

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BAKIR, SİLİSYUM VEYA NİKEL İÇEREN Al-40Zn  
ESASLI ALAŞIMLARIN YAPISAL, MEKANİK VE TRIBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mak. Yük. Müh. Yasin ALEMDAĞ**

**TEMMUZ 2007  
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BAKIR, SİLİSYUM VEYA NİKEL İÇEREN Al-40Zn  
ESASLI ALAŞIMLARIN YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mak. Yük. Müh. Yasin ALEMDAĞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"Doktor"  
Unvanı Verilmesi İçin kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30.05.2007  
Tezin Savunma Tarihi : 05.07.2007

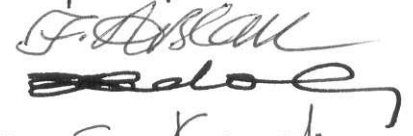
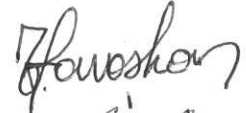
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL

Jüri Üyesi : Prof. Dr. E. Sabri KAYALI

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Genççağ PÜRÇEK



Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2007



## ÖNSÖZ

Uygulama alanı gittikçe artan çinko-alüminyum-bakır alaşımlarının yapı, mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan çalışmalar günümüzde de büyük bir ilgi ile sürdürülmektedir. Bu çalışmaların sonucunda monotektoid bileşime sahip alaşımların ötektik ve ötektoid bileşime sahip alaşımlardan daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Ancak %40'dan daha yüksek oranda alüminyum içeren alüminyum-çinko esaslı alaşımların mekanik ve tribolojik özellikleri yeterli ölçüde sistematik bir biçimde incelenmemiştir. Söz konusu bu alaşımlar kaymalı yatak yapımından başka, hafifliğin ön planda olduğu mühendislik uygulamaları için önemli bir potansiyel olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle, bu çalışmada bakır, silisyum veya nikel içeren alüminyum-çinko esaslı alaşımlar üretildi ve bu alaşımların yapı, mekanik ve tribolojik özellikleri incelendi. Elde edilen bulgular geleneksel bir yatak alaşımı olan SAE 65 bronzundan aynı koşullarda elde edilen bulgularla karşılaştırıldı.

Tez danışmanlığımı üstlenerek çalışmaların yönlendirilmesindeki katkılarından dolayı hocam sayın Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarına katkıda bulunan Yrd. Doç. Dr. Tefvik KÜÇÜKÖMEROĞLU'na, Yrd. Doç. Dr. Gençğa PÜRÇEK'e, Arş. Gör. Osman BİCAN'na, Arş. Gör. Zeki AZAKLI'ya ve Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Takım Tezgahlarında görevli teknisyenlere teşekkür ederim. Çalışmayı mali yönden destekleyen KTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi yetkililerine de teşekkür ederim. Aynı zamanda çalışmalarım süresince gösterdiği sabır ve desteğinden dolayı eşim Gamze ALEMDAĞ'a müteşekkirim.

Yasin ALEMDAĞ  
Trabzon 2007

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Alüminyum Esaslı Alaşımların Faz Diyagramları.....	2
1.2.1. İkili Alüminyum-Çinko Faz Diyagramı.....	2
1.2.2. Üçlü Alüminyum-Çinko-Bakır Alaşımlarının Faz Diyagramları.....	3
1.2.3. Dörtlü Alüminyum-Çinko-Bakır-Silisyum Alaşımlarının Faz Diyagramları.....	5
1.3. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	5
1.4. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Tribolojik Özellikleri.....	10
1.5. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	11
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	12
2.1. Alaşımların Üretimi ve Isıl İşlemi.....	12
2.2. Alaşımların Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi.....	12
2.3. Alaşımların Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi.....	14
2.4. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi.....	16
3. BULGULAR.....	19
3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimi.....	19
3.2. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular.....	20
3.3. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular.....	32
3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular.....	38
3.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular.....	53
4. İRDELEME.....	69

5.	SONUÇLAR.....	81
6.	ÖNERİLER.....	83
7.	KAYNAKLAR.....	84
	ÖZGEÇMİŞ	

## ÖZET

Bu çalışmada bir dizi ikili alüminyum-çinko, üçlü alüminyum-çinko-bakır, dörtlü alüminyum-çinko-bakır-silisyum ve alüminyum-çinko-bakır-nikel alaşımı kokil döküm yöntemiyle üretildi. Çinko, bakır, silisyum ve nikel oranlarının üretilen alaşımların yapı ve mekanik özelliklerine etkileri incelendi. Üçlü ve dörtlü alaşımların sürtünme ve aşınma özelliklerinin kayma yolu, basınç, hız ve yağ debisine göre değişimleri blok-disk esaslı bir deney düzeneği yardımıyla belirlendi. Elde edilen bulgular geleneksel bir yatak alaşımı olan SAE 65 bronzundan elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı.

Bu çalışmada baz olarak alınan ikili Al-40Zn alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısının alüminyumca zengin göbekli  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen ötektoid  $\alpha + \eta$  fazlarından oluştuğu görüldü. Bakır, silisyum veya nikel içeren üçlü ve dörtlü alaşımlarda ise  $\alpha$ ,  $\alpha + \eta$  ve  $\theta$  fazları ile birlikte silisyum veya  $Al_3Ni$  parçacıklarının bulunduğu gözlemlendi.

Al-40Zn-(0-5)Cu alaşımlarının sertliği artan bakır oranı ile sürekli artarken, çekme dayanımının %3 Cu oranından sonra artan bakır oranı ile azaldığı görüldü. Silisyum ve nikel katkılarının Al-40Zn-3Cu alaşımının çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerini düşürdüğü gözlemlendi. Diğer taraftan alaşımların sürtünme katsayısının artan basınçla azaldığı, sıcaklık ve aşınma ile meydana gelen hacim kaybının ise arttığı gözlemlendi. Alaşımların sürtünme katsayısı kayma hızından pek fazla etkilenmezken, sıcaklığının artan kayma hızı ile arttığı, hacim kaybının ise belirli bir hız değerinden sonra artışa geçtiği belirlendi. Al-40Zn esaslı alaşımlarda adhezyonun, SAE 65 bronzunda ise abrazyonun yanı sıra adhezyonun da etkin aşınma mekanizması olduğu gözlemlendi. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, Al-40Zn esaslı alaşımların SAE 65 bronzundan daha üstün aşınma direnci sergilediği belirlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Al-Zn, Al-Zn-Cu, Al-Zn-Cu-Si ve Al-Zn-Cu-Ni Alaşımları, Yapısal ve Mekanik Özellikler, Sürtünme, Aşınma ve Yağlama Özellikleri, Yapı-Özellik İlişkileri

## SUMMARY

### **An Investigation of Microstructural Features and Mechanical and Tribological Properties of Al-40Zn Based Alloys Containing Copper, Silicon or Nickel**

In this study, a series of binary aluminum-zinc, ternary aluminum-zinc-copper, quaternary aluminum-zinc-copper-silicon and aluminum-zinc-copper-nickel alloys were prepared by permanent mould casting. Their microstructure and mechanical properties were investigated in the as-cast and heat treated conditions and the effects of zinc, copper, silicon and nickel additions on these properties were determined. The friction and wear properties of the alloys were investigated under different test conditions including sliding distance, pressure, sliding speed and oil rate using a conforming block-on-disc test machine. The results obtained from these alloys were compared with those obtained from SAE 65 bearing bronze.

It was observed that the microstructure of binary Al-40Zn alloy consisted of aluminum-rich  $\alpha$  dendrites surrounded by eutectoid  $\alpha + \eta$  phase. In addition to these phases  $\theta$ , silicon or  $\text{Al}_3\text{Ni}$  particles were observed in the ternary or quaternary alloys containing copper, silicon or nickel. It was found that the hardness of Al-40Zn-(1-5)Cu alloys increased continuously with increasing copper content, but their tensile strength showed a decrease when the copper content exceeded %3. It was also observed that the additions of silicon and nickel decreased the tensile strength and elongation of Al-40Zn-3Cu alloy. It was shown that the friction coefficient of the alloys decreased with increasing pressure, but their temperature and volume loss showed reverse trend. It was observed that sliding speed has no considerable effect on friction coefficient of alloys, but their temperature and volume loss increased with it. Adhesion was found to be the most effective wear mechanism for the Al-40Zn based alloys, but both abrasion and adhesion operated for the wear of the SAE 65 bronze. As a result of this study, it was concluded that the Al-40Zn based alloys were much superior to the SAE 65 bronze as far as their wear resistance is concerned.

**Key Words:** Al-Zn, Al-Zn-Cu, Al-Zn-Cu-Si and Al-Zn-Cu-Ni Alloys, Microstructural and Mechanical Properties, Friction, Wear and Lubrication Properties, Structure-Property Relationships

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1. İkili alüminyum-çinko faz diyagramı .....	2
Şekil 2. Alüminyum-çinko-bakır alaşım sisteminin 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti. 3	3
Şekil 3. %5 oranında bakır içeren Al-Zn-Cu alaşımına ait faz diyagramının dikey kesiti .....	4
Şekil 4. Blok-disk esaslı aşınma deney düzeneğinin şematik görünümü .....	16
Şekil 5. Aşınma deney düzeneğinin fotoğrafı .....	17
Şekil 6. Aşınma deney düzeneğinde numune, numune tutucusu ve diskin yakından görünümü.....	17
Şekil 7. Sürtünme ve aşınma deneylerinde kullanılan numunenin teknik resmi.....	18
Şekil 8. Sürtünme kuvvetinin ölçümünde kullanılan yük hücresine ait kalibrasyon doğrusu.....	18
Şekil 9. Al-40Zn alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	22
Şekil 10. Al-40Zn-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	22
Şekil 11. Al-40Zn-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	23
Şekil 12. Al-40Zn-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	23
Şekil 13. Al-40Zn-4Cu alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	24
Şekil 14. Al-40Zn-5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	24
Şekil 15. Al-40Zn-3Cu-0,25Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	25
Şekil 16. Al-40Zn-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	25
Şekil 17. Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	26
Şekil 18. Al-40Zn-3Cu-3Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	26
Şekil 19. Al-40Zn-3Cu-4Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	27
Şekil 20. Al-40Zn-3Cu-5Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	27
Şekil 21. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-5Si alaşımında birincil silisyum parçacıklarının kümeleşmesini gösteren fotoğraf .....	28
Şekil 22. Al-40Zn-3Cu-0,5Ni alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	28
Şekil 23. Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	29
Şekil 24. Al-40Zn-3Cu-2Ni alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	29
Şekil 25. Al-40Zn-3Cu-3Ni alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	30
Şekil 26. Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının ısıtılmış durumdaki iç yapısı.....	30

Şekil 27	Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşımlarının ısıtılma işlemi görmüş durumdaki iç yapısı.....	31
Şekil 28.	SAE 65 bronzunun iç yapısı.....	31
Şekil 29.	Al-(10-50)Zn alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin çinko oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	35
Şekil 30.	%2 oranında bakır içeren Al-Zn-Cu alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin çinko oranına göre değişimini gösteren eğriler...	35
Şekil 31.	Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımlarının çekme dayanımı, sertlik, kopma uzaması ve $\alpha$ fazının mikrosertliğinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler .....	36
Şekil 32.	Silisyum oranının Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının çekme dayanımı, sertlik ve kopma uzamasına etkisini gösteren eğriler.....	36
Şekil 33.	Al-40Zn-3Cu-(0-3)Ni alaşımlarının çekme dayanımı, sertlik ve kopma uzaması ile $\alpha$ fazının mikrosertliğinin nikel oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	37
Şekil 34.	Çözündürme ve su verme sonrası 100°C sıcaklıkta yaşlandırma işlemine tabi tutulan Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri.....	37
Şekil 35.	Al-40Zn esaslı alaşımlar içerisinde seçilen bazıları ile SAE 65 bronzunun sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	39
Şekil 36.	Al-40Zn esaslı alaşımlar içerisinde seçilen bazı alaşımlar ile SAE 65 bronzunun sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	40
Şekil 37.	Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımları ile SAE 65 bronzunda meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	41
Şekil 38.	Alaşımların sertlik, çekme dayanımı ve hacim kaybı değerlerinin bakır oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	41
Şekil 39.	Silisyum oranının Al-40Zn-3Cu alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerine etkisini gösteren eğriler.....	42
Şekil 40.	Nikel oranının Al-40Zn-3Cu alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerine etkisini gösteren eğriler.....	42
Şekil 41.	Silisyum oranının Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve hacim kaybı değerlerine etkisini gösteren eğriler.....	43
Şekil 42.	Nikel oranının Al-40Zn-3Cu-(0-3)Ni alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve hacim kaybı değerlerine etkisini gösteren eğriler.....	43
Şekil 43.	Alaşımların sürekli rejim durumdaki sürtünme katsayılarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	46
Şekil 44.	Alaşımların rejim durumdaki sıcaklıklarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	47
Şekil 45.	Dökülmüş ve ısıtılma işlemi görmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlarda ve SAE 65 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	47

Şekil 46. Alaşımların sürtünme katsayılarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.....	49
Şekil 47. Alaşımların sıcaklıklarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.....	50
Şekil 48. Dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlarda ve SAE 65 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.....	50
Şekil 49. 7 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında sürtünme deneyine tabi tutulan alaşımların 2700 m'lik kayma yolu sonunda belirlenen sürtünme katsayısı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler.....	52
Şekil 50. 7 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında sürtünme deneyine tabi tutulan alaşımların 2700 m'lik kayma yolu sonunda belirlenen sıcaklık değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler.....	52
Şekil 51. 7 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlarda 2700 m'lik kayma yolu sonunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler.....	53
Şekil 52. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu alaşımına ait bir aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü.....	55
Şekil 53. SAE 65 bronzuna ait bir aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü.....	55
Şekil 54. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-1Cu alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	56
Şekil 55. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-2Cu alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	56
Şekil 56. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	57
Şekil 57. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-4Cu alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	57
Şekil 58. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-5Cu alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	58
Şekil 59. SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	58
Şekil 60. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-1Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	59
Şekil 61. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	59
Şekil 62. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-5Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	60
Şekil 63. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	60
Şekil 64. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Ni alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	61



Şekil 65. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-3Ni alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	61
Şekil 66. Isıl işlem görmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	62
Şekil 67. Isıl işlem görmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	62
Şekil 68. 1,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 2 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	63
Şekil 69. 1,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	63
Şekil 70. 1,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	64
Şekil 71. 1,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 8 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	64
Şekil 72. 1,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 2 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	65
Şekil 73. 1,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	65
Şekil 74. 1,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 400 km'lik yol sonundaki SEM görüntüsü.....	66
Şekil 75. 1,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 8 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	66
Şekil 76. 1,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 0,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 100 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	67
Şekil 77. 1,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 100 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	67
Şekil 78. 1,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 100 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	68

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. İkili alüminyum-çinko alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri.....	3
Tablo 2. Alüminyum-çinko-bakır alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri.....	4
Tablo 3. Çinko esaslı ticari alaşımlar ile bazı geleneksel ticari yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri .....	6
Tablo 4. Çinko esaslı ticari alaşımlar ile bazı geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellikleri.....	9
Tablo 5. Alaşımların kimyasal bileşimleri.....	19
Tablo 6. Alaşımların fiziksel ve mekanik özellikleri.....	33
Tablo 7. Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımları ve SAE 65 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerleri.....	40
Tablo 8. Farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış Al-40Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 bronzunun sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayıları.....	45
Tablo 9. Farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış Al-40Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 bronzunun rejim durumundaki sıcaklıkları.....	45
Tablo 10 Farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerleri.....	46
Tablo 11. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 bronzunun sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayıları.....	48
Tablo 12. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 bronzunun rejim durumundaki sıcaklıkları.....	48
Tablo 13. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlarda meydana gelen hacim kaybı değerleri.....	49
Tablo 14. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlar ile bronzun 30 dakikalık süre içerisinde alınan 2700 m'lik kayma yolu sonundaki sürtünme katsayısı değerleri.....	51
Tablo 15. Farklı yağ debilerinde sürtünme deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki alaşımların 2700 m'lik kayma yolu sonundaki sıcaklık değerleri.....	51
Tablo 16. Farklı yağ debilerinde sürtünme deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlarda ve bronzda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerleri.....	51

# 1. GENEL BİGİLER

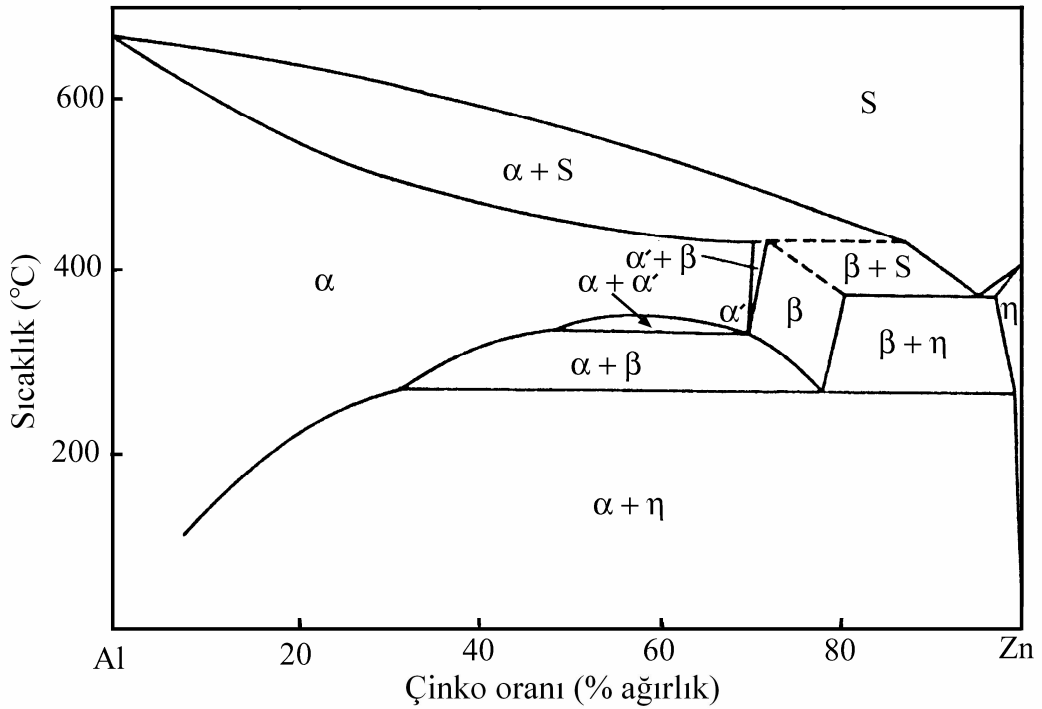
## 1.1. Giriş

1940'lı yıllara rastlayan İkinci Dünya Savaşı sırasında bakır ve kalay temininde karşılaşılan zorluklar nedeniyle bu metallere yapılan geleneksel yatak bronzu yerine çinko esaslı alaşımlar üretilerek geliştirilmeye başlanmıştır [1-4]. Daha sonra malzeme tedarikinde karşılaşılan zorlukların ortadan kalkmasıyla birlikte tekrar geleneksel yatak malzemelerine geri dönülmüş, ancak Avrupa ve Kuzey Amerika'da bulunan bazı metal şirketleri çinko esaslı alaşımları geliştirme çalışmalarına devam etmişlerdir [2-6]. Bu alaşımların geliştirilmesi ve kullanımlarının yaygınlaştırılması amacıyla yapılan çalışmalar günümüzde de sürdürülmektedir [3, 7]. Söz konusu alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar daha çok ötektik, ötektoid ve monotektoid bileşimler üzerine yoğunlaştırılmıştır. Çinko-alüminyum ötektik alaşımı %5, ötektoid alaşımı %22 ve monotektoid alaşımı %40 oranlarında alüminyum içermektedir [2, 8, 9]. Yapılan çalışmalar monotektoid bileşime sahip alaşımların gerek ötektik, gerekse ötektoid bileşime sahip alaşımlardan daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olduklarını göstermiştir [2, 3, 5, 10, 11]. Ancak, %40'dan daha yüksek oranlarda alüminyum içeren çinko esaslı alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerinin yeterince incelenmediği göze çarpmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmaların daha çok söz konusu alaşımların faz diyagramlarının belirlenmesi ve yapısal özelliklerinin araştırılmasına yönelik olduğu görülmektedir [12-17]. İkili çinko-alüminyum alaşımları üzerinde yapılan çalışmalar bunların sertlik, mukavemet ve aşınma direncinin %70 Al oranına kadar artan alüminyum oranı ile arttığını göstermiştir [18-20]. Savaşkan [19] ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise alüminyum oranı arttıkça ikili çinko-alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımı ve ömrünün arttığı belirlenmiştir. Diğer taraftan alüminyum oranı arttıkça bu alaşımların yoğunluğunun düştüğü, özgül mukavemetinin (mukavemet/yoğunluk) ise arttığı gözlenmiştir [18]. Başka bir deyişle alüminyum oranı arttıkça söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemeti artmakta, ancak özgül mukavemetinde daha yüksek oranda bir artış meydana gelmektedir. Bu nedenle bu çalışmada çinko, bakır, silisyum ve nikel içeren alüminyum esaslı ikili, üçlü ve dörtlü alaşımların yapı, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenerek hem uygun kimyasal bileşimin belirlenmesi hem de tasarıma yönelik bilgiler elde edilmesi amaçlanmıştır.

## 1.2. Alüminyum Esaslı Alaşımların Faz Diyagramları

### 1.2.1. İkili Alüminyum-Çinko Faz Diyagramı

İkili alüminyum-çinko faz diyagramı birçok araştırmacı tarafından incelenmesine rağmen, Presnyakov ve arkadaşları [12] tarafından belirlenen faz diyagramının bu sistemi en doğru şekilde temsil ettiği kabul edilmiştir. Söz konusu faz diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Bu diyagramda  $\alpha$  yüzey merkezli kübik yapı (YMK) alüminyumca zengin,  $\eta$  ise sıkı düzenli hegzagonal yapı (SDH) çinkoca zengin faz bölgelerini göstermektedir [21]. Çinko, alüminyum içerisinde %83 oranına kadar çözünerek  $\alpha$ ,  $\alpha'$  ve  $\beta$  olarak adlandırılan üç farklı faz bölgesi oluşturmaktadır [22, 23]. Bu fazların tümü YMK yapıya sahiptir. Ancak kafes parametrelerinin birbirine çok yakın olması nedeniyle  $\alpha$  ve  $\alpha'$  fazları arasındaki sınır tam olarak belirlenememiştir. Bu fazların her biri yavaş soğuma sonucunda kararlı alüminyum ve çinko fazlarına dönüşmektedir [21]. Hızlı soğutma işlemi ise çinkonun aşırı doymuş katı çözelti içerisinde tutulmasına neden olmakta ve ardından uygulanan yaşlandırma sırasında bu katı çözelti ayrılarak bir takım geçiş fazları oluşturmaktadır [21]. İkili Al-Zn alaşım sisteminde meydana gelen önemli dönüşümler ile bu dönüşümlerin meydana geldiği sıcaklıklar Tablo 1'de verilmiştir [21-23].



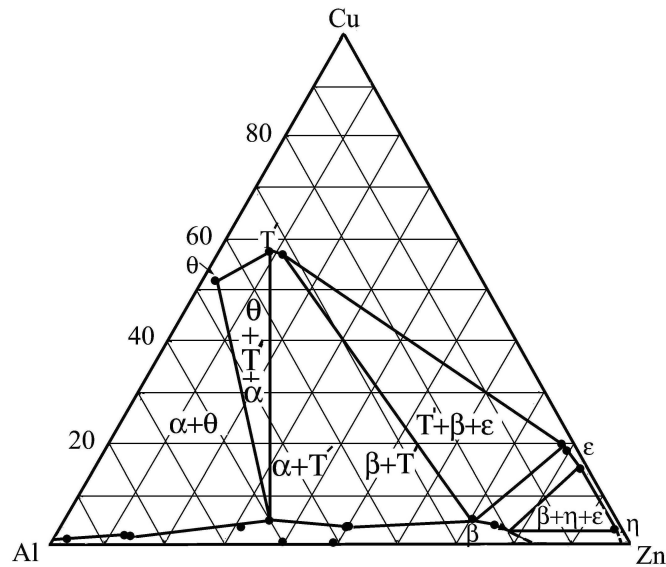
Şekil 1. İkili alüminyum-çinko faz diyagramı [12].

Tablo 1. İkili alüminyum-çinko alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [21-23].

Dönüşüm	Dönüşüm formülü	Dönüşüm noktası	
		Çinko oranı (%)	Sıcaklık (°C)
Ötektik	$S \rightleftharpoons \beta + \eta$	95	382
Ötektoid	$\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	78	276
Monotektoid	$\alpha / \alpha' \rightleftharpoons \alpha + \beta$	52-68	340
Peritektik	$\alpha + S \rightleftharpoons \beta$	72	443

### 1.2.2. Üçlü Alüminyum-Çinko-Bakır Faz Diyagramı

Alüminyum-çinko-bakır alaşımlarında bakırca zengin  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ),  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) ve  $T'$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$ ) gibi metaller arası (intermetalik) bileşiklerin oluşması nedeniyle faz dönüşümleri ikili sisteme göre daha karmaşıktır [24-27]. Söz konusu alaşımların faz diyagramı tam olarak belirlenememiş, ancak sistemin düşük oranlarda bakır içeren bölümü Murphy [25] tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Murphy tarafından belirlenen faz diyagramının  $350^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki izotermal kesiti Şekil 2'de, bu sistemde meydana gelen katı hal dönüşümleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

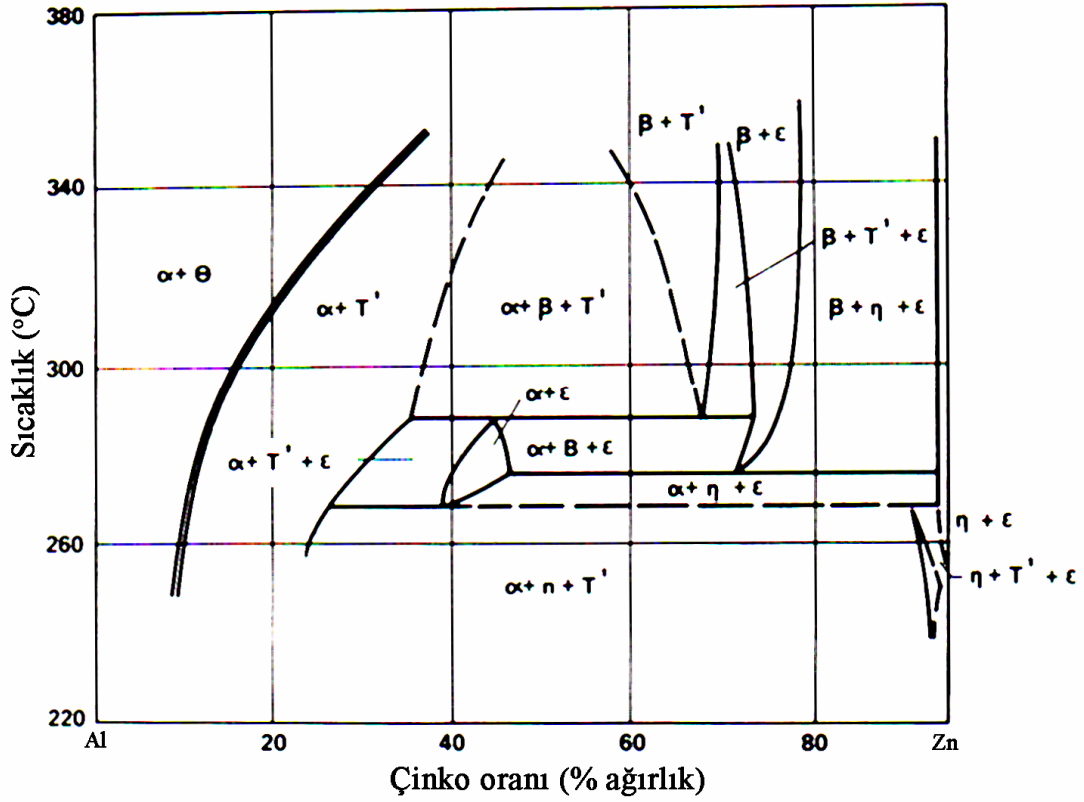


Şekil 2. Alüminyum-çinko-bakır alaşım sisteminin  $350^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki izotermal kesiti [25].

Tablo 2. Alüminyum-çinko-bakır alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri [25].

Dönüşüm	Dönüşüm sıcaklığı (°C)
$T' + \beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	288
$\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	275
$\beta + \varepsilon \rightleftharpoons \alpha + \eta$	276
$\alpha + \varepsilon \rightleftharpoons T' + \eta$	268

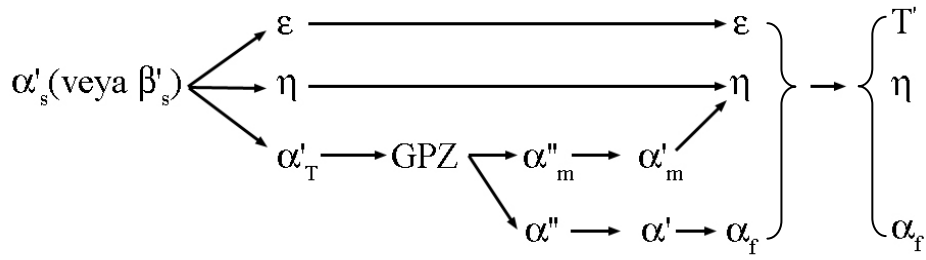
Söz konusu katı hal dönüşümleri ve bu dönüşümlerin meydana geldiği sıcaklıklardan yararlanılarak belirlenen Al-Zn-Cu alaşım sistemine ait faz diyagramının dikey kesiti ise Şekil 3'de verilmiştir [25]. Bu şekilde görüldüğü gibi sıcaklık azaldıkça çinko ve bakırın alüminyum içerisindeki çözünürlüğü azalmakta ve 276°C'de  $\beta + \varepsilon \rightleftharpoons \alpha + \eta$  dönüşümü meydana gelmektedir. [21].



Şekil 3. %5 oranında bakır içeren Al-Zn-Cu alaşımına ait faz diyagramının dikey kesiti [25].

### 1.2.3. Dörtlü Alüminyum-Çinko-Bakır-Silisyum Faz Diyagramı

Dörtlü Al-Zn-Cu-Si faz diyagramı henüz tam olarak belirlenememiş olmakla birlikte, bu sistemde meydana gelen faz dönüşümleri bazı araştırmacılar [21, 22, 28-30] tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışmalar silisyumun alüminyum-çinko matrisi içerisindeki çözünürlüğünün çok düşük (%0,1 oranında) olduğunu ve bu sistemde meydana gelen faz dönüşümlerini belirgin bir şekilde etkilemediğini göstermiştir [21, 22]. Çözündürme ve su verme işlemlerinden sonra yaşlandırılan Al-Zn-Cu-Si alaşımlarında meydana gelen faz dönüşümleri aşağıda verilmiştir [21]. Söz konusu dönüşümler sırasında ilk önce aşırı doymuş  $\alpha'_s$  veya  $\beta'_s$  fazları  $\alpha'_T + \varepsilon + \eta$  fazlarına ayrışmakta ve daha sonra G.P.Z. (Guiner-Preston zones) bölgeleri oluşmaktadır. Alüminyumca zengin  $\alpha'_T$  geçiş fazı spinodal ayrışma ile  $\alpha''_m$ ,  $\alpha'_m$ ,  $\alpha''$  ve  $\alpha'$  fazlarını oluşturmakta ve bu fazlarda alüminyumca zengin  $\alpha_f$  ve çinkoca zengin  $\eta$  fazlara dönüşmektedir.



Burada  $\alpha''_m$  ve  $\alpha'_m$  sırasıyla birinci ve ikinci geçiş fazlarını,  $\alpha''$  ve  $\alpha'$  ise alüminyumca zengin kararlı fazları göstermektedir. Diğer taraftan silisyumun fazların dönüşüm sıcaklıklarını az da olsa etkilediği görülmüştür [22]. Nitekim üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarında  $288^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta meydana gelen  $T' + \beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$  dönüşümünün, dörtlü Zn-Al-Cu-Si alaşımlarında  $285^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta ortaya çıktığı görülmüş ve bu farklılığın silisyum katkısının dönüşüm sıcaklığını değiştirmesinden kaynaklandığı ileri sürülmüştür [22].

### 1.3. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Çinko esaslı bazı ticari alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri Tablo 3'de verilmiştir. Bu tablo çinko esaslı alaşımların yoğunluk, ısı ve elektrik iletkenliklerinin geleneksel yatak malzemelerinin bu değerlerinden daha düşük olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan alüminyum oranı arttıkça çinko-alüminyum

alaşımalarının yoğunluğu azalmakta, ısı ve elektrik iletkenlikleri artmaktadır [18,19, 33-35]. Bu gözlem alüminyumun yoğunluğunun çinkonun yoğunluğundan daha düşük, ısı ve elektrik iletkenliğinin ise çinkonun söz konusu değerlerinden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır [18, 34, 36]. Ancak, düşük oranlarda bakır katkılarının ikili çinko-alüminyum alaşımlarının yoğunluğunu artırdığı, silisyum katkılarının ise azalttığı belirlenmiştir [3, 10, 37-40]. Bu durum da bakırın yoğunluğunun alüminyum ve çinkonun yoğunluğundan daha yüksek, silisyumun yoğunluğunun ise bu elementlerin yoğunluklarından daha düşük olmasından ileri gelmektedir.

Tablo 3. Çinko esaslı ticari alaşımlar ile bazı geleneksel ticari yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri [31, 32].

Alaşım	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Katılma aralığı (°C)	Isıl genişleme katsayısı (µm/mK)	Isıl iletkenlik (W/mK)	Elektriksel iletkenlik (%IACS)
ZA8	6300	375 - 404	23,2	115	27,7
ZA12	6030	377 - 432	24,1	116	28,3
ZA27	5000	375 - 484	26	125,5	29,7
SAE 40 pirinci	8830	855 - 1010	18	72	15
SAE 65 bronz	8775	831-999	17	70	9,6
SAE 660 bronz	8930	855 - 975	18	59	12
Kır dökme demir	7200	1232	11,9	-----	6

Yapılan çalışmalar ikili ötektoid alaşımların çekme dayanımının 235 ile 275 MPa değerleri arasında, monotektoid alaşımların çekme dayanımının ise 273 ile 310 MPa değerleri arasında değiştiğini göstermiştir [10, 37-41]. Söz konusu alaşımların çekme dayanımında gözlenen bu değişimler döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve soğuma hızı gibi döküm koşullarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak %40 değerinden daha yüksek oranlarda alüminyum içeren çinko esaslı alaşımların mekanik özellikleri yeterince incelenmemiştir. Bu alanda yapılan sınırlı sayıdaki çalışmalarda, ikili çinko-alüminyum alaşımlarının mukavemet ve sertliğinin artan alüminyum oranı ile artarak % 70 Al oranında en yüksek değerine ulaştığı ve bu oranın üzerindeki değerlerde ise azaldığı görülmüştür [18-20, 36]. Ancak ikili çinko-alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemetinin pek çok



uygulama için yeterli olmadığı bilinmektedir [18, 42, 43]. Yapılan araştırmalar bakır, silisyum ve magnezyum gibi katkıların ikili çinko-alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemetini artırdığını göstermiştir [3, 10, 18, 33, 37-40]. Özellikle düşük oranlardaki bakır katkısının ikili çinko-alüminyum alaşımlarının mukavemet, sertlik ve sürünme direncini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür [10, 18, 33, 37, 38, 43-46]. Nitekim %2 oranında bakır içeren ötektoid esaslı üçlü alaşımların çekme dayanımının 306 ile 350 MPa değerleri arasında, monotektoid esaslı üçlü alaşımların çekme dayanımının da 315 ile 370 MPa değerleri arasında değişmesi bu durumu göstermektedir [8, 37, 47]. Diğer taraftan bu çalışmalar alüminyum ve bakırın çinko esaslı alaşımların mekanik özelliklerini iyileştiren en önemli alaşım elementi olduklarını göstermiştir. Ancak belirli oranın üzerindeki bakır katkılarının bu alaşımların mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği bilinmektedir [18, 19, 37, 38, 47]. Diğer taraftan bakır oranı arttıkça üçlü alaşımlarda ortaya çıkan hacimsel büyüme oranının da arttığı belirlenmiştir [10, 26]. Bu nedenle, üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarında bakır oranının %1-3 değerleri arasında tutulmasının hem boyutsal kararlılık hem de mekanik özellikler açısından uygun olduğu ileri sürülmektedir [26, 37, 38].

İkili çinko-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmenin diğer bir yolu da bu alaşımlara ısıl işlem uygulamaktır [3, 39, 48-50]. Ancak, ısıl işlemin doğru seçilmesi gerekir. Çünkü bazı ısıl işlemler bu alaşımların sertlik ve mukavemetini artırırken, bazıları azaltmaktadır. Nitekim çözündürme ve su verme sonrası uygulanan yaşlandırma işlemi çinko esaslı alaşımların sertlik ve mukavemetini artırırken, dökülmüş durumdaki alaşımların yapısını kararlı hale getirmek amacıyla uygulanan stabilizasyon işlemi sözü edilen değerleri düşürmektedir [2, 3, 18, 33, 48-50]. Alaşımların sertlik ve mukavemetinde, su verme sonrası uygulanan yaşlandırma işlemi sırasında meydana gelen artış çökelme sertleşmesi mekanizmasına, stabilizasyon sırasında meydana gelen azalma ise yapı içerisindeki kalıntı gerilmelerin giderilmesine ve katılaşma sonucunda oluşan metastabil fazların kararlı fazlara dönüşmesine dayandırılarak açıklanmaktadır [3, 18, 33, 48-50].

Çinko-alüminyum alaşımlarında yapı-mekanik özellik ilişkileri Savaşkan ve Turhal [51] tarafından incelenmiş ve sonuçta dökülmüş durumdaki alaşımlarda ikincil dendrit kol aralığı azaldıkça sertlik ve mukavemetin arttığı belirlenmiştir. Söz konusu çalışmadan elde edilen sonuçların Skenazi ve arkadaşları [52] tarafından yapılan çalışmayla uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Çinko-alüminyum alaşımlarının kırılma tokluğunun ise

geleneksel malzemelerin kırılma tokluğundan daha düşük olmasına karşın, söz konusu alaşımların bu değerinin artan alüminyum oranı ile arttığı belirlenmiştir [51].

