

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇİNKO VE BAKIR KATKILARININ Al-7Si ALAŞIMININ YAPI, MEKANİK
VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Murat BEDER

ARALIK 2014
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇİNKO VE BAKIR KATKILARININ Al-7Si ALAŞIMININ YAPI, MEKANİK
VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Mak. Müh. Murat BEDER

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24.11.2014
Tezin Savunma Tarihi : 02.12.2014

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Anabilim Dalında

Murat BEDER tarafından hazırlanan

**ÇİNKO VE BAKIR KATKILARININ Al-7Si ALAŞIMININ YAPI, MEKANİK
VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 18/11/2014 gün ve 1577 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

Üye : Prof. Dr. Ümit UZMAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ

Savaşkan
.....
Uzman
.....
Alemdağ
.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Ötektik altı alaşımlar içerisinde Al-7Si esaslı alaşımlar motor pistonları, subap kapakları, silindir gömlekleri ve motor blokları gibi bazı parçaların yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak söz konusu alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerinin pek çok uygulama için yetersiz olduğu bilinmektedir. Bu alaşımların söz konusu özelliklerinin iyileştirilmesi ve kullanım alanlarının daha da yaygınlaştırılması için yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla alaşım elementi katma, tane inceletme, modifikasyon elementi kullanma ve ısıl işlem uygulama gibi pek çok yöntemler kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar bunlar arasında alaşım elementi katma ve ısıl işlem uygulamanın en basit ve özelliklerin iyileştirilmesinde en etkin yöntemler olduğunu göstermiştir. Bu nedenle bu çalışmada çinko ve bakır katkılarının Al-7Si alaşımının yapı, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisi sistematik bir biçimde incelenerek, Al-7Si esaslı yeni alaşımların geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Tez danışmanlığımı üstlenerek çalışmaların yönlendirmesindeki katkılarından dolayı danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarına katkılarından dolayı Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN'a, Prof. Dr. Genççağa PÜRÇEK'e, Arş. Gör. Hasan Onur TAN'a, Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Takım Tezgahları Laboratuvarı'nda görevli teknisyenlere teşekkür ederim. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan bazı ön alaşımların tedarikinde sağladığı kolaylık ve desteklerden dolayı İnşaat Mühendisi Ömer FETTAHOĞLU'na şükranlarımı sunarım. Diğer taraftan üretilen alaşımların analizlerinin yapılmasında sağladığı destek ve katkılardan dolayı Binbaşı Muzaffer BAKİ'ye teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca desteklerini benden esirgemeyen başta eşim, annem ve babam olmak üzere tüm aileme teşekkür ederim.

Murat BEDER
Trabzon, 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çinko ve Bakır Katkılarının Al-7Si Alaşımının Yapı, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/12/2014

Murat BEDER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Alüminyum-Silisyum Esaslı İkili, Üçlü ve Dörtlü Alaşımların Faz Diyagramları.....	3
1.2.1. İkili Alüminyum-Silisyum Faz Diyagramı.....	3
1.2.2. Üçlü Al-Si-Zn ve Dörtlü Al-Si-Zn-Cu Faz Diyagramları.....	4
1.3. Alüminyum-Silisyum Esaslı Alaşımların Özellikleri.....	5
1.3.1. Al-Si Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri.....	5
1.3.2. Alüminyum-Silisyum Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri	8
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	10
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	12
2.1. Alaşımların Üretimi ve Kimyasal Analiz.....	12
2.2. Alaşımların Yapısal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.....	12
2.3. Alaşımlara Uygulanan Isıl İşlemler.....	14
2.4. Alaşımların Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi.....	15
2.5. Aşınma Yüzeylerinin ve Parçacıklarının İncelenmesi	19
3. BULGULAR	20
3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri	20
3.2. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular	20
3.3. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular	27
3.4. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular	32
3.5. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	35
3.6. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular	47
3.7. Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular	58

4.	İRDELEME.....	61
4.1.	Metalografik İncelemelerinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi.....	61
4.2.	Mekanik DeneYlerden Elde edilen Bulguların İrdelenmesi	63
4.3.	Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi	64
4.4.	Sürtünme ve Aşınma DeneYlerinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi.....	65
4.5.	Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi	69
4.6.	Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi	70
5.	SONUÇLAR	72
6.	ÖNERİLER	74
7.	KAYNAKLAR.....	75
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ÇİNKO VE BAKIR KATKILARININ Al-7Si ALAŞIMININ YAPISI, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Murat BEDER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ
2014, 80 Sayfa

Bu çalışmada bir dizi üçlü Al-7Si-Zn ve dördü Al-7Si-4Zn-Cu alaşımları kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Çinko katkısının ikili Al-7Si esaslı, bakır katkısının ise üçlü Al-7Si-4Zn esaslı alaşımların yapı, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelendi.

Üçlü Al-7Si-Zn alaşımlarının içyapılarının alüminyumca zengin α -dendritleri ile ötektik ve birincil silisyum parçacıklarından oluştuğu görüldü. Dördü alaşımların içyapısında ise bu fazlar ile birlikte θ fazının yer aldığı gözlemlendi. T6 ve T7 ısıtma işlemlerinin Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının dendritik yapısını ortadan kaldırdığı, ancak bu işlemlerin silisyum morfolojisi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı görüldü. Al-7Si-Zn ve Al-7Si-4ZnCu alaşımlarının yoğunluk, sertlik, akma, çekme ve basma dayanımlarının artan çinko ve bakır oranları ile arttığı, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin ise azaldığı görüldü. T6 ve T7 ısıtma işlemlerinin Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının akma ve çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığı ancak kopma uzamasını azaltmadığı gözlemlendi. Üretilen üçlü ve dördü alaşımların hacim kaybı değerlerinin artan çinko ve bakır oranları ile azalarak sırasıyla %4Zn ve %3Cu oranlarında en düşük seviyelerine ulaştıktan sonra arttığı belirlendi. Söz konusu alaşımların hacim kaybının ise artan yük ile sürekli arttığı görüldü. Ancak, kayma hızı arttıkça dökülmüş durumdaki alaşımların hacim kaybının belirli bir hız değerine kadar azaldığı, bu değer üzerinde artışa geçtiği T6 ve T7 ısıtma işlemleri uygulanmış alaşımın bu değerinin ise dökülmüş durumuna göre ters bir değişim sergilediği gözlemlendi. Aşınma deneyleri sonucunda alaşımların yüzeylerinde sıvama tabakalarının, mikroçatlakların ve ince çiziklerin oluştuğu, oksitlenmelerin ve soyulmaların meydana geldiği görüldü.

Anahtar Kelimeler: Al-Si Alaşımları, Mekanik Özellikler, Isıl İşlem, Triboloji.

Master Thesis

SUMMARY

AN INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURAL FEATURES, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Al- 7Si BASED ALLOYS CONTAINING ZINC AND COPPER

Murat BEDER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ
2014, 80 Pages

In this study, a series of ternary Al-7Si-Zn and quaternary Al-7Si-4Zn-Cu alloys were produced by permanent mould casting. The effects of zinc and copper additions on their microstructure, mechanical and tribological properties were investigated.

It was seen that the microstructure of ternary Al-7Si-Zn alloys consisted of aluminium rich α -dendrites, eutectic and primary silicon particles. In addition to these phases, θ phase was observed in the microstructure of quaternary alloys containing copper. T6 and T7 heat treatments removed the dendritic structure of the alloy but had no considerable effect on the silicon particles. The density, hardness, yield, tensile and comprehensive strengths of ternary and quaternary alloys increased with increasing zinc and copper contents respectively, but their percent elongation and impact energy decreased as the zinc and copper contents increased. T6 and T7 heat treatment caused a significant increase in the yield and tensile strength of the Al-7Si-4Zn-3Cu alloy, but a small decrease in its percent elongation. Volume loss of ternary and quaternary alloys decreased with increasing zinc and copper contents up to %4 Zn and %3 Cu respectively; when the zinc and copper contents exceeded these levels it increased. The volume loss of alloys as-cast and heat-treatment states increased continuously with increasing applied load. As the sliding speed increased volume loss of the alloys in as-cast state decreased up to its certain level, above which it started to increase. However the reverse trend was observed to T6 and T7 heat treated Al-7Si-4Zn-3Cu alloy as compared to that in its as-cast state. It was observed that wear surface of the alloys were characterised by smeared layers, microcracks, fine scratches, oxidation and delamination.

Key Words: Al-Si Alloys, Mechanical Properties, Heat Treatment, Tribology.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İkili alüminyum-silisyum faz diyagramı	4
Şekil 2. (a) Çekme, (b) basma ve (c) darbe deneylerinde kullanılan numunelerin teknik resmi	13
Şekil 3. Çözündürme ve su verme işlemi sonrasında yaşlandırma işlemine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-3Cu alaışımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri	14
Şekil 4. Bilya-disk esaslı aşınma deney düzeneğinin, (a) genel görünümünün fotoğrafı ve (b) test bölgesinin şematik resmi	15
Şekil 5. Belirli bir yük etkisi altında düzlemsel bir yüzeye temas eden küresel bir cimin bu yüzeyde oluşturduğu basınç ve gerilme dağılımları[80].....	17
Şekil 6. Al-7Si alaışımının dökülmüş durumdaki içyapısı	21
Şekil 7. Al-7Si-1Zn alaışımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	21
Şekil 8. Al-7Si-2Zn alaışımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	22
Şekil 9. Al-7Si-3Zn alaışımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	22
Şekil 10. Al-7Si-4Zn alaışımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	23
Şekil 11. Al-7Si-5Zn alaışımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	23
Şekil 12. Al-7Si-4Zn-1Cu alaışımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	24
Şekil 13. Al-7Si-4Zn-3Cu alaışımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	25
Şekil 14. Al-7Si-4Zn-5Cu alaışımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	25
Şekil 15. Al-7Si-4Zn-3Cu alaışımının T6 ısıtma işlemi görmüş durumdaki içyapısı	26
Şekil 16. Al-7Si-4Zn-3Cu alaışımının T7 ısıtma işlemi görmüş durumdaki içyapısı	27
Şekil 17. Üçlü Al-7Si-(0-5)Zn alaışımının sertlik, matrisi oluşturan α fazının mikrosertliği, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin çinko oranına göre değişimini gösteren eğriler	30
Şekil 18. Üçlü Al-7Si-(0-5)Zn alaışımının akma, çekme ve basma dayanımları ile yoğunluk değerlerinin çinko oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	30
Şekil 19. Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaışımının sertlik, matrisi oluşturan α fazının mikrosertliği, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler	31
Şekil 20. Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaışımının akma, çekme ve basma dayanım değerlerinin bakır oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	31
Şekil 21. Çekme deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn alaışımının kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü	33

Şekil 22.	Çekme deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-5Cu alaşımının kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü	33
Şekil 23.	Al-7Si-4Zn alaşımının kırılma yüzeyinin çekme doğrultusu yönündeki kesitini gösteren ışık mikroskobu görüntüsü	34
Şekil 24.	Al-7Si-4Zn-5Cu alaşımının kırılma yüzeyinin çekme doğrultusu yönündeki kesitini gösteren ışık mikroskobu görüntüsü	34
Şekil 25.	Al-7Si esaslı alaşımlar arasından seçilen bazılarının sürtünme katsayısının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler	36
Şekil 26.	Al-7Si-4Zn esaslı alaşımlar arasından seçilen bazılarının sürtünme katsayısının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler	36
Şekil 27.	Al-7Si esaslı alaşımlarının kararlı durumdaki ortalama sürtünme katsayısının çinko oranına göre değişimlerini gösteren eğriler	37
Şekil 28.	Al-7Si-4Zn esaslı alaşımlarının kararlı durumdaki ortalama sürtünme katsayısının bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	37
Şekil 29.	Aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-(0-5)Zn alaşımlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	38
Şekil 30.	Aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler	39
Şekil 31.	Al-7Si-(0-5)Zn alaşımların aşınma kaybının çinko oranına göre değişimlerini gösteren eğriler	41
Şekil 32.	Farklı yollarda aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımların aşınma kaybının bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	41
Şekil 33.	Dökülmüş ve ısıl işlemler görmüş durumdaki alaşımların kararlı durumdaki sürtünme katsayılarının yüke göre değişimini gösteren eğriler.....	44
Şekil 34.	Dökülmüş ve ısıl işlemler görmüş durumdaki alaşımların hacim kaybının yüke göre değişimini gösteren eğriler.....	44
Şekil 35.	Dökülmüş ve ısıl işlemler görmüş durumdaki alaşımların kararlı durumdaki sürtünme katsayılarının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	46
Şekil 36.	Dökülmüş ve ısıl işlemler görmüş durumdaki alaşımların hacim kaybının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	46
Şekil 37.	Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si alaşımının aşınma yüzeyinin 250 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	48
Şekil 38.	Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si alaşımının aşınma yüzeyinin 1500 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	48

Şekil 39.	Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn alaşımının aşınma yüzeyinin 250 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	49
Şekil 40.	Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn alaşımının aşınma yüzeyinin 1500 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	49
Şekil 41.	Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 250 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	50
Şekil 42.	Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1500 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü.....	50
Şekil 43.	İkili Al-7Si alaşımının 5 N'luk yük, 0,16 m/s'lik hız ve 1500 m'lik kayma mesafesinde kullanılan bilyenin yüzeyinde oluşan sıvama tabakasının SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	51
Şekil 44.	2,5 N'luk yük ve 0.16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	52
Şekil 45.	7,5 N'luk yük ve 0.16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	52
Şekil 46.	12,5 N'luk yük ve 0.16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	53
Şekil 47.	2,5 N yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıl işlemi görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	53
Şekil 48.	7,5 N yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıl işlemi görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	54
Şekil 49.	12,5 N yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıl işlemi görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	54
Şekil 50.	5 N'luk yük ve 0,08 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	55
Şekil 51.	5 N'luk yük ve 0,18 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	55
Şekil 52.	5 N'luk yük ve 0,22 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	56

Şekil 53.	5 N'luk yük ve 0,08 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıtıl işlemi görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	56
Şekil 54.	5 N'luk yük ve 0,17 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıtıl işlemi görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	57
Şekil 55.	5 N'luk yük ve 0,22 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıtıl işlemi görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü	57
Şekil 56.	5 N'luk yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn alaşımından 250 m'lik kayma yolu sonunda toplanan aşınma parçacıklarının EDS analizi ve SEM görüntüsü	58
Şekil 57.	5 N'luk yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn alaşımından 1500 m'lik kayma yolu sonunda toplanan aşınma parçacıklarının EDS analizi ve SEM görüntüsü	59
Şekil 58.	5 N'luk yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımından 250 m'lik kayma yolu sonunda toplanan aşınma parçacıklarının EDS analizi ve SEM görüntüsü	59
Şekil 59.	5 N'luk yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımından 1500 m'lik kayma yolu sonunda toplanan aşınma parçacıklarının EDS analizi ve SEM görüntüsü	60

