yerine başarılı bir şekilde kullanılabilecekleri ortaya çıkmaktadır.



5. SONUÇLAR

1. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların sertlik ve mukavemet değerleri intermetalik toz katma yöntemi ile önemli ölçüde iyileştirilebilir.
2. İncelenen çinko-alüminyum esaslı alaşımların yağlanmış durumdaki sürtünme katsayıları 0,017-0,038 değerleri arasında olup, bu değerler basınç ve kayma hızına göre değişir. Bu alaşımların sürtünme katsayısı değerleri, artan basınçla önce azalır, daha sonra ise artar. Kayma hızı arttıkça, söz konusu alaşımların sürtünme katsayıları düşer.
3. Silisyum içeren çinko-alüminyum alaşımları, incelenen alaşımlar içerisinde en üstün tribolojik özelliklere sahiptirler.
4. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan üretilen kaymalı yatakların hidrodinamik yağlama şartlarındaki sürtünme katsayıları, yatak basıncı arttıkça düşmektedir.
5. Sınır ve karışık yağlama veya sürtünme şartlarında, % 1 oranında silisyum içeren $ZnAl_{40}Cu_2Si_1$ alaşımından imal edilen yatak, incelenen diğer bütün yataklardan daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir.
6. Yatak boşluğu; sınır ve karışık yağlama şartlarında çalışan yatakların sürtünme davranışı üzerinde daha etkili olmaktadır. Yatak boşluğu, arttıkça çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan imal edilen yatakların sürtünme katsayıları, sınır ve karışık yağlama bölgelerinde önemli ölçüde düşmekte, buna karşılık hidrodinamik (sıvı) yağlama şartları daha düşük devir sayılarında oluşmaktadır.

7. Yatak basıncı arttıkça, $ZnAl_{12}Cu_2Si_2$ alaşımından üretilen yatağın Stribeck eğrisine ait karışık yağlama bölgesi genişlemekte ve belirli bir basınç değerinin üzerinde hidrodinamik yağlama devresi oluşmamaktadır.

8. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ile bu alaşımlardan imal edilen kaymalı yataklar, ticari bronz ve bu malzemedenden imal edilen yataklardan daha üstün tribolojik özelliklere sahiptir.

9. Sertlik ve mukavemet değerleri, çinko-alüminyum esaslı alaşımların ve bu alaşımlardan imal edilen yatakların aşınma dayanımlarının belirlenmesinde her zaman yeterli bir ölçü değildir. Ancak, bu değerler yetersiz yağlama durumundaki aşınma davranışı üzerinde daha etkili olmaktadır.

10. Çubuk-disk esaslı aşınma deney düzeneği yardımıyla, yatak alaşımlarının aşınma özellikleri hakkında elde edilen bilgiler, bu alaşımlardan imal edilen yatakların tribolojik davranışları için de büyük ölçüde geçerlidir.

11. Bu çalışmada belirtilen deney şartlarında , çinko-alüminyum esaslı alaşımlar için en etkin mekanizma adhezif aşınma, $CuSn_{12}$ bronz için en etkin aşınma mekanizması ise abrazif aşınmadır.