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların sürünme davranışı Savaşkan ve Murphy [44, 45] tarafından incelenmiş ve bakır katkısının bu alaşımların sürünme direncini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca dökülmüş durumdaki alaşımların çözündürme ve su verme sonrası yaşlandırılmış alaşımlardan daha yüksek oranda sürünme direnci sergiledikleri görülmüştür [44, 45]. Savaşkan ve arkadaşları [19, 53] tarafından yapılan çalışmalar sonunda söz konusu alaşımların yorulma ömrü ve yorulma dayanımının artan alüminyum oranı ile arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, bu çalışmalarda alaşımların yorulma dayanımı ve yorulma ömrünün artan sertlik ve mukavemetle arttığı görülmüştür [19, 41].

Farklı döküm yöntemiyle üretilen çinko esaslı ticari alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellikleri Tablo 4'de verilmiştir. Bu tabloda çinko esaslı alaşımların geleneksel yatak malzemelerinden daha yüksek mukavemet değerlerine sahip oldukları görülmektedir.

Çinko-alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklığının düşük olması kullanım alanlarını kısıtlamaktadır [2, 3]. Nitekim sıcaklık arttıkça söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemeti önemli ölçüde düşerken süneklik değeri artmaktadır [2, 3]. Bu nedenle söz konusu alaşımlara yüksek sıcaklıklardaki mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla bakır, silisyum ve nikel gibi alaşım elementleri katılmaktadır [54-64]. Ancak silisyum ve nikel katkıları alaşımların mekanik özelliklerini bakır kadar artırmamaktadır [3, 10, 37-39, 50, 57, 58]. Diğer taraftan yüksek sıcaklıklarda yapılan mekanik deneyler sonucunda, silisyum ve nikel içeren alaşımların mukavemet değerlerinin bakır içeren alaşımların söz konusu değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür [55-60, 65]. Bu durumun söz konusu alaşımların yapılarında bulunan silisyum parçacıkları ve nikel içeren fazların yüksek sıcaklıklarda bile sertliklerini korumasından kaynaklandığı ileri sürülmektedir [55-60, 65]. Ancak %40'dan daha yüksek oranda alüminyum içeren çinko-alüminyum alaşımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında literatürde sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır.

Tablo 4. Çinko esaslı ticari alaşımlar ile bazı geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellikleri [31, 32].

Alaşım	Döküm yöntemi	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)	Kopma uzaması (%)	Brinell sertlik değeri (BSD)	Darbe dayanımı (J)
ZA8	Kum	248-276	193-200	87,6	1-2	82-89	17-24
	Kokil	221-255	200-214	85,5	1-2	85-90	----
	Basınçlı	365-386	283-296	----	6-10	95-110	32-48
ZA12	Kum	275-317	207-214	82,1	1-2	92-96	23-30
	Kokil	310-345	250-275	83	1,5-2,5	85-95	----
	Basınçlı	393-414	310-331	----	4-7	95-115	20-37
ZA27	Kum	400-441	365-372	77,9	3-6	110-120	34-54
	Kokil	428-455	358-393	----	2-3	110-117	-----
	Basınçlı	407-441	359-379	----	2,5	105-125	9-16
SAE 40 pirinci	Kum	255	117	83	30	60	15
SAE 65 bronz	Kum	290	172	110	10	105	6
SAE 660 bronz	Kum	240	124	100	20	65	8
Kır dökme demir	Kum	345	221	172	10	119-156	54-88

#### 1.4. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Tribolojik Özellikleri

Yapılan araştırmalar bakır, silisyum ve magnezyum içeren çinko-alüminyum alaşımlarının geleneksel yatak malzemelerine göre üstün tribolojik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir [2, 3, 5, 10, 11]. Söz konusu alaşımların üstün tribolojik özellik sergilemesi bu alaşımların çok fazlı yapıya sahip olmalarının yanında aşınma yüzeylerinde çinko ve alüminyum oksit tabakalarının oluşumuna dayandırılarak açıklanmaktadır [3]. Şöyle ki, bu alaşımların iç yapısında bulunan alüminyumca zengin  $\alpha$  fazı ile bakır ve silisyumca zengin fazlar yük taşıma görevi yaparken, çinkoca zengin  $\eta$  fazı kaymayı kolaylaştırmaktadır [3, 57]. Ayrıca, aşınma yüzeylerinde oluşan sert alüminyum oksit tabakasının yük taşıma görevi yaptığı, çinko oksit tabakasının ise kaymayı kolaylaştırdığı bilinmektedir [3].

Savaşkan ve Murphy [3] tarafından yapılan bir çalışma sonucunda, çinko-alüminyum-silisyum alaşımlarının aynı çinko ve alüminyum oranlarına sahip çinko-alüminyum-bakır alaşımlarından daha üstün tribolojik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum yumuşak çinko-alüminyum matrisi içerisinde yer alan silisyum parçacıklarının varlığına, oranına ve dağılımına dayandırılarak açıklanmıştır [3, 10, 39, 40]. Silisyumun yapıdaki dağılımının ise silisyum oranına bağlı olduğu ve homojen bir dağılım elde edilebilmesi için bu oranın belirli bir değerin (%2) altında tutulmasının gerektiği ileri sürülmüştür [3, 39, 40, 66]. Alaşımdaki silisyum oranının %2'den fazla olması durumunda ise yapı içerisindeki silisyum parçacıklarının büyüdüğü ve bazı bölgelerde kümeleştikleri görülmüştür [39,40]. Bu durumun yapı içerisinde silisyumsuz bölgelerin oluşmasına yol açarak söz konusu alaşımların tribolojik özelliklerini olumsuz etkilediği gözlenmiştir [3, 39, 40]. Diğer taraftan çinko-alüminyum-silisyum alaşımlarının dökülmüş durumda, çinko-alüminyum-bakır alaşımlarının ise ısıtılma işlem görmüş durumda en üstün aşınma direnci sergiledikleri belirlenmiştir [3]. Bu durum alüminyum-çinko-silisyum alaşımlarının ana yapısının (matris) ısıtılma sırasında yumuşamasından, çinko-alüminyum-bakır alaşımlarının ise bakırca zengin fazların çökmesi nedeniyle sertleşmesinden kaynaklanmaktadır [3, 39].

Nikel katkısı  $Al_3Ni$ ,  $Ni_3Al$ ,  $Ni_3Zn_{22}$  ve  $Ni_5Zn_{21}$  gibi metaller arası bileşikler oluşturarak çinko-alüminyum alaşımlarının özellikle yüksek sıcaklıklardaki tribolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği gözlenmiştir [56, 61-64]. Bu durumun yapıdaki nikelce zengin fazların metal-metal teması durumunda adhezyonu engellemesinden kaynaklandığı ileri sürülmüştür [62]. Ayrıca, söz konusu fazların dağılımının bu özellikler

üzerinde etkili olduğu görülmüştür [62, 63]. Nitekim en üstün mekanik ve tribolojik özellikler bu fazların homojen dağılması durumunda elde edilmiştir [62, 63]. Ancak alüminyum esaslı Al-Zn-Cu, Al-Zn-Cu-Si ve Al-Zn-Cu-Ni alaşımlarının tribolojik özellikleri hakkında literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

### 1.5. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Kaymalı yatak üretiminde kullanılan beyaz metal, pirinç ve bronz gibi geleneksel malzemelerin pahalı, mekanik ve tribolojik özelliklerinin ise pek çok uygulama için yetersiz olması nedenleriyle bunların yerine kullanılması amacıyla yeni malzemeler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda çinko esaslı alaşımların mekanik ve tribolojik özellikler bakımından söz konusu malzemelerden daha üstün oldukları görülmüştür. Ayrıca çinko esaslı alaşımların geleneksel yatak malzemelerine göre üretiminin daha kolay, maliyetinin ise daha düşük olduğu belirlenmiştir.

İkili çinko-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin pek çok uygulama için yetersiz olduğu bilinmektedir. Bu nedenle söz konusu alaşımlara bakır, silisyum ve magnezyum gibi alaşım elementleri katılarak bunların hem mekanik hem de tribolojik özellikleri iyileştirilmesi yoluna gidilmiştir. Yapılan çalışmalar bakırın söz konusu alaşımların mekanik özelliklerini iyileştiren en önemli alaşım elementi olduğunu göstermiştir. Ancak belirli oranın üzerinde bakır katkılarının söz konusu alaşımlarda boyutsal kararsızlığa yol açtığı görülmüştür. Bu nedenle bu alaşımlara bakır yerine silisyum veya nikel katılması yoluna gidilmiş, ancak bu katkıların alaşımların mekanik özelliklerini bakır kadar iyileştirmediği görülmüştür. Son yıllarda bakır, silisyum ve/veya nikel içeren çinko esaslı dördü alaşımlar üretilerek bunların özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda geliştirilen dördü alaşımların çekme dayanımlarının üçlü çinko-alüminyum-bakır alaşımlarının söz konusu değerlerinden daha düşük olmasına rağmen, üçlü alaşımlardan daha üstün tribolojik özellikler sergilediği görülmüştür.

Çinko esaslı alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmenin diğer bir yolu da bunlara ısıtma işlemi uygulamaktır. Çözündürme ve su verme sonrası uygulanan yaşlandırma işlemi çinko esaslı alaşımların sertlik ve mukavemetini artırırken, dökülmüş durumdaki alaşımların yapısını kararlı hale getirmek amacıyla uygulanan stabilizasyon işlemi sözü edilen değerleri düşürmektedir. Bu nedenle söz konusu alaşımlar için amaca uygun olan ısıtma işleminin seçilmesi gerekir.

Alüminyum oranı arttıkça çinko-alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemeti artarken yoğunluğu düşmektedir. Nitekim monotektoid bileşime sahip alaşımların ötektik ve ötektoid bileşime sahip alaşımlardan daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere ve daha düşük yoğunluk değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu alaşımlar yatak yapımından başka, hafifliğin ön planda olduğu mühendislik uygulamaları için önemli bir potansiyel olarak düşünülmektedir. Ancak literatürde %40 değerinden daha yüksek oranlarda alüminyum içeren alüminyum-çinko esaslı alaşımların bu özellikleri yeterince incelenmemiştir. Bu nedenle bu çalışmada bakır, silisyum veya nikel katkılarının hem dökülmüş hem de ısıtılmış işlem görmüş durumdaki alüminyum-çinko esaslı alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkilerini inceleyerek bunların mühendislik alanlarındaki kullanımları için en uygun kimyasal bileşim, ısıtılmış işlem ve çalışma koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Alaşımın Üretimi ve Isıl İşlemi**

Bu çalışmada bir dizi ikili alüminyum-çinko, üçlü alüminyum-çinko-bakır, dörtlü alüminyum-çinko-bakır-silisyum ve alüminyum-çinko-bakır-nikel alaşımı kokil döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımın üretiminde ticari saflıkta (%99,70) alüminyum, yüksek saflıkta (%99,9) çinko, elektrolitik bakır ve nikel kullanıldı. Bakır içeren alaşımın üretiminde alüminyum-bakır (Al-50Cu), nikel içeren alaşımın üretiminde alüminyum-nikel (Al-6Ni), silisyum içeren alaşımın üretiminde ise Etial-140 (Al-12Si) alaşımı ön alaşım olarak kullanıldı. Ergitme işlemi elektrikli bir pota fırını içerisinde gerçekleştirildi. Ergitilen alaşımın kimyasal bileşim oranına göre belirlenen ve 600-700°C arasında yer alan sıcaklıklarda çelikten yapılmış 60 x 72 x 196 mm boyutlarındaki bir kalıba dökülerek katılaştırıldı. Üretilen alaşımın bir kısmı dökülmüş, bir kısmı da ısıl işlem görmüş durumda incelendi. Isıl işlem görmüş alaşımın, 375°C sıcaklıkta 30 saat süreli çözündürme işlemine tabi tutulduktan sonra suda soğutuldu ve ardından 100°C sıcaklıkta 2 saat yaşlandırıldı. Bu yaşlandırma süresi silisyum içeren dörtlü alaşımın içerisinde en yüksek mukavemete sahip olan Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma sırasındaki değişimine bakılarak belirlendi. Alaşımın kimyasal bileşimleri atomik absorpsiyon spektrometresi (AAS) kullanılarak tayin edildi. Bu çalışmada, ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla SAE 65 bronzu kullanıldı. Söz konusu bu bronz savurmalı döküm yöntemiyle üretilmiş olup, piyasadan temin edilmiştir.

### **2.2. Alaşımın Yapısal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**

Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumdaki alaşımlardan alınan numuneler standart metalografi yöntemiyle hazırlandıktan sonra sodyum hidroksit çözeltisi (1gr NaOH + 100 ml saf su) içerisinde dağlandı. Hazırlanan metalografi numuneleri hem ışık mikroskobu hem de taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelendi ve iç yapılarını gösteren fotoğraflar çekildi.

Alaşımın yoğunluğunu belirlemek amacıyla talaşlı işlemle hazırlanan numunelerin boyutları  $\pm 0,001$  mm hassasiyetindeki bir mikrometre ile ölçülerek hacimleri hesaplandı.

Numunelerin kütleleri ise  $\pm 0,01$  mg hassasiyetine sahip bir terazide ölçüldü. Ölçülen kütle değerlerinin hesaplanan hacim değerlerine bölünmesi sonucunda alaşımların yoğunlukları belirlendi.

Alaşımların sertliği, Brinell sertlik ölçme yöntemi ile 62,5 kg yük altında 2,5 mm çapında uç kullanılarak ölçüldü. Her bir numune üzerinden beş sertlik ölçümü yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alındı. Alaşımların ana yapısını (matris) oluşturan  $\alpha$  dendritlerinin mikrosertliği ise Vickers sertlik ölçme yöntemi ile 50 g'lık yük uygulanarak ölçüldü.

Alaşımlardan, talaşlı yöntemle 8 x 40 TS 138A standardına uygun olarak hazırlanan numuneler  $6,25 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 'lik deformasyon hızında çekme deneyine tabi tutuldu. Her alaşım için üç adet çekme numunesi kullanıldı. Elde edilen sonuçların ortalaması alınarak alaşımların çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri belirlendi.

### 2.3. Alaşımların Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi

Alaşımların sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi için şematik resmi Şekil 4'de verilen blok-disk esaslı bir deney düzeneği kullanıldı. Bu deney düzeneği 3 kW gücünde bir elektrik motoru, 12 kW gücünde bir hız kontrol ünitesi, rulmanlarla yataklanan bir mil, bir disk, bir numune tutucusu, bir yükleme kolu, yağlama devresi ve sürtünme kuvveti ölçüm devresinden oluşmaktadır. Düzenekte kullanılan disk bir kaymalı yatak ünitesindeki mili, numune ise yatağı temsil etmektedir. Çapı 150 mm olan bu disk SAE 4140 çeliğinden imal edildi ve ısıl işleme  $55 \pm 1$  RSD-C değerine kadar sertleştirildi. Sertleştirilen diskin yüzeyi  $\pm 3 \text{ } \mu\text{m}$ 'lik bir hassasiyetle taşlandı. Motorun devir sayısı (milin dönme hızı) elektrik devresine yerleştirilen hız kontrol ünitesi ile ayarlandı. Yükleme, örnek tutucusunun bağlı olduğu yükleme kolunun ucuna ağırlık asmak suretiyle gerçekleştirildi. Yükleme kolu bir perno ile yataklandı ve üzerindeki dengeleme ağırlığı yardımıyla dengelendi. Yağlama ise yüksek bir yere yerleştirilen depodan ince bir hortum vasıtasıyla alınan yağın bir debi ayarlayıcısından geçirildikten sonra diskin numuneyle temasta olan yan yüzeyine damlatılmasıyla gerçekleştirildi. Deneylerde SAE 20W/50 normuna uygun motor yağı kullanıldı. Deney düzeneğinin genel görünümünü ve ayrıntılarını gösteren fotoğraflar Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

Al-40Zn esaslı alaşımlar ile DIN-1705 veya SAE 65 bronzundan (CuSn12) talaşlı işleme 10 x 15 x 35 mm boyutlarında sürtünme ve aşınma numuneleri hazırlandı.



Hazırlanan numunelerin uçları, iç çapı  $149,6 \pm 0,05$  mm olan bir kalıpta işlendi. Bu numunelerin teknik resmi Şekil 7’de verilmiştir.

Sürtünme kuvvetini ölçmek için numune tutucusu ile sabit mesnet arasına çekme kuvvetini gerilime çeviren 50 kg kapasiteli S-tipi bir yük hücresi (load cell) yerleştirildi. Yük hücresinden alınan elektriksel sinyal (gerilim değeri) bir yükselticide (strain indicator) kuvvetlendirildikten sonra bir yazıcıya aktarıldı ve böylece numune ile diskin yan yüzeyi arasındaki sürtünme kuvvetine ait gerilimin deney süresine göre değişimi sürekli olarak kaydedildi. Yük hücresi, ucuna belirli ağırlıklar asılarak elde edilen verilerin (gerilim) değerlendirilmesi suretiyle kalibre edildi. Gerilimin uygulanan yüke göre değişimini gösteren kalibrasyon doğrusu Şekil 8’de verilmiştir. Deney süresince yazıcı tarafından kaydedilen gerilim değerleri kalibrasyon doğrusu yardımıyla sürtünme kuvvetine dönüştürüldü. Daha sonra bu değer normal yüke bölünerek sürtünme katsayısı belirlendi. Deney numunesinin sıcaklığı ise temas yüzeyinin 1,5 mm yukarısına açılan bir deliğe yerleştirilen bakır-nikel termoeleman çifti yardımıyla ölçüldü ve bunun deney süresine göre değişimi bir yazıcı ile çizdirildi.

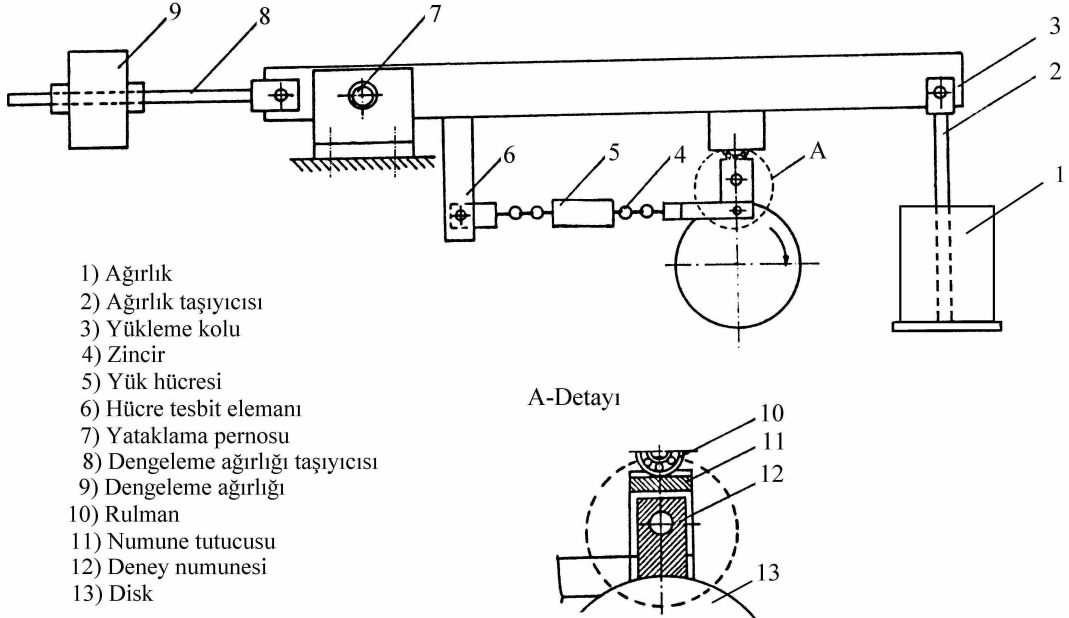
Üretilen Al-40Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kaybını belirlemek için hazırlanan numuneler aşınma deney düzeneğinde deneye tabi tutuldu. Sürtünme katsayısı ile sıcaklık 64.8 km’lik yola karşılık gelen 12 saat süreyle, hacim kaybı değerleri ise 907 km’lik yola karşılık gelen 168 saat süreyle ölçüldü. Bu deneylere başlamadan önce, kimyasal çözücüler içerisinde ultrasonik temizleyici yardımı ile temizlenen deney numunelerinin kütleleri,  $\pm 0,01$  mg’lık hassasiyete sahip bir terazi ile ölçüldü. Belirli çalışma süreleri sonunda kimyasal çözücüler içerisinde ultrasonik yöntemle tekrar temizlenen deney numuneleri tartılarak, alaşımlarda aşınma ile meydana gelen kütle kayıpları belirlendi. Ölçülen kütle kayıpları alaşımların yoğunluklarına bölünerek, alaşımlarda meydana gelen hacim kaybı hesaplandı. Silisyum ve nikel oranlarının söz konusu alaşımlar içerisinde en yüksek mukavemet ve aşınma direnci sergileyen Al-40Zn-3Cu alaşımının sürtünme ve aşınma davranışlarına etkisini belirlemek için de 400 km’lik yola karşılık gelen 74 saat süreli aşınma deneyleri yapıldı. Bu deneyler 6 MPa’lık basınç altında, 1,5 m/s’lik kayma hızında ve 1,5 cm<sup>3</sup>/saat’lik yağ debisinde gerçekleştirildi.

Basıncın alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve aşınma ile meydana gelen hacim kaybına etkilerini belirlemek için deney numuneleri aşınma deney düzeneğinde 2-8 MPa arasında değişen basınçlarda 74 saat süreyle deneye tabi tutuldu ve her bir deney 400

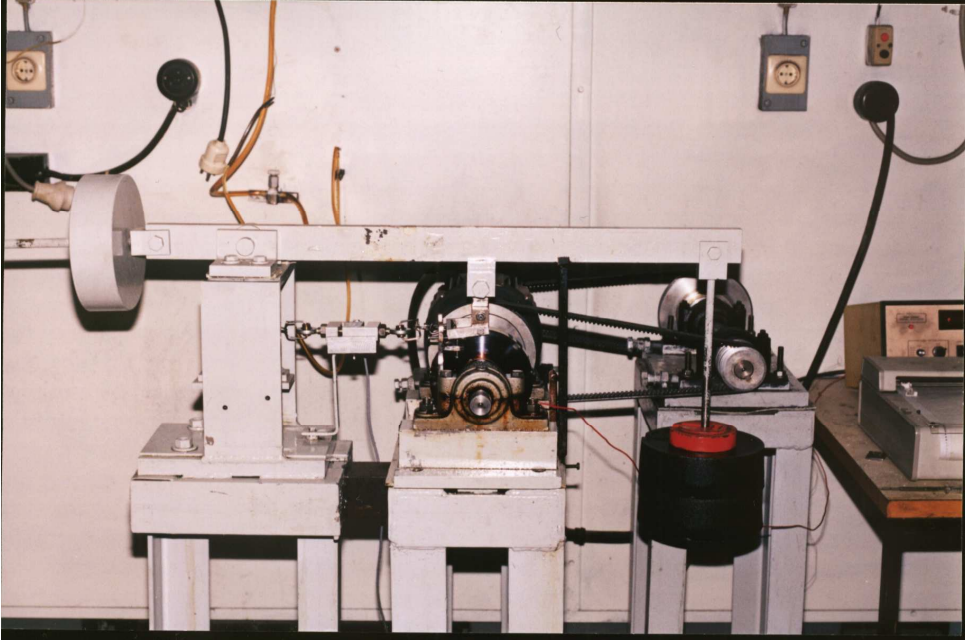
km'lik kayma mesafesi (yol) tamamlanincaya kadar sürdürüldü. Bu deneyler 1,5 m/s'lik kayma hızı ve 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisinde yapıldı. Kayma hızının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybına etkilerini belirlemek amacıyla deney numuneleri 0,5-3 m/s aralığında yer alan farklı kayma hızlarında 100 km'lik kayma mesafesi tamamlanincaya kadar deneylere tabi tutuldu. Bu deneyler 6 MPa'lık basınç altında ve 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisinde yapıldı. Yağ debisinin alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybına etkilerini belirlemek için de deney numuneleri 7 MPa'lık basınç altında, 1,5 m/s'lik kayma hızında ve 0,5-2,5 cm<sup>3</sup>/saat arasında değişen yağ debilerinde 30 dakika'lık süreyle 2,7 km'lik kayma mesafesi tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutuldu.

#### 2.4. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

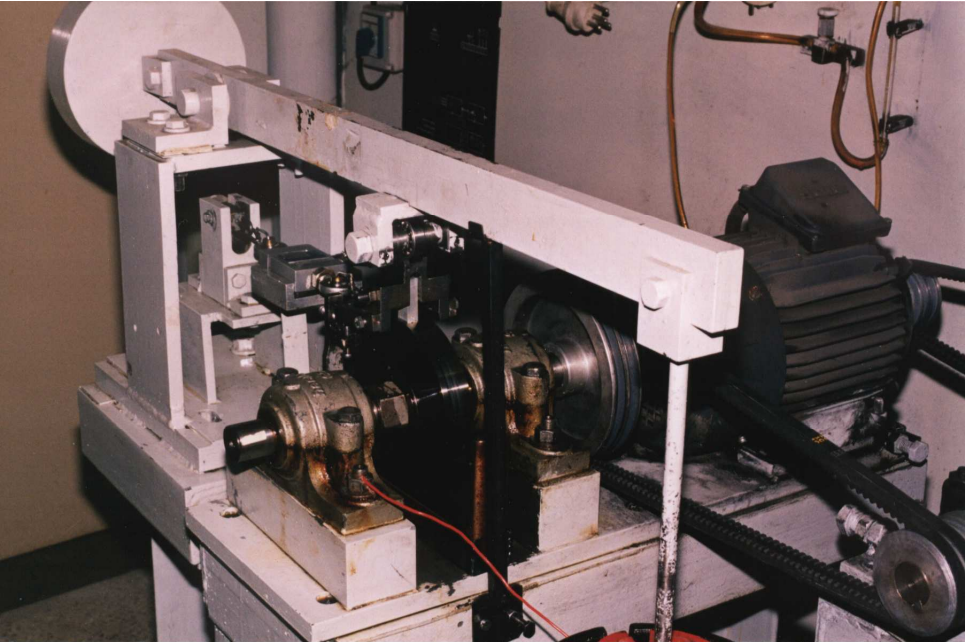
Talaşlı imalat yöntemiyle üretilen aşınma numunelerinin yüzeyinde aşınma sonucu meydana gelen değişimleri tam olarak belirlemek amacıyla söz konusu örneklerin yüzeyi aşınma deneylerinden önce ve sonra tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenerek fotoğrafları çekildi.



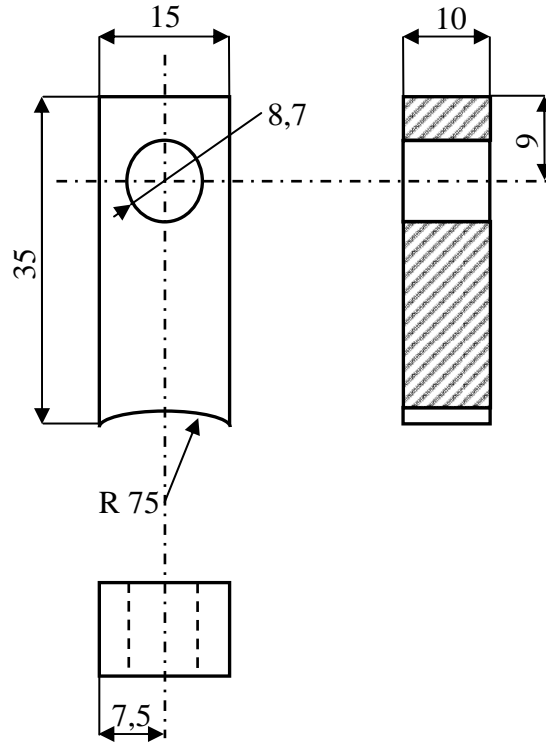
Şekil 4. Blok-disk esaslı aşınma deney düzeneğinin şematik resmi



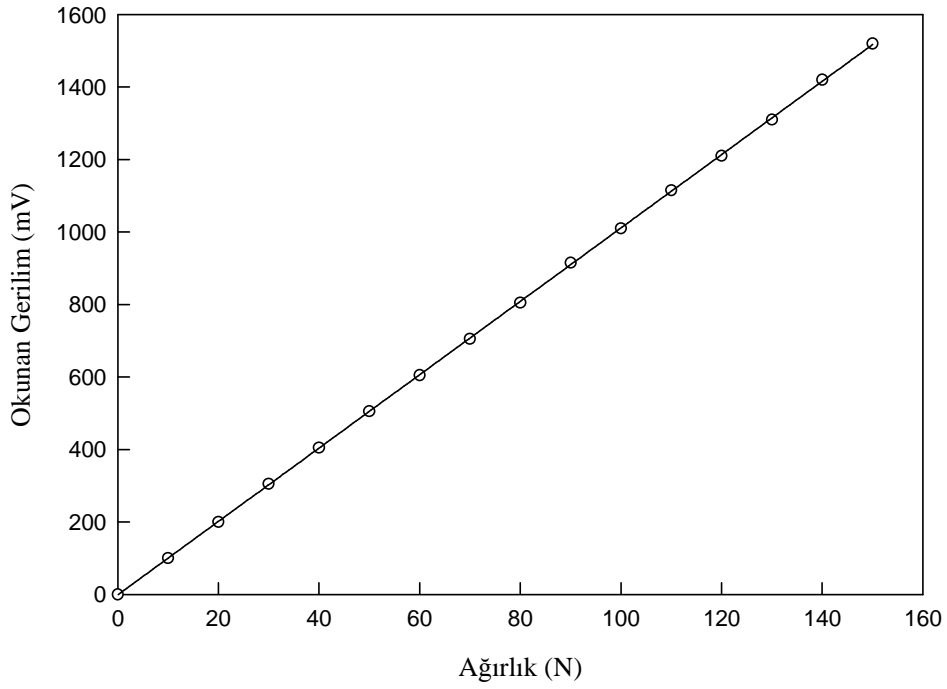
Şekil 5. Aşınma deney düzeneğinin fotoğrafı



Şekil 6. Aşınma deney düzeneğinde numune, numune tutucusu ve diskin yakından görünümü



Şekil 7. Sürtünme ve aşınma deneylerinde kullanılan numunenin teknik resmi



Şekil 8. Sürtünme kuvvetinin ölçümünde kullanılan yük hücresine ait kalibrasyon doğrusu

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Alaşımların kimyasal bileşimleri

Alaşım	Kimyasal bileşim (%)				
	Al	Zn	Cu	Si	Ni
Al-10Zn	91,6	8,4	---	---	---
Al-20Zn	81,2	18,8	---	---	---
Al-25Zn	73,7	26,3	---	---	---
Al-30Zn	71,3	28,7	---	---	---
Al-40Zn	61,2	38,8	---	---	---
Al-50Zn	48,6	51,4	---	---	---
Al-10Zn-2Cu	86,7	11,2	2,1	---	---
Al-20Zn-2Cu	77,0	21,0	2,0	---	---
Al-25Zn-2Cu	73,4	24,7	1,9	---	---
Al-30Zn-2Cu	65,3	32,6	2,1	---	---
Al-35Zn-2Cu	62,1	35,8	2,1	---	---
Al-40Zn-2Cu	56,8	41,0	2,2	---	---
Al-50Zn-2Cu	46,9	51,0	2,1	---	---
Al-40Zn-1Cu	59,1	39,7	1,2	---	---
Al-40Zn-2Cu	56,8	41,0	2,2	---	---
Al-40Zn-3Cu	56,9	40,0	3,1	---	---
Al-40Zn-4Cu	56,9	39,0	4,1	---	---
Al-40Zn-5Cu	56,4	38,4	5,2	---	---

Tablo 5'in devamı

Alaşım	Kimyasal bileşim (%)				
	Al	Zn	Cu	Si	Ni
Al-40Zn-3Cu-0,25Si	57,4	39,2	3,1	0,3	---
Al-40Zn-3Cu-0,5Si	56,9	39,3	3,2	0,6	---
Al-40Zn-3Cu-1Si	57,0	38,8	3,1	1,1	---
Al-40Zn-3Cu-2Si	54,5	40,3	3,0	2,2	---
Al-40Zn-3Cu-3Si	55,2	38,7	3,0	3,1	---
Al-40Zn-3Cu-4Si	54,0	39,0	3,1	3,9	---
Al-40Zn-3Cu-5Si	52,0	40,1	3,0	4,9	---
Al-40Zn-3Cu-0,5Ni	57,6	39,1	2,9	---	0,4
Al-40Zn-3Cu-1Ni	56,0	40,0	3,1	---	0,9
Al-40Zn-3Cu-1,5Ni	55,9	39,4	3,1	---	1,6
Al-40Zn-3Cu-2Ni	56,1	38,9	3,1	---	1,9
Al-40Zn-3Cu-2,5Ni	55,1	39,4	3,1	---	2,4
Al-40Zn-3Cu-3Ni	54,5	39,3	3,1	---	3,1

### 3.2. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular

Bu çalışmada baz alınan dökülmüş durumdaki ikili Al-40Zn alaşımının iç yapısının alüminyumca zengin göbekli  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen ötektoid  $\alpha + \eta$  fazlarından oluştuğu görüldü, Şekil 9. Bu alaşıma bakır katıldığında metalografik yapısının fazla değişmediği, ancak dendritlerarası bölgelerde bakırca zengin  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) fazının oluştuğu gözlemlendi, Şekil 10-14. Bakır oranı arttıkça  $\theta$  fazına ait parçacıkların irileşerek daha belirgin hale geldikleri görüldü.

Dörtlü Al-40Zn-3Cu-(0,25-5)Si alaşımlarının iç yapısında ise, üçlü Al-40Zn-3Cu alaşımının iç yapısından farklı olarak silisyum parçacıklarının yer aldığı görüldü, Şekil 15-20. Bu alaşımların iç yapısında yer alan silisyum parçacıklarının iri ve ince olmak üzere iki farklı görünüm sergiledikleri gözlemlendi. Bunlardan iri olanlar birincil (primer), ince olanlar ise ötektik dönüşüm ürünü silisyum parçacıkları olarak adlandırıldı. Söz konusu

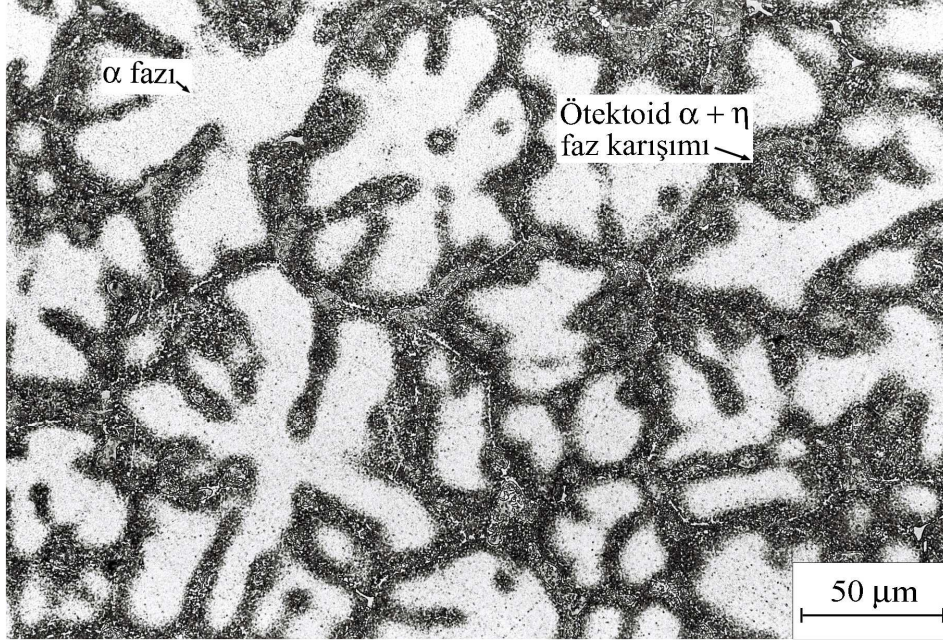
parçacıkların büyüklük ve dağılım biçiminin silisyum oranına göre değiştiği görüldü. Şöyle ki, %2'den daha düşük oranlarda silisyum içeren alaşımlarda silisyum parçacıkları ince olup, daha çok dendritlerarası bölgelerde yer almaktadır, Şekil 15-16. Bu değerden daha yüksek oranlarda silisyum içeren alaşımlarda ise hem ince hem de iri silisyum parçacıklarının bulunduğu ve bu parçacıkların dendritiçi ve dendritlerarası bölgelerde yer aldıkları görüldü, Şekil 18-20. Ayrıca, silisyum oranı arttıkça silisyum parçacıkların büyüdüğü ve yapı içerisinde belirli bölgelerde toplandıkları veya kümelendikleri gözlemlendi, Şekil 21.

Dörtlü alüminyum-çinko-bakır-nikel alaşımlarının iç yapılarını gösteren fotoğraflar da Şekil 22-25'de verilmiştir. Bu fotoğraflara bakıldığında, söz konusu alaşımların iç yapılarının  $\alpha$ ,  $\alpha + \eta$  ve  $\theta$  fazları ile dendritiçi ve dendritlerarası bölgelerde yer alan nikelce zengin fazlardan oluştuğu görülmektedir. Enerji dispersif spektrometresi (EDS) yardımıyla yapılan analizler sonucunda nikelce zengin fazların  $Al_3Ni$  olduğu belirlendi. Nikel oranı arttıkça bu fazların büyüklük ve oranının arttığı gözlemlendi.

