

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BAKIR VE SİLİSYUM İÇEREN Al-25Zn ESASLI ALAŞIMLARIN DÖKÜLMÜŞ
VE ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ DURUMLARDAKİ YAPISAL, MEKANİK VE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Osman BİCAN

**HAZİRAN 2010
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BAKIR VE SİLİSYUM İÇEREN Al-25Zn ESASLI ALAŞIMLARIN DÖKÜLMÜŞ
VE ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ DURUMLARDAKİ YAPISAL, MEKANİK VE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Mak. Yük. Müh. Osman BİCAN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“Doktor (Makina Mühendisliği)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18.05.2010
Tezin Savunma Tarihi : 16.06.2010**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Kaymalı yatak yapımında yaygın olarak kullanılan bronz, pirinç ve dökme demir gibi malzemelerin pahalı olması ve tribolojik özelliklerinin çoğu uygulamalar için yetersiz kalması nedeniyle bunların yerine çinko esaslı alaşımlar geliştirilmiştir. Ancak, bakır içeren çinko esaslı üçlü ve dörtlü alaşımlarda biri boyutsal kararsızlık, diğeri de düşük süneklik olmak üzere iki önemli sorunla karşılaşmıştır. Bu nedenle, çinko esaslı alaşımlar yerine alüminyum esaslı alaşımların geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmalar çinkonun alüminyum ile değiştirilmesinin boyutsal kararsızlık problemini büyük ölçüde giderebileceğini ve sünekliği önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermiştir. İkili Al-Zn alaşımları üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda Al-25Zn alaşımının en yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak Al-25Zn esaslı üçlü ve dörtlü alaşımların yapısal ve mekanik özellikleriyle tribolojik davranışlarının sistematik bir biçimde incelenmediği görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada Al-25Zn esaslı bir dizi alaşımın yapı ve mekanik özellikleri belirlendikten sonra farklı koşullardaki tribolojik davranışlarının incelenip bulunan sonuçların aynı koşullarda SAE 65 ve SAE 660 bronzlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak bu alaşımlar için en uygun kimyasal bileşim oranı ve ısıl işlem durumunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda Al-25Zn esaslı tüm alaşımların SAE 65 ve SAE 660 bronzlarından daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.

Tez danışmanlığımı üstlenerek çalışmaların yönlendirilmesindeki katkılarından dolayı hocam sayın Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarına katkıda bulunan Yrd. Doç. Dr. Yasin Alemdağ'a, Mak. Yük. Mühendisi Alipaşa HEKİMOĞLU'na, Arş. Gör. Zeki AZAKLI'ya ve Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Takım Tezgâhları Laboratuvarında görevli teknisyenlere teşekkür ederim. Ayrıca, bu çalışmayı mali yönden destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma boyunca manevi desteklerini benden esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Osman BİCAN
Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Alüminyum Esaslı İkili, Üçlü ve Dörtlü Alaşımın Faz Diyagramları.....	2
1.2.1. İkili Alüminyum-Çinko Faz Diyagramı.....	2
1.2.2. Üçlü Al-Zn-Cu Faz Diyagramı.....	3
1.2.3. Dörtlü Al-Zn-Cu-Si Faz Diyagramı.....	4
1.3. Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımın Özellikleri.....	5
1.3.1 Al-Zn Esaslı Alaşımın Fiziksel Özellikleri.....	5
1.3.2 Al-Zn Esaslı Alaşımın Mekanik Özellikleri.....	7
1.3.3 Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımın Tribolojik Özellikleri.....	10
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	11
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	13
2.1 Alaşımın Üretimi ve Kimyasal Analiz.....	13
2.2 Alaşımın Yapısal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.....	13
2.3 Isıl işlemler.....	14
2.4 Alaşımın Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi.....	14
2.5 Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi.....	17
3. BULGULAR.....	20
3.1. Alaşımın Kimyasal Bileşimleri.....	20
3.2. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular.....	21
3.3. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular.....	31
3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular.....	36
3.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular.....	76

4.	İRDELEME.....	96
5.	SONUÇLAR.....	107
6.	ÖNERİLER.....	109
7.	KAYNAKLAR.....	110
	ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Bu çalışmada bir adet ikili Al-25Zn, yedi adet üçlü Al-25Zn-(1-5)Cu ve altı adet Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımı kokil döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen alaşımların sürtünme ve aşınma davranışları farklı koşullarda çubuk-disk esaslı bir aşınma deney düzeneği yardımıyla incelendi. Bulunan sonuçlar bu alaşımların içyapı ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanarak, geleneksel yatak malzemeleri olan SAE 660 ve SAE 65 bronzlarında aynı koşullarda elde edilen bulgularla karşılaştırıldı.

Bu çalışmada baz olarak alınan ikili Al-25Zn alaşımının iç yapısının alüminyumca zengin α , bunları çevreleyen ötektoid $\alpha+\eta$ fazlarından oluştuğu gözlemlendi. Bu alaşıma bakır katıldığında dendritlerarası bölgelerde bakırca zengin θ fazının oluştuğu gözlemlendi. Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının içyapılarının ise üçlü alaşımlarda gözlenen fazlarla birlikte silisyum parçacıklarından oluştuğu görüldü. Uygulanan stabilizasyon işleminin Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının içyapısında herhangi bir değişime yol açmadığı, T7 ısıl işleminin ise bu alaşımın dendritik yapısını tamamen ortadan kaldırdığı gözlemlendi. Üçlü ve dörtlü alaşımların çekme ve basma dayanımlarının artan bakır ve silisyum oranları ile arttığı, bu oranların %3 değerinin üzerine çıkması durumunda ise azaldığı belirlendi. Ancak, söz konusu alaşımların sertliğinin artan bakır ve silisyum oranları ile sürekli arttığı görüldü. Alaşımların sürtünme katsayısının artan basınç ile azaldığı, kayma hızından ise pek fazla etkilenmediği gözlemlendi. Ancak, sıcaklık ve hacim kaybının artan basınç ve kayma hızıyla sürekli arttığı görüldü. Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarının aşınma yüzeylerinin altında iki farklı bölge oluştuğu gözlemlendi. Bu bölgelerin oluşumu numunelerin yüzey malzemesinin aşırı plastik deformasyonu ve yeniden kristalleşmesi ile aşınma parçacıklarının yüzeye sıvanmasına dayandırılarak açıklandı.

Al-25Zn esaslı üçlü ve dörtlü alaşımların SAE 65 ve SAE 660 bronzlarından daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olduğu belirlendi. Bu alaşımlar içerisinde en yüksek mukavemet ve aşınma dirençleri Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarından elde edildi.

Anahtar Kelimeler: Al-25Zn Esaslı Alaşımlar, Yapısal ve Mekanik Özellikler, Isıl İşlem, Test parametreleri, Sürtünme ve Aşınma

SUMMARY

Investigation of Microstructure and Mechanical and Tribological Properties of Al-25Zn Based Alloys Containing Copper and Silicon in the As-cast and Heat-treated Conditions

In this study, one binary Al-25Zn, seven Al-25Zn-(1-5)Cu and six ternary Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alloys were prepared by permanent mould casting. Their friction and wear behaviour were investigated under different test conditions using a pin-on-disc machine. The results obtained from the tests were discussed in terms of structure and mechanical properties of the alloys and compared to those obtained from SAE 65 and SAE 660 conventional bearing bronzes.

The microstructure of the binary Al-25Zn alloy consisted of aluminum-rich α dendrites surrounded by eutectoid $\alpha + \eta$ phase. Addition of copper to this alloy produced intermetallic θ particles mainly in the interdendritic channels. The microstructure of the quaternary Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alloys revealed silicon particles, in addition to the phases observed in the ternary alloy. The stabilization treatment showed no significant effect on the microstructure of the Al-25Zn-3Cu-3Si alloy, but the T7 heat treatment removed its dendritic microstructure. The tensile and compressive strengths of the alloys increased with increasing copper and silicon contents up to 3%, above which the trend reversed. However, the hardness of the ternary and quaternary alloys increased continuously with increasing copper and silicon contents. The friction coefficient of the alloys decreased with increasing pressure, but the sliding speed had no significant effect on it. However, the temperature and wear volume of the alloys increased with increasing pressure and sliding speed. Two different regions were observed underneath the wear surface of the Al-25Zn-3Cu and Al-25Zn-3Cu-3Si alloys. The formation of them was related to the microstructural changes resulted from heavy plastic deformation and recrystallization of the surface material and smearing of wear particles.

The Al-25 based ternary and quaternary alloys were found to be much superior to the SAE 65 and 660 bronzes as far as their mechanical and tribological properties are concerned. In addition, among the ternary and quaternary alloys the highest strength and wear resistance were obtained with Al-25Zn-3Cu and Al-25Zn-3Cu-3Si alloys, respectively.

Key Words: Al-25Zn Based Alloys, Microstructural and Mechanical Properties, Heat treatment, Test Parameters, Friction and Wear.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İkili alüminyum-çinko faz diyagramı	2
Şekil 2. Üçlü Al-Zn-Cu alaşım sisteminin 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti.....	4
Şekil 3. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri.....	5
Şekil 4. Al-(10-50)Zn alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve yoğunluk değerlerinin çinko oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	8
Şekil 5. Aşınma deney düzeneğinin kesit resmi (önden görünüm).....	17
Şekil 6. Aşınma deney düzeneğinin kesit resmi (üstten görünüm).....	17
Şekil 7. Aşınma deney düzeneğinin fotoğrafı.....	18
Şekil 8. Aşınma deney düzeneğinde diskin, numune, numune tutucusunun yakından görünümü.....	18
Şekil 9. Sürtünme kuvvetinin ölçümünde kullanılan yük hücresine (S50) ait kalibrasyon doğrusu.....	19
Şekil 10. Alaşımların sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan numunenin teknik resmi.....	19
Şekil 11. Al-25Zn alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	22
Şekil 12. Al-25Zn-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	22
Şekil 13. Al-25Zn-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	23
Şekil 14. Al-25Zn-2,5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	23
Şekil 15. Al-25Zn-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	24
Şekil 16. Al-25Zn-3,5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	24
Şekil 17. Al-25Zn-4Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	25
Şekil 18. Al-25Zn-5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	25
Şekil 19. Al-25Zn-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	26
Şekil 20. Al-25Zn-3Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	26
Şekil 21. Al-25Zn-3Cu-2,5Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	27
Şekil 22. Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	27
Şekil 23. Al-25Zn-3Cu-4Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	28
Şekil 24. Al-25Zn-3Cu-5Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	28
Şekil 25. Stabilizasyon işlemine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının içyapısı	29
Şekil 26. T7 ısıl işlemi sonrası Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında oluşan içyapı	29

Şekil 27. SAE 65 bronzunun içyapısı.....	30
Şekil 28. SAE 660 bronzunun içyapısı.....	30
Şekil 29. Al-25Zn-(0-5)Cu alaşımlarının, (a) sertlik, mikrosertlik, çekme ve basma dayanımları ile (b) darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	33
Şekil 30. Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının (a) sertlik, mikrosertlik, çekme ve basma dayanımları ile (b) darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	34
Şekil 31. Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarının sertlik ve boyut değişimi değerlerinin stabilizasyon süresine göre değişimlerini gösteren eğriler.....	35
Şekil 32. Çözündürme ve su verme işlemi sonrasında yaşlandırma işlemine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri.....	35
Şekil 33. Yağsız durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	37
Şekil 34. Yağsız durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	37
Şekil 35. Yağsız durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	38
Şekil 36. Yağsız durumda Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin bakır oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	38
Şekil 37. Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	39
Şekil 38. Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	39
Şekil 39. Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	40
Şekil 40. Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	40
Şekil 41. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	44
Şekil 42. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının çalışma sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	44
Şekil 43. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	45
Şekil 44. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	45

Şekil 45. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının çalışma sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	46
Şekil 46. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	46
Şekil 47. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan T7 ısıtma işlemi görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	47
Şekil 48. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan T7 ısıtma işlemi görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	47
Şekil 49. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan T7 ısıtma işlemi görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	48
Şekil 50. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan stabilize edilmiş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	48
Şekil 51. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan stabilize edilmiş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	49
Şekil 52. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan stabilize edilmiş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	49
Şekil 53. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	50
Şekil 54. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	50
Şekil 55. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	51
Şekil 56. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	51
Şekil 57. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	52
Şekil 58. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	52
Şekil 59. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının sürtünme katsayısının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	53
Şekil 60. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının çalışma sıcaklığının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	53

Şekil 61. Yağsız (kuru) durumda ve farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımında meydana gelen hacim kaybının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.....	54
Şekil 62. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sürtünme katsayısının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	54
Şekil 63. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının çalışma sıcaklığının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	55
Şekil 64. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	55
Şekil 65. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	56
Şekil 66. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklığının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	56
Şekil 67. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	57
Şekil 68. Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	58
Şekil 69. Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	58
Şekil 70. Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler...	59
Şekil 71. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	60
Şekil 72. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sıcaklıklarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	60
Şekil 73. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarında meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	61
Şekil 74. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.	61
Şekil 75. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	62
Şekil 76. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarında meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler...	62
Şekil 77. Yağlı şartlarda Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin bakır oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	63
Şekil 78. Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının yağlı durumdaki sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	63

Şekil 79. Al-25Zn esaslı alaşımların ve SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler.....	66
Şekil 80. Al-25Zn esaslı alaşımların ve SAE 65 ve 660 bronzlarının sıcaklıklarının yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler.....	66
Şekil 81. Al-25Zn esaslı alaşımlarda ve SAE 65 ve SAE 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler.	67
Şekil 82. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının uygulanan basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	69
Şekil 83. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 ve 660 bronzlarının çalışma sıcaklıklarının uygulanan basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	69
Şekil 84. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 ve 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının uygulanan basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	70
Şekil 85. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.....	72
Şekil 86. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 ve 660 bronzlarının çalışma sıcaklıklarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.....	72
Şekil 87. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 ve 660 bronzlarında 30 km'lik kayma yolu sonunda meydana gelen hacim kaybının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.....	73
Şekil 88. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 ve 660 bronzlarından 6 MPa'lık basınç, 2 m/s'lik kayma hızı ve 1 cm ³ /saatlik yağ debisinde elde edilen sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	74
Şekil 89. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve SAE 65 ve 660 bronzlarından 6 MPa'lık basınç, 2 m/s'lik kayma hızı ve 1 cm ³ /saatlik yağ debisinde elde edilen çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	74
Şekil 90. 6 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saatlik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarında meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	75
Şekil 91. Al-25Zn-3Cu alaşımına ait bir aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü.....	77
Şekil 92. SAE 65 bronzuna ait bir aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü.....	77
Şekil 93. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-1Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	78
Şekil 94. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	78

Şekil 95. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-5Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	79
Şekil 96. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-1Si alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	79
Şekil 97. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	80
Şekil 98. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-5Si alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	80
Şekil 99. Yağsız durumda 0,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	81
Şekil 100. Yağsız durumda 2,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	81
Şekil 101. Yağsız durumda 0,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin 500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	82
Şekil 102. Yağsız durumda 2,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin 500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	82
Şekil 103. 6 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 108 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	83
Şekil 104. 6 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 108 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	83
Şekil 105. 6 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan T7 ısıl işlemi görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 108 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	84
Şekil 106. 6 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 108 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	84
Şekil 107. 4 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	85
Şekil 108. 8 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	86

Şekil 109.4 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	86
Şekil 110.8 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	87
Şekil 111.6 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	87
Şekil 112.6 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 3 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	88
Şekil 113. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-25Zn-3Cu alaşımına ait aşınma numunesinin yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimleri gösteren SEM mikrografı.....	89
Şekil 114. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	89
Şekil 115. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan T7 ısıtılmış Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	90
Şekil 116. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	90
Şekil 117. 1,5 MPa basınç ve 1 m/s kayma hızında kuru sürtünme deneyine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlara ait numunelerin mikrosertliklerinin aşınma yüzeyinden itibaren artan derinliğe göre değişimini gösteren eğriler.....	91
Şekil 118. Yağsız durumda 0,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 500 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü....	92
Şekil 119. 2,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 500 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	92
Şekil 120. Yağsız durumda 0,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 500 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan T7 ısıtılmış Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	93

- Şekil 121. 2,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T7 ısıtılmış Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma yönüne paralel kesitinin 500 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü..... 93
- Şekil 122. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 0,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma yönüne paralel kesitinin 500 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü..... 94
- Şekil 123. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyine paralel kesitinin 500 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü..... 94
- Şekil 124. Farklı basınçlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımına ait aşınma numunelerinin kayma yönüne paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin yüzeyden itibaren artan derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler..... 95

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri	3
Tablo 2. Al-Zn-Cu alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri	4
Tablo 3. Çinko esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri.....	6
Tablo 4. Çinko esaslı bazı ticari alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellikleri.....	9
Tablo 5. Sürtünme ve aşınma deneylerine ilişkin koşullar	16
Tablo 6. Al-25Zn esaslı alaşımların kimyasal bileşimleri.....	20
Tablo 7. SAE 65 ve 660 bronzlarının kimyasal bileşimleri.....	20
Tablo 8. Al-25Zn-(0-5)Cu ve Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının sertlik, mikrosertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, kopma uzaması ve yoğunluk değerleri.....	32
Tablo 9. Yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında deneye tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayıları.....	41
Tablo 10. Yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında deneye tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının çalışma sıcaklıkları.....	42
Tablo 11. Yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında deneye tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının değerleri.....	43
Tablo 12. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayıları.....	64
Tablo 13. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürekli rejim durumundaki çalışma sıcaklıkları.....	65
Tablo 14. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları.....	65
Tablo 15. Farklı basınçlarda deneye tabi tutulan alaşımların sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayıları.....	67
Tablo 16. Farklı basınçlarda deneye tabi tutulan alaşımların sürekli rejim durumundaki çalışma sıcaklıkları.....	68
Tablo 17. Farklı basınçlarda deneye tabi tutulan alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları.....	68

Tablo 18. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış ve ısıtılmış görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayıları.....	70
Tablo 19. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış ve ısıtılmış görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının sürekli rejim durumundaki çalışma sıcaklıkları.....	71
Tablo 20. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış ve ısıtılmış görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları.....	71
Tablo 21. Sürtünme ve aşınma deneylerine tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarında meydana gelen hacim kaybı değerleri.....	75

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

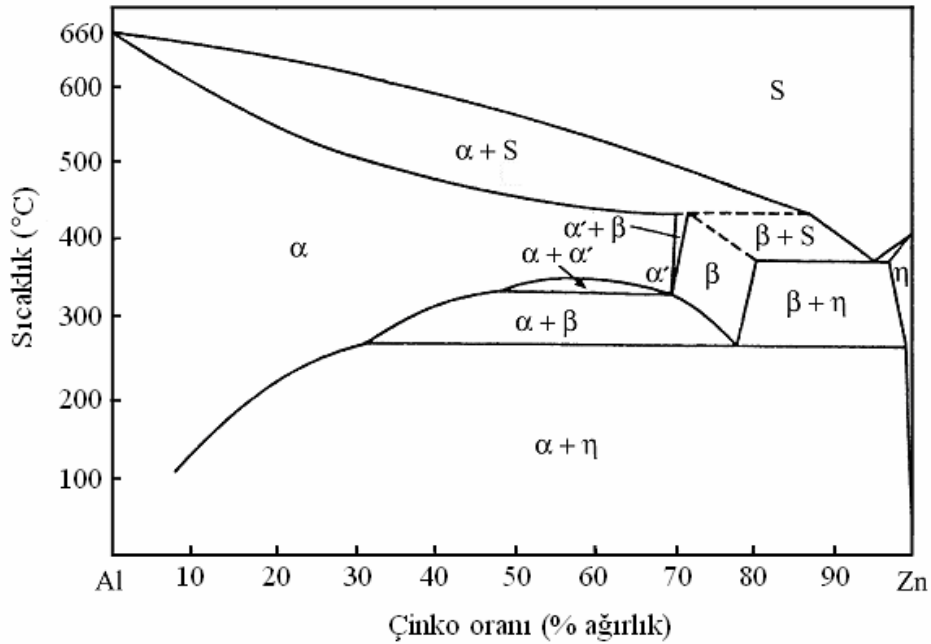
İkinci Dünya Savaşı sırasında geleneksel yatak malzemesi tedarikinde karşılaşılan zorluklar nedeniyle kaymalı yatak üretiminde kullanılmak üzere çinko-alüminyum-bakır alaşımları üretilmiştir [1-6]. Savaş sonrası dönemde söz konusu alaşımların geliştirilmesine yönelik araştırma çalışmaları artan bir hızla sürdürülmüş ve sonuçta ALZEN 305, ZA-5, ZA-8, ZA-12, ZA-27, Zn-40Al-2Cu-2Si ve Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımları geliştirilmiştir [7-15]. Yapılan çalışmalar sonucunda çinko esaslı üçlü ve dördü alaşımların bronz ve dökme demir gibi geleneksel yatak alaşımlarından daha yüksek aşınma direnci sergiledikleri gözlenmiştir [16-25]. Bu alaşımlar içerisinde en üstün mekanik ve tribolojik özellikler monotektoid (Zn-40Al) esaslı Zn-40Al-2Cu, Zn-40Al-2Si ve Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımlarından elde edilmiştir [26-31]. Ancak, bütün bu üstünlüklerin yanı sıra bakır içeren çinko esaslı üçlü ve dördü alaşımlarda iki önemli sorunla karşılaşmıştır. Bunlardan biri boyutsal kararsızlık, diğeri de düşük sünekliktir. Boyutsal kararsızlık problemi döküm sırasında oluşan metastabil ϵ (CuZn_4) fazının kullanım sırasında dördü faz reaksiyonu ($\epsilon + \alpha \rightleftharpoons \text{T}' + \eta$) sonucunda dönüşüme uğramasından, yetersiz süneklik ise çinko ve bakırca zengin fazların gevrek davranış sergilemelerinden kaynaklanmaktadır [32-36]. Bu sorunları gidermek veya en aza indirmek amacıyla çeşitli element katkılarının yanı sıra farklı ısıl işlemler denenmiş, ancak istenen başarı elde edilememiştir [20-36]. Bu nedenle, çinko esaslı alaşımların yerine alüminyum esaslı alaşımlar üretilerek bunların özelliklerinin incelenmesi yoluna gidilmiştir [36-38]. Bu çalışmalar sonucunda geliştirilen Al-40Zn-3Cu ve Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımların gerek çinko esaslı alaşımlara gerekse geleneksel bir yatak malzemesi olan SAE 65 bronzuna göre daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere (düşük sürtünme katsayısı ve sıcaklık, yüksek aşınma direnci) sahip olduğu belirlenmiştir [36-38]. Diğ taraftan alüminyum oranı arttıkça bu alaşımların yoğunluğunun düştüğü, özgül mukavemetinin (mukavemet/yoğunluk) ise arttığı gözlenmiştir [36-38]. Ayrıca, yapılan bu çalışmalar çinkonun alüminyum ile yer değiştirmesinin boyutsal kararsızlık problemini büyük ölçüde giderebileceğini ve sünekliği önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermiştir. Diğ taraftan ikili Al-Zn alaşımları içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemet değerleri %25 oranında Zn içeren alaşımdan elde edilmiştir [39]. Bu nedenle Al-25Zn esaslı bakır ve

silisyum içeren üçlü ve dörtlü yeni alaşımların geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. Ancak, yapılan literatür araştırması sonucunda Al-25Zn esaslı üçlü ve dörtlü alaşımların yapı ve özelliklerinin incelenmediği görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada Al-25Zn esaslı bir dizi alaşım üretilip bunların yapı ve mekanik özellikleri belirlendikten sonra farklı deney koşullarındaki tribolojik davranışlarının incelenmesi ve bulunan sonuçların aynı koşullarda deneye tabi tutulan SAE 65 ve SAE 660 bronzlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması amaçlanmıştır.

1.2. Alüminyum Esaslı İkili, Üçlü ve Dörtlü Alaşımların Faz Diyagramları

1.2.1. İkili Alüminyum-Çinko Faz Diyagramı

İkili çinko-alüminyum faz diyagramı Şekil 1’de verilmiştir. Bu diyagramda yer alan α alüminyumca zengin faz bölgesini, η ise çinkoca zengin faz bölgesini göstermektedir [1,16,32,40,43-45]. Bu diyagramda görüldüğü gibi alüminyum içerisindeki çinko katı çözültüsü %83 Zn oranına kadar uzanarak α , α' ve β olarak adlandırılan farklı faz bölgeleri oluşturmaktadır. Sözü edilen α ve α' fazlarının kafes parametrelerinin birbirine çok yakın olması nedeniyle bu fazlar arasındaki sınır tam olarak belirlenememiştir. Yavaş soğutma sonucunda bu fazlar kararlı çinko ve alüminyum fazlarına dönüşmektedir [32-36].



Şekil 1. İkili alüminyum-çinko faz diyagramı [1,16].

Al-Zn faz diyagramında 382°C sıcaklık ve %95 Zn oranında ötektik dönüşüm meydana gelmektedir. Ötektik dönüşüm sonucunda yüzey merkezli kübik (YMK) yapılı β ile sıkı düzenli hegzagonal yapıya sahip η fazlarını içeren bir içyapı oluşmaktadır [31-36]. Ayrıca, alüminyumun η fazı içindeki katı çözünürlüğü azalan sıcaklıkla azalmakta ve 20°C sıcaklıkta %0,05 Al oranına kadar düşmektedir. Bu diyagramda yer alan β fazı ise, 276°C sıcaklıkta %22 Al oranında meydana gelen ötektoid reaksiyon sonucunda α ve η fazlarına dönüşmektedir [31-36].

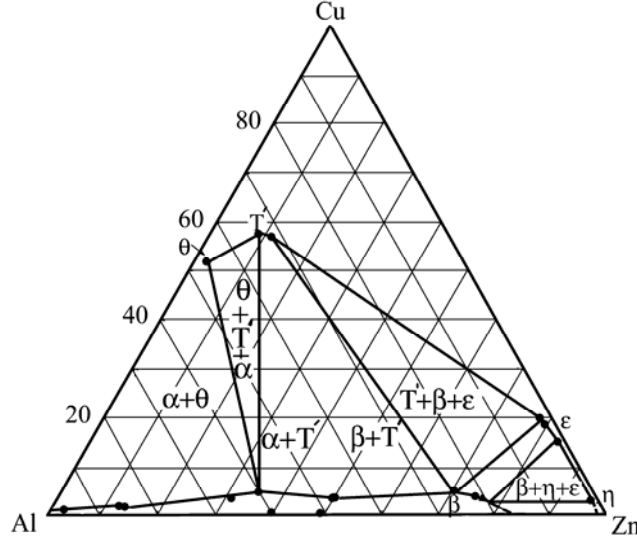
İkili alüminyum-çinko alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri, kimyasal bileşim oranı ve sıcaklık değerleri ile birlikte Tablo 1’de verilmiştir.

1.2.2. Üçlü Al-Zn-Cu Faz Diyagramı

Üçlü Al-Zn-Cu faz diyagramı henüz tam olarak belirlenememiş olmakla birlikte, bu diyagramın bakır oranı düşük olan kısmı Murphy [33] tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Al-Zn-Cu faz diyagramının 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti Şekil 2’de, bu sistemde meydana gelen katı hal dönüşümleri de Tablo 2’de verilmiştir. Bu tabloda yer alan α alüminyumca zengin, η çinkoca zengin fazları; ε (CuZn_4), θ (CuAl_2) ve T' ($\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$) de bu alaşımlarda oluşan metaller arası bileşikleridir [1,33]. Yapılan incelemeler sonucunda ε bileşiğinin yarı kararlı (metastabil), θ ve T' bileşiklerinin ise kararlı yapıya sahip oldukları görülmüştür [31-33].

Tablo 1. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [31-36].

Dönüşüm	Dönüşüm formülü	Dönüşüm noktası	
		Alüminyum oranı (%)	Sıcaklık (°C)
Ötektik	$S \rightleftharpoons \beta + \eta$	5	382
Ötektoid	$\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	22	276
Peritektik	$\alpha + S \rightleftharpoons \beta$	28	443
Monotektoid	$\alpha/\alpha' \rightleftharpoons \alpha + \beta$	40	340



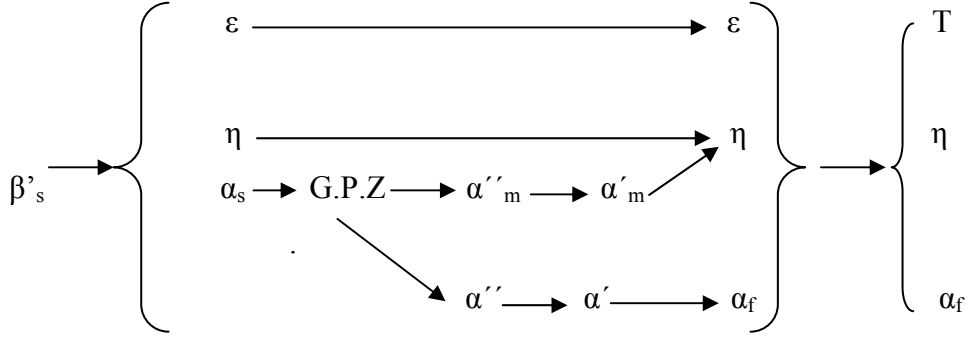
Şekil 2. Üçlü Al-Zn-Cu alaşım sisteminin 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti [1,33].

Tablo 2. Al-Zn-Cu alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri [33].

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

1.2.3. Dörtlü Al-Zn-Cu-Si Faz Diyagramı

Dörtlü Al-Zn-Cu-Si faz diyagramı henüz tam olarak belirlenememiştir. Ancak bu sistemdeki bazı faz dönüşümleri Zhu ve arkadaşları [34,46] tarafından incelenmiştir. Silisyumun, çinko-alüminyum matrisi içerisindeki çözünürlüğünün çok az olması nedeniyle bu alaşımlarda meydana gelen faz dönüşümlerini belirgin bir şekilde etkilemediği görülmüştür [34,46,47]. Çözündürme ve su verme işlemlerinden sonra yaşlandırılan Zn-20Al-3Cu-2Si alaşımında meydana gelen faz dönüşümleri Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [34,46,47].

Şekil 3’de görüldüğü gibi, su verme işlemi sonunda elde edilen aşırı doymuş α_s katı çözeltilisinin yaşlandırılması sırasında önce Guiner-Preston bölgeleri (GPZ) oluşmakta ve bunu α''_m , α'_m , α'' , α' sembolleriyle gösterilen geçiş fazlarının oluşumu izlemekte ve bu fazlar da sonunda çinkoca zengin η ve alüminyumca zengin α_f fazlarına dönüşmektedir.

Silisyum parçacıklarının büyüklüğü ve alaşım içerisindeki dağılımlarının silisyum oranına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir [11,36-38]. Yapılan araştırmalar Zn-40Al ve Al-40Zn-Cu esaslı alaşımlarda silisyum oranının %2’nin altında olması durumunda, silisyum parçacıklarının içyapıda homojen olarak dağıldıklarını, %2’nin üzerine çıkılması durumunda ise hem büyüdükleri hem de farklı bölgelerde toplanarak kümeleştiklerini göstermiştir [11,12, 36-38].

1.3. Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımların Özellikleri

1.3.1. Al-Zn Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri

İkili alüminyum-çinko alaşımlarının ergime sıcaklığı ve katılma aralığı ilgili faz diyagramında da görüldüğü gibi alüminyum oranına bağlı olarak değişmektedir [1,16,48-52]. Alüminyum oranı arttıkça alaşımların katılma aralığı daralmakta, ergime noktası ise yükselmektedir [1,16,48,52].

Alüminyum-çinko esaslı alaşımlar, geleneksel yatak alaşımlarına kıyasla daha yüksek ısı iletkenlik ve elektriksel iletkenlik katsayılarına sahiptirler ve bu değerler artan alüminyum oranı ile artmaktadır [53-57]. Bu alaşımların yoğunlukları ise, artan alüminyum oranı ile azalmaktadır. Tablo 3’de çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri [53-57].

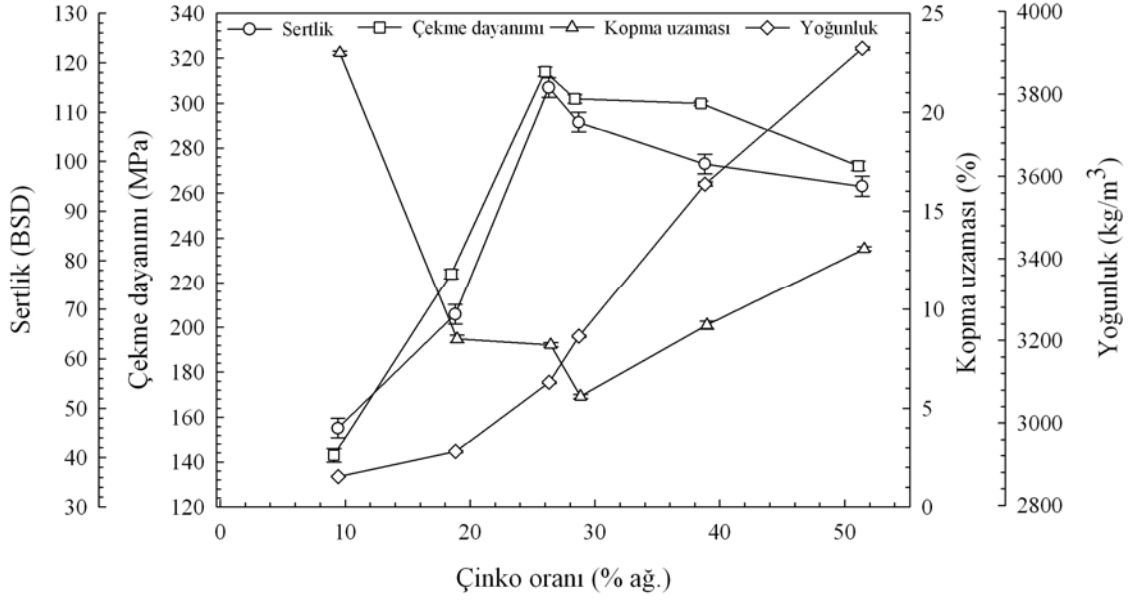
Alaşım	Fiziksel Özellikler					
	Yoğunluk (kg/m ³)	Katılaşma aralığı (°C)	Isıl genleşme katsayısı (µm/m°C)	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m°C)	Elektriksel iletkenlik katsayısı (%IACS)	
Zamak 3	6660	387-381	27,4	113	27	
Zamak 5	6700	386-380	27,4	109	26	
Zamak 7	6600	387-381	27,4	113	27	
ZA-8	6300	404-375	23,3	115	28	
ZA-12	6000	432-377	24,2	116	28	
ZA-27	5000	484-376	26,0	126	30	
SAE-40 pirinci	8500	1010-855	18	72	15	
SAE 660 bronz	8910	975-855	18	59	12	
Kır dökme demir	7300	1260-1090	11,9	45	6	

1.3.2 Al-Zn Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

İkili alüminyum-çinko alaşımlarının mekanik özelliklerinin alüminyum oranına çok duyarlı olduğu bilinmektedir [56-58]. Nitekim yapılan araştırmalar monotektoid bileşime sahip ikili alaşımın (Zn-40Al) gerek ötektik (Zn-5Al), gerekse ötektoid (Zn-22Al) bileşime sahip alaşımlardan çok daha yüksek sertlik ve mukavemete sahip olduğunu göstermiştir [11,12,26-31,56-58]. Bu durum monotektoid alaşımlarda gerek katılaşma gerekse yaşlandırma sırasında meydana gelen spinodial dönüşüm ile oluşan metastabil geçiş fazlarının α matrisinin kafes yapısını distorsiyona uğratmasından kaynaklanmaktadır [59,60].

Dökülmüş durumdaki çinko-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin ikincil dendrit kol aralığına bağlı olduğu ve ortalama kol aralığının azalmasıyla sertlik ve mukavemet değerlerinin arttığı gözlenmiştir [61,62]. Bu alaşımların kırılma tokluğu geleneksel malzemelerin söz konusu değerlerinden daha düşüktür, ancak bu değer artan alüminyum oranı ile artmaktadır [61,62].

Savaşkan ve Alemdağ [39] tarafından yapılan bir çalışmada ikili Al-(10-50)Zn alaşımlarının sertlik ve çekme dayanımının artan çinko oranı ile artarak %25 Zn oranında en yüksek değerine ulaştığı ve bu değer üzerinde ise azaldığı görülmüştür, Şekil 4. Bu durum söz konusu alaşımlarda meydana gelen katı çözümlü sertleşmesi mekanizmasına dayandırılarak açıklanmaktadır [36-38]. 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 [41,42]. Alüminyum-çinko alaşımlarının süneklik değerleri artan çinko oranı ile azalmakta, yaklaşık olarak %30 çinko değerinde en düşük değerini aldıktan sonra tekrar artmaktadır [39]. Ancak ikili alüminyum-çinko alaşımlarının sertlik, mukavemet, korozyon ve aşınma dirençlerinin pek çok uygulama için yeterli olmadığı bilinmektedir. Bu yetersizliği gidermek için bu alaşımlara bakır, silisyum, nikel, magnezyum ve mangan gibi elementler katılmaktadır [1,11,12,29,30,36-38]. Yapılan araştırmalar söz konusu alaşımların mekanik özelliklerinin yanı sıra korozyon özelliklerini iyileştirmede en etkin alaşım elementinin bakır olduğunu göstermiştir [11,12,20,21,36-38]. Tablo 4'de dökülmüş durumdaki alüminyum-çinko esaslı alaşımlar ile bazı geleneksel yatak alaşımlarının mekanik özellikleri verilmiştir.



Şekil 4. Al-(10-50)Zn alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve yoğunluk değerlerinin çinko oranına göre değişimini gösteren eğriler [39].

Alüminyum-çinko esaslı alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmek için uygulanan diğer bir yöntem de ısıl işlemdir. Kararlı içyapılar elde etmek için dökülmüş durumda ki alaşımlara uygulanan stabilizasyon işlemi bu alaşımların sertlik ve mukavemetini düşürdüğü gibi, dendritik yapılarını da ortadan kaldıramamaktadır. Bu nedenle hem homojen ve kararlı bir içyapı elde etmek hem de sertlik ve mukavemeti artırmak amacıyla söz konusu alaşımlar çözündürme ve su verme işlemlerinden sonra doğal veya yapay (T6, T7 ve T9) olarak yaşlandırılmaktadır [63-66]. Alaşımların sertlik ve mukavemetinde, su verme sonrası uygulanan yaşlandırma işlemi sırasında meydana gelen artış çökeltme sertleşmesi mekanizmasına, stabilizasyon sırasında meydana gelen azalma ise yapı içerisindeki kalıntı gerilmelerin giderilmesine ve katılaşma sonucunda oluşan metastabil fazların kararlı fazlara dönüşmesine dayandırılarak açıklanmaktadır [12,63-66].

Tablo 4. Çinko esaslı bazı ticari alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellikleri [5,9,10].

Alaşım	Mekanik Özellikler						
	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Sertlik (BSD)	Yorulma dayanımı (MPa)	Darbe dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)	
Zamak 3	283	10	82	48	58	-	
Zamak 5	331	7	91	56	65	-	
Zamak 7	283	13	80	47	58	-	
ZA-8	221-255	1-2	80-90	103	20	12,4	
ZA-12	310-345	1-3	90-105	103	25	12	
ZA-27	400-440	3-6	110-120	117	47	10,9	
SAE-40 pirinci	255	30	60	76	15	12	
SAE 660 bronz	270	11	81	90	15	11,5	
Kır dökme demir	214	10	210	97	54	13-16,4	

1.3.3. Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri

Yapılan araştırmalar alüminyum-çinko esaslı üçlü Al-Zn-Cu ve dördü Al-Zn-Cu-Si ve Al-Zn-Cu-Ni alaşımların geleneksel kaymalı yatak alaşımlarından çok daha üstün tribolojik özelliklere sahip olduklarını göstermiştir [1-3,7,9,22,27,32,38,67-82]. Bu durum söz konusu alaşımların içyapıları ile yüzeylerinde oluşan oksit filmlerine dayandırılarak açıklanmaktadır [14,21,25,29,36-38,83]. Üçlü alaşımların içyapıları alüminyumca zengin α dendritleri ile bunları çevreleyen ötektoid $\alpha + \eta$ faz karışımı ve θ parçacıklarından oluşurken, dördü alaşımların içyapılarında ayrıca sert ve gevrek Si ve Al_3Ni parçacıkları yer almaktadır [1,3,8,29,30,33,36-38,73]. Yumuşak olan α matrisi kaymayı kolaylaştırırken, sert θ , Si ve Al_3Ni parçacıkları yük taşıma görevi yapmaktadırlar [25,29,36-38,83]. Bu durum söz konusu alaşımların üstün tribolojik özelliklerinin büyük ölçüde bunların ideal içyapılarından kaynaklandığını göstermektedir. Diğer taraftan bu alaşımların yüzeylerinde çalışma sırasında alüminyum ve çinko oksit tabakalarının oluştuğu ve bunlardan sertliği yüksek olan alüminyum oksit tabakasının yük taşıma görevi yaparak aşınma direncini arttırdığı, çinko oksit tabakasının ise özellikle sınır ve karışık sürtünme durumlarında yağlayıcı gibi davranarak kaymayı kolaylaştırdığı ileri sürülmektedir [14,21,25,29,36-38,83]. Gerek iki fazlı ideal bir içyapıya sahip olmaları, gerekse yüzeylerinde oluşan oksit filmlerinin kaymayı kolaylaştırıp aşınma direncini artırması bu alaşımları kaymalı yatak uygulamaları için cazip hale getirmektedir.

Yapılan çalışmalar bakır, silisyum ve nikel içeren Al-40Zn esaslı alaşımların SAE 660 bronzundan çok daha üstün tribolojik özelliklere sahip olduklarını göstermiştir [8,11,12,14,20,21,36-38,80]. Bakır içeren Al-40Zn esaslı alaşımlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının artan bakır oranı ile azaldığı, %3 Cu oranının üzerinde ise bakır oranı arttıkça arttığı gözlenmiştir [36-38]. Aşınma direncinin ise, bu değişimin aksine %3 Cu oranına kadar artan bakır oranı ile artarken, bu oranın üzerinde bakır oranı arttıkça azaldığı belirlenmiştir [36,37]. Silisyum içeren Al-40Zn-3Cu esaslı alaşımların üstün tribolojik özelliklere sahip olmaları, bu alaşımların içyapısında bulunan sert silisyum parçacıkları ve bu parçacıkların yapı içindeki dağılımından kaynaklandığı ileri sürülmektedir [36,37]. Nitekim yumuşak çinko-alüminyum matrisi içerisinde hemen hemen homojen biçimde dağılmış olan sert silisyum parçacıkları yatağa gelen yükü taşıma görevini üstlenerek aşınmayı azalttığı görülmüştür.[11,12,36-38]. Ancak söz konusu alaşımların silisyum oranının %2'yi geçmesi durumunda silisyum parçacıklarının

büyüdüğü ve yapı içerisinde belirli bölgelerde toplanarak kümeleştikleri görülmüştür [11,12]. Bu dağılım biçimi söz konusu alaşımların aşınma davranışını olumsuz etkilemektedir. Nikel içeren Al-40Zn-3Cu 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 görülmüştür. Bu durum nikel içeren alaşımların içyapısında bulunan sert Al_3Ni fazının büyüklüğü, oranı ve dağılım biçimine göre açıklanmaktadır. Nikel oranı arttıkça bu alaşımlarda oluşan sert Al_3Ni parçacıklarının hem büyüklüğünün hem de yüzde oranının arttığı gözlenmiştir. Alaşımlarda oluşan sert Al_3Ni parçacıklarının genelde dendritlerarası bölgelerde toplanarak sürtünme sırasında abrasif etki yaptığı belirlenmiştir [79, 84].

İkili alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemet Al-25Zn alaşımından elde edilmesine rağmen, Al-25Zn esaslı alaşımların yapı ve özelliklerinin herhangi bir çalışmada ele alınarak incelenmemiş olması bir eksiklik olarak göze çarpmaktadır. Bu çalışmada sözü edilen eksikliğin giderilmesi ve daha üstün özelliklere sahip alaşımların geliştirilmesi yoluna gidilmiştir.

1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Kaymalı yatak yapımında yaygın olarak kullanılan bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel malzemelerin hem pahalı olmaları hem de tribolojik özelliklerinin pek çok uygulama için yetersiz kalması nedenlerinden dolayı bunların yerine tedariki ve üretimi kolay olan ve daha ekonomik çinko esaslı alaşımlar (ALZEN 305, ZA-5, ZA-8, ZA-12, ZA-27, Zn-40Al-2Cu-2Si ve Al-40Zn-3Cu-2Si) geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda çinko esaslı üçlü ve dördü alaşımların bronz ve dökme demir gibi geleneksel yatak alaşımlarına kıyasla daha yüksek aşınma direnci sergiledikleri gözlenmiştir. Bu alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direnci monotektoid bileşime sahip alaşımlardan (Zn-40Al-2Cu, Zn-40Al-2Si ve Zn-40Al-2Cu-2Si) elde edilmiştir. Ancak, bütün bu üstünlüklerin yanı sıra bakır içeren çinko esaslı üçlü ve dördü alaşımlarda biri boyutsal kararsızlık, diğeri de düşük süneklik olmak üzere iki önemli sorunla karşılaşmıştır. Boyutsal kararsızlık problemi büyük ölçüde döküm sırasında oluşan metastabil ϵ ($CuZn_4$) fazının kullanım sırasında dördü faz reaksiyonu ($\epsilon + \alpha \rightleftharpoons T' + \eta$) ile T' (Al_4Cu_3Zn) fazına dönüşmesinden, yetersiz süneklik ise çinko ve bakırca zengin fazların gevrek davranış sergilemelerinden kaynaklanmaktadır. Bu sorunları gidermek veya en aza

indirmek amacıyla çeşitli element katkılarının yanı sıra farklı ısıl işlemler denenmiş, ancak istenen başarı tam olarak elde edilememiştir. Bu nedenle, bu alaşımlardaki çinkonun alüminyum ile yer değiştirilmesi yoluna gidilmiştir. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilen Al-40Zn-3Cu ve Al-40Zn-3Cu-2Si alaşımlarının gerek çinko esaslı alaşımlara, gerekse geleneksel bir yatak malzemesi olan SAE 65 bronzuna göre daha düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direnci sergilediği görülmüştür. Ayrıca, çinkonun yerini alüminyumun alması ile boyutsal kararsızlık probleminin büyük ölçüde giderebileceği ve sünekliğin önemli ölçüde artırılabilirliği görülmüştür. Bu durum, bu alaşımlarda metastabil ϵ (CuZn_4) fazından çok daha kararlı θ (CuAl_2) fazının oluşmasından kaynaklanmaktadır. Ancak daha sonra yapılan ayrıntılı çalışmalar sonucunda Al-25Zn alaşımının ikili Al-Zn sistemi içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemete sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, Al-40Zn esaslı alaşımlar yerine Al-25Zn bazlı alaşımların üretilmesinin daha uygun olacağı düşünülmüş ve yapılan ön çalışmalar bu görüşü doğrulamıştır. Ancak, literatürde Al-25Zn esaslı üçlü ve dörtlü alaşımların yapı, mekanik ve tribolojik davranışları hakkında herhangi bir bilginin yer almadığı görülmüştür. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada Al-25Zn esaslı bir dizi alaşım üretilerek bunların yapı, mekanik ve tribolojik özellikleri incelendikten sonra bulunan sonuçların aynı koşullarda SAE 65 ve SAE 660 bronzlarından elde edilen bulgularla karşılaştırılıp, bu alaşımlar için en uygun kimyasal bileşim oranı ve ısıl işlem durumunun belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Alaşımların Üretimi ve Kimyasal Analiz

Bu çalışmada bir adet ikili alüminyum-çinko (Al-25Zn), yedi adet üçlü alüminyum-çinko-bakır (Al-25Zn-Cu), altı adet dördü alüminyum-çinko-bakır-silisyum (Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si) alaşımı kokil kalıp döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımların üretiminde ticari saflıkta (%99,97) alüminyum, yüksek saflıkta (%99,99) çinko ve elektrolitik bakır (%99,99) kullanıldı. Bakır içeren alaşımların üretiminde alüminyum-bakır (Al-50Cu) alaşımı, silisyum içeren alaşımların üretiminde ise Al-12Si (Etial-140) alaşım kullanıldı. Ergitme işlemi elektrikli bir pota fırını içerisinde gerçekleştirildi. Ergitilen alaşımlar 680°C dolayındaki bir sıcaklıktan, oda sıcaklığında tutulan 45 x 60 x 190 mm boyutlarına sahip bir çelik kalıba dökülerek katılaştırıldı. Ayrıca, bu çalışmada karşılaştırma yapmak amacıyla piyasadan temin edilen SAE 65 ve SAE 660 bronzları kullanıldı. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri atomik absorpsiyon ve spektral analiz yöntemleriyle belirlendi.

2.2. Alaşımların Yapısal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Dökülmüş ve ısı işlem görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlarından alınan numuneler standart metalografi yöntemiyle hazırlandıktan sonra sodyum hidroksit çözeltisi (3gr NaOH + 100 ml saf su) içerisinde dağlandı. SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının dağlanmasında ise 2 g FeCl₃ + 5 ml HCl + 30 ml H₂O + 60 ml etanol çözeltisi kullanıldı. Hazırlanan metalografi numuneleri hem ışık mikroskobu hem de taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelendi ve içyapılarını gösteren fotoğraflar çekildi. Söz konusu içyapıları oluşturan fazlar enerji dispersif spektroskopisi (EDS) yöntemiyle analiz edilerek tanımlandı.

Alaşımların yoğunluğunu belirlemek amacıyla talaşlı işlemle hazırlanan numunelerin boyutları $\pm 0,001$ mm hassasiyetine sahip bir mikrometre ile ölçülerek hacimleri hesaplandı. Kütle ölçümlerinde ise $\pm 0,01$ mg hassasiyetine sahip bir terazi kullanıldı. Ölçülen kütle değerleri hacim değerlerine bölünerek numunelerin yoğunlukları bulundu.

Alaşımların makro sertliği, Brinell sertlik ölçme yöntemiyle 62,5 kg'lık yük altında 2,5 mm çapında bir çelik bilya uç kullanılarak ölçüldü. Al-25Zn esaslı alaşımların

içyapılarında bulunan α fazının mikro sertliği ise Vickers sertlik ölçme yöntemi ile 10 g'lık yük altında ölçüldü. Her bir sertlik numunesi üzerinde 5 ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alındı. Alaşımların darbe dirençlerinin ölçülmesi amacıyla talaşlı işleme 10 x 10 x 55 mm boyutlarına sahip çentiksiz numuneler hazırlandı. Her bir ölçüm için üç numune kullanıldı ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak alaşımların darbe dirençleri belirlendi.

Çekme ve basma deneyleri için alaşımlardan sırasıyla 8 x 40 TS 138 ve 10 x 10 TS 206 standartlarına uygun numuneler talaşlı yöntemle üretildi. Üretilen numuneler $0,25 \text{ mm.s}^{-1}$ 'lik sabit bir çene hızına karşılık gelen $5,90 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 'lik bir deformasyon hızında çekme ve basma deneylerine tabi tutuldu. Her alaşım için 3 numune kullanıldı ve yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak alaşımların çekme ve basma dayanımlarıyla kopma uzaması değerleri belirlendi.