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Al-Si Alaşımından Bazılarının Sertlik, Çekme Dayanımı ve Kopma Uzaması Değerleri	8
Tablo 2. Hesaplamalarda Kullanılan Al, Si ve Çelik İçin Baz Alınan Değerler, [54].....	18
Tablo 3. Bu Çalışmada Kullanılan Yük Değerleri İçin Hesaplanan a , Z_m , τ_{max} ve P_{max} Değerleri	18
Tablo 4. Alaşımın Kimyasal Bileşimleri	20
Tablo 5. Alaşımın Yoğunluk, Sertlik, Mikrosertlik, Akma, Çekme ve Basma Dayanımları ile Kopma Uzaması Değerleri	29
Tablo 6. Al-7Si-4Zn-3Cu Alaşımının T6 ve T7 Isıl İşlemleri Uygulanmış Numunelerine Ait Sertlik, Akma ve Çekme Dayanımları ile Kopma Uzaması Değerleri	32
Tablo 7. Aşınma Deneyine Tabi Tutulan Al-7Si-(0-5)Zn ve Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu Alaşımında Aşınma ile Meydana Gelen Hacim Kaybı Değerleri	40
Tablo 8. Farklı Yüklerde Aşınma Deneyine Tabi Tutulan Alaşımın Kararlı Durumdaki Sürtünme Katsayısı Değerleri	43
Tablo 9. Farklı Yüklerde Aşınma Deneyine Tabi Tutulan Alaşımın 1000 m Kayma Mesafesi Sonundaki Hacim Kaybı Değerleri.....	43
Tablo 10. Farklı Kayma Hızlarında Aşınma Deneyine Tabi Tutulan Alaşımın Kararlı Durumdaki Sürtünme Katsayısı Değerleri	45
Tablo 11. Farklı Kayma Hızlarında Aşınma Deneyine Tabi Tutulan Alaşımın, 1000 m Kayma Mesafesi Sonundaki Hacim Kaybı Değerleri	45

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Al-Si alaşımları içerdikleri silisyum oranına göre ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü alaşımlar olmak üzere üçe ayrılır [1-3]. Ötektik Al-Si alaşımlarında yaklaşık %12 oranında silisyum bulunur. Bu değerden düşük oranlarda silisyum içeren alaşımlar ötektik altı, yüksek oranlarda silisyum içeren alaşımlar ise ötektik üstü alaşımlar olarak adlandırılır [1-3]. Alüminyum silisyum alaşımlarının mekanik ve tribolojik özellikleri içerdikleri silisyum oranına bağlıdır [4-6]. Şöyle ki, silisyum oranı arttıkça alaşımların sertliğinin sürekli arttığı sünekliğinin ise azaldığı görülmüştür [4-6]. Diğer taraftan bu alaşımların çekme dayanımlarının ve aşınma dirençlerinin artan silisyum oranı ile artıp %12 silisyum oranında en yüksek değerine ulaştıktan sonra düştüğü belirlenmiştir [5,6]. Ancak, ötektik üstü alaşımların yüksek hız ve basınçlarda ötektik ve ötektik altı alaşımlara göre daha üstün aşınma direnci sergiledikleri görülmüştür [7,8]. Bu durumun söz konusu alaşımların sertliğinin artan silisyum oranı ile artmasından kaynaklandığı belirlenmiştir [6,9-13]. Ancak ötektik üstü alaşımların içyapılarında bulunan iri ve sert silisyum parçacıklarının aşınma sırasında malzeme yüzeyinden ayrılarak temas yüzeylerinde abrasif aşınmaya yol açtığı, bununla karşı yüzeyin aşınma kaybının artmasına neden olduğu gözlenmiştir [6,9-13]. Bu durum bu alaşımların tribolojik amaçlı kullanılması hususunda bir belirsizlik oluşturmuş ve pratikte kullanımlarını engellemiştir. Bu nedenle günümüzde tribolojik amaçlı uygulamalar için ötektik altı ve ötektik alüminyum-silisyum alaşımları daha çok tercih edilmektedir [14-18]. Ötektik altı alaşımlar içerisinde ise Al-7Si esaslı alaşımların tribolojik uygulamalar için yaygın olarak kullanıldığı göze çarpmaktadır [14-18,19].

Alüminyum-silisyum alaşımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerinin bunların içyapılarında bulunan ötektik silisyum ve birincil silisyum parçacıklarının boyutuna, şekline ve dağılımına göre önemli bir değişim sergilediği belirlenmiştir [16-21]. İri ve keskin köşeli silisyum parçacıklarının alüminyum-silisyum alaşımlarının mukavemet ve süneklik değerleri ile aşınma direncini düşürdüğü, homojen dağılmış küresel biçimdeki silisyum parçacıklarının ise bu değerleri artırdığı görülmüştür [16-21]. Bu nedenle silisyum parçacıklarının hem morfolojisini değiştirmek hem de dağılımını homojenleştirmek amacıyla alüminyum-silisyum alaşımlarına bazı işlemler uygulanmaktadır. Bunların

başında söz konusu alaşımlara sodyum, antimon ve stronsiyum gibi modifikasyon elementleri katmak, alaşımları dökümden hemen sonra hızlı soğutup katılaştırmak ve bu alaşımları ısıtma işlemine tabi tutmak gibi işlemler gelmektedir [22-29]. Yapılan çalışmalar ısıtma işleminin söz konusu alaşımların aşınma direncini önemli ölçüde artırdığını, modifikasyon elementlerinin ise aşınma direnci üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermiştir [22-30].

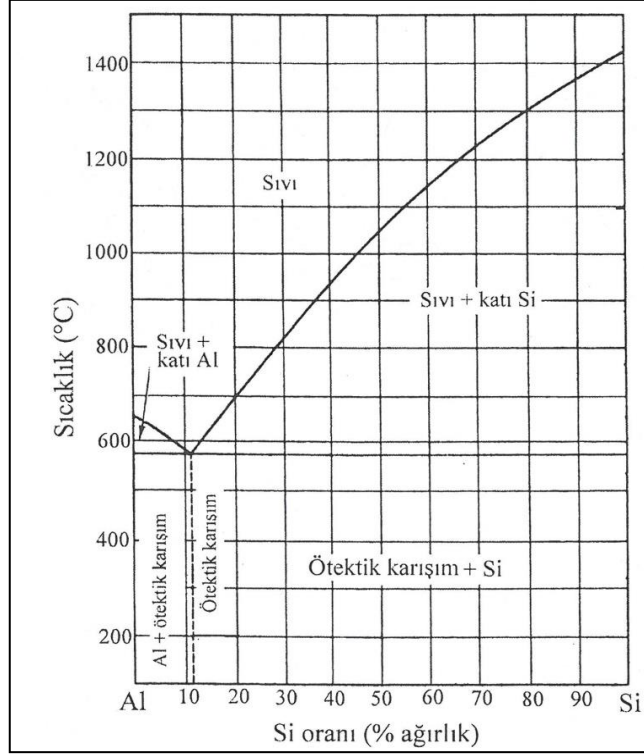
İkili alüminyum-silisyum alaşımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerinin pek çok uygulama için yeterli olmadığı görülmüştür. Bu alaşımlara alaşım elementi katarak söz konusu özelliklerin önemli ölçüde iyileştirildiği belirlenmiştir [31-37]. Bu amaçla alüminyum-silisyum alaşımlarına bakır, demir, magnezyum, mangan, nikel, kurşun ve çinko gibi alaşım elementleri katma yoluna gidilmiştir [31-37]. Demir ve nikel katkılarının alüminyum-silisyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklardaki aşınma direncini artırdığı, sünekliğini ise düşürdüğü belirlenmiştir [31-37]. Bu nedenle demir ve nikel içeren alüminyum-silisyum alaşımlarının süneklik değerlerini artırmak için bunlara mangan katılmaktadır [27-29,38-40]. Bakır, magnezyum ve çinko gibi alaşım elementleri alaşımların hem sertlik ve mukavemetini artırmakta hem de bunları ısıtma işlemine uygun hale getirmektedir [6,8,25-28]. Bu katkı maddelerini içeren alüminyum-silisyum alaşımlarına uygulanan ısıtma işlemleri sonucunda bunların sertlik ve adesiv aşınma direncinin arttığı görülmüştür [25-28]. Ancak gerek çinko gerekse bakırın alüminyum-silisyum alaşımlarının yapı, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkilerinin sistematik bir biçimde araştırılmadığı gözlenmiştir. Çinko esaslı alaşımlar üzerinde yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinde bu alaşımların aşınma yüzeylerinde oluşan çinko oksit tabakasının bir katı yağlayıcı gibi davranarak kaymayı kolaylaştırdığı belirlenmiştir [6,17-20]. Nitekim söz konusu oksit tabakasından dolayı çinko esaslı alaşımların sürtünme katsayısının azaldığı aşınma direncinin ise arttığı görülmüştür [6,17-20]. Diğer taraftan bakır katkısının Al-Cu alaşımlarının sertlik ve mukavemetini önemli oranda artırdığı belirlenmiştir [30,33]. Söz konusu alaşımın sertlik ve mukavemetinde meydana gelen artışın bakırın alüminyum içersinde belli bir orana kadar çözünmesinden ve geri kalan bakırın da alüminyumla birlikte sert ve gevrek intermetalik faz parçacıklarını oluşturmasından kaynaklandığı ileri sürülmüştür [30,33,34]. Dolayısıyla bu iki alaşım grubunun sergilediği özellikler Al-7Si alaşımında birleştirilerek bunların hem sertlik ve mukavemetinin hem de aşınma direncinin artırılması sağlanabilir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında çinko ve bakır katkılarının ötektik altı Al-7Si alaşımının yapı, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin sistematik

bir biçimde araştırılması ve geleneksel alaşımlardan farklı Al-7Si esaslı yeni alaşımların geliştirilmesi amaçlanmıştır.

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

1.2.1. İkili Alüminyum-Silisyum Faz Diyagramı

İkili alüminyum-silisyum faz diyagramı Şekil 1’de verilmiştir [41]. Bu diyagramda görüldüğü gibi alüminyum ve silisyumun sıvı durumda birbiri içerisinde her oranda çözünmekte, katı durumda ise hiç çözünmemektedir [41-44]. Sıvı faz 577 °C’de yaklaşık %12 silisyum oranında ötektik dönüşümle katı alüminyum ve silisyum katmanlarından oluşan ötektik bir karışım meydana getirmektedir. Ötektik dönüşümün meydana geldiği kimyasal bileşim dikkate alınarak alüminyum-silisyum alaşımları ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü alaşımlar olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Al-Si faz diyagramından da görüldüğü gibi ötektik altı alaşımların katı durumdaki içyapıları alüminyum fazı ile ötektik karışımdan, ötektik üstü alaşımların içyapıları ise ötektik karışım ve birincil silisyum parçacıklarından oluşmaktadır. Ötektik dönüşüm sonucu oluşan silisyum parçacıklarının ince ve uzun, birincil silisyum parçacıklarının ise iri ve köşeli bir görünüm sergiledikleri gözlenmiştir [41-44].



Şekil 1. İkili alüminyum-silisyum faz diyagramı, [41]

1.2.2. Üçlü Al-Si-Zn ve Dörtlü Al-Si-Zn-Cu Faz Diyagramları

Üçlü Al-Si-Zn ve dörtlü alüminyum Al-Si-Zn-Cu alaşımlarına ait faz diyagramları henüz tam olarak belirlenememiştir. Ancak yüksek oranda çinko ve alüminyum, düşük oranda silisyum içeren üçlü Al-Zn-Si alaşımlarında meydana gelen faz dönüşümleri birkaç araştırmacı tarafından incelenmiştir [12,45-51]. Bu araştırmalar silisyumun Al-Zn matrisi içerisindeki çözünürlüğünün ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ve bu nedenle faz dönüşümlerini fazla etkilemediğini göstermiştir. Nitekim metalografik incelemeler sonucunda bu alaşımların içyapılarının alüminyumca zengin göbekli α dendritleri ve bu dendritler arasında yer alan çinkoca zengin η fazı ile silisyum parçacıklarından oluştuğu görülmüştür. Ancak düşük oranda çinko içeren Al-7Si-Zn alaşımları üzerinde yapılan bir çalışmada çinkonun alüminyum içerisinde katı durumda tamamen çözünerek alüminyumca zengin α fazını oluşturduğu gözlenmiş, çinkoca zengin η fazına ise rastlanmamıştır [45-51]. Bu nedenle düşük oranlardaki çinko katkısının Al-Si alaşımlarının morfolojisi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir.

Diğer taraftan bakır katkısının alüminyum içerisindeki katı çözünürlüğünün yaklaşık %1, alüminyum-çinko matrisi içerisindeki çözünürlüğünün ise yaklaşık %2 oranında

olduğu görülmüştür [6,30,33,47]. Çözünürlüğün dışında kalan bakırın alüminyum ve çinkoyle reaksiyona girerek bakırca zengin θ , ϵ ve T' gibi metallerarası bileşiklerin oluşmasına yol açtığı belirlenmiştir. Bu durum Al-Si-Zn-Cu alaşımlarına ait faz diyagramlarının bunların ikili sistemlerine göre karmaşık bir hal almasına neden olmuştur. Düşük oranlarda çinko içeren Al-Si-Zn-Cu alaşımlarında ise θ fazı dışında bakırca zengin herhangi bir fazın oluşmadığı gözlenmiştir [49-53].

1.3. Alüminyum-Silisyum Esaslı Alaşımların Özellikleri

1.3.1. Al-Si Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

İkili alüminyum-silisyum alaşımlarından bazılarının sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri Tablo 1'de verilmiştir [54]. Bu tabloya bakıldığında söz konusu alaşımların bu özelliklerinin silisyum oranına bağlı olarak değiştiği görülmektedir [54]. Şöyle ki, silisyum oranı arttıkça söz konusu alaşımların sertliği sürekli olarak artmakta, sünekliği ise azalmaktadır. Alaşımların sertliğinde meydana gelen artış sert silisyum parçacıklarının oranının artan silisyum oranı ile artmasından kaynaklanmaktadır [1-5,54,55]. Ancak keskin kenar ve köşeli bu parçacıklar hem gerilme yığılmasına yol açmakta hem de çentik etkisi yaparak alaşımların süneklik değerlerini düşürmektedir [1-5,54-56]. Al-Si alaşımlarının çekme dayanımları ise artan silisyum oranı ile önce artmakta %12 silisyum oranında en yüksek değerine ulaştıktan sonra azalmaktadır. Bu durum bu alaşımların içyapısında bulunan sert ve gevrek silisyum parçacıklarının boyut, şekil ve dağılımına bağlı olarak açıklanmaktadır [6,7,11,14]. Şöyle ki, Al-Si alaşımların içyapılarında iki farklı görünüme sahip silisyum parçacıkları bulunmaktadır. Bunlardan ince ve uzun olanları ötektik, iri ve keskin köşeli olanları ise birincil silisyum parçacıkları olarak adlandırılmaktadır. Ötektik silisyum parçacıkları ötektik altı alaşımlarda dentritlerarası bölgelerde yer almakta ve silisyum oranı arttıkça bu parçacıklar yapı içerisine homojen bir biçimde dağılmaya başlamaktadır. %12 silisyum oranında ise içyapıda homojen bir biçimde dağılmış alüminyum ve silisyum katmanlarından oluşan lamelli bir yapı oluşmaktadır [4-6,9-13]. Bu durum Al-Si alaşımlarının çekme dayanımının artan silisyum oranı ile artarak %12 silisyum oranında en yüksek değerine ulaşmasına neden olmaktadır. Ötektik üstü alaşımlarda ise ötektik silisyumların yanı sıra birincil silisyum parçacıkları oluştuğu ve bunların bazı bölgelerde kümелendikleri görülmüştür. Söz konusu

parçacıkların buldukları bölgelerde yerel gevrekliğe yol açarak çekme dayanımının düşmesine yol açtığı belirlenmiştir [4-6,9-13].