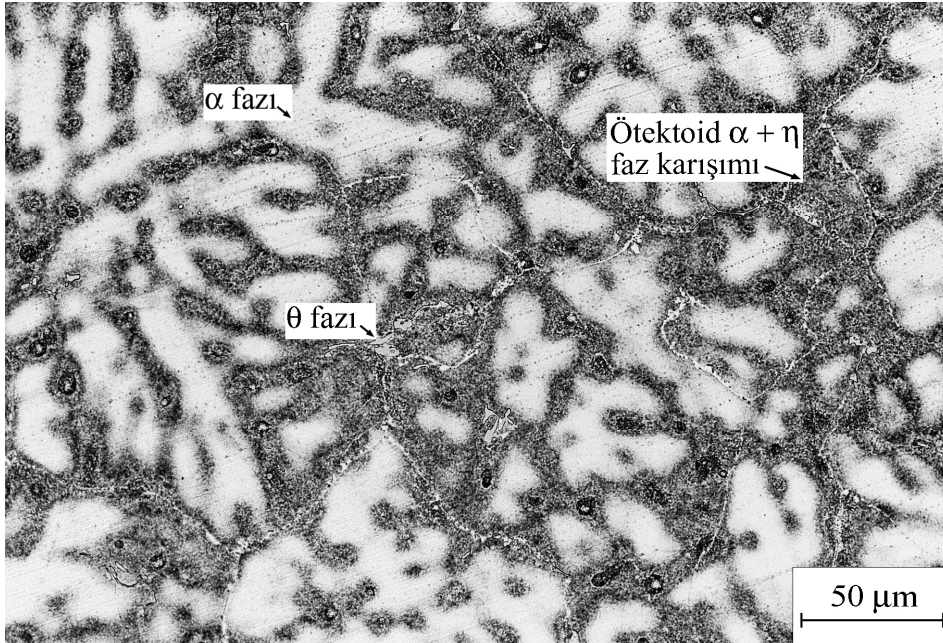
Uygulanan ısı işlem sonucunda alaşımların dendritik yapılarının ortadan kalktığı ve bunların yerini çinkoca zengin ince çökeltilerin aldığı görüldü. Şekil 26 ve 27. Ancak, bu alaşımlarda bulunan silisyum parçacıkları ile bakır ve nikelce zengin fazlarda ( $\theta$  ve  $Al_3Ni$ ) ısı işleminden sonra herhangi bir değişim gözlenmedi.

SAE 65 bronzunun iç yapısını gösteren fotoğraf ise Şekil 28'de verilmiştir. Bu fotoğrafta söz konusu alaşımın mikroyapısının bakırca zengin  $\alpha$  dendritleri ile ötektoid  $\alpha$  ve  $\delta$  fazlarından oluştuğu görülmektedir.



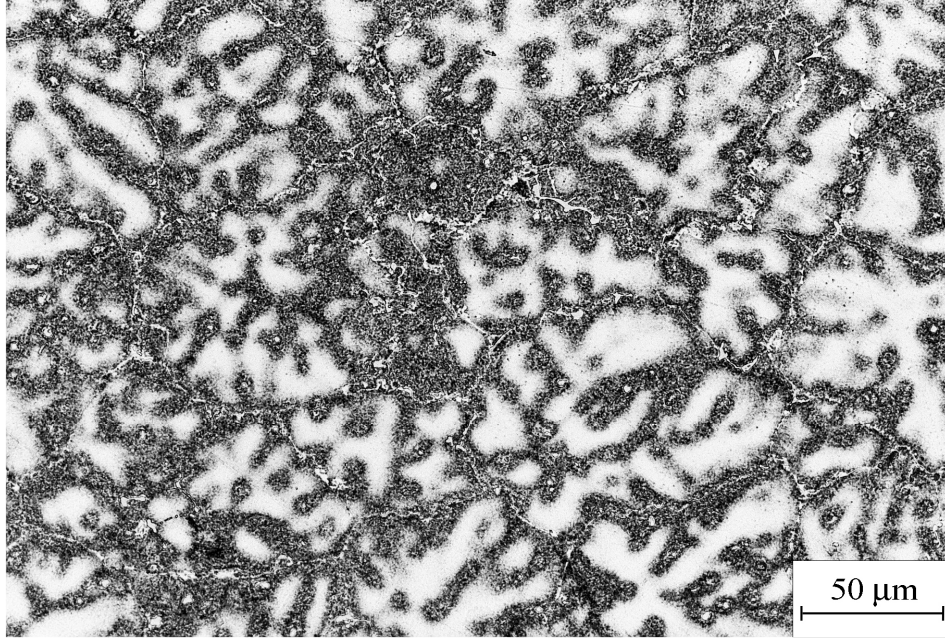


Şekil 9. Al-40Zn alaşımlının dökülmüş durumdaki iç yapısı

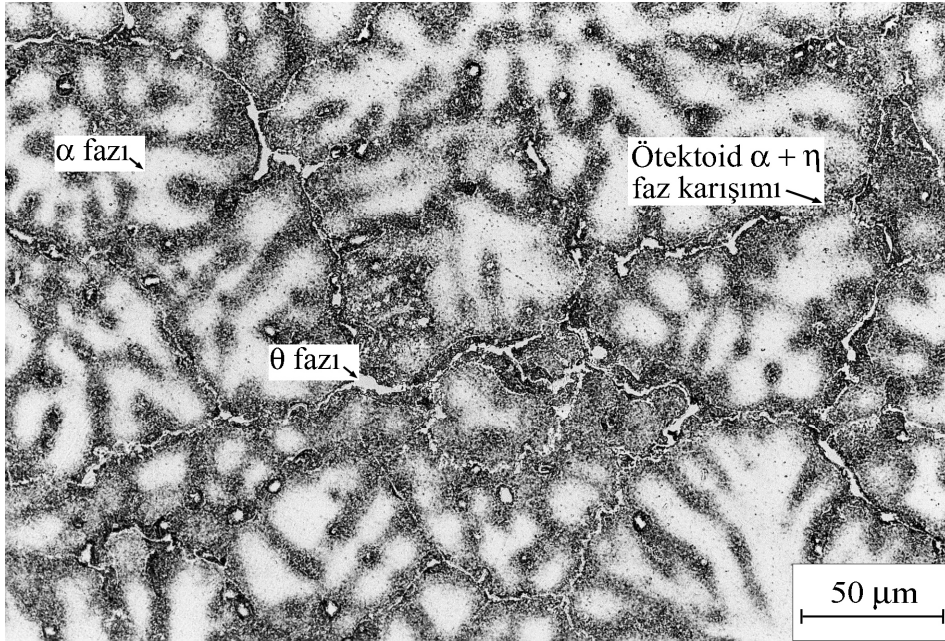


Şekil 10. Al-40Zn-1Cu alaşımlının dökülmüş durumdaki iç yapısı

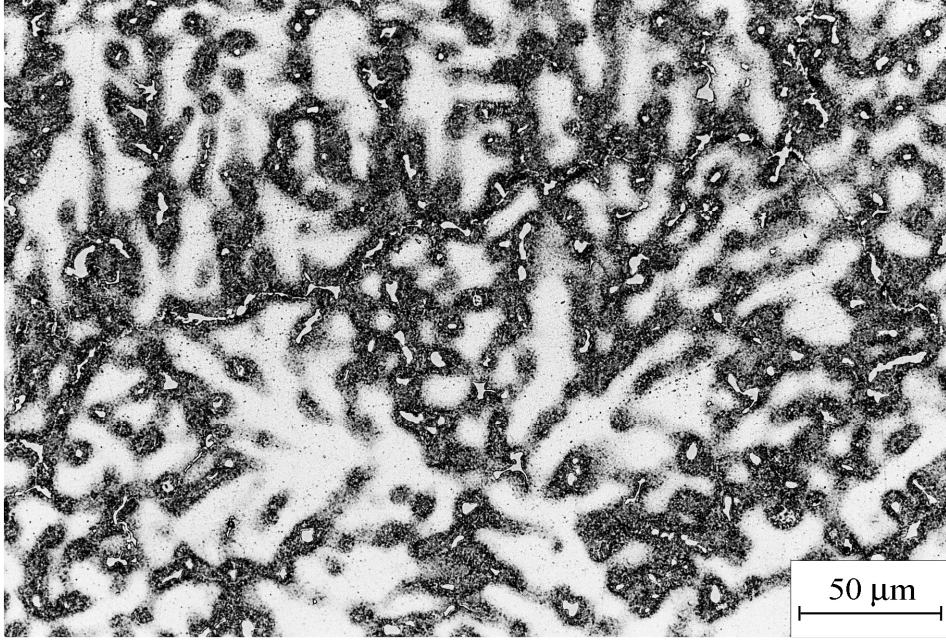




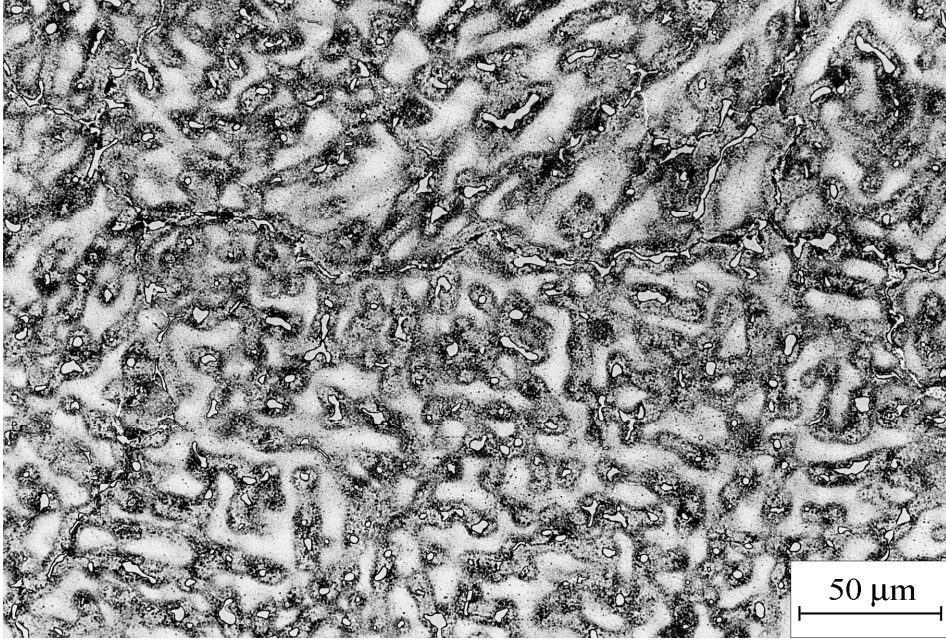
Şekil 11. Al-40Zn-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı



Şekil 12. Al-40Zn-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı

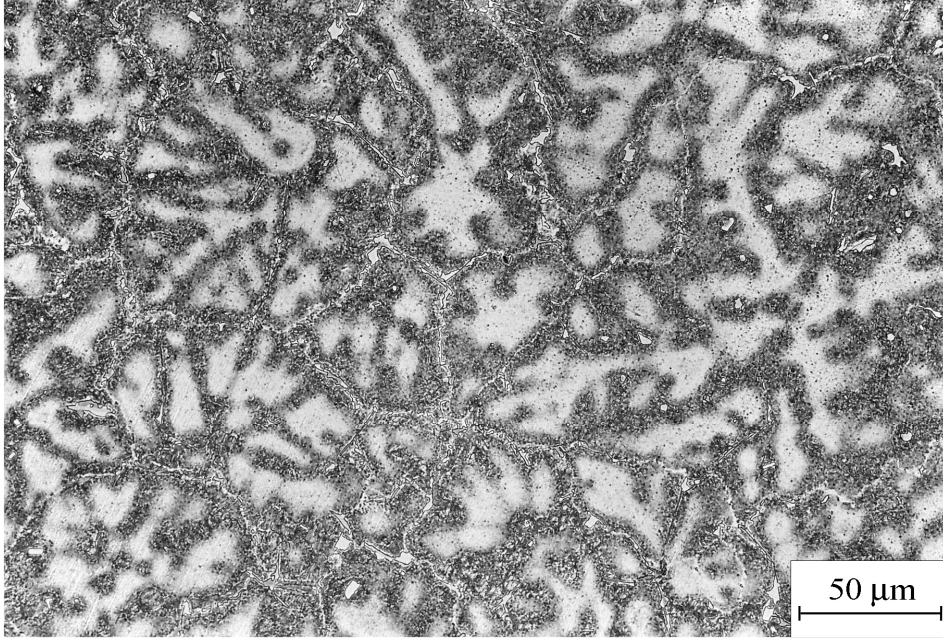


Şekil 13. Al-40Zn-4Cu alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı

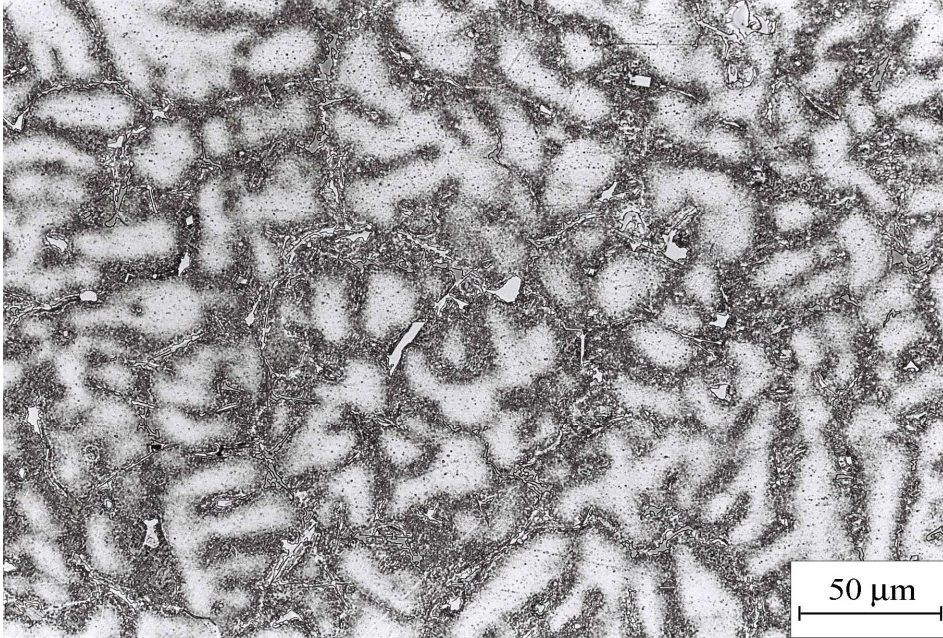


Şekil14. Al-40Zn-5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı



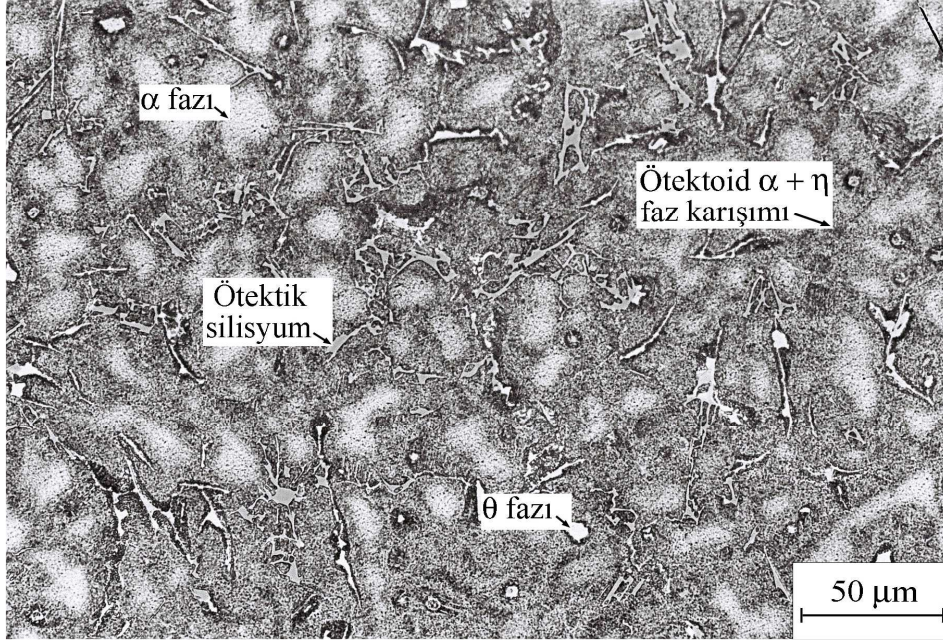


Şekil 15. Al-40Zn-3Cu-0,25Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı

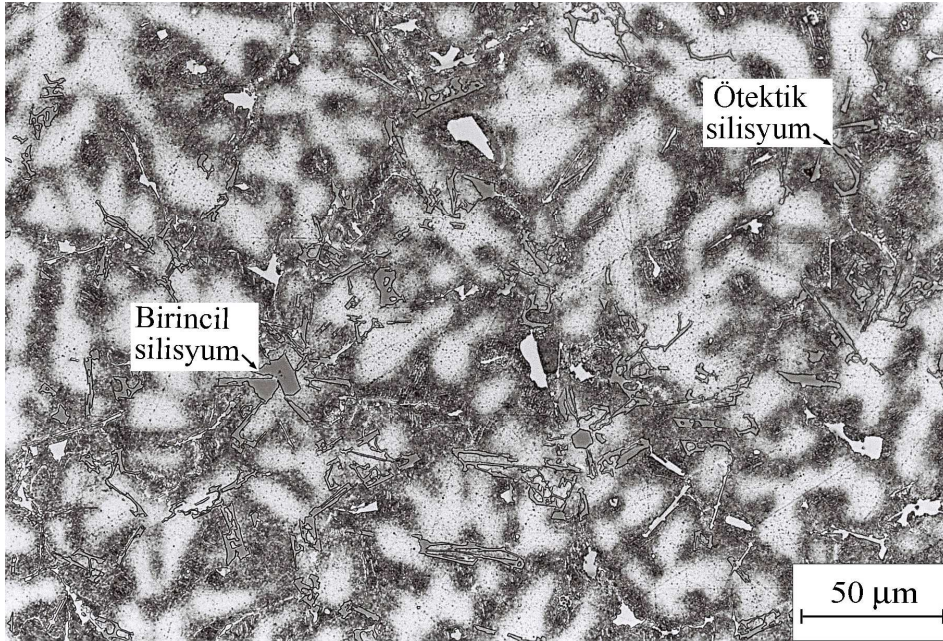


Şekil 16. Al-40Zn-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı



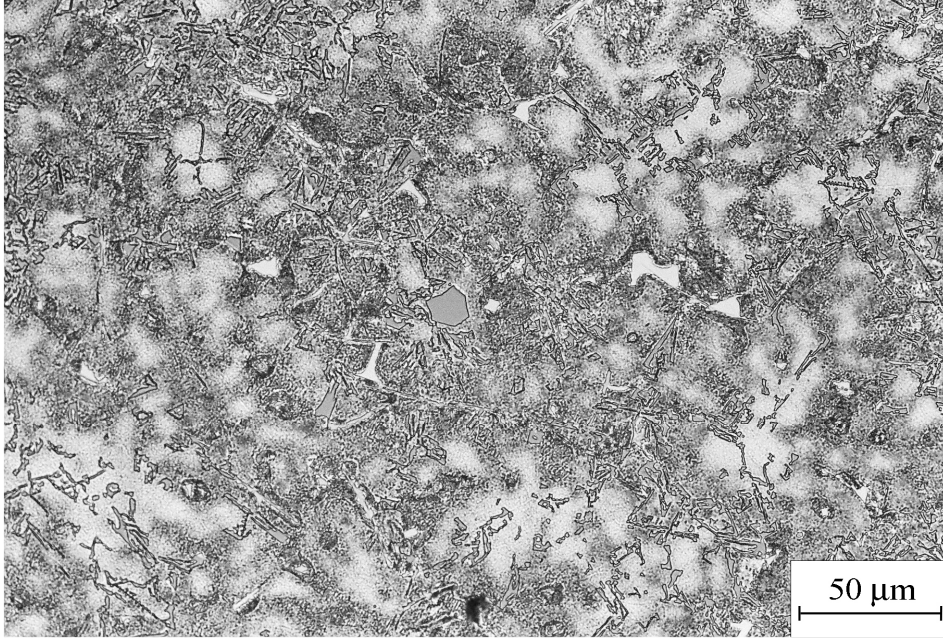


Şekil 17. Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı

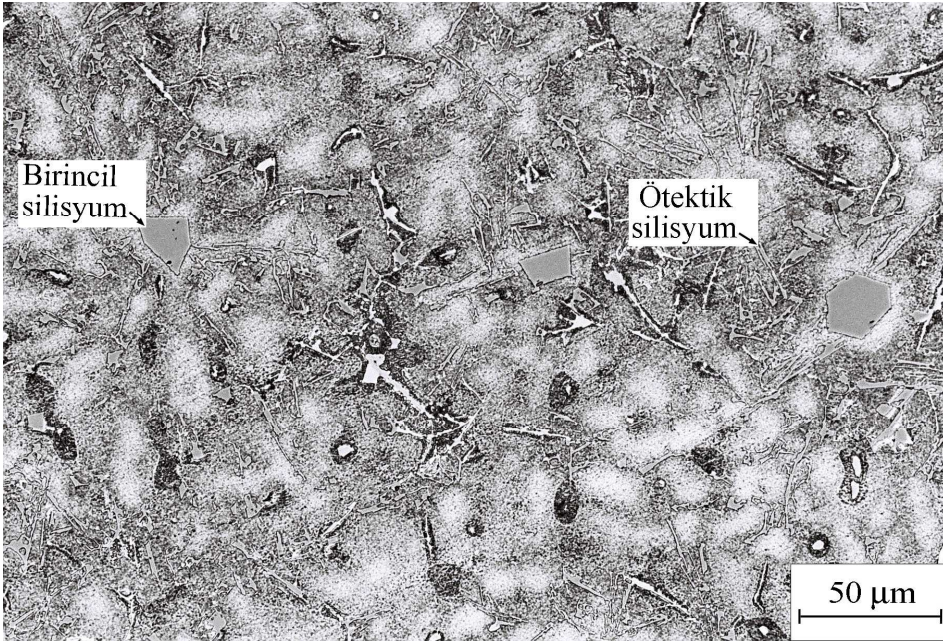


Şekil 18. Al-40Zn-3Cu-3Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı





Şekil 19. Al-40Zn-3Cu-4Si alaşımanın dökülmüş durumdaki iç yapısı

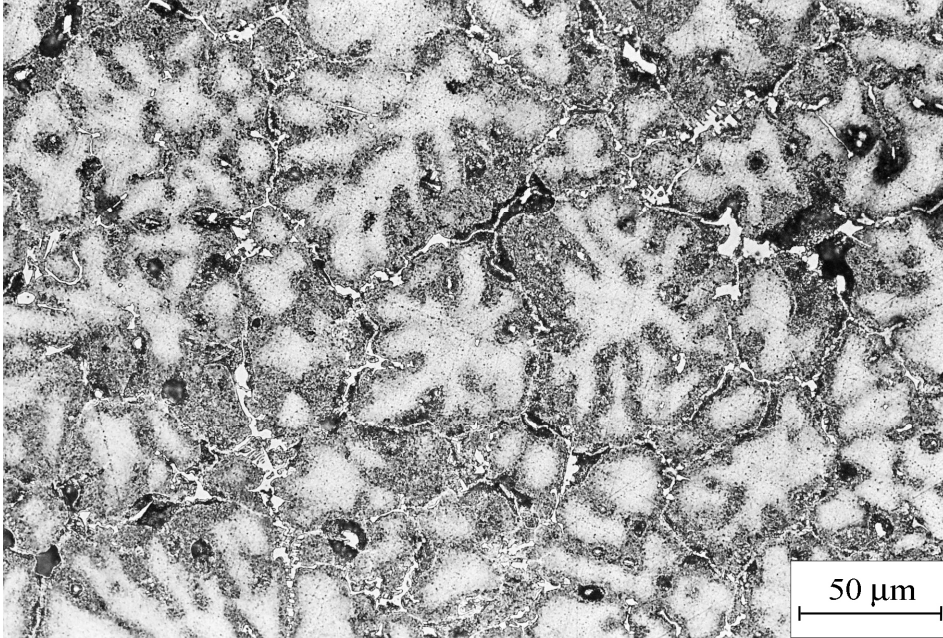


Şekil 20. Al-40Zn-3Cu-5Si alaşımanın dökülmüş durumdaki iç yapısı



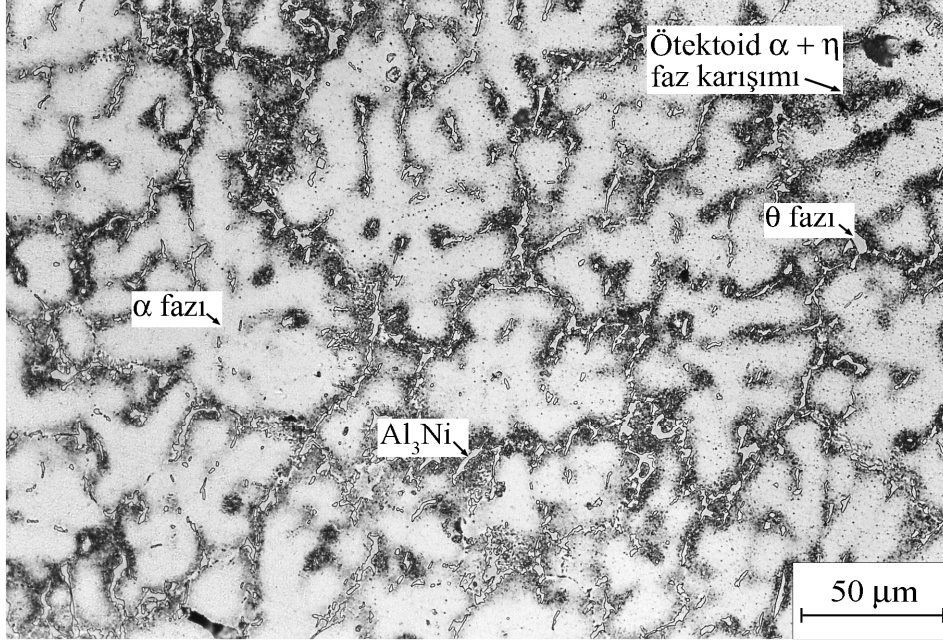


Şekil 21. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-5Si alaşımında birincil silisyum parçacıklarının kümeleşmesini gösteren fotoğraf

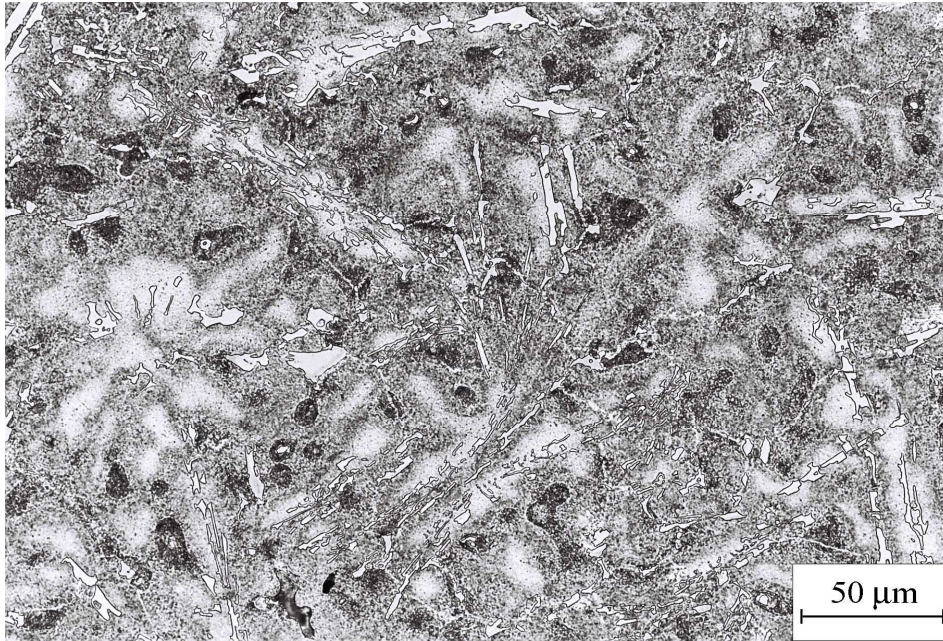


Şekil 22. Al-40Zn-3Cu-0,5Ni alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı



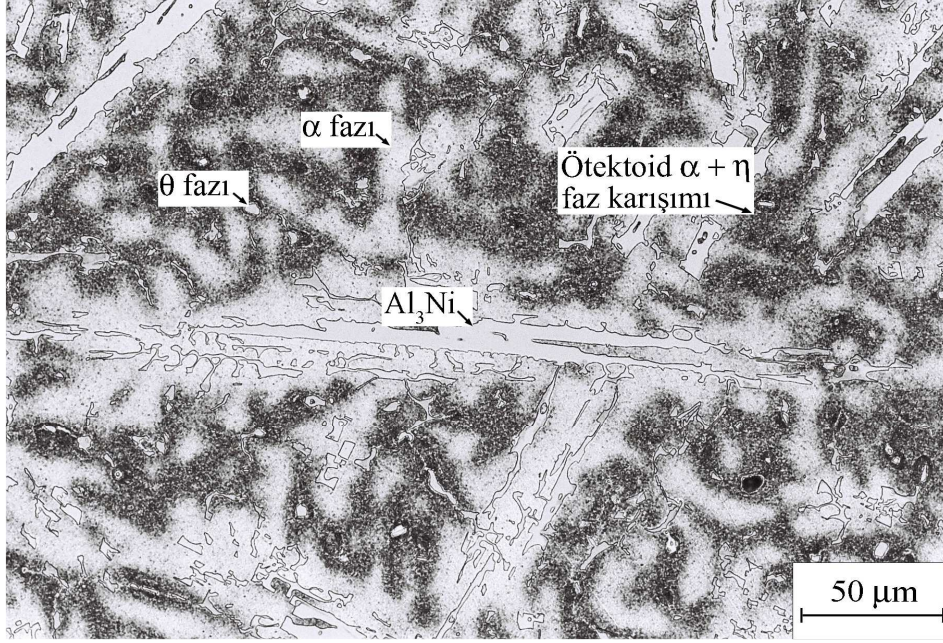


Şekil 23. Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı

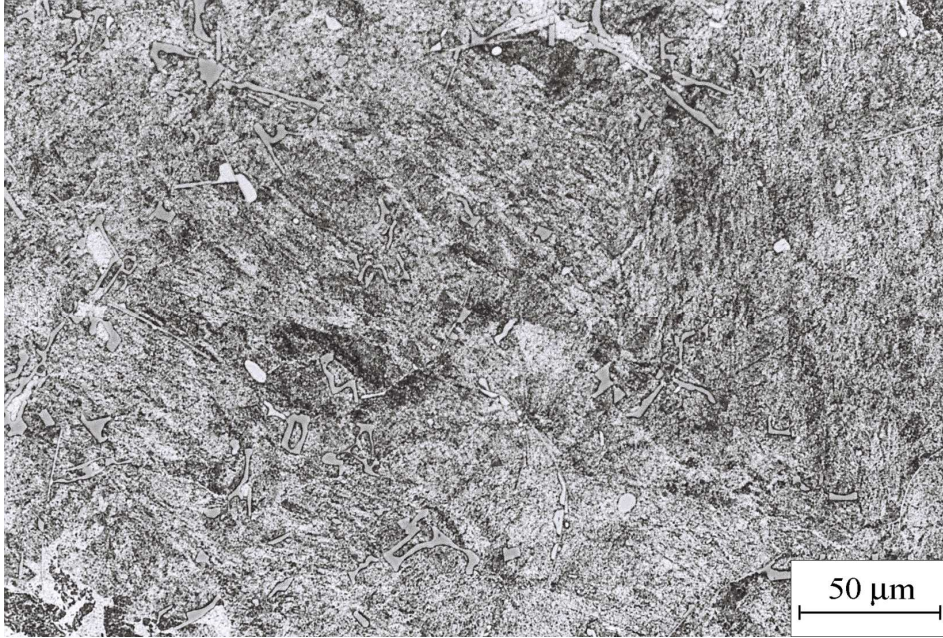


Şekil 24. Al-40Zn-3Cu-2Ni alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı



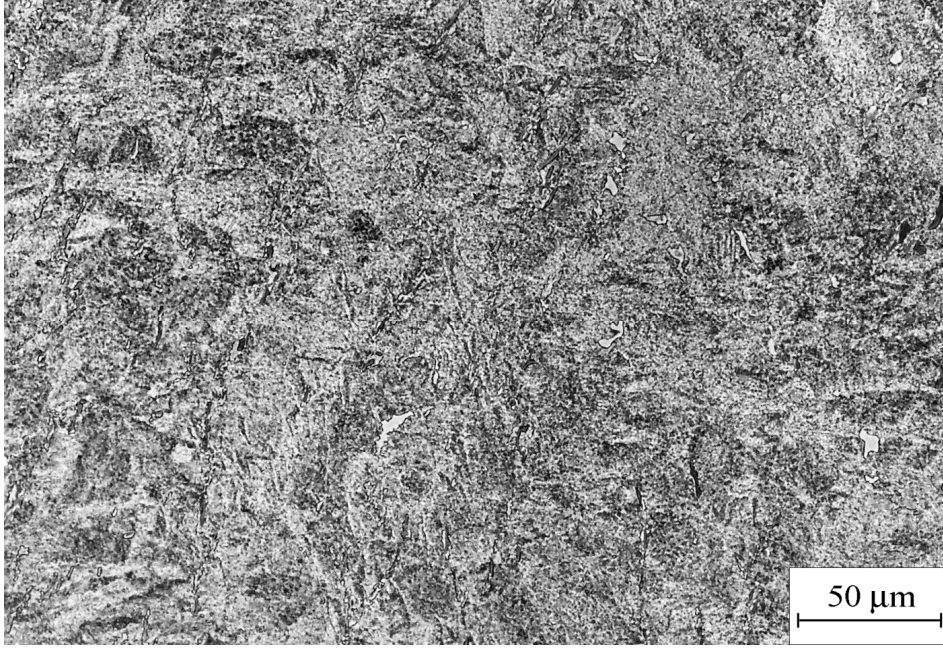


Şekil 25. Al-40Zn-3Cu-3Ni alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı

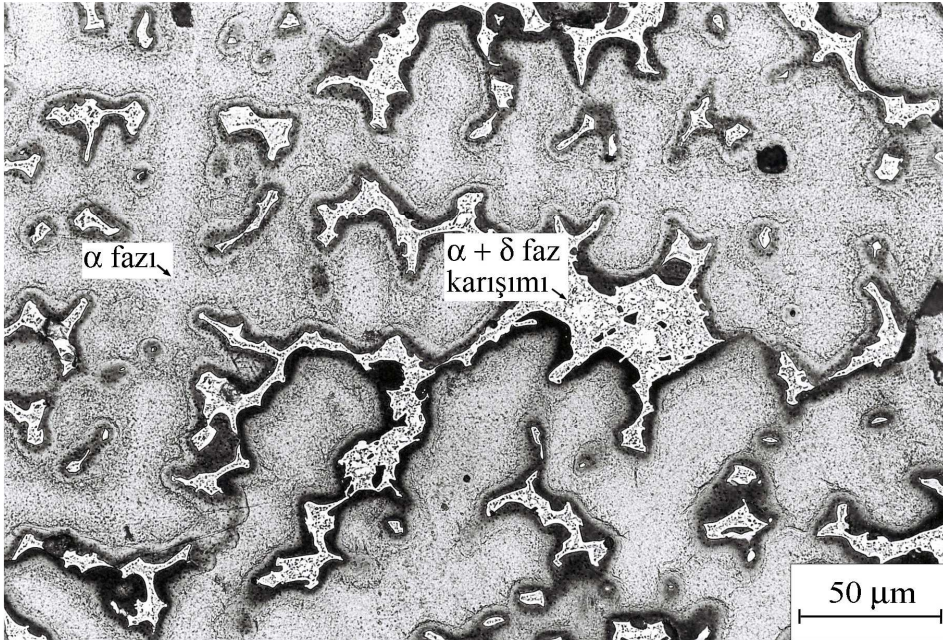


Şekil 26. Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının ısı işlem görmüş durumdaki iç yapısı





Şekil 27. Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşımının ısıtım işlem görmüş durumdaki iç yapısı



Şekil 28. SAE 65 bronzunun iç yapısı

### 3.1.3. Fiziksel ve Mekanik Deneylelerden Elde Edilen Bulgular

Alaşımların yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Bu tabloda alaşımların yoğunluklarının artan çinko, bakır ve nikel oranları ile artarken, artan silisyum oranı ile de azaldığı görülmektedir. İkili alüminyum-çinko ve %2 oranında bakır içeren üçlü alüminyum-çinko-bakır alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin çinko oranına göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 29 ve 30'da verilmiştir. Bu eğrilerde görüldüğü gibi ikili alaşımların sertlik ve çekme dayanımı artan çinko oranı ile artarak %25 Zn oranında en yüksek değerine ulaşmakta, bu değer üzerinde ise artan çinko oranı ile azalmaktadır. Alaşımların kopma uzaması ise artan çinko oranı ile azalmakta, %30 Zn oranından sonra da artmaktadır. Bakır katkısı alaşımların sertlik ve çekme dayanımını artırmakta, kopma uzamasını ise azaltmaktadır. İkili alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemet Al-25Zn alaşımından elde edilirken, Al-40Zn-2Cu alaşımının %2 oranında bakır içeren üçlü alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemete sahip olduğu belirlendi. Bu nedenle bu çalışmada Al-40Zn alaşımı baz alınarak bakır, silisyum ve nikel katkılarının bu alaşımın yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelendi.

Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması ile matrisi oluşturan  $\alpha$  fazının mikrosertliğinin bakır oranına göre değişimini gösteren eğriler Şekil 31'de verilmiştir. Bu eğrilerde görüldüğü gibi söz konusu alaşımların sertliği artan bakır oranı ile sürekli artmakta, matrisi oluşturan  $\alpha$  fazının mikrosertiği ise %3 Cu oranına kadar arttıktan sonra bu değer üzerinde bakır oranlarında sabit kalmaktadır. Alaşımların çekme dayanımı ise artan bakır oranı ile artarak %3 Cu oranında en yüksek değerine ulaşmakta ve bu oranının üzerindeki bakır oranlarında düşmektedir. Ayrıca alaşımların kopma uzaması değeri artan bakır oranı ile azalmaktadır.

Silisyum oranın üçlü Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımları içerisinde en yüksek mukavemete sahip olan Al-40Zn-3Cu alaşımının mekanik özelliklerine etkisini gösteren eğriler Şekil 32'de verilmiştir. Bu eğrilere bakıldığında alaşımların çekme dayanımının artan silisyum oranı ile önce azalıp, daha sonra artarak %2 silisyum oranında en yüksek değerine ulaştıktan sonra tekrar azaldığı görülmektedir. Ancak silisyum içeren dördü alaşımların çekme dayanımının silisyum içermeyen Al-40Zn-3Cu alaşımının bu değerinden daha düşük olduğu görüldü. Diğer taraftan silisyum oranı arttıkça alaşımların sertliğinin arttığı, kopma uzamasının ise azaldığı gözlemlendi.