2.3. Isıl işlemler

Üçlü ve dörtlü alaşımlar içerisinde en yüksek çekme ve basma dayanımına sahip olan Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımları 150°C sıcaklıkta 10 saatlik bir süre stabilizasyon (kararlı hale getirme) işlemine tabi tutuldu. Bu işlem için en uygun sürenin belirlenmesi amacıyla bu alaşımlar söz konusu sıcaklıkta 100 saat süreli stabilizasyon işlemine tabi tutularak boyut ve sertliklerinde meydana gelen değişimler izlendi. Bu deneyler için sırasıyla 8 x 45 mm ve 15 x 10 mm boyutlarındaki silindirik numuneler kullanıldı. Boyut değişimleri $\pm 0,001 \text{ mm}$ hassasiyetine sahip bir mikrometre yardımıyla ölçüldü. Her bir boyut (uzunluk) ve sertlik değeri, yapılan 5 ölçümün ortalaması alınarak belirlendi.

Ayrıca, dörtlü alaşımlar içerisinde en yüksek çekme ve basma dayanımına sahip olan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımına T7 ısıl işlemi uygulandı. Bunun için bu alaşımdan alınan numuneler 375°C sıcaklıkta 36 saat süreyle çözündürme işlemine tabi tutularak suda soğutulduktan sonra 180°C sıcaklıkta 8 saatlik bir süreyle yapay olarak yaşlandırıldı. T7 ısıl işlemi için en uygun yaşlandırma süresinin belirlenmesi amacıyla bu alaşıma ait numuneler çözündürme-su verme işleminden sonra söz konusu sıcaklıkta 100 saatlik bir süre yaşlandırıldı.

2.4. Alaşımın Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Üretilen alaşımların sürtünme ve aşınma özelliklerinin incelenmesi için kullanılan çubuk-disk (pin-on-disk) esaslı deney düzeneğinin önden ve üstten görünümünü sergileyen teknik resimler Şekil 5 ve 6'da, genel ve ayrıntılı yapısını gösteren fotoğraflar ise Şekil 7 ve 8'de verilmiştir. Söz konusu düzeneğe 3 kW gücünde bir elektrik motoru, bir disk, bir numune tutucusu ve bir yükleme kolundan oluşmaktadır. Motorun devir sayısı (milin dönme hızı) elektrik devresine yerleştirilen hız kontrol ünitesi ile ayarlanmaktadır. Ayrıca, bu düzenekte bir yağlama sistemi ve bir sürtünme kuvveti ölçüm devresi bulunmaktadır. Çapı 200 mm olan disk SAE 1045 (Fe-0.46 %C- 0.6 %Mn, 0.035 %P-0.03%S) çeliğinden imal edilmiş olup, ısıl işleme 50 RSD-C değerine kadar sertleştirilmiştir. Sertleştirme işleminden sonra söz konusu disk $\pm 3 \mu\text{m}$ 'lik bir hassasiyetle taşlanmıştır.

Bu çalışmada yükleme, yükleme kolunun ucuna ağırlık asmak suretiyle; yağlama ise yüksek bir yere yerleştirilen depodan ince bir hortum yardımıyla alınan yağın bir debi ayarlayıcısından geçirildikten sonra disk üzerine damlatılmasıyla gerçekleştirildi. Deneylerde SAE 20W/50 normuna uygun motor yağı kullanıldı.

Sürtünme kuvvetini ölçmek için numune tutucusu ile düzenekteki sabit bir mesnet arasına kapasitesi 50 kg olan S-50 tipi bir yük hücresi yerleştirildi. Sürtünme kuvvetini ölçmek için kullanılan yük hücresinin ucuna belirli ağırlıklar asılarak gerilim-kuvvet ilişkisini gösteren grafik elde edildi, Şekil 9. Doğrusal değişim gösteren bu grafik çalışma sırasında yük hücresinden alınan gerilim değerlerine karşı gelen sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısının belirlenmesinde kullanıldı.

Al-25Zn esaslı alaşımlar ile bronzlardan talaşlı işleme 10 x 15 x 26,6 mm boyutlarında aşınma numuneleri hazırlandı. Bu numunelerin teknik resmi Şekil 10'da verilmiştir.

Numunelerin sıcaklıkları bakır-nikel termoeleman çifti kullanılarak ölçüldü. Bunun için söz konusu termoeleman çifti aşınma numunesinin temas yüzeyinden 2 mm yukarıya açılan bir deliğe yerleştirildi. Bu termoelemanlardan alınan gerilim deney süresi boyunca veri toplama kartı yardımıyla kaydedildi ve bilgisayara aktararak numunelerin çalışma sıcaklıkları belirlendi.

Aşınma deneylerine başlanmadan önce numuneler ultrasonik yöntemle sırasıyla karbontetraklorür (CCl_4) ve alkol-aseton karışımı kullanılarak temizlendi. Temizlenen

numunelerin kütleleri 0,01 mg'lık hassasiyete sahip bir terazi ile ölçüldü. Deney numuneleri belirli çalışma süreleri sonunda kimyasal çözücüler içinde temizlenerek tartıldı ve böylece aşınma ile meydana gelen kütle kayıpları ölçüldü. Ölçülen kütle kayıpları alaşımların yoğunluklarına bölünerek aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları hesaplandı.

Üretilen Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 660 ve SAE 65 bronzlarının alaşımlarının sürtünme ve aşınma davranışları kuru (yağsız) ve yağlı durumlarda incelendi. Yağsız durumda yapılan deneyler 0,5-2,5 MPa basınç ve 0,5-1,5 m/s hız aralıklarında gerçekleştirildi. Söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklığı 500 m'lik yol boyunca sürekli kaydedildi ve bu yol sonunda aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları belirlendi. Ayrıca, bu alaşımlar yağsız durumda sabit bir basınç (1,5 MPa) ve sabit bir kayma hızında (1 m/s) daha uzun mesafeli (2500 m) deneylere tabi tutularak sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybının alınan yola göre değişimleri incelendi.

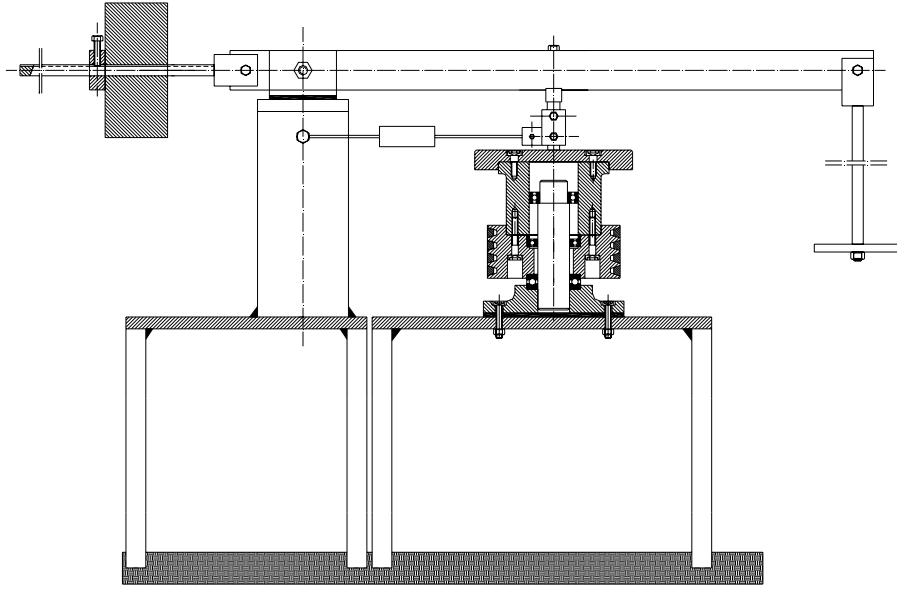
Basınç, kayma hızı ve yağ debisinin söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybına etkilerini belirlemek için alaşımlardan alınan aşınma numuneleri 1-8 MPa arasında yer alan farklı basınçlarda, 1-3 m/s aralığında değişen farklı kayma hızlarında ve 0,5-2,5 cm³/saat arasındaki farklı yağ debilerinde 30 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneylere tabi tutuldu. Ayrıca, söz konusu alaşımların sürtünme ve aşınma özelliklerinin alınan yola göre değişimlerini incelemek amacıyla daha uzun mesafeli (108 km) veya süreli (15 saat) deneyler yapıldı. Bu deneyler 6 MPa'lık basınç, 2 m/s'lik kayma hızı ve 1 cm³/saat'lik yağ debisinde gerçekleştirildi. Yukarıda belirtilen tüm sürtünme ve aşınma deneylerine ilişkin koşullar Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Sürtünme ve aşınma deneylerine ilişkin koşullar

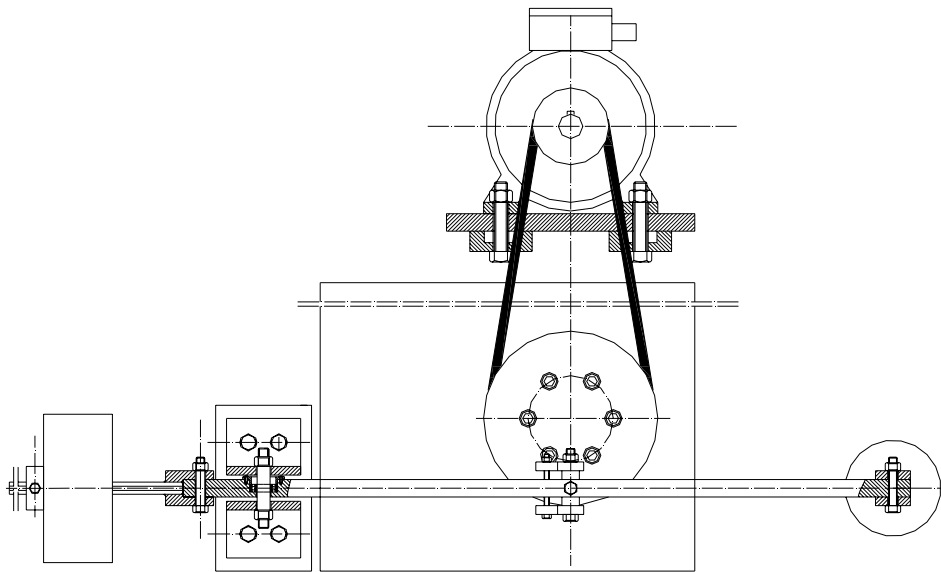
Deney	Kısa deneyler				Uzun Deneyler			
	Basınç (MPa)	Hız (m/s)	Yağ debisi (cm ³ /saat)	Alınan yol (m)	Basınç (MPa)	Hız (m/s)	Yağ debisi (cm ³ /saat)	Alınan yol (m)
Yağsız durum	0,5–2,5	0,5–1,5	-	500	1,5	1	-	2500
Yağlı durum	1–8	1–3	0,5–2,5	30000	6	2	1	108000

2.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Alaşımın aşınma davranışını izlemek amacıyla aşınma numunelerinin yüzeyleri deneylere başlamadan önce ve deneylerden sonra tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelendi. Bu numunelerin yüzeylerinin altında meydana gelen yapısal değişimler ise, SEM metalografisinin yanı sıra mikrosertlik ölçümleri de yapılarak incelendi.



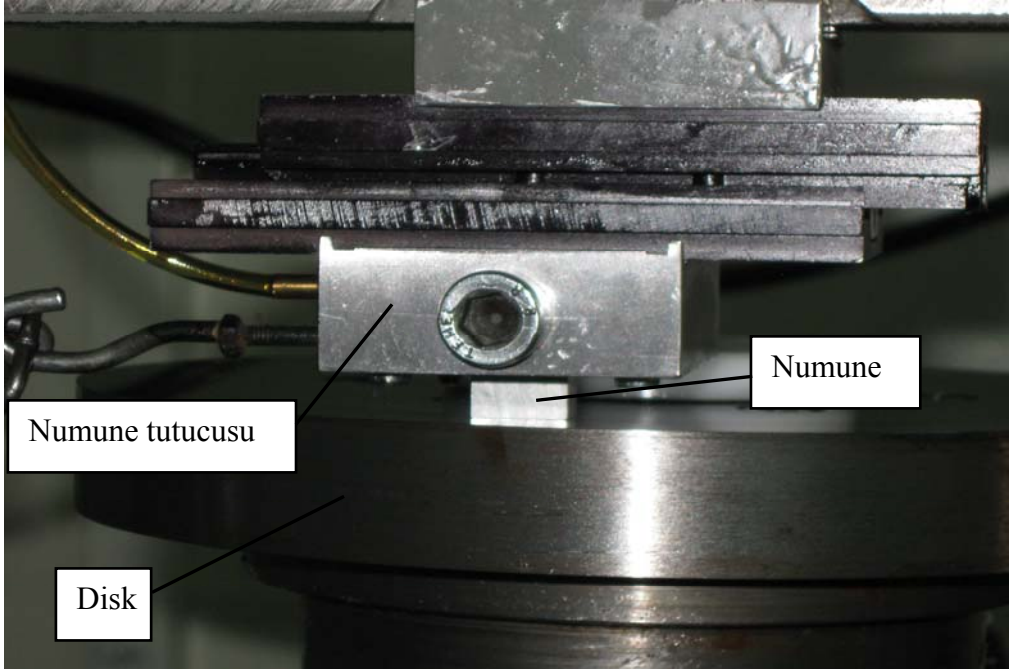
Şekil 5. Aşınma deney düzeneğinin kesit resmi (önden görünüm)



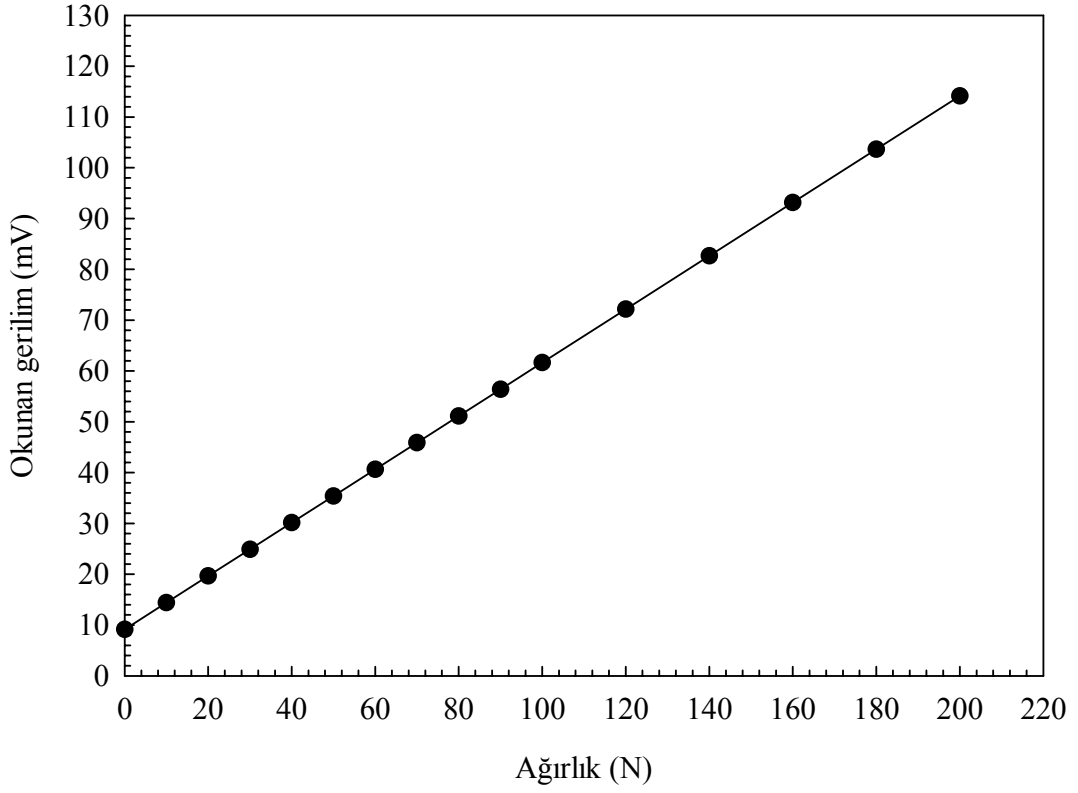
Şekil 6. Aşınma deney düzeneğinin kesit resmi (üstten görünüm)



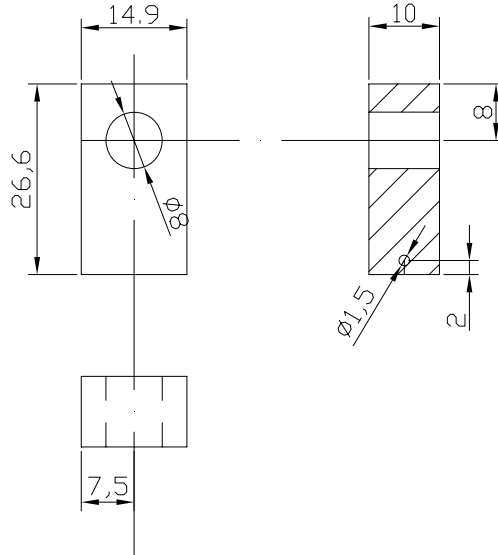
Şekil 7. Aşınma deney düzeneğinin fotoğrafı



Şekil 8. Aşınma deney düzeneğindeki disk, numune ve numune tutucusunun yakından görünümü



Şekil 9. Sürtünme kuvvetinin ölçümünde kullanılan yük hücresine (S50) ait kalibrasyon doğrusu



Şekil 10. Alaşımların sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan numunenin teknik resmi

3. BULGULAR

3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

Üretilen Al-25 Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının kimyasal bileşimleri sırasıyla Tablo 6 ve 7’de verilmiştir.

Tablo 6. Al-25Zn esaslı alaşımların kimyasal bileşimleri

Alaşım	Kimyasal bileşim (%)			
	Al	Zn	Cu	Si
Al-25Zn	74,8	25,2	-	-
Al-25Zn-1Cu	74,0	25,1	0,9	-
Al-25Zn-2Cu	72,6	25,2	2,2	-
Al-25Zn-2,5Cu	72,3	25,1	2,6	-
Al-25Zn-3Cu	71,7	25,2	3,1	-
Al-25Zn-3,5Cu	71,1	25,2	3,7	-
Al-25Zn-4Cu	70,5	25,3	4,2	-
Al-25Zn-5Cu	69,9	25,2	4,9	-
Al-25Zn-3Cu-1Si	70,9	25,1	2,9	1,1
Al-25Zn-3Cu-2Si	69,8	25,2	2,8	2,2
Al-25Zn-3Cu-2,5Si	69,4	25,1	2,9	2,6
Al-25Zn-3Cu-3Si	68,9	25,1	2,9	3,1
Al-25Zn-3Cu-4Si	67,8	25,2	3,1	3,9
Al-25Zn-3Cu-5Si	67,0	25,1	2,8	5,1

Tablo 7. SAE 65 ve 660 bronzlarının kimyasal bileşimleri

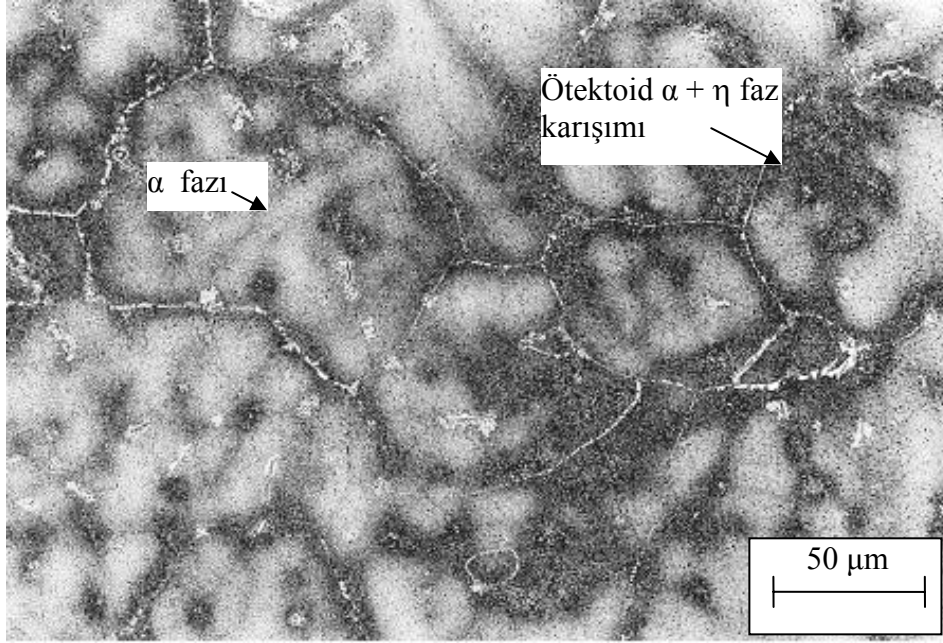
Alaşım	Kimyasal bileşim oranı (% ađ.)			
	Cu	Sn	Pb	Zn
SAE 65 bronzu	88,3	11,7	-	-
SAE 660 bronzu	82,8	6,9	5,7	4,6

3.2. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular

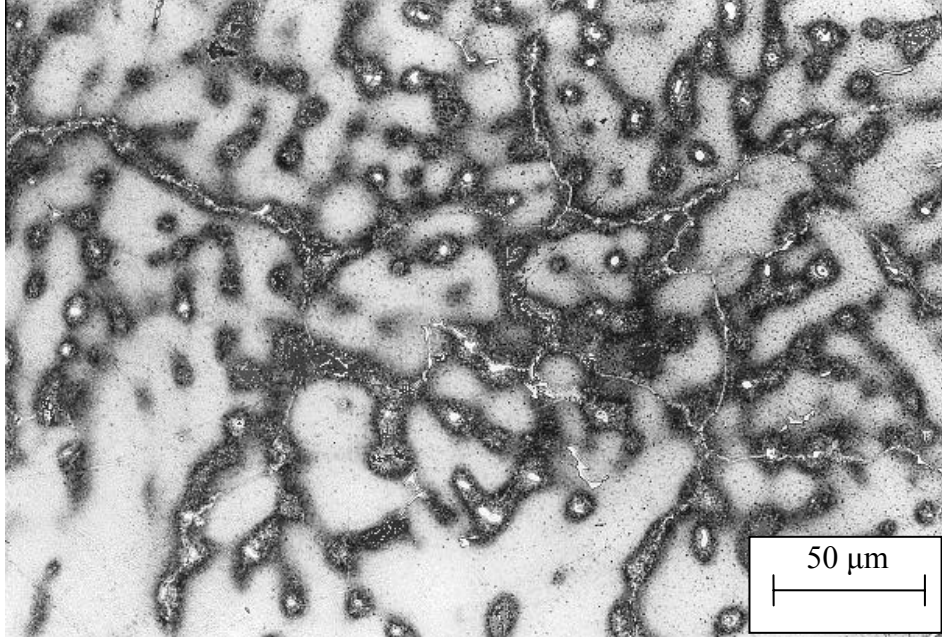
Bu çalışmada baz alınan ikili Al-25Zn alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının alüminyumca zengin göbekli α dendritleri ile bunları çevreleyen ötektoid $\alpha + \eta$ fazlarından oluştuğu görüldü, Şekil 11. Bu alaşıma bakır katıldığında metalografik yapısının fazla değişmediği, ancak dendritlerarası bölgelerde bakırca zengin θ (CuAl_2) fazının oluştuğu gözlemlendi, Şekil 12-18. Bakır oranı arttıkça θ fazına ait parçacıkların irileşerek daha belirgin hale geldikleri görüldü.

Silisyum içeren alaşımların içyapılarında ise α , $\alpha + \eta$ ve θ fazlarından başka silisyum parçacıklarının bulunduğu görüldü, Şekil 19-24. Bu parçacıkların, %3 oranına kadar silisyum içeren alaşımlarda ince görünümünün yanı sıra homojen bir dağılım sergiledikleri, bu değerden daha yüksek oranlarda silisyum içeren alaşımlarda ise irileşerek farklı bölgelerde kümeleştikleri görüldü. Yapılan metalografik incelemeler sonucunda söz konusu parçacıklardan ince olanların ötektik dönüşüm ürünü, iri olanların ise birincil (primer) silisyum parçacıkları oldukları belirlendi. Uygulanan stabilizasyon işleminin Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının içyapısında belirgin bir değişime yol açmadığı gözlemlendi, Şekil 25. T7 ısıtma işlemi sonrasında ise bu alaşımın dendritik yapısı tamamen ortadan kalkarken, silisyum ve θ (CuAl_2) parçacıklarında herhangi bir değişimin meydana gelmediği görüldü, Şekil 26.

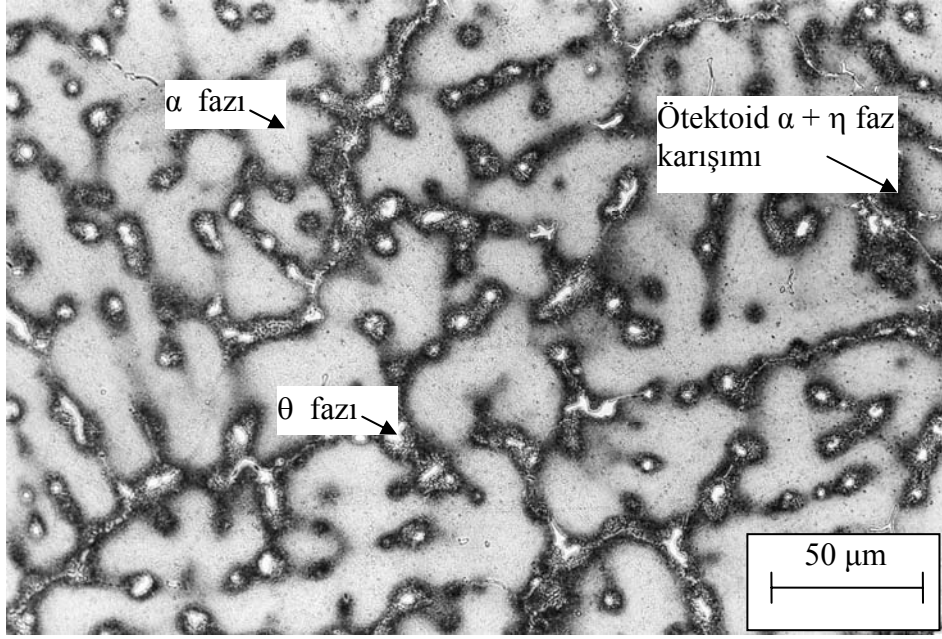
SAE 660 ve SAE 65 bronzlarının içyapılarının bakırca zengin α dendritleri ile bunları çevreleyen ötektoid $\alpha + \delta$ fazlarından oluştuğu görüldü. Bu yapıları gösteren fotoğraflar sırasıyla Şekil 27-28'de verilmiştir.



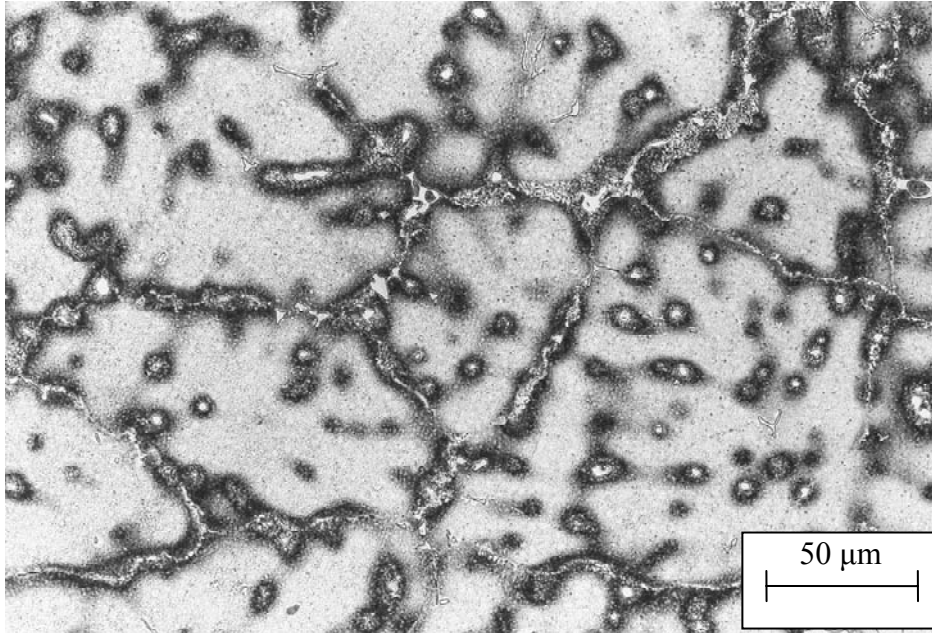
Şekil 11. Al-25Zn alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



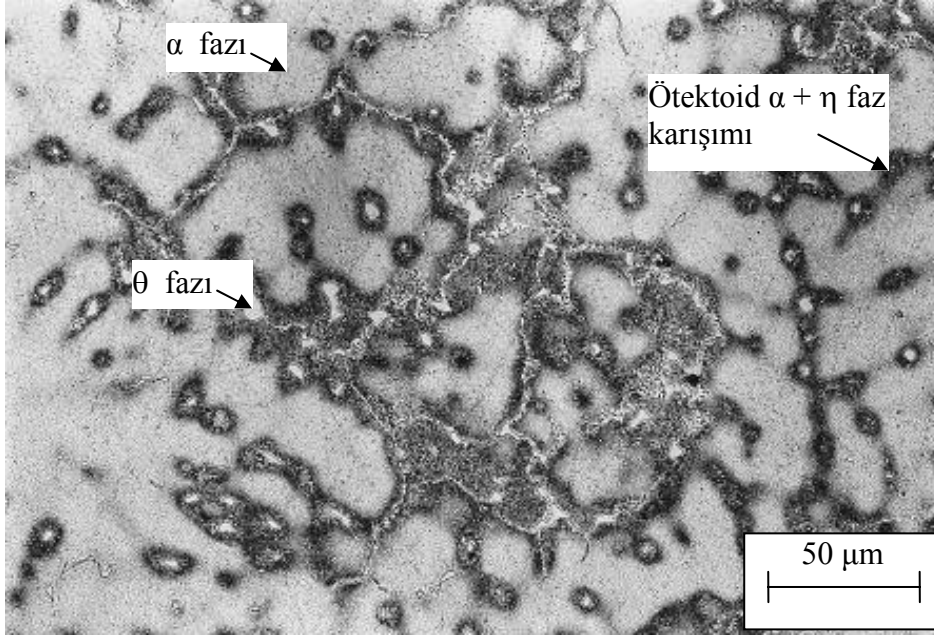
Şekil 12. Al-25Zn-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



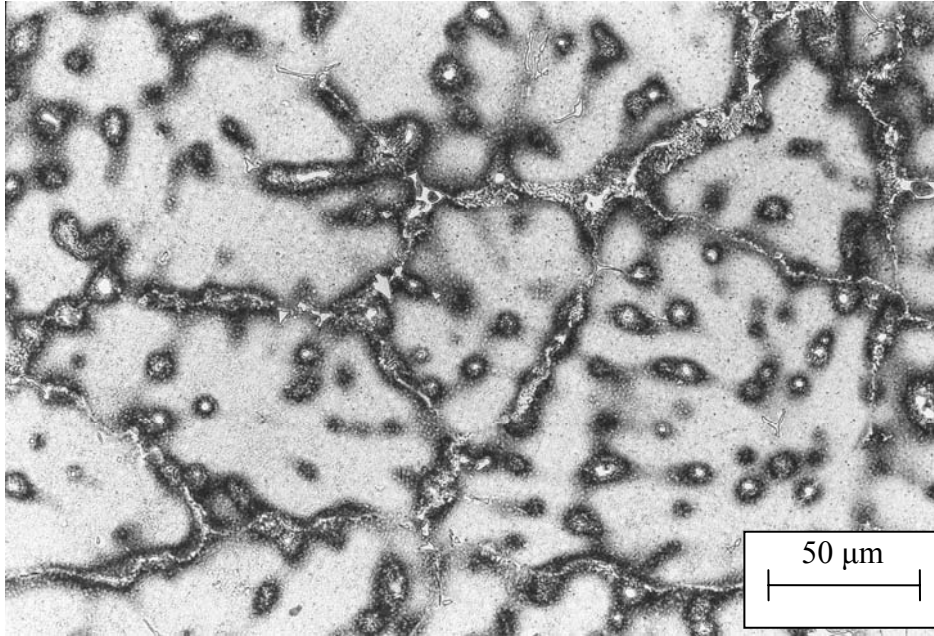
Şekil 13. Al-25Zn-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



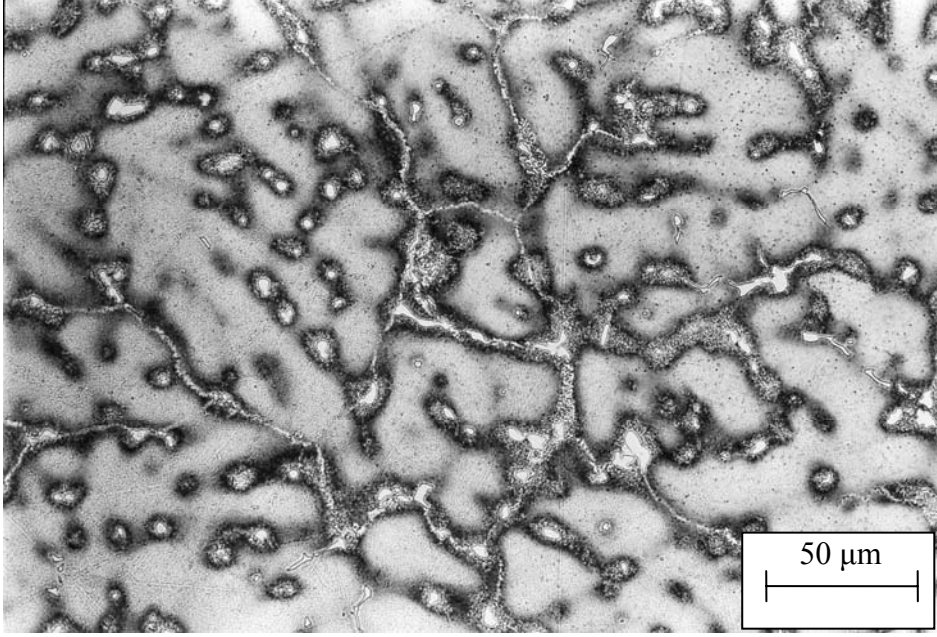
Şekil 14. Al-25Zn-2,5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



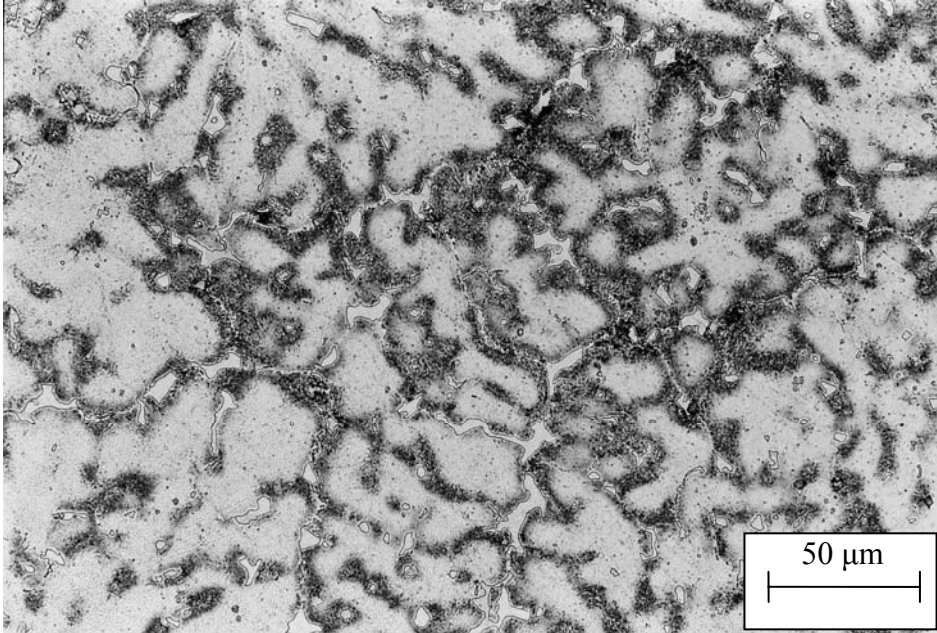
Şekil 15. Al-25Zn-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



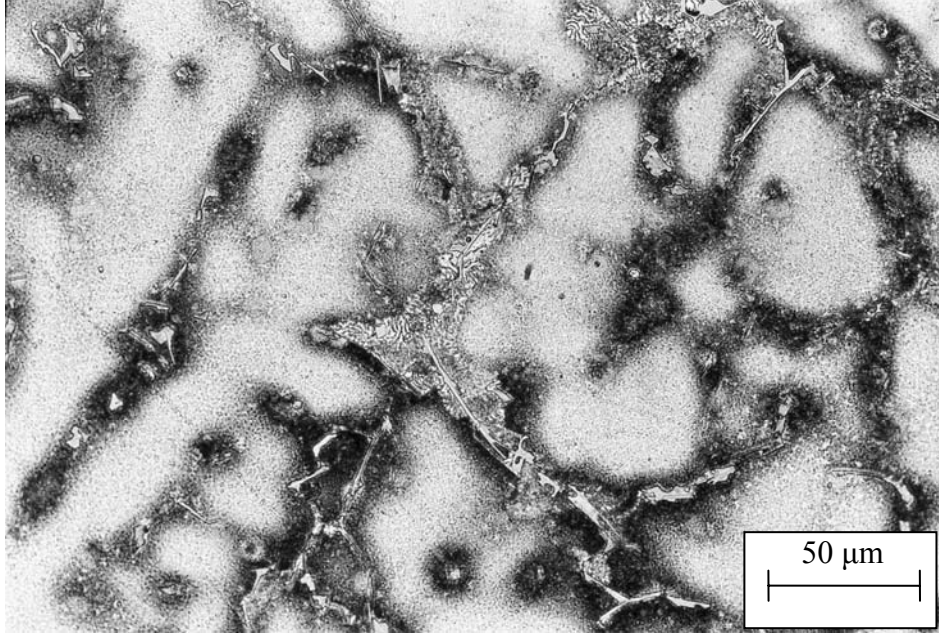
Şekil 16. Al-25Zn-3,5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



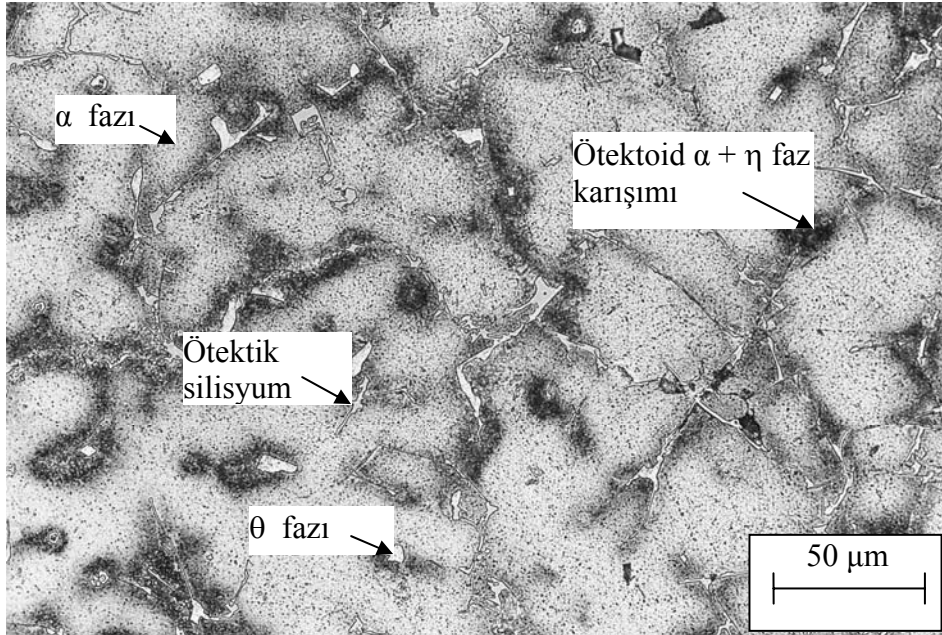
Şekil 17. Al-25Zn-4Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



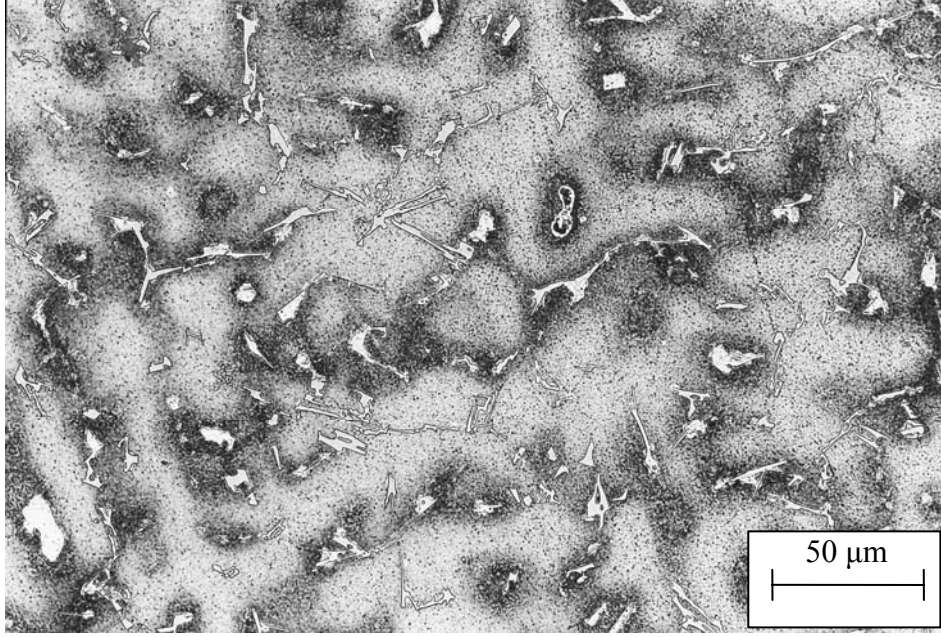
Şekil 18. Al-25Zn-5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



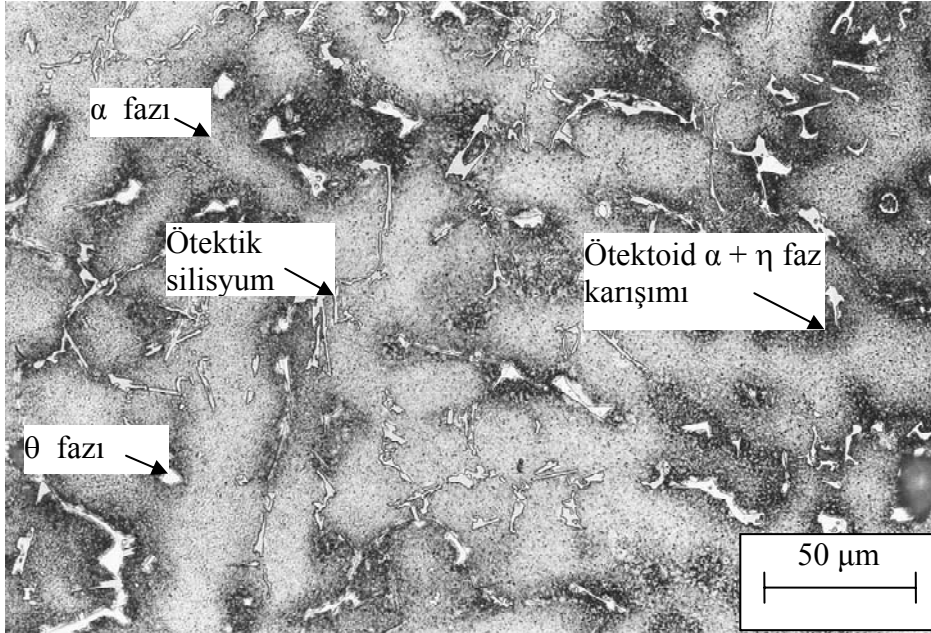
Şekil 19. Al-25Zn-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



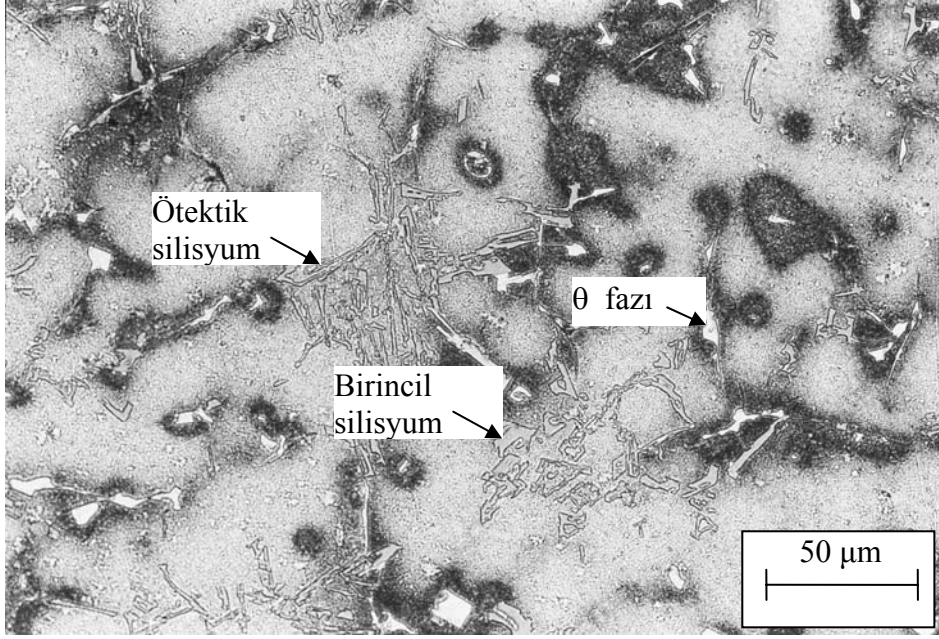
Şekil 20. Al-25Zn-3Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



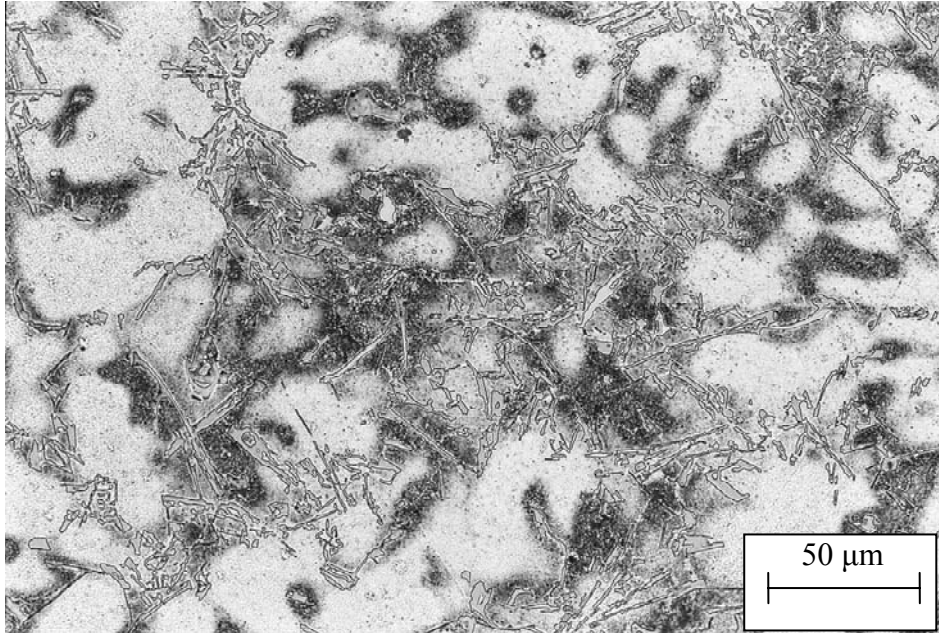
Şekil 21. Al-25Zn-3Cu-2,5Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



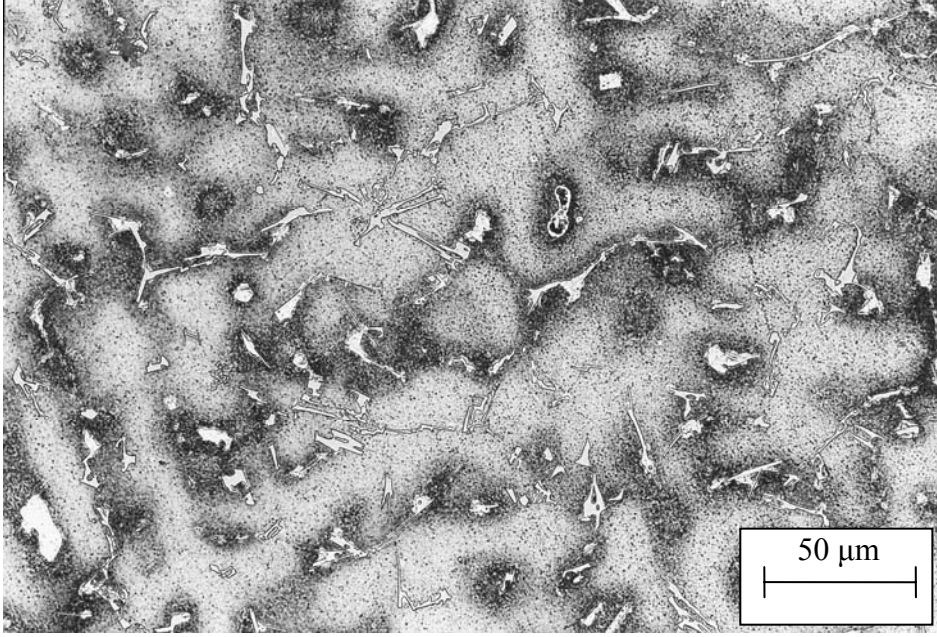
Şekil 22. Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



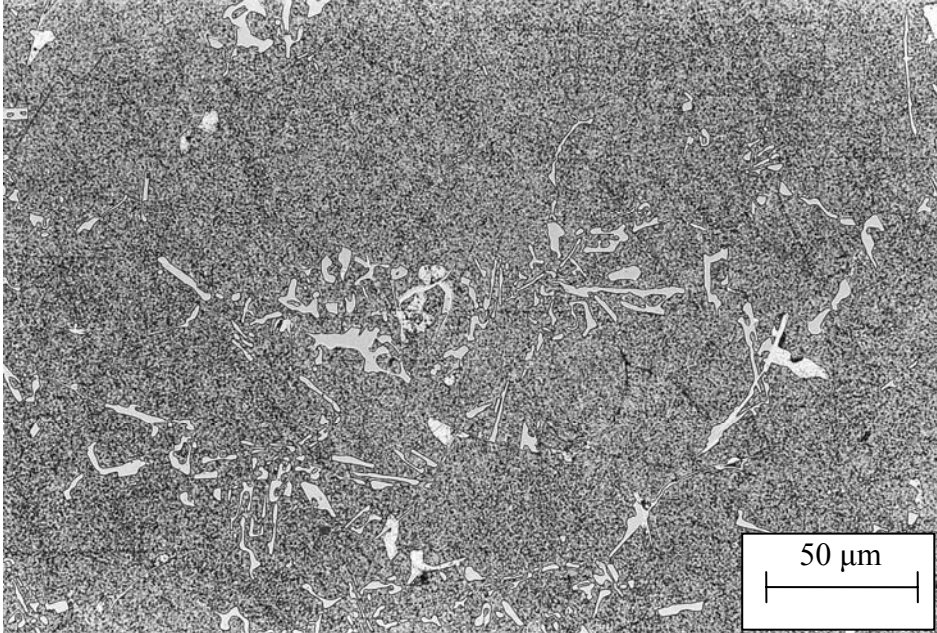
Şekil 23. Al-25Zn-3Cu-4Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



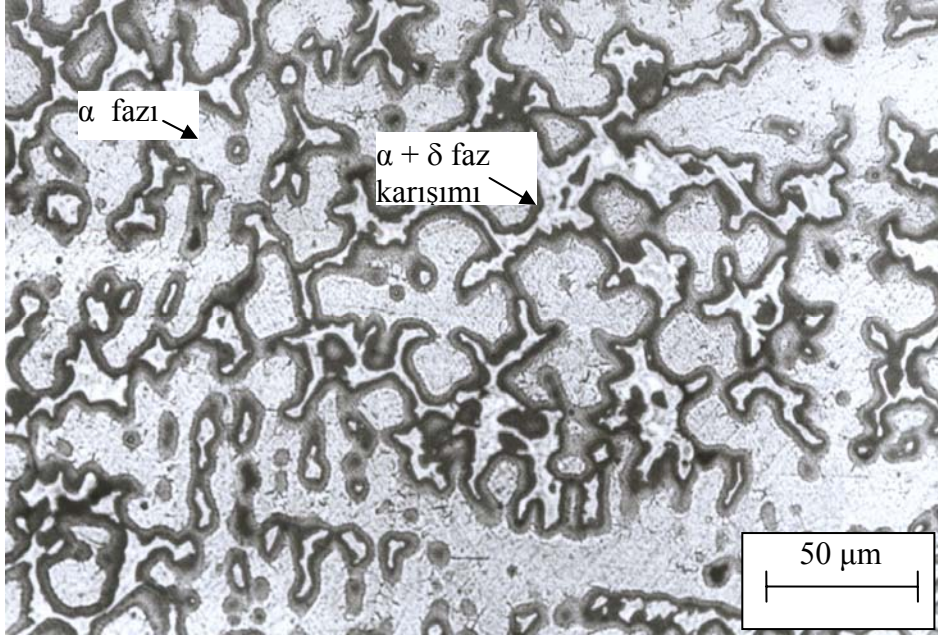
Şekil 24. Al-25Zn-3Cu-5Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



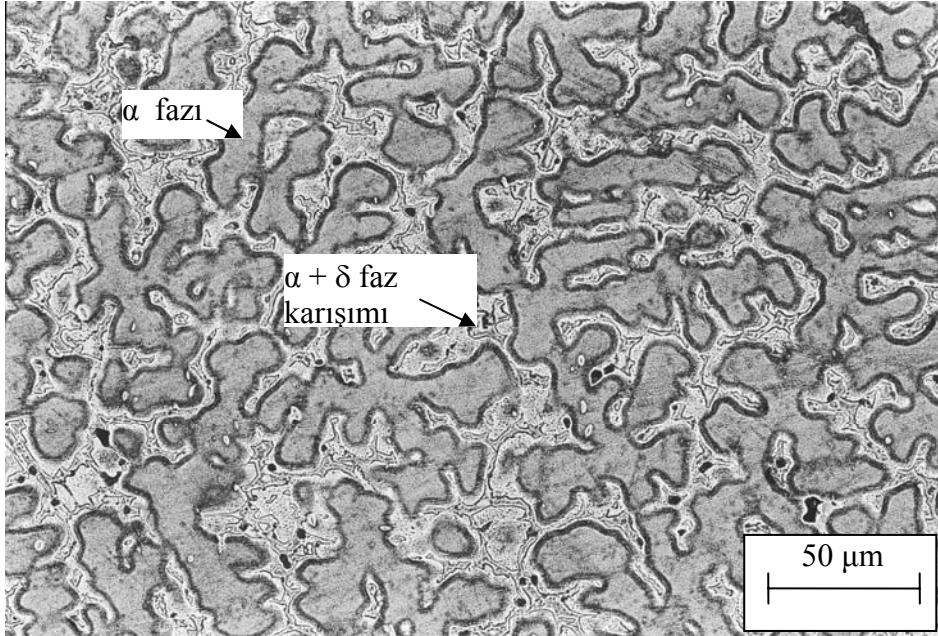
Şekil 25. Stabilizasyon işlemine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının içyapısı



Şekil 26. T7 ısıtıl işlemi sonrası Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında oluşan içyapı



Şekil 27. SAE 65 bronzunun içyapısı



Şekil 28. SAE 660 bronzunun içyapısı

3.3.Fiziksel ve Mekanik Deneylelerden Elde Edilen Bulgular

Al-25Zn-(0-5)Cu alaşımlarının sertlik, mikrosertlik, çekme ve basma dayanımları, darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerleri Tablo 8’de, bu değerlerin bakır oranına göre değişimini gösteren eğriler ise Şekil 29a ve b’ de verilmiştir. Söz konusu alaşımlarının sertlik değerleri artan bakır oranı ile sürekli artarken, matrisi oluşturan α fazının mikro sertliği %3 Cu oranına kadar arttıktan sonra bu değer üzerindeki bakır oranlarında sabit kalmaktadır. Bu alaşımların çekme ve basma dayanımları da artan bakır oranı ile artmakta, ancak %3’den daha yüksek bakır oranlarında keskin bir azalma sergilemektedir. Diğer taraftan bu alaşımların yoğunluğu artan bakır oranı ile artmakta, darbe direnci ve kopma uzaması değerleri ise azalmaktadır.