İkili alüminyum-silisyum alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerlerinin pek çok uygulama için yeterli olmadığı bilinmektedir [57-59]. Bu nedenle alaşım elementi katma, tane inceltme ve ısıtım işlemi gibi bir takım yöntemler kullanarak bu alaşımların söz konusu değerlerinin iyileştirilmesi yoluna gidilmiştir [31-37]. Alaşım elementi olarak magnezyum, bakır, mangan, nikel, demir, çinko, kurşun ve fosfor kullanılmıştır. Bu alaşım elementleri içerisinde magnezyum, bakır ve çinkonun söz konusu alaşımların mukavemetini hem dökülmüş hem de ısıtım işlemi görmüş durumda önemli oranda artırdığı belirlenmiştir. Bu durum söz konusu alaşım elementlerinin alüminyum içerisinde hem çözünmesine hem de Mg_2Si ve $AlCu_2$ gibi sert fazların oluşturmaya dayandırılarak açıklanmıştır [31-37]. Ancak çinko ve bakırın bu alaşımların mekanik özelliklerine etkisinin sistematik bir biçimde incelenmediği görülmüştür.

Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirmenin diğer bir yolu ise bu alaşımlara stronsiyum ve sodyum gibi modifikasyon elementleri katarak silisyum morfolojisini değiştirmektir [29]. Söz konusu elementler sıvı çözelti içerisinde bulunan silisyumun hem difüzyon katsayısını düşürmekte hem de büyümesini engellemektedir. Bu durum iğne biçimindeki silisyum parçacıklarının nispeten küresel forma dönüşmesine yol açmaktadır [29]. Küresel biçimdeki silisyum parçacıkları iğne biçimindeki silisyum parçacıklarına göre daha az çentik etkisine sahiptir. Bu nedenle alaşımların içyapısında küresel silisyum parçacıklarının yer alması mukavemet ve süneklik değerlerinin artmasına yol açmaktadır. Al-Si alaşımlarının mekanik özellikleri aşılama olarak bilinen Al-5Ti, Al-Ti-B ve TiB_2 gibi tane inceltici elementler kullanılarak veya hızlı soğutma ile ince taneli yapılar oluşturularak da artırılabilir [25-29]. Bu durum ince taneli malzemelerde tane sınırı sayısında meydana gelen artışa dayandırılarak açıklanmaktadır [26-28]. Son yıllarda modifikasyon ve tane inceltici elementleri bir arada kullanarak Al-Si alaşımlarının mukavemetlerinin artırılması yoluna gidilmiş, ancak döküm sırasında söz konusu elementlerin oranların ayarlanmasında karşılaşılan zorluklar nedeniyle henüz tam bir sonuç elde edilememiştir [25-29].

Al-Si esaslı alaşımların içyapılarını kararlı hale getirmek, sertlik ve mukavemet değerlerini artırmak için bu alaşımlara T5 ve T6 gibi bazı ısıtım işlemleri uygulanmaktadır. Yapılan çalışmalar T5 ısıtım işleminin alaşımların içyapılarını kararlı hale getirdiğini, T6 ısıtım işleminin ise sertlik ve mukavemetlerini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. T5 ısıtım

işlemi, söz konusu alaşımların 120-180 °C arasındaki sıcaklıklarda 3-10 saat gibi bir süre tavlanması suretiyle yapılmaktadır. Bu ısıl işlem alaşımların dendritik yapısında önemli bir değişme yol açmamakta ancak kararsız (metastabil) fazların kararlı (stabil) fazlara dönüşmesini sağlamaktadır [23,35-37]. Diğer taraftan alaşımların dökümü sırasında denge dışı soğumadan kaynaklanan kalıntı veya artık gerilmelerin bu ısıl işlemde sonra giderilmektedir. Ancak, bu durumun alaşımların sertlik ve mukavemetinde belirgin bir azalmaya yol açmaktadır [23,35-37]. Çözündürme, su verme ve yaşlandırma aşamalarını içeren T6 ısıl işlemi ile söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemetlerinin önemli ölçüde artırıldığı görülmüştür [37]. Bu işlem alaşımların 400-550 °C arasındaki sıcaklıklarda çözündürülmesi ve hemen ardından su verilmesi ve daha sonra 150-200 °C aralığındaki sıcaklıklarda ise 2-8 saat süreyle yaşlandırılması şeklinde uygulanmaktadır [35,37]. Bu işlem sonucunda alaşımların dendritik yapılarının ortadan kalktığı bunların yerini ise ince taneli homojen bir yapının aldığı görülmüştür. Ancak, istenen yapı ve özelliklerin elde edilebilmesi için çözündürme, yaşlandırma sıcaklık ve sürelerinin deneysel verilere dayanarak belirlenmesi sonucuna varılmıştır.

Al-Si alaşımlarının yorulma ömrünün gözenek oranına, bunların yüzeylerinde oluşan oksit filmlerine ve yapısal özelliklerine bağlı olduğu görülmüştür. Ancak gözenek oranının bu alaşımların yorulma ömrü üzerinde yüzey oksitlerinden daha etkin rol oynadığı gözlenmiştir. Nitekim gözenek oranı arttıkça söz konusu alaşımların yorulma ömrünün azaldığı belirlenmiştir [60]. Bu durum söz konusu kusurların yorulma esnasında çatlak oluşturma eğilimini artırmasından kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Diğer taraftan alaşımların içyapılarının yorulma ömrüne etkileri konusunda bir takım farklı görüşler ortaya atılmıştır [61]. Genel olarak ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin azaltılmasının ve silisyum parçacıklarının modifikasyon elementleri kullanılarak küresel forma dönüştürülmesinin yorulma ömrünü arttırdığı görülmüştür [60,61]. Ancak ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin 40 µm'den düşük 60 µm'den büyük olması durumunda yorulma ömrünün azaldığı, 40 ile 60 µm arasındaki değerlerinde ise yorulma ömrünün sabit bir değişim sergilediği gözlenmiştir [60,61]. Diğer taraftan düşük akma gerilmesine sahip Al-Si alaşımlarının kısa ömürlü bir yorulma davranışı sergilediği görülmüştür [60,61]. Bu nedenle söz konusu alaşımları ısıl işleme tabi tutarak akma dayanımlarının ve yorulma ömürlerinin artırılması yoluna gidilmiştir [60-62]. Yapılan araştırmalar T6 ısıl işlemine tabi tutulan Al-Si alaşımlarının akma dayanımlarında meydana gelen artıştan dolayı yorulma ömrünün arttığını göstermiştir [62,63].

Tablo 1. Al-Si Alaşımlarından Bazılarının Sertlik, Çekme Dayanımı ve Kopma Uzaması Değerleri, [54]

Alaşımlar	Sertlik (VSD)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Al-2Si	39,5	127,3	12,4
Al-4Si	47,3	142,2	10,2
Al-6Si	55,6	155,7	9,6
Al-8Si	61,6	169,6	7,2
Al-11,6Si	67	185,4	5,8
Al-12,5Si	70	189	5,4
Al-15Si	72,5	183,25	4,7
Al-17Si	76,6	175,8	3
Al-20Si	81	172,4	2,5

Kokil kalıba döküm

1.3.2. Alüminyum-Silisyum Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri

Al-Si alaşımlarının sürtünme ve aşınma davranışları pek çok araştırmacı tarafından incelenmiş ve söz konusu alaşımların geleneksel yatak malzemelerinden daha üstün tribolojik özellik sergiledikleri belirlenmiştir [10-14,17-22,64-75]. Bu durum alaşımların içyapılarına dayandırılarak açıklanmıştır. Şöyle ki, Al-Si alaşımların mikro yapıları alüminyumca zengin yumuşak bir matris ve sert silisyum parçacıklarından oluşmaktadır. Bu yapılardan sert olanı yük taşıma görevi yaparken yumuşak olanı ise hem kaymayı kolaylaştırmakta hem de aşınan parçacıkları kendi bünyesinde toplamaktadır. Bu özelliklerinden dolayı alüminyum-silisyum alaşımları tribolojik amaçlı uygulamalar için önemli bir malzeme olarak değerlendirilmektedir [17-22,64-68].

Al-Si alaşımlarının aşınma davranışlarının önemli oranda bunların içyapılarında bulunan sert silisyum parçacıklarının boyut, şekil ve dağılımına bağlı olduğu belirlenmiştir [19,20,65,66]. Şöyle ki, silisyum oranı arttıkça Al-Si alaşımlarının aşınma direncinin arttığı %12 silisyum oranında en yüksek değerine ulaştıktan sonra azaldığı görülmüştür [10,14-18,65,68]. Diğer taraftan, Sarkar ve arkadaşları ötektik altı Al-Si alaşımlarının ötektik üstü Al-Si alaşımlarından daha üstün aşınma davranışı sergilediğini belirlemişlerdir [19,20]. Bu durumu ötektik üstü alaşımların içyapılarında bulunan keskin kenar ve köşeli birincil (iri) silisyum parçacıklarının aşınma sırasında yüzeyden ayrılarak oluşturduğu abrasif etkiye dayandırarak açıklamışlardır [17-22,66-69]. Ancak, bazı araştırmacılar yumuşak aşınma bölgesinde silisyum oranının alaşımların aşınma davranışı üzerinde belirgin bir etkiye

sahip olmadığını, bazıları ise ötektik üstü alaşımların aşırı aşınma bölgesinde diğer alaşımlardan daha üstün aşınma davranışı sergilediğini belirtmişlerdir. Bu durum ise alaşımların sertliğinin artan silisyum oranı ile artmasına ve birincil silisyum parçacıklarının yük taşıma özelliğine dayandırılarak açıklanmıştır [54]. Ancak bu alaşımların içyapılarında bulunan birincil silisyum parçacıkları hem alaşımların talaşlı imalatında bir takım zorlukların ortaya çıkmasına yol açmakta hem de çalışma sırasında karşı yüzeyin aşınmasına neden olmaktadır. Bu zorluklar günümüzde söz konusu alaşımların tribolojik amaçlı kullanılmasını kısıtlamaktadır. Bu nedenlerle Al-Si alaşımları arasında ötektik altı ve ötektik alaşımlar tribolojik uygulamalar için daha yaygın bir malzeme olarak tercih edilmektedir [10,17-22,54,66,69,70].

Ötektik altı Al-Si alaşımları arasında Al-7Si alaşımı gerek otomotiv gerekse havacılık endüstrisinde bazı parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu alaşımın mekanik özelliklerinin bazı tribolojik uygulamalar için yetersiz olduğu görülmüştür [57,59,65]. Bu nedenle alaşım elementi katma, modifikasyon, tane inceltme ve ısıl işlem gibi yöntemlerle söz konusu alaşımların hem mekanik hem de tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi yoluna gidilmiştir [5,8,21-29,69]. Isıl işlemin söz konusu alaşımların aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı, ancak bu işlemin uzun zaman alması nedeniyle ekonomik bir takım sorunlar oluşturduğu görülmüştür [23,35,37,63]. Diğer taraftan modifikasyon işleminin aşınma direnci üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir [3,23,25-29]. Son zamanlarda modifikasyon ve tane inceltici elementleri bir arada kullanılarak alüminyum-silisyum alaşımlarının tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesine çalışılmaktadır. Ancak söz konusu katkı maddelerinin oranlarının ayarlanmasında ve döküm esnasındaki kontrolünde bir takım zorlukların meydana geldiği belirlenmiştir [3,37,38]. Bu nedenle söz konusu yöntemler arasında gerek uygulama kolaylığı gerekse etkisi bakımından en uygun yöntemin alaşımlama olduğu sonucuna varılmıştır. Magnezyum, bakır, mangan, nikel ve çinko gibi alaşım elementlerinin Al-7Si alaşımlarının aşınma direncini artırdığı görülmüştür [22,30,32,34,55,59,63]. Ancak söz konusu elementler arasında çinko ve bakırın Al-7Si alaşımın tribolojik özelliklerine etkisinin sistematik bir biçimde araştırılmadığı belirlenmiştir.

1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Al-Si döküm alaşımları beyaz metal, bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel malzemelere göre bazı üstün özelliklere sahiptir. Bu üstünlüklerin başında söz konusu alaşımların yoğunluğunun düşük ve özgül mukavemetinin yüksek olması, döküme ve işlenmeye elverişli olması, üstün aşınma ve korozyon direnci sergilemesi, termal iletkenliğinin yüksek olması, alaşım elementlerinin kolay bulunması ve ucuza temin edilmesi gelmektedir. Bu üstün özelliklerinden dolayı söz konusu alaşımlar otomotiv endüstrisinde kullanılan motor gövdesi, silindir kapağı ve supap iteceği gibi bazı önemli parçaların üretiminde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu kullanıma bağlı olarak son on yıl içerisinde Avrupa ve Amerika'da alüminyum-silisyum alaşımlarının üretimi hızlı bir artış göstermiş ve bu alaşımların özelliklerinin iyileştirilmesi ve kullanım alanlarının daha da yaygınlaştırılması hususunda yoğun çalışmalar başlatılmıştır.

Al-Si alaşımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerinin içerdikleri silisyum oranına bağlı olduğu görülmüştür. Bu alaşımların çekme dayanımının ve aşınma direncinin artan silisyum oranı ile arttığı %12 silisyum değerinden sonra ise azaldığı belirlenmiştir. Diğer taraftan silisyum oranı arttıkça alaşımların sertliğinin sürekli artarken sünekliğinin azaldığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar Al-Si alaşımlarının içyapısında bulunan silisyum parçacıklarının boyutuna, şekline, oranına ve dağılımına dayandırılarak açıklanmıştır. Şöyle ki, Al-Si alaşımlarının içyapılarında bulunan keskin köşeli silisyum parçacıklarının Al-Si alaşımlarının mukavemet ve süneklik değerleri ile aşınma direncini düşürdüğü, homojen dağılmış küresel biçimdeki silisyum parçacıklarının ise söz konusu bu değerleri artırdığı belirlenmiştir. Bu nedenle Al-Si alaşımlarında bulunan silisyumun morfolojisini değiştirmek ve dağılımını homojenleştirmek amacıyla bu alaşımlara bazı işlemler uygulanmaktadır. Bu işlemlerin başında söz konusu alaşımlara modifikasyon elementleri katmak, alaşımları dökümden hemen sonra hızlı soğutmak bu alaşımları ısıl işleme tabi tutmak gelmektedir. Ancak yapılan çalışmalar ısıl işlemin söz konusu alaşımların aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı, modifikasyon elementlerinin ise aşınma direnci üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermiştir.

Alüminyum-silisyum alaşımlarının tribolojik özellikleri bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu araştırmacılardan bazıları ötektik altı Al-Si alaşımlarının ötektik ve ötektik üstü alaşımlardan, bazıları ötektik bileşime sahip alaşımların ötektik altı ve ötektik üstü alaşımlardan, bazıları ise ötektik üstü alaşımların diğerlerine göre daha

üstün aşınma direncine sahip olduklarını idda etmektedirler. Bu durum söz konusu alaşımların tribolojik amaçlı kullanımları için gerekli olan en uygun kimyasal bileşimin belirlenmesi hususunda bir takım tartışmaların oluşmasına yol açmıştır. Söz konusu tartışmalar günümüzde de devam etmektedir. Son yıllarda ötektik üstü alaşımların aşınma özelliklerinin incelenmesi üzerine yapılan bazı çalışmalarda bu alaşımların yüksek yük ve hız değerlerinde üstün tribolojik özellik sergiledikleri belirlenmiştir. Ancak bu alaşımların içyapısında bulunan birincil silisyum parçacıklarının karşı yüzeyde ciddi hasarlara yol açtığı görülmüştür. Diğer taraftan söz konusu alaşımların talaşlı imalatın da bir takım zorlukların ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu zorluklar söz konusu alaşımlardan tribolojik amaçlı parça yapımında bazı kısıtlamaların oluşmasına yol açmıştır. Bu nedenle Al-Si alaşımları içerisinde daha çok ötektik altı Al-7Si ve ötektik Al-12Si alaşımları tercih edilmekte ve bu alaşımlardan hava ve kara taşıtları için tribolojik amaçlı bazı parçalar üretilmektedir.