Nikel oranının Al-40Zn-3Cu-(0-3)Ni alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması ile içerdikleri  $\alpha$  fazının mikrosertliğine etkisini gösteren eğriler ise Şekil 33'de verilmiştir. Bu eğrilerde görüldüğü gibi nikel oranı arttıkça alaşımların çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri azalmaktadır. Söz konusu alaşımların sertliği %1 Ni oranında bir maksimumdan geçtikten sonra azalmakta ve %2,5 Ni oranından sonra artarak %1 Ni oranında elde edilen en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu alaşımların matrisini oluşturan  $\alpha$  fazının mikrosertliğinin alaşımların sertliğine benzer bir değişim sergilediği görüldü.

Çözündürme ve su verme işlemi sonrasında yaşlandırma işlemine tabi tutulan Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri Şekil 34'de verilmiştir. Bu eğride söz konusu alaşımın sertliğinin artan yaşlandırma süresiyle önce artıp, bir tepe noktasından geçtikten sonra azaldığı görülmektedir. Diğer taraftan çözündürme ve su verme sonrası 2 saat süreyle yaşlandırılan Al-40Zn-3Cu-2Si ve Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşımlarının sertlik ve çekme dayanımının arttığı, kopma uzaması değerinin ise azaldığı belirlendi, Tablo 6.

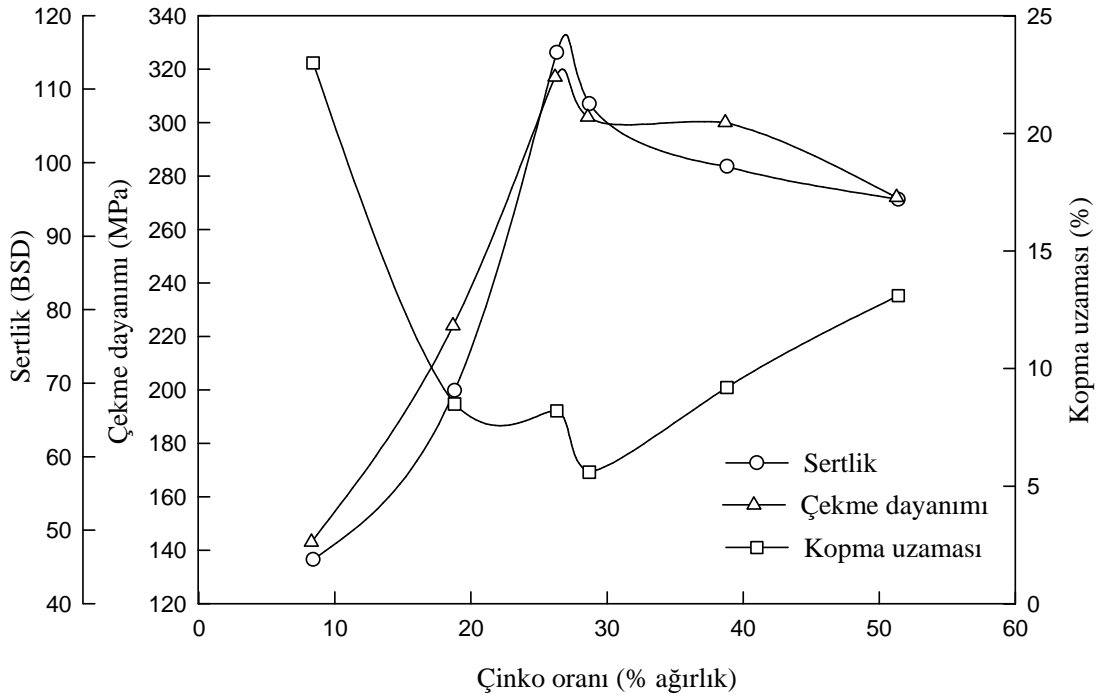
Tablo 6. Alaşımların fiziksel ve mekanik özellikleri

Alaşım	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Sertlik (BSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
Al-10Zn	2870	46	143	23
Al-20Zn	2930	69	224	8,5
Al-25Zn	3170	115	317	8,2
Al-30Zn	3210	108	302	5,6
Al-40Zn	3581	99,5	300	9,2
Al-50Zn	3910	95	272	13,1
Al-10Zn-2Cu	2900	48,4	147	21
Al-20Zn-2Cu	2980	70,2	313	7
Al-25Zn-2Cu	3200	123	364	6,4
Al-30Zn-2Cu	3250	115	330	4,3
Al-35Zn-2Cu	3450	121	357	5,4
Al-40Zn-2Cu	3632	125	373	7,3
Al-50Zn-2Cu	3980	118	336	3,8

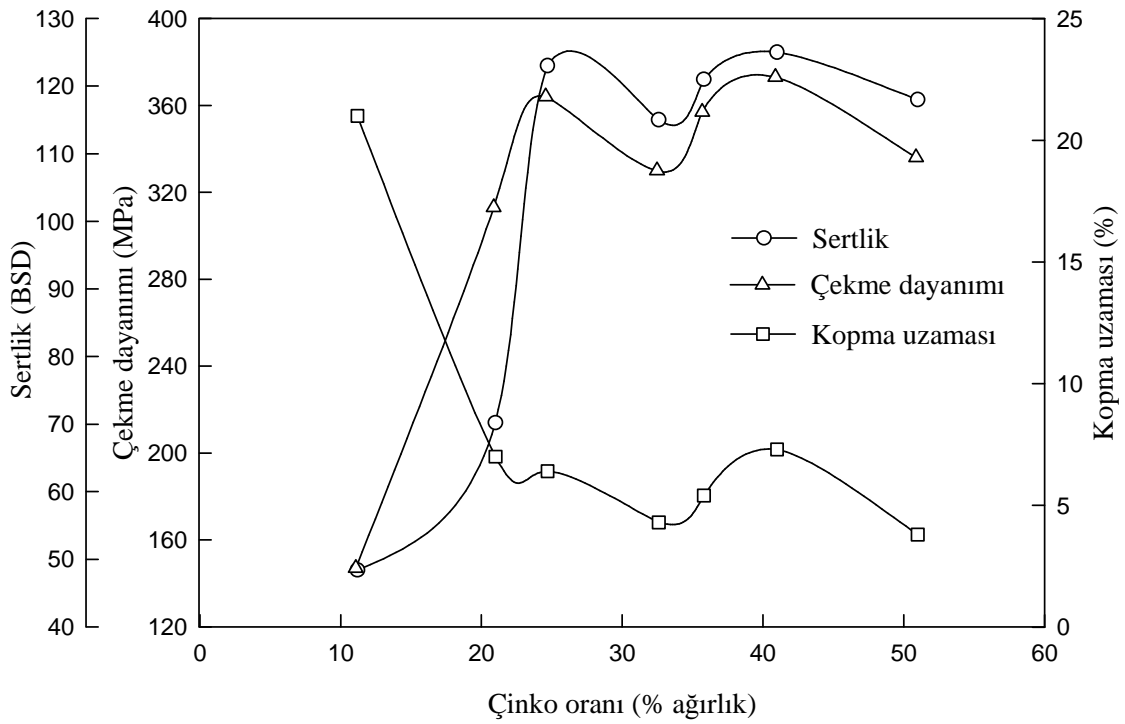
Tablo 6' nın devamı

Alaşım	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Sertlik (BSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
Al-40Zn-1Cu	3604	121	355	8,5
Al-40Zn-2Cu	3632	125	373	7,3
Al-40Zn-3Cu	3670	128	390	5,8
Al-40Zn-4Cu	3721	135	370	4
Al-40Zn-5Cu	3745	142	366	2,5
Al-40Zn-3Cu-0,25Si	3664	130	322	3,4
Al-40Zn-3Cu-0,5Si	3659	131	330	3,1
Al-40Zn-3Cu-1Si	3652	133	340	2,5
Al-40Zn-3Cu-2Si	3645	135	345	2,3
Al-40Zn-3Cu-2Si *	3640	169	440	0,10
Al-40Zn-3Cu-3Si	3640	138	327	2,1
Al-40Zn-3Cu-4Si	3636	140	310	2
Al-40Zn-3Cu-5Si	3630	146	305	1,3
Al-40Zn-3Cu-0,5Ni	3707	122	345	3
Al-40Zn-3Cu-1Ni	3722	137	331	2,8
Al-40Zn-3Cu-1Ni *	3720	164	360	1,9
Al-40Zn-3Cu-1,5Ni	3737	127	292	2,5
Al-40Zn-3Cu-2Ni	3757	125	280	1,9
Al-40Zn-3Cu-2,5Ni	3775	127	269	1,2
Al-40Zn-3Cu-3Ni	3792	137	255	1,1
SAE 65 Bronzu	8775	105	290	6

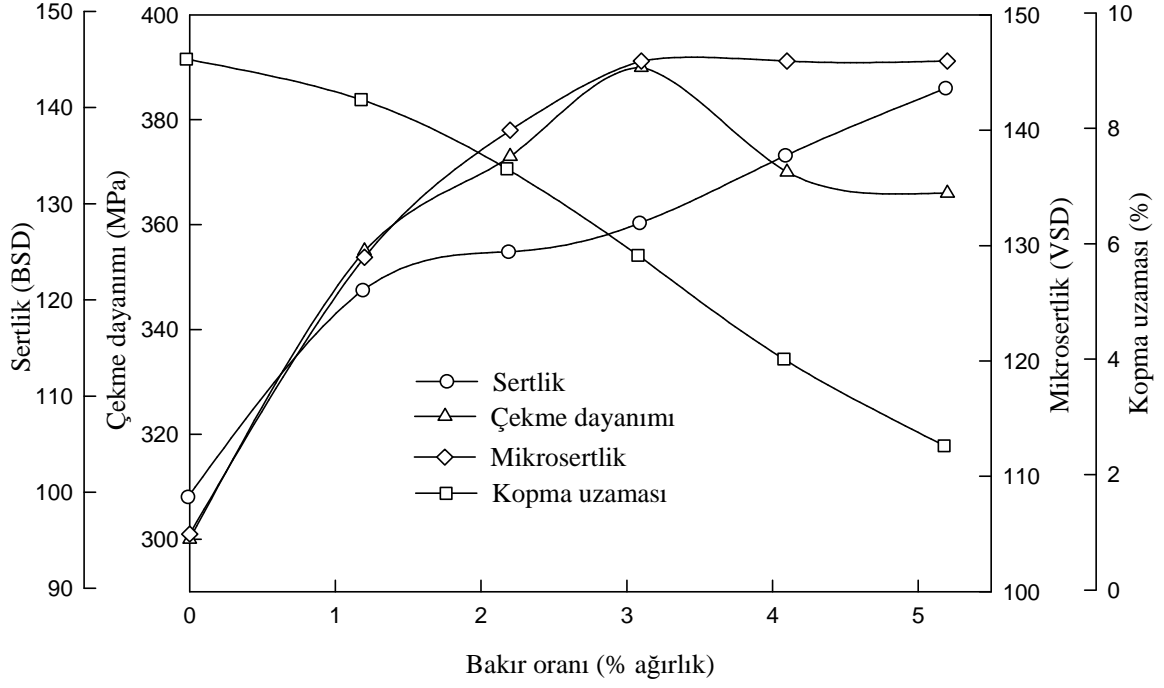
\*Isıl işlem görmüş durumdaki alaşımlar



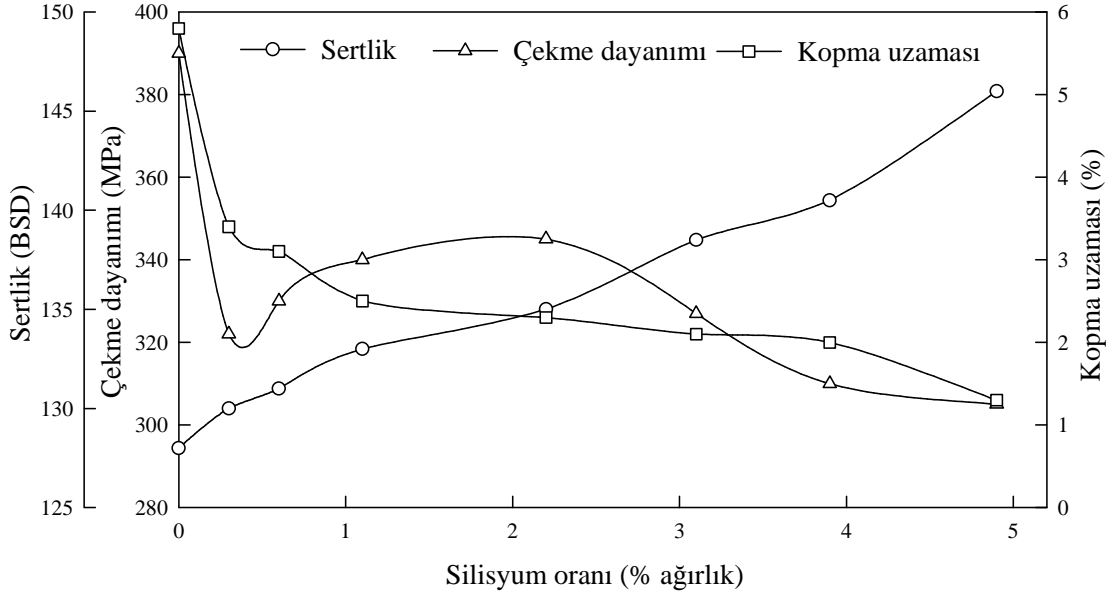
Şekil 29. Al-(10-50)Zn alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin çinko oranına göre değişimini gösteren eğriler



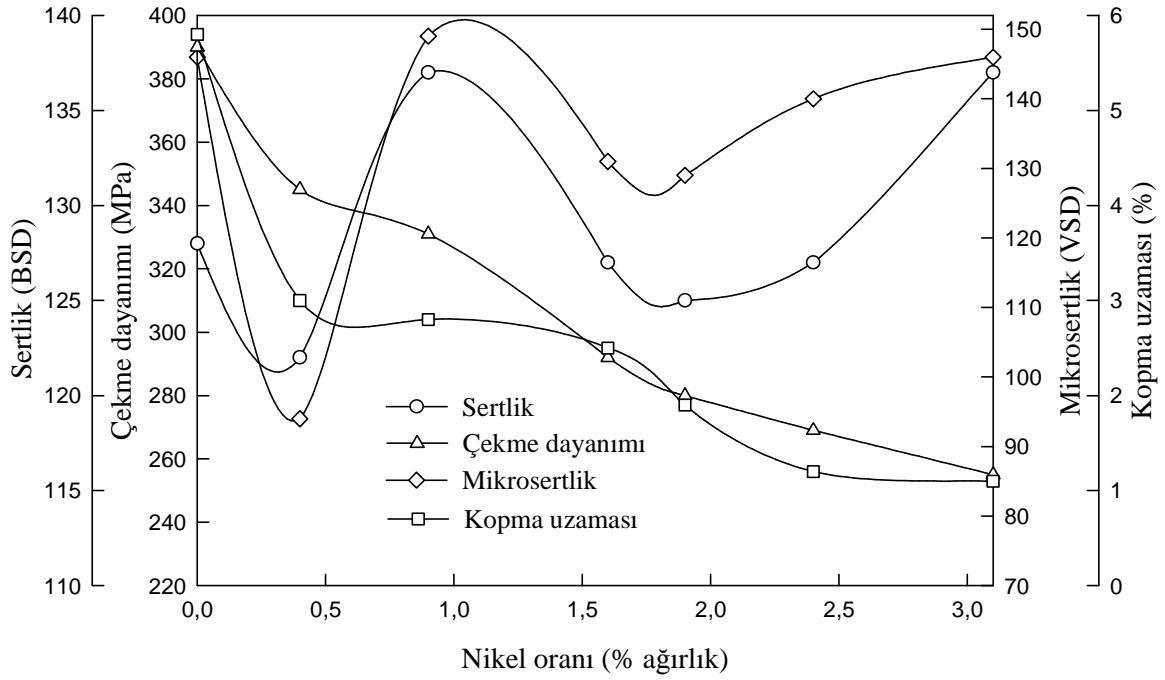
Şekil 30. %2 oranında bakır içeren Al-Zn-Cu alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin çinko oranına göre değişimini gösteren eğriler



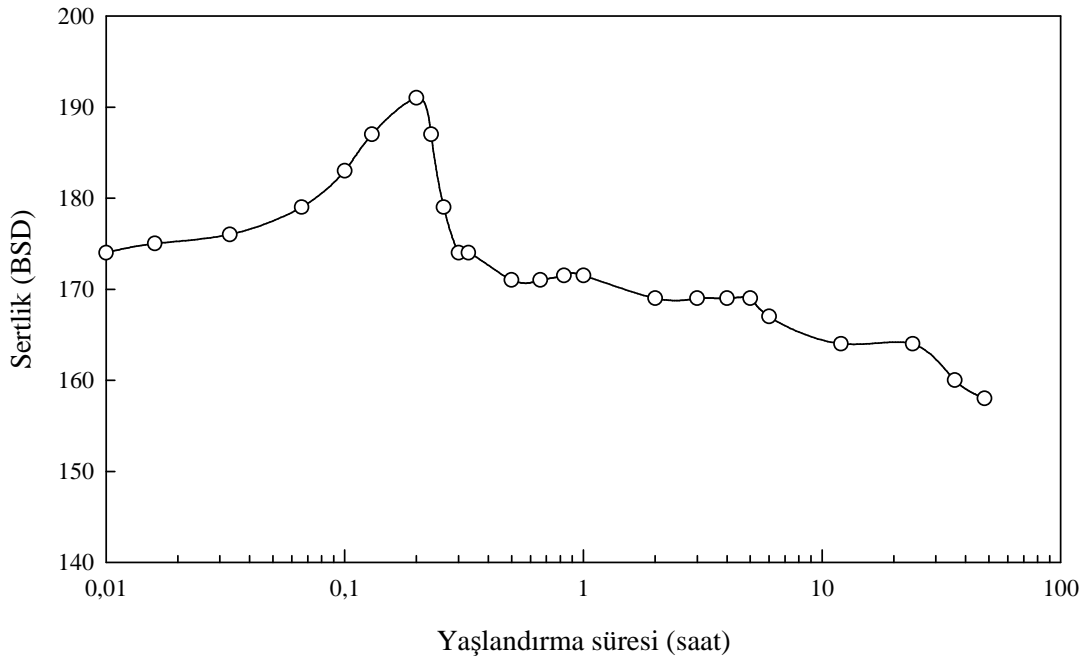
Şekil 31. Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımlarının çekme dayanımı, sertlik, kopma uzaması ve  $\alpha$  fazının mikrosertliğinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 32. Silisyum oranının Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının çekme dayanımı, sertlik ve kopma uzamasına etkisini gösteren eğriler



Şekil 33. Al-40Zn-3Cu-(0-3)Ni alaşımlarının çekme dayanımı, sertlik ve kopma uzaması ile  $\alpha$  fazının mikrosertliğinin nikel oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 34. Çözündürme ve su verme sonrası 100°C sıcaklıkta yaşlandırma işlemine tabi tutulan Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri

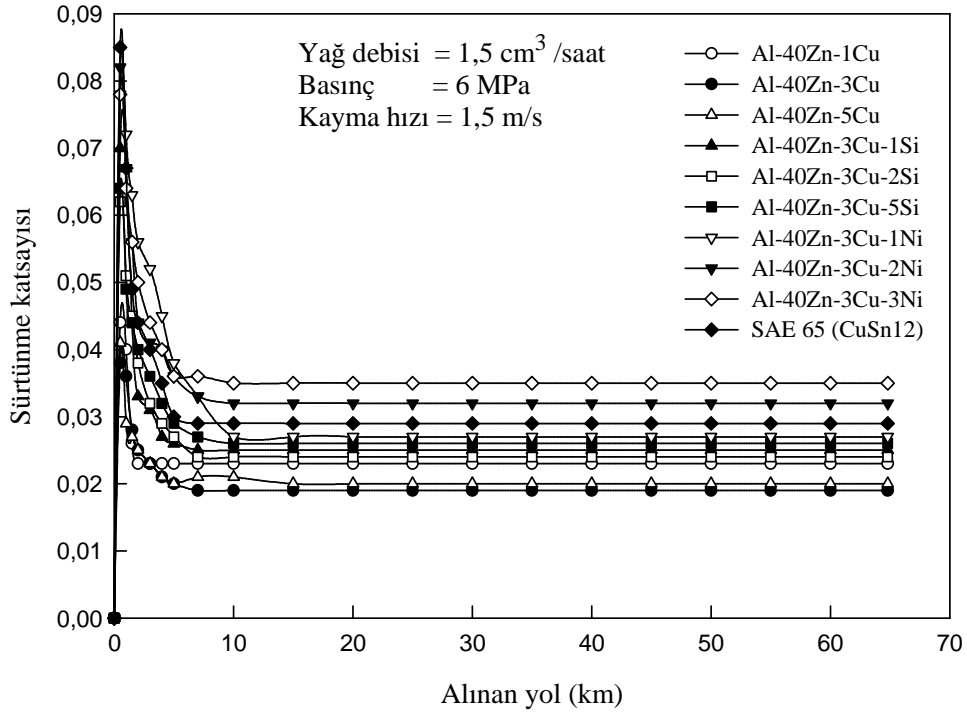
### 3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylelerinden Elde Edilen Bulgular

Sürtünme ve aşınma deneyine tabi tutulan Al-40Zn esaslı alaşımlar arasından seçilen bazıları ile SAE 65 bronzunun sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 35 ve 36'da verilmiştir. Bu eğrilere bakıldığında, alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklığı deneylerin başlangıcından itibaren azalarak sürekli rejim hali olarak bilinen sabit değere eriştiği görülmektedir. İncelenen tüm alaşımların söz konusu değerlerinin aynı değişimi sergilediği gözlenmiştir. Deneye tabi tutulan alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı (aşınma kaybı) Tablo 7'de, hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler ise Şekil 37'de verilmiştir. Bu eğriler, söz konusu alaşımlarda rodaj döneminde çok yüksek olan aşınma hızının gittikçe azalarak belirli kayma yolu sonunda hemen hemen sabit kaldığını göstermektedir. Söz konusu alaşımlar içerisinde en düşük hacim kaybının Al-40Zn-3Cu alaşımında, en yüksek hacim kaybının ise SAE 65 bronzunda meydana geldiği görüldü. Bu alaşımların sertlik ve çekme dayanımı değerleri ile çalışma süresi sonunda ölçülen hacim kaybının bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 38'de verilmiştir. Bu eğriler alaşımların hacim kaybının çekme dayanımı ile ters orantılı bir değişim sergilediğini göstermektedir. Bir başka deyişle hacim kaybı artan çekme dayanımı ile azalmakta, çekme dayanımının azalması durumunda ise artmaktadır.

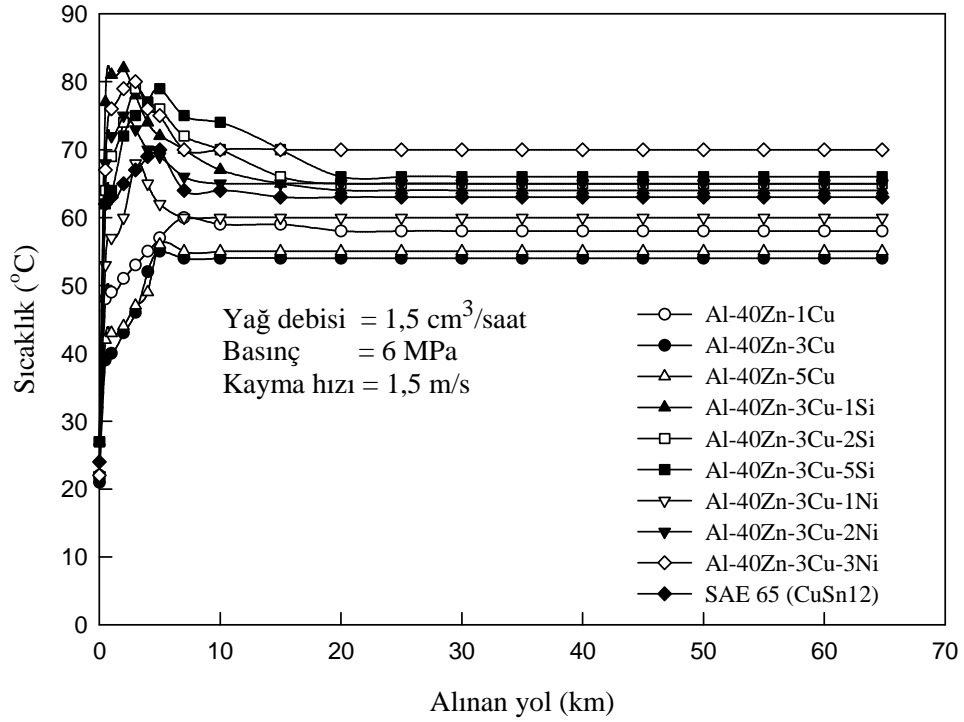
Silisyum ve nikel katkılarının Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımları içerisinde en yüksek mukavemet ve aşınma direncine sahip Al-40Zn-3Cu alaşımının sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayısı, sıcaklık ve 400 km'lik kayma yolu sonundaki hacim kaybına etkilerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 39 ve 40'da verilmiştir. Bu eğriler, silisyum ve nikel katkılarının söz konusu alaşımın sürtünme katsayısı ve sıcaklığını artırdığını göstermektedir. Ayrıca, bu eğrilerde silisyum oranının dörtlü Al-40Zn-3Cu-(0,25-5)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı ve sıcaklığını pek fazla etkilemediği, ancak nikel içeren alaşımlarda bu değerlerin artan nikel oranı ile arttığı görülmektedir. Diğer taraftan bu şekiller alaşımların sürtünme katsayısı ile sıcaklığının birbirine benzer değişimler sergilediğini de göstermektedir. Başka bir deyişle sürtünme katsayısı arttıkça sıcaklık artmakta, sürtünme katsayısının azalması durumunda da sıcaklık azalmaktadır. Söz konusu eğriler silisyum ve nikel katkılarının alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı üzerinde farklı etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Şöyle ki, alaşımlarda meydana gelen hacim kaybı artan silisyum oranı ile artarak %0,25 silisyum oranında en yüksek, %2



silisyum oranında da en düşük değerlere ulaştıktan sonra artan silisyum oranı ile tekrar artmaktadır. Ancak nikel içeren alaşımlarda meydana gelen hacim kaybı %0,5 nikel oranında en yüksek değere ulaştıktan sonra artan nikel oranı ile azalmaktadır. Dörtlü alaşımların sertlik, çekme dayanımı ve hacim kaybı değerlerinin içerdikleri silisyum ve nikel oranlarına göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 41 ve 42’de verilmiştir. Bu eğriler, silisyum içeren alaşımların çekme dayanımı ile hacim kaybının birbirine göre ters orantılı, nikel içeren alaşımların söz konusu değerlerinin ise birbirine göre doğru orantılı değişimler sergilediğini göstermektedir. Nitekim silisyum içeren alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direnci çekme dayanımı en yüksek olan Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımından, nikel içeren alaşımlar arasında ise en yüksek aşınma direnci çekme dayanımı en düşük olan Al-40Zn-3Cu-3Ni alaşımından elde edildi.



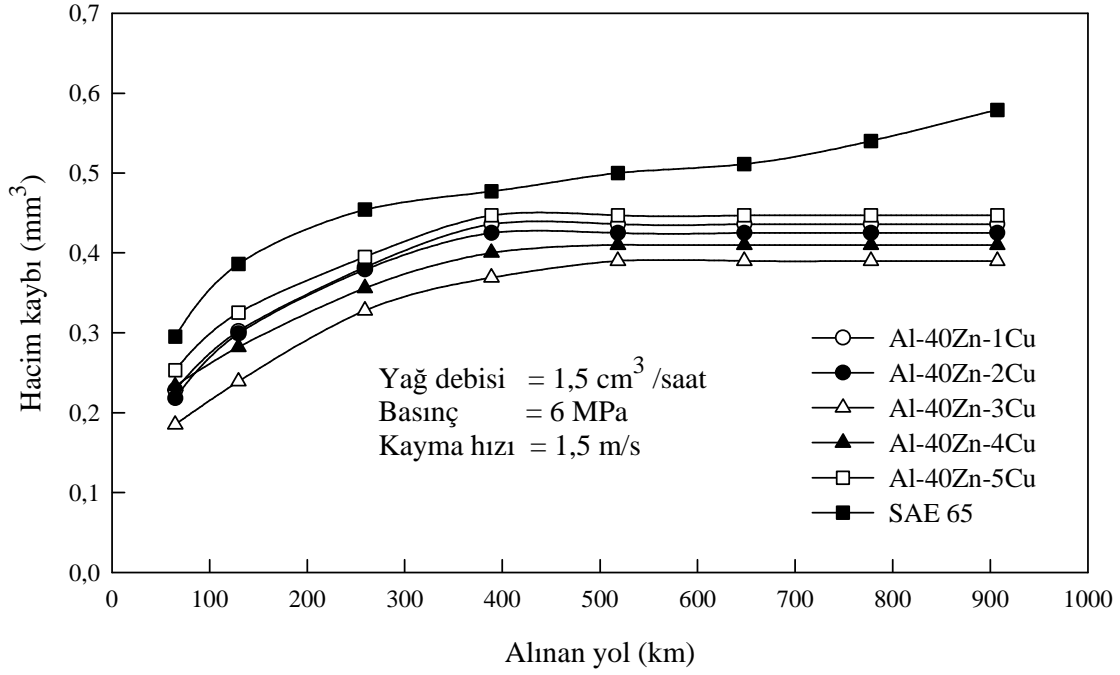
Şekil 35. Al-40Zn esaslı alaşımlar içerisinde seçilen bazıları ile SAE 65 bronzunun sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



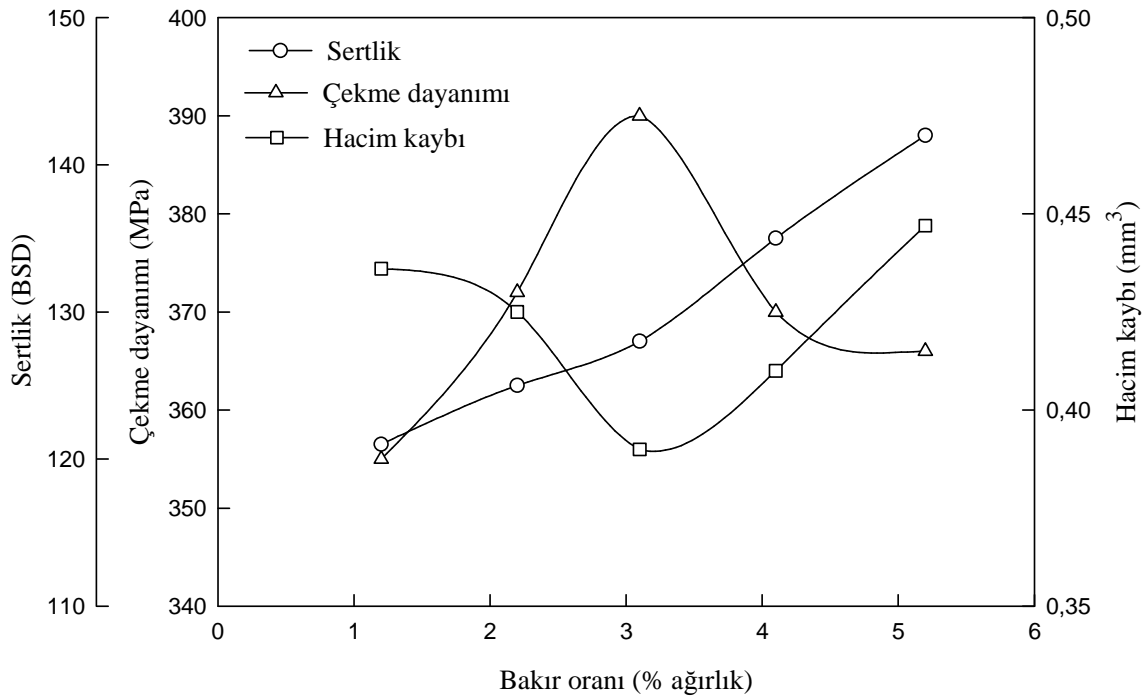
Şekil 36. Al-40Zn esaslı alaşımlar içerisinde seçilen bazı alaşımlar ile SAE 65 bronzunun sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 7. Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımları ve SAE 65 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerleri

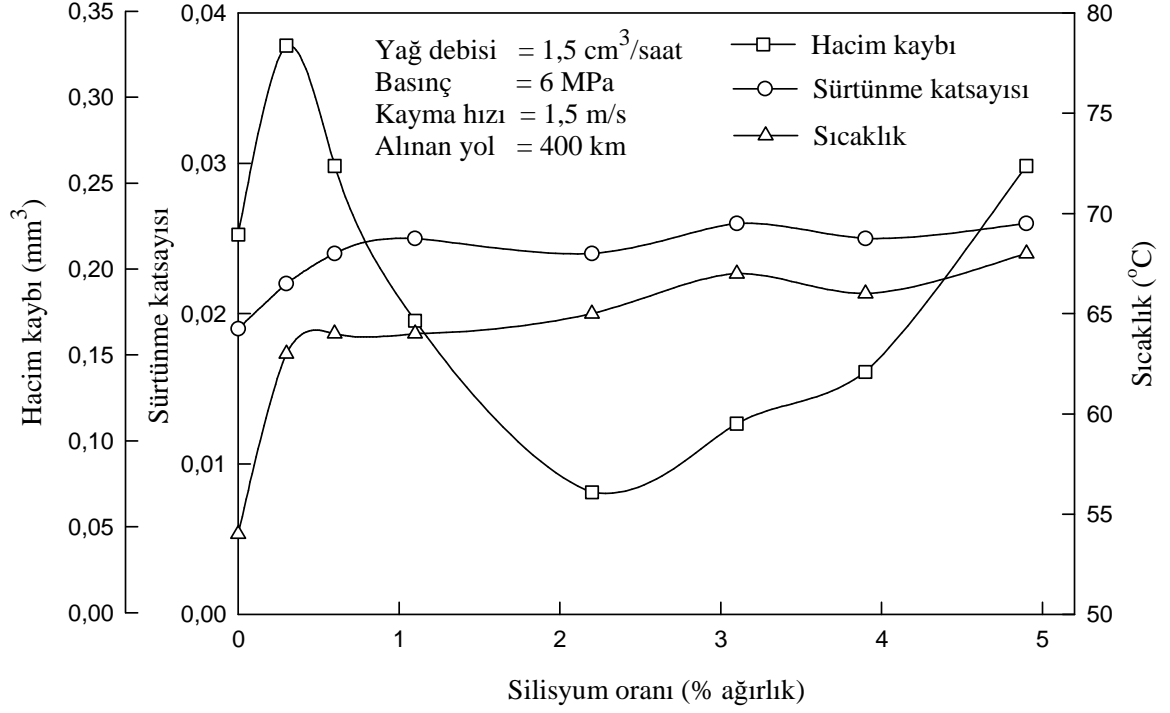
Alaşım	Alınan yol (km)							
	64,8	129,6	259,2	388,8	518,4	648	777,6	907,2
	Hacim kaybı (mm <sup>3</sup> )							
Al-40Zn-1Cu	0,228	0,302	0,382	0,436	0,436	0,436	0,436	0,436
Al-40Zn-2Cu	0,218	0,299	0,379	0,425	0,425	0,425	0,425	0,425
Al-40Zn-3Cu	0,185	0,239	0,328	0,369	0,390	0,390	0,390	0,390
Al-40Zn-4Cu	0,233	0,282	0,356	0,400	0,410	0,410	0,410	0,410
Al-40Zn-5Cu	0,253	0,325	0,395	0,447	0,447	0,447	0,447	0,447
SAE 65	0,295	0,386	0,454	0,477	0,500	0,511	0,540	0,579



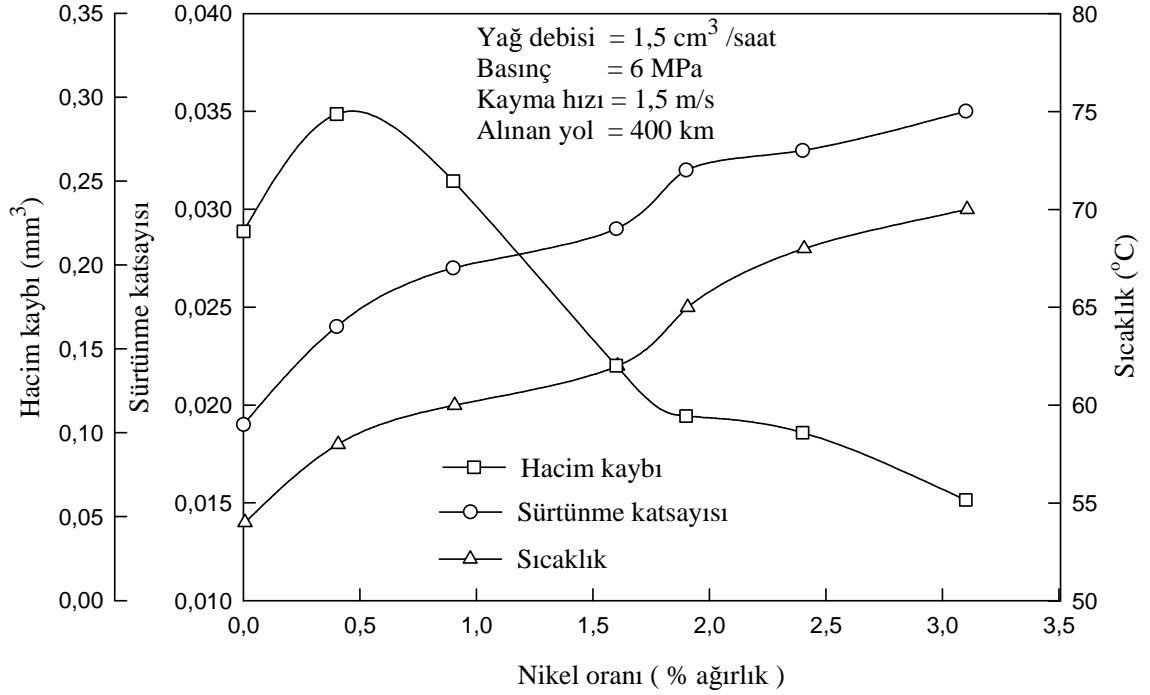
Şekil 37. Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımları ile SAE 65 bronzunda meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