Silisyum katkısının, en yüksek mukavemet değerine sahip Al-25Zn-3Cu alaşımının fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini gösteren eğriler Şekil 30a ve b’de verilmiştir. Bu eğrilere bakıldığında silisyum oranı arttıkça alaşımların sertliğinin sürekli arttığı, α fazının mikrosertliğinin değişmediği, darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerlerinin ise azaldığı görülmektedir. Ayrıca, bu eğriler söz konusu alaşımların çekme ve basma dayanımlarının önce azalıp, daha sonra artarak %3 Si oranında en yüksek değerlerine ulaştığını ve bu değerlerden sonra ise azaldığını göstermektedir.

Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarının sertlik ve boyut değişimi değerlerinin stabilizasyon süresine göre değişimini gösteren eğriler Şekil 31’de verilmiştir. Söz konusu eğrilere bakıldığında bu alaşımların her ikisinde meydana gelen boyut değişimlerinin başlangıçtan itibaren artarak 10 saatlik bir stabilizasyon süresi sonunda sabit bir değere (%0,03) ulaştığı görülmektedir. Söz konusu alaşımların sertlik değerlerinin ise, boyut değişiminin tam tersi bir davranış sergiledikleri gözlemlendi.

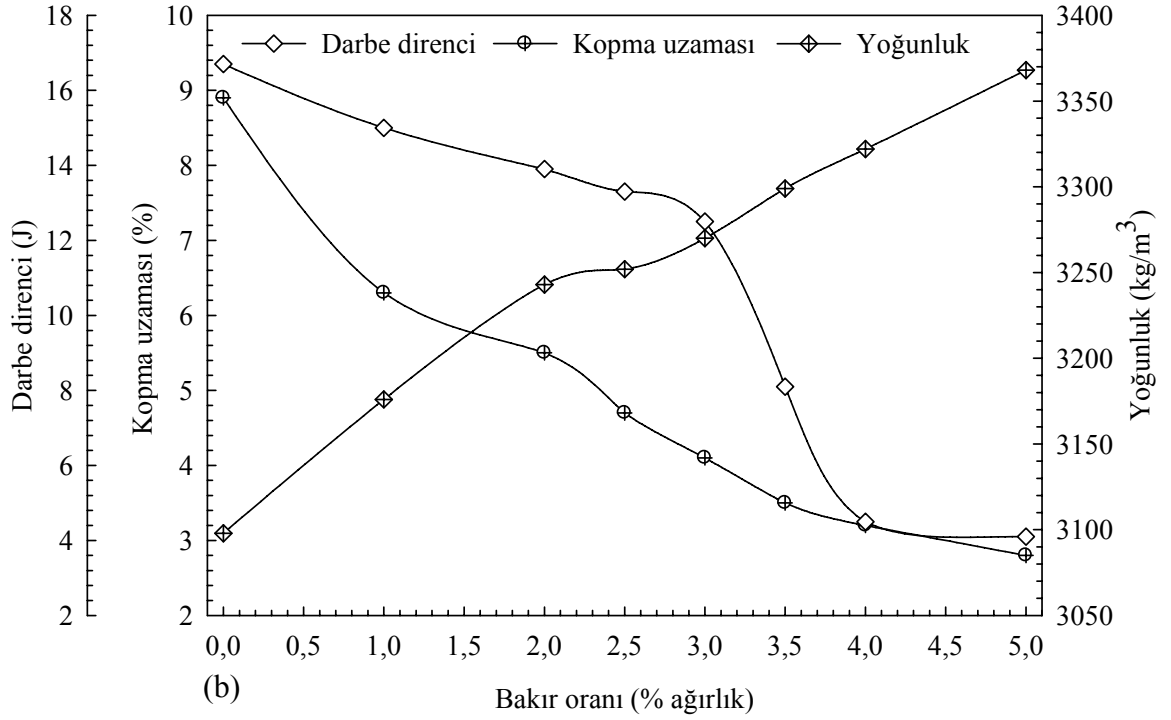
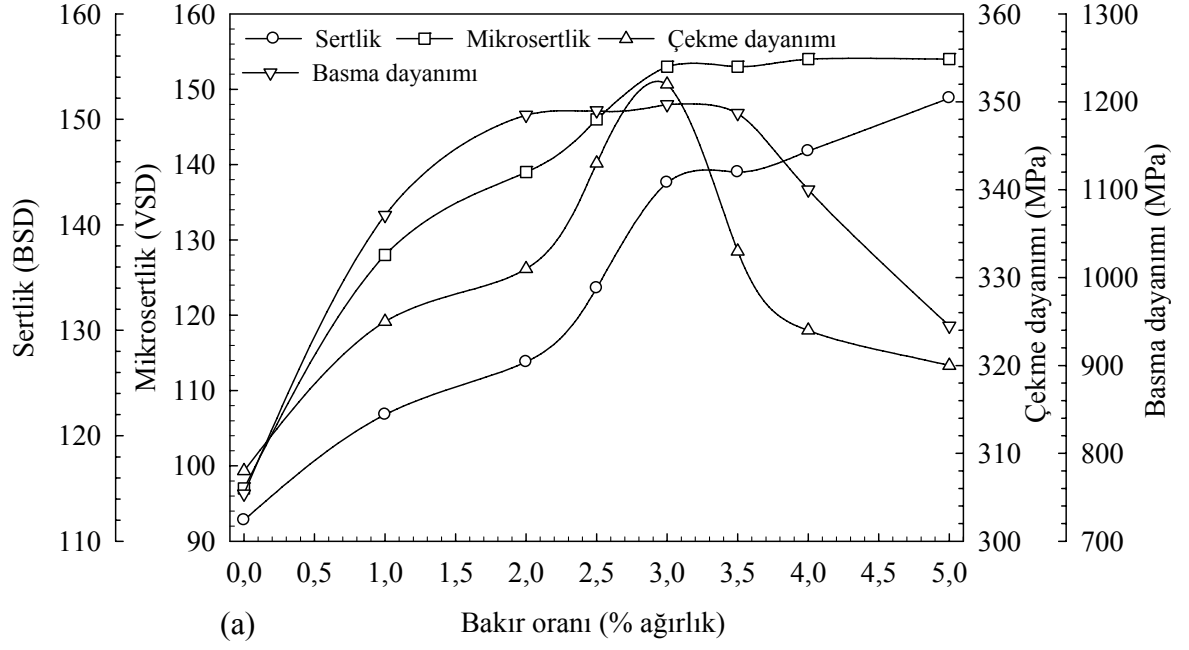
Çözündürme ve su verme işlemleri sonrasında yapay yaşlandırılan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri Şekil 32’de verilmiştir. Bu eğri söz konusu alaşımın sertliğinin artan yaşlandırma süresiyle önce artıp, bir tepe noktasından geçtikten sonra azaldığını göstermektedir. T7 ısıl işleminin Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sertlik değeri ile çekme ve basma dayanımlarını azalttığı, darbe direnci ve kopma uzaması değerlerini ise artırdığı belirlendi.

Tablo 8. Al-25Zn-(0-5)Cu ve Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının sertlik, mikrosertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerleri

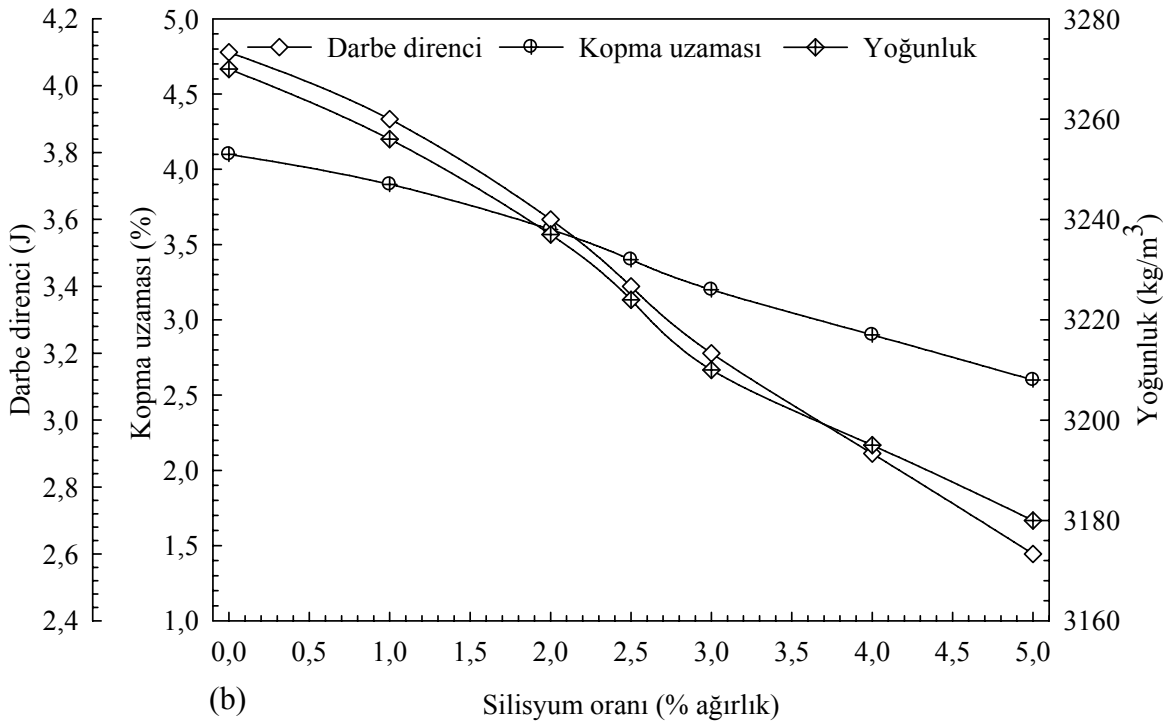
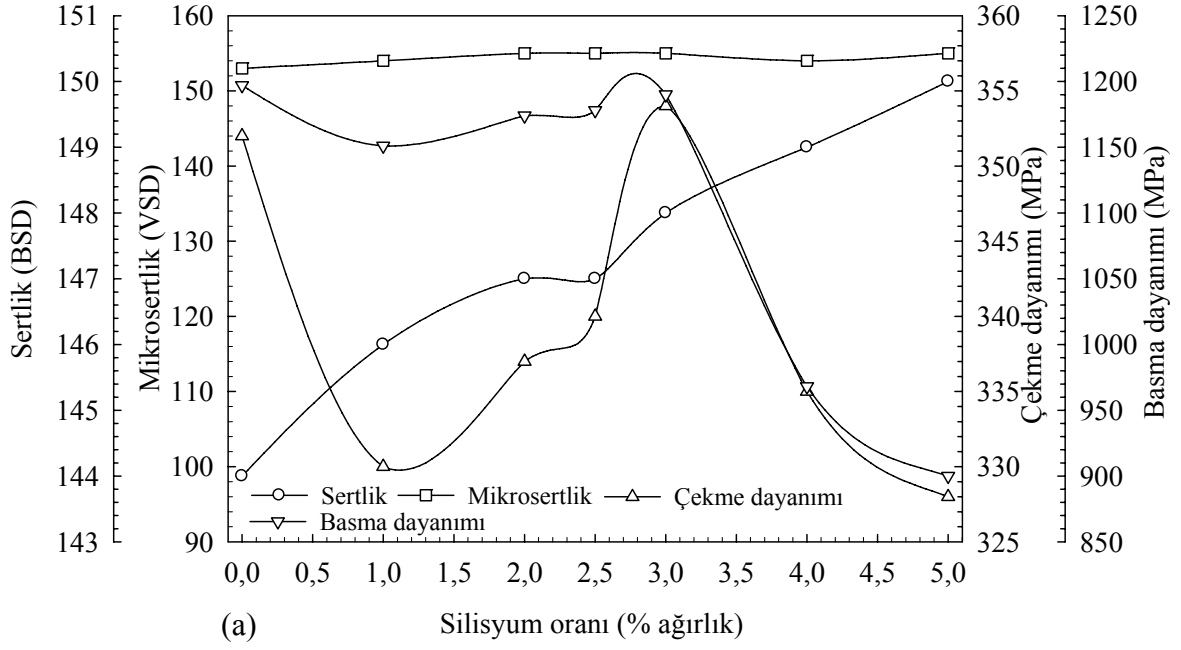
Alaşım	Sertlik (BSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Basma dayanımı (MPa)	Darbe direnci (J)	Kopma uzaması (%)	Yoğunluk (kg/m ³)	Mikro sertlik (VSD)
Al-25Zn	112	308	754	16,7	8,9	3098	97
Al-25Zn-1Cu	122	325	1071	15	6,3	3176	128
Al-25Zn-2Cu	127	331	1185	13,9	5,5	3243	139
Al-25Zn-2,5Cu	134	343	1190	13,3	4,7	3252	146
Al-25Zn-3Cu	144	352	1197	12,5	4,1	3270	153
Al-25Zn-3Cu*	114	317	1165	12,9	5,6	3273	118
Al-25Zn-3,5Cu	145	333	1187	8,1	3,5	3299	153
Al-25Zn-4Cu	147	324	1100	4,5	3,2	3322	154
Al-25Zn-5Cu	152	320	945	4,1	2,8	3368	154
Al-25Zn-3Cu-1Si	146	330	1151	3,5	3,9	3256	154
Al-25Zn-3Cu-2Si	147	337	1174	3,0	3,6	3237	155
Al-25Zn-3Cu-2,5Si	147	340	1178	2,8	3,4	3224	155
Al-25Zn-3Cu-3Si	148	354	1190	2,7	3,2	3210	155
Al-25Zn-3Cu-3Si*	116	319	1168	3,6	5,2	3207	121
Al-25Zn-3Cu-3Si**	104	298	1162	3,8	8,1	3212	109
Al-25Zn-3Cu-4Si	149	335	968	2,4	2,9	3195	154
Al-25Zn-3Cu-5Si	150	328	900	2,1	2,6	3180	155
SAE 65 bronz	103	286	1115	17,1	8,0	8770	105
SAE 660 bronz	83	278	1098	17,9	11,0	8913	103

* Stabilizasyon işlemine tabi tutulmuş

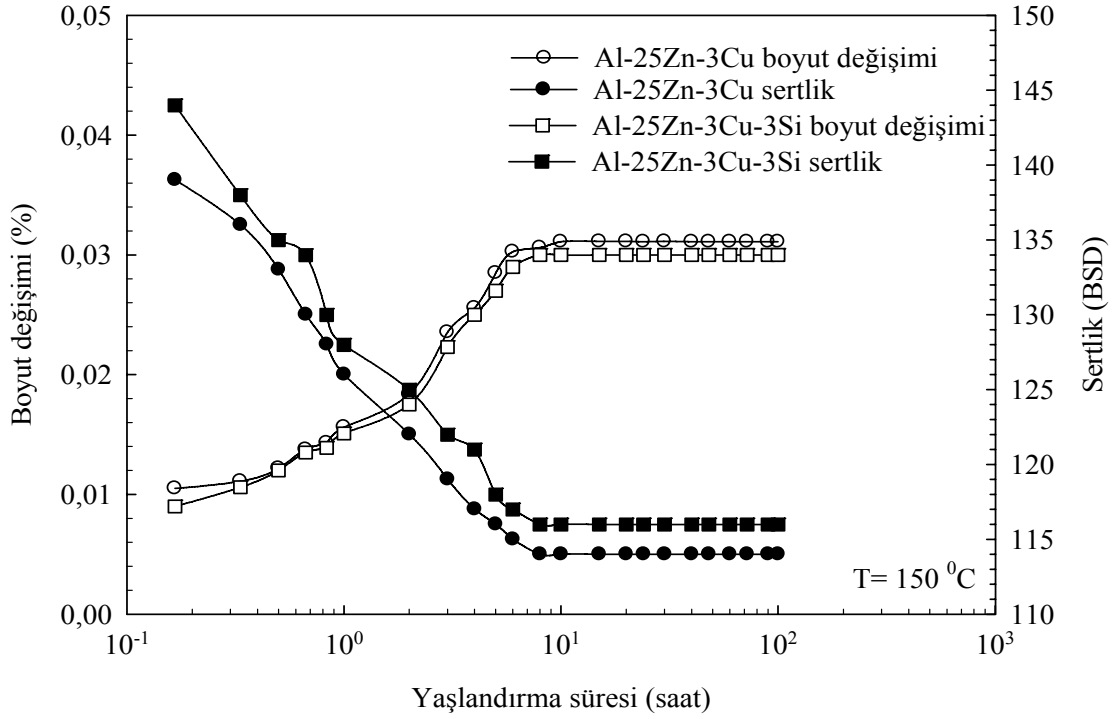
** T7 ısıtıl işlemi görmüş



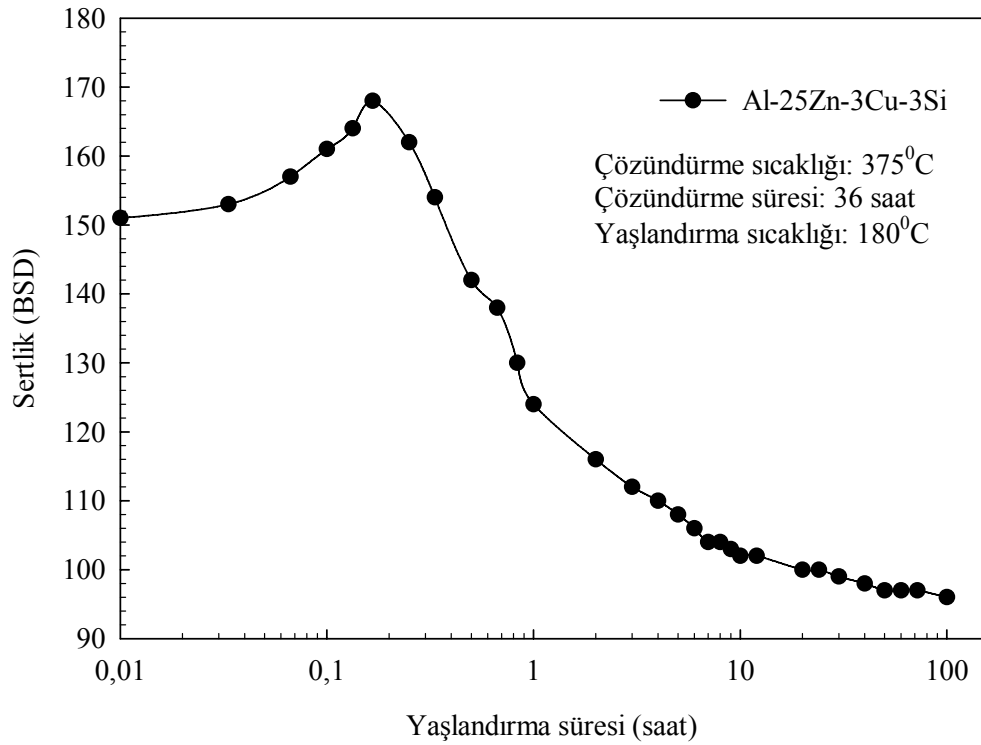
Şekil 29. Al-25Zn-(0-5)Cu alaşımlarının, (a) sertlik, mikrosertlik, çekme ve basma dayanımları ile (b) darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 30. Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının (a) sertlik, mikrosertlik, çekme ve basma dayanımları ile (b) darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 31. Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarının sertlik ve boyut değişimi değerlerinin stabilizasyon süresine göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 32. Çözündürme ve su verme işlemi sonrasında yaşlandırma işlemine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri

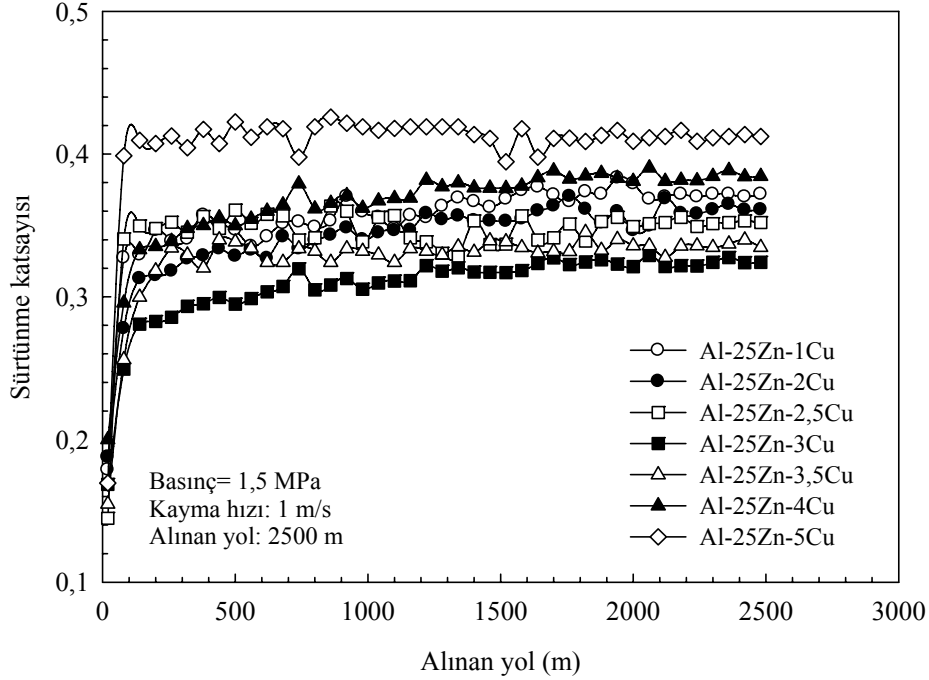
3.4 Sürtünme ve Aşınma Deneylelerinden Elde Edilen Bulgular

Yağsız durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 33-35’de, bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 36’da verilmiştir. Alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklıklarının deneylerin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde arttıktan sonra yaklaşık 200 m kayma mesafesi sonunda hemen hemen sabit değerlere ulaştıkları gözlemlendi. Alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının ise, alınan yola göre doğrusal bir değişim sergilediği gözlemlendi. Alaşımların sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin artan bakır oranı ile azalarak %3 Cu oranında en düşük değerini aldığı, bu orandan sonra ise artan bakır oranı ile arttığı belirlendi.

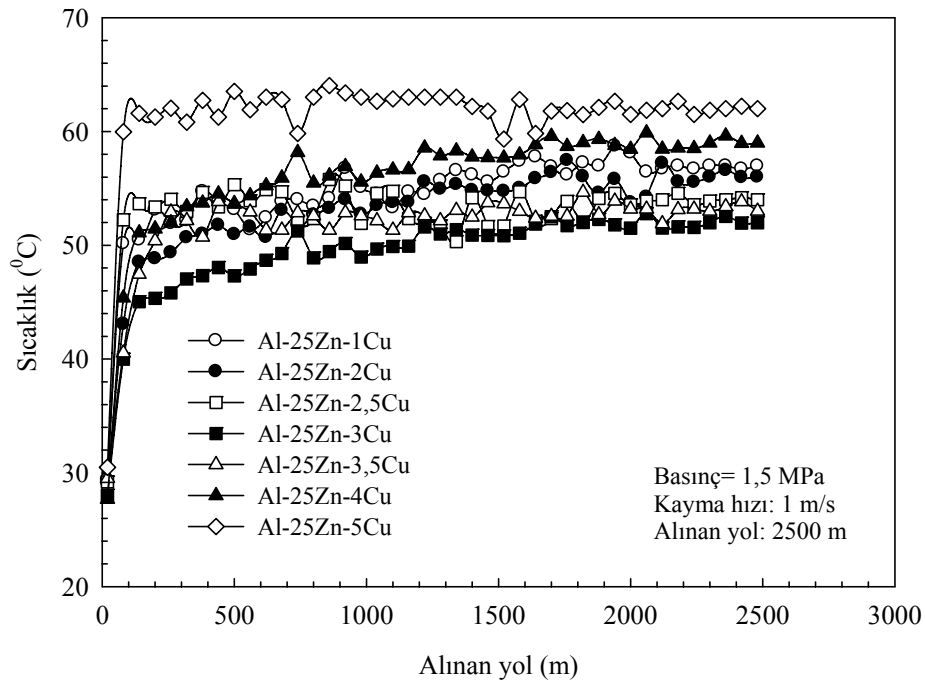
Silisyum içeren dörütlü Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarından yağsız durumda elde edilen sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler Şekil 37-39’da, bu değerlerin silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler ise Şekil 40’da verilmiştir. Söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklıklarının başlangıçta hızlı bir şekilde artarak yaklaşık 200 m’lik kayma mesafesi sonunda sabit değerlere ulaştıkları gözlemlendi. Bu alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının da, üçlü alaşımlarda olduğu gibi alınan yolla doğrusal bir değişim sergilediği görüldü. Ayrıca, dörütlü alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri artan silisyum oranı ile sürekli olarak artarken, hacim kaybının %3 Si oranına kadar artan silisyum oranı ile azaldığı, bu orandan sonra ise tekrar arttığı belirlendi.

Yağsız durumda farklı basınç ve hız değerlerinde deneye tabi tutulan alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri Tablo 9-11’de verilmiştir. Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımları ile SAE 65 ve 660 bronzlarının söz konusu özelliklerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 41-58’de, kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 59-67’de verilmiştir. Bu eğrilere bakıldığında Al-25Zn esaslı alaşımların sürtünme katsayılarının genelde artan basınç ile azaldığı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin ise arttığı belirlendi. SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısının ise artan basınçla azaldığı, ancak 1-1,5 MPa gerilme aralığından sonra tekrar arttığı gözlemlendi. Kayma hızı artıkça Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarının sürtünme katsayılarında önemli bir değişimin meydana gelmediği, ancak sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin arttığı gözlemlendi. SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısının ise artan

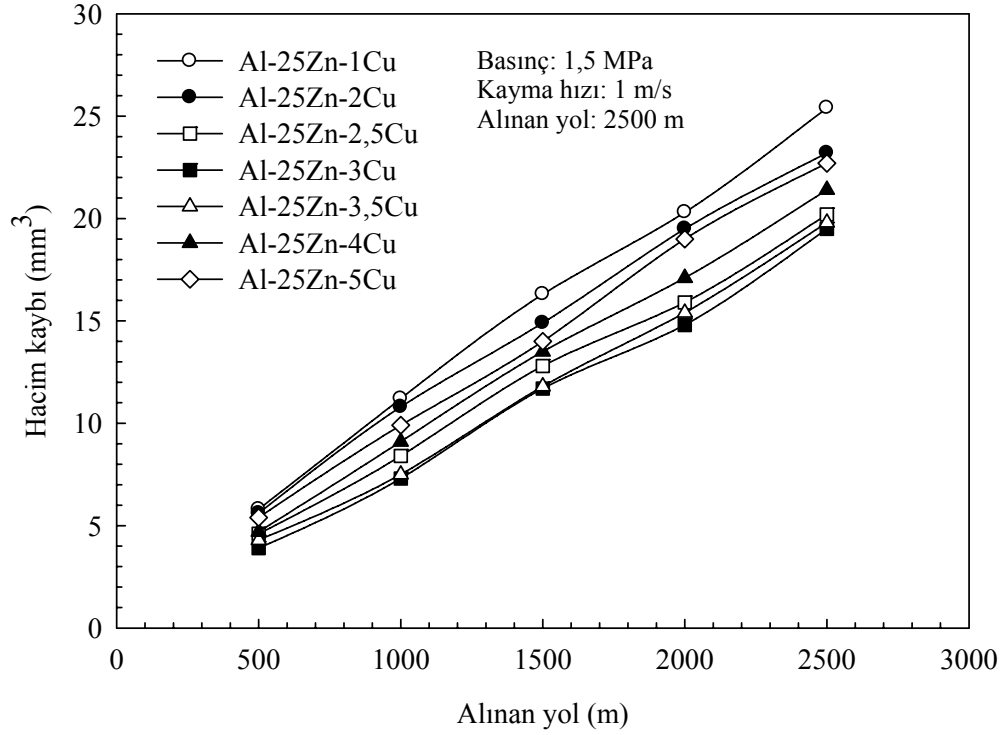
kayma hızı ile önce artma ve 0,75-1 m/s aralığında azalma gösterdikten sonra hızlı bir şekilde arttığı belirlendi.



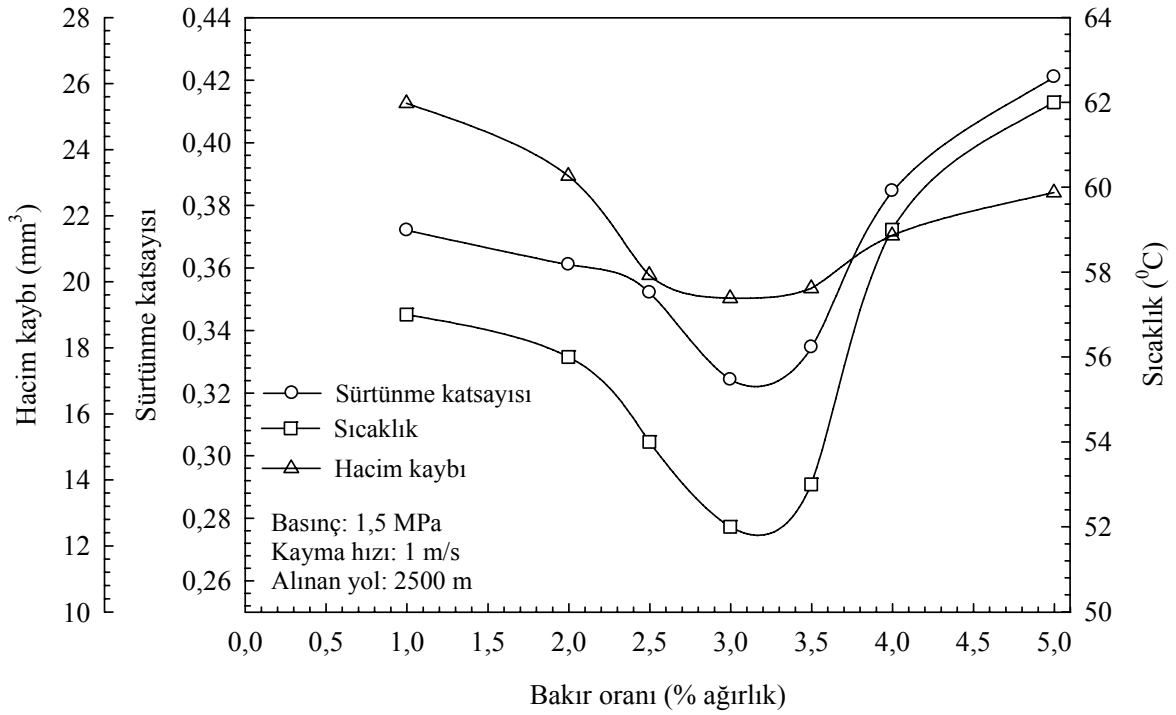
Şekil 33. Yağsız durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



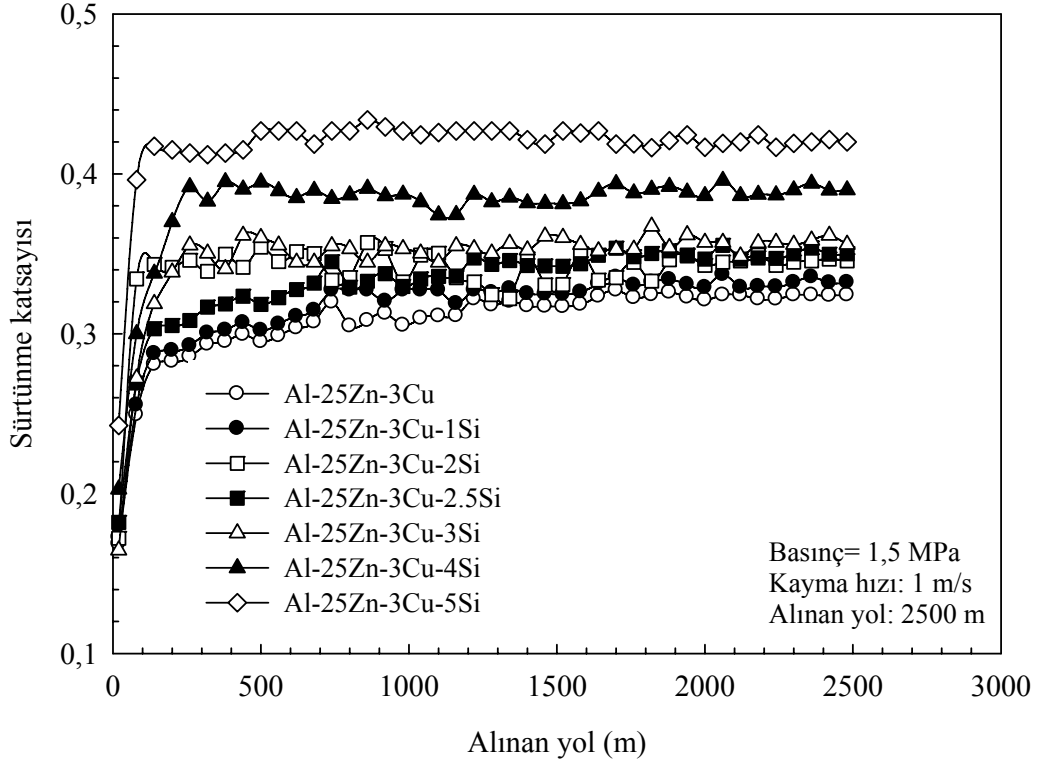
Şekil 34. Yağsız durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



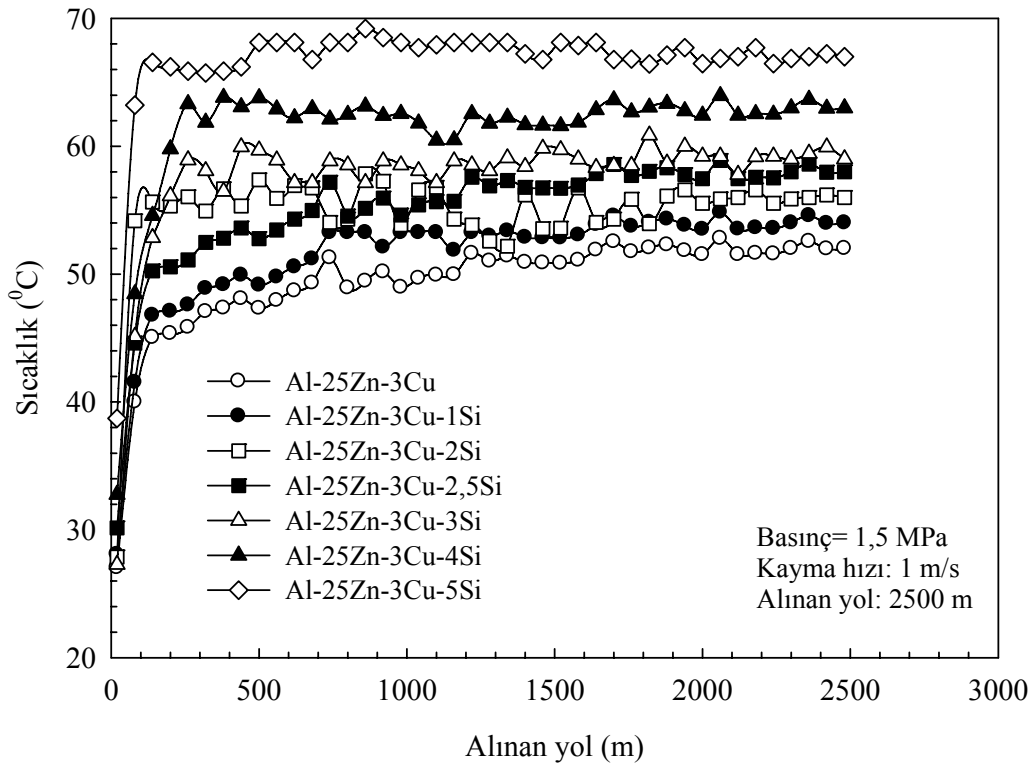
Şekil 35. Yağsız durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



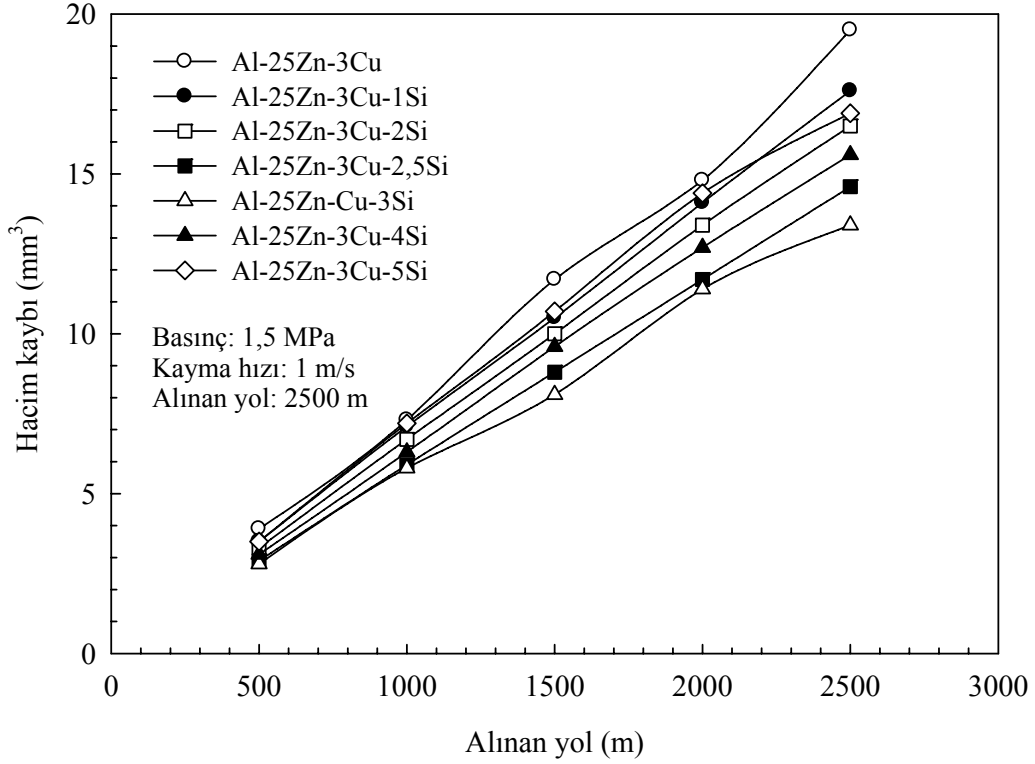
Şekil 36. Yağsız durumda Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin bakır oranına göre değişimini gösteren eğriler



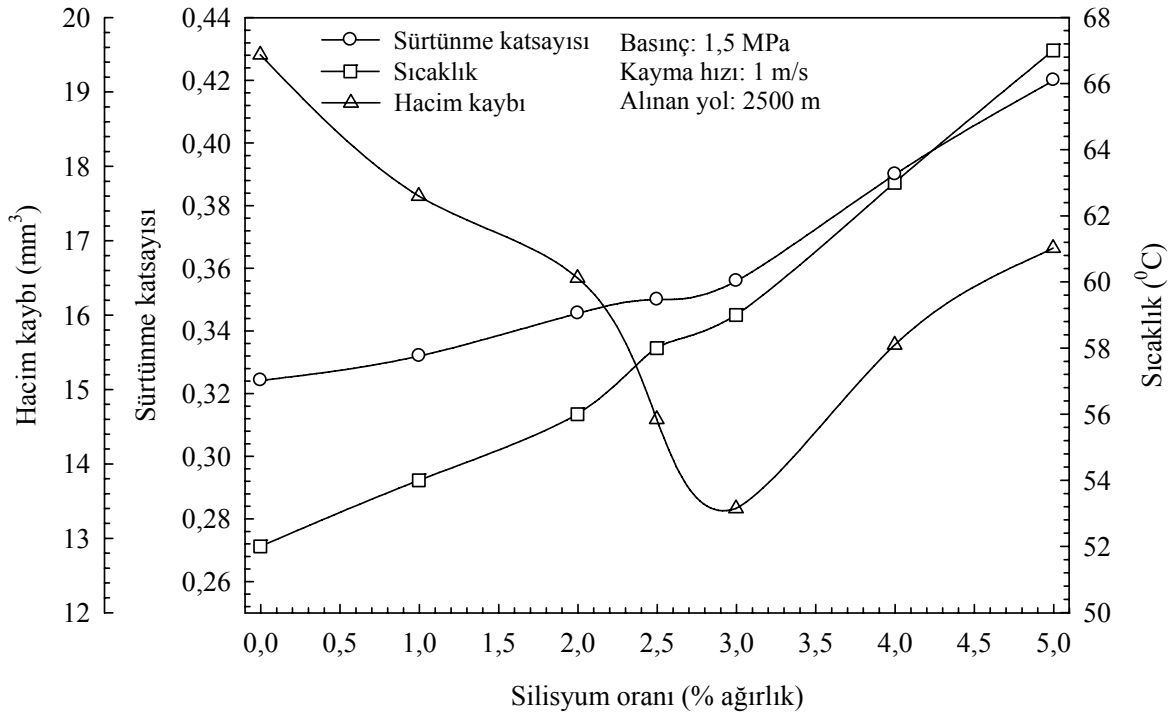
Şekil 37. Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 38. Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 39. Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 40. Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 9. Yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında deneye tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayıları

Basınç (MPa)	Kayma hızı (m/s)	Sürtünme katsayısı					
		Alaşım					
		Al-25Zn-3Cu	Al-25Zn-3Cu-3Si	Al-25Zn-3Cu-3Si (*)	Al-25Zn-3Cu-3Si (**)	SAE 65 bronz	SAE 660 bronz
0,5	0,5	0,420	0,430	0,474	0,500	0,610	0,650
	0,75	0,388	0,430	0,480	0,510	0,630	0,680
	1,0	0,367	0,423	0,471	0,520	0,620	0,660
	1,25	0,397	0,440	0,463	0,541	0,643	0,703
	1,5	0,366	0,451	0,482	0,560	0,650	0,720
1	0,5	0,358	0,380	0,452	0,460	0,582	0,620
	0,75	0,367	0,414	0,459	0,480	0,600	0,650
	1,0	0,326	0,392	0,421	0,503	0,610	0,640
	1,25	0,327	0,410	0,443	0,511	0,610	0,680
	1,5	0,334	0,423	0,461	0,540	0,622	0,692
1,5	0,5	0,346	0,360	0,423	0,440	0,570	0,620
	0,75	0,354	0,365	0,438	0,460	0,580	0,643
	1,0	0,324	0,372	0,397	0,490	0,590	0,630
	1,25	0,329	0,380	0,423	0,500	0,611	0,700
	1,5	0,322	0,390	0,421	0,532	0,630	0,713
2	0,5	0,345	0,352	0,432	0,430	0,560	0,610
	0,75	0,345	0,357	0,441	0,444	0,571	0,662
	1,0	0,358	0,362	0,432	0,480	0,580	0,640
	1,25	0,335	0,390	0,448	0,493	0,631	0,710
	1,5	0,309	0,410	0,436	0,510	0,640	0,720
2,5	0,5	0,357	0,352	0,443	0,455	0,566	0,611
	0,75	0,334	0,365	0,452	0,460	0,570	0,670
	1,0	0,370	0,380	0,443	0,480	0,595	0,660
	1,25	0,345	0,400	0,461	0,500	0,650	0,720
	1,5	0,326	0,420	0,463	0,510	0,670	0,730

(*) Stabilize edilmiş

(**) T7 ısıtılmasına tabi tutulmuş

Tablo 10. Yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında deneyi tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının çalışma sıcaklıkları

Basınç (MPa)	Kayma hızı (m/s)	Çalışma sıcaklığı					
		Alaşım					
		Al-25Zn-3Cu	Al-25Zn-3Cu-3Si	Al-25Zn-3Cu-3Si (*)	Al-25Zn-3Cu-3Si (**)	SAE 65 bronzu	SAE 660 bronzu
0,5	0,5	21	23	27	30	40	44
	0,75	23	23	30	32	43	46
	1,0	24	25	31	32	52	56
	1,25	24	26	32	35	56	59
	1,5	25	28	35	40	62	65
1	0,5	28	27	40	42	52	55
	0,75	28	32	43	45	52	58
	1,0	35	47	44	50	62	66
	1,25	36	53	53	55	65	72
	1,5	35	55	60	62	70	75
1,5	0,5	31	34	55	58	63	65
	0,75	36	37	62	63	71	74
	1,0	46	58	65	65	76	80
	1,25	51	61	67	69	78	81
	1,5	57	62	71	73	79	84
2	0,5	35	43	60	62	72	77
	0,75	44	44	64	65	76	80
	1,0	60	62	69	73	78	82
	1,25	65	63	74	76	84	85
	1,5	64	67	77	79	85	90
2,5	0,5	43	56	70	72	76	78
	0,75	46	58	74	76	78	82
	1,0	72	74	76	77	80	85
	1,25	75	76	81	82	88	90
	1,5	85	78	86	86	89	95

(*) Stabilize edilmiş

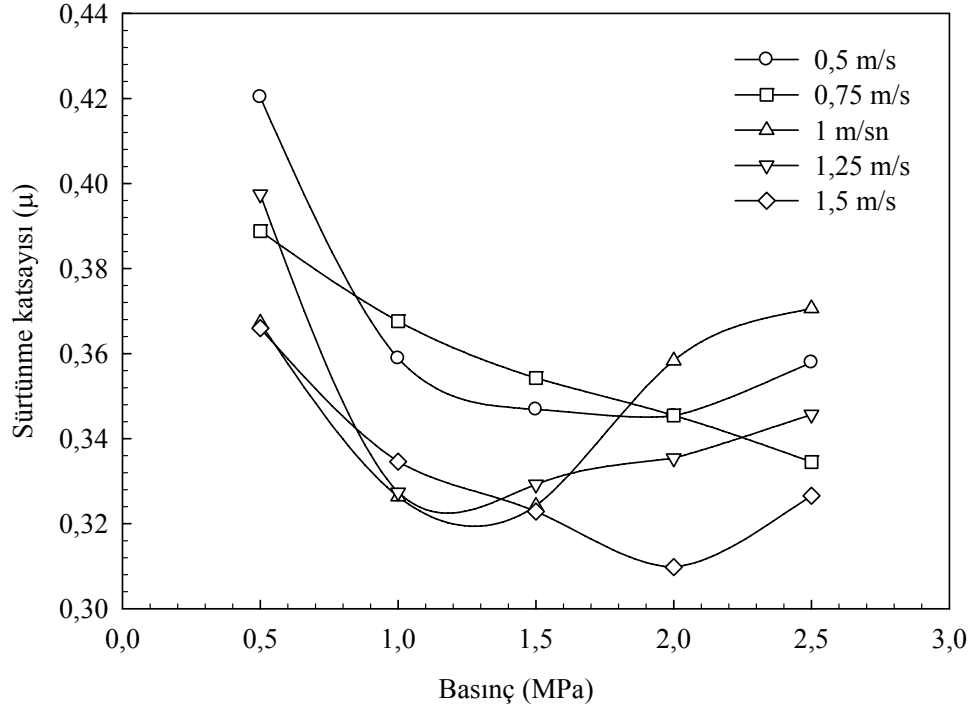
(**) T7 ısıtılma işlemine tabi tutulmuş

Tablo 11. Yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında deneye tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının değerleri