İkili Al-7Si alaşımların mekanik özelliklerinin pek çok tribolojik amaçlı uygulama için yeterli olmadığı bilinmektedir. Bu nedenle alaşım elementi katma ısıl işlem uygulama, tane inceltme ve modifikasyon elementi kullanma gibi bir takım yöntemlerle bu alaşımların söz konusu özelliklerinin iyileştirilmesi yoluna gidilmiştir. Bu yöntemler arasında uygulama basitliği ve etkinliği bakımından alaşımlamanın en uygun yöntem olduğu belirlenmiştir. Nitekim bu alaşımlara bakır, demir, magnezyum, mangan, nikel, kurşun ve çinko gibi alaşım elementleri katarak söz konusu özelliklerin iyileştirildiği görülmüştür. Ancak çinko ve bakırın bu alaşımların yapı, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin sistematik bir biçimde incelenmediği göze çarpmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada çinko ve bakır katkısının Al-7Si esaslı alaşımların yapı, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin sistematik bir biçimde araştırılması ve geleneksel alaşımlardan farklı yeni Al-7Si-Zn, Al-7Si-Zn-Cu alaşımlarının geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Alaşımın Üretimi ve Kimyasal Analiz

Bu çalışmada bir adet ikili Al-7Si, beş adet üçlü Al-7Si-(1-5)Zn ve beş adet dördü Al-7Si-4Zn-(1-5)Cu alaşımı kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımın üretiminde ticari saflıkta (%99,70) alüminyum, yüksek saflıkta (%99,99) çinko ve elektrolitik bakır (%99,99) kullanıldı. Alaşımın bileşiminde bulunan silisyum ve bakır sırasıyla Al-12Si (ETİAL-140) ve Al-50Cu ön alaşımlarından elde edildi. Elektrikli bir ergitme ocağında grafit pota kullanılarak ergitilen alaşımlar yaklaşık beş dakika karıştırıldıktan sonra 690°C dolayındaki bir sıcaklıktan oda sıcaklığında tutulan 57 x 72 x 180 mm boyutlarındaki bir çelik kalıba dökülerek katılaştırıldı. Üretilen alaşımların kimyasal analizleri spektral analiz yöntemiyle belirlendi.

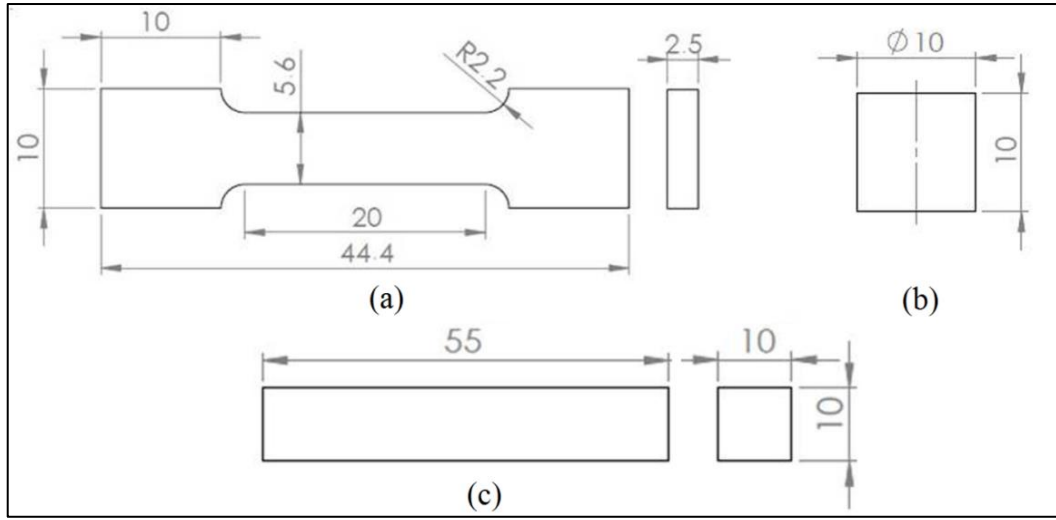
2.2. Alaşımın Yapısal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Alaşımın içyapılarının incelenmesi için alınan numuneler standart zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulduktan sonra nital çözeltisi (%6'lık HNO₃ + 94 ml alkol) içerisinde dağlandı. Hazırlanan numuneler hem ışık mikroskopunda hem de taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelendi ve içyapılarını gösteren fotoğraflar çekildi. Diğer taraftan alaşımların içyapıları oluşturan fazlar enerji dispersif spektroskopisi (EDS) yöntemiyle analiz edilerek tanımlandı.

Alaşımın yoğunluklarını belirlemek amacıyla talaşlı işlemlerle silindirik numuneler hazırlandı ve bu numunelerin boyutları $\pm 0,001$ mm hassasiyetindeki bir mikrometre ile ölçülerek hacimleri hesaplandı. Numunelerin kütleleri ise $\pm 0,01$ mg hassasiyetine sahip bir terazide ölçüldü. Ölçülen kütle değerlerinin hesaplanan hacim değerlerine bölünmesi ile alaşımların yoğunlukları belirlendi.

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

Alaşımlardan tel erozyon yöntemiyle 2,5 x 5,6 x 20 mm boyutlarında yassı numuneler hazırlandı. Çekme deneyi için kullanılan bu numunelerin teknik resmi Şekil 2a'da verilmiştir. Söz konusu numuneler $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 'lik deformasyon hızında çekme deneyine tabi tutuldu. Her bir alaşım için en az beş çekme numunesi kullanıldı. Elde edilen sonuçların ortalaması alınarak alaşımların akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerleri belirlendi. Çekme deneyi sonucunda alaşımların kırılma yüzeyleri hem ışık hem de SEM ile incelendi.



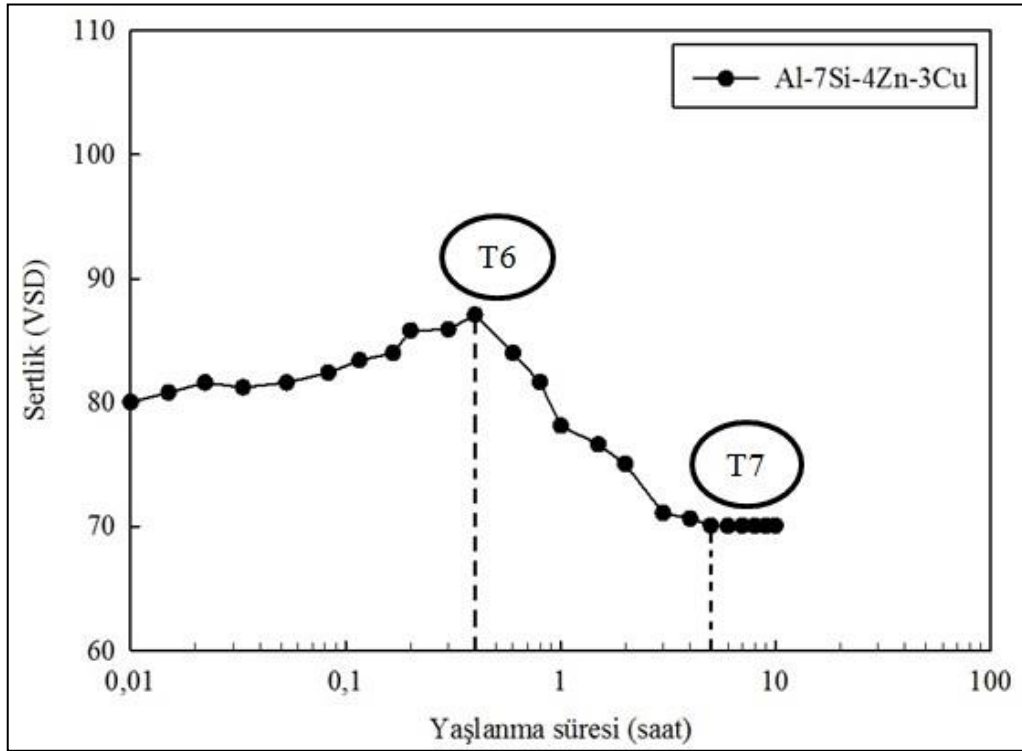
Şekil 2. (a) Çekme, (b) basma ve (c) darbe deneylerinde kullanılan numunelerin teknik resmi

Alaşımların basma dayanımının belirlenmesinde 10 x 10 mm boyutlarında silindirik numuneler kullanıldı. Bu numunelerin teknik resmi Şekil 2b'de gösterilmiştir. Söz konusu numuneler $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 'lik deformasyon hızında basma deneyine tabi tutuldu. Numunelerin boyunda %50 oranında kısalmaya yol açan gerilme değeri basma dayanımı olarak ölçüldü. Her bir alaşımın basma dayanımı en az üç ölçümün ortalaması alınarak belirlendi.

Alaşımların darbe dirençlerinin ölçülmesinde teknik resmi Şekil 2c'de gösterilen 10 x 10 x 55 mm boyutlarındaki çentiksiz numuneler kullanıldı. Talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanan bu numuneler 50 J kapasiteli ve $\pm 0.005 \text{ J}$ hassasiyete sahip bir Charpy makinesinde darbe deneyine tabi tutuldu. Her bir alaşım için üç ölçüm yapıldı ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak darbe enerjileri belirlendi.

2.3. Alaşımlara Uygulanan Isıl İşlemler

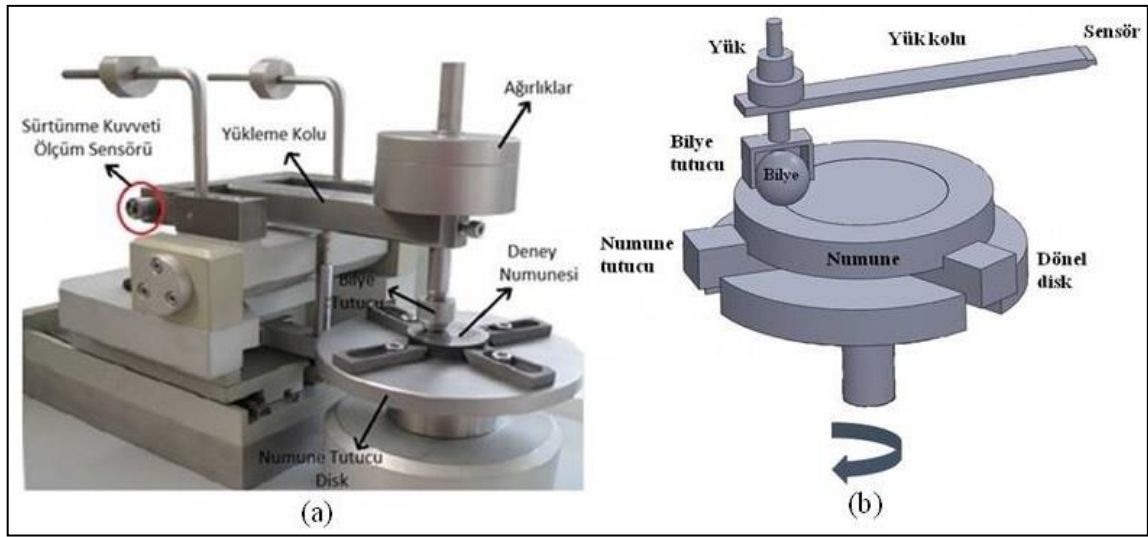
Üretilen alaşımların içerisinde en iyi mekanik ve tribolojik özellik sergileyen Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımına T6 ve T7 ısıl işlemleri uygulandı. Bu ısıl işlemler için uygun yaşlandırma süresinin belirlenmesi amacıyla, söz konusu alaşım 450°C sıcaklıkta 36 saat çözündürme işlemine tabi tutulduktan sonra suda soğutuldu ve ardından 150°C sıcaklıkta 10 saat'lik bir süre yaşlandırıldı. Yaşlandırma sırasında alaşımın sertliği belirli aralıklarla ölçüldü ve sertliğin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri elde edildi, Şekil 3. Bu eğri göz önüne alınarak söz konusu sıcaklıkta alaşımın sertliğinin en yüksek değerine ulaştığı 30 dakikalık süre T6, sertliğin kararlı hale geldiği 5 saatlik süre ise T7 ısıl işlemleri için ideal yaşlandırma süresi olarak belirlendi.



Şekil 3. Çözündürme ve su verme işlemi sonrasında yaşlandırma işlemine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri

2.4. Alaşımların Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi

Alaşımların sürtünme ve aşınma deneyleri ASTM: G99 standartlarına uygun bilya-disk esaslı bir deney düzeneğinde gerçekleştirildi. Bu düzeneğin fotoğrafı Şekil 4a'da çalışma bölgesinin şematik resmi ise Şekil 4b'de verilmiştir. Deney düzeneği genel olarak 50-500 d/dk devirler arasında çalışabilen bir elektrik motoru, bir disk, bir yükleme kolu, bir numune tutucu, bir bilya tutucu, sıcaklık ve kuvvet algılayıcı sensörler ve bilgisayar destekli bir kontrol ünitesinden oluşmaktadır.



Şekil 4. Bilya-disk esaslı aşınma deney düzeneğinin, (a) genel görünümünün fotoğrafı ve (b) test bölgesinin şematik resmi

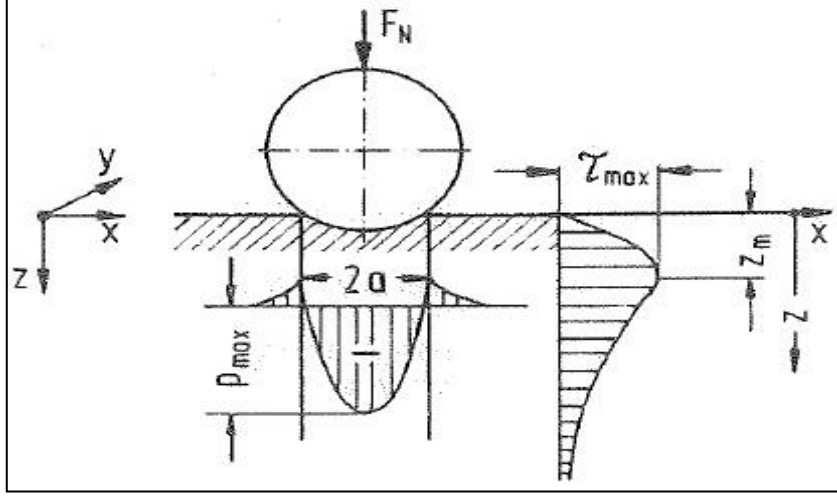
Sürtünme ve aşınma deneyleri için alaşımlardan tel erozyon yöntemiyle 24 mm çapında ve 7 mm kalınlığında numuneler kesildi. Kesme işleminin ardından numunelerin yüzeyleri bir otomatik taşlama ve parlatma makinesi yardımıyla önce taşlandı ve daha sonra sırasıyla 1 μm ve 0,3 μm tane boyutuna sahip alümina ve bir bez ile parlatıldı. Bu işlemin sonunda her bir numunede ortalama $0.15 \pm 0.05 \mu\text{m}$ değerinde yüzey pürüzlülüğü elde edildi. Söz konusu numuneler döner disk üzerinde bulunan numune tutucusuna yerleştirildi. Aşındırıcı olarak 6 mm çapında sertliği 58-62 RSD olan 100Cr6 çeliğinden imal edilmiş bilye kullanıldı. Bilye yükleme kolunun ucuna düşey olarak yataklanmış bir kolda bulunan tutucuya sabit olarak yerleştirildi. Yükleme, yükleme kolunun ucuna ağırlık asmak suretiyle gerçekleştirildi. Sürtünme kuvveti 30 N kapasiteli indüktif bir sensör yardımıyla belirlendi. Bunun için sensörden alınan elektriksel sinyal bir bilgisayar

ortamına aktarılarak bir yazılım ile sürtünme kuvvetine dönüştürüldü. Sürtünme kuvveti normal yüke bölünerek alaşımların sürtünme katsayısı belirlendi ve bu katsayısının yola veya zamana göre değişimi sürekli kaydedildi.