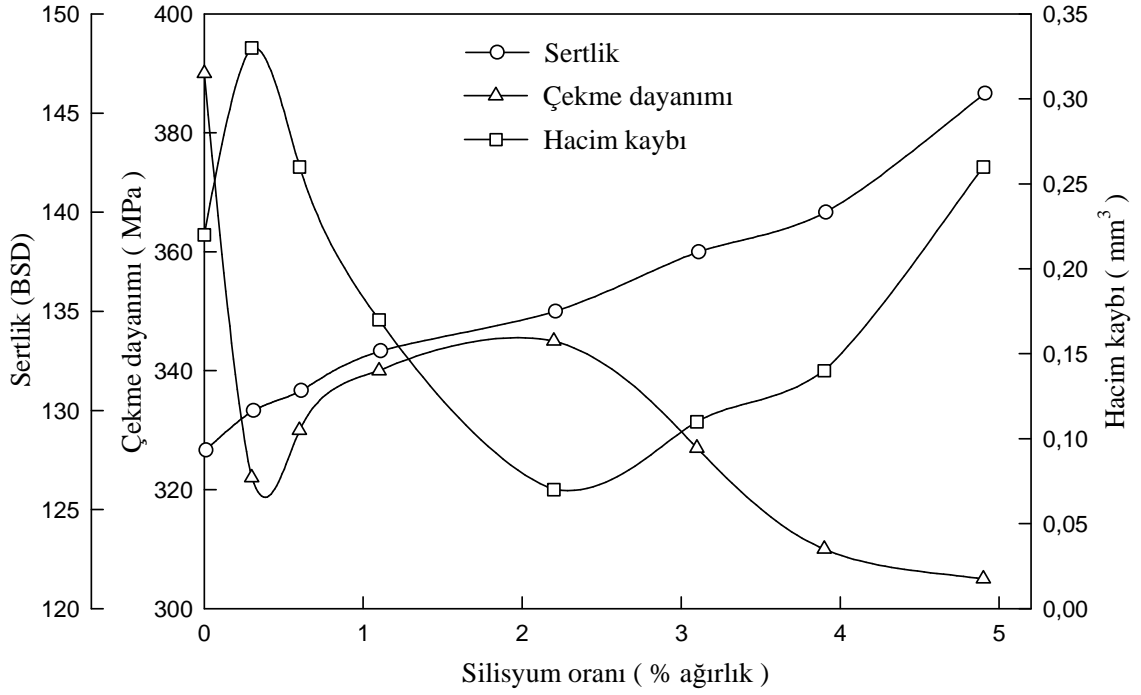
Şekil 38. Alaşımların sertlik, çekme dayanımı ve hacim kaybı değerlerinin bakır oranına göre değişimini gösteren eğriler



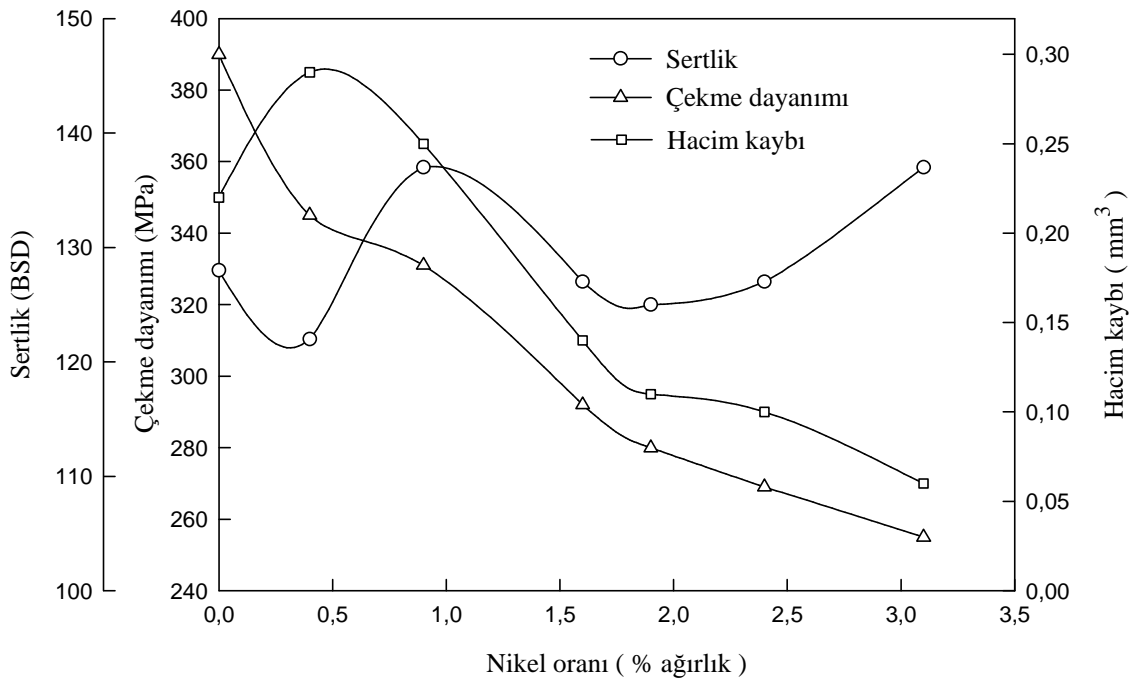
Şekil 39. Silisyum oranının Al-40Zn-3Cu alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerine etkisini gösteren eğriler



Şekil 40. Nikel oranının Al-40Zn-3Cu alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerine etkisini gösteren eğriler



Şekil 41. Silisyum oranının Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve hacim kaybı değerlerine etkisini gösteren eğriler



Şekil 42. Nikel oranının Al-40Zn-3Cu-(0-3)Ni alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve hacim kaybı değerlerine etkisini gösteren eğriler

Farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri ile bu alaşımlarda 400 km'lik kayma yolu sonunda meydana gelen hacim kaybı değerleri sırasıyla Tablo 8-10'da, bu değerlerin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler ise sırasıyla Şekil 43-45'de verilmiştir. Bu eğriler alaşımların sürtünme katsayısının artan basınç ile azaldığını, sıcaklık ve hacim kaybının ise sürekli arttığını göstermektedir. Ancak, dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si ve Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı artan basınç ile önce azalmakta, belirli basınç değerlerinden sonra ise artmaktadır. Ayrıca, bu eğriler farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan ısıtılmış alaşımların, dökülmüş durumdaki alaşımlardan daha üstün aşınma direnci sergilediklerini göstermektedir.

Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayısı ve sıcaklık ile bu alaşımlarda 100 km'lik kayma yolu sonunda meydana gelen hacim kaybı değerleri sırasıyla Tablo 11-13'de, bu değerlerin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler ise sırasıyla Şekil 46-48'de verilmiştir. Bu eğriler, alaşımların sürtünme katsayısının kayma hızı ile pek fazla değişmediğini, sıcaklığının artan kayma hızı ile sürekli arttığını, hacim kaybının ise artan kayma hızı ile azalıp, 1-2 m/s'lik kayma hızı aralığında bir minimumdan geçtikten sonra tekrar arttığını göstermektedir.

Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve bu alaşımlarda meydana gelen hacim kaybı değerleri Tablo 14-16'da, bu değerlerin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler ise sırasıyla Şekil 49-51'de verilmiştir. Bu eğriler alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artan yağ debisi ile azaldığını, 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi değerinden sonra ise sabit kaldığını göstermektedir. Ayrıca, bu eğrilerde Al-40Zn esaslı üçlü ve dörtlü alaşımlar ile SAE 65 bronzunun düşük yağ debilerinde hemen hemen aynı hacim kaybını sergiledikleri, ancak belirli bir yağ debisinin (1 cm<sup>3</sup>/saat) üzerine çıktığında Al-40Zn esaslı bütün alaşımların bronzdan daha üstün aşınma direncine sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 8. Farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş Al-40Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 bronzunun sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayıları

Alaşım	Basınç (MPa)						
	2	3	4	5	6	7	8
	Sürtünme katsayısı						
Al-40Zn-3Cu	0,038	0,035	0,031	0,023	0,021	0,019	0,020
Al-40Zn-3Cu-2Si	0,040	0,036	0,030	0,027	0,024	0,026	0,031
Al-40Zn-3Cu-2Si*	0,040	0,032	0,028	0,026	0,025	0,022	0,021
Al-40Zn-3Cu-1Ni	0,040	0,036	0,033	0,027	0,026	0,024	0,028
Al-40Zn-3Cu-1Ni*	0,033	0,027	0,025	0,024	0,023	0,021	0,022
SAE 65 bronz	0,040	0,039	0,037	0,034	0,033	0,028	0,024

\* Isıl işlem görmüş

Tablo 9. Farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş Al-40Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 bronzunun rejim durumundaki sıcaklıkları

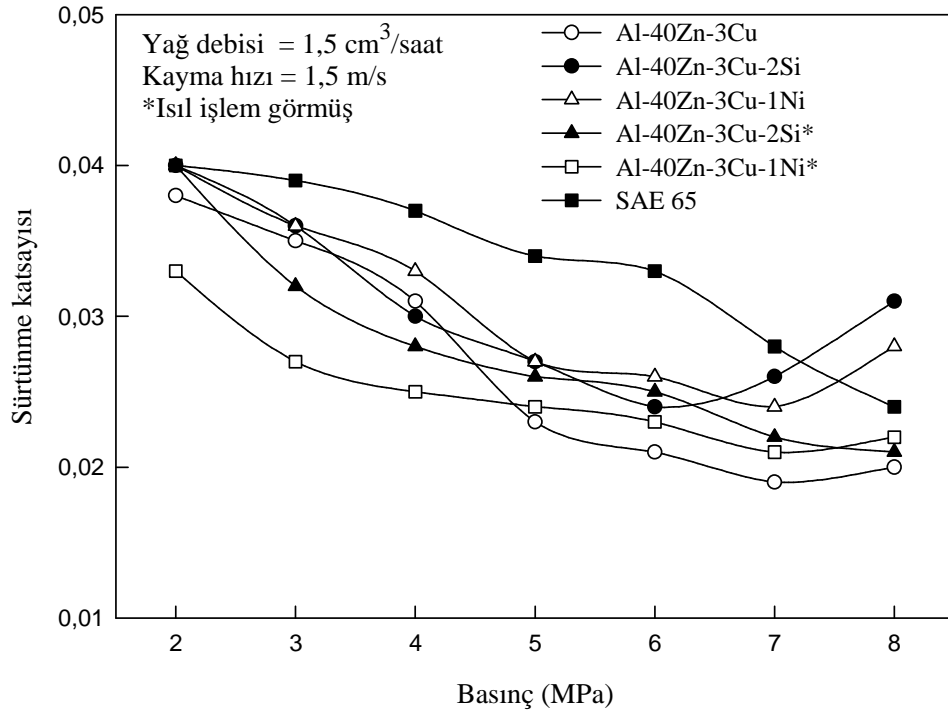
Alaşım	Basınç (MPa)						
	2	3	4	5	6	7	8
	Sıcaklık (°C)						
Al-40Zn-3Cu	50	52	53	55	56	59	61
Al-40Zn-3Cu-2Si	57	60	62	64	66	67	69
Al-40Zn-3Cu-2Si*	39	41	45	46	48	53	57
Al-40Zn-3Cu-1Ni	45	50	54	56	60	63	68
Al-40Zn-3Cu-1Ni*	36	37	39	42	44	47	50
SAE 65 bronz	50	52	58	62	65	67	69

\* Isıl işlem görmüş

Tablo 10. Farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerleri

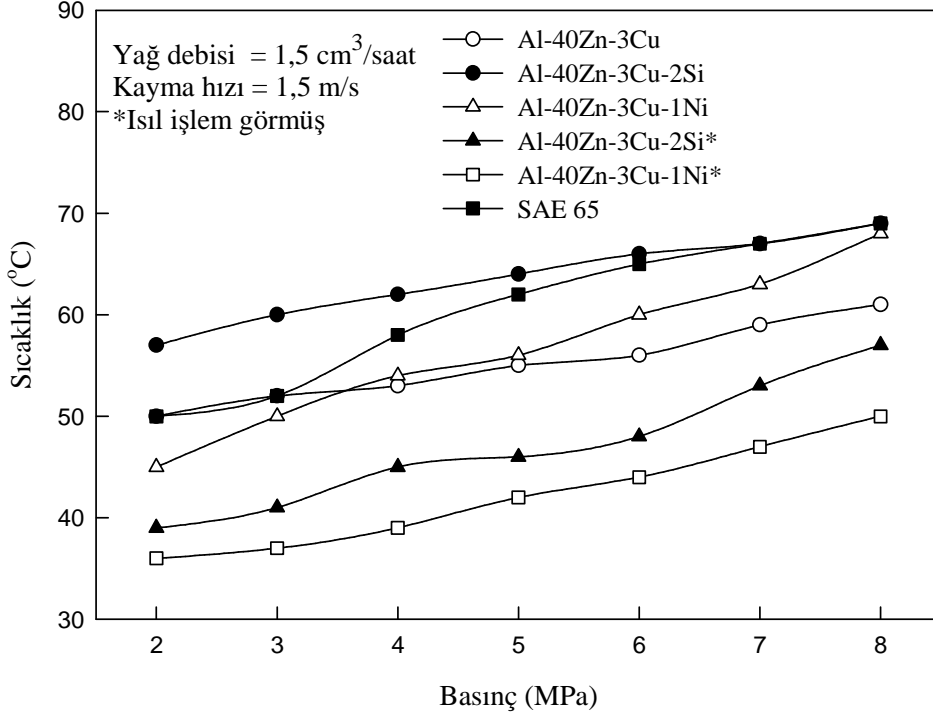
Alaşım	Basınç (MPa)						
	2	3	4	5	6	7	8
	Hacim kaybı (mm <sup>3</sup> )						
Al-40Zn-3Cu	0,035	0,090	0,100	0,120	0,220	0,240	0,290
Al-40Zn-3Cu-2Si	0,033	0,044	0,056	0,061	0,070	0,080	0,090
Al-40Zn-3Cu-2Si*	0,027	0,036	0,050	0,060	0,065	0,072	0,080
Al-40Zn-3Cu-1Ni	0,090	0,120	0,160	0,190	0,240	0,270	0,360
Al-40Zn-3Cu-1Ni*	0,038	0,056	0,080	0,100	0,120	0,140	0,160
SAE 65 bronz	0,110	0,190	0,240	0,300	0,370	0,430	0,480

\* Isıl işlem görmüş

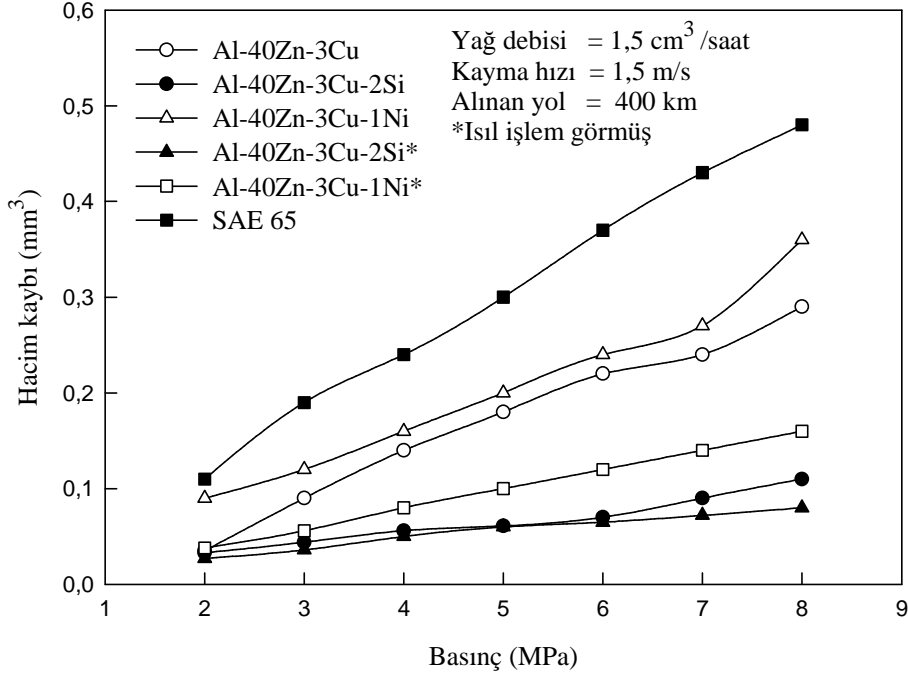


Şekil 43. Alaşımların sürekli rejim durumdaki sürtünme katsayılarının basınca göre değişimini gösteren eğriler





Şekil 44. Alaşımların rejim durumundaki sıcaklıklarının basınca göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 45. Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlarda ve SAE 65 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 11. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 bronzunun sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayıları

Alaşım	Kayma hızı (m/s)					
	0,5	1	1,5	2	2,5	3
	Sürtünme katsayısı					
Al-40Zn-3Cu	0,023	0,020	0,021	0,024	0,022	0,021
Al-40Zn-3Cu-2Si	0,025	0,024	0,021	0,023	0,022	0,024
Al-40Zn-3Cu-2Si*	0,025	0,027	0,025	0,028	0,026	0,028
Al-40Zn-3Cu-1Ni	0,026	0,028	0,026	0,025	0,028	0,024
Al-40Zn-3Cu-1Ni*	0,023	0,025	0,023	0,026	0,024	0,026
SAE 65 bronz	0,031	0,027	0,030	0,029	0,027	0,027

\* Isıl işlem görmüş

Tablo 12. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 bronzunun sürekli rejim durumundaki sıcaklıkları

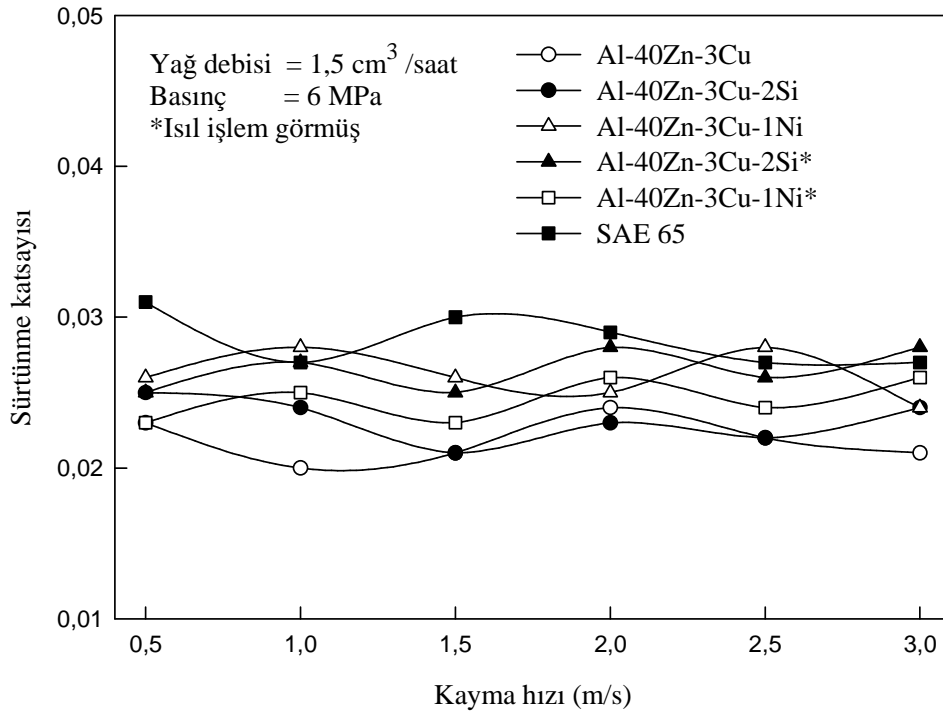
Alaşım	Kayma hızı (m/s)					
	0,5	1	1,5	2	2,5	3
	Sıcaklık (°C)					
Al-40Zn-3Cu	43	50	59	66	69	75
Al-40Zn-3Cu-2Si	48	52	61	68	73	81
Al-40Zn-3Cu-2Si*	34	40	48	57	63	72
Al-40Zn-3Cu-1Ni	42	50	60	67	71	73
Al-40Zn-3Cu-1Ni*	35	40	47	54	57	64
SAE 65 bronz	52	61	65	68	72	76

\* Isıl işlem görmüş

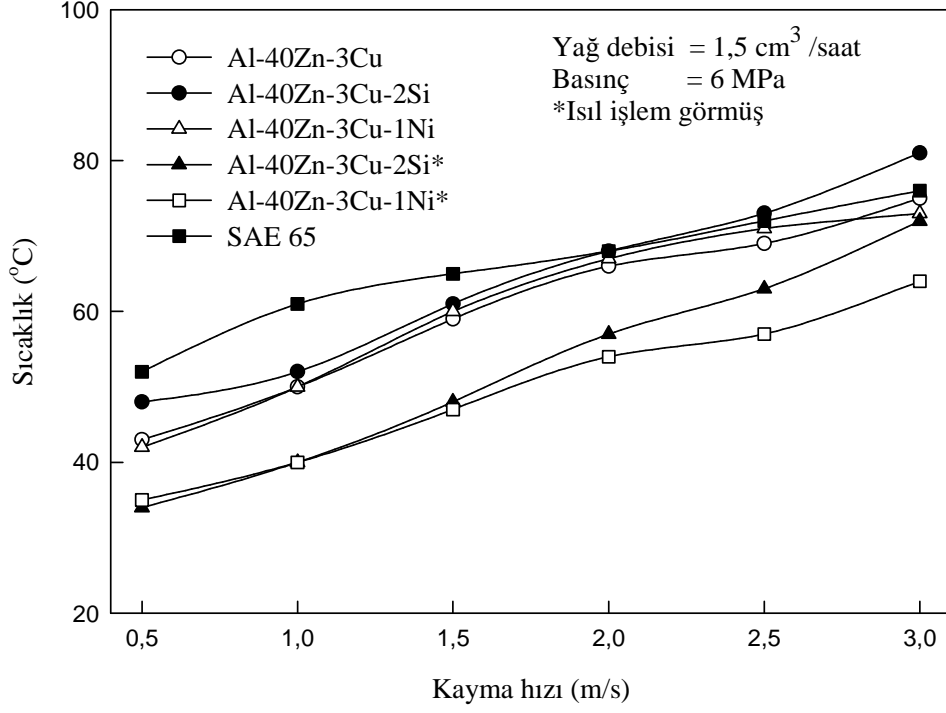
Tablo 13. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlarda meydana gelen hacim kaybı değerleri

Alaşım	Kayma hızı (m/s)					
	0,5	1	1,5	2	2,5	3
	Hacim kaybı (mm <sup>3</sup> )					
Al-40Zn-3Cu	0,27	0,18	0,12	0,20	0,26	0,30
Al-40Zn-3Cu-2Si	0,14	0,10	0,05	0,09	0,13	0,18
Al-40Zn-3Cu-2Si*	0,10	0,08	0,04	0,07	0,10	0,14
Al-40Zn-3Cu-1Ni	0,20	0,17	0,14	0,26	0,38	0,54
Al-40Zn-3Cu-1Ni*	0,15	0,12	0,08	0,17	0,27	0,33
SAE 65 bronz	0,35	0,27	0,30	0,34	0,37	0,41

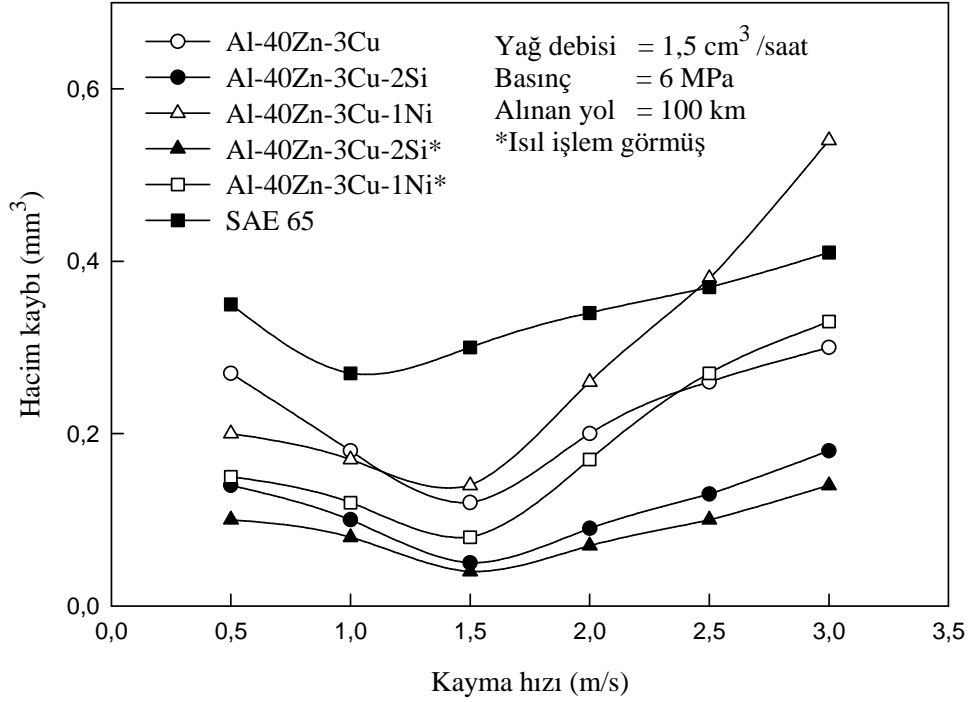
\* Isıl işlem görmüş



Şekil 46. Alaşımların sürtünme katsayılarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 47. Alaşımların sıcaklıklarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 48. Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlarda ve SAE 65 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 14. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlar ile bronzun 30 dakikalık bir sürede alınan 2700 m'lik kayma yolu sonundaki sürtünme katsayısı değerleri

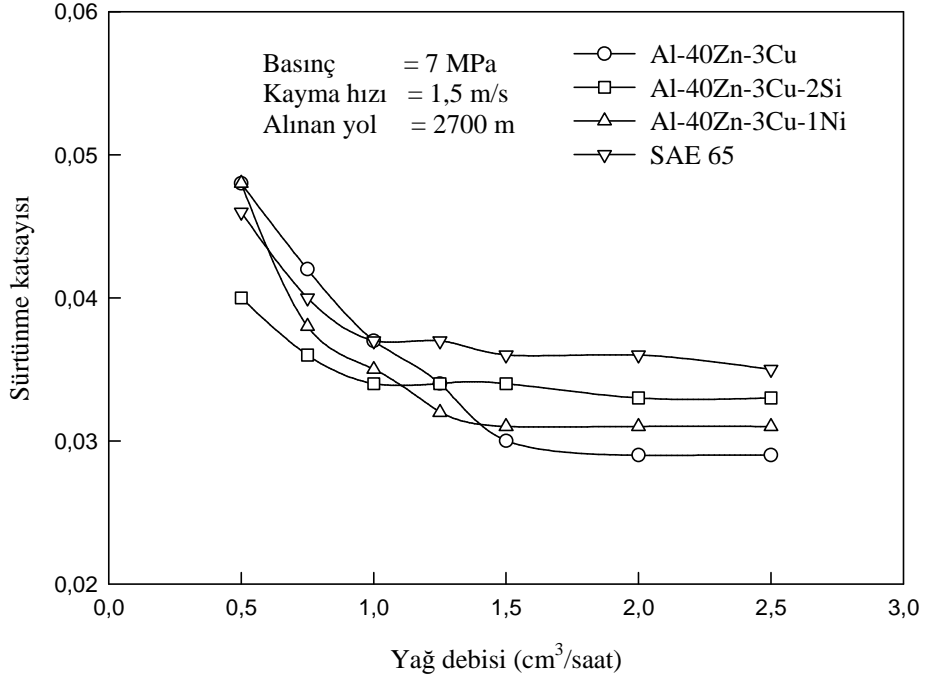
Alaşım	Yağ debisi (cm <sup>3</sup> /saat)						
	0,5	0,75	1	1,25	1,5	2	2,5
	Sürtünme katsayısı						
Al-40Zn-3Cu	0,048	0,042	0,037	0,034	0,030	0,029	0,029
Al-40Zn-3Cu-2Si	0,040	0,036	0,034	0,034	0,034	0,033	0,033
Al-40Zn-3Cu-1Ni	0,048	0,036	0,035	0,032	0,031	0,031	0,031
SAE 65 bronz	0,046	0,040	0,037	0,037	0,036	0,036	0,035

Tablo 15. Farklı yağ debilerinde sürtünme deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki alaşımların 2700 m'lik kayma yolu sonundaki sıcaklık değerleri

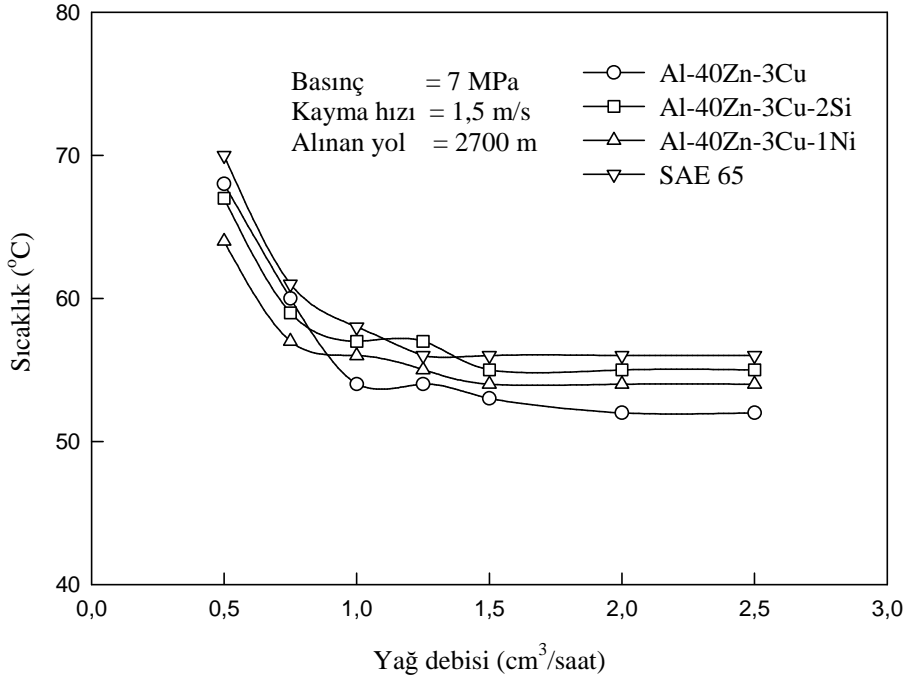
Alaşım	Yağ debisi (cm <sup>3</sup> /saat)						
	0,5	0,75	1	1,25	1,5	2	2,5
	Sıcaklık (°C)						
Al-40Zn-3Cu	68	60	54	54	53	52	52
Al-40Zn-3Cu-2Si	67	59	57	57	55	55	55
Al-40Zn-3Cu-1Ni	64	57	56	55	54	54	54
SAE 65 bronz	70	61	58	56	56	56	56

Tablo 16. Farklı yağ debilerinde sürtünme deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımlarda ve bronzda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerleri

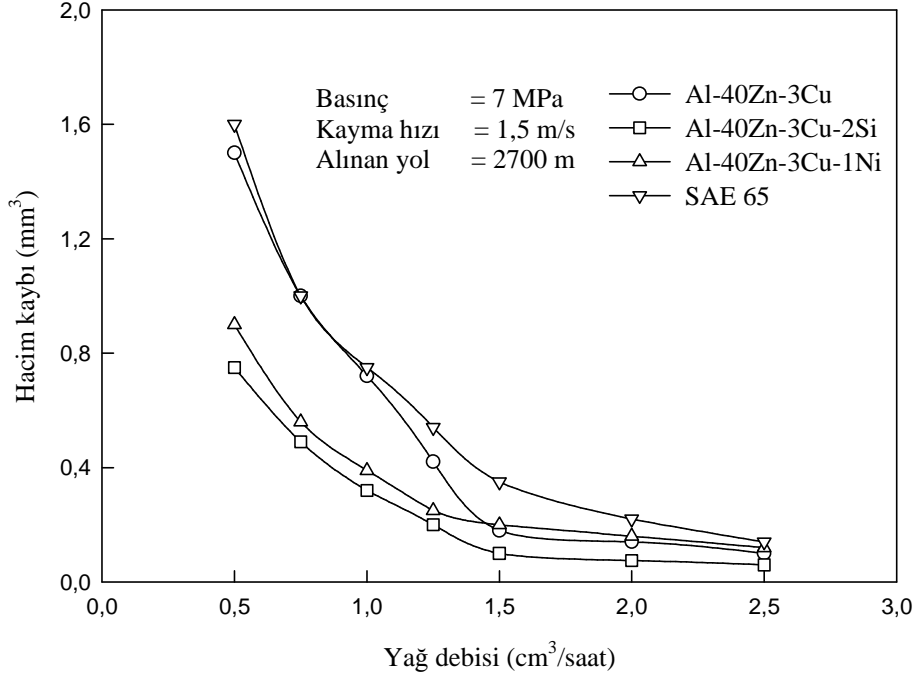
Alaşım	Yağ debisi (cm <sup>3</sup> /saat)						
	0,5	0,75	1	1,25	1,5	2	2,5
	Hacim kaybı (mm <sup>3</sup> )						
Al-40Zn-3Cu	1,50	1,00	0,72	0,42	0,18	0,14	0,10
Al-40Zn-3Cu-2Si	0,75	0,49	0,32	0,20	0,10	0,075	0,06
Al-40Zn-3Cu-1Ni	0,90	0,56	0,39	0,25	0,20	0,16	0,12
SAE 65 bronz	1,60	1,00	0,75	0,54	0,35	0,22	0,14



Şekil 49. 7 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında sürtünme deneyine tabi tutulan alaşımların 2700 m'lik kayma yolu sonunda belirlenen sürtünme katsayısı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 50. 7 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında sürtünme deneyine tabi tutulan alaşımların 2700 m'lik kayma yolu sonunda belirlenen sıcaklık değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 51. 7 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlarda 2700 m'lik kayma yolu sonunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler

### 3.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

Al-40Zn-3Cu alaşımı ve SAE 65 bronzundan talaşlı işleme hazırlanan aşınma numunelerinin yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları Şekil 52 ve 53'de verilmiştir. Bu fotoğraflar numunelerin yüzeylerinde imalat sırasında hafif sıvama tabakaları ile ince çiziklerin oluştuğunu göstermektedir.

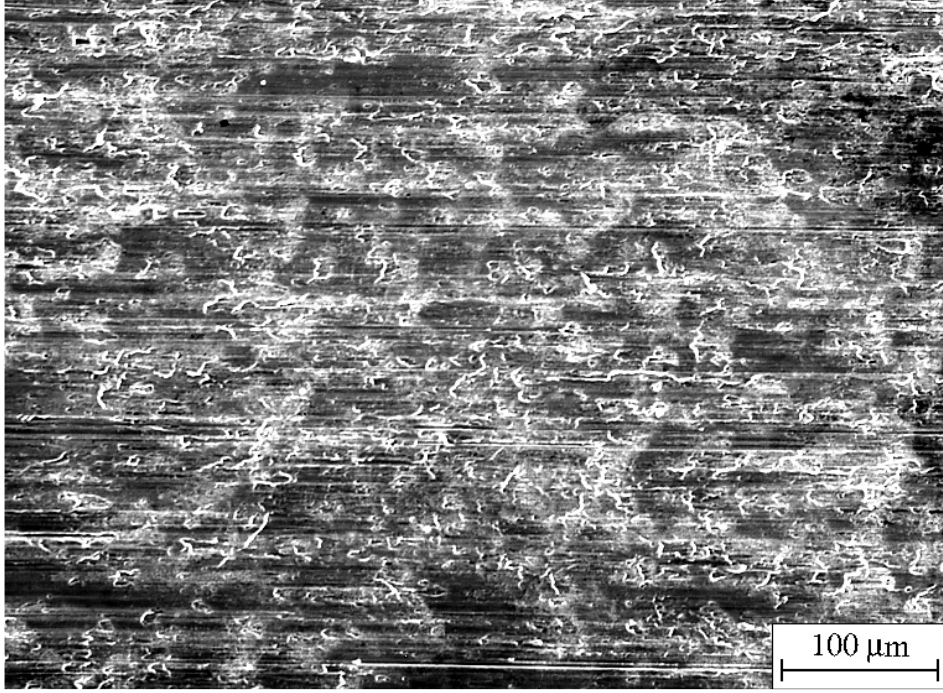
1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımları ile SAE 65 bronzunun aşınma yüzeylerinden 907 km'lik kayma yolu sonunda elde edilen SEM fotoğrafları Şekil 54-59'da verilmiştir. Bu fotoğraflar Al-40Zn-Cu alaşımlarına ait numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvama tabakaları ve çiziklerin yanı sıra dağlanma belirtilerinin bulunduğunu göstermektedir. SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinde ise derin aşınma çizikleriyle birlikte az da olsa sıvama tabakalarının yer aldığı görüldü.