6. ÖNERİLER

1. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan imal edilen yatakların dinamik yük altındaki tribolojik davranışları incelenerek bazı uygulamalar için yararlı sonuçlar elde edilebilir. Bunun için, bu alaşımlardan imal edilen yataklar otomobil (benzinli veya dizel) motorlarının krank millerinin yataklanmasında kullanılarak, bunların dinamik yük altındaki tribolojik davranışları incelenebilir. Ayrıca, söz konusu incelemeler, dinamik yük uygulayan deney düzenekleri yardımıyla da yapılabilir.
2. Yüzey pürüzlülüğünün, çinko-alüminyum esaslı alaşımların ve bu alaşımlardan imal edilen yatakların tribolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi, gerek söz konusu yatakların imalâtı, gerekse çalışma ömürlerinin arttırılması bakımından yararlı sonuçlar doğurabilir.
3. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan, tabakalı yataklar imal edilerek bunların statik ve dinamik yük altındaki tribolojik davranışlarının incelenmesi sonucunda yatak teknoloji için yararlı bilgiler edinilebilir.
4. Değişik ısıtım işlem görmüş çinko-alüminyum esaslı alaşımların ve bu alaşımlardan imal edilen yatakların tribolojik özellikleri incelenerek, söz konusu yataklar için en uygun yapısal durumun oluşmasını sağlayan ısıtım yöntemi veya yöntemleri belirlenebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Gervais E., ZA Alloys-A Challenge to the Metals Industry , CIM Bulletin, 80, 900 (1987) 67-92.
2. Redden, T., Zinc Alloy Bearing Down on Bronze Territory, Canadian Mining Journal, (1986) 58-59.
3. Barnhurst, R.J., ve Farge, J.C., A Study of the Bearing Characteristics of Zinc-Aluminum (ZA) Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 27, 3 (1988) 225-233.
4. Altorfer K.J., Zinc Alloys Compete with Bronze in Bearings and Bushings, Metall Progress, November, 122, 6 (1982) 29-31
5. Calayag T.S., Zinc Alloys Replace Bronze in Mining Equipment Bushings and Bearings, Mining Engineering, (1983) 727-728.
6. Barnhurst, R.J., Guidelines for Designing Zinc Alloy Bearings - A Technical Manual, Society of Automotive Engineers, paper no.88028 (1989) 2164-2170.
7. Murphy, S.,ve Savaşkan, T., Comparative Wear Behaviour of Zn-Al Based Alloys in an Automotive Engine Application , Wear, 98 (1984) 151-161.
8. Calayag T., ve Ferres D., High Performance, High Aluminium Zinc Alloys for Low Speed Bearings and Bushings , SAE Annual Conference, paper no. 820643, 1983, 2241-2251.
9. Marczak R.J., ve Ciach R., Tribological Properties of Concentrated Al-Zn Alloys, Proc. 1st Europe Tribology Congress, 1973, London, 223-227.
10. Apelian D., Paliwal M., ve Herrschaft D.C., Casting with Zinc Alloys , Journal of Metals, 33, 11 (1981) 12-19.
11. Mihaichuk, W., ve Bess, M.L., The ZA Die Casting Alloys, Society of Automotive Engineers, paper no 860556 (1987) 3560-3568.
12. Gervais, E., Barhurst, R.J., ve Loong, C.A., An Analysis of Selected Properties of ZA Alloys, Journal of Metals, 37, 11 (1983) 43-47.

13. Gervais, E., ve Loong, C.A., New ZA Alloys in Die Castings , 11th International Pressure Die Casting Conference, 19-22 June 1984, Lyon-France, 1-.
14. Lyon, R., The Properties and Applications of ZA Alloys , The British Foundryman, (1986) 344-349.
15. Lyon , R., Engineering Applications of ZA Alloys, Proc. Second Conference on Material Engineering, 1985, London, 221-227.
16. Wakefield, E.C., Copper-Aluminum-Zinc Alloy Excels in Tough Conditions, Design Engineering, (1973) 1-2.
17. Mihaichuk, W., Zinc-Alloy Bearings Challenge the Bronzes , Machine Design, 53, 28 (1981) 133-137.
18. Lamberigts, M., Walmag ,G., Coutsouradis, D., Delneuville, P., ve Meeus, M., Friction and Ductility Behaviours of a High Strength Zinc Foundry Alloys, AFS Transactions, (1985) 569-578.
19. Mykura, N., Zhu, Y., ve Murphy, S., Solid-State Reactions in Zn-Al Based Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 25, 2 (1986) 151-159.
20. Zhu, Y., Villasenor, G.T., ve Pina, C., Complex Microstructural Changes in As-Cast Eutectoid Zn-Al Alloy, Journal of Materials Science, 29 (1994) 1549-1552.
21. Houghton, M.E., ve Murray, M.T., An Introduction to Zinc Alloys , Metals Forum, 6, 4 (1984) 211-225.
22. Savaşkan, T., ve Murphy, S., Zn-Al Esaslı Yatak Alaşımlarındaki Faz Dönüşümleri , 4. Ulusal Metalurji Kongresi, Ankara, Ekim 1986, Bildiriler Kitabı , Cilt II, 532-555.
23. Gervais, E., Levert, H., ve Bess, M., The Development of a Family of Zinc-Based Foundry Alloys , Trans.Am.Foundrym. Soc., 88, (1980) 183-194.
24. Barnhurst, R.J.,ve Gervais, E., Gravity Casting of Zinc-Aluminum (ZA) Alloys : Dependence of Mechanical Properties on Soundness, Microstructure and Inclusion Content, AFS Transactions, 93 (1985) 591-602.