Alaşımların sürtünme ve aşınma deneyleri yağsız (kuru) durumda yapıldı. Sürtünme ve aşınma numuneleri hem deneylere başlamadan önce hem de deneyler tamamlandıktan sonra ultrasonik bir temizleyicide sırasıyla trikloretilen (C_2HCl_3) ve alkol-aseton karışımı içerisinde temizlendi. Temizlenen numunelerin kütleleri 0,01 mg'lık hasasiyete sahip bir terazi ile ölçüldü. Ölçülen kütle kaybı değerleri alaşımların yoğunluklarına bölünerek aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kayıpları belirlendi.

Sürtünme ve aşınma deneyleri 5 N'luk bir yük altında, 0,16 m/s'lik kayma hızında ve 250-1500 m arasında değişen kayma mesafesinde gerçekleştirildi. Her bir koşul için yeni bir numune ve bilye kullanıldı. Bu deneyler sonucunda alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimi belirlendi. Üçlü alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direnci sergileyen Al-7Si-4Zn alaşımı dökülmüş, dörtlü alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direncine sahip Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımı ise hem dökülmüş hem de ısıtım işlem görmüş durumda farklı yük ve kayma hızlarında sürtünme ve aşınma deneylerine tabi tutuldu.

Yükün alaşımların sürtünme katsayısı ve aşınma ile meydana gelen hacim kaybına etkilerini belirlemek için deney numuneleri 0,16 m/s'lik kayma hızında 2,5-12,5 N arasında değişen yüklerde 1000 m'lik kayma mesafesi tamamlanıncaya kadar deneylere tabi tutuldu. Söz konusu yük değerlerinde numune yüzeyinde oluşan Hertz basıncının ve kayma gerilmesinin en yüksek değeri ile bu gerilmenin etkin olduğu derinlik temas mekaniği denklemleri kullanılarak belirlendi [76,80]. Şöyle ki, belirli bir yük etkisi altında düzlemsel bir yüzeye temas eden küresel bir cismin bu yüzeyde oluşturduğu basınç ve gerilme dağılımları Şekil 5'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5. Belirli bir yük etkisi altında düzlemsel bir yüzeye temas eden küresel bir cimin bu yüzeyde oluşturduğu basınç ve gerilme dağılımları[80]

Bu şekil üzerinde yer alan a düzlemsel yüzey (numune) üzerindeki temas alanın yarıçapını, P_{\max} ve τ_{\max} sırasıyla Hertz basıncının ve kayma gerilmesinin en yüksek değerini Z_m ise kayma gerilmesinin en yüksek değerinin numune yüzeyinden olan derinliğini göstermektedir. Söz konusu bu parametreler aşağıdaki denklemler yardımıyla belirlenmektedir.

$$a = 1,11 \left(\frac{F_N R}{E^*} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$P_{\max} = -0,388 \left(\frac{F_N E^{*2}}{R^2} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = 0,31 P_{\max} \quad (3)$$

$$Z_m = 0,47 a \quad (4)$$

Bu denklemlerde yer alan E^* eşdeğer elastisite modülünü, F_N uygulanan yükü ve R bilyanın yarıçapını göstermektedir. Eşdeğer elastisite modülü ise;

$$\frac{1}{E^*} = \left[\frac{[1 - (\nu_{Al-Si})^2]}{E_{Al-Si}} + \frac{[1 - (\nu_{\text{Ç}})^2]}{E_{\text{Ç}}} \right] \quad (5)$$

bağıntısı yardımıyla belirlenmektedir [80]. Bu bağıntıda yer alan E_{Al-Si} ve $E_{\text{Ç}}$ sırasıyla Al-Si alaşımının ve çelik bilyanın elastisite modüllerini, ν_{Al-Si} ve $\nu_{\text{Ç}}$ ise poisson oranlarını göstermektedir. Al-Si alaşımları için elastisite modülü ve poisson oranı aşağıda verilen bağıntılar ile hesaplanmaktadır [77,80].

$$E_{Al-Si} = E_{Si}\omega_{Si} + E_{Al}(1 - \omega_{Si}) \quad (6)$$

$$\nu_{Al-Si} = \nu_{Si}\omega_{Si} + \nu_{Al}(1 - \omega_{Al}) \quad (7)$$

Bu bağıntılarda yer alan ω_{Si} silisyumun, ω_{Al} ise alüminyumun ağırlıkça yüzde oranını göstermektedir. Bu parametrelerin hesaplanmasında Al, Si ve çelik için baz alınan değerler Tablo 2’de verilmiştir [76-80]. Söz konusu bağıntılar ve tablo değerleri kullanılarak hesaplanan a , Z_m , P_{\max} ve τ_{\max} değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 2. Hesaplamalarda Kullanılan Al, Si ve Çelik İçin Baz Alınan Değerler, [54]

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı
Al	70	0,33
Si	107	0,22
100Cr6	210	0,33

Tablo 3. Bu Çalışmada Kullanılan Yük Değerleri İçin Hesaplanan a , Z_m , τ_{\max} ve P_{\max} Değerleri

Hesaplanan Değerler	Yük (N)				
	2,5	5	7,5	10	12,5
Temas alanı yarıçapı, a (mm)	0,554	0,698	0,799	0,880	0,947
Derinlik, Z_m (mm)	0,260	0,328	0,375	0,413	0,445
En yüksek Hertz basıncı, P_{\max} (GPa)	3,88	4,89	5,60	6,17	6,64
En yüksek kayma gerilmesi, τ_{\max} (GPa)	1,202	1,488	1,736	1,912	2,058

Kayma hızının alaşımların sűrtűnme katsayısı ve aşınma ile meydana gelen hacim kaybına etkilerini belirlemek amacıyla deney numuneleri 5 N'luk yűk altında 0,08-0,22 m/s aralığında yer alan farklı kayma hızlarında 1000 m'lik kayma mesafesi tamamlanıncaya kadar deneylere tabi tutuldu. Alaşımların aşınma davranışlarını belirlemek için her bir deneyden sonra bir karbon bant yardımıyla aşınma parçacıkları toplandı.

2.5. Aşınma Yűzeylerinin ve Parçacıklarının İncelenmesi

Ařınma deneyleri sonucunda alařımların ařınma yűzeylerinde meydana gelen deęiřimler taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelendi. Ařınma deneylerinden sonra disk yűzeyinden toplanan ařınma parçacıkları da SEM yardımıyla incelenerek fotoęrafları çekildi. Dięer taraftan bazı deney kořullarında ařındırıcı bilye yűzeyleri SEM yardımıyla incelenerek gűrűntűlendi.

3. BULGULAR

3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

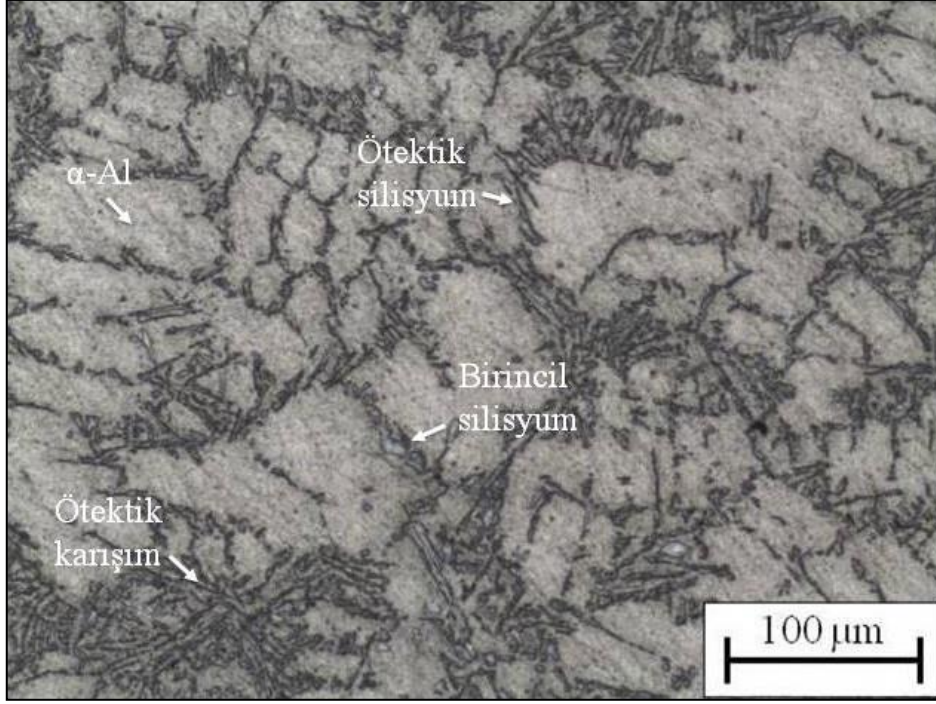
Üretilen alaşımların kimyasal bileşimi Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

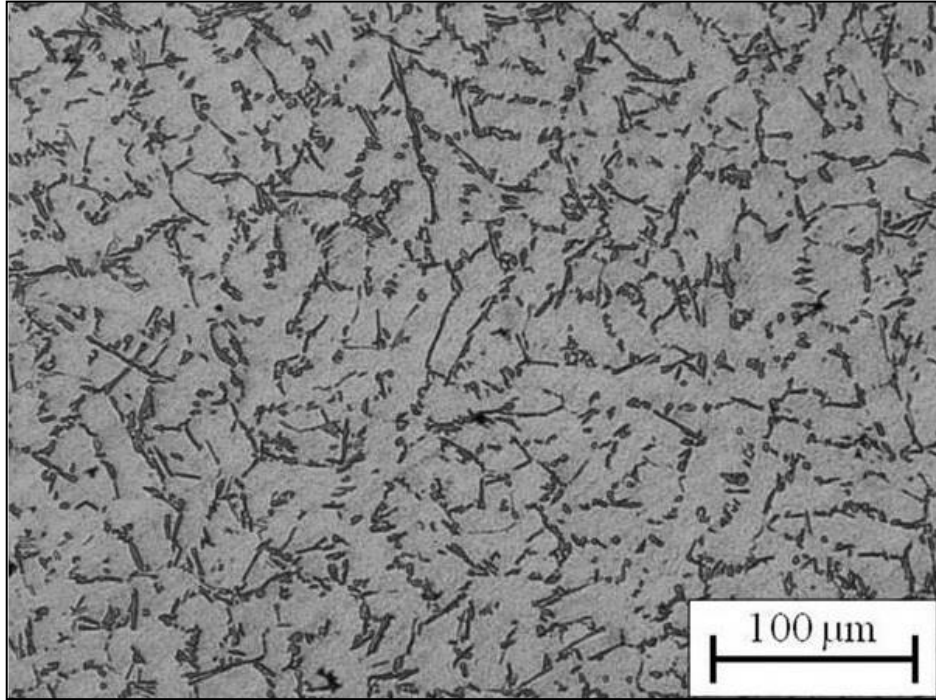
Alaşım	Kimyasal Bileşim Oranı (% ağırlık)			
	Al	Si	Zn	Cu
Al-7Si	92,9	7,1	---	---
Al-7Si-1Zn	91,9	7,0	1,1	---
Al-7Si-2Zn	98,8	7,1	2,1	---
Al-7Si-3Zn	89,6	7,2	3,2	---
Al-7Si-4Zn	88,7	7,1	4,2	---
Al-7Si-5Zn	87,6	7,2	5,2	---
Al-7Si-4Zn-1Cu	87,6	7,2	4,1	1,1
Al-7Si-4Zn-2Cu	85,4	7,1	4,3	2,3
Al-7Si-4Zn-3Cu	85,2	7,3	4,3	3,2
Al-7Si-4Zn-4Cu	84,4	7,2	4,2	4,2
Al-7Si-4Zn-5Cu	83,5	7,1	4,3	5,1

3.2. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular

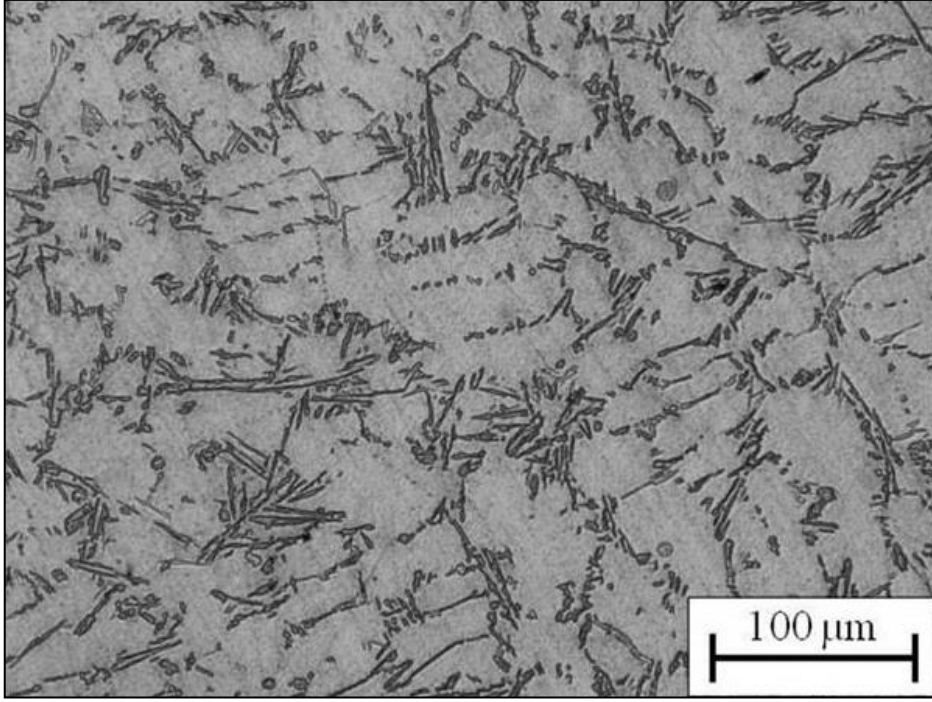
Bu çalışmada baz alınan ikili Al-7Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının göbekli alüminyum (α -Al) dendritleri ile ötektik ve birincil silisyum parçacıklarından oluştuğu belirlendi, Şekil 6. Ötektik silisyum parçacıklarının ince ve uzun bir görünüme sahip oldukları ve bu parçacıkların dendritlerarası bölgelerde toplandıkları gözlemlendi. Birincil silisyum parçacıklarının ise iri ve köşeli bir görünüm sergiledikleri ve bunların hem dendritiçi hem de dendritlerarası bölgelerde yer aldıkları görüldü. Bu alaşıma çinko katıldığında metalografik yapısının fazla değişmediği, ancak çinko katkısının bu alaşımlarda alüminyumca zengin bir katı çözeltilinin oluşumuna yol açtığı gözlemlendi. Diğer taraftan çinko oranı arttıkça birincil silisyum parçacıklarının boyut ve hacimsel oranın arttığı ve bu parçacıkların ayrı gruplar halinde bazı bölgelerde kümeleştikleri görüldü, Şekil 7-11.