1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında 389 km'lik yola karşılık gelen 72 saat süreli deneye tabi tutulan Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si ve Al-40Zn-

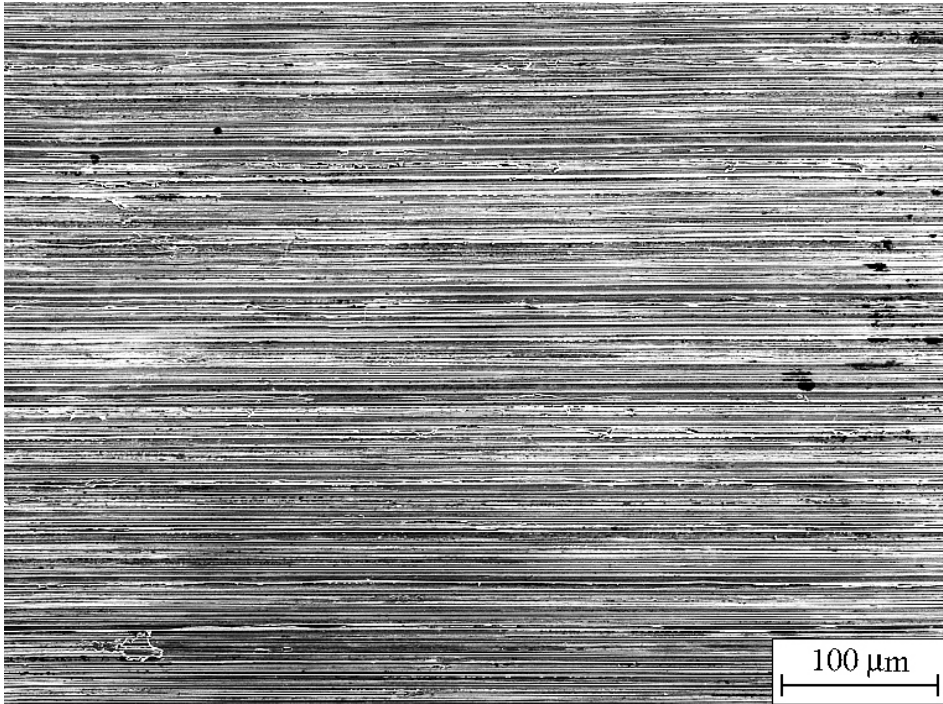
3Cu-(0-3)Ni alaşımlarının aşınma yüzeylerinin birbirine çok benzedikleri görülmüş ve bu nedenle burada her bir alaşım grubuna ait üç numunenin aşınma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafları verilmiştir, Şekil 60-65. Bu fotoğraflar söz konusu alaşımlara ait numunelerin aşınma yüzeylerinde genelde sıvama tabakalarıyla çiziklerin yer aldığını göstermektedir. Ayrıca nikel içeren alaşımların aşınma yüzeylerinde sıvama tabakaları ve çiziklerin yanı sıra yüzeye yapışmış durumda bulunan aşınma parçacıklarına rastlandı, Şekil 63-65. Isıl işlem görmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si ve Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşımlarının aynı koşullarda deneye tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları Şekil 66 ve 67’de verilmiştir. Bu fotoğraflara bakıldığında ısıl işlem görmüş numunelerin aşınma yüzeylerinde dökülmüş durumdaki numunelerin aşınma yüzeylerinde gözlenenenden daha az miktarda sıvanmanın meydana geldiği, buna karşılık daha fazla sayıda çizik oluştuğu görülmektedir.

Farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan Al-40Zn esaslı alaşımlar ile bronzla ait numunelerin yüzeylerinde oluşan sıvanma bölgelerinin artan basınçla genişlediği, çiziklerin ise derinleştiği gözlemlendi. Bu durum Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımı ile SAE 65 bronzunun 2, 4, 6 ve 8 MPa’lık basınçlar altında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin yüzeylerini gösteren fotoğraflarda görülmektedir, Şekil 68-75. Diğer taraftan kayma hızı arttıkça sıvanan bölgelerin daraldığı, 2m/s’lik kayma hızından sonra ise bu bölgelerin tekrar genişlediği görüldü. Bu durum Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının 0,5, 1,5 ve 3 m/s’lik kayma hızlarında deneye tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeylerinden elde edilen SEM fotoğraflarında görülmektedir, Şekil 76-78.

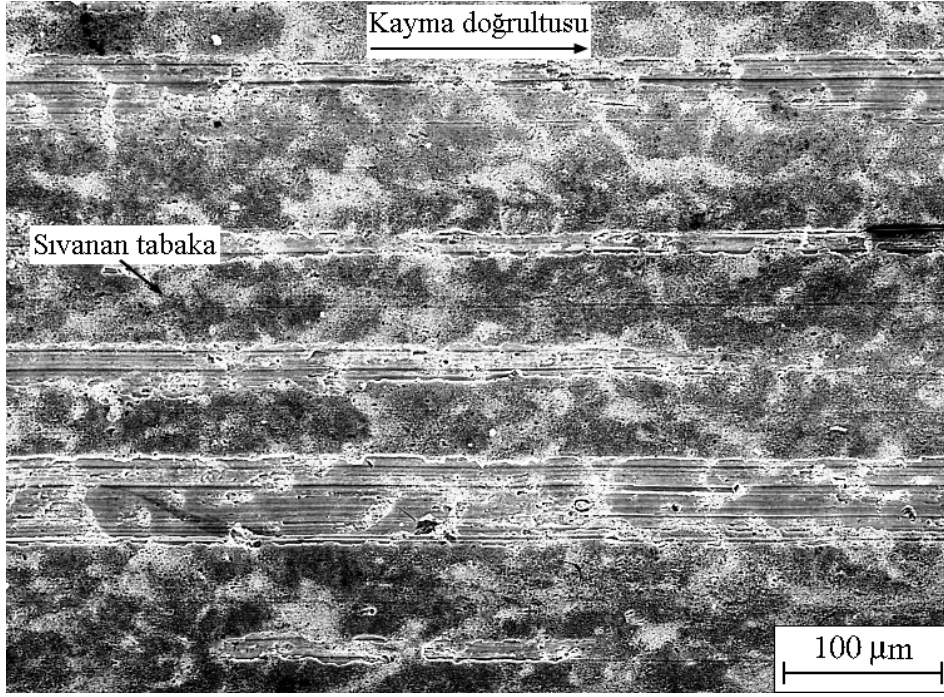




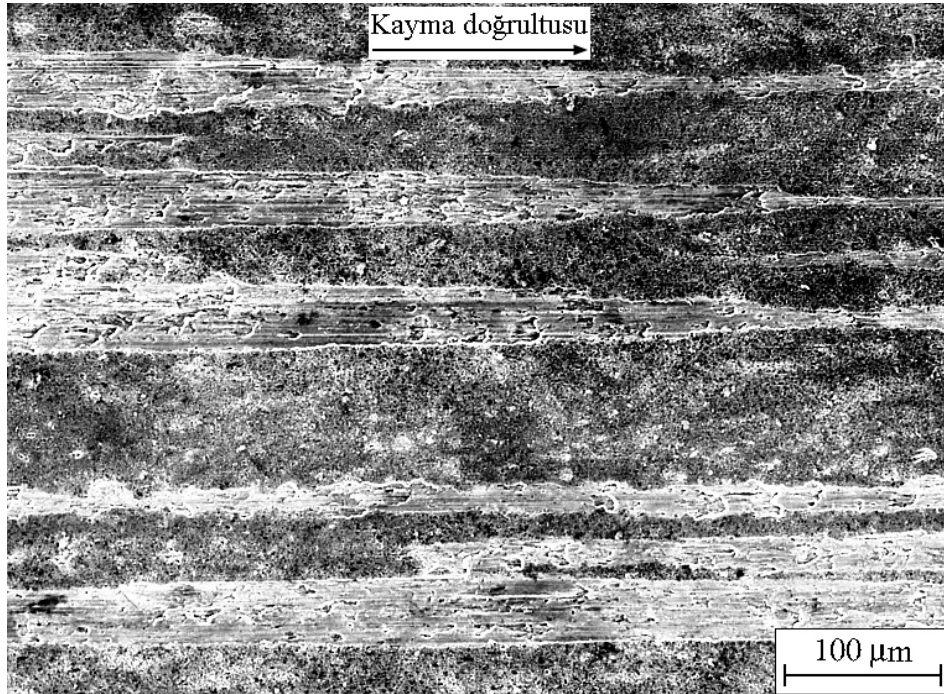
Şekil 52. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu alaşımına ait bir aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü



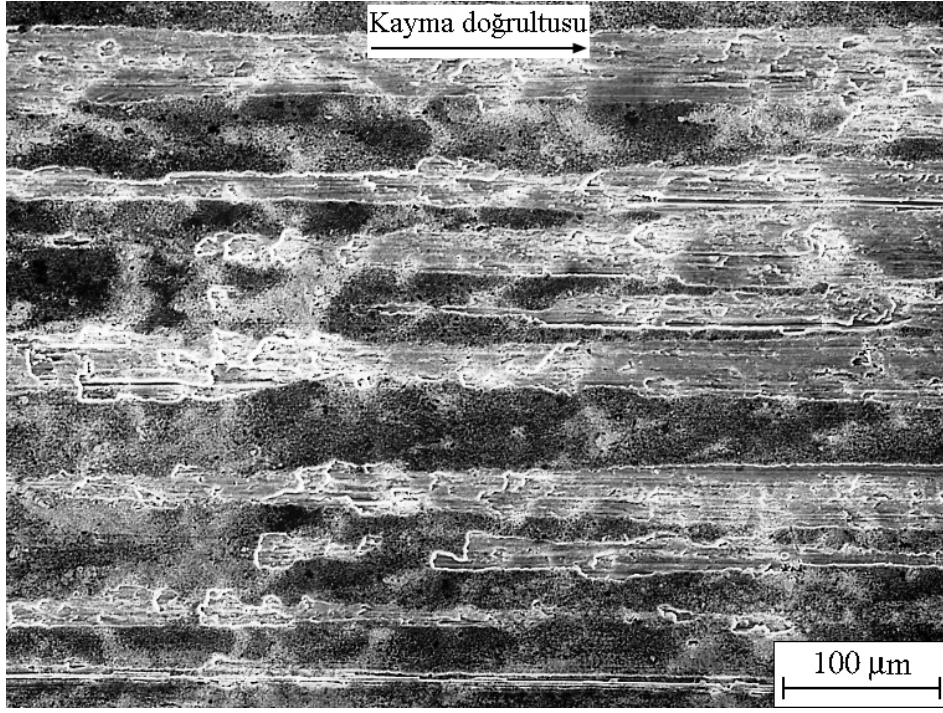
Şekil 53. SAE 65 bronzuna ait bir aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü



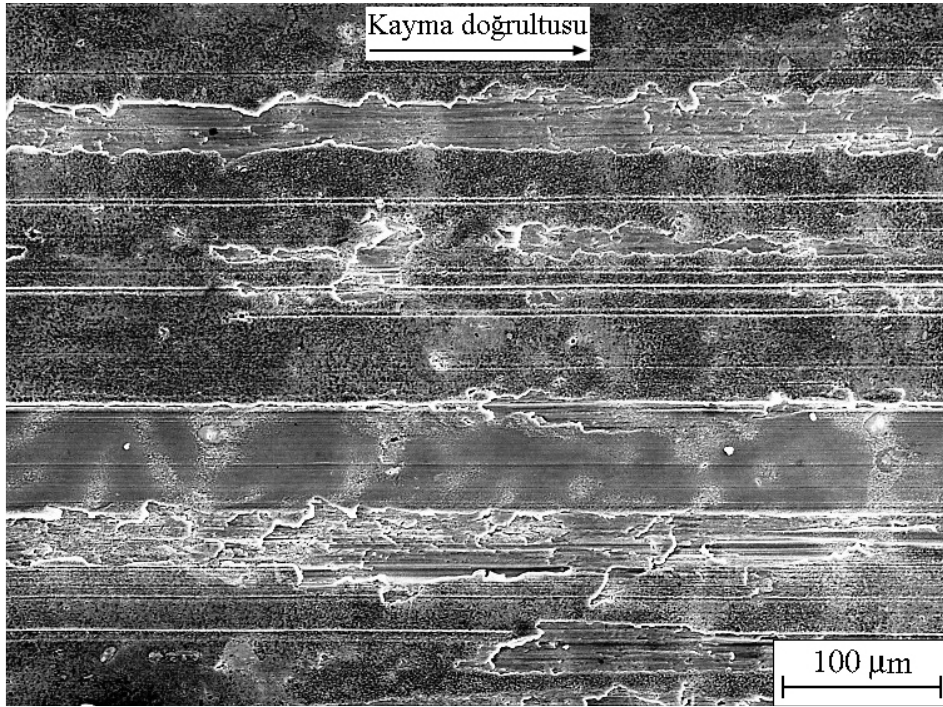
Şekil 54. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-1Cu alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 55. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-2Cu alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

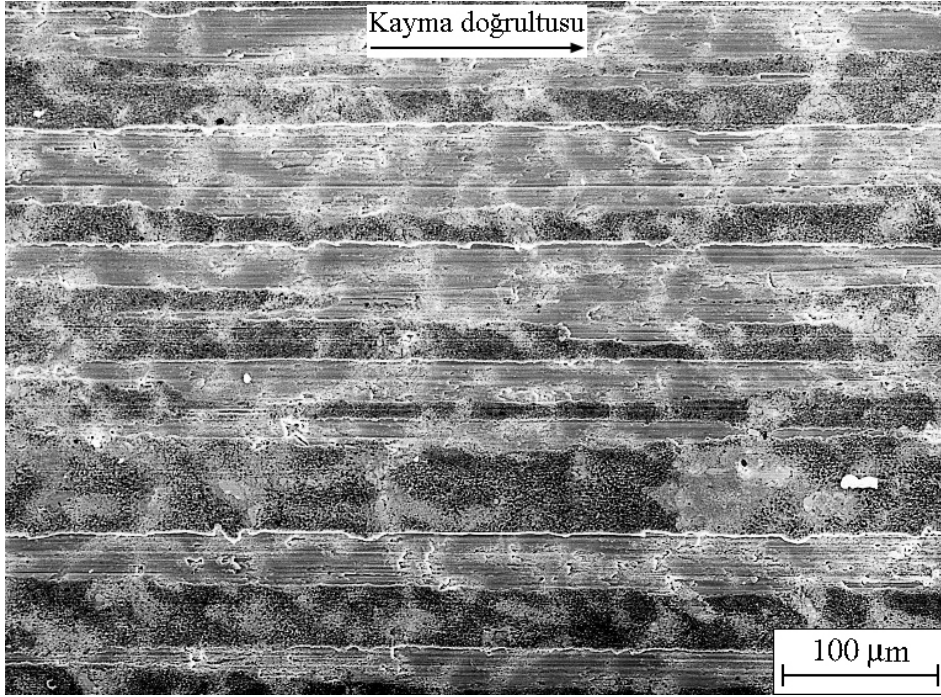


Şekil 56. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

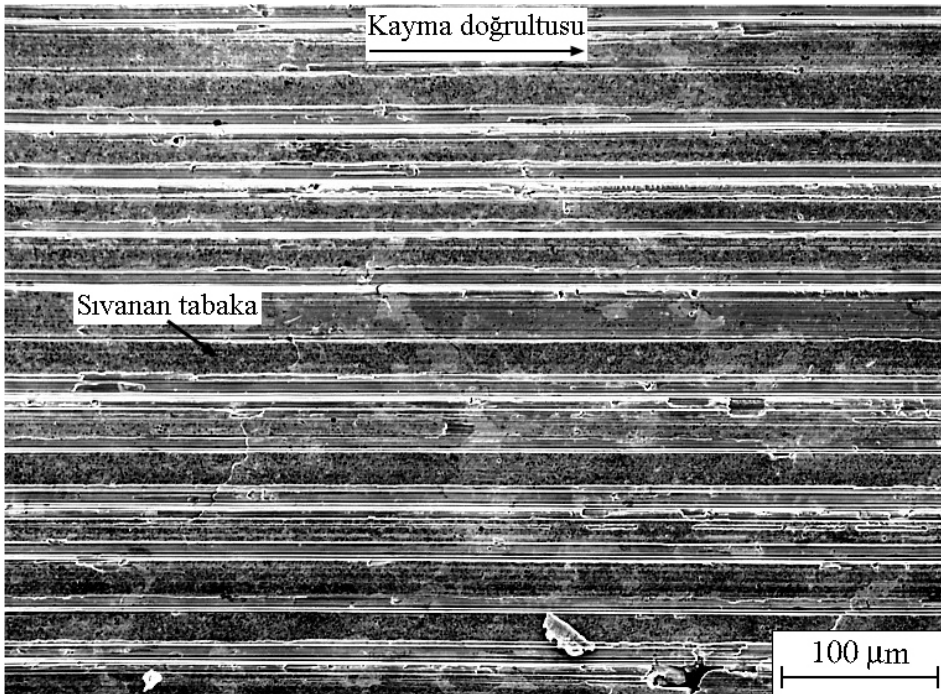


Şekil 57. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-4Cu alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

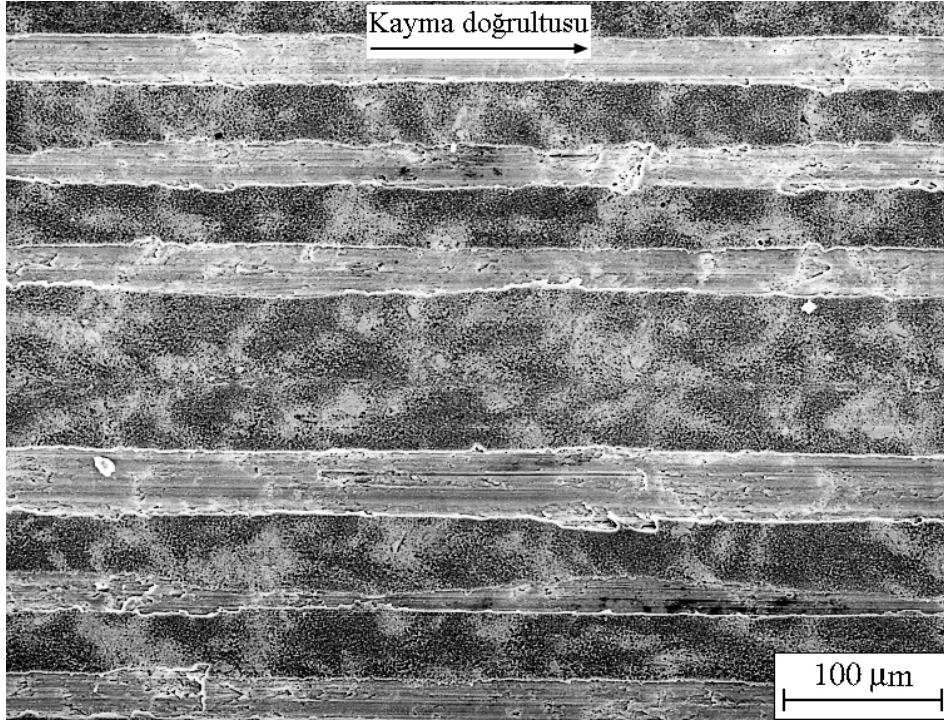




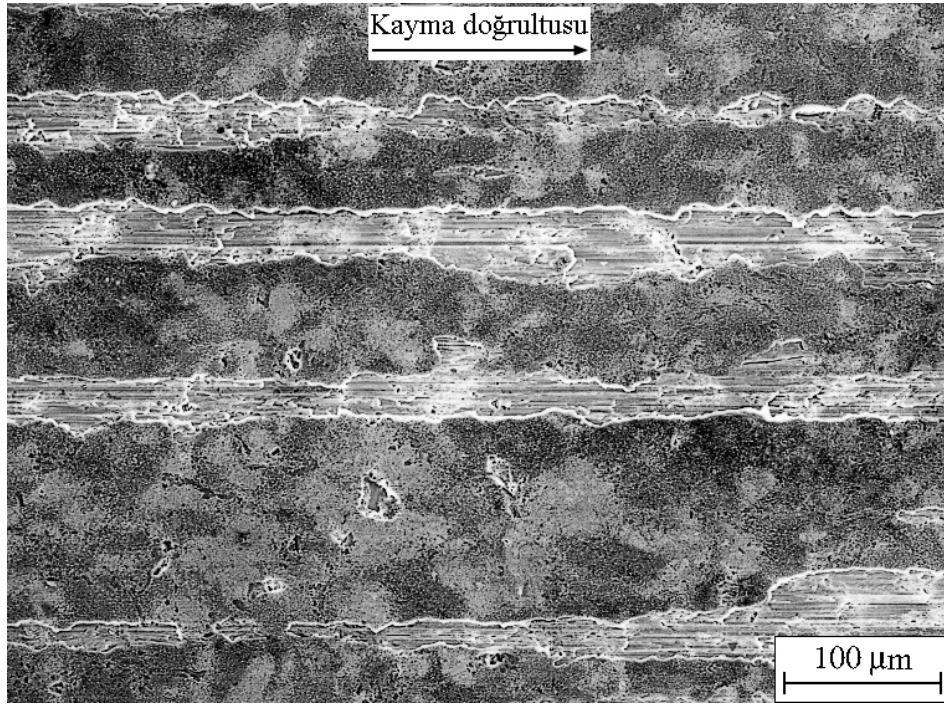
Şekil 58. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-5Cu alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



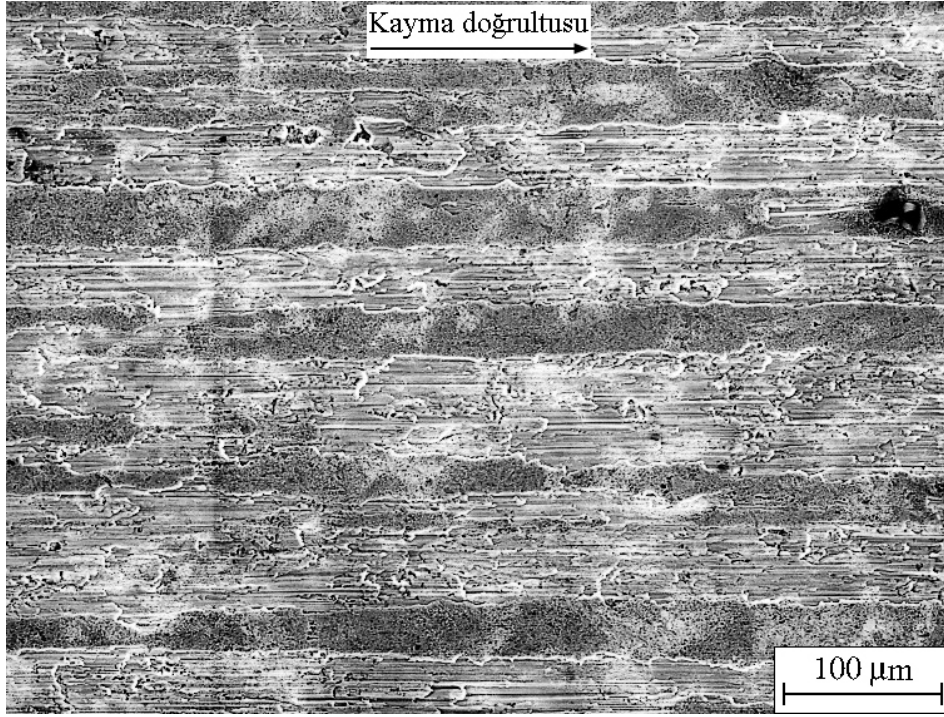
Şekil 59. SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



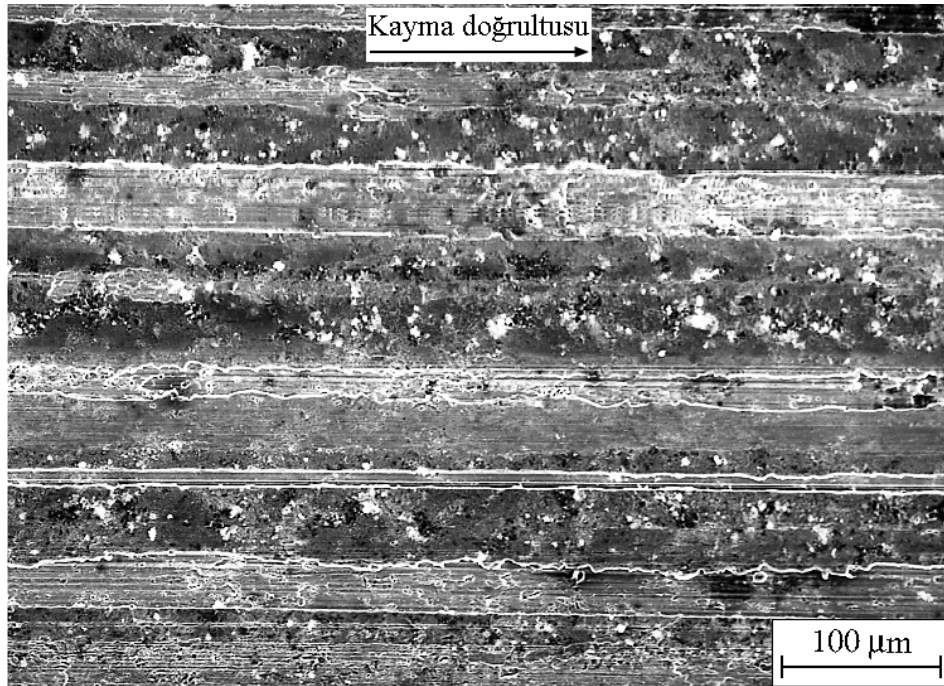
Şekil 60. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-1Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 61. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

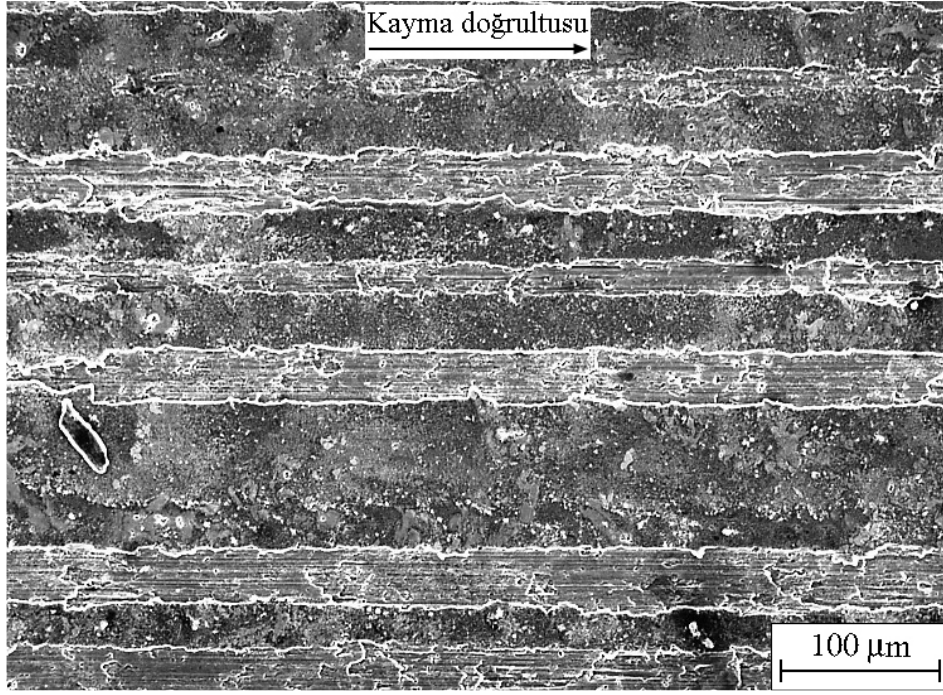


Şekil 62. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-5Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

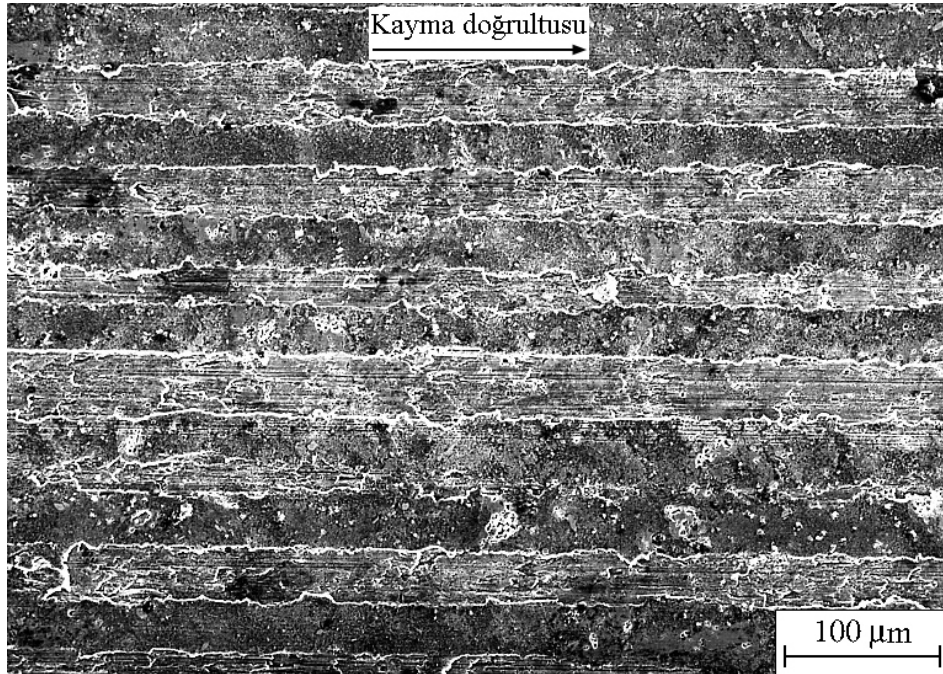


Şekil 63. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

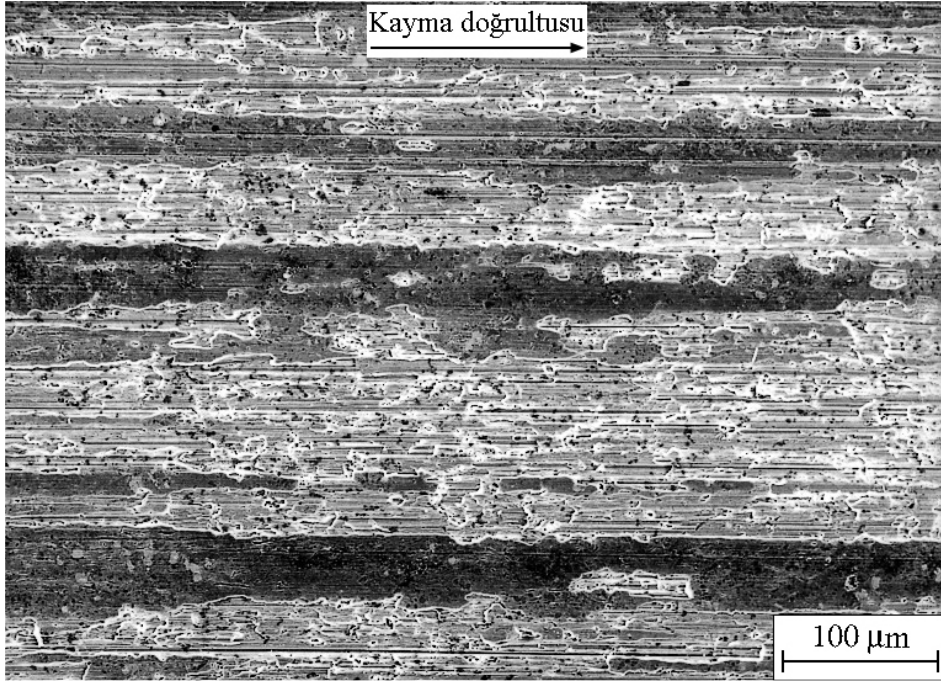




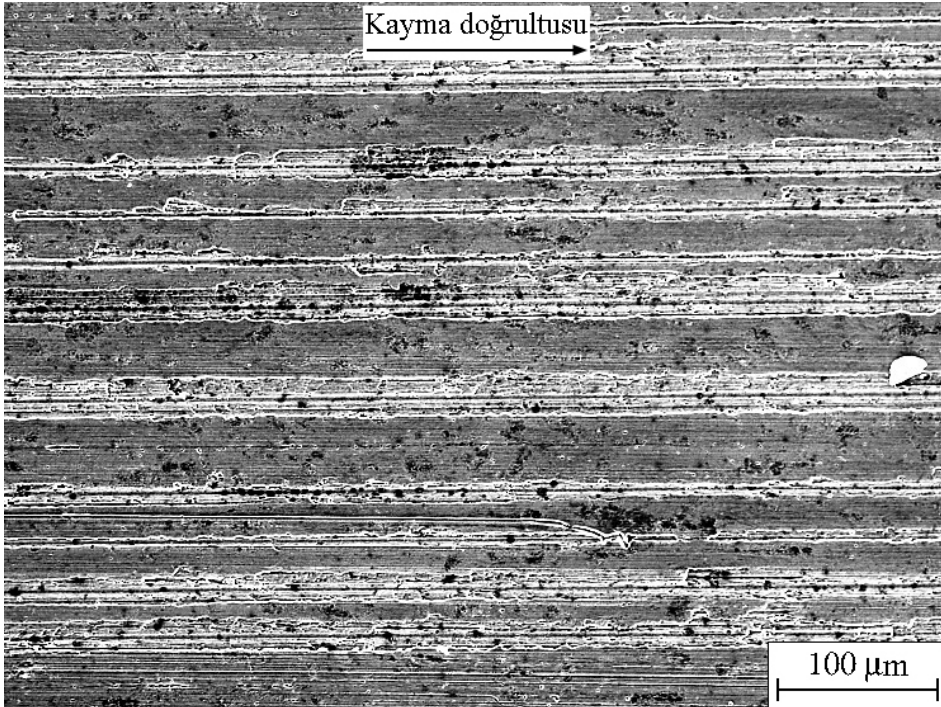
Şekil 64. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Ni alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 65. Dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-3Ni alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

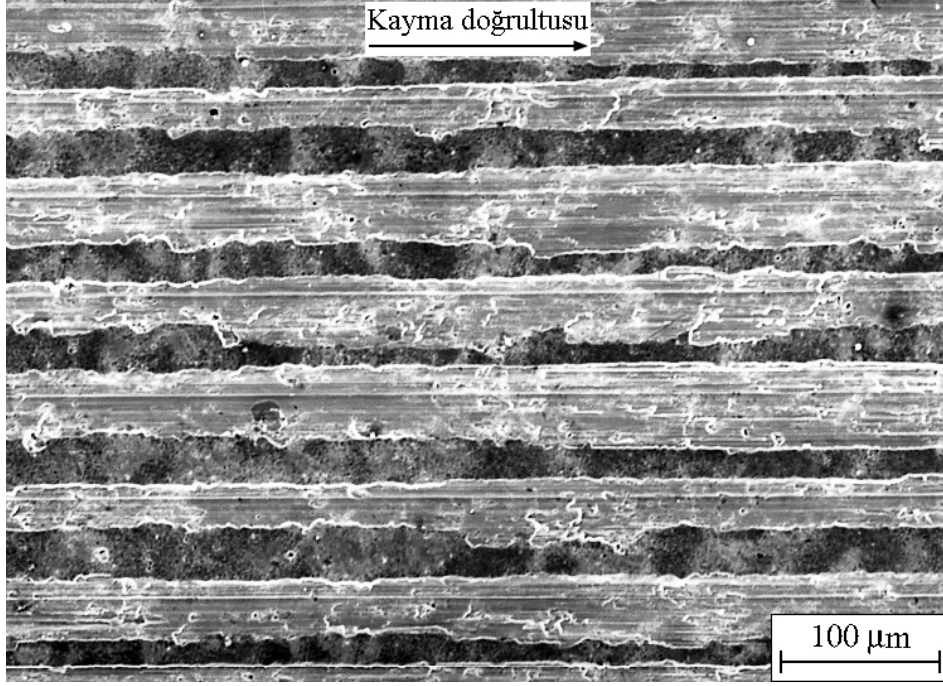


Şekil 66. Isıl işlem görmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşıımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

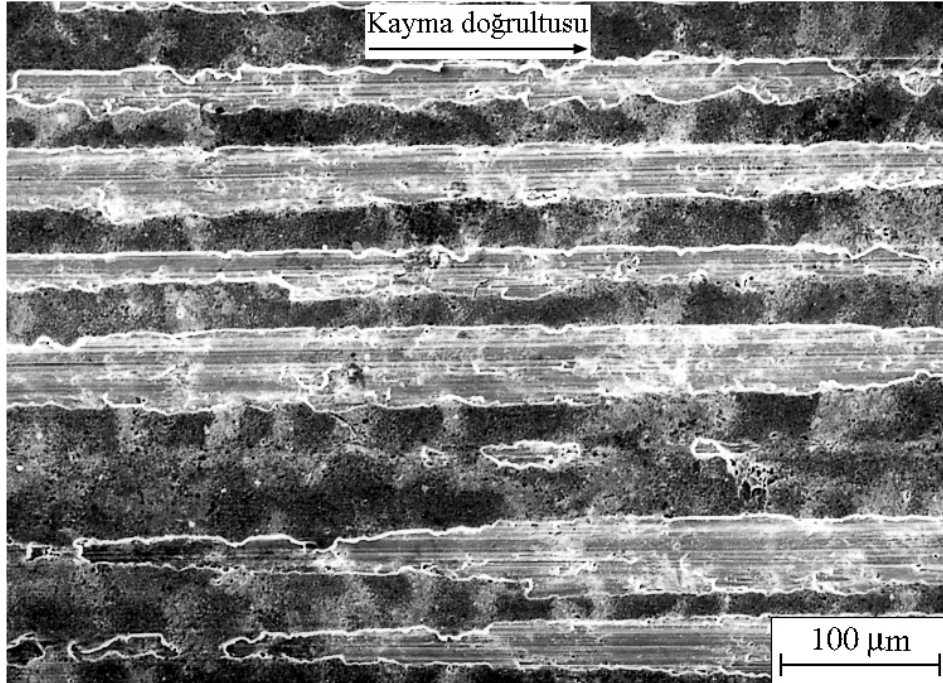


Şekil 67. Isıl işlem görmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşıımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