25. Savaşkan, T., ve Murphy, S., Decomposition of Zn-Al Alloys on Quench-Aging , Materials Science and Technology, 6, (1990) 695-700.
26. Murphy, S., Solid-Phase Reactions in the Low Copper Part of the Zn-Al-Cu System , Z. Metallkde., 71, 2 (1980) 96-102.
27. Zhu, Y., ve Murphy, S., A General Rule of Decomposition Reaction in Super-saturated Zn-Al Based Alloys, Chin.J.Met.Sci.Technol., 2 (1986) 105-116.
28. Zhu, Y., Savaşkan ,T., ve Murphy S., Phase Transformations in Quench-Aged Zn-Al-Si Alloys , Mat. Res. Soc. Proc., 21, (1984) 835-840.
29. Murphy, S., ve Savaşkan, T., Metallography of Zinc-25 % Al Based Alloys in the As-Cast and Aged Conditions, Practical Metallography, 24, (1987) 204-221.
30. Lyon R., New Zinc Alloys with Wide Engineering Applications , Proc. Conference on Materials Engineering, University of Leeds, July 1984, 87-96.
31. Barnhurst, R.J., Gervais,E., ve Bayles, F.D., Gravity Casting of Zinc-Aluminum Alloys-Solidification Behaviour of ZA-8, ZA-12 and ZA-27, AFS Transactions, 91 (1983) 569-584.
32. Durman, M., ve Murphy, S., Identification of the Metastable Phase α_m' in a Zn/Al Alloy Containing Cu and Mg, Journal of Materials Science, 27 (1992) 3215-3220.
33. Kubel, E.J., Expanding Horizons for ZA Alloys, Metal Progress, 7 (1987) 51-57.
34. Calayag, T.S., ZA Casting Alloys Hold Promise for Metalcasting Industry, Modern Casting, (1984) 19-21.
35. Mihaichuk, W., Near Net Shape Castings from Zinc-Aluminum Alloys, Machine Design, 8 (1983) 98-103.
36. Altorfer, K.J., New High Performance Zinc Casting Alloys : Versatile and Cost-Effective, Design News, 8-9 (1982) 43-50

37. Durman, M., ve Murphy, S., Precipitation of Metastable ϵ -Phase in a Hyper-eutectic Zinc-Aluminum Alloy Containing Copper, Acta Metall. Mater., 39, 10 (1991) 2235-2242.
38. Çuvalcı, H., Çinko-Alüminyum Esaslı Yatak Alaşımlarının İçyapı ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1989.
39. Skenazi, A.F., Pelerin, J., Coutsouradis, D., Magnus, B., ve Meeus, M., Some Recent Developments in the Improvements of the Mechanical Properties of Zinc Foundry Alloys , Metall., 137, 9 (1983) 898-902.
40. Engineering Properties of Zinc Alloys, Editors : Goodwin F. E., Ponikvar A.L., Published by Int. Lead Zinc Res.Org., Inc., Third Edition-Revised, North Carolina, 1989.
41. Ashrafizadeh, F., Young, J.M., ve Kondic, V., Solidification Structure and Mechanical Properties of Zn-27 Al Alloys Cast in Metal Moulds, Materials Science and Technology, 3 (1987) 665-670.
42. Barnhurst, R.J., Evaluation of the Riser Requirements for the ZA-27 Zinc-Base Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 27, 3 (1988) 205-211.
43. Barnhurst, R.J., Zinc and Zinc Alloys, Metals Handbook, 10th Edition, Vol.2, American Society for Metals , Metals Park, Ohio, 1991, 528-542.
44. Savaşkan, T., ve Murphy, S., Creep Behaviour of Zn-Al-Cu Bearing Alloys, Z. Metallkunde., 74, 2 (1983) 76-82.
45. Murphy, S., Savaşkan, T., ve Hill, J., The Creep Kinetics of Zinc-Aluminum-Based Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 25, 2 (1986) 145-150.
46. Murphy, S., Durman, M., ve Hill, J., Kinetics of Creep in Pressure Die Cast Commercial Zinc-Aluminum Alloys, Z. Metallkunde., 79, 4 (1988) 243-247.
47. Givertz, A.C., Zinc Castings Alloys-A Comparative Properties Analysis, Society of Automotive Engineers, Paper no 871953, (1988) 1047-1067.

48. Dionne, P., Dickson, J.I., ve Bailon, J.P., The Influence of the As-Cast Microstructure on the Fracture Toughness of a Zn-Al Foundry Alloy, AFS Transactions, 92, 117 (1984) 693-702.
49. Aydın, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.
50. Gahr, K.H., Microstructure and Wear of Materials, Elsevier Science Publishers B.V., Netherlands, 1987.
51. Ling, F.F., Position Paper on Tribology, Journal of Tribology, January (1984) 106-125.
52. Pinkus, C., ve Wilcock, D.F., Strategy for Energy Conservation Through Tribology, ASME, (1977) 29-45.
53. Çimenoğlu, H., ve Kayalı, E.S., Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi, İstanbul, 1991.
54. Bowden, F.P., ve Tabor, D., Friction and Lubrication, Methuen and Co. Ltd., London, 1967.
55. Akkurt M., Makina Elemanları, II.Cilt, İstanbul, 1986.
56. Halling, J., Principles of Tribology, Macmillan Education Ltd., Great Britain, 1989.
57. Bhushan. B., ve Gupta, B.K., Handbook of Tribology, Materials, Coatings and Surface Treatments, McGraw-Hill Book Company, USA, 1991.
58. Neale, M.J., Tribology Handbook, Butterworths and Co Publishers Ltd., London, 1973.
59. Hutchings I.M., Tribology : Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold Publishers Ltd., Great Britain, 1992.
60. Black, A.J., Kopalinsky, E.M., ve Oxley, P.L.B., Asperity Deformation Models for Explaining the Mechanism Involved in Metallic Sliding Friction and Wear-A Review, Journal of Mechanical Engineering Science, 207 (1993) 335-353.