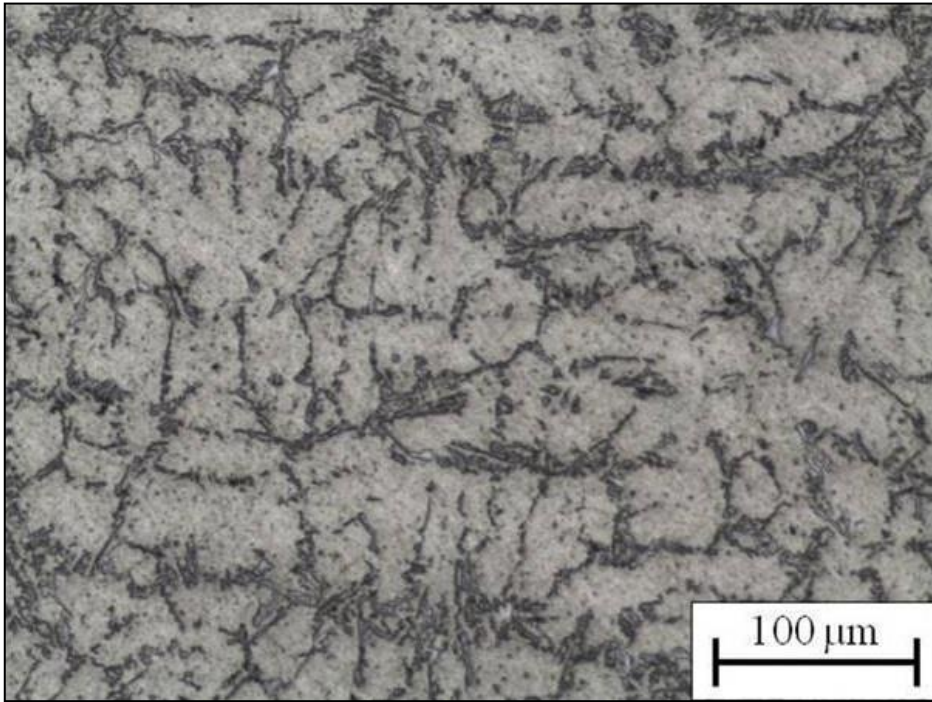
Şekil 6. Al-7Si alaşımlının dökülmüş durumdaki içyapısı



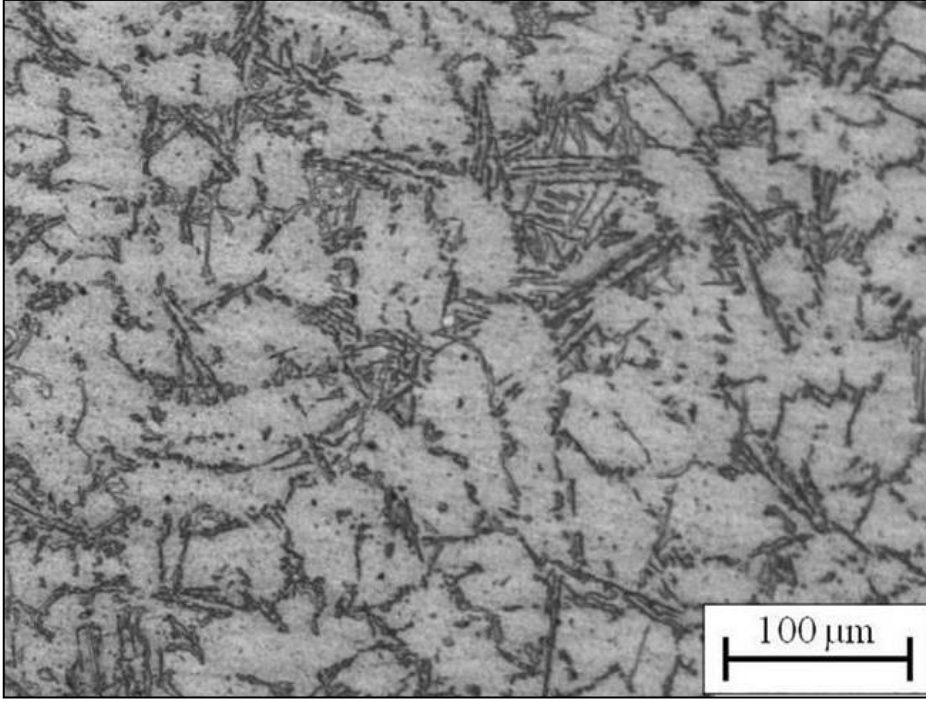
Şekil 7. Al-7Si-1Zn alaşımlının dökülmüş durumdaki içyapısı



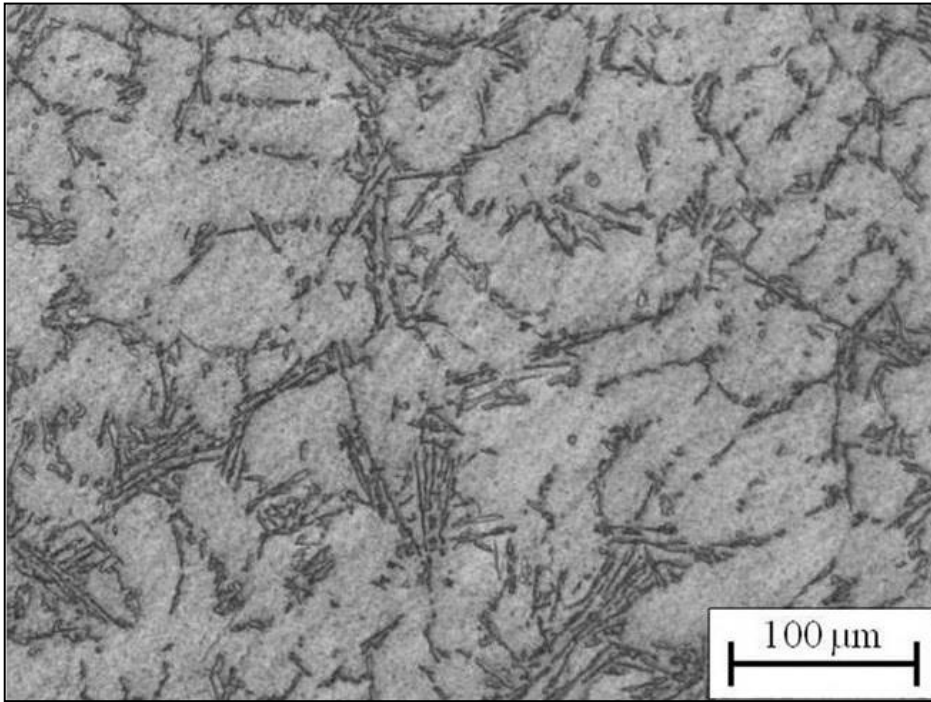
Şekil 8. Al-7Si-2Zn alaşımlının dökülmüş durumdaki içyapısı



Şekil 9. Al-7Si-3Zn alaşımlının dökülmüş durumdaki içyapısı



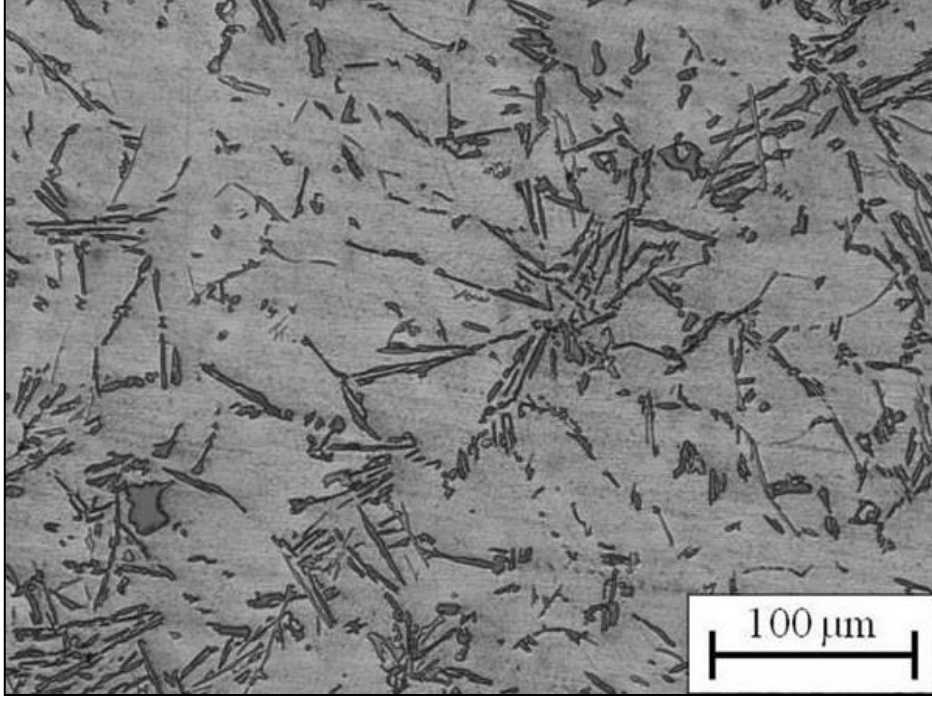
Şekil 10. Al-7Si-4Zn alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



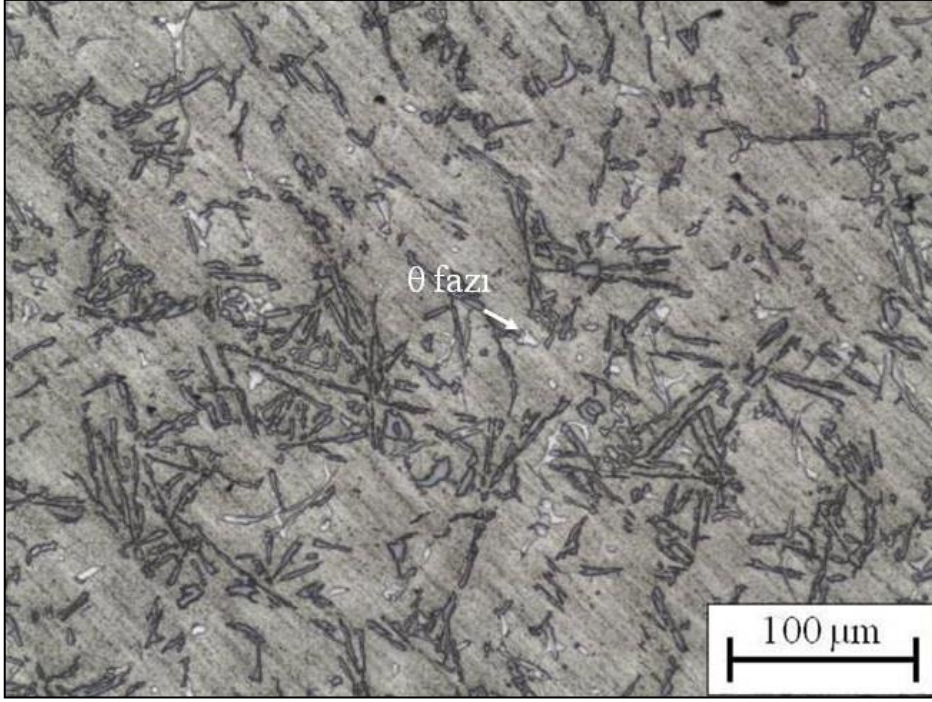
Şekil 11. Al-7Si-5Zn alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı

Dörtlü Al-7Si-4Zn-Cu alaşımların içyapılarının bunlar iç baz alınan üçlü Al-7Si-4Zn alaşımına benzediği, ancak %2'den daha yüksek oranda bakır içeren alaşımlarda bakırca

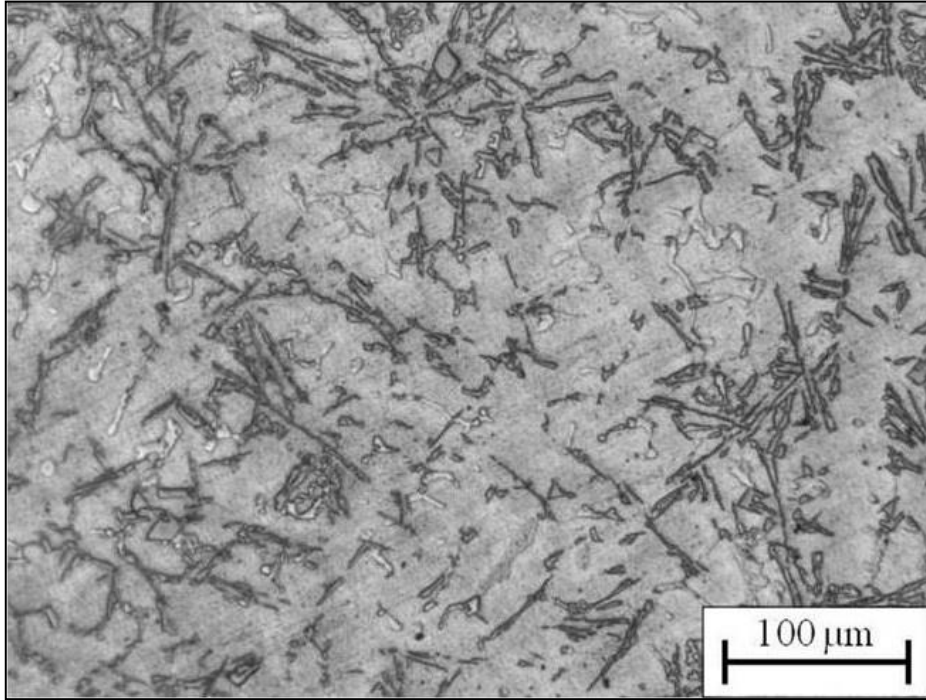
zengin θ (CuAl_2) fazının oluştuğu görüldü. Bu nedenle burada yalnız %1, %3 ve %5 oranlarında bakır içeren alaşımların içyapısını gösteren fotoğraflar verilmiştir, Şekil 12-14. Bu fotoğraflar bakır oranı arttıkça θ fazına ait parçacıkların irileşerek daha belirgin hale geldiklerini ve rastgele kümeleşme sergilediklerini göstermektedir.