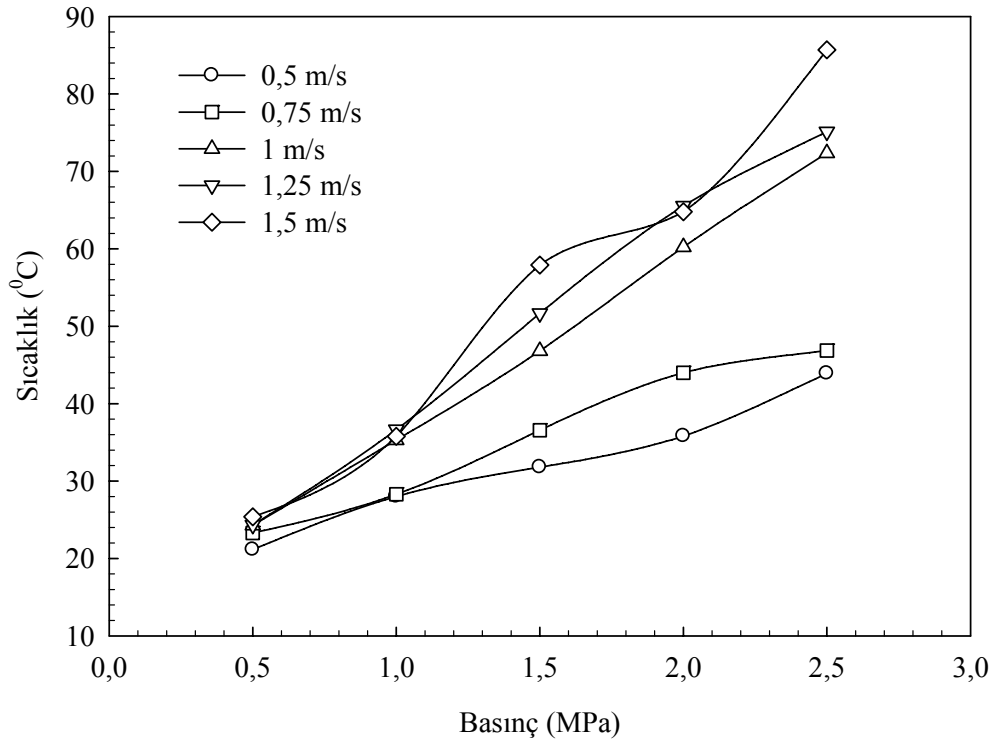
Basınç (MPa)	Kayma hızı (m/s)	Aşınma ile meydana gelen hacim kaybı (mm ³)					
		Alaşım					
		Al-25Zn-3Cu	Al-25Zn-3Cu-3Si	Al-25Zn-3Cu-3Si (*)	Al-25Zn-3Cu-3Si (**)	SAE 65 bronz	SAE 660 bronz
0,5	0,5	0,3180	0,2312	0,8122	1,3634	1,6032	2,1023
	0,75	1,8326	1,4023	1,9324	2,4554	2,7543	2,6342
	1,0	2,1345	1,8056	2,4123	2,5349	3,2543	3,9345
	1,25	2,5256	2,3234	2,6786	2,9600	3,8321	4,1353
	1,5	3,0220	2,6345	3,2345	3,2121	4,4542	4,7056
1	0,5	1,8500	1,7600	1,9645	2,1221	2,3034	3,4045
	0,75	2,3973	2,1300	2,4174	2,6654	2,9345	4,1453
	1,0	3,0911	2,6030	3,1567	3,3054	4,4234	4,6568
	1,25	4,5123	4,3030	4,5578	4,6023	4,9456	5,2234
	1,5	5,2343	5,0653	5,3456	5,5045	5,8043	5,9456
1,5	0,5	2,3239	1,9235	2,4567	2,5454	3,2430	4,5643
	0,75	3,3208	2,6034	3,5673	3,6043	4,7034	5,1045
	1,0	4,1220	2,9034	4,3085	5,7543	5,9435	7,1321
	1,25	5,6324	5,1830	5,8767	6,1056	6,4000	7,6056
	1,5	6,1230	5,9679	6,2136	6,5343	6,8012	7,9930
2	0,5	2,3851	2,1034	2,6569	2,9323	4,1043	5,2456
	0,75	4,5494	4,1043	4,6578	4,8056	6,4342	6,0323
	1,0	5,5104	4,5345	5,8895	6,2087	6,8346	8,6035
	1,25	7,3450	5,9121	7,6123	7,8342	8,3654	8,9020
	1,5	8,1736	7,9054	8,3241	8,4345	8,8456	9,6045
2,5	0,5	2,7979	2,6067	3,2312	4,8643	5,6067	6,7033
	0,75	6,4371	5,2034	6,5674	6,8432	8,3053	8,5323
	1,0	6,5343	6,4065	7,5645	7,7030	8,6232	9,9112
	1,25	8,6305	7,7134	8,8785	8,9343	9,1345	10,1034
	1,5	9,3093	9,1089	9,4332	9,6345	10,9781	11,3642

(*) Stabilize edilmiş

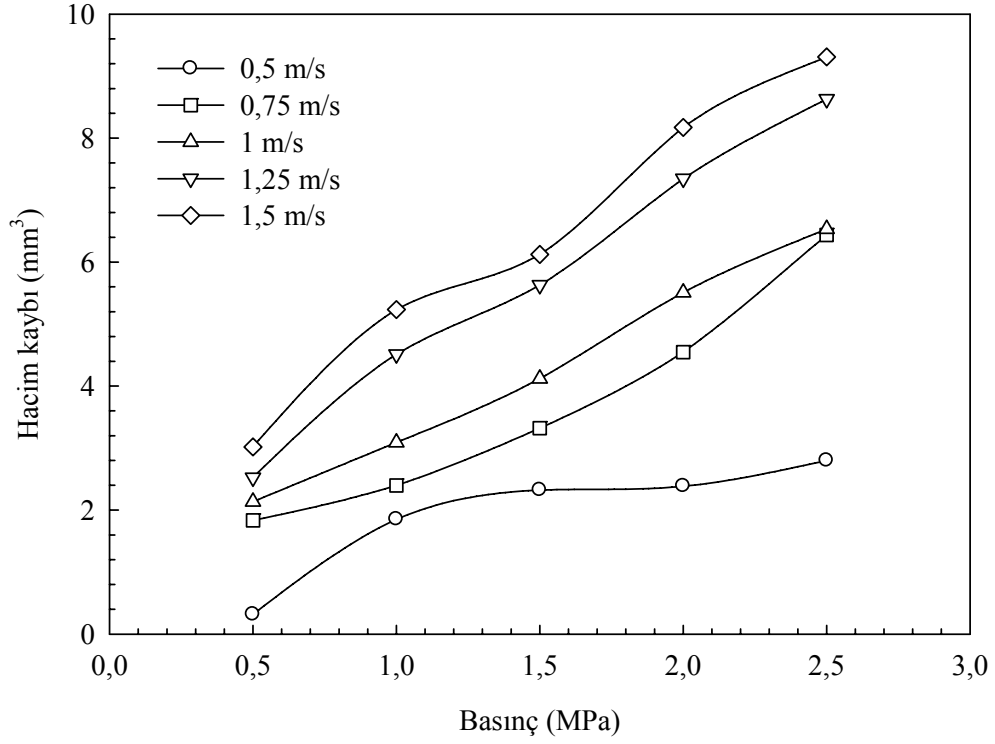
(**) T7 ısıtılma işlemine tabi tutulmuş



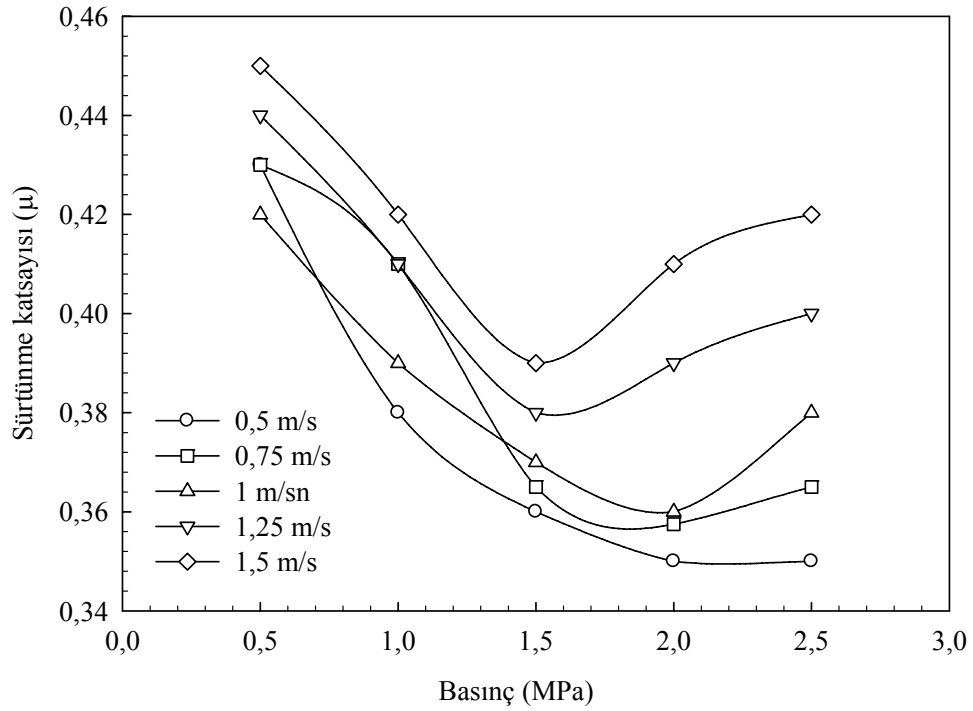
Şekil 41. Yağsız (kuru) durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler



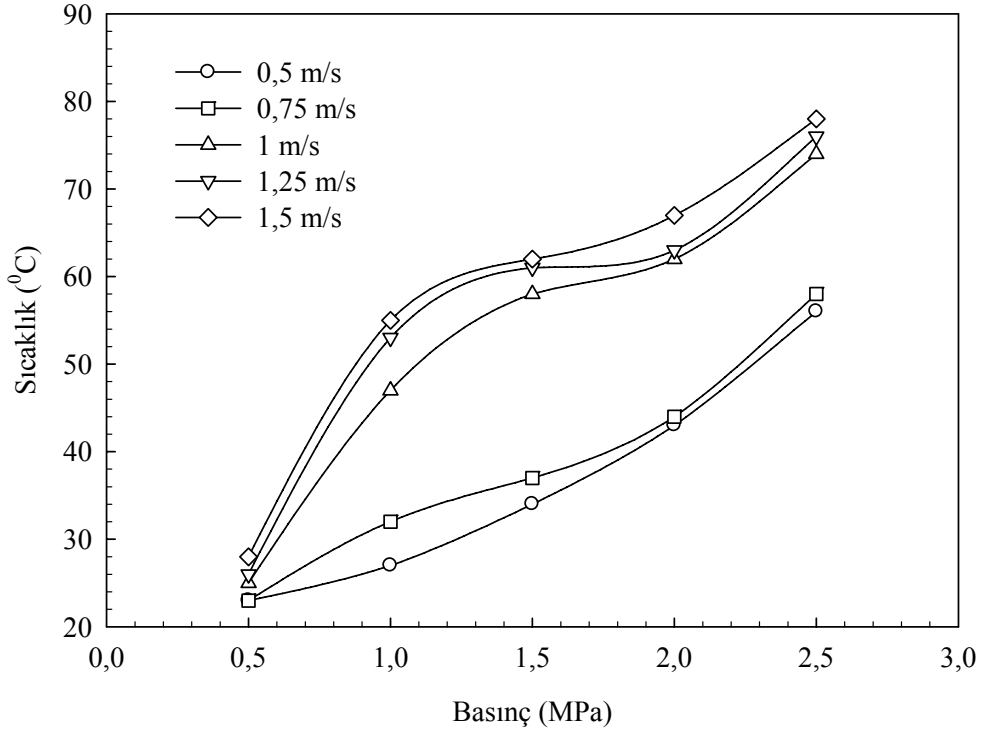
Şekil 42. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının çalışma sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler



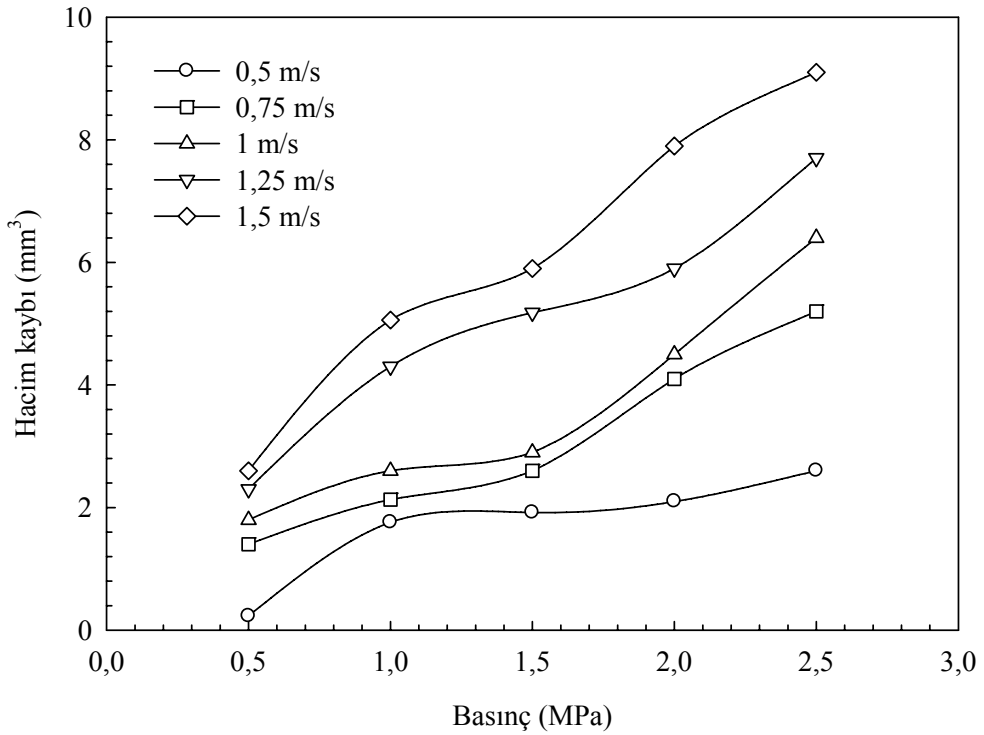
Şekil 43. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler



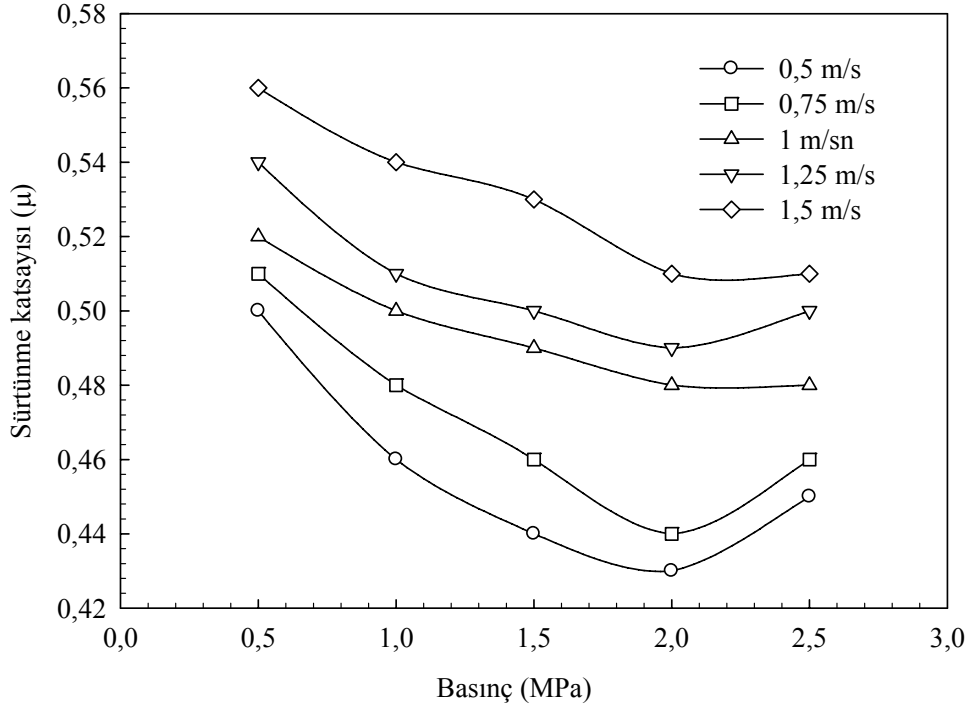
Şekil 44. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler



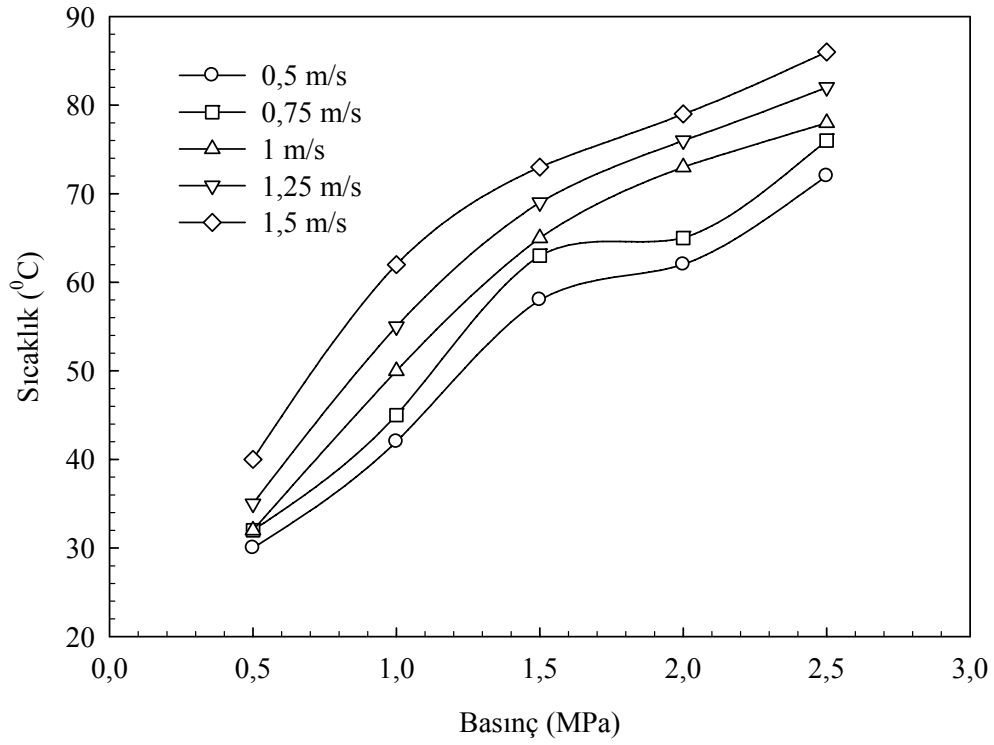
Şekil 45. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının çalışma sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler



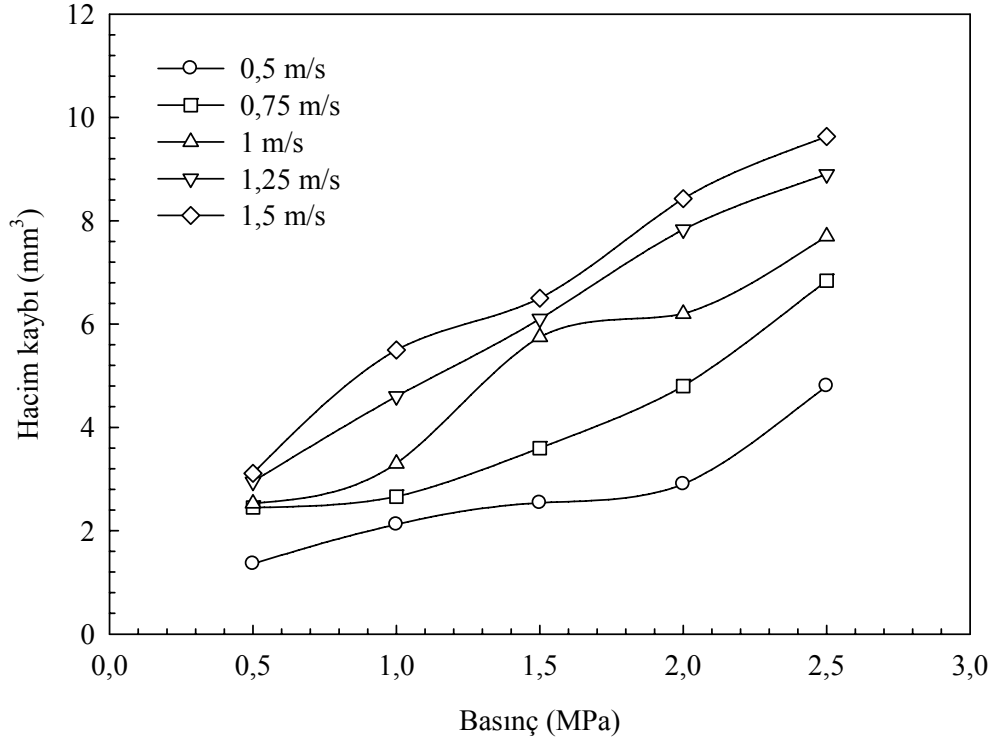
Şekil 46. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler



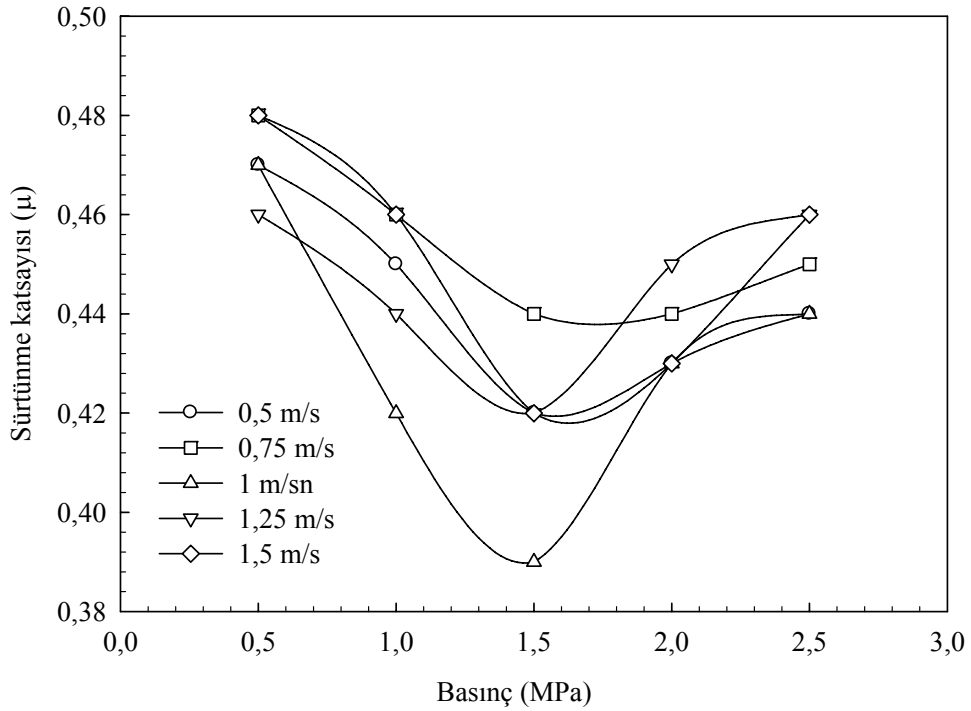
Şekil 47. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan T7 ısıt işleme görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler



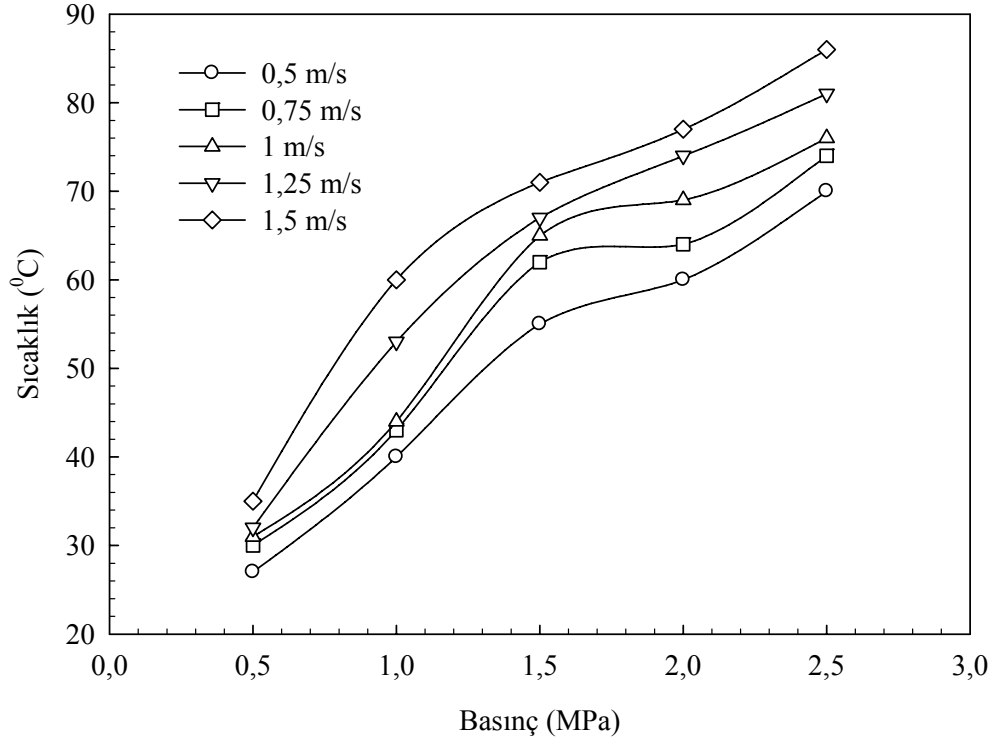
Şekil 48. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan T7 ısıt işleme görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler



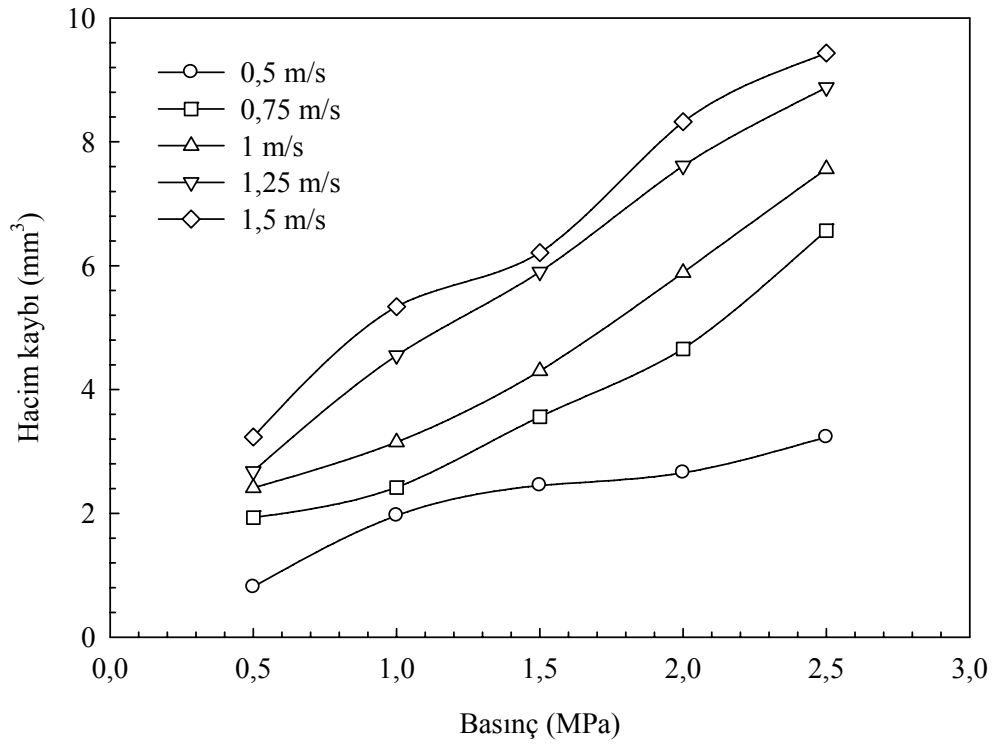
Şekil 49. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan T7 ısıl işlemi görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler



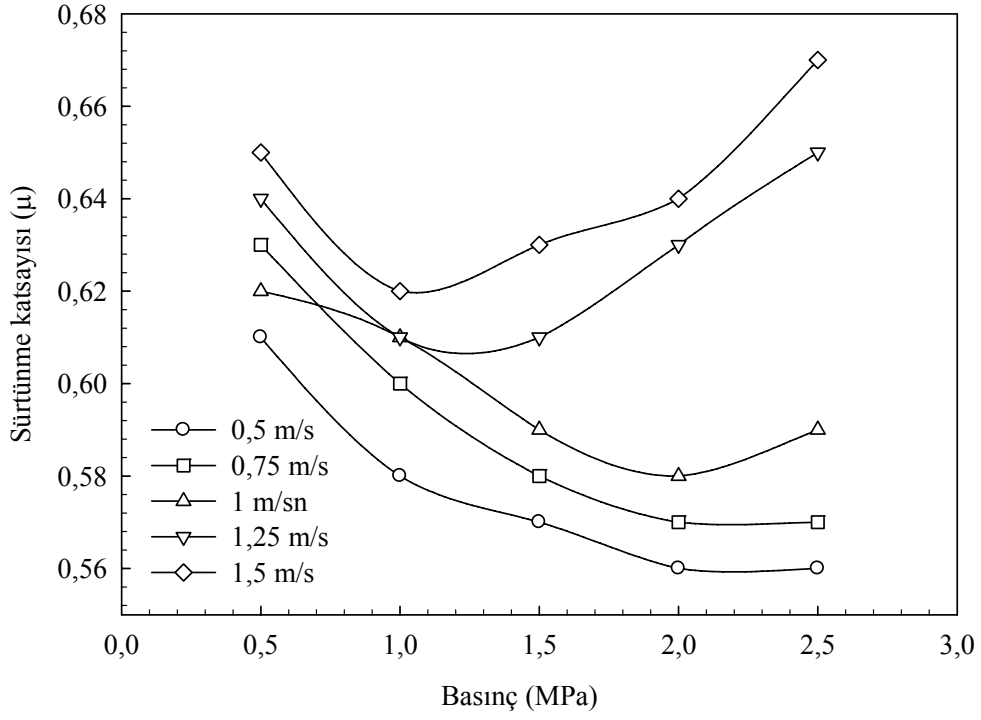
Şekil 50. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan stabilize edilmiş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler



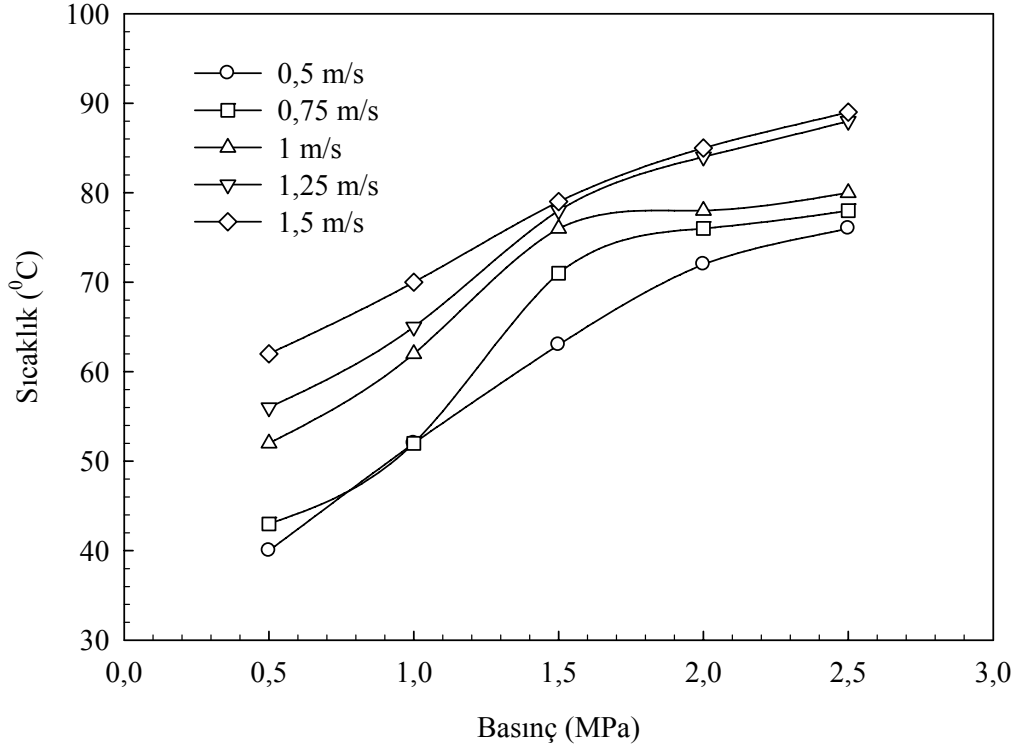
Şekil 51. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan stabilize edilmiş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler



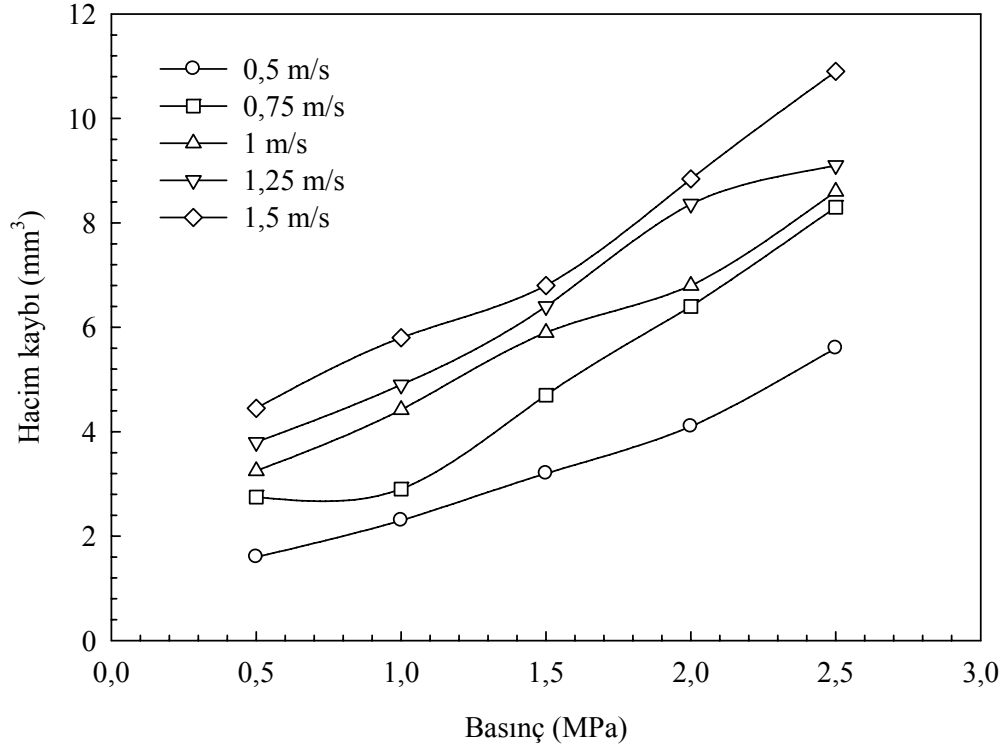
Şekil 52. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan stabilize edilmiş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler



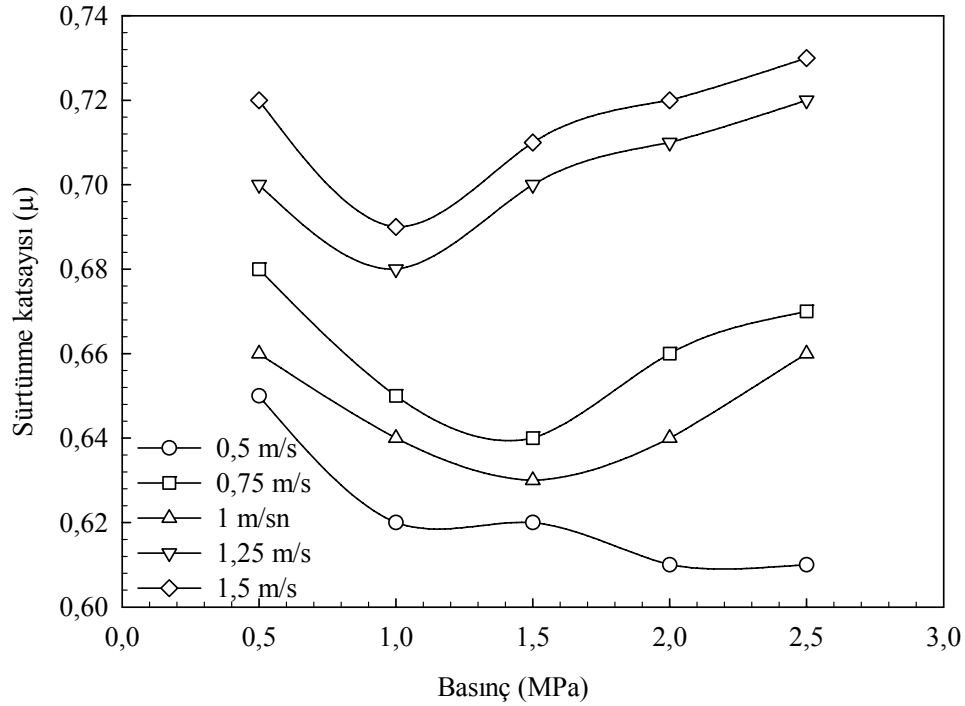
Şekil 53. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler



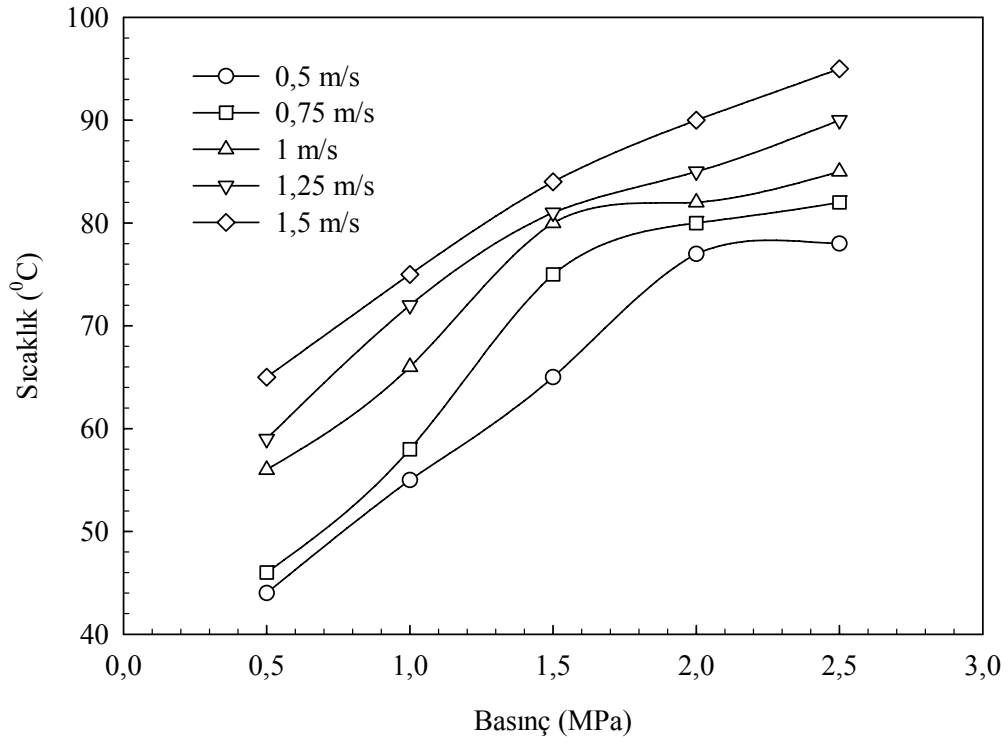
Şekil 54. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler



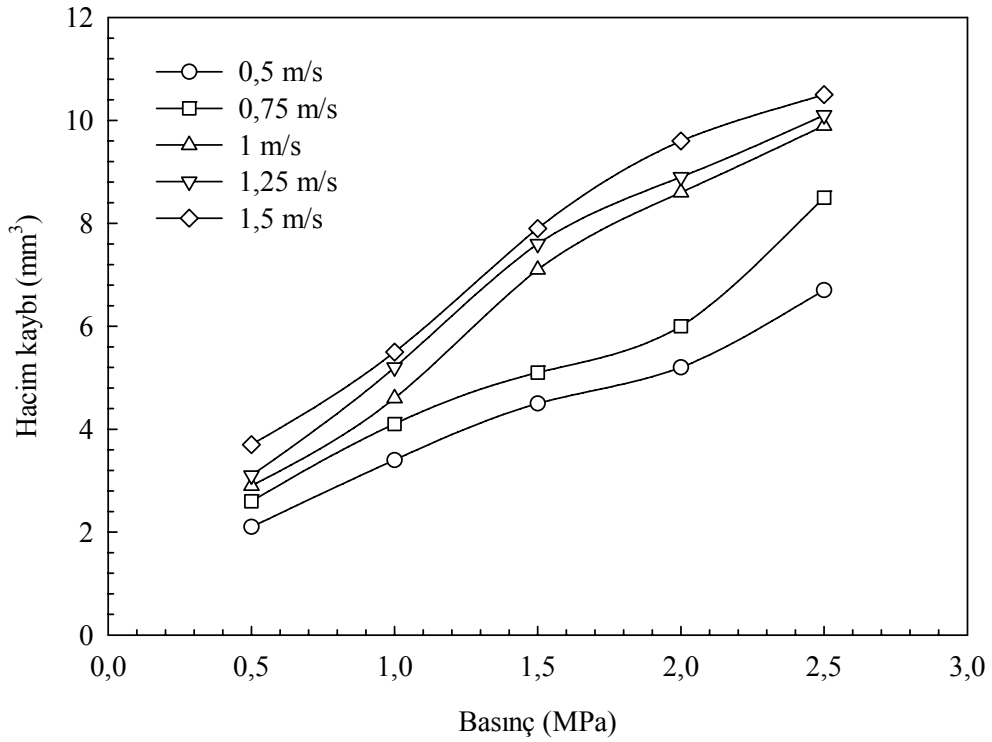
Şekil 55. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler



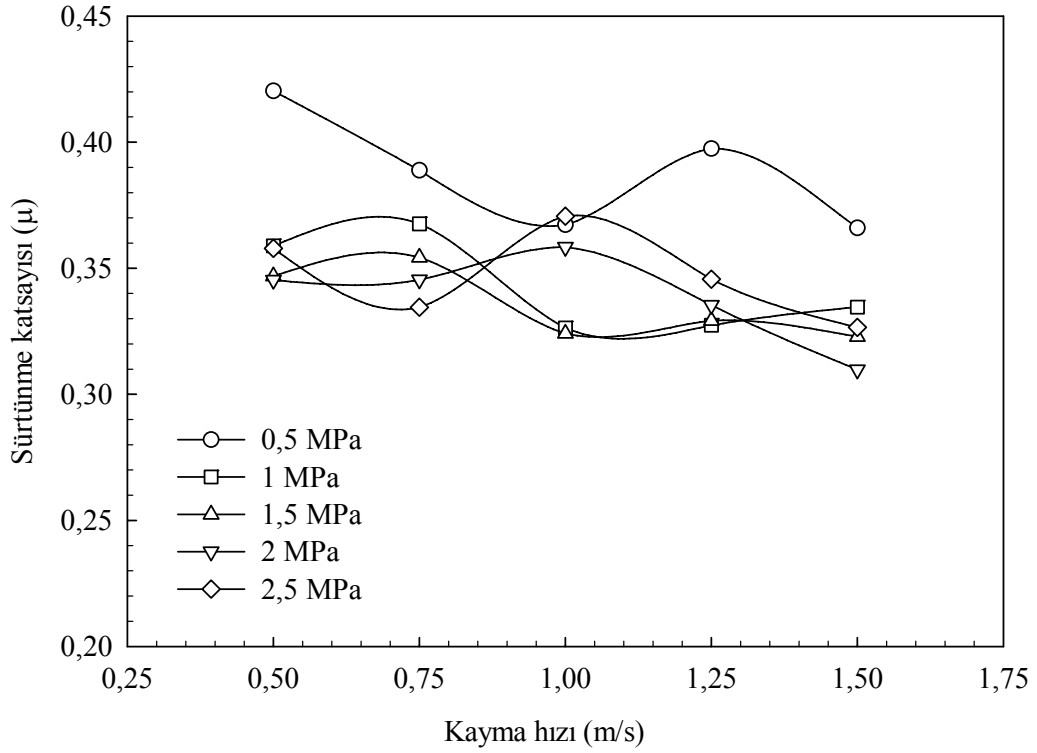
Şekil 56. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler



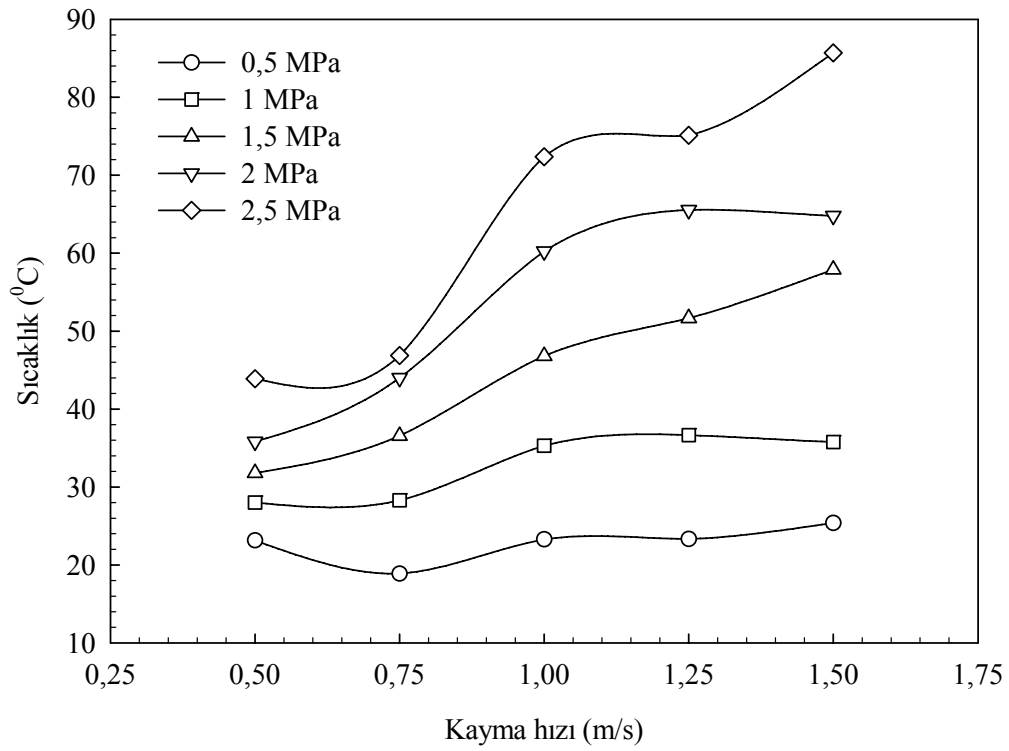
Şekil 57. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler



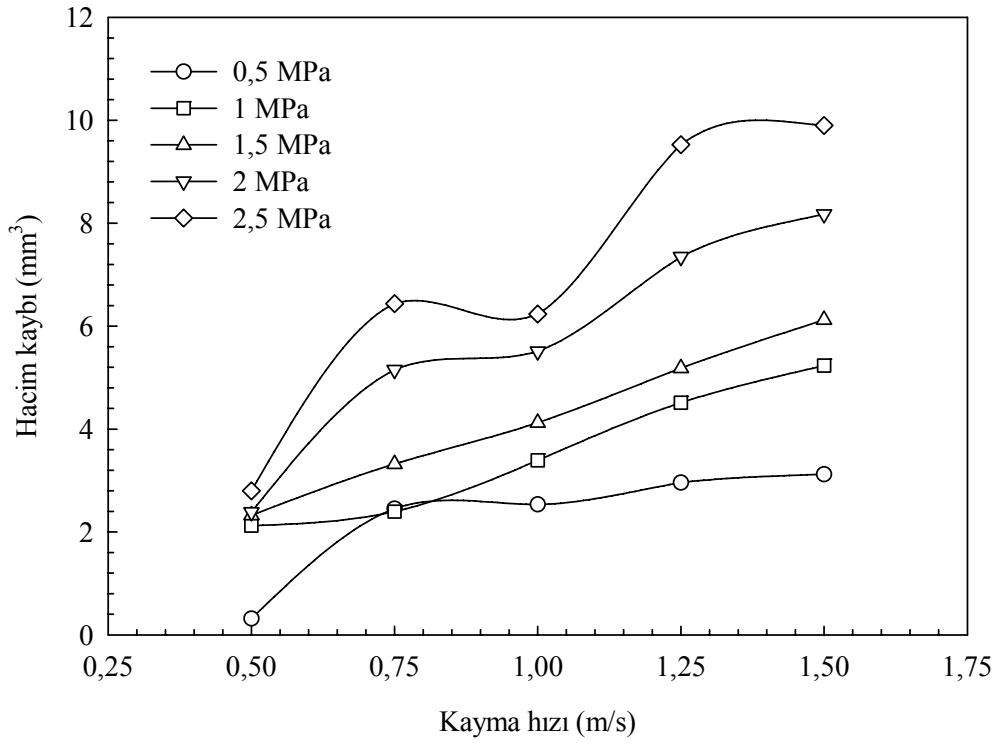
Şekil 58. Yağsız durumda farklı hızlarda deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler



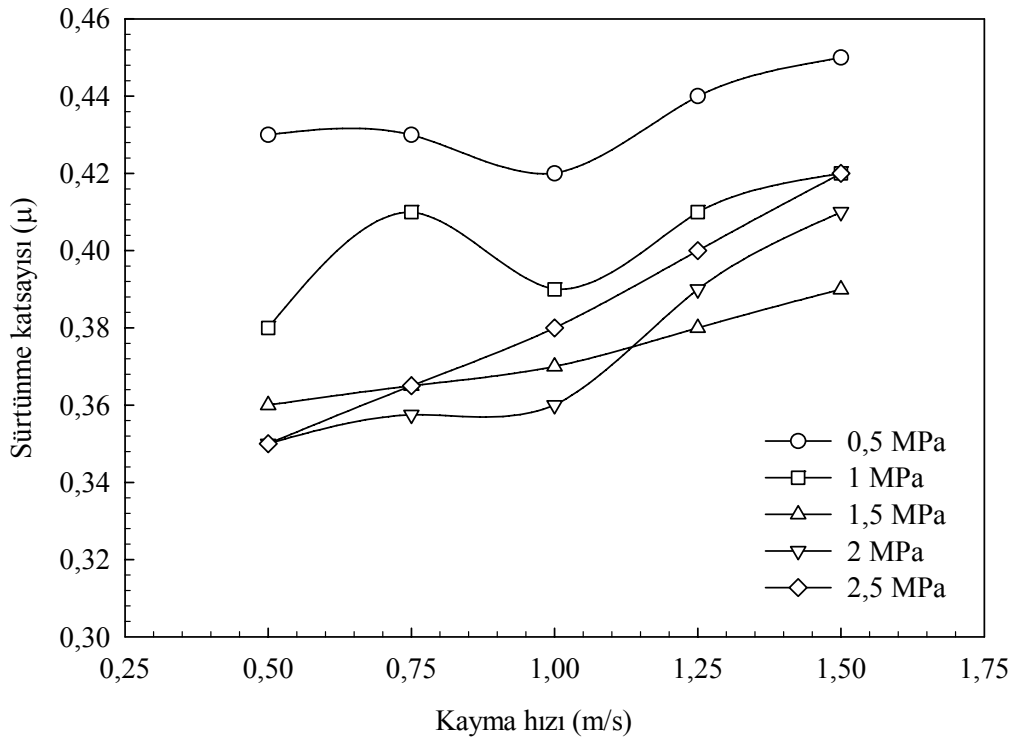
Şekil 59. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının sürtünme katsayısının hıza göre değişimini gösteren eğriler



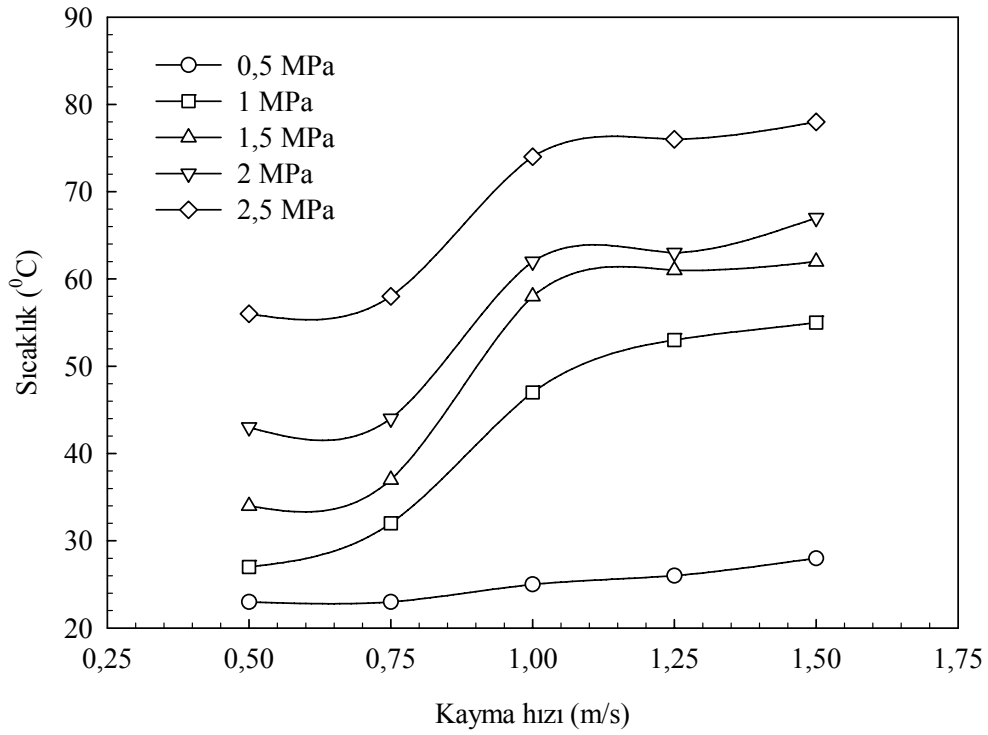
Şekil 60. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının çalışma sıcaklığının hıza göre değişimini gösteren eğriler



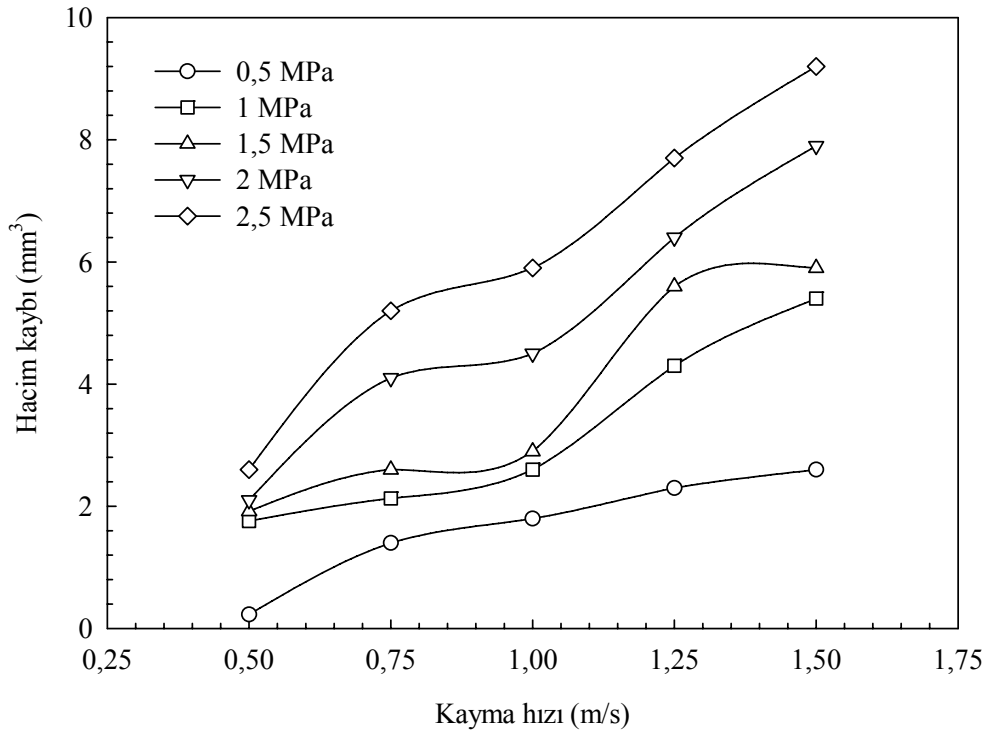
Şekil 61. Yağsız durumda ve farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımında meydana gelen hacim kaybının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler



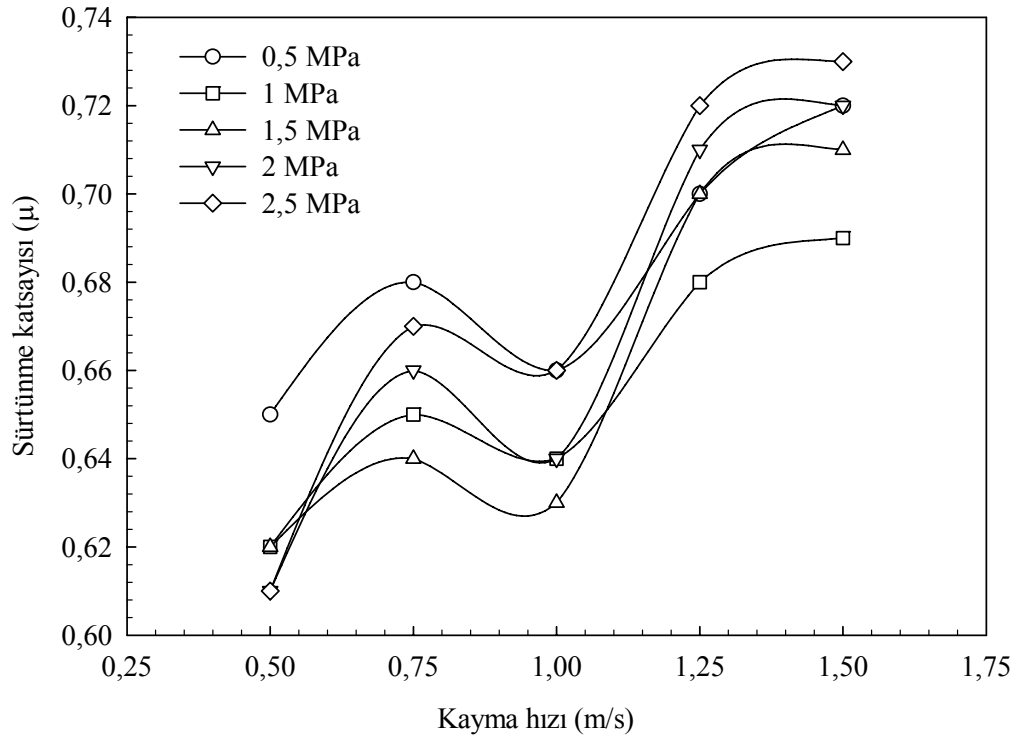
Şekil 62. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sürtünme katsayısının hıza göre değişimini gösteren eğriler



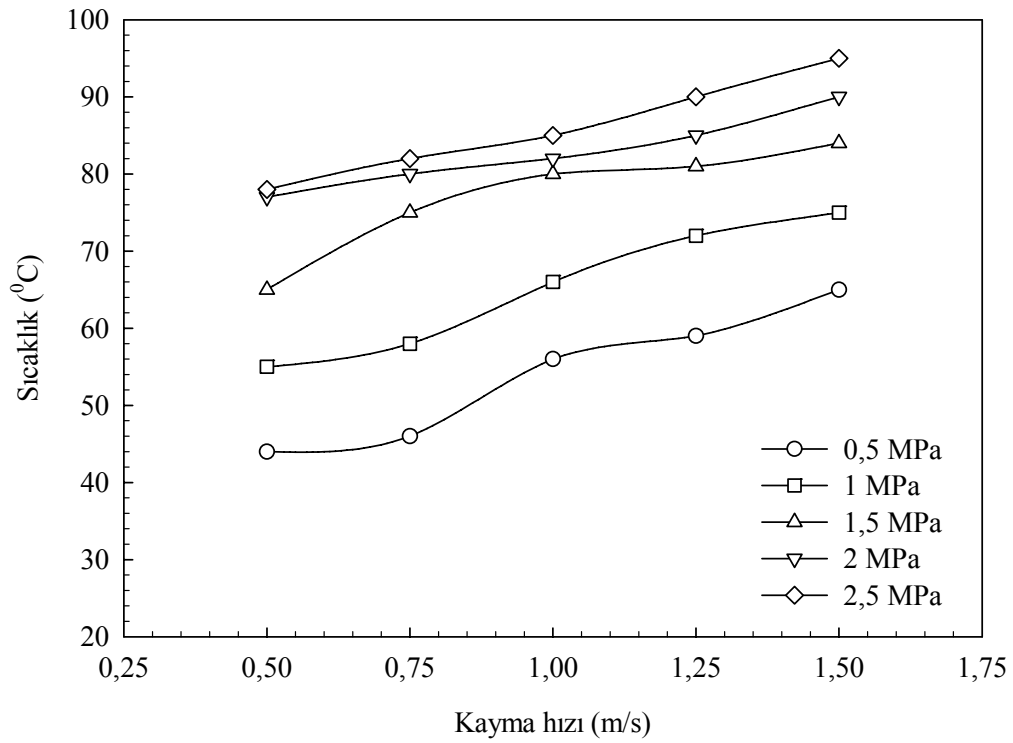
Şekil 63. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının çalışma sıcaklığının hıza göre değişimini gösteren eğriler



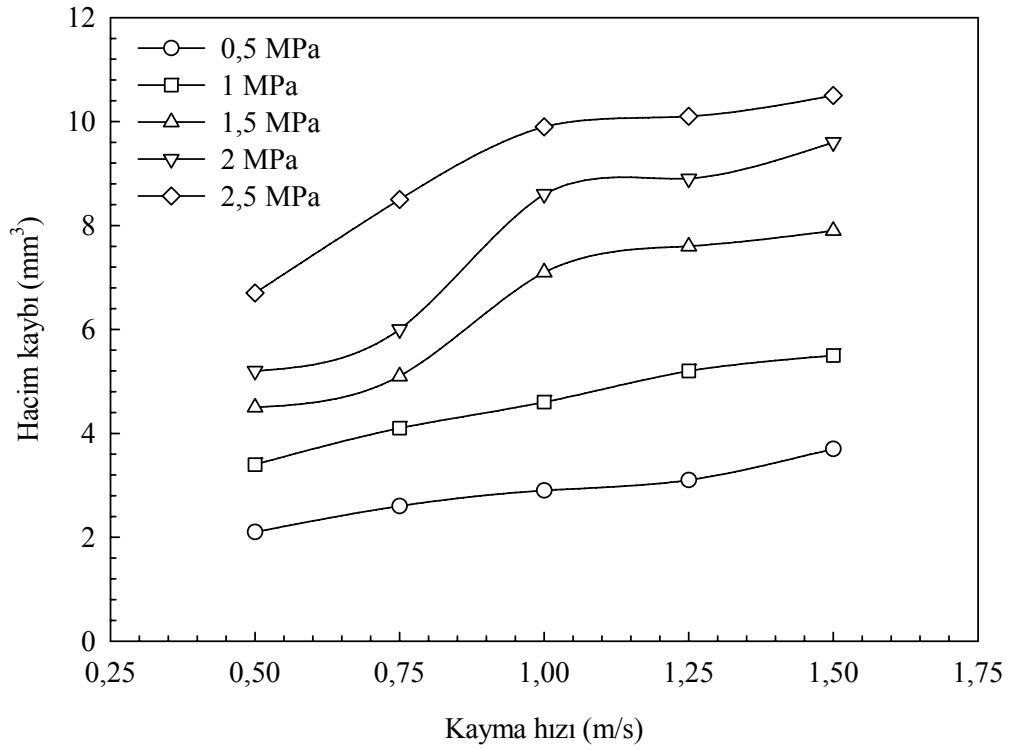
Şekil 64. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının hıza göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 65. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneyeye tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısının hıza göre değişimini gösteren eğriler

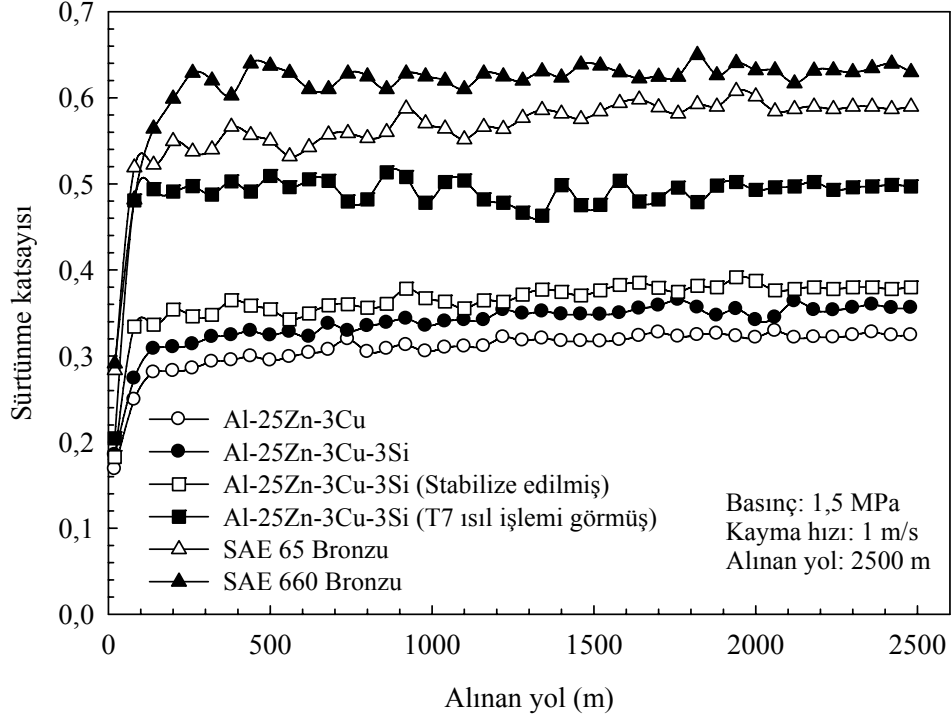


Şekil 66. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneyeye tabi tutulan SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklığının hıza göre değişimini gösteren eğriler

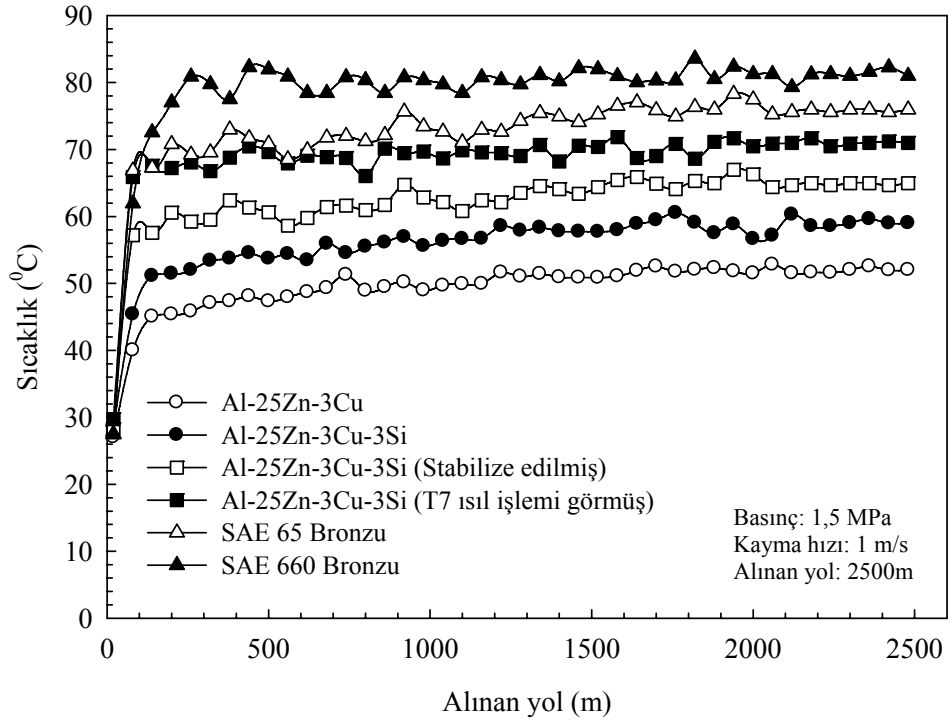


Şekil 67. Yağsız durumda farklı basınçlarda deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının hıza göre değişimini gösteren eğriler

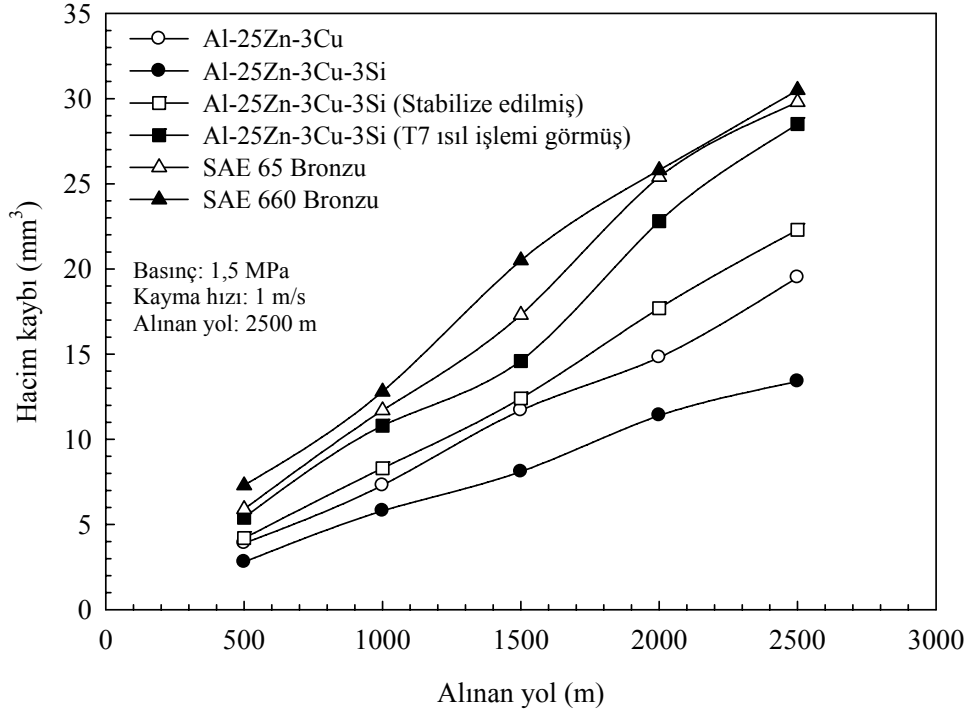
Yağsız durumda 1,5 MPa basınç ve 1 m/s kayma hızında 2500 m'lik yol alınıncaya kadar deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımları ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler Şekil 68-70'de verilmiştir. Bu eğrilere bakıldığında alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklıklarının deneyin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde arttıktan sonra yaklaşık 200 m kayma mesafesi sonunda sabit değerlere ulaştığı gözlemlendi. Deneye tabi tutulan alaşımlar içerisinde Al-25Zn-3Cu alaşımının en düşük, SAE 660 bronzunun ise en yüksek sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerini sergilediği görüldü. Alaşımlarda meydana gelen aşınma kaybının alınan yolla hemen hemen doğrusal bir değişim sergilediği belirlendi. Deneye tabi tutulan alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direnci dökülmüş durumdaki Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımından elde edildi.



Şekil 68. Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler

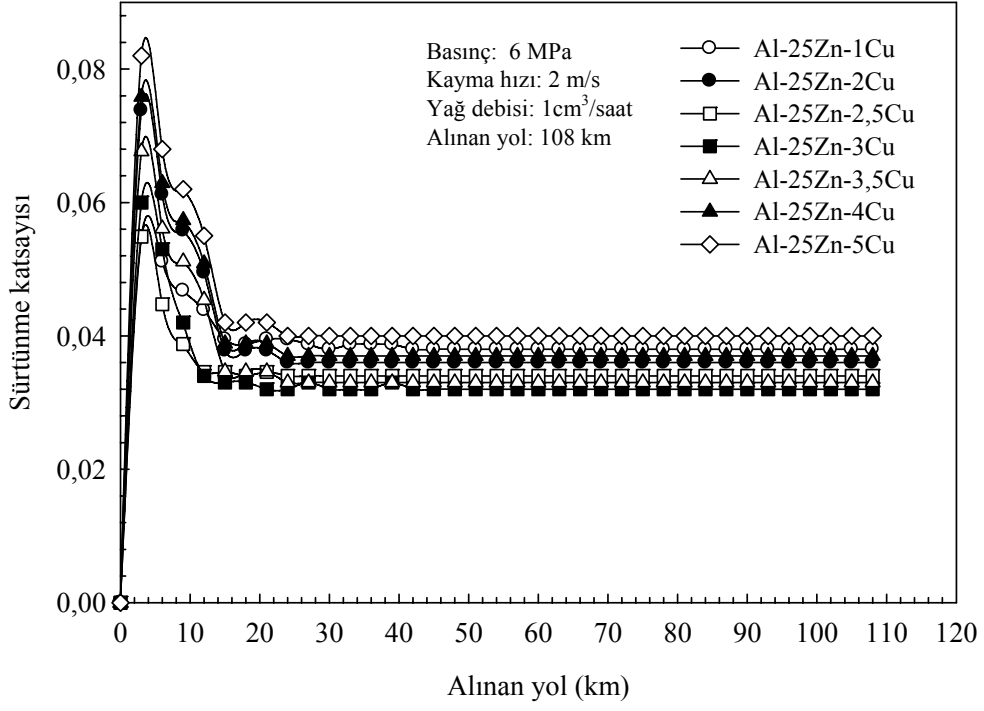


Şekil 69. Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler

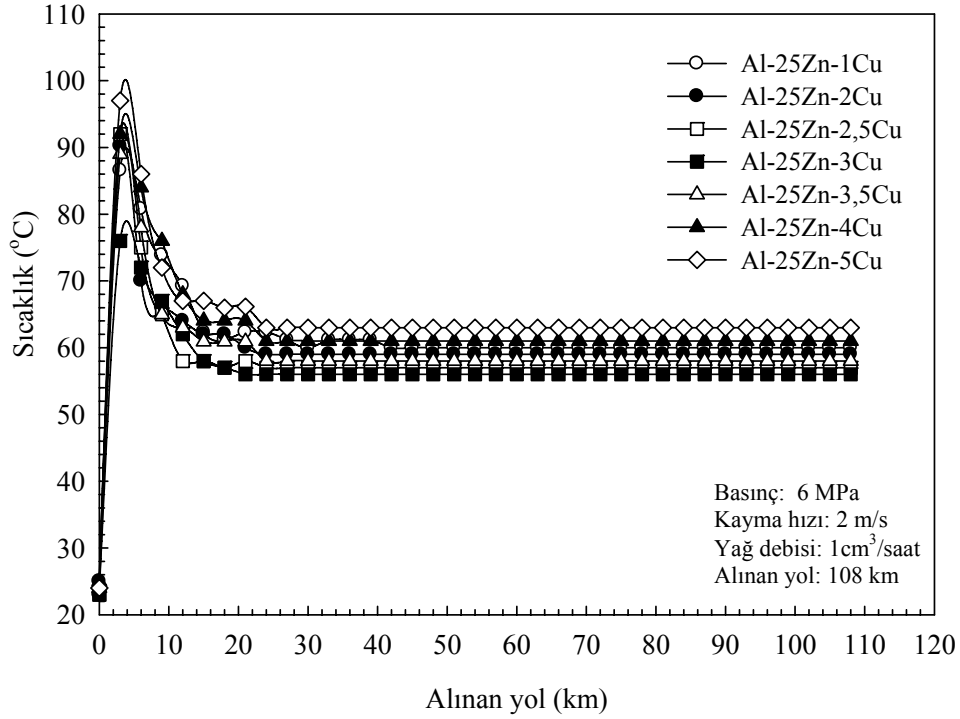


Şekil 70. Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler

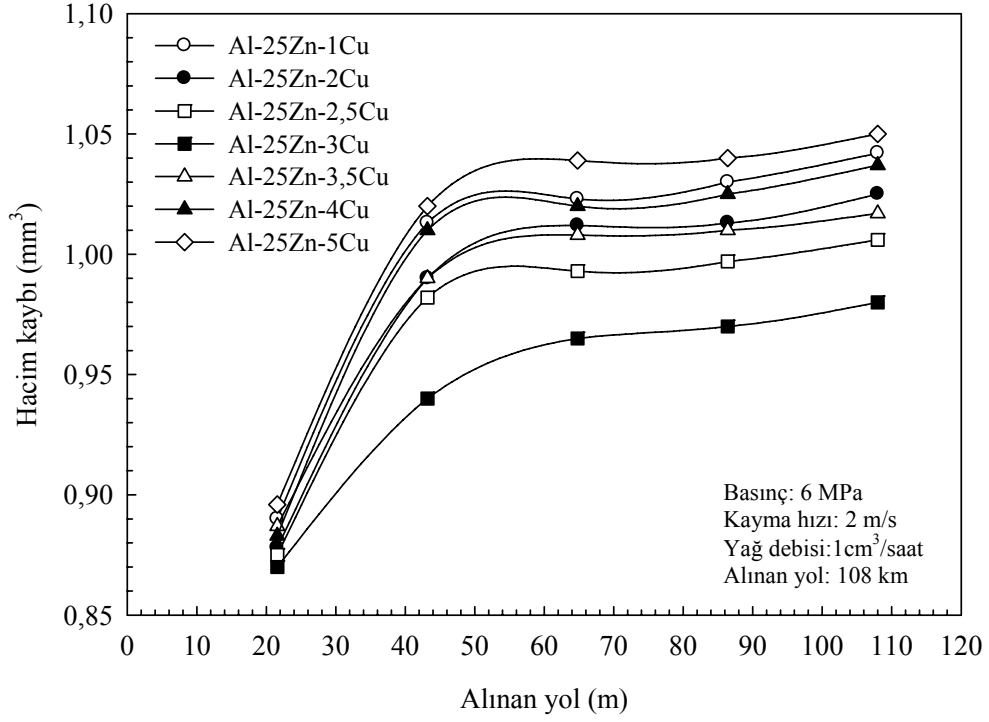
Yağlı durumda 108 km'lik yol tamamlanincaya kadar sürtünme ve aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu ve Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 71-73 ve 74-76'da, bakır ve silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler ise sırasıyla Şekil 77 ve 78'de verilmiştir. Alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklıklarının deneylerin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde arttığı ve yaklaşık 20 km'lik kayma yolu sonunda hemen hemen sabit değerlere ulaştığı gözlemlendi. Bu eğriler ayrıca, alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının da deneylerin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde arttığını, ancak 40 km gibi daha uzun bir kayma yolu sonunda sabit kaldığını göstermektedir. Söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağlı ve yağsız çalışma durumlarında birbirine benzer değişimler sergilediği gözlemlendi. Şöyle ki, bu büyüklüklerin artan bakır oranı ile azalarak %3 Cu oranında en düşük değerlerini aldığı, bu orandan sonra ise artan bakır oranı ile arttığı belirlendi. Ayrıca, dördü alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin artan silisyum oranı ile sürekli arttığı; hacim kaybı değerlerinin %3 Si oranına kadar azaldığı, bu oranın üzerine çıkılması durumunda ise tekrar artmaya başladığı gözlemlendi.



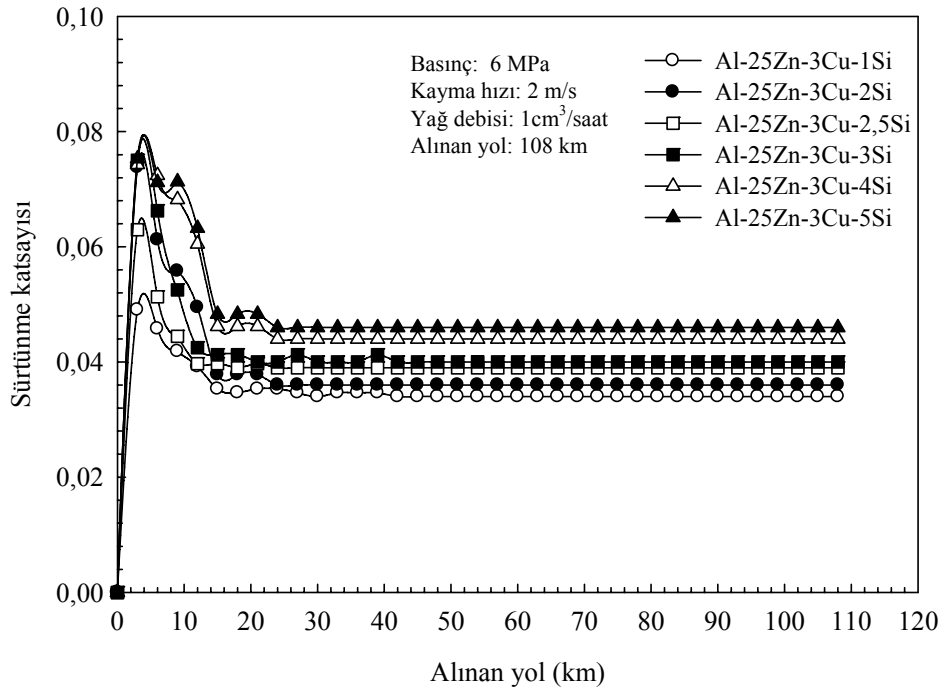
Şekil 71. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



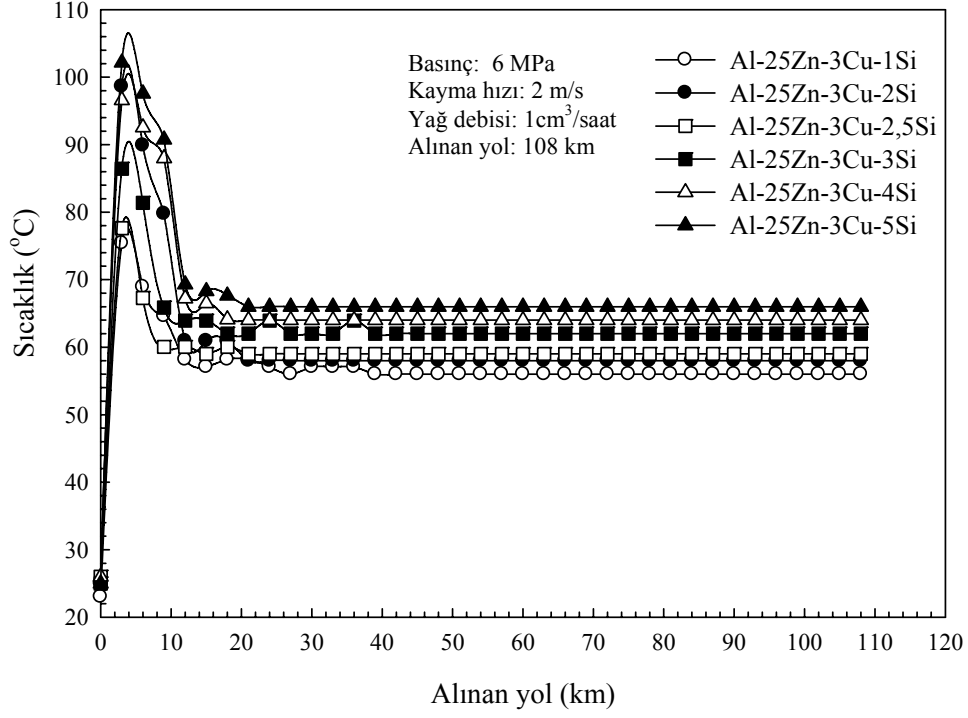
Şekil 72. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sıcaklıklarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



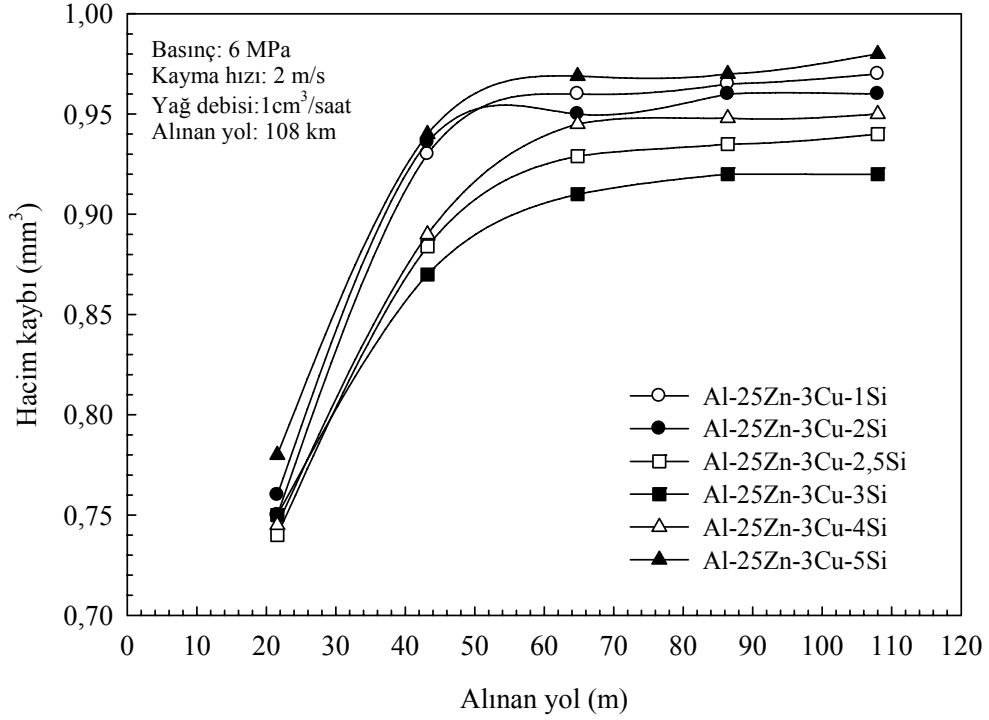
Şekil 73. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarında meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



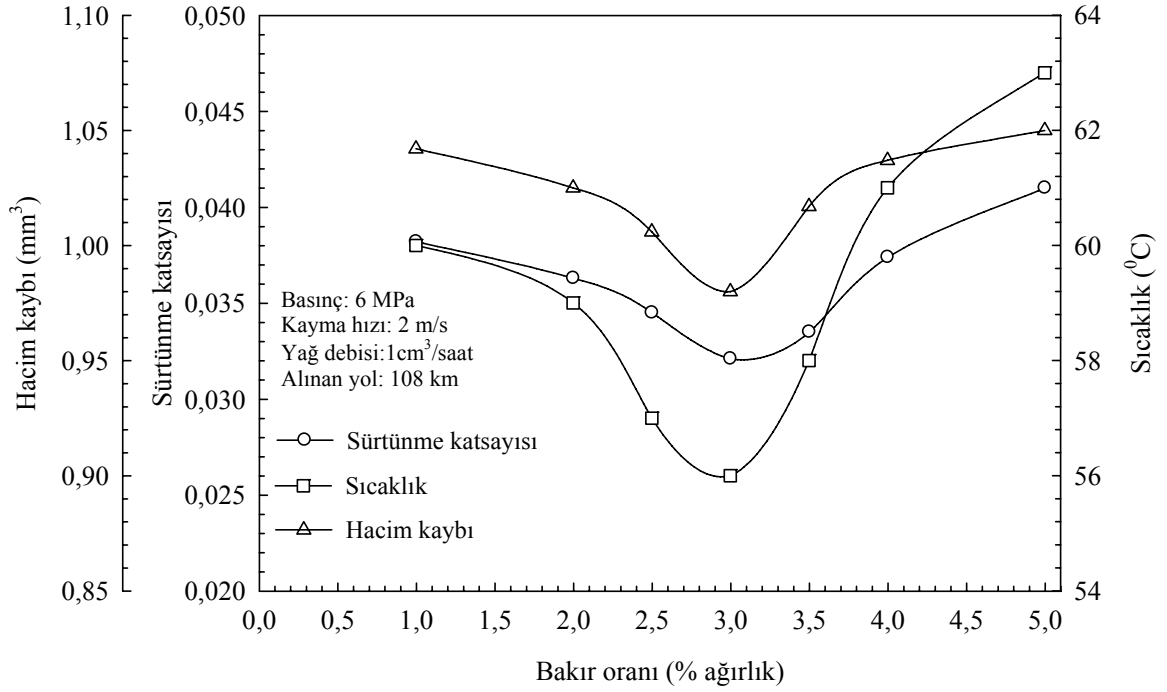
Şekil 74. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



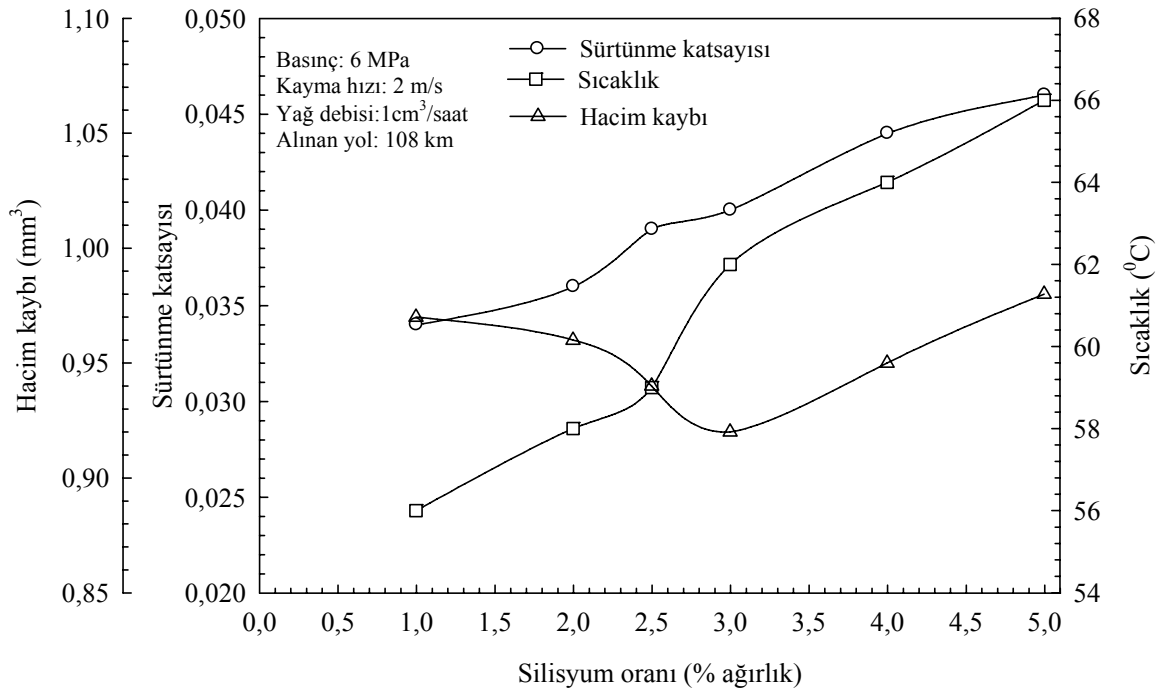
Şekil 75. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 76. Yağlı durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarında meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 77. Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının yağlı durumdaki sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin bakır oranına göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 78. Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının yağlı durumdaki sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler

Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri sırasıyla Tablo 12, 13 ve 14’de, bu değerlerin yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler ise Şekil 79, 80 ve 81’de verilmiştir. Bu tablo ve şekiller alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybının artan yağ debisi ile azaldığını, 1,5 cm³/saat’lik yağ debisinden sonra ise hemen hemen sabit kaldıklarını göstermektedir.

Farklı basınçlarda aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının sürtünme katsayısı, sıcaklığı ve bu alaşımlarda 30 km’lik kayma yolu sonunda meydana gelen hacim kaybı değerleri sırasıyla Tablo 15, 16 ve 17’de, bunların basınca göre değişimlerini gösteren eğriler de Şekil 82, 83 ve 84’de verilmiştir. Bu eğriler alaşımların sürtünme katsayısının artan basınç ile sürekli azaldığını, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin ise sürekli arttığını göstermektedir.

Alaşımların sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayısı ve sıcaklıklarıyla bu alaşımlarda 30 km’lik kayma yolu sonunda meydana gelen hacim kaybı değerleri sırasıyla Tablo 18, 19 ve 20’de, bu değerlerin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler ise sırasıyla Şekil 85, 86 ve 87’de verilmiştir. Bu eğriler, alaşımların sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızından fazla etkilenmediğini, ancak sürekli rejim sıcaklığının artan kayma hızı ile sürekli arttığını göstermektedir.

Tablo 12. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayıları

Alaşım	Yağ debisi (cm ³ /saat)				
	0,5	1	1,5	2	2,5
	Sürtünme katsayısı				
Al-25Zn-3Cu	0,074	0,032	0,031	0,031	0,030
Al-25Zn-3Cu-3Si	0,079	0,040	0,039	0,039	0,038
Al-25Zn-3Cu-3Si*	0,080	0,044	0,043	0,043	0,043
Al-25Zn-3Cu-3Si**	0,081	0,047	0,046	0,045	0,045
SAE 65 bronz	0,092	0,052	0,052	0,053	0,052
SAE 660 bronz	0,085	0,057	0,056	0,057	0,056

* Stabilize edilmiş

** T7 ısıtılmış işlemine tabi tutulmuş

Tablo 13. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürekli rejim durumundaki çalışma sıcaklıkları

Alaşım	Yağ debisi (cm ³ /saat)				
	0,5	1	1,5	2	2,5
	Sıcaklık (°C)				
Al-25Zn-3Cu	78	56	55	54	54
Al-25Zn-3Cu-3Si	83	62	61	61	60
Al-25Zn-3Cu-3Si*	86	63	62	62	61
Al-25Zn-3Cu-3Si**	85	65	64	63	64
SAE 65 bronzu	92	68	68	67	67
SAE 660 bronzu	94	70	69	69	69

* Stabilize edilmiş

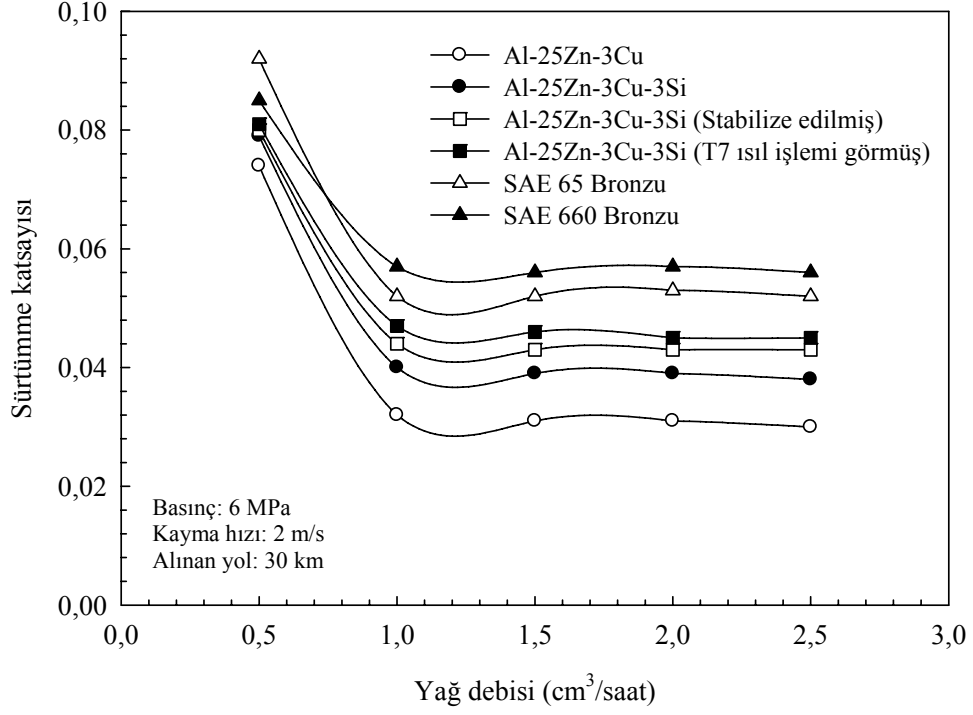
** T7 ısıtılmış işlemine tabi tutulmuş

Tablo 14. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları

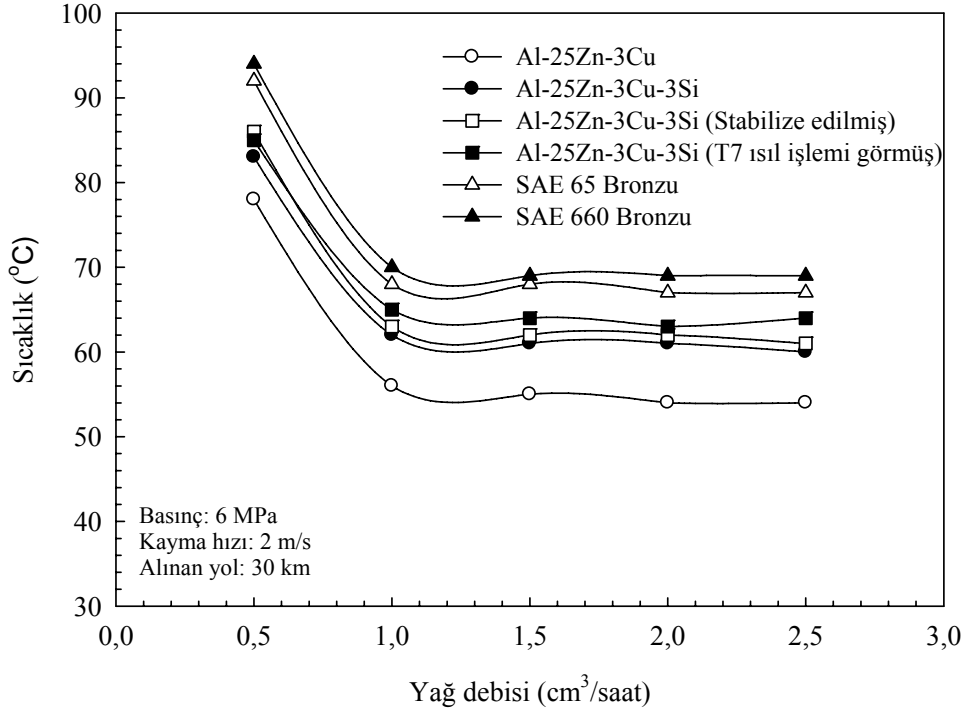
Alaşım	Yağ debisi (cm ³ /saat)				
	0,5	1	1,5	2	2,5
	Hacim kaybı (mm ³)				
Al-25Zn-3Cu	2,2	0,93	0,89	0,86	0,83
Al-25Zn-3Cu-3Si	1,98	0,85	0,81	0,80	0,79
Al-25Zn-3Cu-3Si*	2,45	0,94	0,91	0,87	0,85
Al-25Zn-3Cu-3Si**	2,65	0,95	0,93	0,90	0,87
SAE 65 bronzu	2,8	1,12	0,99	0,98	0,97
SAE 660 bronzu	2,9	1,08	0,97	0,96	0,95

* Stabilize edilmiş

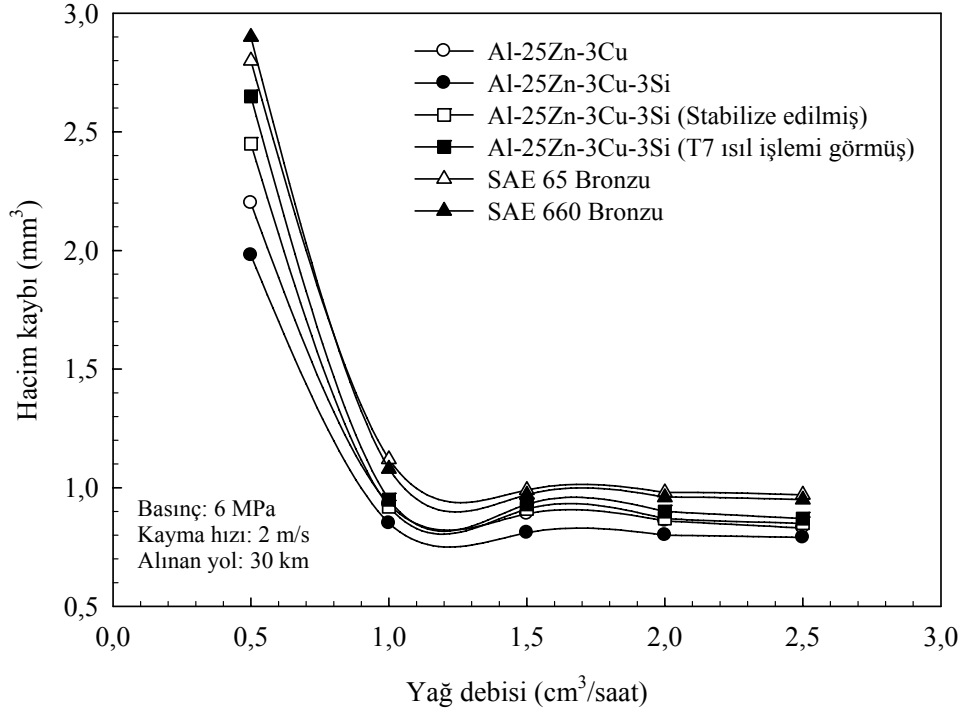
** T7 ısıtılmış işlemine tabi tutulmuş



Şekil 79. Al-25Zn esaslı alaşımları ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 80. Al-25Zn esaslı alaşımların ve bronzlarının sıcaklıklarının yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 81. Al-25Zn esaslı alaşımlarda ve bronzlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 15. Farklı basınçlarda deneye tabi tutulan alaşımların sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayıları

Alaşım	Basınç (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Sürtünme katsayısı							
Al-25Zn-3Cu	0,053	0,048	0,043	0,037	0,033	0,032	0,033	0,033
Al-25Zn-3Cu-3Si	0,062	0,058	0,056	0,051	0,043	0,041	0,043	0,043
Al-25Zn-3Cu-3Si*	0,064	0,061	0,057	0,053	0,046	0,044	0,044	0,043
Al-25Zn-3Cu-3Si**	0,065	0,062	0,058	0,055	0,054	0,048	0,046	0,045
SAE 65 bronzu	0,072	0,067	0,063	0,061	0,057	0,053	0,051	0,048
SAE 660 bronzu	0,074	0,068	0,065	0,064	0,060	0,056	0,057	0,052

* Stabilize edilmiş

** T7 ısıl işlemine tabi tutulmuş

Tablo 16. Farklı basınçlarda deneye tabi tutulan alaşımların sürekli rejim durumundaki çalışma sıcaklıkları

Alaşım	Basınç (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Sıcaklık (°C)							
Al-25Zn-3Cu	42	45	48	49	52	56	57	58
Al-25Zn-3Cu-3Si	47	52	56	57	59	62	63	65
Al-25Zn-3Cu-3Si*	51	54	57	58	61	63	65	68
Al-25Zn-3Cu-3Si**	49	55	57	60	63	65	66	69
SAE 65 bronz	54	56	61	63	65	68	72	75
SAE 660 bronz	55	58	62	68	69	70	75	76

* Stabilize edilmiş

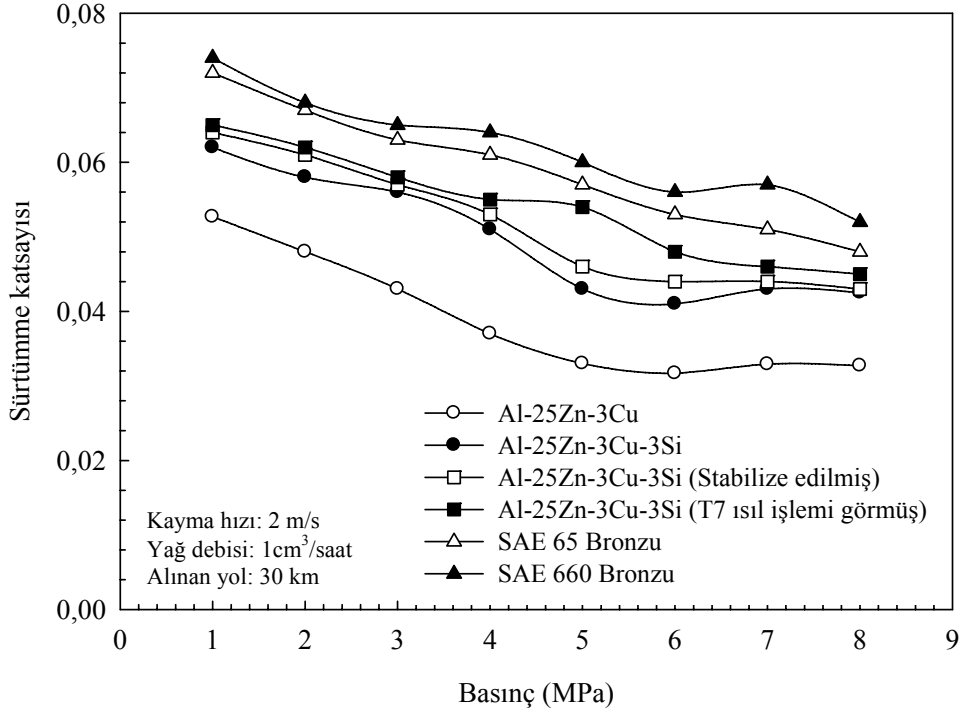
** T7 ısıtılmasına tabi tutulmuş

Tablo 17. Farklı basınçlarda deneye tabi tutulan alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları

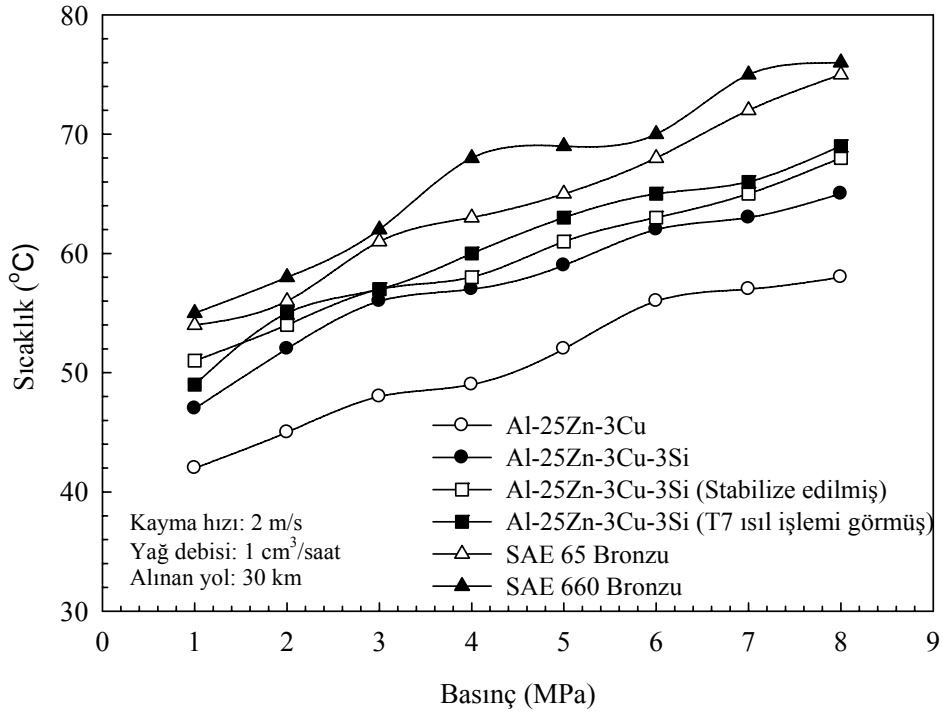
Alaşım	Basınç (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Hacim kaybı (mm ³)							
Al-25Zn-3Cu	0,08	0,18	0,38	0,68	0,82	0,93	1,12	1,17
Al-25Zn-3Cu-3Si	0,07	0,15	0,27	0,52	0,66	0,85	0,98	1,02
Al-25Zn-3Cu-3Si*	0,09	0,21	0,44	0,75	0,85	0,94	1,14	1,20
Al-25Zn-3Cu-3Si**	0,10	0,23	0,53	0,82	0,87	0,95	1,17	1,24
SAE 65 bronz	0,26	0,35	0,77	0,97	1,07	1,12	1,38	1,52
SAE 660 bronz	0,28	0,36	0,69	0,87	1,03	1,08	1,23	1,46

* Stabilize edilmiş

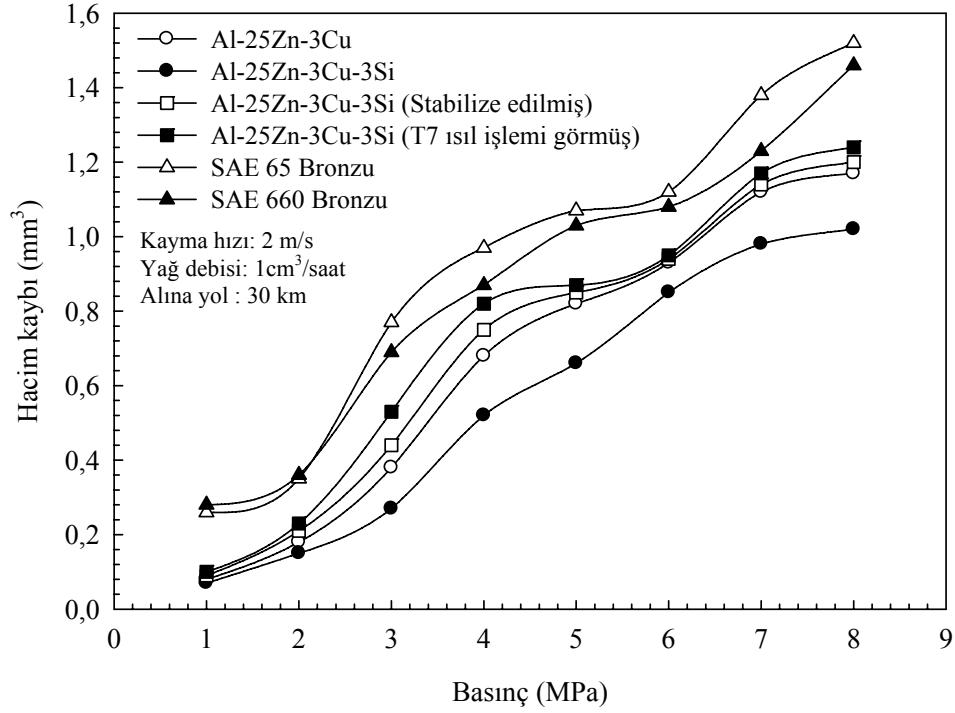
** T7 ısıtılmasına tabi tutulmuş



Şekil 82. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve bronzların sürtümme katsayılarının uygulanan basınca göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 83. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve bronzların çalışma sıcaklıklarının uygulanan basınca göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 84. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve bronzlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının uygulanan basınca göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 18. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayıları

Alaşım	Kayma hızı (m/s)				
	1	1,5	2	2,5	3
	Sürtünme katsayısı				
Al-25Zn-3Cu	0,033	0,032	0,032	0,033	0,032
Al-25Zn-3Cu-3Si	0,039	0,042	0,041	0,043	0,042
Al-25Zn-3Cu-3Si*	0,042	0,043	0,043	0,044	0,044
Al-25Zn-3Cu-3Si**	0,046	0,048	0,048	0,049	0,047
SAE 65 bronz	0,056	0,055	0,053	0,053	0,052
SAE 660 bronz	0,054	0,054	0,056	0,054	0,055

* Stabilize edilmiş

** T7 ısıl işlemine tabi tutulmuş

Tablo 19. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının sürekli rejim durumundaki çalışma sıcaklıkları

Alaşım	Kayma hızı (m/s)				
	1	1,5	2	2,5	3
	Sıcaklık (°C)				
Al-25Zn-3Cu	46	52	56	65	73
Al-25Zn-3Cu-3Si	52	55	62	69	75
Al-25Zn-3Cu-3Si*	53	57	63	70	76
Al-25Zn-3Cu-3Si**	55	62	65	72	78
SAE 65 bronzu	62	65	68	73	79
SAE 660 bronzu	64	68	70	74	79

* Stabilize edilmiş

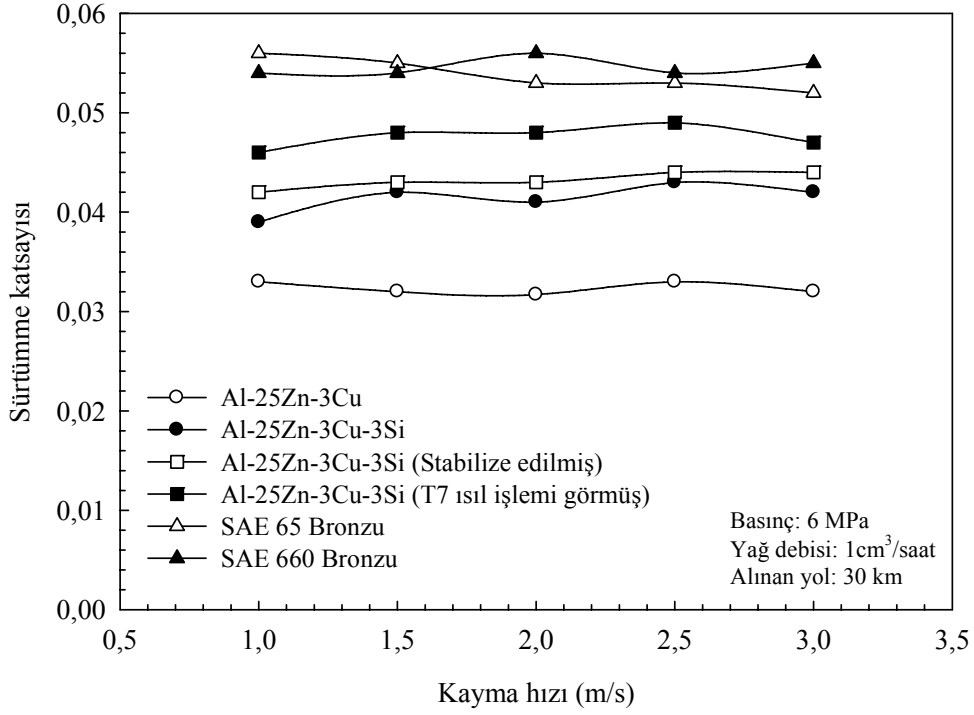
** T7 ısıtılmış işlemine tabi tutulmuş

Tablo 20. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları

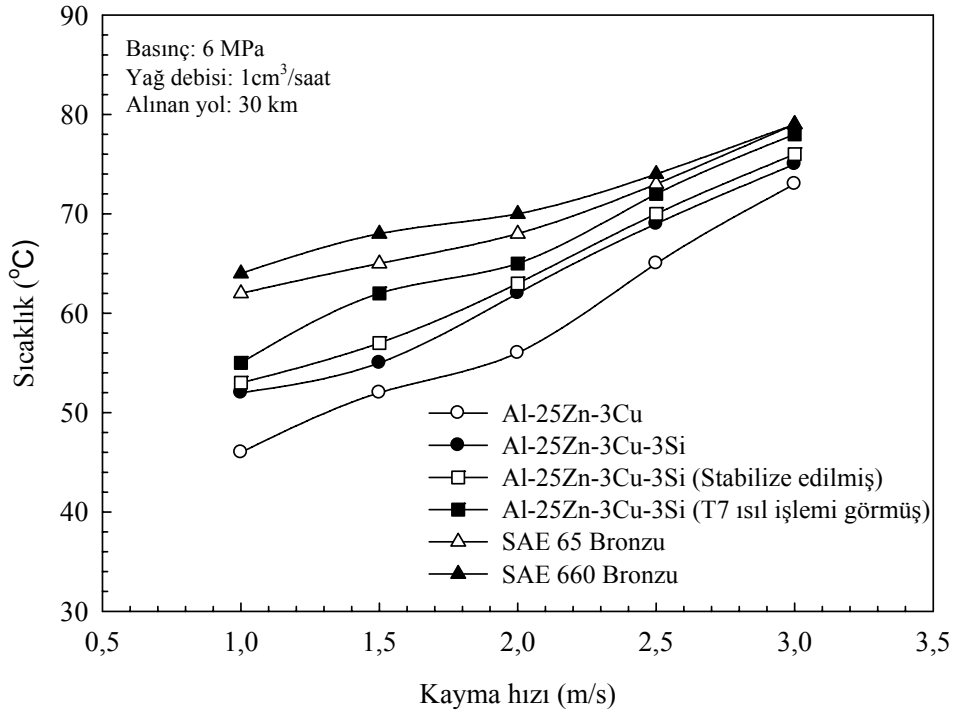
Alaşım	Kayma hızı (m/s)				
	1	1,5	2	2,5	3
	Hacim kaybı (mm ³)				
Al-25Zn-3Cu	0,956	0,955	0,930	0,943	0,953
Al-25Zn-3Cu-3Si	0,880	0,870	0,850	0,858	0,910
Al-25Zn-3Cu-3Si*	0,950	0,945	0,940	0,950	0,954
Al-25Zn-3Cu-3Si**	0,975	0,964	0,950	0,962	0,963
SAE 65 bronzu	1,140	1,110	1,120	1,160	1,170
SAE 660 bronzu	1,060	1,050	1,080	1,100	1,090

* Stabilize edilmiş

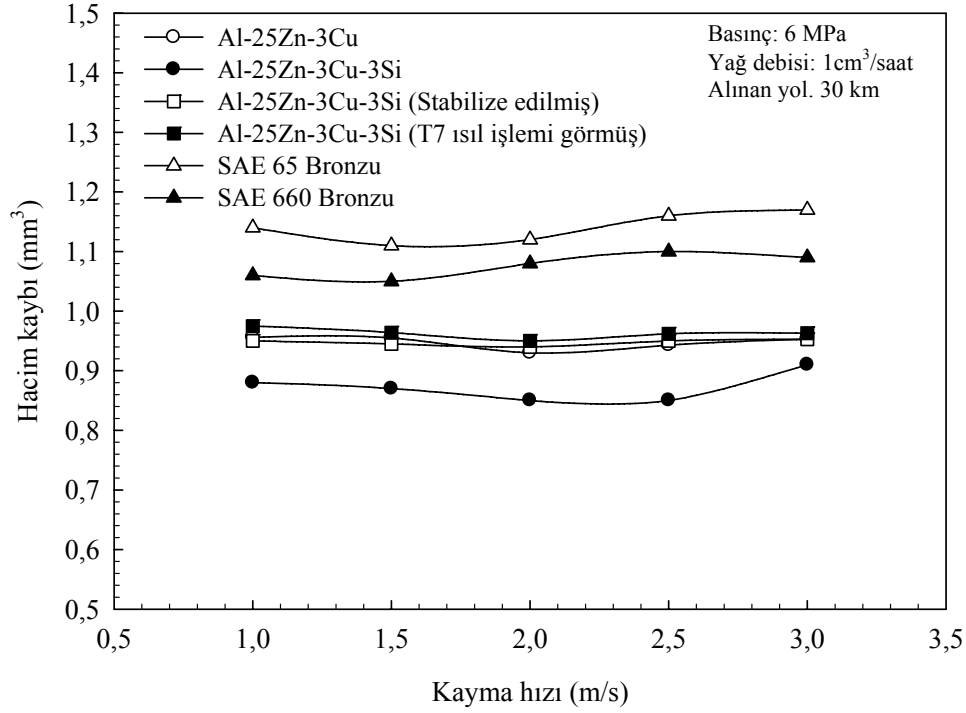
** T7 ısıtılmış işlemine tabi tutulmuş



Şekil 85. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve bronzların sürtünme katsayılarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler

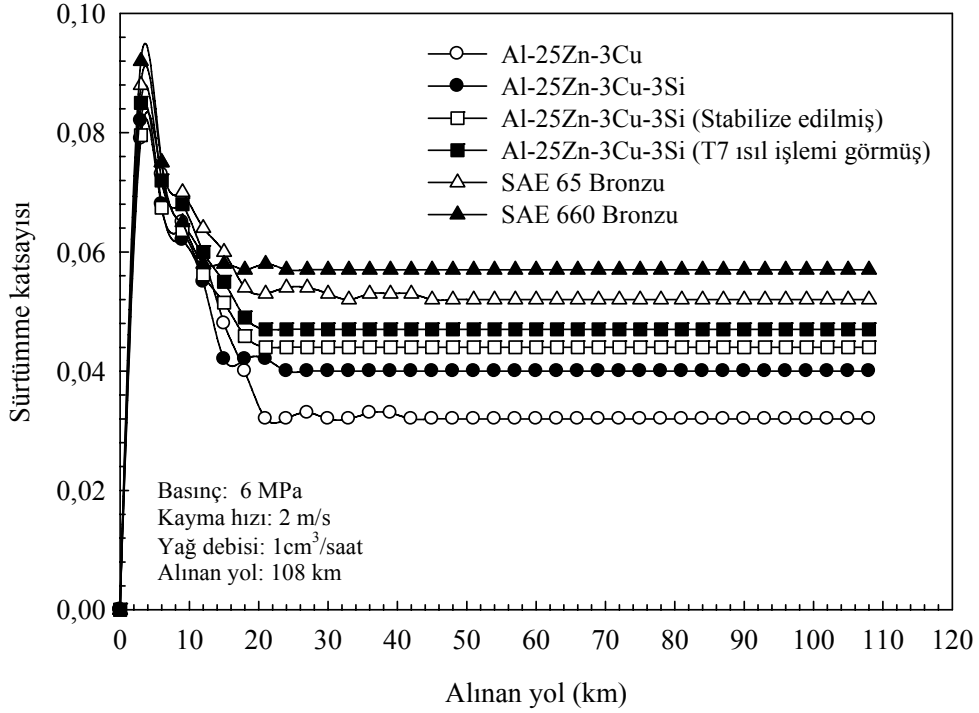


Şekil 86. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve bronzların çalışma sıcaklıklarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler

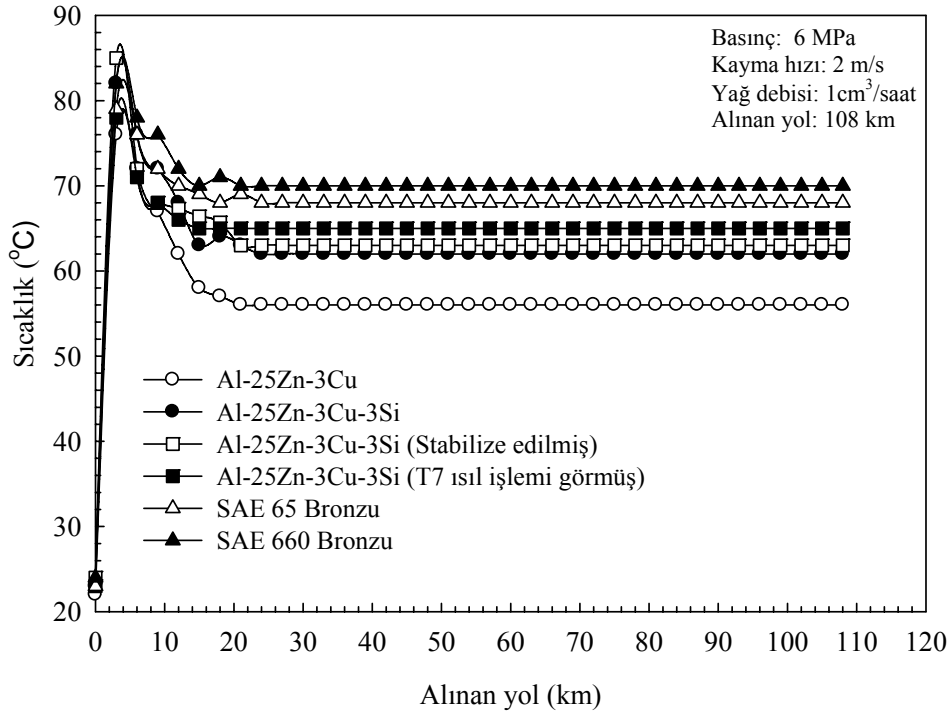


Şekil 87. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve bronzlarda 30 km'lik kayma yolu sonunda meydana gelen hacim kaybının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler

6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 108 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler Şekil 88 ve 89'da verilmiştir. Söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin deneyin ilk aşamasında ani bir artış gösterdiği, daha sonra ise azalarak yaklaşık 20 km'lik yol sonunda sabit kaldığı gözlemlendi. Bu alaşımlar içerisinde en düşük sürtünme katsayısı Al-25Zn-3Cu alaşımından elde edilirken, en yüksek sürtünme katsayısını SAE 660 bronzunun sergilediği görüldü. Alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerleri Tablo 21'de, bu değerlerin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler ise Şekil 90'da verilmiştir. Alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının deneyin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde arttıktan sonra hemen hemen sabit değerlere ulaştığı belirlendi. Deneye tabii tutulan alaşımlar içerisinde en düşük aşınma kaybının Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında, en yüksek aşınma kaybının ise SAE 65 bronzunda meydana geldiği görüldü.



Şekil 88. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve bronzlardan 6 MPa'lık basınç, 2 m/s'lik kayma hızı ve 1 cm³/saatlik yağ debisinde elde edilen sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



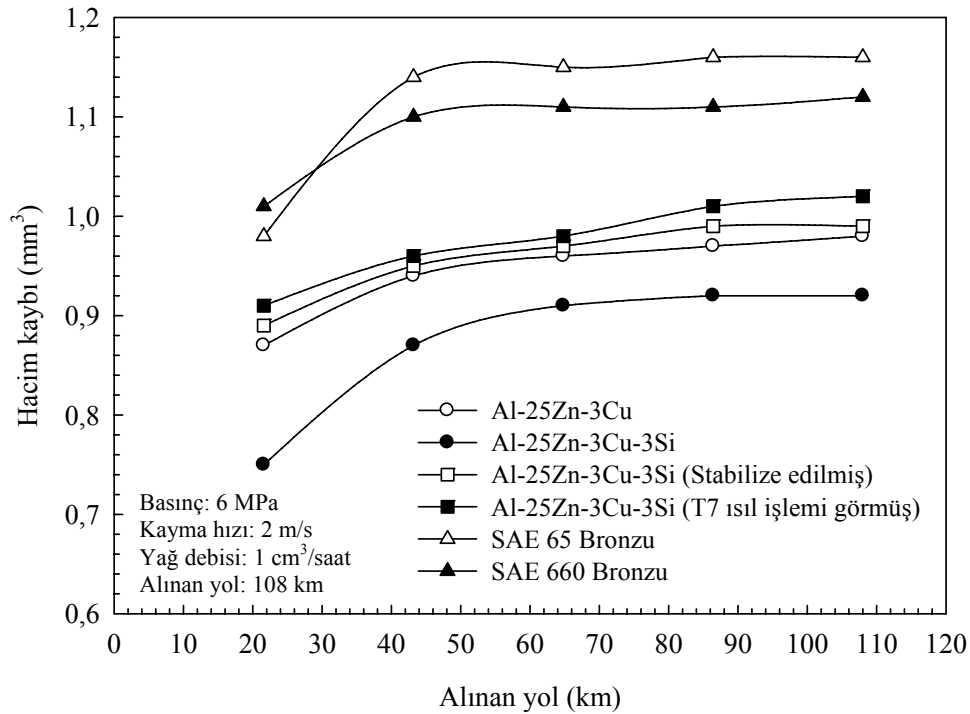
Şekil 89. Al-25Zn esaslı alaşımlar ve bronzlardan 6 MPa'lık basınç, 2 m/s'lik kayma hızı ve 1 cm³/saatlik yağ debisinde elde edilen çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 21. Sürtünme ve aşınma deneylerine tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 65 ve 660 bronzlarında meydana gelen hacim kaybı değerleri

Alaşım	Basınç: 6 MPa, Kayma hızı: 2 m/s, Yağ debisi: 1 cm ³ /saat				
	Alınan yol (km)				
	21,6	43,2	64,8	86,4	108
	Hacim kaybı (mm ³)				
Al-25Zn-3Cu	0,87	0,94	0,96	0,97	0,98
Al-25Zn-3Cu-3Si	0,75	0,87	0,91	0,92	0,92
Al-25Zn-3Cu-3Si*	0,89	0,95	0,97	0,99	0,99
Al-25Zn-3Cu-3Si**	0,91	0,96	0,98	1,01	1,02
SAE 65 bronzu	0,98	1,14	1,15	1,16	1,16
SAE 660 bronzu	1,01	1,10	1,11	1,11	1,12

* Stabilize edilmiş

** T7 ısıl işlemine tabi tutulmuş



Şekil 90. 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saatlik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ve bronzlarda meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler

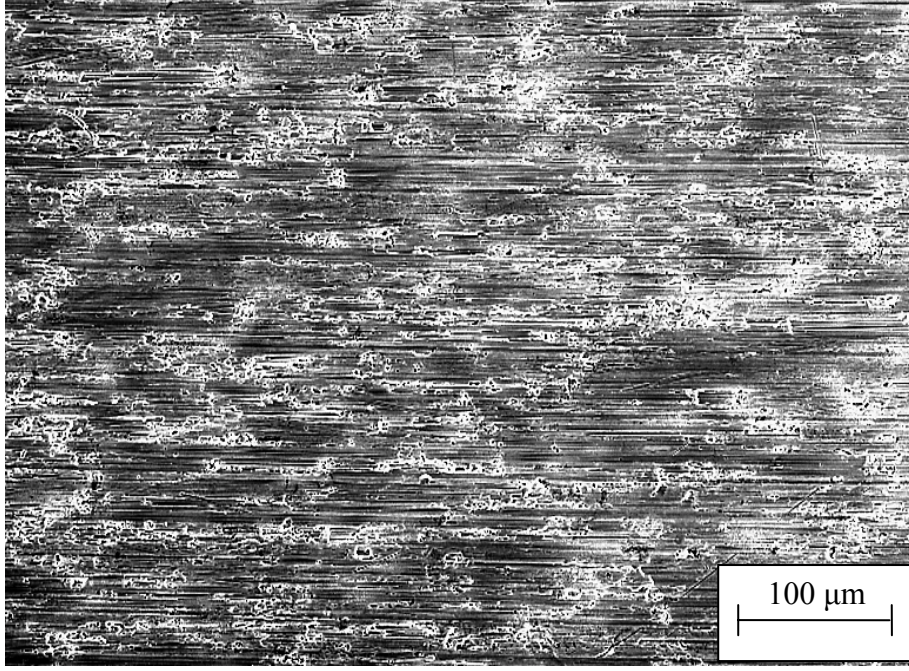
3.5 Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

Al-25Zn esaslı alaşımlardan ve SAE 660 bronzundan talaşlı işlemlerle hazırlanan aşınma numunelerinin yüzeylerini gösteren SEM mikrografları Şekil 91 ve 92’de verilmiştir. Bu fotoğraflar numunelerin yüzeylerinde tornalama ve frezeleme işlemler sırasında oluşan çizik şeklindeki kalem izlerini göstermektedir.

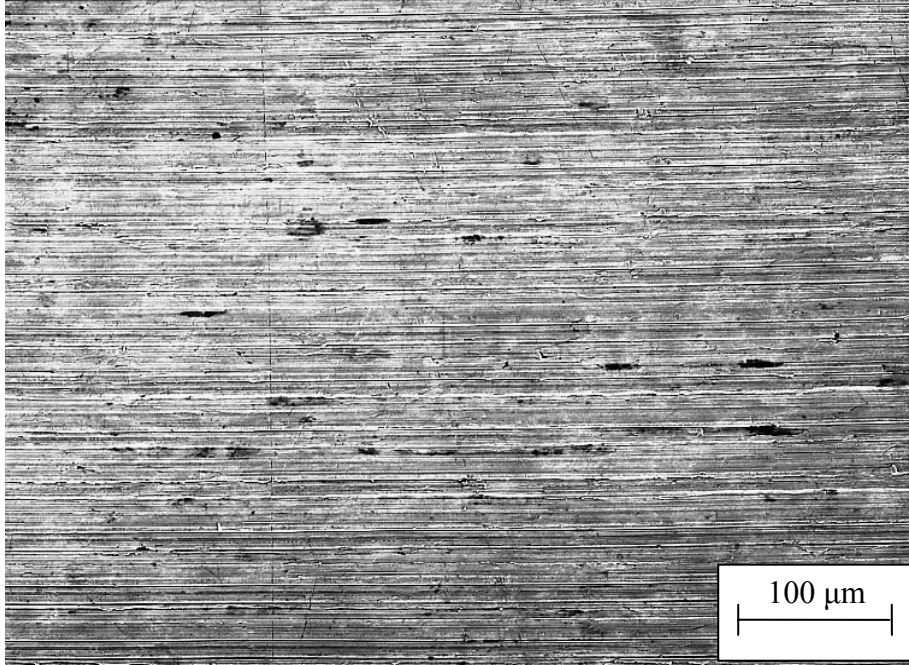
Yağsız veya kuru durumda 1,5 MPa’lık basınç ve 1 m/s’lik kayma hızında 2500’lik kayma mesafesi boyunca sürtünme ve aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-(1-3-5)Cu ve Al-25Zn-3Cu-(1-3-5)Si alaşımlarının aşınma yüzeylerinin SEM mikrografları, sırasıyla Şekil 93, 94, 95, 96, 97 ve 98’de verilmiştir. Bu mikrografları söz konusu alaşımların aşınma yüzeylerinde sıvanma belirtileri ve çiziklerin yer aldığını göstermektedir. Ayrıca, bu fotoğraflarda bakır ve silisyum oranlarının %3’ü geçmesi durumunda bu alaşımların aşınma yüzeylerindeki sıvanma belirtilerinin azaldığı, çizik sayısının ise arttığı görülmektedir.

Yağsız durumda farklı basınç (0,5–2,5 MPa) ve kayma hızlarında (0,5–1,5 m/s) deneye tabi tutulan alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direnci sergileyen Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımı ve en düşük aşınma direncine sahip olan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeylerinin ayrıntılarını gösteren SEM fotoğrafları Şekil 99-102’de verilmiştir. Bu fotoğraflar, basınç ve kayma hızı arttıkça Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinde oluşan çizik sayısı ve sıvanma miktarının arttığını, SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinde ise çizik sayısı ve derinliğinin artıp, sıvanma miktarının azaldığını göstermektedir.

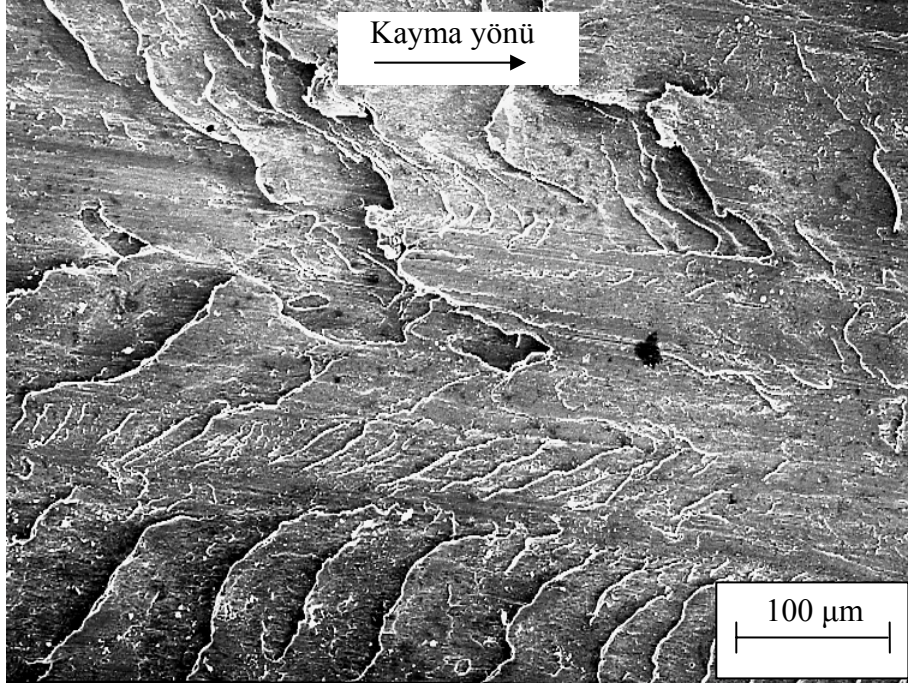
Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımları ile SAE 65 bronzunun 6 MPa’lık basınç, 1 cm³/saat’lik yağ debisi ve 2 m/s’lik kayma hızında 108 km’lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan aşınma numunelerinin yüzeylerinin SEM fotoğrafları sırasıyla Şekil 103, 104 ve 105’de verilmiştir. Aynı koşullarda deneye tabi tutulan T7 ısıtılma işlemi görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımına ait bir numunenin aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafı ise Şekil 106’da görülmektedir. Bu fotoğraflara bakıldığında T7 ısıtılma işlemi görmüş alaşımın aşınma yüzeyinde, dökülmüş durumdaki numunelerin aşınma yüzeylerine kıyasla daha az sıvanma belirtisi, ancak daha çok sayıda çizik yer aldığı görülmektedir. SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinde ise, Al-25Zn esaslı alaşımlara ait numunelerin yüzeylerine kıyasla çok daha fazla sayıda çizik yer alırken, çok daha az miktarda sıvanma belirtisine rastlandı.



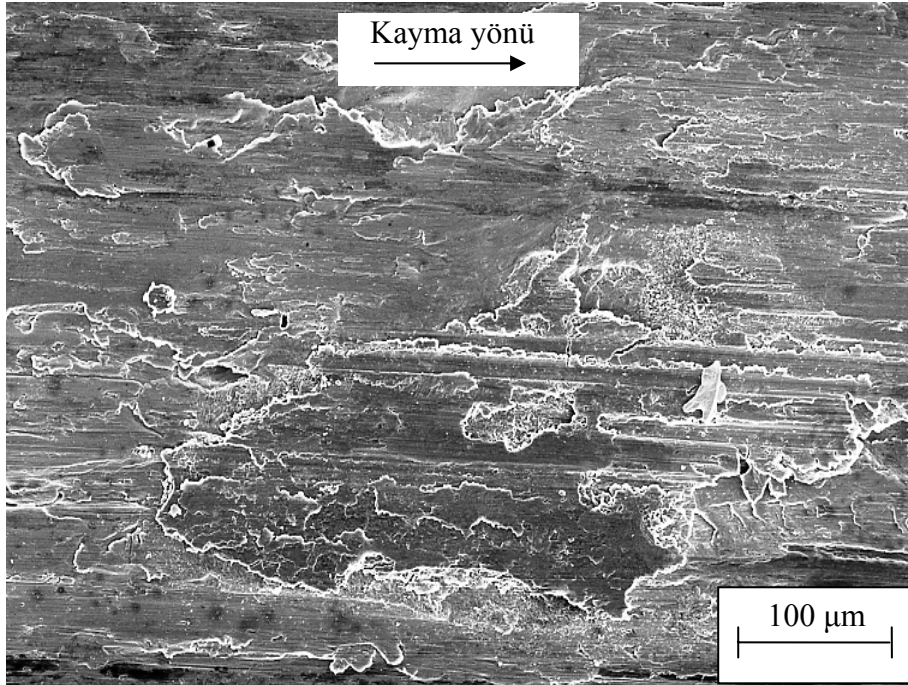
Şekil 91. Al-25Zn-3Cu alaşımına ait bir aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü



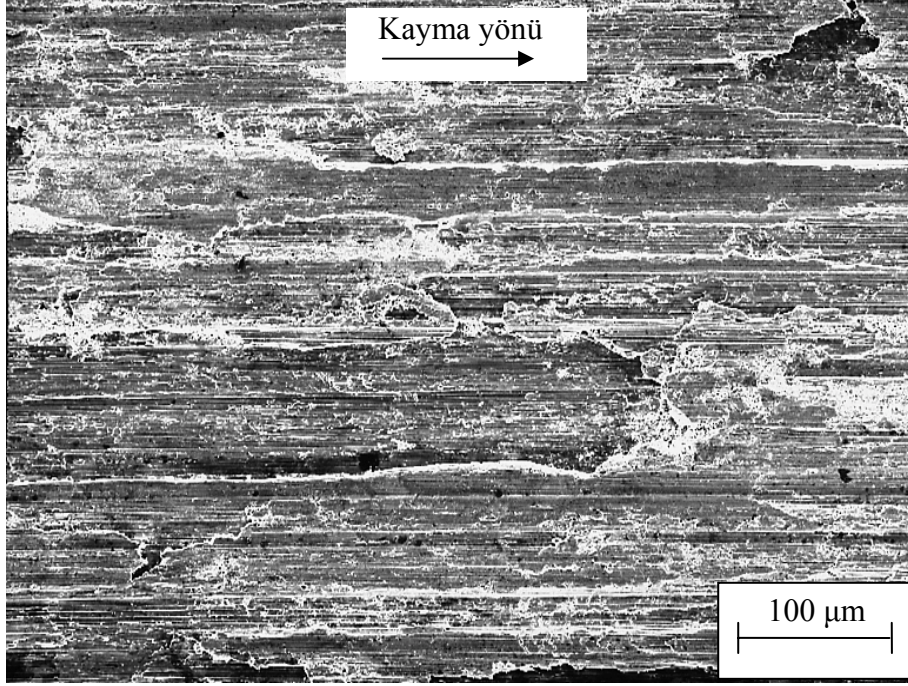
Şekil 92. SAE 65 bronzuna ait bir aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü



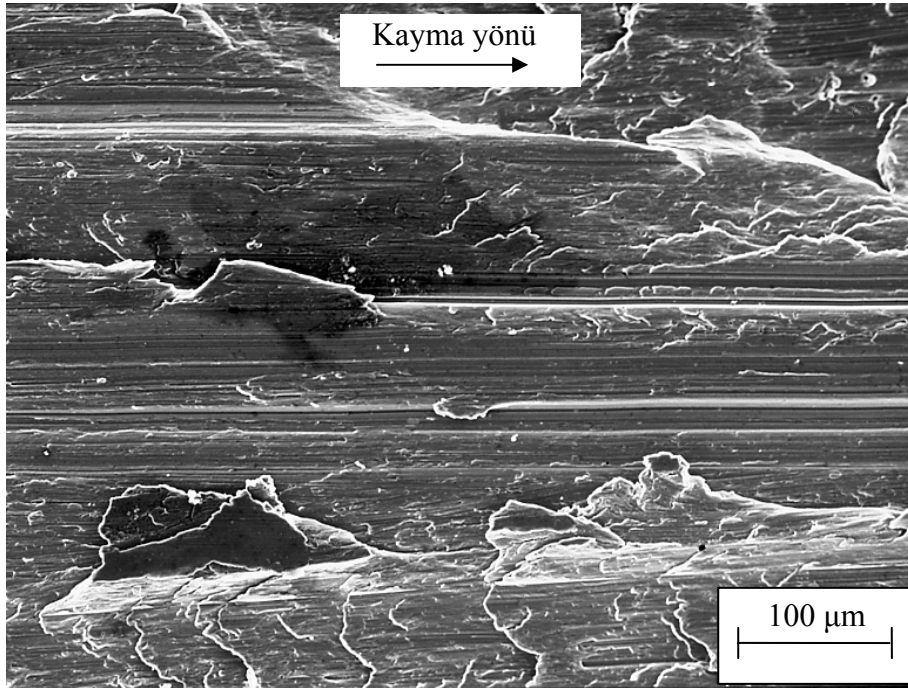
Şekil 93. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-1Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



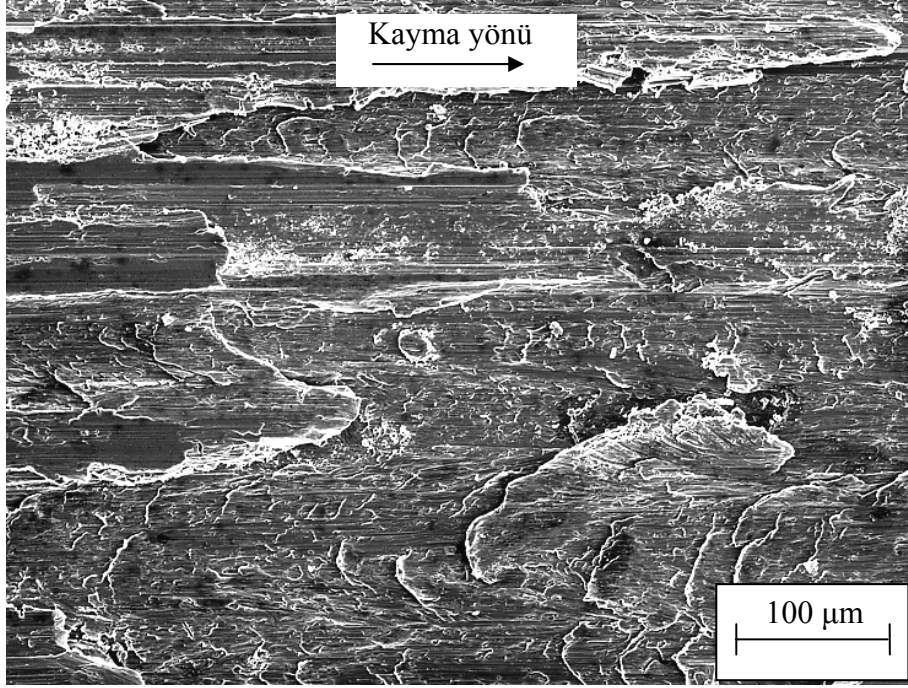
Şekil 94. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



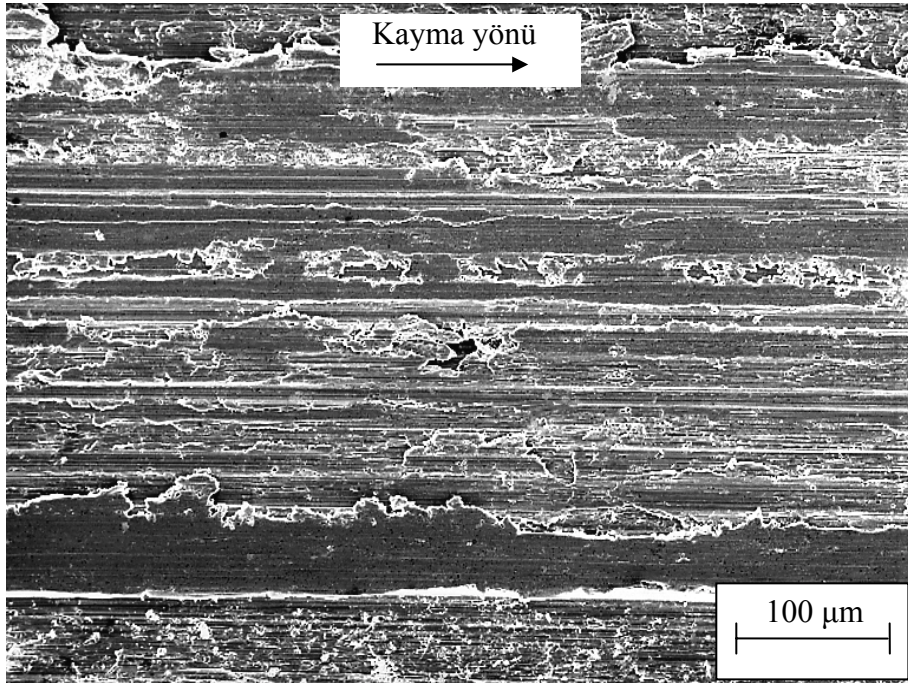
Şekil 95. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-5Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



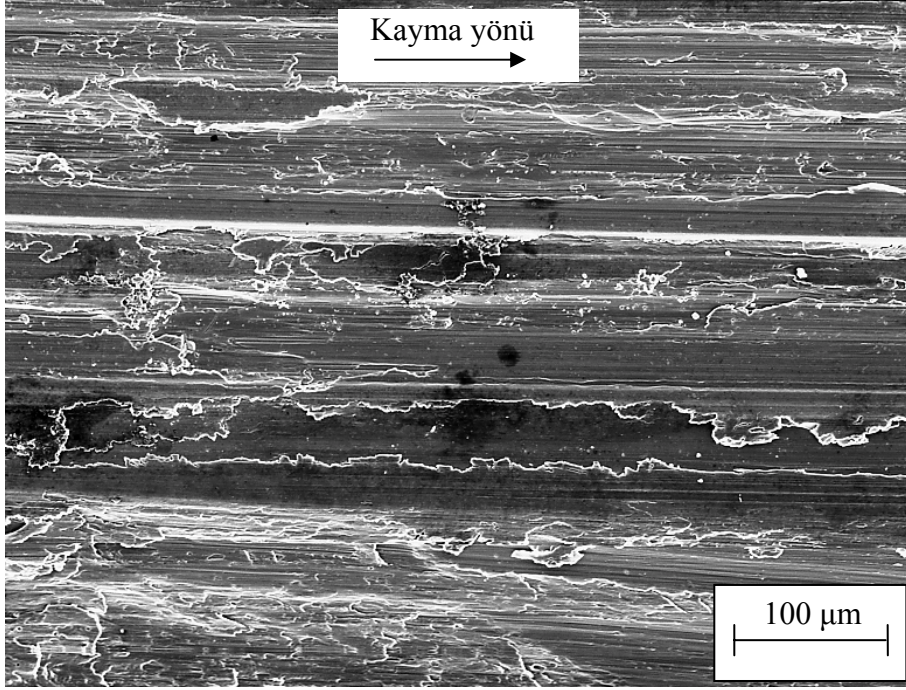
Şekil 96. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-1Si alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



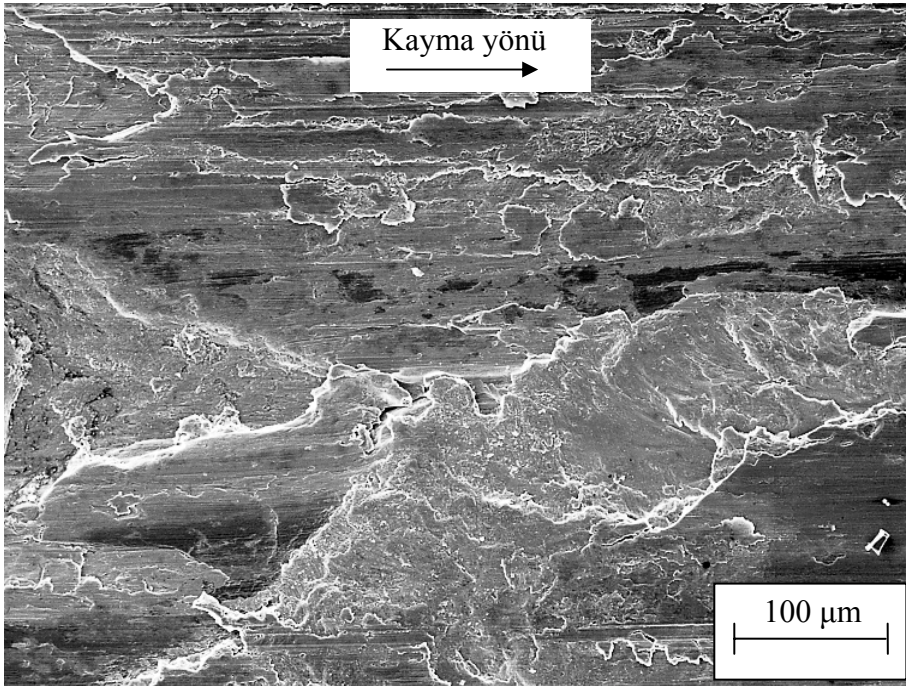
Şekil 97. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