61. Charles, J.A., ve Crane, F.A.A., Selection and Use of Engineering Materials, Second edition, Butterworth-Heinemann Ltd., Great Britain, 1989.
62. Ashby, M.F., ve Jones, D.R.H., Engineering Materials An Introduction to Their Properties and Applications, Pergamon Press, Great Britain, 1983.
63. Freeman, P., Lubrication and Friction, Sir Isaac Pitman and Sons Ltd., London, 1962.
64. Dean, R.R., ve Evans, C.J., Plain Bearing Materials, The Role of Tin, Tribology International, June (1976) 101-108.
65. Niemann, G., Machine Elements, Design and Calculation in Mechanical Engineering, Vol.1, Springer-Verlag, Newyork, 1978.
66. Fuller D.D., Theory and Practice of Lubrication for Engineers, John Wiley and Sons Inc., U.S.A., 1956.
67. Okday Şefik., Makina Elemanları II. Cilt, Rulmanlı Yataklar, Kaymalı Yataklar ve Yağlama, Birsen Kitabevi, İstanbul, 1977.
68. Calayag, T.S., The Practicality of Using ZincAluminium Alloys for Friction-Type Bearings , 25th Annual Conference of Metallurgists, Aug. 1986, Toronto, Ontario, 305-313.
69. Snodgrass, E.M., Zinc Die Castins in Automotive Applications, Society of Automotive Engineers, paper no 871955, (1988) 1069-1075.
70. Gross, D.K., Zinc Alloys : Specifications and Processing, Society of Automotive Engineers, paper no 871952, (1988) 1039-1046.
71. Savaşkan, T., ve Murphy, S., Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25 Al- Based Alloys , Wear, 116 (1987) 211-224.
72. Lee, P.P., Savaşkan, T., ve Laufer, E., Wear Resistance and Microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu Alloys , Wear, 117 (1987) 79-89.
73. Risdon, T.J., Barnhurst, R.J., ve Mihaichuk W.M., Comparative Wear Rate Evaluation of Zinc-Aluminum (ZA) and Bronze Alloys Through Block-on Ring Testing and Field Applications , paper no 860064, SAE Annual Conference, Detroit, USA, 1986.

74. Barnhurst, R.J., Zinc-Aluminum Alloy Design Manual for Continuous Rotation Bearings, Noranda Sales Corporation Ltd., Toronto, January 1988.
75. Jian, L., Laufer, E.E., ve Masounave J., Wear in Zn-Al-Si Alloys , Wear, 165 (1993) 51-56.
76. Delneville, Ph., Tribological Behaviour of Zn-Al Alloys (ZA-27) Compared With Bronze When Used as a Bearing Material With High Load and At very Low Speed, Wear, 105 (1985) 283-292.
77. Cottrell, A., An Introduction to Metallurgy, Second Edition, Edward Arnold Publishers Ltd., London, 1975.
78. Avner, S.H., Introduction to Physical Metallurgy, Second Edition, Ankara Üniversitesi Basımevi, Ankara, 1986.
79. Blau, P.J., Friction and Wear Transitions of Materials, Noyes Publications, 1989.
80. ASM Handbook, Friction and Wear Technology, vol.18, vol. chairman P.J.Blau; Metals Park, Ohio, 1992.
81. Wegler, M.E., ve Wu, C., A Numerical Method for the Calculation of Lubricant Pressures in Bearings with Mixed Lubrication, Tribology International, April (1982) 89-95.

8.ÖZGEÇMİŞ

1965 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve ortaokulu aynı ilde tamamladıktan sonra Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünü birincilikle bitirdi. 1982 yılında kontenjandan girdiği KTÜ Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1986 yılında mezun oldu. Aynı yıl başladığı yüksek lisans (master) eğitimini 1989 yılında tamamlayarak, doktora öğrenimine başladı. Şubat 1988 yılından itibaren KTÜ Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