Şekil 12. Al-7Si-4Zn-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



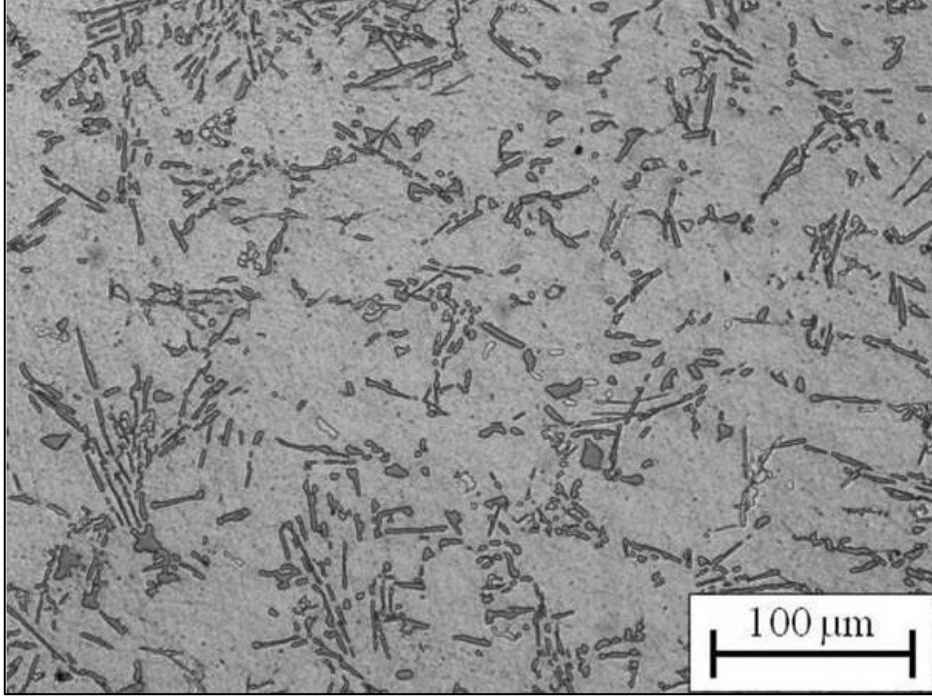
Şekil 13. Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



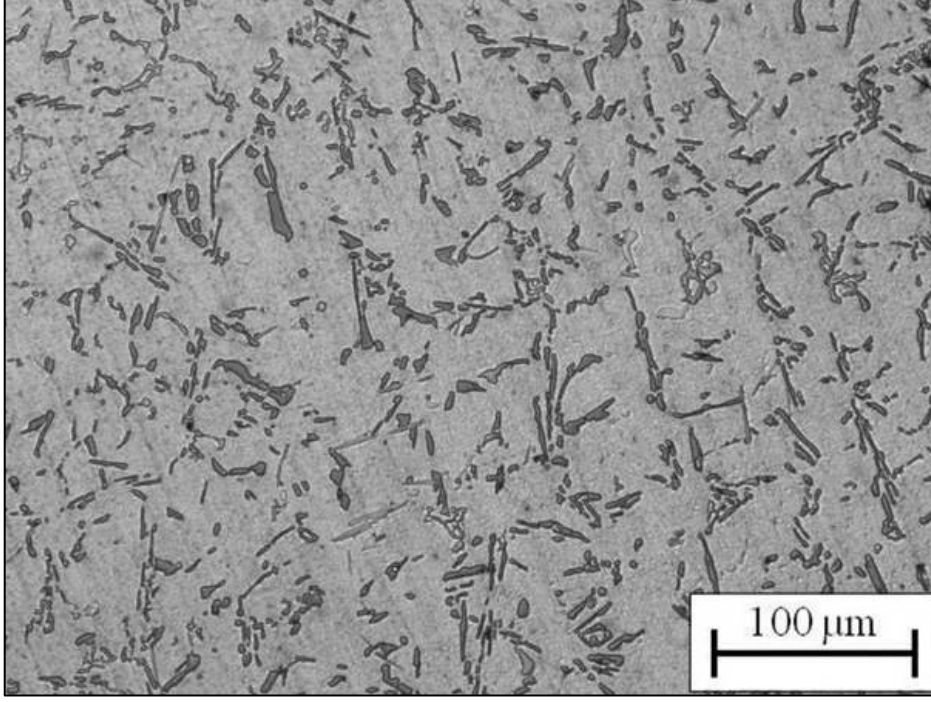
Şekil 14. Al-7Si-4Zn-5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı

Dörtlü alaşımlar içerisinde seçilen Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının T6 ve T7 ısıtma işlemleri görmüş durumdaki numunelerine ait içyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 15 ve Şekil

16'da verilmiştir. Bu fotoğraflara bakıldığında söz konusu ısıl işlemlerin sonunda alaşımların dendritik yapısının ortadan kalktığı görülmektedir. Diğer taraftan T6 ve T7 ısıl işlemlerinin silisyum parçacıklarının morfolojisi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı, ancak T7 ısıl işlemi sonunda θ fazına ait parçacıkların boyutlarında nispeten bir artışın meydana geldiği gözlemlendi.



Şekil 15. Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş durumdaki içyapısı



Şekil 16. Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının T7 ısıl işlemi görmüş durumdaki içyapısı

3.3. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

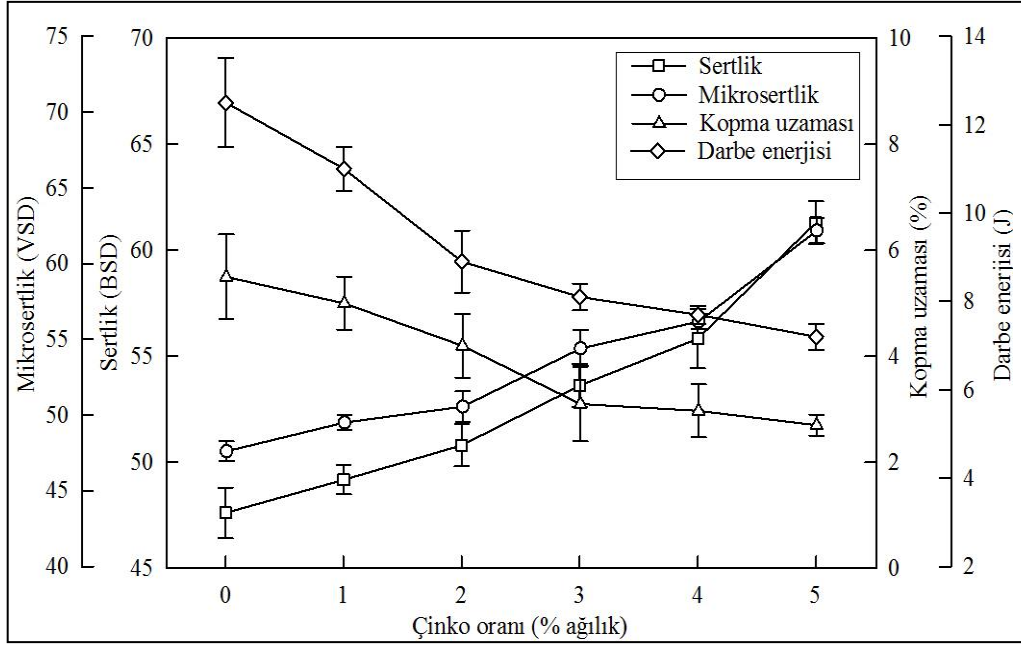
Üretilen alaşımların yoğunluk, sertlik, mikrosertlik, akma, çekme ve basma dayanımları ile kopma uzaması değerleri Tablo 5’de verilmiştir. Bu tabloda alaşımların yoğunluklarının artan çinko ve bakır oranları ile arttığı görülmektedir. Üçlü Al-7Si-(0-5)Zn alaşımlarının akma, çekme ve basma dayanımları ile sertlik, matrisi oluşturan α fazının mikrosertliği, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin çinko oranına göre değişimini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 17 ve Şekil 18’de verilmiştir. Bu eğriler çinko oranı arttıkça alaşımların sertlik ve mukavemetinin arttığını, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin ise azaldığını göstermektedir.

Dörtlü Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımlarının sertlik, mikrosertlik, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 19’da verilmiştir. Söz konusu alaşımların akma, çekme dayanımı ve basma dayanımlarının bakır oranına göre değişimleri ise Şekil 20’de gösterilmiştir. Bu eğriler Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımlarının sertlik ve mukavemetinin artan bakır oranı ile arttığını, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin ise azaldığını göstermektedir.

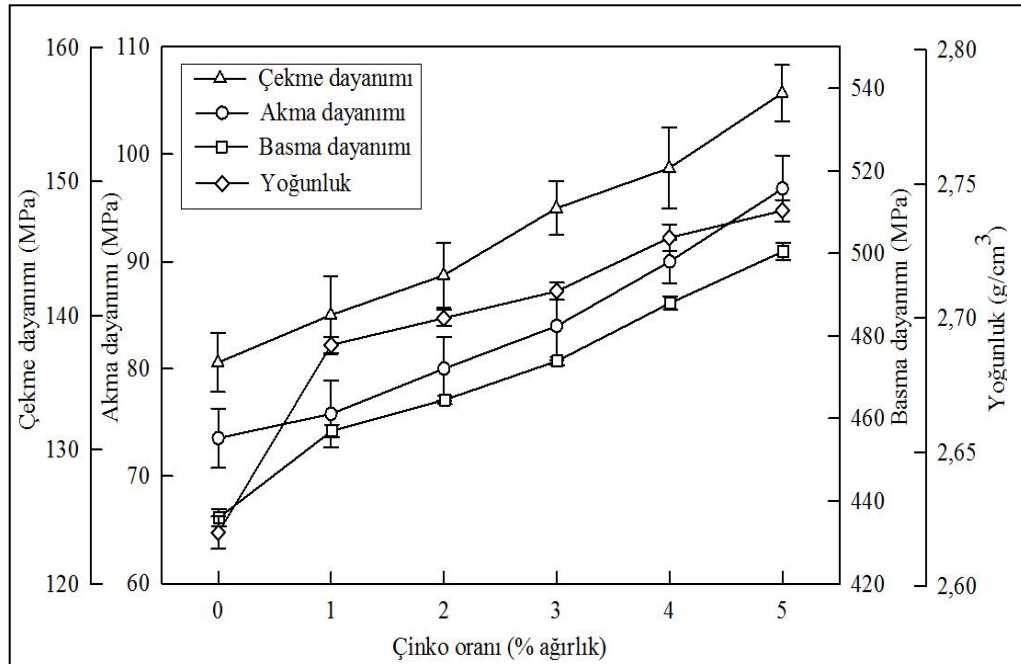
Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının T6 ve T7 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki numunelerine ait sertlik, akma ve çekme dayanımları ile kopma uzaması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Bu tabloya bakıldığında söz konusu ısıl işlemlerin alaşımların akma ve çekme dayanımlarının artmasına kopma uzaması değerlerinin ise azalmasına yol aadığı görölmektedir. Diğer taraftan T7 ısıl işlemi uygulanmış alaşımın T6 ısıl işlemi uygulanmış durumuna göre daha düşük sertlik ve kopma uzaması sergilediği, buna karşın daha yüksek akma ve çekme dayanımına sahip olduğu göröldü.

Tablo 5. Alaşımın Yoğunluk, Sertlik, Mikrosertlik, Akma, Çekme ve Basma Dayanımları ile Kopma Uzaması Değerleri

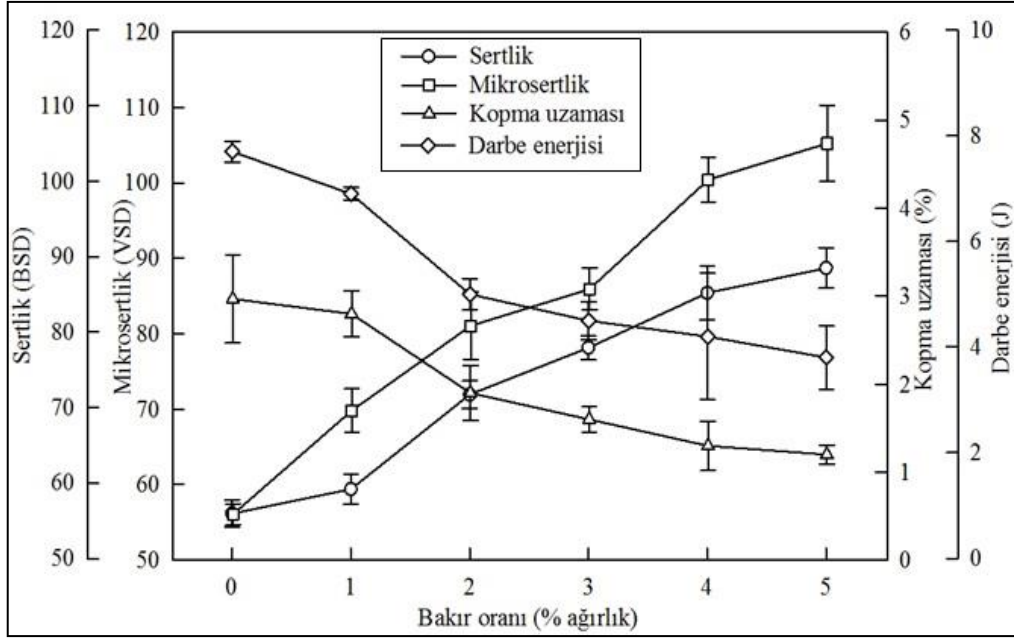
Alaşım	Yoğunluk (gr/cm ³)	Mikrosertlik (VSD)	Sertlik (BSD)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Basma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
Al-7Si	2,62	47,6	47,61	73,54	136,5	436	5,5
Al-7Si-1Zn	2,69	49,5	49,17	75,8	140,05	457	5,0
Al-7Si-2Zn	2,70	50,55	50,8	80	143	464,5	4,2
Al-7Si-3Zn	2,71	54,4	53,61	84	148	474	3,1
Al-7Si-4Zn	2,73	55,83	56,18	90	151	488	2,97
Al-7Si-5Zn	2,74	62,18	61,3	96,78	156,5	500,5	2,7
Al-7Si-4Zn-1Cu	2,75	69,58	59,4	93,9	152,4	595	2,8
Al-7Si-4Zn-2Cu	2,78	80,8	71,94	109,52	156,0	631	1,9
Al-7Si-4Zn-3Cu	2,8	85,7	78,14	122,17	164,4	684	1,6
Al-7Si-4Zn-4Cu	2,82	100,2	85,42	137,32	169,3	703	1,3
Al-7Si-4Zn-5Cu	2,83	105	88,72	140,7	174,7	718	1,2



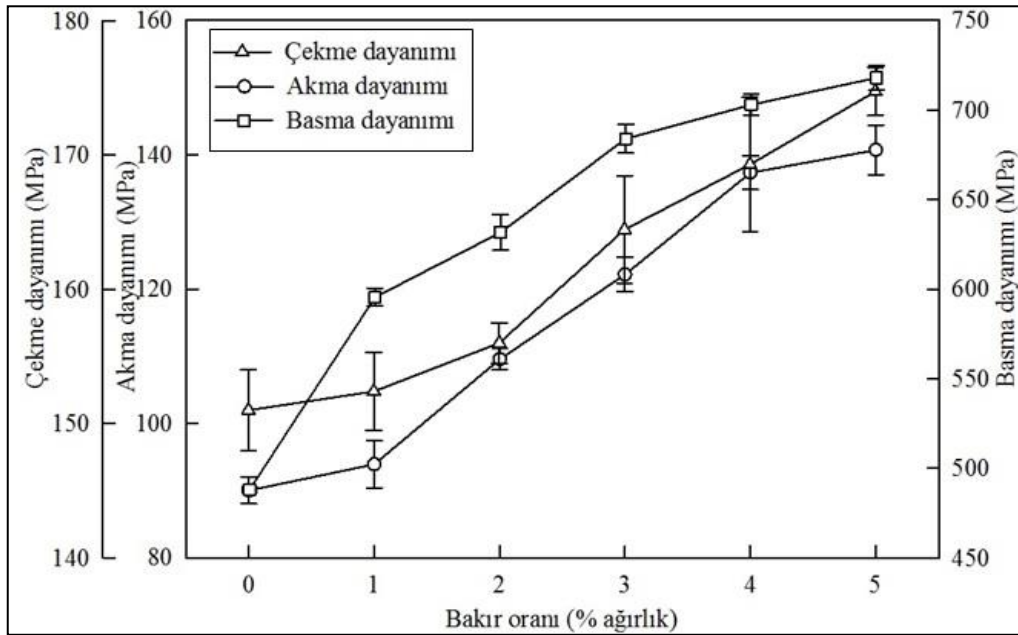
Şekil 17. Üçlü Al-7Si-(0-5)Zn alaşımlarının sertlik, matrisi oluşturan α fazının mikrosertliği, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin çinko oranına göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 18. Üçlü Al-7Si-(0-5)Zn alaşımlarının akma, çekme ve basma dayanımları ile yoğunluk değerlerinin çinko oranına göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 19. Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımlarının sertlik, matrisi oluşturan α fazının mikrosertliği, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