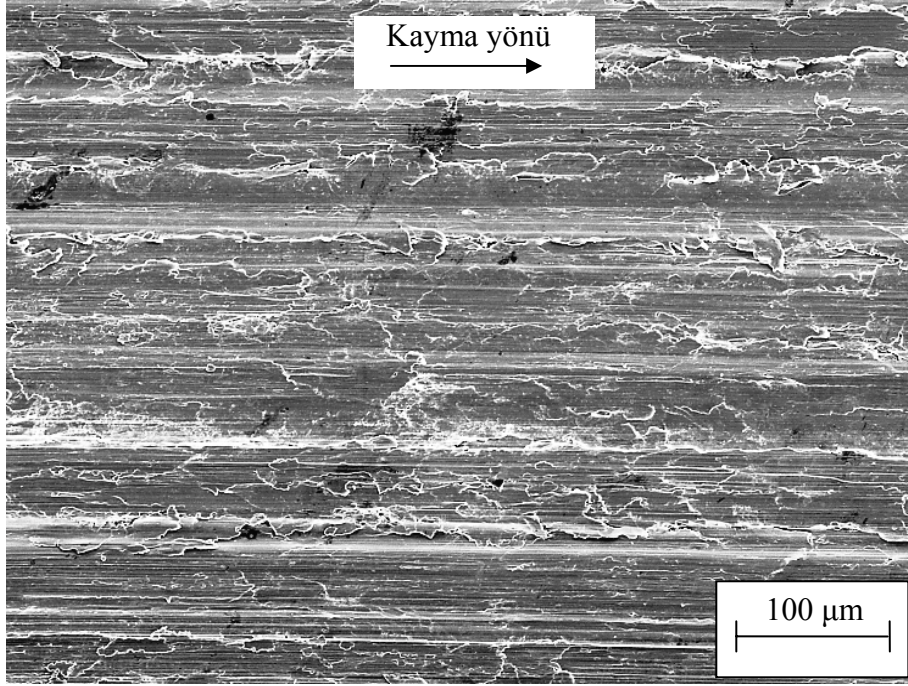
Şekil 98. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-5Si alaşımının aşınma yüzeyinin 2500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



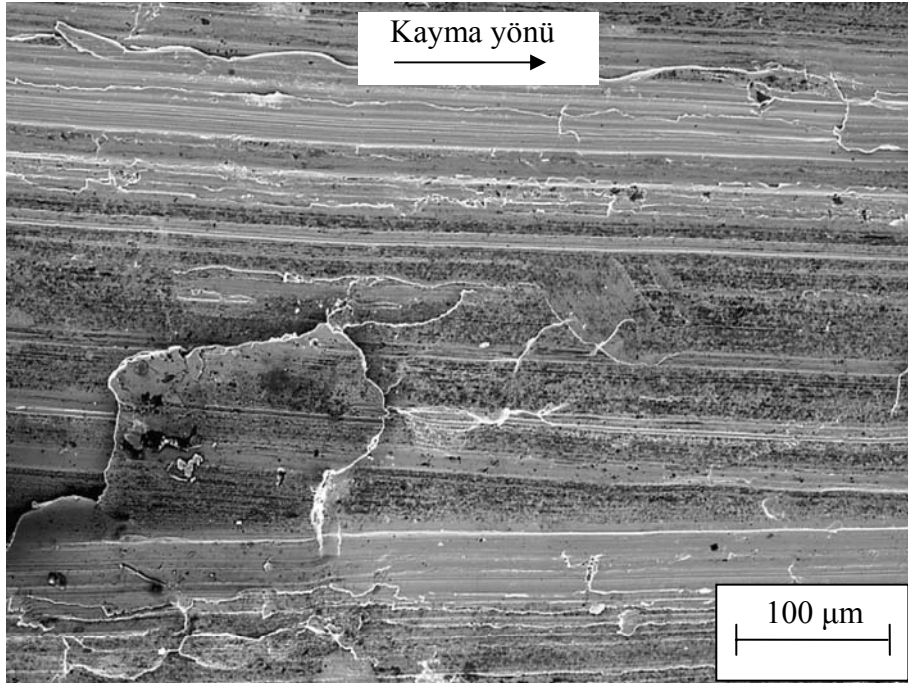
Şekil 99. Yağsız durumda 0,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



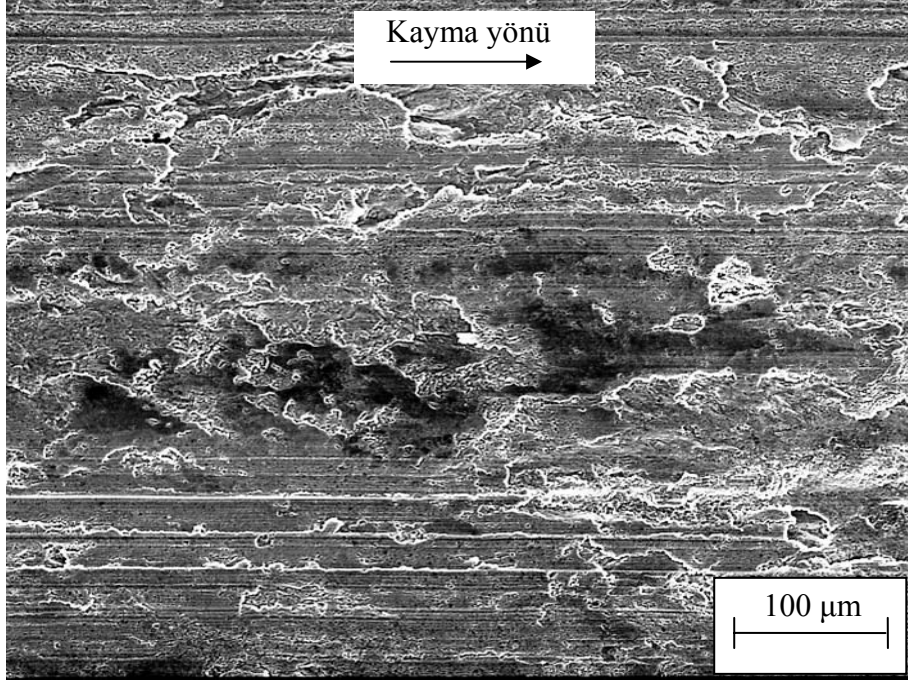
Şekil 100. Yağsız durumda 2,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



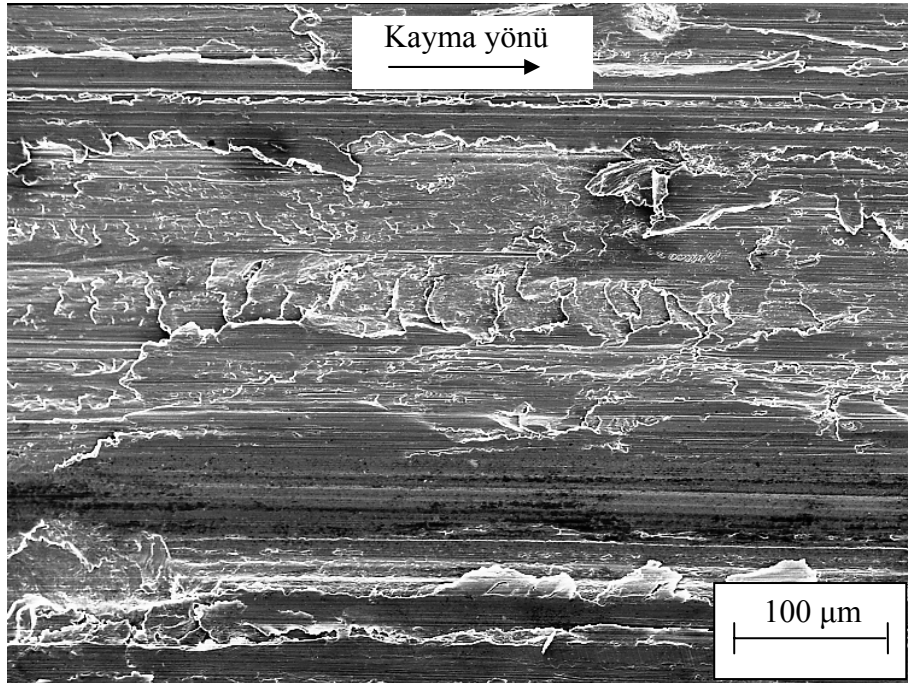
Şekil 101. Yağsız durumda 0,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin 500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



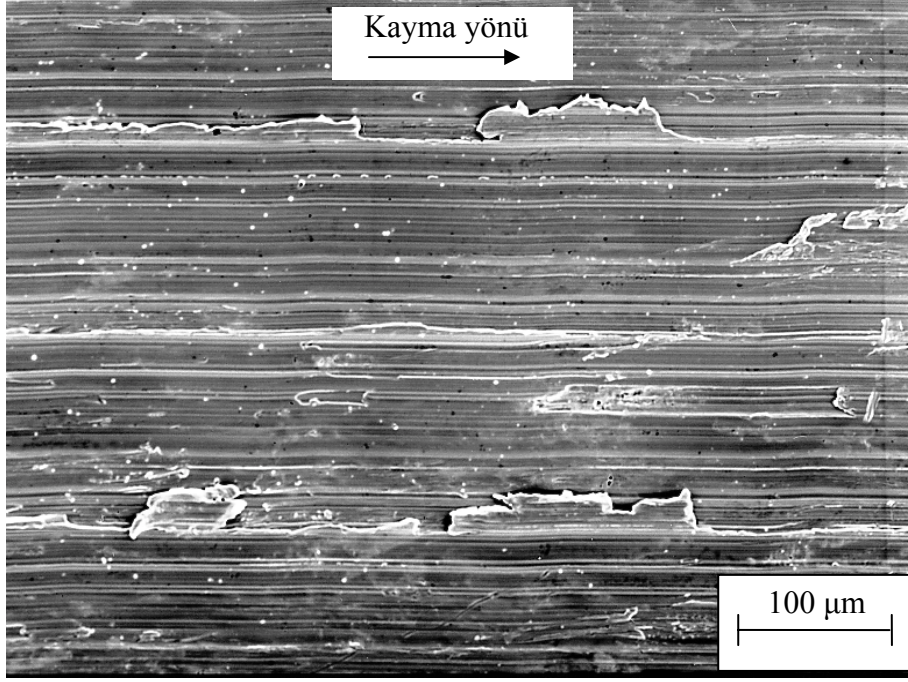
Şekil 102. Yağsız durumda 2,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin 500m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



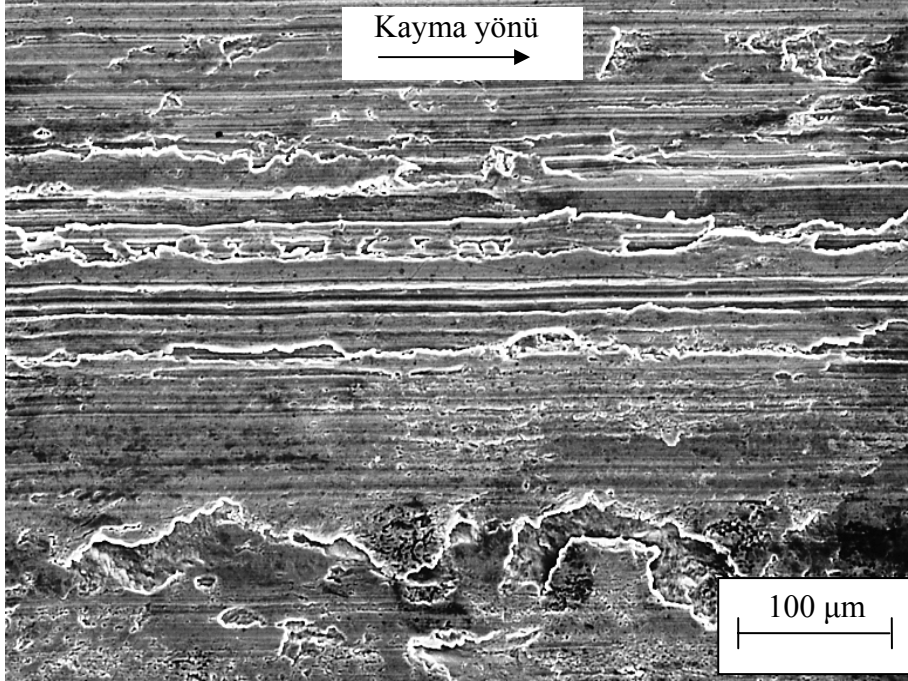
Şekil 103. 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 108 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



Şekil 104. 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 108 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü

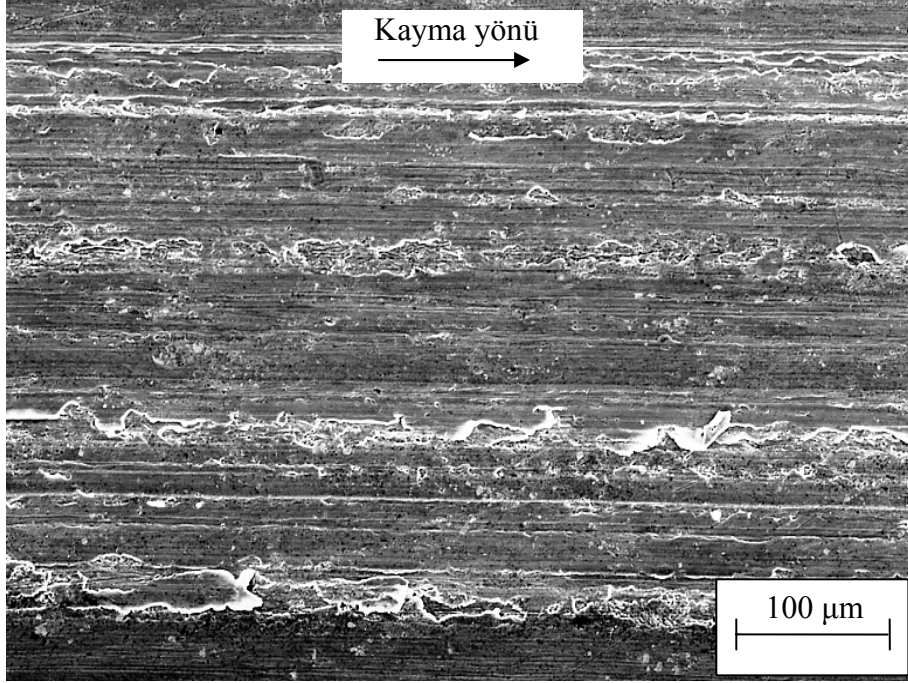


Şekil 105. 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 108 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü

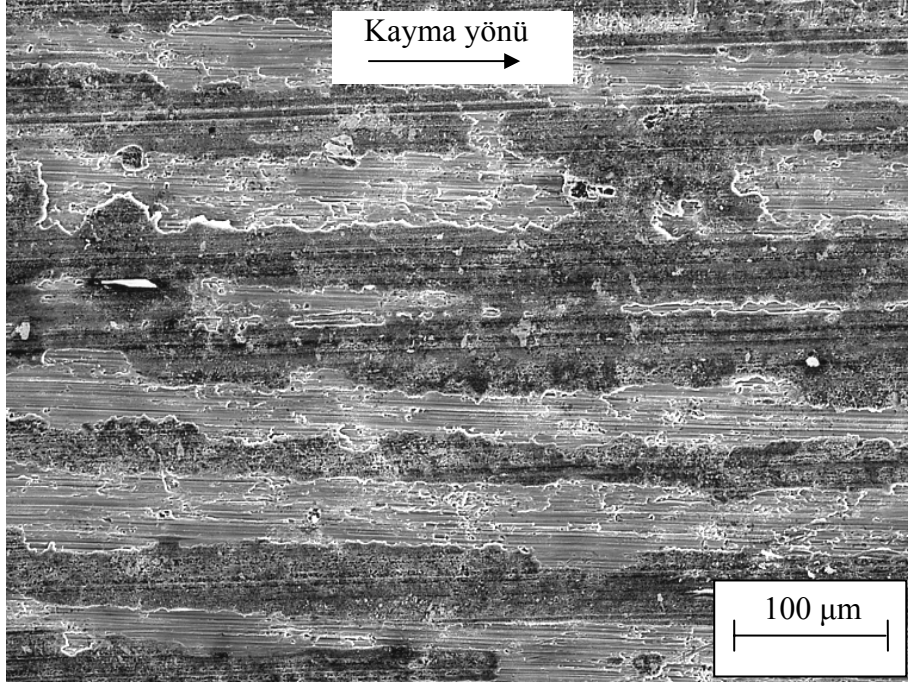


Şekil 106. 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 108 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan T7 ısıt işleme görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımına ait numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

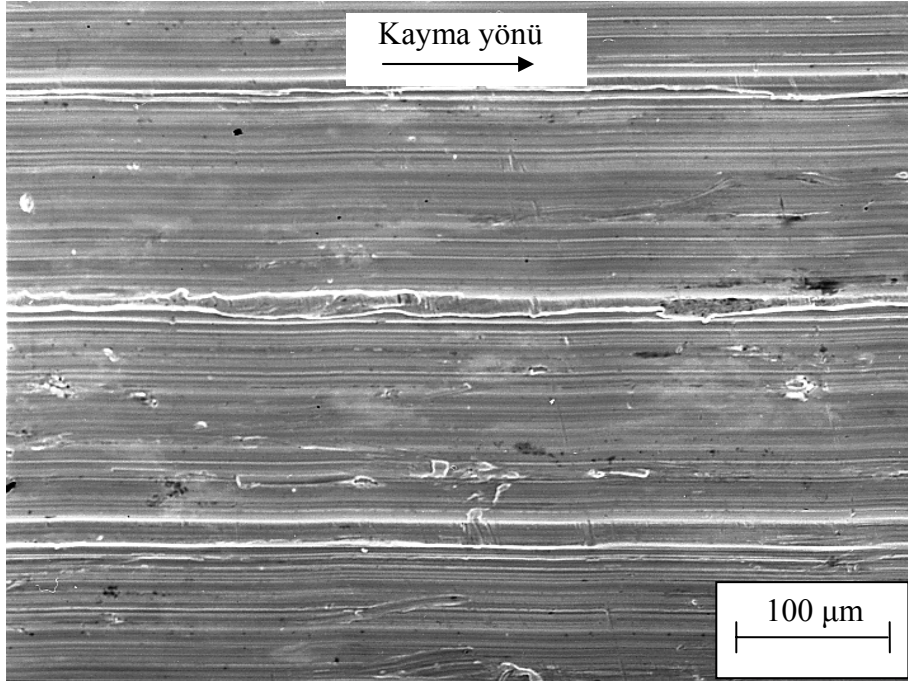
Yağlı durumda farklı basınç ve kayma hızlarında 30 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar aşınma deneylerine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımı ve SAE 65 bronzuna ait aşınma numunelerinin aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları Şekil 107-112'de verilmiştir. Bu fotoğraflar, basınç ve hız arttıkça Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinde oluşan sıvanma tabakalarının genişliğinin arttığını, çiziklerin ise derinleştiğini göstermektedir. SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin ise çok sayıda çizik ve sınırlı sıvanma tabakalarından oluştuğu gözlemlendi. Artan basınç ve hızla sıvanmanın ortadan kalktığı, çizik sayısının ise arttığı gözlemlendi.



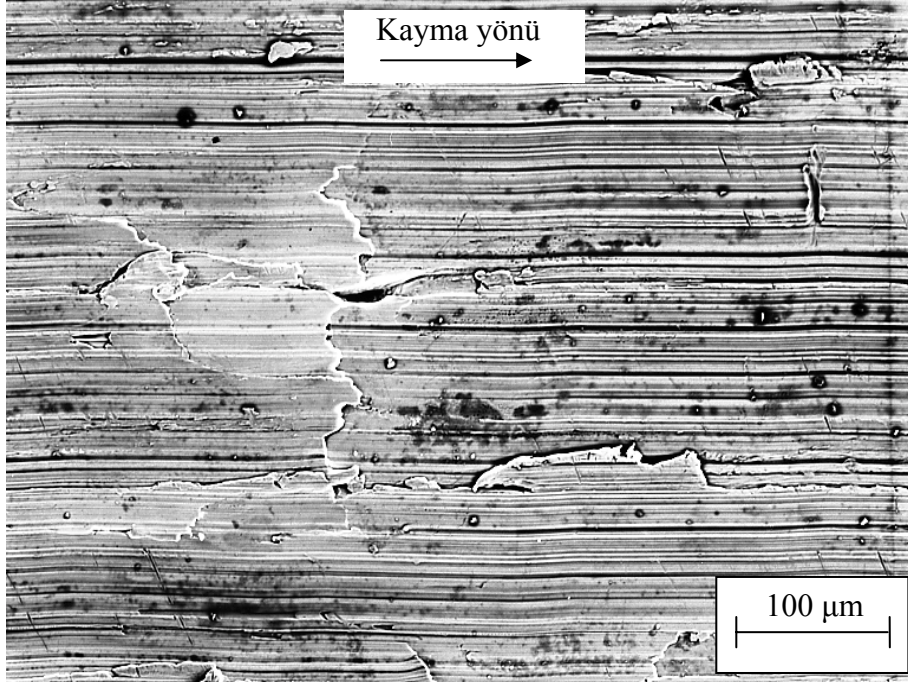
Şekil 107. 4 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



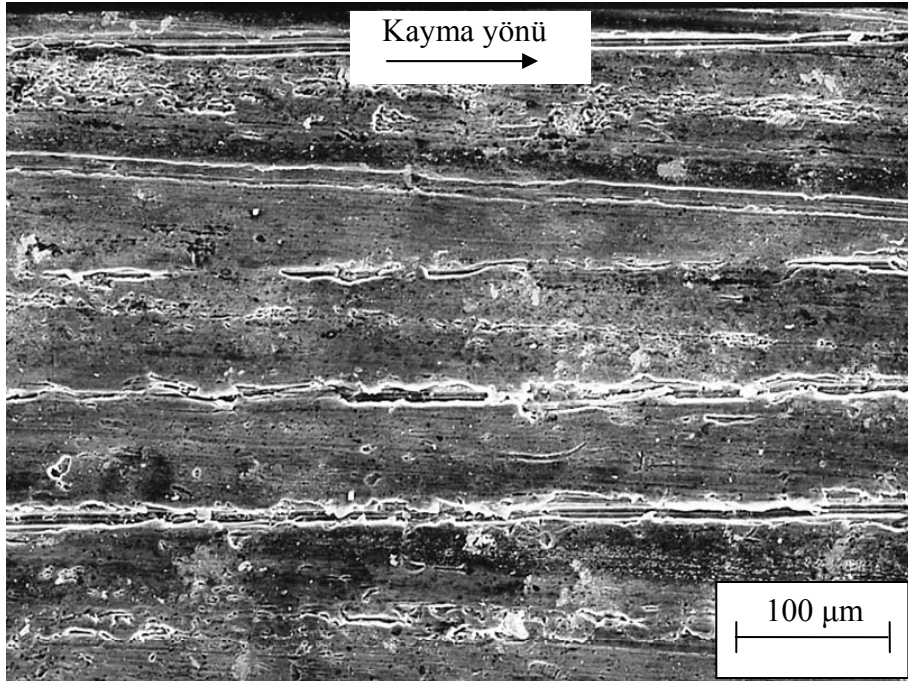
Şekil 108. 8 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



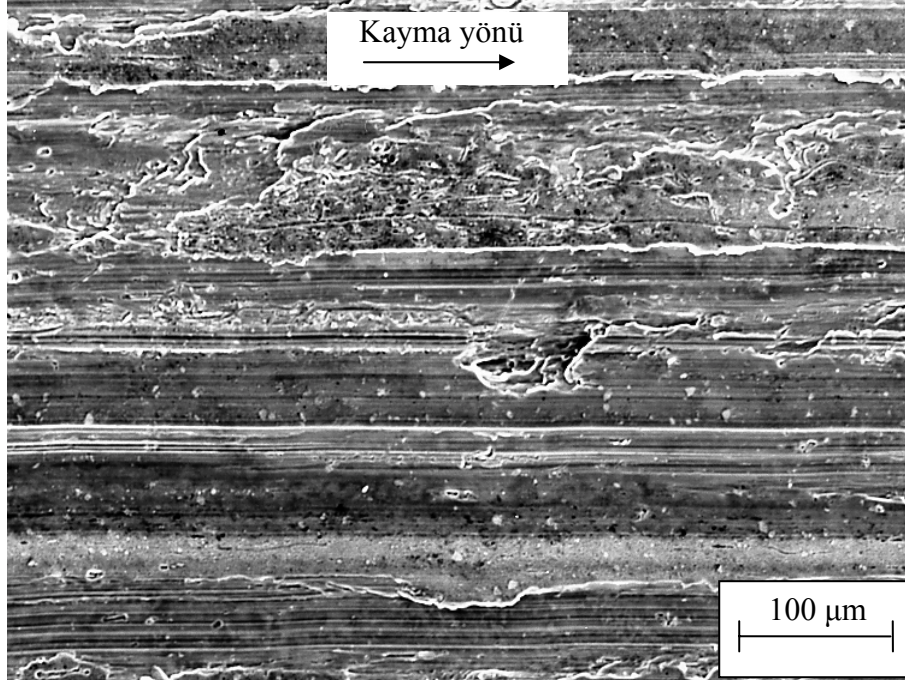
Şekil 109. 4 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



Şekil 110. 8 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan SAE 65 bronzunun aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü

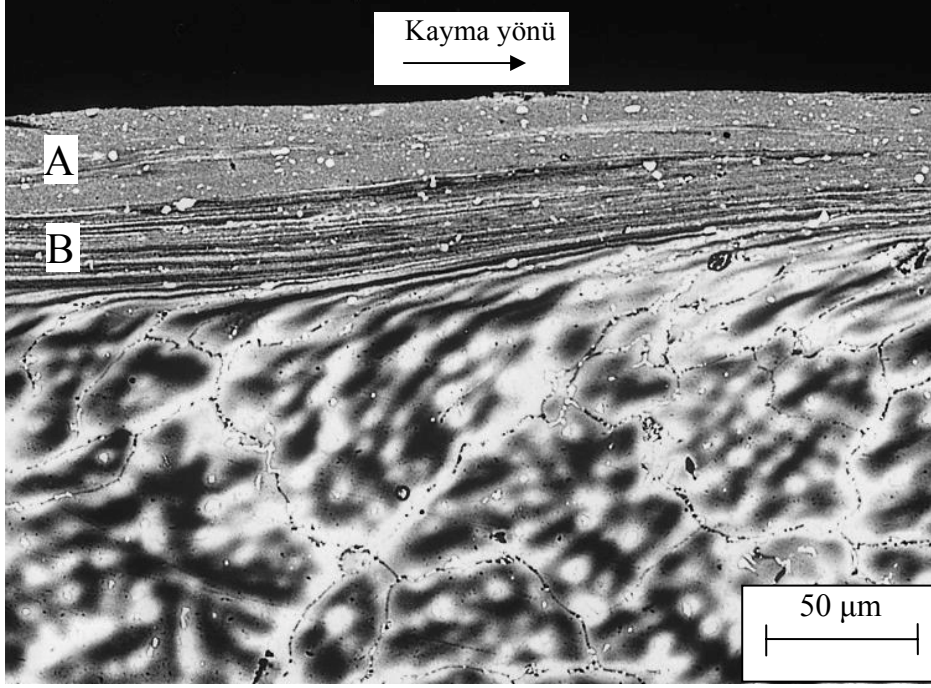


Şekil 111. 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 1 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü

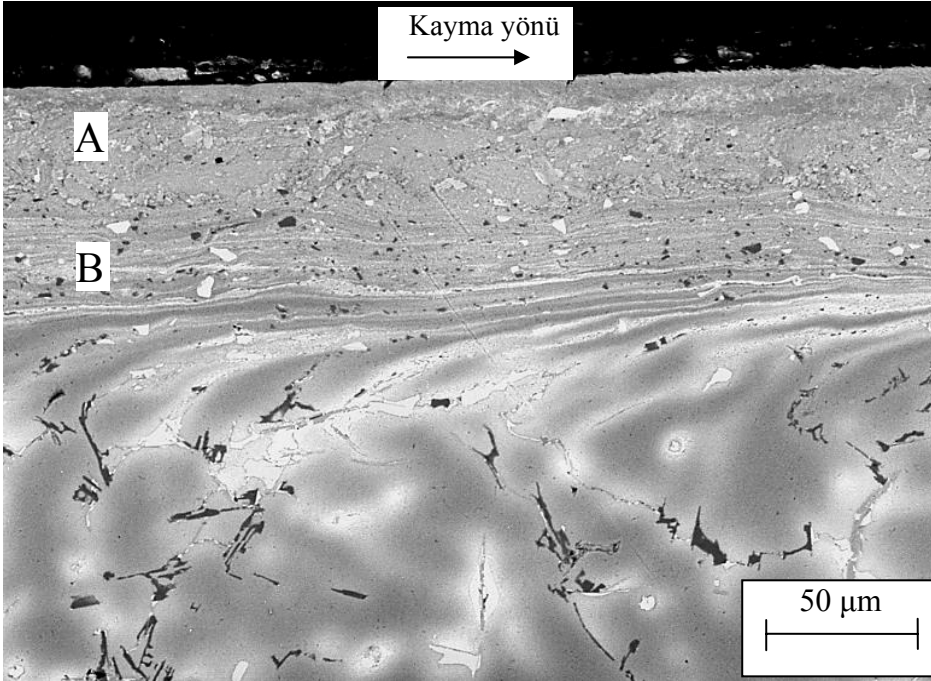


Şekil 112. 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 3 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinin 30 km'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü

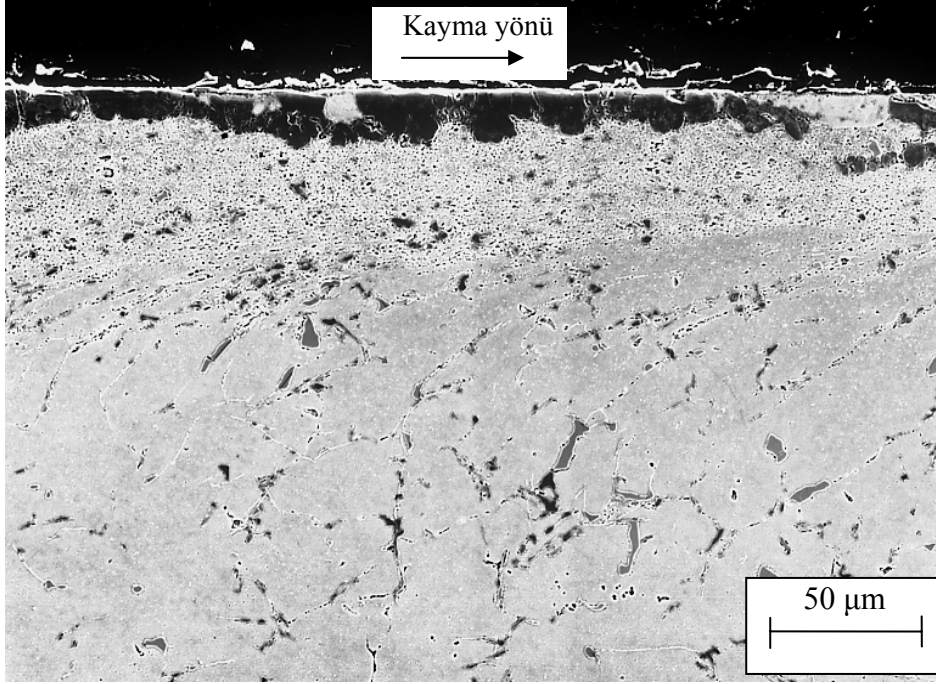
Yağsız durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımları ile SAE 660 bronzuna ait aşınma numunelerinin yüzeylerinin altında meydana gelen yapısal değişimleri gösteren SEM mikrografları Şekil 113-116'da verilmiştir. Bu mikrograflar, Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarına ait aşınma numunelerinin yüzeylerinin hemen altında yapısal dönüşümler sonucunda oluşmuş iki farklı tabakanın yer aldığını göstermektedir. Metalografik yapıları farklı olan bu tabakalar yüzeyden itibaren A ve B bölgeleri olarak adlandırılmıştır. A bölgesinin ince taneli bir yapıya sahip olduğu, B bölgesinin ise kayma yönüne paralel şekilde yönelmiş akma çizgileri içerdiği görülmüştür. T7 ısıl işlemi görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımına ait numunenin aşınma yüzeyinin altında ise yalnız daha az bir derinliğe sahip olan A tabakasının olduğu gözlemlendi, Şekil 115. Başka bir deyişle bu numunede belirgin akma çizgilerine rastlanmadı. Diğer taraftan SAE 660 bronzuna ait aşınma numunesinin yüzeyinin altında ise, yalnız yönelme belirtilerine rastlandı. Bu durum da söz konusu numunede ince tanelerden oluşan tabakanın oluşmadığı anlamına gelmektedir.



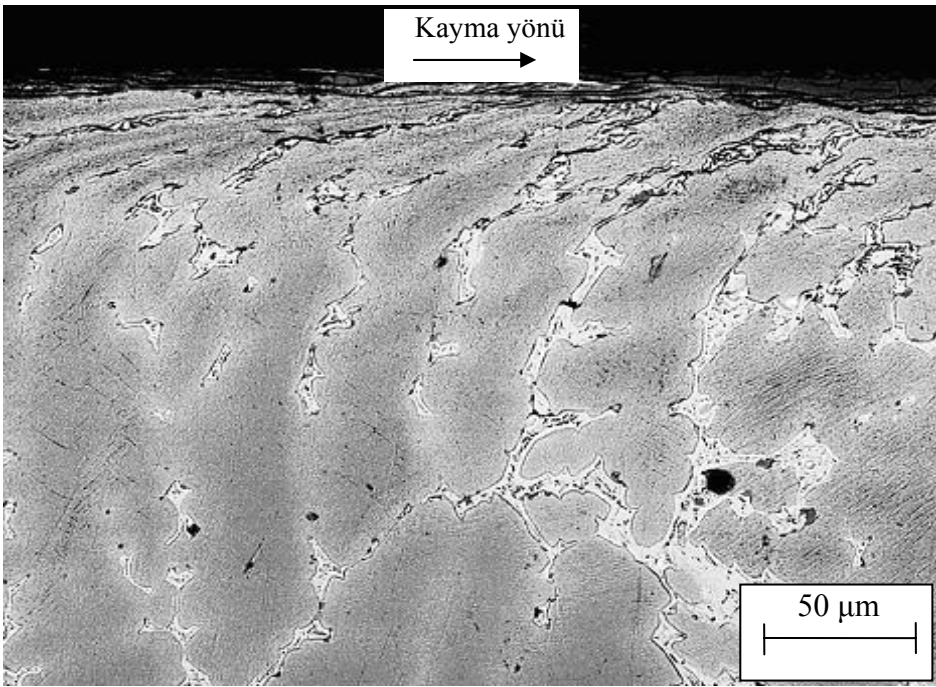
Şekil 113. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu alaşımına ait aşınma numunesinin yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimleri gösteren SEM mikrografi



Şekil 114. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 115. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan T7 ısıt işlemleri görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

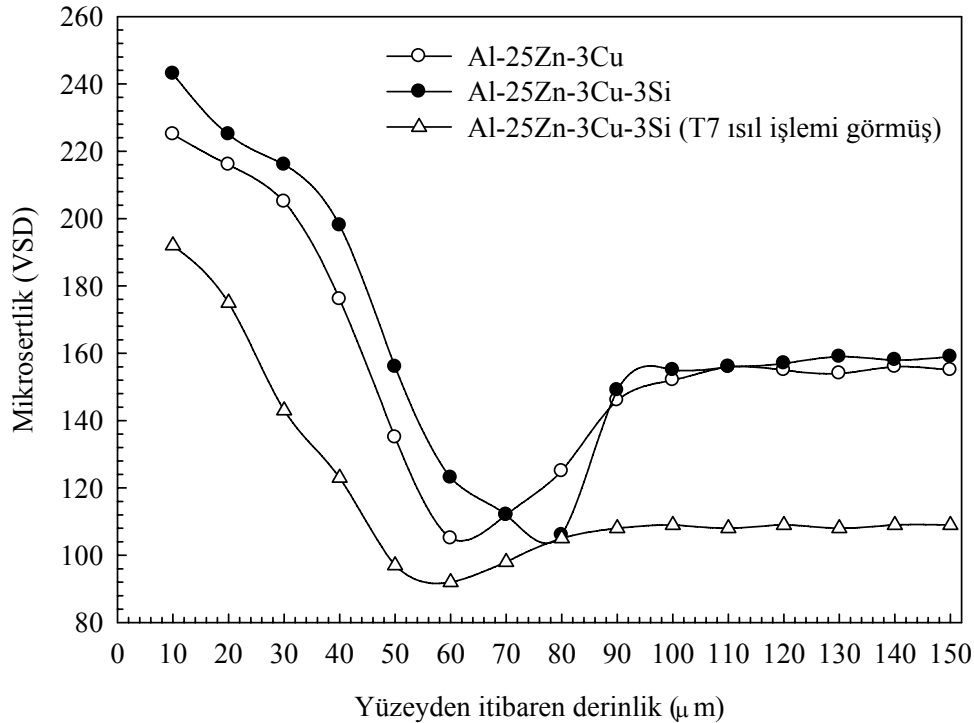


Şekil 116. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

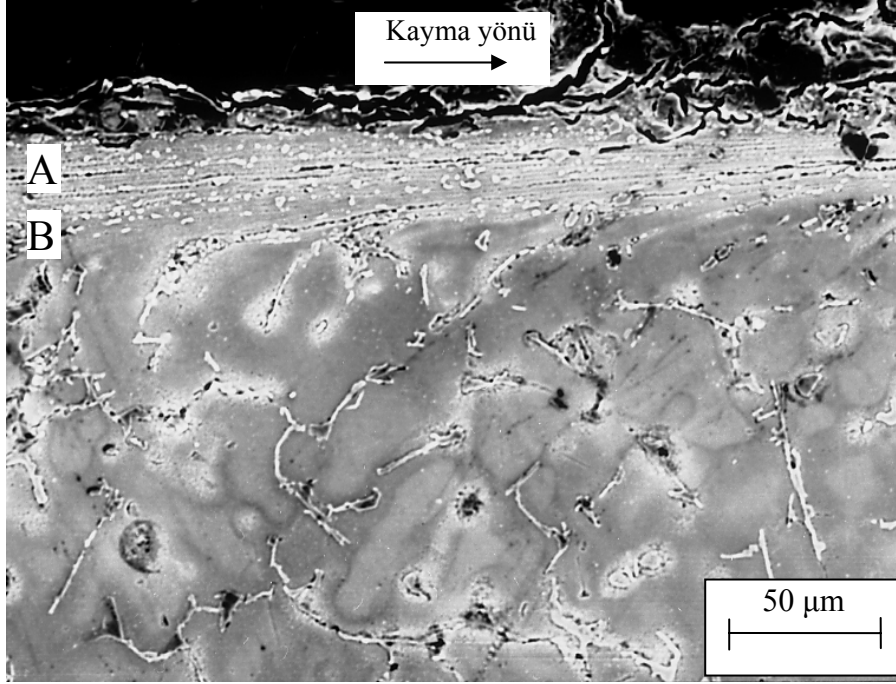
Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarına ait aşınma numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinin mikrosertlik değerlerinin yüzeyden itibaren artan derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 117’de verilmiştir. Bu eğriler, bu numunelerin mikrosertlik değerlerinin A tabakasından başlamak üzere artan derinlikle azaldığını, B tabakasından bir minimumdan geçtikten sonra tekrar artarak numunelerin orijinal içyapılarının mikrosertlik değerlerine ulaştıklarını göstermektedir.

Yağsız durumda farklı basınç ve hızlarda aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlar içerisinde en üstün aşınma direncine sahip olan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının yüzey altında oluşan yapısal değişimleri gösteren SEM mikrografları Şekil 118-123’de verilmiştir. Bu mikrograflar yüzey altında oluşan A ve B tabakalarının kalınlığının artan basınç ile arttığını, ancak kayma hızından fazla etkilenmediğini göstermektedir.

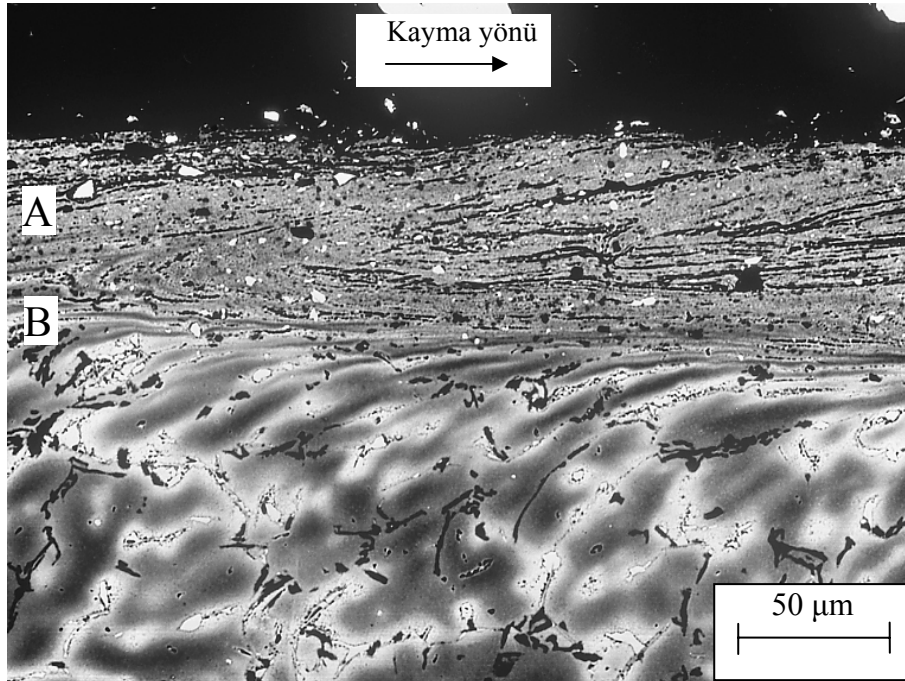
Farklı basınçlarda Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımına ait aşınma numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin yüzeyden itibaren artan derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 124’de verilmiştir. Bu eğriler basınç arttıkça A tabakasının mikrosertlik değerinin arttığını, B tabakasının mikrosertlik değerinin ise azaldığını göstermektedir.



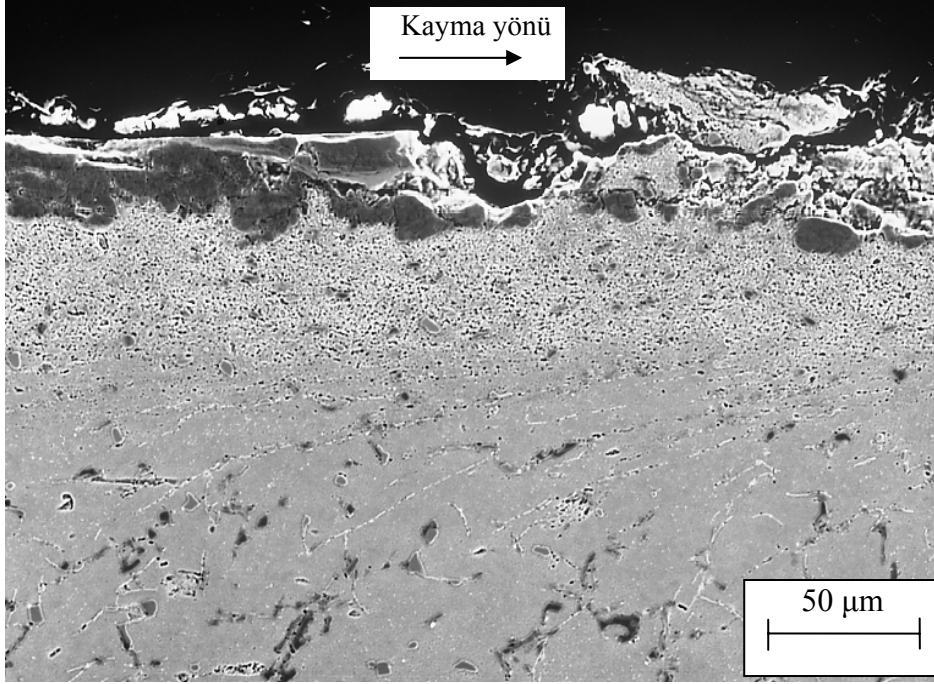
Şekil 117. 1,5 MPa basınç ve 1 m/s kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarına ait numunelerin mikrosertliklerinin aşınma yüzeyinden itibaren artan derinliğe göre değişimini gösteren eğriler



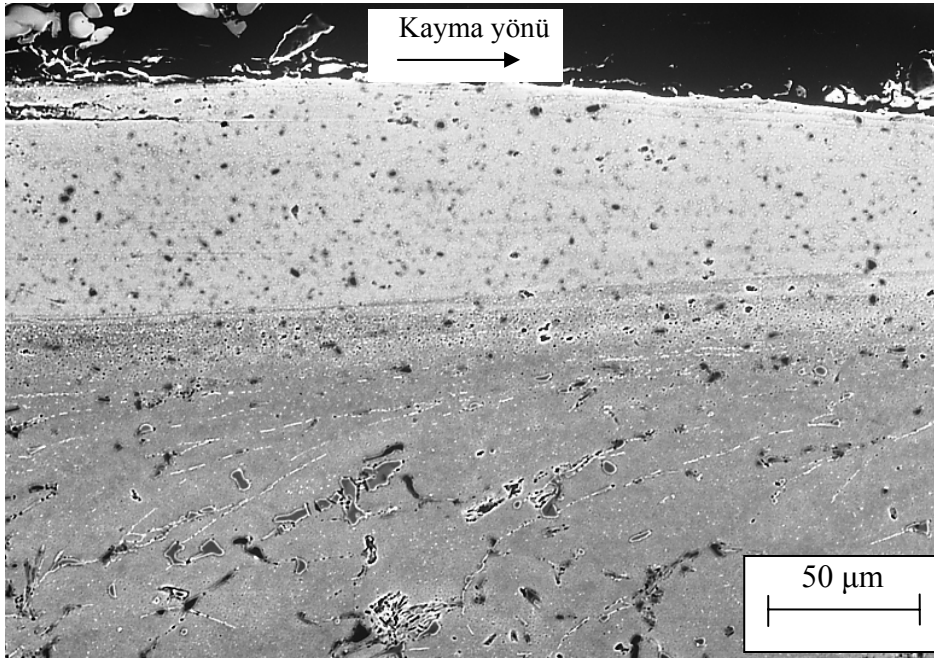
Şekil 118. Yağsız durumda 0,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 500 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



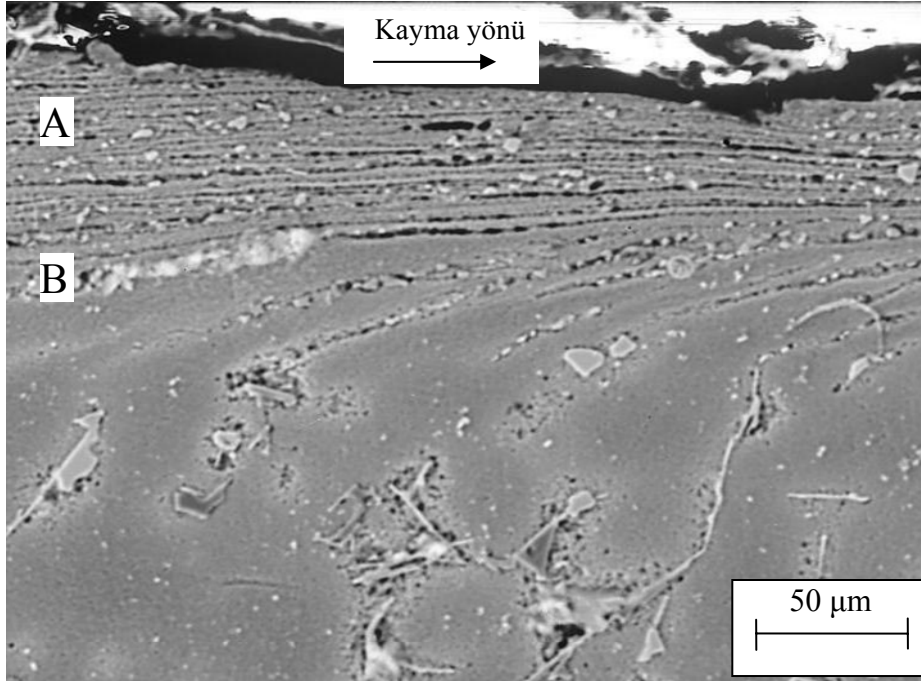
Şekil 119. 2,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 500 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



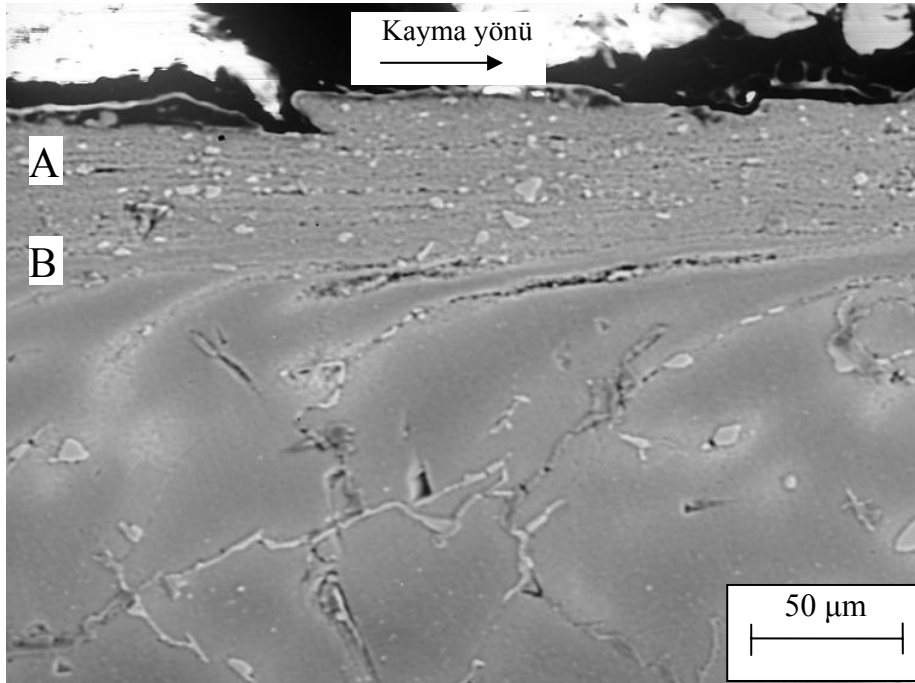
Şekil 120. Yağsız durumda 0,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 500 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan T7 ısıt işleme görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



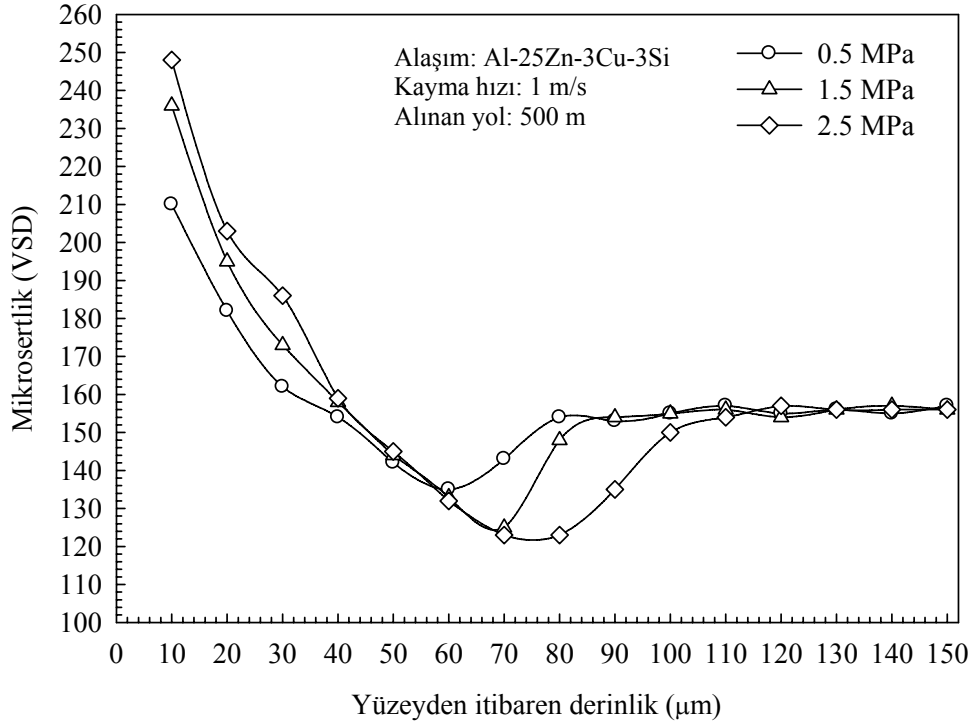
Şekil 121. 2,5 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 500 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan T7 ısıt işleme görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 122. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 0,5 m/s'lik kayma hızında 500 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 123. Yağsız durumda 1,5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında 500 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 124. Farklı basınçlarda Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımına ait aşınma numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin yüzeiden itibaren artan derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler

4. İRDELEME

Dökülmüş durumdaki ikili Al-25Zn alaşımının içyapısının alüminyumca zengin göbekli α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin η ve ötektoid $\alpha + \eta$ faz karışımından oluştuğu görüldü, Şekil 11. Bu alaşıma bakır katıldığında metalografik yapının fazla değişmediği, ancak dendritlerin içerisinde ve dendritler arası bölgelerde bakırca zengin θ (CuAl_2) fazının oluştuğu gözlemlendi, Şekil 12-18. Bakır oranı arttıkça θ fazına ait parçacıkların irileşerek daha belirgin hale geldikleri görüldü. Bakır içeren alüminyum esaslı alaşımların metalografik yapılarında da gözlenen bu durum, söz konusu alaşımların katılma davranışlarına dayandırılarak açıklanmaktadır [20,21, 24-26].