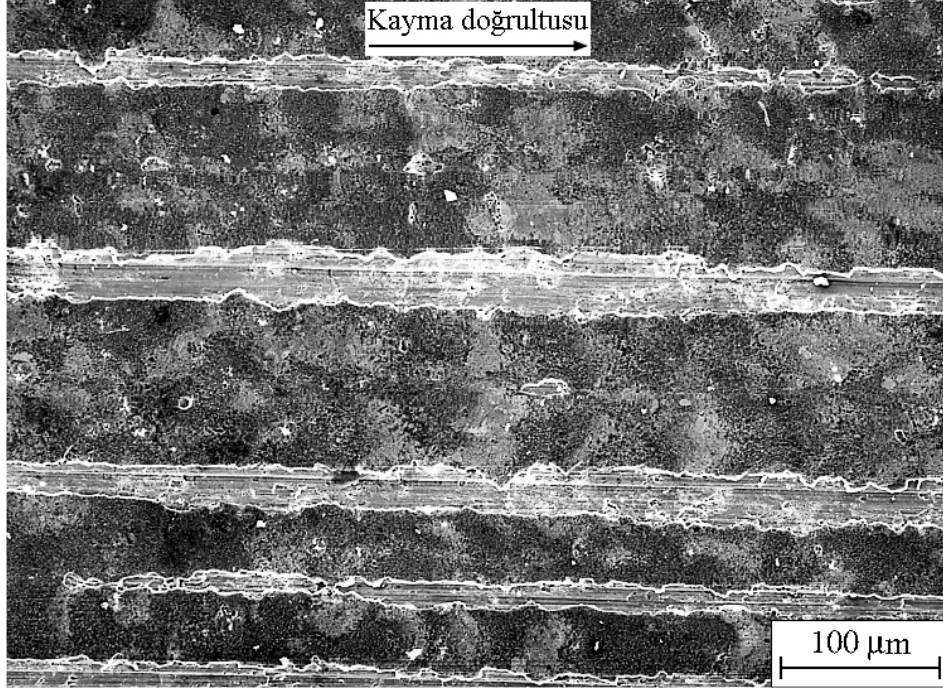




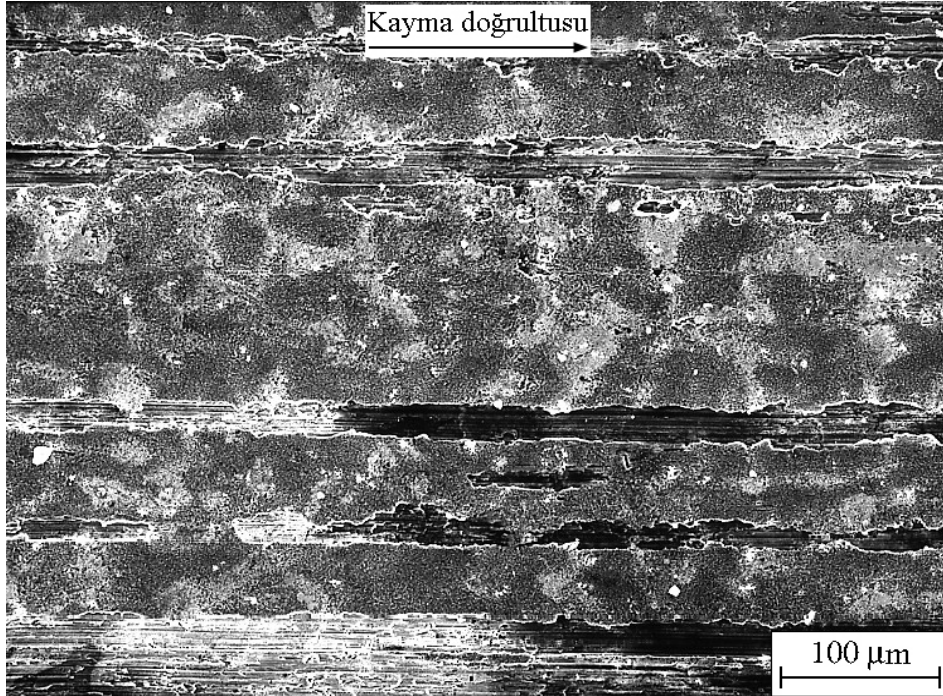
Şekil 68. 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 2 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



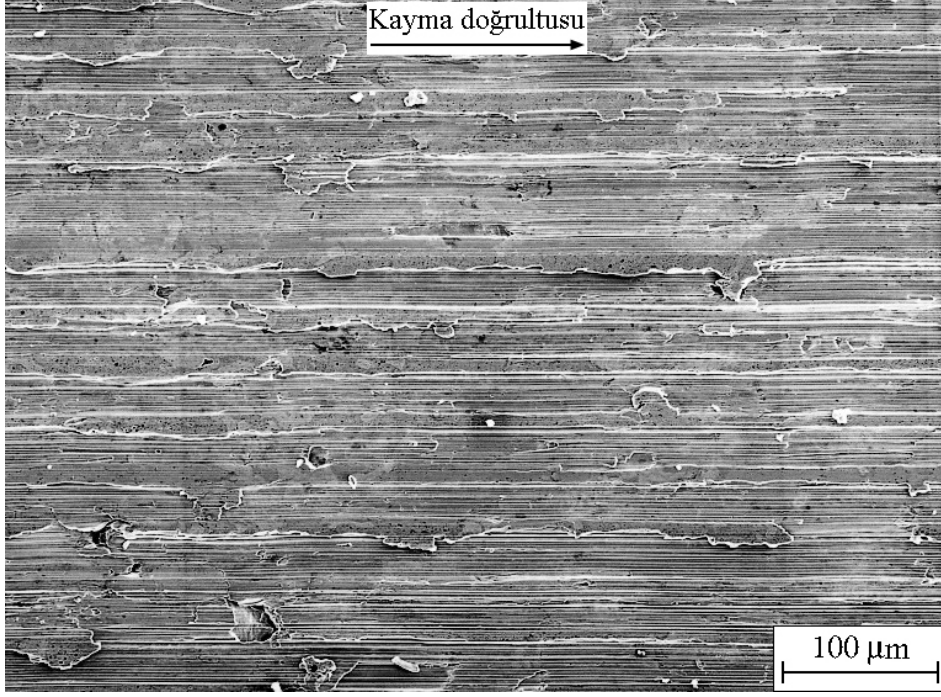
Şekil 69. 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



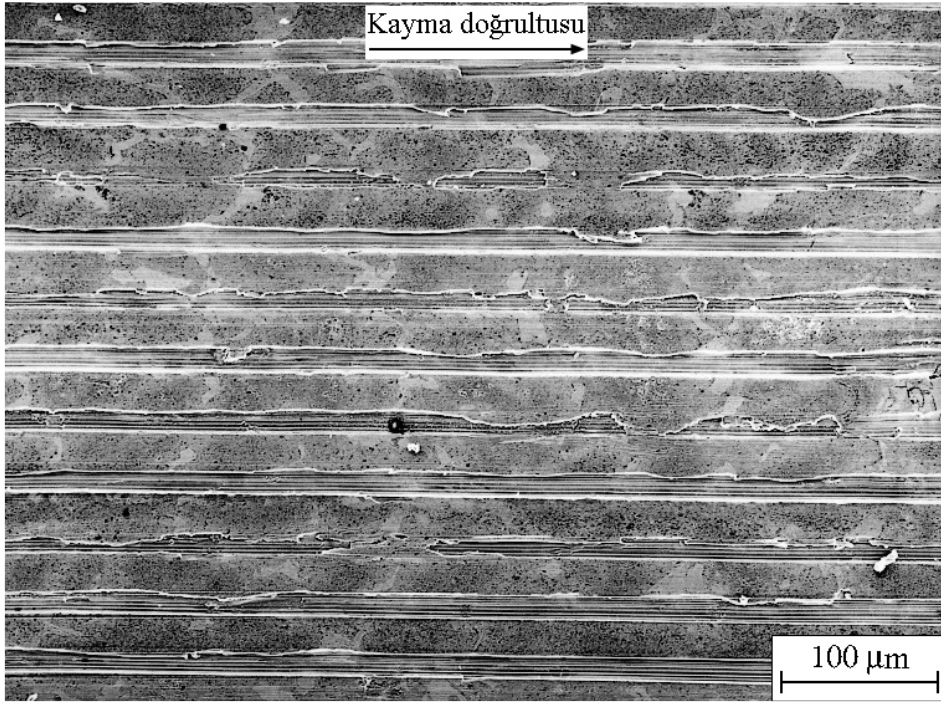
Şekil 70. 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



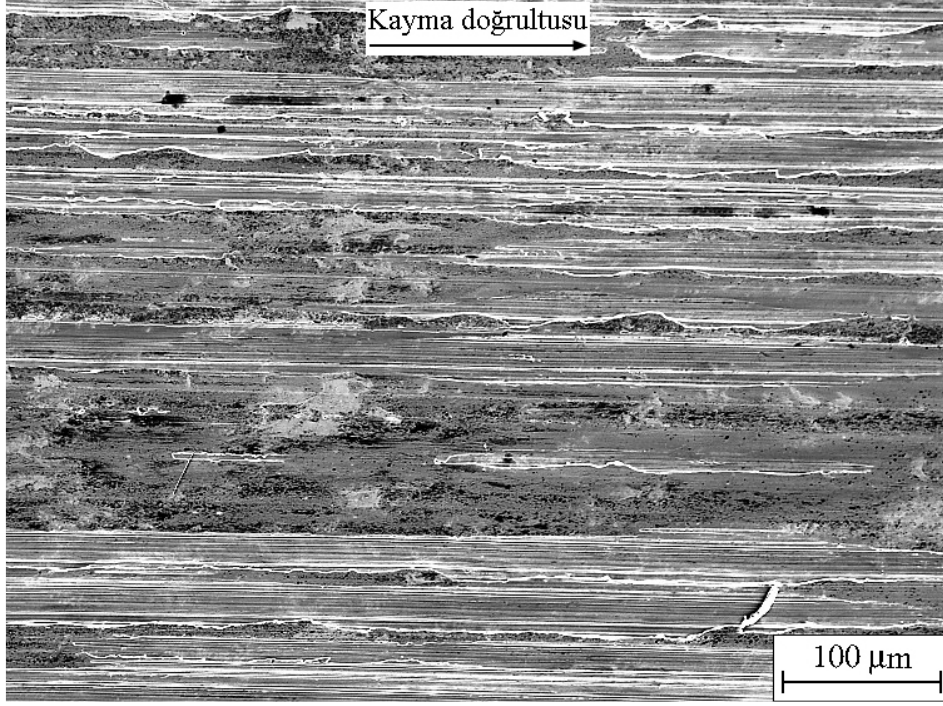
Şekil 71. 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 8 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



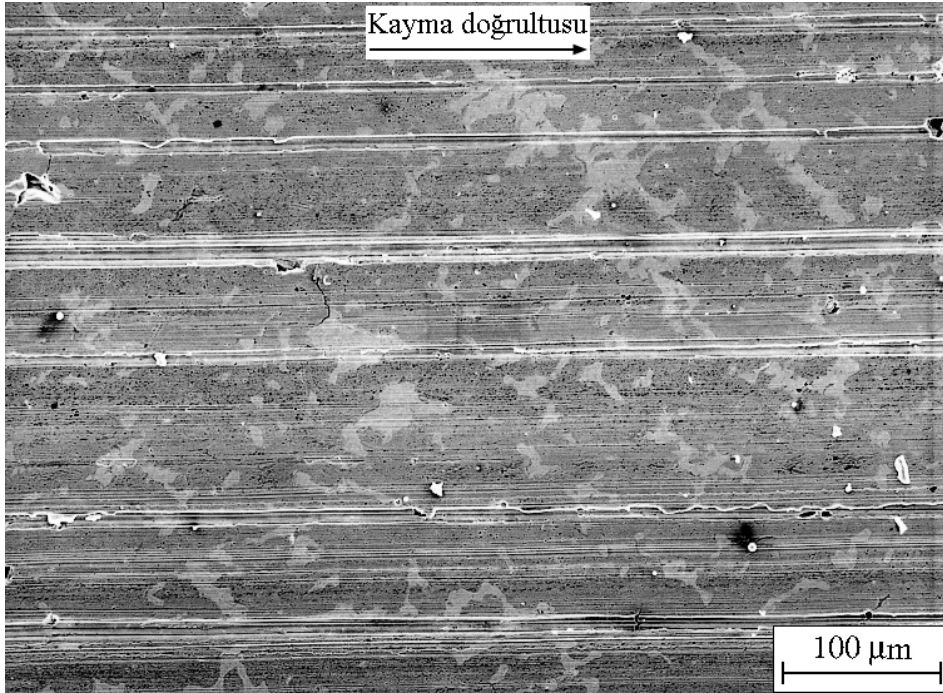
Şekil 72. 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 2 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



Şekil 73. 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü

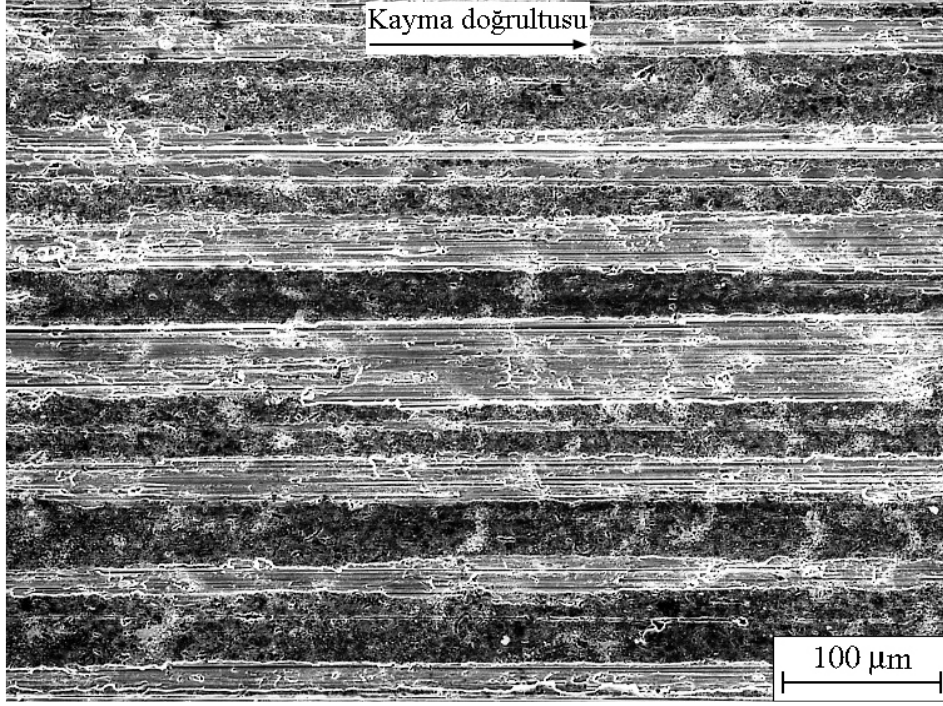


Şekil 74. 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 400 km'lik yol sonundaki SEM görüntüsü

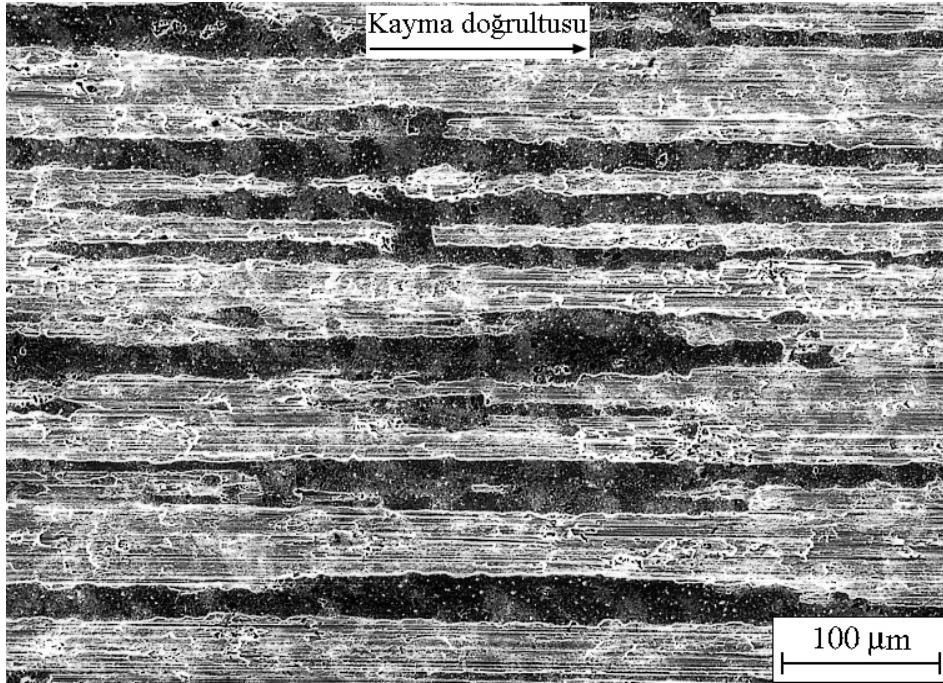


Şekil 75. 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 8 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 400 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü

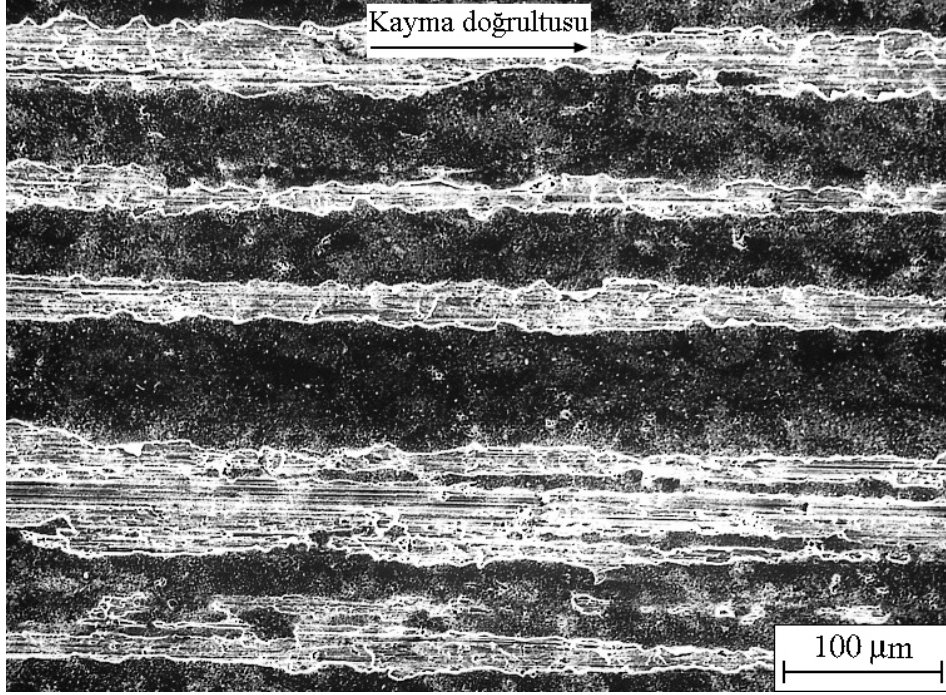




Şekil 76. 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 0,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 100 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



Şekil 77. 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 100 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



Şekil 78. 1,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin 100 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü

#### 4. İRDELEME

Bu çalışmada baz olarak alınan Al-40Zn alaşımının metalografik yapısının alüminyumca zengin göbekli  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen ötektoid  $\alpha + \eta$  fazlarından oluştuğu gözlemlendi, Şekil 9. Bu alaşıma bakır katıldığında metalografik yapısının fazla değişmediği, ancak dendritlerarası bölgelerde bakırca zengin  $\theta$  fazının oluştuğu görüldü, Şekil 10-14. Bakır oranı arttıkça  $\theta$  fazına ait parçacıkların irileşerek daha belirgin hale geldikleri gözlemlendi.

Dörtlü Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının iç yapılarında ise bunlara baz oluşturan üçlü Al-40Zn-3Cu alaşımının iç yapısından farklı olarak silisyum parçacıklarının yer aldığı görüldü, Şekil 15-20. Söz konusu parçacıkların boyut, oran ve dağılımlarının silisyum oranına göre değiştiği gözlemlendi. Şöyle ki, %2'den daha düşük oranlarda silisyum içeren alaşımlardaki silisyum fazının ince ve uzun parçacıklar halinde olup, yalnız dendritlerarası bölgelerde yer aldıkları görüldü, Şekil 15 ve 16. Bu değerden daha yüksek oranlarda silisyum içeren alaşımlarda ise, ince ve iri silisyum parçacıklarının bulunduğu gözlemlendi, Şekil 18-20. Bu parçacıkların hem dendritlerin içerisinde hem de dendritlerarası bölgelerde yer aldıkları belirlendi. Diğer taraftan iri silisyum parçacıklarının alaşımların belirli bölgelerinde toplanarak mikro ve makro segregasyona yol açtığı görüldü, Şekil 21. Bu durum alaşımların katılma mekanizmalarına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, alaşımların iç yapılarında yer alan ince silisyum parçacıklarının ötektik dönüşüm ürünü, iri olanların ise katılma sırasında kendiliğinden oluşan birincil silisyum parçacıkları oldukları anlaşılmaktadır. Birincil (iri) silisyum parçacıklarının yalnız %2'den daha yüksek oranlarda silisyum içeren alaşımlarda yer aldığı görüldü. Bu duruma göre %2 oranından daha düşük oranda silisyum içeren alaşımlar ötektik altı, bu değerden daha yüksek oranda silisyum içeren alaşımlar ise ötektik üstü alaşımlar olarak kabul edilebilir. Ötektik altı alaşımların katılması sırasında önce alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri oluşur ve sıcaklık düştükçe dendritlerarası bölgelerde bulunan sıvı içerisindeki alüminyum oranı azalır, silisyum oranı ise artar. Bu durum sıvı metalin kimyasal bileşiminin ötektik alaşımın kimyasal bileşimine erişmesine kadar devam eder. Ötektik bileşime erişildiğinde ötektik dönüşüm meydana gelir ve böylece dendritlerarası bölgelerde ötektik dönüşüm ürünü ince silisyum parçacıkları oluşur. Daha sonra ise çinkoca zengin fazların katılması sonucunda  $\alpha + \eta$  faz karşımı oluşur. Bu katılma sonucunda alüminyumca zengin göbekli  $\alpha$

dendritleri, bu dendritleri saran ötektoid  $\alpha + \eta$  ve dendritlerarası bölgelerde yer alan ötektik dönüşüm ürünü ince silisyum parçacıkları ile bakırca zengin  $\theta$  fazını içeren bir iç yapı oluşur. Ötektik üstü alaşımların katılaşması sırasında ise önce silisyum katılır ve sıcaklık düştükçe geriye kalan sıvı metal içerisindeki silisyum oranı azalır, alüminyum oranı ise artar. Bu durum sıvı metalin kimyasal bileşiminin ötektik noktanın kimyasal bileşimine erişmesine kadar devam eder. Ötektik bileşime erişildiğinde ötektik dönüşüm meydana gelir ve bunun sonucunda  $\alpha$  fazı ve silisyum parçacıklarından oluşan bir mikro yapı oluşur. Çinkoca zengin sıvının katılaşması ile de katılaşma tamamlanmış olur. Bu katılaşma sonucunda da alüminyumca zengin  $\alpha$  fazı, ötektoid  $\alpha + \eta$  fazları, bakırca zengin  $\theta$  fazı ve nispeten homojen dağılım sergileyen ince silisyum parçacıkları ile büyük boyutlu ötektik dışı veya birincil silisyum parçacıklarını içeren bir iç yapı oluşur. Diğer taraftan %2'den daha yüksek oranda silisyum içeren (ötektik üstü) alaşımların iç yapılarında bulunan büyük boyutlu silisyum parçacıklarının belirli bölgelerde toplandıkları görüldü. Bu durum söz konusu parçacıkların yoğunluklarının düşük olması nedeniyle sıvı metal içerisinde yüzerlerken birbirine çarparak hareketlerini engellemelerinden kaynaklanmış olabilir [40].

Nikel içeren dördü alaşımların iç yapılarının alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri, ötektoid  $\alpha + \eta$  faz karışımı,  $\theta$  fazı ile nikelce zengin fazlardan oluştuğu görüldü, Şekil 22-25. SEM'de yapılan EDS analizleri sonucunda nikelce zengin fazların  $Al_3Ni$  parçacıkları olduğu belirlendi. Söz konusu parçacıkların boyut, oran ve dağılımlarının nikel oranına göre değiştiği gözlemlendi, Şekil 22-24. Şöyle ki, %1'den daha düşük oranlarda nikel içeren alaşımlardaki nikelce zengin fazların ( $Al_3Ni$ ) ince parçacıklar halinde dendritlerarası bölgelerde yer aldıkları görüldü, Şekil 22. Bu değer üzerinde nikel içeren alaşımlarda ise gerek dendritler içerisinde, gerekse dendritlerarası bölgelerde yer alan küçük ve büyük boyutlu  $Al_3Ni$  parçacıklarına rastlandı. Yapılan incelemeler söz konusu parçacıklardan küçük boyutlu olanların ötektik dönüşüm ürünü, büyük boyutlu olanların ise katılaşma sırasında oluşan ötektik dışı parçacıklar oldukları anlaşılmıştır. Bu bulgular söz konusu alaşımların katılaşma davranışlarına dayandırılarak açıklanabilir. Bunun için de Al-6Ni ötektik alaşımının katılaşma davranışı örnek olarak alınabilir. Bu alaşımın katılaşma özellikleri göz önüne alındığında %1'den daha düşük oranlarda nikel içeren Al-40Zn-3Cu alaşımları ötektik altı, bu değerden daha yüksek oranlarda nikel içeren alaşımlar ise ötektik üstü alaşımlar olarak değerlendirilebilir. Ötektik altı alaşımların katılaşması sırasında ilk önce alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri oluşur ve sıcaklık düştükçe dendritlerarası



bölgelerdeki sıvı içerisindeki alüminyum oranı azalır ve nikel oranı artar. Sıvı metalin sıcaklığı ötektik dönüşüm sıcaklığına düştüğünde ötektik dönüşüm meydana gelir ve Al ile  $Al_3Ni$  fazlarını içeren bir iç yapı oluşur. Daha sonra çinkoca zengin sıvının katılaşması sonucunda da dendritlerarası bölgelerde yer alan  $\alpha$  ve  $\eta$  fazları oluşur. Sonuçta göbekli  $\alpha$  dendritleri ile bu dendritleri çevreleyen ötektoid  $\alpha + \eta$  karışımı ve bakır ve nikelce zengin fazların yer aldığı bir yapı meydana gelir. Ötektik üstü alaşımların katılaşması sırasında ise ilk önce  $Al_3Ni$  bileşiği oluşur ve sıcaklık düştükçe sıvı metal içerisindeki nikel miktarı azalırken alüminyum miktarı artar. Bu durum sıvı metalin sıcaklığının ötektik dönüşüm sıcaklığına erişmesine kadar devam eder. Sıvı metalin kimyasal bileşimi ötektik alaşımın kimyasal bileşimine erişmesi durumunda da ötektik dönüşüm meydana gelir ve  $Al+Al_3Ni$  ötektik karışımını içeren bir yapı oluşur. Çinkoca zengin sıvının katılaşması ile katılaşma tamamlanmış olur. Katılaşma tamamlanınca alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri ve ötektoid  $\alpha + \eta$  karışımı ile bakırca zengin  $\theta$  ve nikelce zengin  $Al_3Ni$  fazlarından oluşan bir yapı elde edilir.

Uygulanan çözündürme ve yaşlandırma işlemi sonunda alaşımların dendritik yapıları ortadan kalkarak bunların yerini ince  $\eta$  çökeltilerinin aldığı, ancak bakır, silisyum ve nikelce zengin fazlarda ( $\theta$ , Si ve  $Al_3Ni$ ) önemli bir değişimin meydana gelmediği gözlemlendi, Şekil 26 ve 27. Bu durum çözündürme ve su verme sonrasında oluşan aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözültisi içerisinde yaşlandırma sırasında çinkoca zengin fazların çökmesinden kaynaklanmaktadır [1, 3, 18, 21, 23, 28, 30, 48, 67].

İkili Al-(10-50)Zn alaşımlarının sertlik ve çekme dayanımının artan çinko oranı ile artarak %25 Zn oranında en yüksek değerine ulaştığı ve bu değer üzerindeki bileşimlerde ise azaldığı görüldü, Şekil 29. Bu durum söz konusu alaşımlarda meydana gelen katı çözülti sertleşmesi mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, ikili alüminyum-çinko faz diyagramına göre çinkonun alüminyum içerisindeki çözünürlüğü artan çinko oranı ile artmakta, ancak belirli bir çinko oranında (%25) yapı içerisinde nispeten yumuşak ötektoid dönüşüm ürünü  $\alpha + \eta$  fazları oluşmaya başlamakta ve çinko oranı arttıkça bu dönüşüm ürününün oranı da artmaktadır [12, 18, 20]. Bu durum söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemetinin artan çinko oranı ile artmasının katı çözülti sertleşmesinden, %25 Zn oranından sonra azalmasının ise katılaşma sonucunda oluşan nispeten yumuşak ötektoid  $\alpha + \eta$  fazlarının dendritlerarası bölgeleri zayıflatmasından kaynaklanmış olabileceğini göstermektedir.

%2 oranındaki bakır katkısının Al-(10-50)Zn alaşımlarının sertlik ve çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığı gözlemlendi, Şekil 30. Ancak, söz konusu alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik ve çekme dayanımı Al-40Zn-2Cu alaşımından elde edildi. Bu durum bakırın Al-Zn alaşımları içerisindeki çözünürlüğünün artan çinko oranı ile artarak %40 Zn oranında en yüksek değerine ulaştıktan sonra azalmasından kaynaklanmış olabilir.

Al-40Zn-(0-5)Cu alaşımlarının sertliği artan bakır oranı ile sürekli artarken, çekme dayanımının %3 Cu oranına kadar artan bakır ile arttığı, ancak bakır oranının bu değerin üzerine çıkması durumunda azaldığı görüldü, Şekil 31. Ayrıca alaşımların kopma uzamasının artan bakır oranı ile sürekli azaldığı gözlemlendi. Bu bulgular alaşımların metalografik yapısına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, bakırın alüminyum içerisindeki çözünürlüğü azalan sıcaklıkla azalarak oda sıcaklığında yaklaşık %1 oranına düşmektedir [25]. Bakır oranının bu değerin (%1) üzerine çıkması durumunda alaşımın dendritlerarası bölgelerinde bakırca zengin intermetalik  $\theta$  fazı oluşmaktadır [25]. Alaşıma katılan bakırın bir kısmı  $\theta$  fazının oluşması için harcadığından alüminyum-çinko matrisi içerisinde çözünen bakır oranı azalmaktadır [37, 38, 41, 51]. Bu durum söz konusu alaşımlardaki katı çözültü sertleşmesini kısıtlayarak  $\alpha$  katı çözültüsünün sertleşmesini engellemektedir. Diğer taraftan sert ve gevrek  $\theta$  parçacıkları dendritlerarası bölgelerde toplanarak dendritler (kristal) arasındaki bağı zayıflatabilirler, bir ölçüde söz konusu bölgelerin gevrekleşmesine yol açabilirler. Dendritler arasındaki bağların zayıflaması veya bu bölgelerin gevrekleşmesi nedeniyle dökülmüş durumdaki alaşımların hem çekme dayanımı hem de kopma uzaması azalabilir [38, 51, 58, 59].

Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının sertliği artan silisyum oranı ile sürekli artarken kopma uzamasının sürekli azaldığı görüldü. Söz konusu alaşımların çekme dayanımının ise artan silisyum oranı ile önce azalıp, %0,25 Si oranında bir minimumdan geçtikten sonra artarak %2 silisyum oranında en yüksek değerine ulaştığı daha sonra da tekrar azaldığı gözlemlendi, Şekil 32. Ancak bu alaşımların çekme dayanımının silisyum içermeyen üçlü Al-40Zn-3Cu alaşımının bu değerinden daha düşük olduğu görüldü. Sertlikte meydana gelen artış alaşımlardaki sert silisyum parçacıklarının oranının artan silisyum oranı ile artmasından, kopma uzaması değerlerinde meydana gelen azalma ise sert silisyum parçacıklarının alaşımların gevrek kırılma meylini artırmış olmasından kaynaklanmış olabilir [2, 3, 10, 39, 40, 57, 59]. Alaşımların çekme dayanımının silisyum oranına göre değişimi iç yapıda bulunan silisyum parçacıklarının türüne, büyüklüğüne ve dağılım biçimine dayandırılarak açıklanabilir [3, 10, 39, 40]. Şöyle ki, en düşük çekme dayanımına

sahip olan alaşımlardan birinde (Al-40Zn-3Cu-0,25Si) bulunan bütün silisyum parçacıkları dendritlerarası bölgelerde toplandığı gözlemlendi, Şekil 15. Sert ve gevrek olan bu parçacıklar dendritlerarası bölgeleri gevrekleştirerek veya dendritler arasındaki bağları zayıflatarak alaşımların çekme dayanımının düşmesine neden olabilir. Ancak silisyum oranı arttıkça alaşımlarda ötektik dönüşüm sonucunda oluşan ince ve uzun silisyum parçacıklarının oranı artmakta ve bu parçacıklar yapıda nispeten daha homojen bir dağılım sergilemektedir. Silisyum parçacıklarının hem dendritlerarası hem de dendritiçi bölgelerde yer alarak nispeten homojen bir dağılım sergilemeleri söz konusu alaşımların çekme dayanımının artmasına yol açmış olabilir. Silisyum oranının %2 değerinin üzerine çıkması durumunda ise, alaşımların iç yapılarında ince ve uzun görünümlü ötektik silisyum parçacıklarının yanı sıra büyük boyutlu (iri) birincil silisyum parçacıklarının da oluştuğu ve bu parçacıkların belirli bölgelerde toplanarak segregasyona neden olduğu görüldü. Birincil silisyum parçacıklarının kümeleşerek mikro ve makro boyutlarda segregasyona yol açmaları bu parçacıklar arasındaki ortalama uzaklığın da artmasına neden olur [40]. Sert silisyum parçacıkları arasındaki ortalama uzaklığın artması da bu parçacıkların mukavemet artırma etkisini kısıtlar [40]. Diğer taraftan büyük boyutlu birincil silisyum parçacıkları kümelenedikleri bölgelerin gevrek kırılma meylini artırabilirler [40, 57-59]. Silisyum oranının belirli bir değerin (%2) üzerine çıkması durumunda oluşan büyük boyutlu birincil silisyum parçacıklarının gerek dağılım biçiminde meydana gelen düzensizlik, gerekse bu parçacıkların gevrek kırılmaya yol açmaları %2'den daha yüksek oranda silisyum içeren alaşımların çekme dayanımının artan silisyum oranı ile azalmasına neden olabilir. En yüksek oranda silisyum içeren Al-40Zn-3Cu-5Si alaşımının en yüksek sertliğe sahip olmasına karşın, en düşük çekme dayanımı sergilemesi bu görüşü doğrulamaktadır.

Al-40Zn-3Cu-(0-3)Ni alaşımlarının sertliği nikel oranı ile düzensiz bir değişim gösterirken, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin artan nikel oranı ile azaldığı görüldü, Şekil 33. Bu durum alaşımların iç yapılarında bulunan fazların biçimine, miktarına ve dağılımına göre açıklanabilir. Şöyle ki, nikel içeren ve içermeyen alaşımlar arasındaki tek fark nikelli alaşımlarda katılma sırasında  $Al_3Ni$  bileşiğinin oluşmasıdır. Metalografik incelemeler bu bileşiğin büyüklük, oran ve dağılım biçiminin katılan nikel oranına göre değiştiğini gösterdi. Alaşımların sertliğinde meydana gelen dalgalanma sözü edilen değişimlerden kaynaklanmış olabilir. Çekme dayanımı ile kopma uzamasının artan nikel oranı ile sürekli azalması ise oluşan  $Al_3Ni$  bileşiğinin daha çok dendritlerarası bölgelerde yer alarak alaşımları gevrekleştirmesinden kaynaklanmış olabilir. Silisyum

içeren alaşımlarda gözleendiği gibi söz konusu bileşiklerden dendritlerarsı bölgelerde yer alanlar dendritler arasındaki bağı zayıflatarak gevrek kırılmaya yol açabilirler [54, 55, 57, 59-64].

Uygulanan ısı işlem (çözündürme, su verme ve yapay yaşlandırma) sonucunda alaşımların sertlik ve çekme dayanımı artarken, kopma uzaması değerinin az da olsa azaldığı görüldü, Tablo 6. Bu durum yaşlandırma sırasında aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözültisi içerisinde çinkoca zengin ince fazların çökmesinden kaynaklanmaktadır [1, 3, 23, 28, 68, 69]. Şekil 34'deki sertlik eğrisinde görüldüğü gibi alaşımın sertliği yaşlandırma sırasında artarak bir tepe noktasına eriştikten sonra tekrar azalmaktadır. Bu durum çekirdekleşme ve büyüme mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir. Yaşlandırma aşamasında çinkoca zengin fazların çökmesi nedeniyle oluşan bağdaşıklık gerilmeleri  $\alpha$  matrisinin kafes yapısının çarpılmasına veya deformasyona uğramasına yol açabilir [1,3, 70]. Kafes yapısında meydana gelen çarpılma da dislokasyonların hareketini engelleyerek alaşımın sertlik ve mukavemetini artırır [71, 72]. Yaşlandırma devresinden sonra hem bağdaşıklık gerilmelerinin azalması hem de çökeltilerin büyümeleri nedeniyle alaşımın özelliklerindeki değişim tersine döner ve sertlik ve mukavemet zamanla azalırken, süneklik az da olsa artar. Kısacası yapay yaşlandırma sırasında birbirine ters iki etki ortaya çıkar. Bunlardan biri kafes yapısındaki çarpılma nedeniyle meydana gelen sertleşme, diğeri de bağdaşıklık gerilmelerin azalmasından ve çökeltilerin büyümesinden kaynaklanan yumuşamadır. Bu iki etkinin birbirini dengelediği durumda en yüksek setliğe erişilir. Dolayısıyla uygulanan ısı işlem sonrası söz konusu alaşımların mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözültisi içerisinde çinkoca zengin fazların çökmesi ve büyümelerinden kaynaklanmaktadır [1, 3, 23, 70].

Alaşımların gerek sürtünme katsayısı, gerekse sıcaklığının aşınma deneylerinin başlangıcında hızlı olmak üzere gittikçe azalarak sürekli rejim hali olarak bilinen sabit değerlere ulaştığı görüldü, Şekil 35 ve 36. Sürtünme katsayısı ve sıcaklığın alıştırma (rodaj) dönemi olarak da adlandırılan başlangıç aşamasında yüksek olması, sürtünen yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filminin oluşmaması nedeniyle bu yüzeylerin birbirine temas etmesinden kaynaklanmaktadır [73-75]. Alıştırma dönemi sonrasında hem pürüzlerin azalması hem de yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filmi oluşması nedenleriyle sürtünme katsayısı ve sıcaklık azalarak sabit değerlere ulaşmaktadır [73-76].

Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımları ile SAE 65 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının artan yol ile hızlı bir artış gösterdikten sonra yaklaşık 400 km sonunda sabit

değerlere ulaştığı görüldü, Şekil 37. Alıştırma devresi olarak adlandırılan başlangıç aşamasında hacim kaybında görülen artış, sürtünen yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filminin oluşmamasından dolayı meydana gelen metal-metal temasından kaynaklanmış olabilir [73-78]. Alıştırma devresinde alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklığının en yüksek değerlere ulaşması (Şekil 35 ve 36) bu görüşü doğrulamaktadır. Bu dönemde sıcaklıkta meydana gelen ani artış numunenin sertliğinin düşmesine yol açabilir. Numune sertliğinin azalması da bu devrede meydana gelen metal-metal teması sırasındaki hacim kaybının artmasında rol oynamış olabilir. Alaşımların hacim kaybının belirli bir süre veya yol sonunda sabit bir değere ulaşması ise numune yüzeylerinde sıvama tabakası ve oksit filmi oluşumuna dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, numune yüzeyine sıvanan malzeme yüzey pürüzlerini örterek nispeten düzgün bir yüzey oluşturur ve böylece numune yüzeyi disk yüzeyine daha iyi uyum sağlayabilir. Temas yüzeylerinin birbirine alışması anlamına gelen bu durum alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklığını düşürerek hacim kaybını azaltabilir. Diğer taraftan bu devrede söz konusu alaşımların yüzeylerinde oluşan alüminyum oksit ve çinko oksit filmleri de hacim kaybını azaltıcı veya aşınma direncini artırıcı etki yapabilirler. Çalışma sırasında bu alaşımların yüzeyinde oluşan sert alüminyum oksit filmi uygulanan yükü taşıırken, daha yumuşak olan çinko oksit filminin yağlayıcı özelliğinden dolayı kaymayı kolaylaştırdığı bilinmektedir [3, 57].

Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının artan bakır oranı ile azaldığı, %3 Cu oranının üzerinde ise bakır oranı arttıkça arttığı gözlemlendi, Şekil 38. Anlam olarak hacim kaybının tersi olarak tanımlanan aşınma direnci ise, bu değişimin aksine %3 Cu oranına kadar artan bakır oranı ile artarken, bu oranın üzerinde bakır oranı arttıkça azalmaktadır. Bu durum hacim kaybının ya da bunun tersi olan aşınma direncinin malzemenin sertliğinden çok çekme dayanımına bağlı olduğunu göstermektedir. Şöyle ki, alaşımların sertliği artan bakır oranı ile sürekli artarken, çekme dayanımı %3 Cu oranından sonra azalmaktadır, Şekil 38. Başka bir deyişle alaşımların aşınma direnci artan çekme dayanımı ile artmakta, çekme dayanımının azalması durumunda ise azalmaktadır. Çinko esaslı alaşımlar üzerinde daha önceden yapılan çalışmalarda da [38] gözlenen bu durum alaşımların metalografik yapılarına ve bu yapıları oluşturan fazların sertliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, alaşımların matrisini oluşturan  $\alpha$  fazının mikrosertliğinin %3 Cu oranına kadar artan bakır oranı ile arttığı ve bu değer üzerindeki oranlarda ise sabit kaldığı gözlemlendi, Şekil 31. Alüminyumca zengin  $\alpha$  fazının mikrosertliğinin artması çekme dayanımının artmasına, çekme dayanımının artması da

hacim kaybının azalmasına neden olabilir. %3 oranından sonra  $\alpha$  fazının mikrosertliği artan bakır oranı ile değişmezken aşınma direncinin azalması bu alaşımların dendritlerarası bölgelerinde yer alan sert ve gevrek  $\theta$  parçacıklarının çekme dayanımını düşürmesinin yanı sıra yüzeyden koparak abrazyon etkisi yapmasından kaynaklanmış olabilir.

Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarında sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayısı ve sıcaklığının artan silisyum oranıyla pek fazla değişmediği, ancak aşınma ile meydana gelen hacim kaybının artan silisyum oranı ile artarak %0,25 Si oranında en yüksek, %2 Si oranında ise en düşük değerine ulaştıktan sonra tekrar arttığı görüldü, Şekil 39. Bu durum alüminyum-çinko matrisi içerisinde yer alan silisyum parçacıklarının oranı ve dağılım biçiminden kaynaklanmış olabilir. Söyle ki, silisyum oranı arttıkça alüminyum-çinko matrisindeki ötektik dönüşüm sonucu oluşan silisyum parçacıklarının oranı artmakta ve bu parçacıklar nispeten homojen dağılım sergilemektedir. Sert ve gevrek olan silisyum parçacıklarının yapıda homojen olarak dağılması alaşımların aşınma direncini artırıcı etki yapabilir. Ancak, %2 değerinden daha yüksek oranlarda silisyum içeren alaşımların iç yapılarında ötektik silisyum parçacıklarının yanı sıra büyük boyutlu silisyum parçacıklarının oluştuğu ve bu parçacıkların belirli bölgelerde kümeleştiği gözlemlendi, Şekil 18-21]. Büyük boyutlu silisyum parçacıklarının belirli bölgelerde toplanması alaşımların iç yapılarında hem silisyumsuz bölgelerin oluşumuna hem de mikro segregasyona yol açmaktadır. Silisyum parçacıklarının belirli bölgelerde kümeleşerek düzensiz dağılım sergilemeleri alaşımların mukavemetinin artmasından çok azalmasına neden olabilir. Mukavemette meydana gelen azalma da hacim kaybının artmasına yol açabilir [39, 40]. Alaşımların hacim kaybı ve çekme dayanımının silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler bu görüşü doğrulamaktadır, Şekil 41.

Al-40Zn-3Cu-(0-3)Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı ve sıcaklığı artan nikel oranı ile sürekli artarken, bu alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının %0,5 Ni oranında bir tepe noktasından geçtikten sonra azaldığı görüldü, Şekil 40. Bu durum nikel içeren alaşımların iç yapısında bulunan sert  $Al_3Ni$  fazının büyüklüğü, oranı ve dağılım biçimine göre açıklanabilir. Şöyle ki, nikel oranı arttıkça bu alaşımlarda oluşan  $Al_3Ni$  parçacıklarının hem büyüklüğünün hem de yüzde oranının arttığı gözlemlendi, Şekil 22-25. Alaşımlarda oluşan sert  $Al_3Ni$  parçacıkları abrazyon etkisi yaparak yüzeyler arasındaki yağ filminin yırtılmasına neden olduğu gibi karşı yüzeyin çizilmesine de yol açabilir. Yağ filminin yırtılması metal-metal temasını, karşı yüzeyin çizilmesi de harekete karşı direnci artırır. Her iki etki de sürtünme katsayısının artmasına yol açar. Sürtünme katsayısı

sürtünme kuvveti ile doğru orantılı olduğundan sürtünme kuvveti arttıkça sürtünme katsayısı artar. Sürtünme kuvvetinin artması sürtünme ısısının da artmasına yol açar. Bunun sonucunda da alaşımların sıcaklığında artma meydana gelir. Söz konusu alaşımlarda nikel oranının artması nikelce zengin metallere parçacıkların boyut ve yüzde oranını arttırmaktan başka bu parçacıkların yapı içerisindeki dağılım biçimlerini de etkilemektedir, Şekil 22-25. Önceden de belirtildiği gibi %1'den daha düşük oranlarda nikel içeren alaşımlarda oluşan nikelce zengin parçacıklar dendritlerarası bölgelerde toplanarak mukavemetin azalmasına yol açmaktadır. Mukavemetin azalması da bu alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının artmasına neden olmaktadır. Ancak nikel oranı arttıkça nikelce zengin parçacıkların dağılım biçiminde belirgin bir değişim meydana gelmektedir. Şöyle ki, %1'den daha yüksek oranlarda nikel içeren alaşımlardaki nikelce zengin parçacıkların hem dendritlerarası hem de dendritiçi bölgelerde yer aldıkları gözlemlendi, Şekil 24 ve 25. Nikelce zengin parçacıkların  $\alpha$  dendritleri içerisinde yer alması alaşımların matrisinin sertliğini arttırmaktadır. Başka bir deyişle alaşımların çekme dayanımı azalırken, sertliği artmaktadır. Matris sertliğinin artması nedeniyle %1'den daha yüksek oranlarda nikel içeren alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı artan nikel oranı ile azalmaktadır.

Basınç arttıkça bronz da dahil tüm alaşımların sürtünme katsayısının genelde azaldığı, sıcaklık ile aşınma ile meydana gelen hacim kaybının ise sürekli arttığı gözlemlendi, Şekil 43-45. Kaymalı yataklara ait Stribeck eğrisinde de görüldüğü gibi yağlı sistemlerin sürtünme katsayısı yalnız hidrodinamik yağlama devresinde artan basınçla azalır [75, 77]. Söz konusu alaşımlarla yapılan aşınma deneyleri sırasında hidrodinamik yağlama koşullarının oluştuğunu gösteren bu durum, yüzeyler arasındaki yağ filminin artan basınçla incelerek yağ içerisinde meydana gelen sürtünmenin azalmasından kaynaklanmış olabilir. Sıcaklıkta görülen artış, yüzeyler arasında özellikle rodaj döneminde meydana gelen sürtünme kuvvetinin artan basınçla artmasından kaynaklanmış olabilir. Aşınma ile meydana gelen hacim kaybının artması durumu ise, rodaj döneminde yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvvetine dayandırılarak açıklanabilir. Her ne kadar bu alaşımların sürtünme katsayısı kararlı rejim durumunda artan basınçla azalıyorsa, rodaj döneminde basınçla belirgin bir değişim sergilememektedir. Bu durum rodaj döneminde yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinin artan basınçla arttığını göstermektedir. Sürtünme kuvvetinin artması da temas eden yüzeyler arasındaki kesme kuvvetinin artması anlamına gelmektedir. Rodaj döneminde gerek metal-metal temasının, gerekse kesme kuvvetlerinin artan basınçla

artması bu döneminde alaşımlarda aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kaybının artmasına yol açabilir. Ölçülen aşınma kaybının büyük bir bölümünün rodaj döneminde meydana geldiği bilinmektedir. Buna göre basınç arttıkça rodaj döneminde meydana gelen aşınma kaybının artması beklenir. Bu nedenle basınç arttıkça alaşımlarda meydana gelen toplam aşınma kaybı artar. Nitekim basınç arttıkça alaşımların rodaj dönemindeki sıcaklığının artması ve yüzeylerinde oluşan sıvama tabakasının genişlemesi bu görüşü doğrulamaktadır, Şekil 68-71.

Alaşımların sürtünme katsayısının kayma hızı ile pek fazla değişmediği, ancak sıcaklığının artan kayma hızı ile arttığı görüldü, Şekil 46 ve 47. Bu alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının ise kayma hızı arttıkça önce azaldığı, 1-2 m/s'lik kayma hızı aralığında bir minimumdan geçtikten sonra tekrar arttığı gözlemlendi, Şekil 48. Alaşımların sürtünme katsayısında önemli bir değişimin gözlenmemesi artan kayma hızı ile yağın sıcaklığının artması sonucunda viskozitesinin azalmasından kaynaklanmış olabilir. Nitekim sıcaklık arttıkça yağın viskozitesinin düştüğü ve iç sürtünmenin azaldığı bilinmektedir [74, 75]. Yağın iç sürtünmesinin azalması hızın sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini dengeleyerek sürtünme katsayısının değişimini engellemiş olabilir. Alaşımların sıcaklığı ile bu alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının kayma hızına göre değişimleri çalışma sırasında ortaya çıkan merkezkaç kuvvetine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, diskin dönme hızı arttıkça disk üzerindeki yağa etki eden merkezkaç kuvveti de artar. Merkezkaç kuvvetinin artması disk yüzeyinden savrulan yağın miktarının artmasına neden olabilir. Bu durum da numune ile disk yüzeyi arasındaki yağ filmi kalınlığının azalmasına yol açar. Yağ filmi kalınlığının yüzeyleri birbirinden ayıracak değer altına düşmesi durumunda metal-metal teması meydana gelir. Kayma hızı arttıkça yüzeyler arasındaki metal-metal teması artar, bunun sonucunda da numune sıcaklığında sürekli artış meydana gelir. Yağlı sistemlerde aşınma ile meydana gelen hacim kaybının büyük bir bölümünün rodaj döneminde ortaya çıktığı bilinmektedir [10]. Bu dönemde meydana gelen metal-metal temasının artan hızla artması toplam hacim kaybının artmasına yol açar. Bu nedenle, kayma hızı arttıkça aşınma numunelerinde meydana gelen hacim kaybı da artar.

Diğer taraftan yağ debisi arttıkça alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklığı ile bu alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının azaldığı görüldü, Şekil 49-51. Alaşımlara ait söz konusu değerlerin artan yağ debisi ile azalması, yüzeyler arasında oluşan yağ filminin kalınlığına göre açıklanabilir. Bilindiği gibi, yağ debisi arttıkça yüzeyler arasında oluşan



yağ filminin kalınlığı artar. Yağ filmi kalınlığının artması da sürtünen yüzeyler arasındaki metal-metal temasını azaltmasına yol açar [79, 80]. Sürtünen yüzeyler arasındaki metal-metal teması azaldıkça hem sürtünme katsayısı hem sıcaklık hem de bu alaşımlarda meydana gelen hacim kaybı azalır.

Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlar içerisinde en üstün aşınma direncini Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımının sergilediği görüldü, Şekil 51. Bu durum söz konusu alaşımın iç yapı ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, bu alaşımın, dörtlü alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemete sahip olduğu ve iç yapısında bulunan ötektik silisyum parçacıklarının diğer alaşımlarda olduğundan daha homojen bir dağılım sergiledikleri gözlenmiştir. Bu gözlem söz konusu alaşımın ideal bir iç yapı ve üstün özelliklere sahip bir yatak malzemesi olduğunu göstermektedir. Bu durum da söz konusu alaşımın en üstün aşınma direnci sergilemesinin nedenlerini ortaya koymaktadır.

Al-40Zn esaslı alaşımların gerek dökülmüş, gerekse ısıl işlem görmüş durumdaki numunelerinin, aynı koşullarda aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzundan daha az hacim kaybı veya daha yüksek aşınma direnci sergilediği görüldü, Şekil 37, 45, 48 ve 51. Bu durum söz konusu alaşımların özellikleriyle bu alaşımlarda meydana gelen etkin aşınma mekanizmalarına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, SEM ile yapılan incelemeler sonucunda Al-40Zn esaslı alaşımlara ait aşınma numunelerinin yüzeylerinde belirgin sıvama tabakalarına rastlanırken, SAE 65 bronzuna ait aşınma numunelerinin yüzeylerinde derin çizikler ile az miktarda sıvama tabakaları gözlemlendi, Şekil 54-78. Bu bulgular Al-40Zn esaslı alaşımlarda adhezif aşınma mekanizmasının, SAE 65 bronzunda ise abrazif aşınma mekanizmasının daha etkin olduğunu göstermektedir. Bir başka deyişle Al-40Zn esaslı alaşımlardan aşınma sonucu kopan parçacıkların büyük bir kısmı tekrar yüzeye sıvanırken, SAE 65 bronzundan kopan parçacıkların büyük bir bölümü yüzeyden uzaklaşmaktadır. Ayrıca bu parçacıklar yüzeyden ayrılırken yüzeyin çizilmesine yol açmaktadır. Al-40Zn esaslı alaşımlardan kopan parçacıkların önemli bir bölümünün tekrar geriye sıvanması bu alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının azalmasına, SAE 65 bronzundan kopan parçacıkların çoğunun yüzeyden uzaklaşması ise söz konusu alaşımın hacim kaybının artmasına yol açabilir.

SEM ile yapılan incelemeler Al-40Zn esaslı alaşımlara ait numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvama tabakası ile çiziklerin yer aldığını gösterdi, Şekil 54-58, 60-65, 68-71 ve 76-78. Ancak, dökülmüş durumdaki alaşımlara ait numunelerin aşınma yüzeylerinde

sıvanma izlerine rastlanırken, ısıtıl işlem görmüş durumdaki numunelerin yüzeylerinde sıvanma belirtileriyle birlikte çiziklerin oluştuğu gözlemlendi, Şekil 66 ve 67. Bir başka deyişle dökülmüş durumdaki numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvanma ön plana çıkarken, ısıtıl işlem görmüş numunelerin yüzeylerinde sıvanmanın yanı sıra çizikler de belirgin bir görünüm sergilemektedir. Bu durum alaşımların dökülmüş ve ısıtıl işlem görmüş durumlardaki metalografik yapı ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Uygulanan ısıtıl işlemin alaşımların dendritik yapılarını kırarak sertlik ve mukavemetini artırdığı gözlemlenmiştir, Şekil 26, 27 ve Tablo 6. Alaşımların sertliğinin artması aşınan malzeme hacmini azaltırken, sert parçacıkların ( $\theta$ , Si ve  $Al_3Ni$ ) yapıdan kolay ayrılmasına yol açabilir. Yapıdan ayrılan sert parçacıklar gerek ayrılma, gerekse geri dönme sırasında numunelerin aşınma yüzeylerinin çizilmesine neden olabilir. Bu gözlemler dökülmüş durumdaki Al-40Zn esaslı alaşımların aşınmasında adhezyonun, ısıtıl işlem görmüş durumdaki alaşımların aşınmasında ise hem adhezyon hem de abrazyonun etkin mekanizmalar olduğunu göstermektedir. SAE 65 bronzuna ait aşınma numunelerinin yüzeyinde ise derin aşınma çizikleriyle az da olsa sıvanma belirtilerine rastlandı, Şekil 59, 72-75. Bu gözlem de söz konusu bronz için abrazyonun yanı sıra adhezyonun da etkin bir aşınma mekanizması olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan Al-40Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 bronzuna ait aşınma numunelerinin yüzeylerinde oluşan sıvanma bölgelerinin artan basınç ve kayma hızı ile genişlediği, çiziklerin ise derinleştiği görüldü, Şekil 68-78. Bu durum yağ filmi kalınlığının artan basınç ve kayma hızı ile azalması nedeniyle yüzeyler arasında meydana gelen metal-metal temasının artmasından kaynaklanmış olabilir [78-80].

## 5. SONUÇLAR

1. İkili Al-Zn alaşımlarının iç yapısı göbekli  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen ötektoid  $\alpha + \eta$  fazlarından oluşmaktadır. Üçlü Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımlarının iç yapısında ise bu alaşımlar için baz alınan ikili Al-40Zn alaşımının iç yapısını oluşturan fazlardan başka bakırca zengin  $\theta$  fazı yer almaktadır.
2. Dörtlü Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si ve Al-40Zn-3Cu-(0-3)Ni alaşımlarının iç yapılarında, bu alaşımlar için baz alınan Al-40Zn-3Cu alaşımının iç yapısını oluşturan fazlardan başka silisyum ve  $Al_3Ni$  parçacıkları bulunmaktadır.
3. Çözündürme ve yaşlandırma işlemi Al-40Zn esaslı alaşımların dendritik yapısını ortadan kaldırıp, bunların yerine çinkoca zengin çökeltiler içeren bir yapı oluşturmaktadır. Ancak silisyum parçacıkları ile bakır ve nikelce zengin fazlar bu ısıl işlemde etkilenmemektedir.
4. İkili Al-Zn esaslı alaşımların sertlik ve çekme dayanımı artan çinko oranı ile artarak %25 Zn oranında en yüksek değerlerine ulaşmakta ve bu oranın üzerindeki bileşimlerde ise azalmaktadır. Ancak %2 oranında bakır içeren Al-(10-50)Zn alaşımları içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemet değerleri Al-40Zn-2Cu alaşımından elde edilmiştir.
5. Al-40Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sertlik ve çekme dayanımları artan bakır oranı ile artmaktadır. Ancak, belirli bir oranın üzerindeki bakır katıları (%3) bu alaşımların çekme dayanımını olumsuz etkilemektedir. Bu alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı bunların çekme dayanımı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Nitekim bu alaşımlar içerisinde en üstün aşınma direncini en yüksek mukavemete sahip Al-40Zn-3Cu alaşımı sergilemektedir.
6. Silisyum katkısı Al-40Zn-3Cu alaşımlarının sertliğini artırmakta, ancak çekme mukavemetini düşürmektedir. Diğer taraftan Al-40Zn-3Cu-(0,25-5)Si alaşımlarının çekme dayanımı artan silisyum oranı ile artarak %2 silisyum oranında en yüksek değerine ulaştıktan sonra artan silisyum oranı ile azalmaktadır. Söz konusu alaşımların hacim kaybı ise çekme dayanımı ile ters orantılı bir değişim göstermektedir. Ayrıca, %1-4 oranları arasında silisyum içeren dörtlü alaşımlar bu alaşımlar için temel alınan üçlü Al-40Zn-3Cu alaşımından daha üstün aşınma direnci sergilemektedir.

7. Al-40Zn-3Cu-(0-3)Ni alaşımlarının çekme dayanımı ve kopma uzaması artan nikel oranı ile azalmaktadır. Ancak, %1 değerinden daha yüksek oranlarda nikel içeren dörtlü alaşımlar üçlü Al-40Zn-3Cu alaşımından daha üstün aşınma direnci sergilemektedir.
8. Çözündürme ve su verme sonrasında yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımlar dökülmüş durumdaki alaşımlardan daha üstün mekanik ve tribolojik özellikler sergilemektedir. Ancak, bu ısıl işlem alaşımların süneklik değerlerini düşürmektedir.
9. Basınç arttıkça incelenen alaşımların sürtünme katsayısı azalmakta, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri ise artmaktadır.
10. Kayma hızı arttıkça alaşımların sıcaklığı artmakta, ancak sürtünme katsayısı belirgin bir değişim göstermemektedir. Alaşımların hacim kaybı ise artan kayma hızı ile azalmakta, belirli bir hız (1-2 m/s) değerinden sonra ise artmaktadır.
11. Al-40Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri artan yağ debisi ile azalmaktadır.
12. Al-40Zn-3Cu-1Ni alaşımının 3 m/s'lik kayma hızındaki aşınma davranışı hariç, Al-40Zn esaslı tüm alaşımların denenen bütün çalışma koşullarında geleneksel bir yatak malzemesi olan SAE 65 bronzundan daha üstün aşınma direnci sergilediği belirlenmiştir.
13. Al-40Zn esaslı alaşımlarda adhezyonun, SAE 65 bronzunda ise hem abrazyon hem de adhezyon etkin aşınma mekanizmaları olduğu gözlenmiştir.

## 6. ÖNERİLER

1. Üçlü ve dördü Al-40Zn esaslı alaşımlar içerisinde en üstün mekanik ve tribolojik özellikler sergileyen alaşımlardan kaymalı yatak imal edilerek bunların statik ve dinamik yük altındaki tribolojik davranışları incelenebilir.
2. Al-40Zn esaslı alaşımların kuru ve yetersiz yağlama koşullarındaki tribolojik özellikleri incelenerek uygulamalarda karşılaşılan sorunlara çözüm üretilebilir.
3. Farklı ısı ve termomekanik işlemlerin Al-40Zn esaslı alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelenerek en uygun yapısal ve çalışma koşulları belirlenebilir.
4. Yeni alaşımlar geliştirmek amacıyla Cu, Si ve Ni içeren Al-40Zn esaslı üçlü, dördü ve beşli alaşımlar üretilerek bu alaşımların mekanik ve tribolojik özellikleri incelenebilir.
5. Döküm parametrelerinin Al-40Zn esaslı alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelenerek bu alaşımlar için en uygun döküm koşulları belirlenebilir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Savaşkan, T., The Structure and Properties of Zinc-Aluminum Based Bearings Alloys, Ph.D. Thesis, University of Aston Birmingham, 1980.
2. Murphy, S. ve Savaşkan, T., Comparative Wear Behaviour of Zn-Al Based Alloys in an Automotive Engine Application, Wear, 98 (1984) 151-161.
3. 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.
4. Altorfer, K., Zinc Alloys Compete With Bronze in Bearings and Bushings, Metall Progress, 122, 6 (1982) 29-31.
5. Calayag, T., ve Ferres, D., High-Performance, High-Aluminum Zinc Alloys for Low-Speed Bearings and Bushings, SAE Annual Conference, Paper No 820643, (1983) 2241-2251.
6. Wakefield, E.C., Copper-Aluminum-Zinc Alloy Excels in tough Conditions, Design Engineering, (1973) 1-4.
7. Risdon, T.J., Barnhurst, R.J. ve Mihalchuk, W.M., Comparative Wear Rate Evaluation of Zinc Aluminum (ZA) and Bronze Alloys through Block on Ring Testing and Field Applications, SAE Annual Conference, paper no 860064, (1986) 400-405.
8. Pürçek, G., Savaşkan, T., Küçükömeroğlu, T. ve Murphy, S., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Zinc-Based Alloys, Wear, 252 (2002) 894-901.
9. Delneuve, P., Tribological Behaviour of ZnAl Alloys (ZA27) Compared with Bronze When Used as a Bearing Material with High Load and very Low Speed, Wear, 105 (1985) 283-292.
10. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25 Al Based Alloys, Wear, 116 (1987) 221-224.
11. Calayag, T.S., The Practicality of Using Zinc-Aluminum Alloys for Friction-Type Bearings, 25<sup>th</sup> Annual Conference of Metallurgists, Aug. 1986, Toronto, Ontario, 305-313.
12. Presnyakov, A.A., Gorban, Y.A. ve Chrevyakova, V.V., The Aluminum-Zinc Phase Diagram, Russian Journal of Physical Chemistry, 35, 6 (1961) 632-633.
13. Goldak, G.R. ve Parr, J.G., A High-Temperature X-Ray-Diffractometer Study of the Zinc-Aluminum System in the Region 40-75 wt.-% Zinc, Journal of the Institute of Metals, 92 (1964) 230-233.



14. Douglass, D.L., Spinodal Decomposition in Al/Zn Alloys, Journal of Materials Science, 4 (1969) 130-136.
15. Anantharaman, T.R. ve Satyanarayana, K.G., The Metastable Solvus for Guinier-Preston Zones in Aluminum-Zinc Alloys, Acta Metallurgica, 7 (1973) 189-192.
16. Anantharaman, T.R., Ramaswamy, V. ve Butler, E.P., Effect of Matrix Precipitation on Cellular Growth Kinetics in an Al-28 at.% Zn Alloy, Journal of Materials Science, 9 (1974) 240-244.
17. Satyanarayana, K.G. ve Hirano, K., Metastable Solvus Curves and Structural Changes in Al-Zn Alloys, Trans. JIM, 18 (1977)403-410.
18. Savaşkan, T., Torul, O. ve Çuvalcı, H., Çinko-Alüminyum Alaşımlarının İyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, 5. Ulusal Metalurji Kongeresi, Ankara, Kasım 1988, Bildiriler Kitabı, Cilt II, 784-796.
19. Savaşkan, T., Aydın, M. ve Odabaşıoğlu, H.A., Fatigue Behaviour of Zn-Al Casting Alloys, Materials Science And Technology, 17 (2001) 682-685.
20. Mondal, D. P., Das, S. ve Rajput, V., Effect of Zinc Concentration and Experimental Parameters on High Stress Abrasive Wear Behaviour of Al-Zn Alloys: A Factorial Design Approach, Materials Science and Engineering A, 406 (2005), 24-33.
21. Zhu, Y. ve Murphy, S., A General Rule of Decomposition Reaction in Supersaturated Zn-Al Based Alloys, Chin. J. Met. Sci.Technol., 2 (1986) 105-116.
22. Zhu, Y., Phase Equilibria in Zn-Al-Cu-Si System at 285°C, Chin. J. Met. Sci.Technol., 5 (1989) 113-118.
23. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Decomposition of Zn-Al-Alloys on Quench-Aging, Materials Science and Technology, 6 (1990) 695-700.
24. Murphy, S., The Structure of the T' Phase in the System Al-Cu-Zn, Metal Science, 9 (1975) 163-168.
25. Murphy, S., Solid-Phase Reactions in the Low-Copper Part of the Al-Cu-Zn System, Zeitschrift Für Metallkunde, 71 (1980) 96-102.
26. Durman, M. ve Murphy, S., Precipitation of Metastable  $\epsilon$ -Phase in a Hypereutectic Zinc-Aluminum Alloy Containing Copper, Acta Metall.Mater., 39, 10 (1991) 2235-2242.
27. Zhu, Y.H. ve Goodwin, F.E., Microstructures of Thermomechanically Treated Eutectoid Zn-Al Alloy, J. Mater. Sci. Technol., 10 (1994).
28. Zhu, Y.H., Savaşkan, T. ve Murphy, S., Phase Transformations in Quench-Aged Zn-Al-Si Alloys, Mat. Res. Soc. Proc., 21 (1984) 835-840.

29. Zhu, Y.H., Yan, B. ve Huang, W., Bearing Wear Resistance of Monotectoid Zn-Al Based Alloy (ZA-35), Materials Science and Technology, 11 (1995) 109-113.
30. Zhu, Y.H., Murphy, S. ve Yeung, C., Early Stages of Phase Transformation in Quenched Zinc-Aluminum Based Alloys, Journal of Materials Processing Technology, 94 (1999) 78-84.
31. Mihaichuk, W., Zinc-Alloy Bearing Challenge the Bronzes, Machine Design, 53, 28 (1981) 133-137.
32. Gervais, E., Barnhurst, R.J. ve Loong, C.A., An Analysis of Selected Properties of ZA Alloys, Journal of Metals, 37, 11 (1985) 43-47.
33. Gervais, E., Levert, H. ve Bess, M., The Development of a Family of Zinc-Base Foundry Alloys, Trans. Am. Foundrym. Soc., 88 (1980) 183-194.
34. Prasad, B.K., Patwardhan, A.K. ve Yagneswaran, A.H., Influence of Aluminum Content on the Physical, Mechanical and Sliding Wear Properties of Zinc-Based Alloys, Zeitschrift Für Metallkunde, 88 (1997) 333-338.
35. Modi, O.P., Yadav, R.P., Prasad, B.K., Jha, A.K., Dasgupta, R. ve Dixit, G., Effects of Swaging and Aluminum Content on the Microstructure and Mechanical and Sliding Wear Properties of Zinc-Based Alloys, Materials Transactions, JIM., 39, 5 (1998) 582-586.
36. Durman, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Basınçlı Döküm Alaşımının %0-%30 Bileşim Aralığında Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi, 5. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, Nisan 1993, 177-191.
37. Savaşkan, T., Pürçek, G. ve Hekimoğlu, A.P., Effect of Copper Content on the Mechanical and Tribological Properties of ZnAl27-Based Alloys, Tribology Letters, 15, 3 (2003) 257-263.
38. Savaşkan, T., Hekimoğlu, A.P. ve Pürçek, G., Effect of Copper Content on the Mechanical and Sliding Wear Properties of Monotectoid-Based Zinc-Aluminium-Copper Alloys, Tribology International, 37 (2004) 45-50.
39. Savaşkan, T. ve Aydın, A., Effect of Silicon Content on the Mechanical and Tribological Properties Monotectoid-Based Zinc-Aluminium-Silicon Alloys, Wear, 257 (2004) 377-388.
40. Savaşkan, T. ve Bican, O., Effects of Silicon Content on the Microstructural Features and Mechanical and Sliding Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-(0-5)Si Alloys, Materials Science and Engineering A, 404 (2005) 259-269.
41. Savaşkan, T. ve Turhal, M.Ş., Relationships Between Cooling Rate, Copper Content and Mechanical properties of Monotectoid Based Zn-Al-Cu Alloys, Materials Characterization, 51 (2003) 259-270.

42. Lyon, R., Engineering Applications of ZA Alloys, Proc. Second Conference on Material Engineering, London, (1985) 221-227.
43. Lyon, R., The Properties and Applications of ZA Alloys, The British Foundry-man, (1986) 344-349.
44. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Creep Behaviour of Zn-Al-Cu Bearing Alloys, Zeitschrift Für Metallkunde, 74, 2 (1983) 76-82.
45. Murphy, S., Savaşkan, T. ve Hill, J., The Creep Kinetics of Zinc-Aluminium Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 25, 2 (1986) 145-150.
46. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Çinko-Alüminyum Esaslı Yatak Alaşımlarının Sürünme (Creep) Davranışlarının İncelenmesi, Metallurji Dergisi, 53 (1987) 15-23.
47. Savaşkan, T., Pürçek, G. ve Murphy, S., Sliding Wear of Cast Zinc-Based Alloy Bearing under Static and Dynamic Loading Conditions, Wear, 252 (2002) 693-703.
48. Prasad, B.J., Influence of Heat Treatment on the Physical, Mechanical and Tribological Properties of a Zinc-Based Alloy, Zeitschrift Für Metallkunde, 87 (1996) 226-232.
49. Prasad, B.K., Effects of Heat Treatment on The Partially Lubricated Sliding Wear Behaviour of a Zinc-Based Alloy, Materials Transactions, JIM., 40, 7 (1999) 578-585.
50. Prasad, B.K., Microstructural Alterations Through Heat Treatment and Its Influence on Wear Response of a Silicon Containing Zinc Based Alloy under Different Test Conditions, Materials Science and Technology, 19 (2003) 327-335.
51. Savaşkan, T., Turhal, M.Ş. ve Murphy, S., Effect of Cooling Rate on Structure and Mechanical Properties of Monotectoid Zinc-Aluminium Alloys, Materials Science and Technology, 19 (2003) 67-73.
52. Skanazi, A.F., Pelerin, J., Coutsouradis, D., Magnus, B. ve Meeus, M., Some Recent Developments in the Improvement of the Mechanical Properties of Zinc Foundry Alloys, Metallwissenschaft und Technik, 37, 9 (1983) 898-902.
53. Aydın, M. ve Savaşkan, T., Fatigue Properties of Zinc-Aluminium Alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl Solutions, International Journal of Fatigue, 26 (2004) 103-110.
54. Prasad, B.K., Microstructure, Mechanical Properties and Sliding Wear Characteristics of Zn-Based Alloys: Effects of Partially Substituting Cu by Si, Zeitschrift Für Metallkunde, 88 (1997) 929-933.
55. Prasad, B.K., Patwardhan, A.K. ve Yagneswaran, A.H., Tensile Properties of Some Zn-27.5 wt %Al Alloys as Influenced by Heat Treatment and Test Conditions, Journal of Materials Science Letters, 16 (1997) 1890-1893.

56. Prasad, B.K., Patwardhan, A.K. ve Yagneswaran, A.H., Microstructural Modifications through Compositional Alterations and Their Influence on the Mechanical and Sliding Wear Properties of Zinc-Based Alloys, Scripta Materialia, 37, 3 (1997) 323-328.
57. Prasad, B.K., Effects of Silicon Addition and Test Parameters on Sliding Wear Characteristics of Zinc-Based Alloy Containing 37,5% Aluminium, Materials Transactions, JIM., 38, 8 (1997)701-706.
58. Prasad, B.K., Tensile Properties of Some Zinc-Based Alloys Comprising 27.5% Al: Effects of Alloy Microstructure, Composition and Test Conditions, Materials Science and Engineering A, 245 (1998) 257-266.
59. Prasad, B.K., Effects of Partially Substituting Copper by Silicon on the Physical, Mechanical and Wear Properties of a Zn-37.5%Al-Based Alloy, Materials Characterization, 44 (2000) 301-308.
60. Prasad, B.K., Microstructure and Tensile Property Characterization of a Nickel-Containing Zinc-Based Alloy: Effect of Heat Treatment and Test Conditions, Materials Science and Engineering A, 277 (2000) 95-101.
61. Prasad, B.K., Effect of Microstructure on The Sliding Wear Performance of a Zn-Al-Ni Alloy, Wear, 240 (2000) 100-112.
62. Choudhury, P., Das, S. ve Datta, B.K., Effect of Ni on the Wear Behavior of a Zinc-Aluminum Alloy, Journal of Material Science, 37 (2002) 2103-2107.
63. Choudhury, P. ve Das, S., Effect of Nickel Aluminides on Tribological Behaviour of Zn-Al Alloy, Materials Science and Technology, 19 (2003) 535-537.
64. Prasad, B.K., The Effect of Heat Treatment on Sliding Wear Behaviour of a Zinc-Based Alloy Containing Nickel and Silicon, Tribology Letters, 15, 3 (2003) 333-341.
65. Prasad, B.K., Patwardhan, A.K. ve Yagneswaran, A.H., Influence of Heat Treatment Parameters on the Microstructure and Properties of some Zinc-Based Alloys, Journal of Material Science, 34 (1996) 6317-6324.
66. 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.
67. Zhu, Y. H., Phase Transformation of Eutectoid Zn-Al Alloys, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM Tongji University, China, 1994.
68. Douglass, D. L. ve Barbee, W., Spinodal Decomposition in Al/Zn Alloys, Journal of Materials Science, 4 (1969) 138-151.
69. Carpenter, G. J.C. ve Garwood, R. D., The Ageing of a Quenched Aluminium-22,5%Zinc Alloy, Metal Science Journal, 1 (1967) 202-211.

70. Douglass, D. L. ve Barbee, W., Spinodal Decomposition in Al/Zn Alloys, Journal of Materials Science, 4 (1969) 121-129.
71. Avner, S. H., Introduction to Physical Metallurgy, International Edition, Mc Graw-Hill Book Company, USA, 1974.
72. Dieter, G. E., Mechanical Metallurgy, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1976.
73. Bowdwen, F. P. ve Tabor, D., The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, Oxford, 2001.
74. Halling, J., Principles of Tribology, Macmillan Education Ltd., Great Britain, 1989.
75. Hutchings, I. M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold Publishers Ltd., Great Britain, 1992.
76. Rabinowicz, E., Friction and Wear of Materials, Jhon Willey and Sons. Inc., New York, 1995.
77. Barnhurst, R. J. ve Farge, J. C., A Study of the Bearing Characteristics of Zinc-Aluminium (ZA) Alloys, Canadian Metallurgical Quaterly, 27 (225-233) 1988.
78. Prasad, B.K., Patwardhan, A. K. ve Yegneswaran, A. H., Wear Characteristics of a Zinc-Based Alloy Compared with a Conventional Bearing Bronze under Mixed Lubrication Conditions: Effects of Material and Test Parameters, Canadian Metallurgical Quaterly, 40 (193-210) 2001.
79. Jain, L., Laufer, E. E. ve Masounave, J., Wear in Zn-Al-Si Alloys, Wear, 165 (1993) 51-56.
80. Gang, H. ve Ma, J., Friction and Wear of Al-Zn-Pb Bearing Alloy, Wear, 169 (1993) 201-207.

## ÖZGEÇMİŞ

Yasin ALEMDAĞ 1975 yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini aynı ilde tamamladı. 1996 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden Makina Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Yüksek lisans öğrenimine 2000 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamladı. 1997-2000 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dekanlığı'nın 50/d kadrosunda araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2000-2002 yılları arasında askerlik görevini yaptı. 2002 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Trabzon Meslek Yüksekokulu Teknik Programlar Bölümü'ne öğretim görevlisi olarak atandı. Halen bu görevi sürdürmekte olan Yasin ALEMDAĞ'ın yüksek lisans tezinden başka yayınlanmış bir adet bilimsel makalesi bulunmaktadır.