Silisyum içeren alaşımların içyapılarında ise α , $\alpha + \eta$ ve θ fazlarından başka silisyum parçacıklarının bulunduğu görüldü, Şekil 19-24. Bu parçacıkların içyapı içerisinde %3 Si oranına kadar homojen bir dağılım sergilediği, bu orandan sonra ise artan silisyum oranı ile irileşerek belirli bölgelerde kümeleştiği görüldü. Metalografik incelemeler sonucunda bu parçacıklardan ince olanların ötektik dönüşüm ürünü, iri olanların ise birincil (primer) silisyum parçacıkları olduğu belirlendi. Bu durum önceki araştırmacılar [8,11,12,28,29,36-38] tarafından da gözlenip ortaya konulmuştur. Ötektik dönüşüm ürünü silisyum parçacıklarının daha çok dendritler arası bölgelerde, birincil silisyum parçacıklarının ise hem dendritlerarası bölgelerde hem de dendritlerin içerisinde yer aldıkları gözlemlendi. Bu gözlemler söz konusu alaşımların katılma davranışlarına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, metalografik incelemeler %3 oranında silisyum içeren alaşımın içyapısında bulunan silisyum parçacıklarının ikili Al-12Si alaşımında ötektik dönüşüm sonucunda oluşan silisyum parçacıklarıyla aynı görünüme sahip olduklarını göstermiştir. Bu durum dördü Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımındaki silisyum parçacıklarının da ötektik dönüşüm sonucunda oluştuğu anlamına gelmektedir. Buna göre %3 değerinden 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 katılma sırasında ilk önce alüminyumca zengin α fazı oluşur ve sıcaklık düştükçe sıvı alaşımın alüminyum oranı azalır, silisyum oranı ise artar. Bu dönüşüm süreci sıvı metalin kimyasal bileşiminin ötektik noktanın kimyasal bileşimine erişmesine kadar devam eder. Ötektik bileşime erişildiğinde ötektik dönüşüm meydana gelir ve bu dönüşüm sonucunda α fazı ile ince silisyum parçacıklarından oluşan bir içyapı elde edilir. Geriye kalan sıvı

metalin katılaşması sonucunda da çinkoca zengin η ve ötektoid $\alpha + \eta$ fazları oluşur. Bu nedenlerden dolayı %3 oranından daha düşük oranlarda silisyum içeren alaşımların içyapılarında göbekli α dendritleri, çinkoca zengin η , ötektoid $\alpha + \eta$ ve bakırca zengin θ fazlarının yanı sıra homojen olarak dağılmış silisyum parçacıkları yer alır. Ötektik üstü alaşımlarda ise, ilk önce silisyum katılaşır ve katılaşma devam ettikçe geriye kalan sıvı içerisindeki silisyum oranı azalırken, alüminyum oranı artar. Bu süreç sıvı metalin kimyasal bileşiminin ötektik noktanın bileşimine erişmesine kadar devam eder. Sıvı metalin kimyasal bileşimi ötektik noktanın kimyasal bileşimine eriştiğinde ötektik dönüşüm meydana gelir. Bunun sonucunda da α fazı ve silisyum parçacıklarını içeren bir içyapı oluşur. Çinkoca zengin sıvının katılaşması ile de katılaşma tamamlanmış olur. Bu katılaşma sonucunda da göbekli α dendritleri, çinkoca zengin η fazı, ötektoid $\alpha + \eta$ faz karışımı ve homojen olarak dağılmış silisyum parçacıkları ile büyük boyutlu silisyum parçacıklarını içeren bir içyapı elde edilir. Bu ilkeler ışığında homojen bir dağılım gösteren ince silisyum parçacıklarının ötektik dönüşüm ürünü, büyük boyutlu silisyum parçacıklarının ise soğuma sırasında doğrudan katılaşan birincil silisyum fazına ait partiküller oldukları sonucuna varılmıştır. İnce silisyum parçacıklarının yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilemeleri katılaşan alaşım içerisinde ötektik dönüşümün meydana gelmesinden, ötektik dışı iri silisyum parçacıklarının kümeleşmeleri ise yoğunluğu düşük olan bu parçacıkların sıvı metal içerisinde yüzerlerken birbirine rastgele çarparak hareketlerini engellemeleri sonucunda farklı bölgelerde toplanmalarından kaynaklanmış olabilir [9,10,24].

Uygulanan stabilizasyon işleminin Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının metalografik yapısında belirgin bir değişime yol açmadığı, ancak T7 ısıtma işlemi sonucunda bu alaşımın dendritik yapısının tamamen ortadan kalktığı, silisyum parçacıkları ile bakırca zengin fazlarda ise herhangi bir değişimin meydana gelmediği gözlemlendi, Şekil 25 ve 26. Bu gözlemler ısıtma işlemi sırasında yapısal değişim mekanizmalarına göre açıklanabilir. Şöyle ki, stabilizasyon işlemi kritik dönüşüm sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta gerçekleştirildiğinden bu işlem sonucunda yalnız metastabil fazların dönüşmesi söz konusu olmaktadır. Bu tür fazların hacimsel oranları çok düşük olduğundan bunların dönüşümü içyapıda belirgin bir değişime yol açmamaktadır. T7 ısıtma işlemi sırasında ise aşırı doymuş α katı çözeltisinde meydana gelen difüzyon kontrollü faz dönüşümleri yapısal değişimlere yol açmaktadır. Saf Si ve θ parçacıklarında difüzyon kontrollü faz dönüşümü söz konusu olmadığından bu fazlarda yapısal değişim meydana gelmemektedir. [36-38].

Al-25Zn-(0-5)Cu alaşımlarının sertliğinin artan bakır oranı ile sürekli arttığı, matrisi oluşturan α fazının mikro sertliğinin ise %3 Cu oranına kadar arttıktan sonra sabit kaldığı gözlemlendi, Şekil 29. Bu alaşımların çekme ve basma dayanımlarının da artan bakır oranı ile artarak %3 Cu oranında en yüksek değerlerine ulaştığı ve bu değer üzerinde ise artan bakır oranı ile azaldığı görüldü, Şekil 29. Bu alaşımların kopma uzamasının artan bakır oranı ile sürekli azaldığı, yoğunluğunun ise tam tersi bir davranış sergileyerek sürekli arttığı belirlendi. Bu gözlem ve bulgular alaşımların içyapılarına dayandırılarak açıklanabilir. Bilindiği gibi bu alaşımlara katılan bakır etkisini iki farklı şekilde gösterir. Bunlardan biri α fazı içerisinde çözünerek katı çözelti sertleşmesine neden olması, diğeri de alüminyum ile birleşerek θ fazı olarak adlandırılan CuAl_2 bileşiğini oluşturmasıdır. Söz konusu katı çözelti sertleşmesi nedeniyle bu alaşımların sertlik ve mukavemeti artan bakır oranı ile artmaktadır. Bakır oranının %3 değerinin üzerine çıkması durumunda alaşımların mukavemeti azalırken, sertliğinin artmaya devam etmesi ve α fazının sertliğinin sabit kalması katı çözelti sertleşmesi etkisinin sona erdiğini göstermektedir. Bir başka deyişle alaşımın bakır oranı %3 değerine çıkınca bakırın α fazı içerisindeki çözünürlüğü en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bakır %3 oranına kadar hem α içerisinde çözünmekte hem de θ (CuAl_2) bileşiğini oluşturmaktadır. Bu oranın üzerine çıkılması durumunda ise, fazlalık bakır yalnız θ (CuAl_2) bileşiğinin oluşumu için harcanmaktadır. Bakır oranının %3 değerinin üzerine çıkması durumunda alaşımların içyapılarındaki θ (CuAl_2) parçacıklarının büyüklük ve hacimsel oranında meydana gelen belirgin artış bu görüşü doğrulamaktadır, Şekil 15-18. Bu nedenlerden dolayı alaşımların sertliği sürekli artarken, çekme ve basma dayanımları ile α fazının mikrosertlik değeri %3 Cu oranında en yüksek değerine ulaşmaktadır. Darbe direnci ve kopma uzamasındaki azalma ise θ (CuAl_2) fazının içyapı içerisindeki dağılımına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, metalografik gözlemler intermetalik θ fazının genelde dendritlerarası bölgelerde yer aldığını göstermiştir. Sert ve gevrek olan bu parçacıklarının çentik etkisi yaparak gevrek kırılmaya yol açtığı bilinmektedir [20,21,36]. Bu durum, söz konusu fazın (θ) alaşımların darbe direnci ve kopma uzaması değerlerinin azalmasına neden olduğunu göstermektedir.

Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımların sertliği artan silisyum oranı ile sürekli artarken, kopma uzaması ve yoğunluk değerlerinin sürekli azaldığı gözlemlendi, Şekil 30. Söz konusu alaşımların çekme ve basma dayanımlarının ise %1 Si oranında bir düşme gösterdikten sonra artarak %3 Si oranında en yüksek değerlerine ulaştıkları daha sonra da azaldıkları

görüldü. Bu gözlem ve bulgular silisyum parçacıklarının büyüklük ve içyapı içerisindeki dağılımlarına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, %3 Si değerinden daha düşük oranlarda silisyum içeren alaşımlardaki silisyum parçacıkları ince olup, homojen bir dağılım sergilerken, bu oranın üzerinde silisyum içeren alaşımlardaki silisyum parçacıkları hem irileşmekte hem de belirli bölgelerde toplanmaktadır, Şekil 19-24. Buna göre %3 Si oranından daha düşük oranda silisyum içeren alaşımların içyapılarında bulunan ötektik silisyum parçacıkları dispersiyon sertleşmesi mekanizmasıyla bu alaşımların sertlik ve mukavemetinin artmasına yol açtığı söylenebilir. Nitekim benzer gözlem ve sonuçlar önceki araştırmalarda da elde edilmiştir [8,11,12,28,29,36-38]. Bu değerden daha yüksek oranlarda silisyum içeren alaşımların içyapılarında bulunan birincil (primer) silisyum parçacıklarının homojen bir dağılım sergilememesi ve aralarındaki ortalama mesafenin ince parçacıklar arasındaki ortalama mesafeye göre çok daha yüksek olması nedenleriyle dispersiyon sertleşmesi etkisi azalmaktadır. Bu durum da söz konusu alaşımların mukavemetinin düşmesine yol açmaktadır. Bu alaşımların sertliğinin sürekli artması ise sert silisyum parçacıklarının hacimsel oranlarının artan silisyum oranı ile artmasından kaynaklanmaktadır [12]. Alaşımların darbe direnci ve kopma uzamasının sürekli azalması ise sert ve gevrek silisyum parçacıklarının çentik etkisi yapması ve dendritler arasında yer alan bölgeleri zayıflatmasından kaynaklanmaktadır [36-38].

Uygulanan stabilizasyon ve T7 ısı işlemlerinin Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sertlik ile çekme ve basma dayanımlarını azalttığı, darbe direnci ve kopma uzaması değerlerini ise artırdığı gözlemlendi, Şekil 31 ve 32. Söz konusu alaşımın mekanik özelliklerinde gözlenen bu değişimler denge dışı soğumadan kaynaklanan kalıntı gerilmelerin stabilizasyon işlemi sonrasında azalması ve metastabil fazların kararlı (stabil) fazlara dönüşmesinden kaynaklanmış olabilir. T7 ısı işlemi sonucunda gözlenen değişimler ise yaşlandırma veya çökeltme sertleşmesi olarak bilinen mukavemet artırma mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir. Bu işlem sırasında yaşlandırma ve aşırı yaşlandırma devreleri olmak üzere iki belirgin aşama söz konusudur. Bilindiği gibi, yaşlandırma devresinde yeni fazların çökmesi nedeniyle ortaya çıkan bağdaşıklık gerilmeleri aşırı doymuş durumdaki alaşımın sertlik ve mukavemetinin artmasına, sünekliğinin azalmasına yol açar [63,64]. Aşırı yaşlandırma devresinde ise, malzeme özelliklerinde bunun tam tersi bir değişim meydana gelir. Bu durum, bağdaşıklık gerilmelerinin zamanla ortadan kalkması ve tane boyutunun büyümesinden kaynaklanır [63,64]. Şekil 32'deki eğriye bakıldığında T7 ısı işlemi için belirlenen yaşlandırma süresinin söz konusu alaşımın aşırı yaşlandırma devresine karşı

geldiği görülür. Bu durum da T7 ısıtma işlemi sonucunda söz konusu alaşımın sertlik ve mukavemetinde meydana gelen azalma ile kopma uzaması ve darbe direncinde meydana gelen artışın nedenlerini ortaya koymaktadır.

Yağsız (kuru) durumda sürtünme ve aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu ve Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin deneyin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde arttıktan sonra yaklaşık 200-300 m kayma mesafesi sonunda sabit kaldığı gözlemlendi. Bu alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin alıştırma devresi olarak bilinen başlangıç aşamasında aniden artması yüzey pürüzlerinin temas ve etkileşiminden, söz konusu değerlerin belirli bir kayma mesafesinden sonra sabit kalmaları ise pürüzlerin zamanla azalarak yüzeylerin düzleşmesinden kaynaklanmış olabilir. Buna benzer gözlem ve açıklamalar ilgili literatürde yer almaktadır [85-90].

Yukarıda belirtilen durumlarda kuru sürtünme deneylerine tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artan bakır oranı ile azalıp %3 Cu oranında en düşük değerlerine ulaştığı, bu oranın üzerinde ise artan bakır oranı ile arttığı gözlemlendi, Şekil 36. Bu durum alaşımların içyapısına ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Sürtünme katsayısı ve hacim kaybının %3 Cu oranına kadar artan bakır oranı ile azalması, bakır katkısının söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerini artırmasından kaynaklanmaktadır [20,21,39,75]. Söz konusu özelliklere ait değerlerin %3 Cu oranından sonra artması ise, bu bakır oranından sonra bu alaşımlarda oluşan θ (CuAl_2) parçacıklarının oranında büyük bir artış meydana gelmesine ve mukavemet değerlerinin düşmesine dayandırılabilir. Şöyle ki, bakır oranının %3 değerini aşması durumunda θ parçacıklarının sayısında büyük bir artış meydana gelmekte ve alaşımların mukavemet değerleri azalmaktadır. Sert ve gevrek olan θ parçacıklarının sayısında meydana gelen bu artış sürtünme katsayısı ve sıcaklığın artmasında, mukavemet değerlerinde meydana gelen azalma da hacim kaybının artmasında etkin rol oynamaktadır.

Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin artan silisyum oranı ile sürekli arttığı, hacim kaybının ise %3 Si oranına kadar artan silisyum oranı ile azalıp daha sonra arttığı görüldü, Şekil 40. Alaşımlarının sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin artan silisyum oranı ile artması silisyum parçacıklarının sayı, boyut ve hacimsel oranlarının artmasından kaynaklanmaktadır [11,12]. Hacim kaybında meydana gelen değişimler ise mukavemet değerlerindeki değişimleri izlemektedir.

Yağsız durumlarda deneye tabii tutulan alaşımların sürtünme katsayılarının genelde artan basınç ile azaldığı, SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısının ise belirli bir gerilme

değerinin (yaklaşık 1,5 MPa) üzerinde tekrar arttığı gözlemlendi. Al-25Zn esaslı alaşımların sürtünme katsayılarının kayma hızından pek fazla etkilenmediği, SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısının ise artan kayma hızı ile belirli bir hız aralığındaki (0,75-1 m/s) duraksama devresi hariç sürekli arttığı görüldü. Bu gözlemler söz konusu alaşımların metalografik yapılarına ve yüzeylerinde oluşan oksit tabakalarına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, Al-Zn esaslı alaşımların içyapılarında bulunan alüminyum ve bakırca zengin fazlar yük taşıma görevi yaparken, daha yumuşak olan çinkoca zengin η fazı ise kaymayı kolaylaştırmaktadır [7-17]. Ayrıca alüminyum, çinko ve bakır içeren alaşımlarda yağsız durumda oluşan oksit tabakalarının da sürtünme katsayılarını azalttığı bilinmektedir [11,83,91]. SAE 65 ve 660 bronzlarının içyapıları ise α ve $\alpha+\delta$ fazlarından oluşmaktadır. Bu bronzların sürtünme katsayısında meydana gelen değişimler, yapıda bulunan sert ve gevrek δ fazının temas eden yüzeyler arasına girmesi ve matrisinin (α fazı) sert parçacıkları yeterince yutamaması veya içine alamamasından kaynaklanmış olabilir.

Yağsız durumda sürtünme ve aşınma deneyine tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artan basınç ve hız ile arttığı görüldü. Alaşımların sıcaklıklarının artan basınç ve hız ile artması sürtünme nedeniyle oluşan ısının birikimli (kümülatif) olarak artmasından kaynaklanmaktadır. Bu alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının artan basınç ile artması ise adhesif aşınma teorisine göre açıklanabilir [85-90]. Bu teoriye göre, malzemelerde meydana gelen hacim kaybı uygulanan basınç veya yükü doğru orantılı olarak değişmektedir. Başka bir deyişle, basınç arttıkça bu alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı da artar. Kayma hızının hacim kaybına etkisi ise, yüzeylerden kopan aşınma parçacıklarına etkileyen merkezkaç kuvvetine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, kayma hızı arttıkça bu parçacıklara etki eden merkezkaç kuvveti de artar. Dolayısıyla yüzeyden ayrılan parçacıklar bu kuvvetin etkisiyle savrulur ve sıvanma zorlaşır. Bu durumun da artan kayma hızı ile hacim kaybının artmasına neden olduğu söylenebilir.

Alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yaklaşık 1,5 cm³/saat'lik yağ debisi değerine kadar artan yağ debisi ile azaldığı, bu değer üzerinde ise sabit kaldığı gözlemlendi, Şekil 79-81. Bu durum yağ debisinin artması ile yüzeyler arasında oluşan yağ film kalınlığının değişimine göre açıklanabilir. Bilindiği gibi, yağ debisi arttıkça yüzeyler arasında oluşan yağ filminin kalınlığı artar. Yağ filmi kalınlığının artması da sürtünen yüzeyler arasındaki metal-metal temasının azalmasına yol açar. Bu temasın azalması sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybını azaltır. Bu ölçüm değerlerinin,

belirli bir seviyenin ($1,5 \text{ cm}^3/\text{saat}$) üzerindeki yağ debilerinde yaklaşık olarak sabit kalması yüzeyleri birbirinden ayırmak için yeterli yağ filmi kalınlığının olduğu anlamına gelmektedir.

Yağlı durumda sürtünme ve aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürtünme katsayısının artan basınç ile azaldığı, sıcaklık ve hacim kaybının ise sürekli arttığı görüldü, Şekil 82-84. Yağlı sistemlerin sürtünme katsayısı yalnız hidrodinamik yağlama devresinde artan basınçla azalır [1,11,12,36-38,85-90]. Bu durum söz konusu alaşımlarla yapılan aşınma deneyleri sırasında hidrodinamik yağlama koşullarının olduğunu göstermektedir. Hidrodinamik yağlama devresinde yüzeyler arasındaki yağ filmi kalınlığının artan basınçla azalması beklenir. Yağ filminin kalınlığının azalması yağ molekülleri arasındaki sürtünmenin azaltılmasına ve dolayısıyla sürtünme katsayısını azaltılmasına neden olmaktadır. Sıcaklıkta görülen artış ise yüzeyler arasında özellikle rodaj döneminde meydana gelen sürtünme kuvvetinin artan basınçla artmasından kaynaklanmış olabilir. Alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının artan basınçla artması ise deneyin ilk aşamasında metal-metal teması nedeniyle yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvvetine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, rodaj döneminde sürtünme veya kesme kuvveti artan basınçla artmaktadır. Sürtünme veya kesme kuvvetinin artması da alaşımlarda aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kaybının artmasına yol açmaktadır.

Alaşımların sıcaklığı artan kayma hızı ile sürekli artarken, sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinin fazla değişmediği gözlemlendi, Şekil 85-87. Sıcaklığın artması, yağa etkiyen merkezkaç kuvvetinin artan hızla artarak yağ filmi kalınlığının azalması ve bunun sonucunda meydana gelen metal-metal temasının artmasından kaynaklanmaktadır [36-38,85-90]. Sürtünme katsayısının değişmemesi, artan sıcaklıkla yağın viskozitesinin azalmasından kaynaklanmış olabilir. Viskozitenin azalması, hızın yağdaki iç sürtünme ve çalkalanmaya etkilerini dengelemiş olabilir. Hacim kaybının fazla etkilenmemesi ise, aşınmanın meydana geldiği rodaj devresinin artan hızla kısılmasına rağmen, bu devrede alınan yolun fazla değişmemesinden kaynaklanmış olabilir.

6 MPa'lık basınç, $1,5 \text{ m/s}$ 'lik kayma hızı, $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ 'lik yağ debisinde 108 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin deneyin ilk aşamasında ani bir artış gösterdiği, daha sonra ise azalarak yaklaşık 20 km'lik yol sonunda sabit kaldığı gözlemlendi. Alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının deneyin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde arttıktan sonra hemen hemen sabit değerlere ulaştığı belirlendi. Sürtünme katsayısı ve sıcaklığın rodaj dönemi

olarak da adlandırılan başlangıç aşamasında yüksek olması, sürtünen yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filminin oluşmaması nedeniyle bu yüzeylerin birbirine temas etmesinden kaynaklanmaktadır [36,87,90]. Rodaj dönemi sonrasında hem pürüzlerin azalması hem de yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filmi oluşması nedenleriyle sürtünme katsayısı ve sıcaklık azalarak sabit değerlere ulaşmaktadır. Başlangıç aşamasında hacim kaybında görülen artış, sürtünen yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filminin oluşmamasından dolayı meydana gelen metal-metal temasından kaynaklanmış olabilir [36-38,87,90]. Bu dönemde alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklığının en yüksek değerlere ulaşması bu görüşü doğrulamaktadır. 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 azaltmaktadır.

SEM ile yapılan incelemeler kuru durumda deneye tabi tutulan Al-25Zn-(1-5)Cu ve Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının aşınma yüzeylerinde sıvanma belirtilerinin yanı sıra çiziklerin oluştuğunu göstermiştir, Şekil 93-98. Bakır ve silisyum oranı arttıkça bu alaşımların aşınma yüzeylerindeki sıvanma belirtilerinin azaldığı, çiziklerin sayı ve genişliğinin ise arttığı gözlemlendi. Bu gözlem söz konusu alaşımların içyapılarında bulunan nispeten sert ve gevrek θ ve silisyum parçacıklarının sayı, büyüklük ve hacimsel oranlarına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, bakır içeren alaşımlarda bakır oranı arttıkça sert θ parçacıklarının, silisyum içeren alaşımlarda ise silisyum oranı arttıkça silisyum parçacıklarının hem sayısı hem de büyüklükleri artmaktadır. Çalışma sırasında yüzeyden kopan bu parçacıklar abrasif etki yaparak çiziklerin artıp, sıvama belirtilerinin azalmasına yol açabilir.

Basınç ve kayma hızı arttıkça Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının aşınma yüzeyinde oluşan çizik sayısı ve sıvanma belirtilerinin, SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinde ise çizik sayısı ve derinliğinin artıp, sıvanma izlerinin azaldığı görüldü. Bu gözlemler bu alaşımların içyapısında bulunan fazlara dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, çalışma sırasında yüzeyden kopan sert θ , δ ve silisyum parçacıkları abrasif etki yaparak yüzey çiziklerinin artmasına neden olabilir. Diğer taraftan Al-25Zn esaslı alaşımların, sert parçacıkları içerisine alma özelliği bakımından SAE 660 bronzundan daha üstün olduğu bilinmektedir

[21,25,36-39]. Bu nedenlerden dolayı Al-25Zn esaslı alaşımların aşınma yüzeylerinde gözlenen sıvanma belirtileri artan basınç ve kayma hızıyla artarken, bronzun yüzeyinde azalmaktadır.

Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarına ait aşınma numunelerinin yüzeylerinin altında tabaka şeklinde iki farklı bölgenin olduğu gözlemlendi, Şekil 112 ve 113. Bu bölgeler, yüzeyden itibaren A ve B harfleriyle gösterildi. A bölgesinin ince taneli bir yapıya sahip olduğu, B bölgesinin ise kayma yönüne paralel olarak yönelmiş akma çizgileri içerdiği gözlemlendi. Aşınma numunelerinin kayma yönüne paralel kesitlerinden alınan mikrosertlik ölçümleri A bölgesinin alaşımların orijinal yapılarından daha sert, B bölgesinin ise daha yumuşak olduğunu gösterdi, Şekil 117. Bu bölgelerin oluşumu çalışma sırasında sıcaklık ve basınç etkisiyle yüzey malzemesinde meydana gelen yapısal değişimler ile aşınma parçacıklarının etkileşimine dayandırılarak açıklanabilir. A bölgesinin sertliğinin çok yüksek olması aşınma parçacıklarının oksitlenmesi ve aşırı basınç altında preslenmesinden kaynaklanmaktadır [92-100]. B bölgesinin sertliğinin düşük olması ise, aşırı plastik deformasyona maruz kalan yüzey malzemesinin sıcaklığın etkisiyle yeniden kristalleşmesinden kaynaklanmış olabilir [92-100]. Bu tabakadaki yönelme ise, dönen diskin numune yüzeyine uyguladığı teğetsel kuvvet ve numune yüzeyinde oluşan kayma gerilmelerinin etkisi sonucunda meydana gelmiş olabilir. Yapılan metalografik incelemeler ile mikrosertlik ölçümleri, ince taneli A bölgesinin aşınma parçacıklarının basınç etkisiyle öğütülmesi, birbiriyle karışması ve yüzeye sıvanarak yapışması sonucunda, B bölgesinin ise yüzey malzemesinin aşırı plastik deformasyona uğrayarak kayma yönüne paralel olarak yönelmesi sonucunda oluştuğunu göstermektedir.

T7 ısıtma işlemi görmüş Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımına ait aşınma numunelerinin yüzeylerinin altında ise yalnız ince taneli bir tabakanın olduğu gözlemlendi, Şekil 115. Bu tabakanın dökülmüş durumdaki alaşımların aşınma yüzeylerinin altında gözlenen A bölgesini andırdığı, ancak derinliğinin daha düşük olduğu görüldü. Isıl işlem görmüş durumdaki bu alaşımın yüzeyinin altında gözlenen bu yapısal değişim, bu alaşımın içyapısı ile aşınma parçacıklarının oksitlenme ve merkezkaç kuvvetinin etkisiyle savrulma durumlarına dayandırılarak açıklanabilir. T7 ısıtma işlemi görmüş alaşımın matrisinin çok ince ve eş eksenli α ve η tanelerinden oluştuğu gözlemlenmiştir, Şekil 26. Bu alaşıma ait numuneden kopan aşınma parçacıklarının aynı koşullarda deneye tabi tutulan dökülmüş durumdaki alaşımların numunelerinden ayrılan aşınma parçacıklarından çok daha ince oldukları görüldü. Ayrıca, T7 ısıtma işlemi görmüş alaşıma ait aşınma numunelerinin

yüzeylerinin altında aşırı plastik deformasyonun bir göstergesi olan belirgin akma çizgilerine rastlanmamıştır. Bu gözlemler ısıtılma işlem sonrası söz konusu alaşımın deformasyon mekanizmasına bağlı olarak aşınma mekanizmasında önemli bir değişimin meydana geldiğini göstermektedir. Matris yapısı ince ve eş eksenli tanelerden oluşan bu alaşımda basınç ve sıcaklık etkisiyle tane sınırı kayması ve tane rotasyonu baskın bir deformasyon mekanizması olarak ortaya çıkmış olabilir. Bu da sürünme aşınması olarak adlandırılabilen bir aşınma mekanizmasının ortaya çıkmasına neden olabilir. Böyle bir aşınma mekanizması da toz halinde ince aşınma parçacıklarının üretilmesine yol açabilir. Bu parçacıkların hem sıcaklık etkisiyle oksitlenmesinin hem de merkezkaç kuvvetinin etkisiyle savrulmasının iri ve uzun parçacıklara göre daha kolay olması beklenir. Oksitlenme durumu aşınma parçacıklarının hem yüzeye sıvanmasını hem de birbirine yapışmalarını zorlaştırır. Savrulma durumu da yüzeye sıvanacak parçacık miktarının azalmasına yol açar. Bu nedenlerden dolayı T7 ısıtılma işlemi görmüş alaşımın aşınma yüzeyinin altında belirgin akma çizgileri yer almamakta, ancak kalınlık veya derinliği nispeten düşük olan ince taneli bir tabaka oluşmaktadır.

Dökülmüş ve ısıtılma işlem görmüş alaşımlar içerisinde en düşük sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri Al-25Zn-3Cu alaşımından, en yüksek aşınma direnci ise dökülmüş durumdaki Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımından elde edildi. Buna karşın en yüksek sürtünme katsayısı ve sıcaklık ile en düşük aşınma direnci ise SAE 660 bronzundan elde edildi. Bu durum Al-25Zn esaslı alaşımların içyapılarına, mekanik özelliklerine ve bu alaşımların aşınma mekanizmalarına dayandırılarak açıklanabilir. Al-25Zn esaslı alaşımların içyapıları alüminyumca zengin göbekli α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin η ve ötektoid $\alpha + \eta$ fazlarla birlikte bakırca zengin θ ve silisyum parçacıklarından oluşmaktadır. Çalışma durumunda bu alaşımların temas yüzeylerinde alüminyum, çinko ve bakır oksit filmleri oluşmaktadır [1,8,14,45,83]. Alüminyum ve bakır oksit filmleri yük taşıma görevi yaparken, çinko oksit filmi yağlayıcı etkisi yaparak kaymayı kolaylaştırmakta ve bu nedenle sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerini düşürmesine yol açmaktadır [1,8,14,45,83,91]. Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının en yüksek aşınma direncini sergilemesi bu alaşımın en yüksek çekme ve basma dayanımına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi Al-Zn esaslı alaşımların aşınma direnci bunların sertliğinden çok çekme ve basma dayanımlarına bağlıdır [1,11,12,14,20,21,27,29,36] . Çekme veya basma dayanımı arttıkça bu alaşımların aşınma direncinin artması beklenmektedir [1,11,12,36,38,39]. Yapılan yüzey ve yüzey altı incelemeleri Al-Zn esaslı alaşımlarda etkin aşınma

mekanizmasının adhezyon, SAE 660 ve SAE 65 bronzlarında ise abrazyon olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR

1. Al-25Zn alaşımının içyapısı göbekli α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin fazlardan oluşmaktadır. Bu alaşıma bakır katıldığında içyapıda sert ve gevrek θ (CuAl_2) parçacıkları oluşmakta ve bakır oranı arttıkça bu parçacıkların sayı ve boyutu artmaktadır.
2. Silisyum içeren Al-25Zn-3Cu alaşımlarının içyapılarında ise α , $\alpha + \eta$ ve θ fazlarından başka silisyum parçacıkları yer almaktadır. Bu parçacıklar, %3 Si oranına kadar ince görünömlü olup homojen bir dağılım sergilemekte, bu değerin üzerindeki silisyum oranlarında ise irileşerek farklı bölgelerde kümeleşmektedir.
3. Uygulanan stabilizasyon işlemleri Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının içyapısında belirgin bir yapısal değışime yol açmazken, T7 ısıl işlemleri bu alaşımın dendritik yapısını tamamen ortadan kaldırmaktadır.
4. Al-25Zn-(0-5)Cu alaşımlarının sertlik, çekme ve basma dayanımları artan bakır oranı ile artmaktadır. Ancak, bakır oranının %3 değerin üzerine çıkması durumunda sertlik artmaya devam etmekte, çekme ve basma dayanımları düşmekte ve α fazının mikrosertlik değeri ise hemen hemen sabit kalmaktadır.
5. Silisyum içeren dörtlü Al-25Zn-3Cu-(1-5)Si alaşımlarının sertlik ve mukavemet değeri artan silisyum oranı ile artmakta, %3 Si oranının üzerine çıkılması durumunda ise çekme ve basma dayanımları azalmaktadır. Ancak, bu alaşımların α fazının mikrosertlik değeri silisyum oranından etkilenmemektedir.
6. Üretilen Al-25Zn esaslı alaşımların özgül mukavemet (kN.m/kg) ve süneklik değeri monotektoid bileşime sahip (Zn-40Al esaslı) alaşımların söz konusu değeri daha yüksek olduğu görölmüştür. Ancak bu farklılık süneklik değeri çok daha belirgin olarak kendini göstermiştir.
7. Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarında meydana gelen boyut değeri en yüksek değeri (%0,03), alüminyum ve bakır içeren çinko esaslı alaşımlarda (Zn-Al-Cu) gözlenen en yüksek boyut değeri (%0,2) çok daha düşük olduğu görölmüştür.
8. Stabilizasyon ve T7 ısıl işlemleri Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sertlik, çekme ve basma dayanımlarını düşürmekte, sünekliğin bir ölçüsü olan kopma uzaması ve darbe direnci değeri ise artırmaktadır.

9. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürtünme katsayıları artan basınç ile genelde azalırken, kayma hızından pek fazla etkilenmemektedir. Diğer taraftan alaşımların sıcaklık ve aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerleri ise artan basınç ve kayma hızıyla sürekli artmaktadır. Ayrıca, hacim kaybının alaşımların sertlik, çekme ve basma dayanımları ile ters orantılı olarak değiştiği gözlenmiştir.
10. Alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri artan yağ debisi ile azalmakta, yaklaşık $1,5 \text{ cm}^3/\text{saat}$ 'lik debi değerinin üzerine çıkılması durumunda ise sabit kalmaktadır.
11. Yağlı durumda deneye tabi tutulan alaşımların sürtünme katsayısı artan basınç ile azalırken, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri sürekli artmaktadır. Ayrıca, alaşımların sıcaklığı artan kayma hızı ile sürekli artarken, sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinde önemli bir değişim meydana gelmemektedir.
12. Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarının aşınma yüzeylerinin altında meydana gelen yapısal değişimler sonucunda tabaka şeklinde farklı bölgeler oluşmaktadır. Bunlar biri ince taneli diğeri yönlenmiş tabaka olmak üzere başlıca iki farklı bölge şeklinde ortaya çıkmaktadır. Söz konusu bölgelerin kalınlığı artan basınçla artmakta, kayma hızından ise etkilenmemektedir. Bu tabakaların oluşumu aşırı plastik deformasyon, yeniden kristalleşme ve sıvanma mekanizmalarına dayandırılarak açıklanmıştır.
13. Yağlı ve yağsız durumlarda aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlar içerisinde en düşük sürtünme katsayısını üçlü Al-25Zn-3Cu alaşımı sergilerken, en yüksek aşınma direnci dördü Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımından elde edilmiştir. Deneye tabi tutulan Al-25Zn esaslı alaşımların hepsinin geleneksel yatak malzemelerinden olan SAE 65 ve 660 bronzlarından daha yüksek sertlik, çekme ve basma dayanımına ve aşınma direncine sahip oldukları belirlenmiştir.
14. Uygulanan T7 ısıl işlemi Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının deformasyon mekanizmasını ve dolayısıyla aşınma davranışını etkileyerek aşınma direncinin önemli ölçüde düşmesine yol açmaktadır.
15. Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş Al-25Zn esaslı alaşımlarda baskın aşınma mekanizmasının adhezyon, SAE 65 ve 660 bronzlarında ise abrazyon olduğu belirlenmiştir. Ancak, Al-25Zn esaslı alaşımlarda baskın aşınma mekanizması yüksek bakır ve silisyum oranlarında değişmektedir.

6. ÖNERİLER

1. Al-25Zn esaslı üçlü ve dörtlü alaşımlar içerisinde en yüksek mukavemet ve aşınma direnci sergileyen Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımların yorulma davranışları ve korozyon özellikleri incelendikten sonra bu alaşımlardan kaymalı yatak imal edilerek bunların statik ve dinamik yük altındaki tribolojik davranışları araştırılabilir.
2. Isıl işlemin Al-25Zn esaslı üçlü ve dörtlü alaşımların deformasyon ve aşınma mekanizmalarına etkileri mikroanaliz, X-ışını ve elektron difraksiyonu yöntemleriyle daha ayrıntılı biçimde incelenebilir.
3. Mg, Mn ve Ni gibi element katkılarının Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri araştırılabilir.
4. Farklı ısıl (T4,T5,T8 ve T9) ve termomekanik işlemlerin (sıcak haddeleme, ekstrüzyon) Al-25Zn esaslı alaşımların mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerine etkileri incelenerek en uygun çalışma koşulları belirlenebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Savaşkan, T., The Structure and Properties of Zinc-Aluminium Based Bearings Alloys, Ph.D. Thesis, University of Aston Birmingham, 1980.
2. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25 Al Based Alloys, Wear, 116 (1987) 221-224.
3. Murphy, S. ve Savaşkan, T., Comparative Wear Behaviour of Zn-Al Based Alloys in an Automotive Engine Application, Wear, 98 (1984) 151-161.
4. Altorfer, K., Zinc Alloys Compete With Bronze in Bearings and Bushings, Metal Progress, 122, 6 (1982) 29-31.
5. Delneuve, P., Tribological Behaviour of Zn-Al Alloys (ZA27) Compared with Bronze When Used as a Bearing Material with High Load and very Low Speed, Wear, 105 (1985) 283-292.
6. Wakefield, E.C., Copper-Aluminum-Zinc Alloy Excels in tough Conditions, Design Engineering, (1973) 1-4.
7. 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.
8. 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.
9. Altorfer, K., Zinc Alloys Compete With Bronze in Bearings and Bushings, Metall Progress, 122, 6 (1982) 29-31.
10. 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.
11. Savaşkan, T. ve Aydiner, A., Effect of Silicon Content on the Mechanical and Tribological Properties Monotectoid-Based Zinc-Aluminium-Silicon Alloys, Wear, 257 (2004) 377-388.
12. 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.
13. 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.

14. Pürçek, G., Savaşkan, T., Küçükömeroğlu, T. ve Murphy, S., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Zinc-Based Alloys, Wear, 252 (2002) 894-901.
15. Calayag, T.S., The Practicality of Using Zinc-Aluminum Alloys for Friction-Type Bearings, 25th Annual Conference of Metallurgists, August 1986, Toronto, Ontario, Bildiriler Kitabı, 305-313.
16. 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
17. 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.
18. 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.
19. Durman, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Basınçlı Döküm Alaşımlarının %0-%30 Bileşim Aralığında Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi, 5. Denizli Malzeme Sempozyumu, Nisan 1993, Denizli, Bildiriler Kitabı, 177-191.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.

27. 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.
28. 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.
29. Azaklı Z. ve Savaşkan T. An Examination of Frictional and Sliding Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy in Case of Oil Cut Off, Tribology International, 41 (2008) 9-16
30. Savaşkan, T. ve Azaklı, Z., An Investigation of Lubricated Friction and Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy in Comparison with SAE 65 Bearing Bronze, Wear 264 (2008) 920-928
31. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Decomposition of Zn-Al-Alloys on Quench-Aging, Materials Science and Technology, 6 (1990) 695-700.
32. Murphy, S., The Structure of the T' Phase in the System Al-Cu-Zn, Metal Science, 9 (1975) 163-168.
33. Murphy, S., Solid-Phase Reactions in the Low-Copper Part of the Al-Cu-Zn System, Zeitschrift Für Metallkunde, 71 (1980) 96-102.
34. Zhu, Y.H., Savaşkan, T. ve Murphy, S., Phase Transformations in Quench-Aged Zn-Al-Si Alloys, Materials Research Society Proceedings, 21 (1984) 835-840.
35. 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.
36. Alemdağ Y. ve Savaşkan, T., Mechanical and Tribological Properties of Al-40Zn-Cu Alloys, Tribology International, 42 (2009) 176-182.
37. Savaşkan, T. ve Alemdağ Y., Effects of Pressure and Sliding Speed on the Friction and Wear Properties of Al-40Zn-3Cu-2Si Alloy: A Comparative Study with SAE 65 Bronze, Materials Science and Engineering A, 496 (2008) 517-523
38. Alemdağ Y. ve Savaşkan, T., Effects of Silicon Content on the Mechanical Properties and Lubricated Wear Behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si Alloys, Tribology Letters, 29 (2008) 221-227
39. Savaşkan, T., Bican, O. ve Alemdağ, Y., Developing Aluminium-Zinc-Based a New Alloy for Tribological Applications, Journal of Materials Science, 44 (2009) 1969-1976
40. Douglass, D.L., Spinodal Decomposition in Al/Zn Alloys, Journal of Materials Science, 4 (1969) 130-136.

41. Anantharaman, T.R. ve Satyanarayana, K.G., The Metastable Solvus for Guinier-Preston Zones in Aluminum-Zinc Alloys, Acta Metallurgica, 7 (1973) 189-192.
42. 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.
43. Satyanarayana, K.G. ve Hirano, K., Metastable Solvus Curves and Structural Changes in Al-Zn Alloys, Trans. JIM, 18 (1977)403-410.
44. Gervais, E., Levert, H. ve Bess, M., The Development of a Family of Zinc-Base Foundry Alloys, Transactions American Foundryman Society, 88 (1980) 183-194.
45. 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.
46. Zhu, Y. ve Murphy, S., A General Rule of Decomposition Reaction in Supersaturated Zn-Al Based Alloys, Chinese Journal of Materials Science and Technology, 2 (1986) 105-116.
47. Zhu, Y., Phase Equilibria in Zn-Al-Cu-Si System at 285°C, Chinese Journal of Materials Science and Technology, 5 (1989) 113-118.
48. Mihaichuk, W., Zinc-Alloy Bearing Challenge the Bronzes, Machine Design, 53, 28 (1981) 133-137.
49. 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.
50. Lyon, R., Engineering Applications of ZA Alloys, Proceedings of Second Conference on Material Engineering, London, 221-227, 1985.
51. Lyon, R., The Properties and Applications of ZA Alloys, The British Foundry-man, 344-349, 1986
52. Savaşkan, T., Aydın, M. ve Odabaşıoğlu, H.A., Fatigue Behaviour of Zn-Al Casting Alloys, Materials Science And Technology, 17 (2001) 682-685.
53. Seah, K. W. H., Sharma, S. C., Girish B. M., Mechanical properties of as-cast and heat-treated ZA-27/graphite particulate composites, Applied Science and Manufacturing, 28 (1997) 251-256.
54. Zhu, Y.H. ve Goodwin, F.E., Microstructures of Thermomechanically Treated Eutectoid Zn-Al Alloy, Journal of Materials Science and Technology, 10 (1994) 1927-1932.

55. Mihaichuk, W., Zinc-Alloy Bearing Challenge the Bronzes, Machine Design, 53, 28 (1981) 133-137.
56. Funderberger, J. J., Philippe, M. J., Wagner, F. ve Esling J., Modelling and Prediction of Mechanical Properties for Materials with Hexagonal Symmetry, Acta Materialia, 45 (1997) 4041-4055
57. Zhu, H. X. ve Liu, S. K., Mechanical Properties of Squeeze-Cast Zinc Alloy Matrix Composites Containing α -Alumina Fibres, Composites, 24 (1993) 437-442
58. Skanazi, A.F., Pelerin, J., Coutouradis, 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.
59. Douglass, D. L. ve Barbee, W., Spinodal Decomposition in Al/Zn Alloys, Journal of Materials Science, 4 (1969) 138-151.
60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. Oppenheim, T., Tewfic S., Scheck T., Klee, V., Lomeli, S., Dahir, W., Youngren, P., Aizpuru, N., Clark, R., Lee, E. W., Ogren, J. ve Es-Said, O. S., On the correlation of mechanical and physical properties of 6061-T6 and 7249-T76 aluminium alloys, Engineering Failure Analysis, 14 (2007) 218-225
64. Akhter, R. , Ivanchev, L. ve Burger, H. P., Effect of pre/post T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Laser Welded SSM cast A356 Aluminium Alloy, Materials Science and Engineering A, 447 (2007) 192-196
65. Wang, Z., Li, Z., Ning, J. ve Zhao, L., Effect of Heat Treatments on the Crushing Behaviour and Energy Absorbing Performance of Aluminium Alloy Foams, Materials and Design, 30 (2009) 977-982
66. Guo, J. ve Yuan, X., The Aging Behaviour of SiC/Gr/6013Al Composite in T4 and T6 Treatments, Materials Science and Engineering A, 499 (2009) 212-214
67. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Creep Behaviour of Zn-Al-Cu Bearing Alloys, Zeitschrift Für Metallkunde, 74, 2 (1983) 76-82.
68. Murphy, S., Savaşkan, T. ve Hill, J., The Creep Kinetics of Zinc-Aluminium Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 25, 2 (1986) 145-150.

69. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Çinko-Alüminyum Esaslı Yatak Alaşımlarının Sürünme (Creep) Davranışlarının İncelenmesi, Metallurji Dergisi, 53 (1987) 15-23.
70. 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.
71. 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.
72. 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.
73. 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.
74. 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.
75. 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.
76. 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.
77. Prasad, B.K., Effect of Microstructure on the Sliding Wear Performance of a Zn-Al-Ni Alloy, Wear, 240 (2000) 100-112.
78. 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.
79. Choudhury, P. ve Das, S., Effect of Nickel Aluminides on Tribological Behaviour of Zn-Al Alloy, Materials Science and Technology, 19 (2003) 535-537.
80. 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.
81. 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.
82. 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.

83. An, J., Liu, Y. B. ve Lu, Y., The Influence of Pb on the Friction and Wear Behaviour of Al-Si-Pb Alloys, Materials Science and Engineering A, 373 (2004) 294-302
84. Savaskan, T. ve Alemdağ, Y., Effect of Nickel Additions on the Mechanical and Sliding Wear Properties of Al-40Zn-3Cu Alloy, Wear, 268 (2010) 565-570
85. Avner, S. H., Introduction to Physical Metallurgy, International Edition, Mc Graw-Hill Book Company, USA, 1974.
86. Dieter, G. E., Mechanical Metallurgy, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1976.
87. Bowdwen, F. P. ve Tabor, D., The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, Oxford, 2001.
88. Halling, J., Principles of Tribology, Macmillan Education Ltd., Great Britain, 1989.
89. Hutchings, I. M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold Publishers Ltd., Great Britain, 1992.
90. Rabinowicz, E., Friction and Wear of Materials, Jhon Willey and Sons. Inc., New York, 1995.
91. Pandey, J. P. ve Prasad, B. K., Dry Sliding Wear Behaviour of A Zinc-Based Alloy Against Different Counterface Materials, Zeitschrift Fur Metallkunde , 88 (1997) 739-743
92. Jain, L., Laufer, E. E. ve Masounave, J., Wear in Zn-Al-Si Alloys, Wear, 165 (1993) 51-56.
93. Gang, H. ve Ma, J., Friction and Wear of Al-Zn-Pb Bearing Alloy, Wear, 169 (1993) 201-207.
94. Şahin, Y. ve Murphy, S., The Effect of Sliding Speed and Microstructure on the Dry Wear Properties of Metal-Matrix Composites, Wear, 214 (1998) 98-106
95. Rodriguez, J., Poza, P., Garrido, M. A. ve Rico, A., Dry Sliding Wear Behaviour of Aluminium-Lithium Alloys Reinforced with SiC Particles, Wear, 262 (2007) 292-300
96. Geng, H. ve Ma J., Friction and Wear of Al-Zn-Pb bearing alloy, Wear, 169 (1993) 201-207
97. Iwai, Y., Hou, W., Honda, T. ve Yoneda, H., Wear Behaviour of High Tensile Strength Aluminium Alloy Under Dry and Lubricated Conditions, Wear, 196 (1996) 46-53

98. Prasad, B.K., Investigation into Sliding Wear Performance of Zinc-Based Alloy Reinforced with SiC Particles in Dry and Lubricated Conditions, Wear, 262 (2007) 262-273
99. Akarca, S.S., Altenhof, W.J. ve Alpas, A. T., Subsurface Deformation and Damage Accumulation in Aluminium-Silicon Alloys Subjected to Sliding Contact, Tribology International, 40 (2007) 735-747
100. Prasad Rao, A.K., Das, K., Murty, B.S. ve Chakraborty, M., Microstructure and Wear Mechanisms of Grain-Refined Aluminium During Dry Sliding Against Steel Disc, Wear, 264 (2008) 638-647
101. 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 Quarterly, 40 (193-210) 2001.

ÖZGEÇMİŞ

Osman BİCAN 1978 yılında Elazığ'da doğdu. 1996 yılında Elazığ Anadolu Lisesini bitirdi. 2001 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden Makina Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Kasım 2001'de K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atandı. Yüksek lisans öğrenimini 2004 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamladı. Bu dönem içerisinde iki bilimsel araştırma projesinde araştırmacı olarak görev yaptı. Osman BİCAN, 2008–2009 Eğitim-Öğretim Yılı K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü lisansüstü başarı teşvik ödülünü almıştır. Osman BİCAN'ın yüksek lisans tezinden başka uluslararası hakemli dergilerde yayımlanmış dört adet bilimsel makale ve bir adet de uluslararası bildiri olmak üzere toplam beş yayını vardır ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.

Doktora tezi kapsamında uluslararası hakemli dergilerde (SCI-index) yapılan yayınlar:

1. Savaşkan, T., Bican, O., Alemdağ, Y.: Developing Aluminium-Zinc-Based a New Alloy for Tribological Applications, Journal of Materials Science, 44 (2009) 1969-1976.
2. Bican O., Savaskan T., Influence of Test Conditions on the Lubricated Friction and Wear Behaviour of Al-25Zn-3Cu Alloy, Tribology Letters, 37 (2010) 175-182.
3. Savaskan T., Bican O., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Al-25Zn-3Cu-3Si Alloy, Tribology International, 43, 8 (2010) 1346-1352.