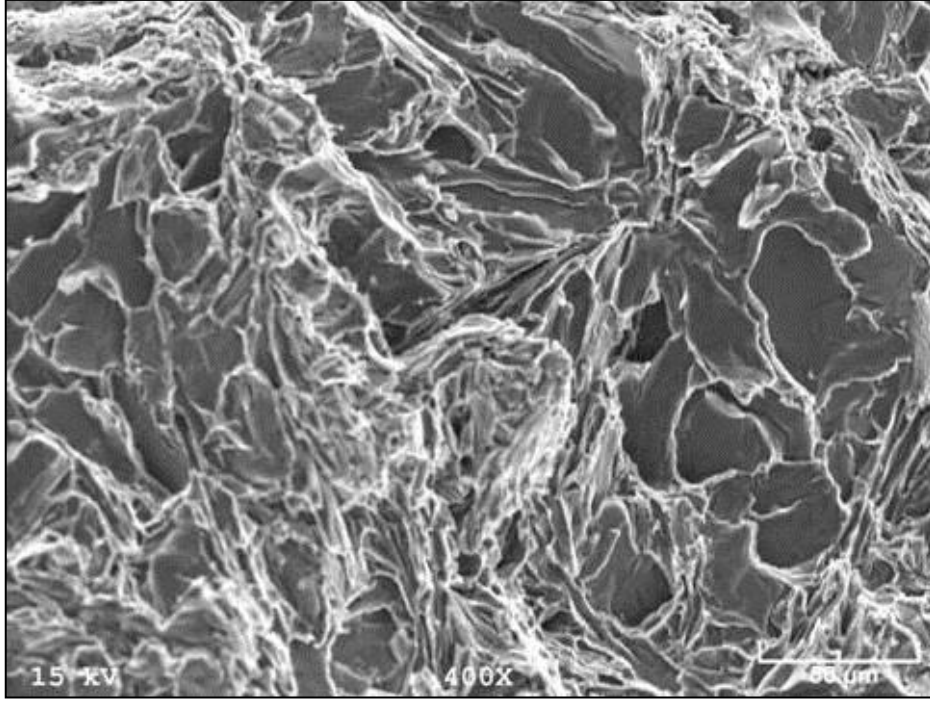
Şekil 20. Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımlarının akma, çekme ve basma dayanım değerlerinin bakır oranına göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 6. Al-7Si-4Zn-3Cu Alaşımının T6 ve T7 Isıl İşlemleri Uygulanmış Numunelerine Ait Sertlik, Akma ve Çekme Dayanımları ile Kopma Uzaması Değerleri

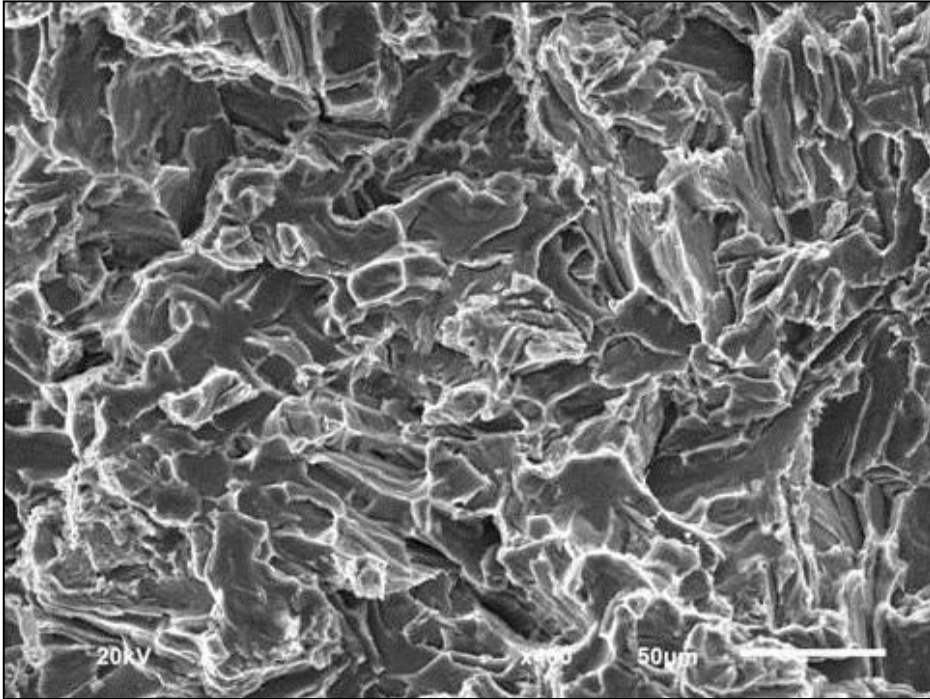
Alaşım	Sertlik (VSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
Al-7Si-4Zn-3Cu-T6	87,07	214,1	140,8	2,70
Al-7Si-4Zn-3Cu-T7	71,07	225,7	155,3	2,25

3.4. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

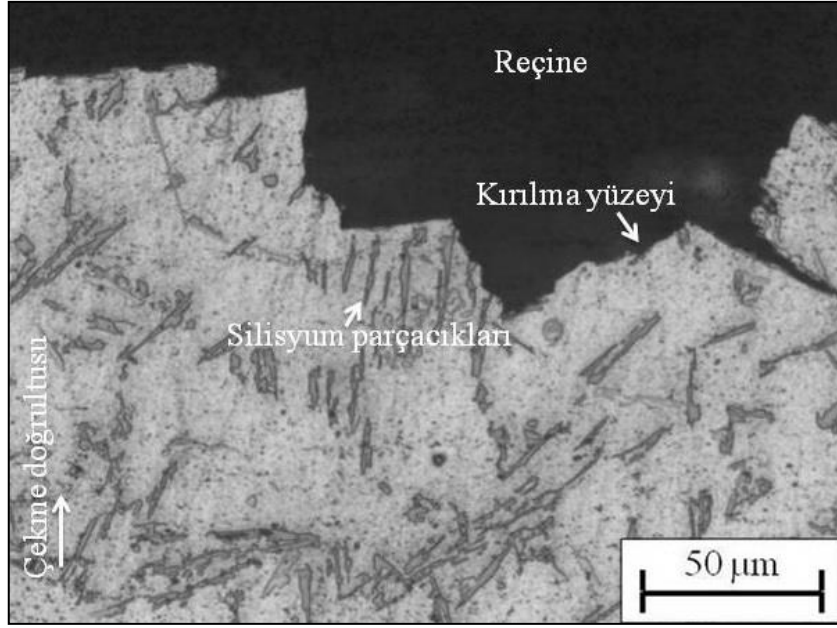
Çekme deneyine tabi tutulan alaşımlara ait numunelerden bazılarının çekme doğrultusuna dik yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları sırasıyla Şekil 21 ve Şekil 22’de verilmiştir. Bu fotoğraflar alaşımların kırılma yüzeylerinin çekme yönünde uzamış kopma sırtları arasında yer alan nispeten geniş ve düz yüzeyler ile çatlaklardan oluştuğunu göstermektedir. Diğer taraftan düz yüzeylerin boyutunun artan çinko ve bakır oranı ile bir artış sergilediği gözlemlendi. Söz konusu alaşımların kırılma yüzeylerinin çekme doğrultusu yönündeki kesitini gösteren ışık mikroskobu görüntüleri ise sırasıyla Şekil 23 ve Şekil 24’de verilmiştir. Bu fotoğraflara bakıldığında çekme deneyine tabi tutulan alaşımlarda kırılmanın dendritler arası bölgelerde meydana geldiği görülmektedir. Gerek çekme deneyi gerekse kırılma yüzeylerinin mikroskobik incelemelerinden elde edilen bulgular söz konusu alaşımların gevrek bir kırılma davranışı sergilediğini ve gevrekliğin ise artan çinko ve bakır oranı ile arttığını göstermektedir.



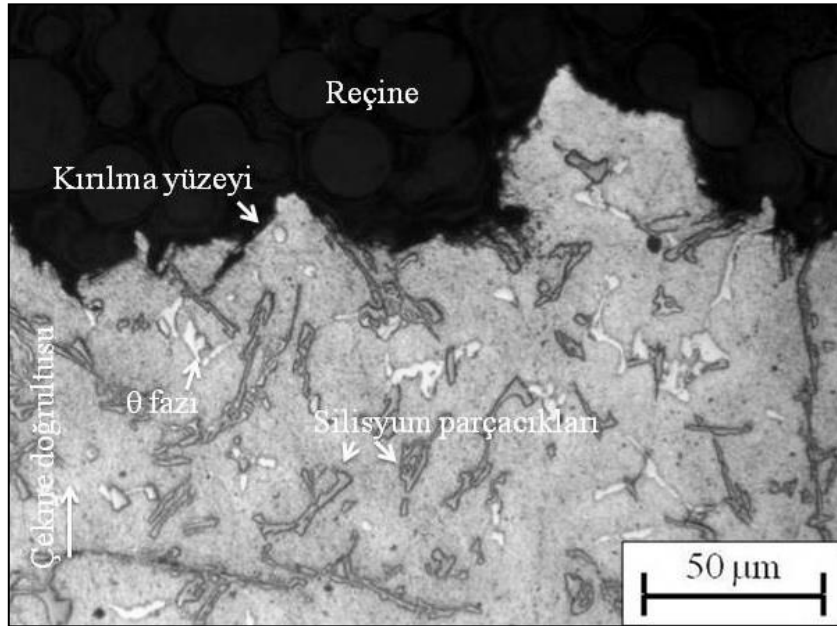
Şekil 21. Çekme deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn alaşımının kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 22. Çekme deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-5Cu alaşımının kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü



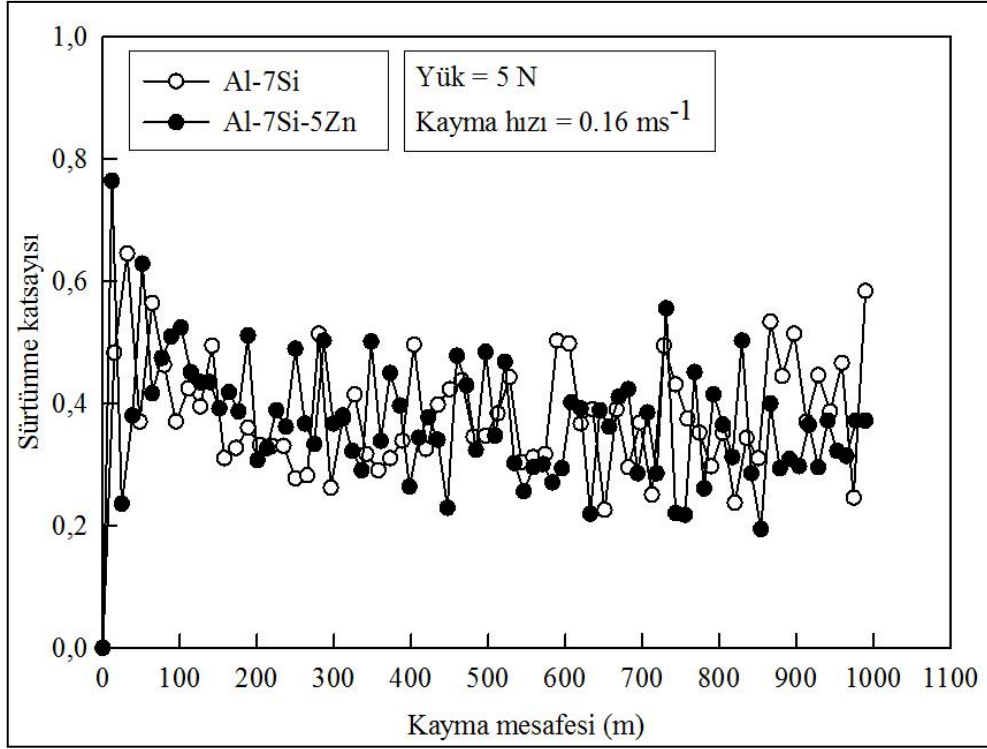
Şekil 23. Al-7Si-4Zn alaşımının kırılma yüzeyinin çekme doğrultusu yönündeki kesitini gösteren ışık mikroskobu görüntüsü



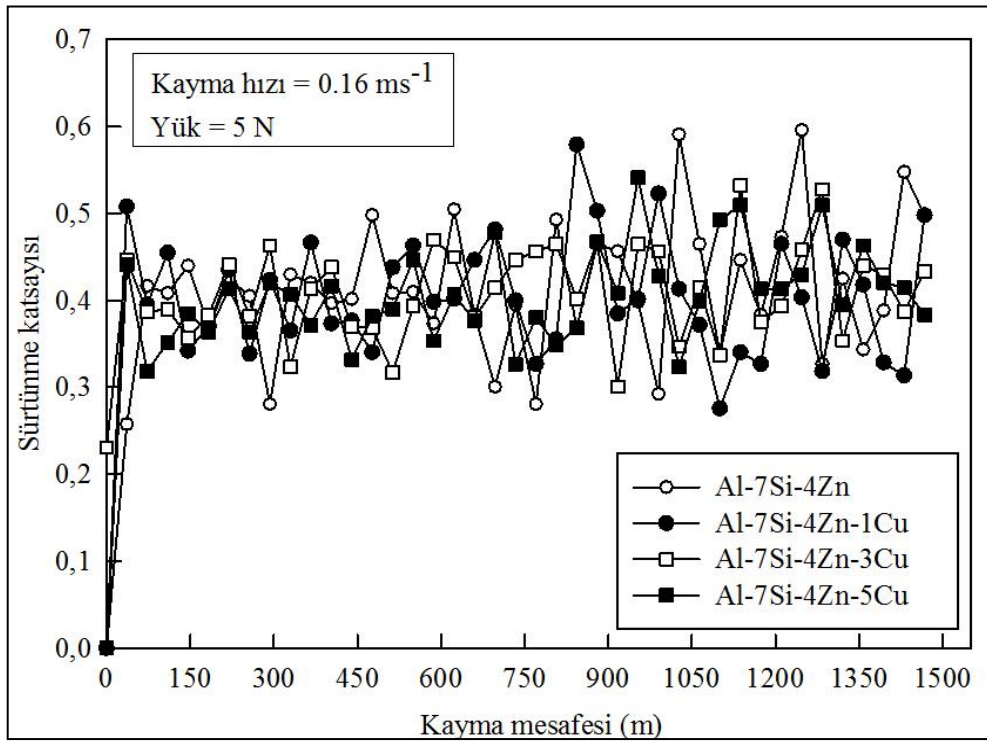
Şekil 24. Al-7Si-4Zn-5Cu alaşımının kırılma yüzeyinin çekme doğrultusu yönündeki kesitini gösteren ışık mikroskobu görüntüsü

3.5. Sürtünme ve Aşınma Deneylelerinden Elde Edilen Bulgular

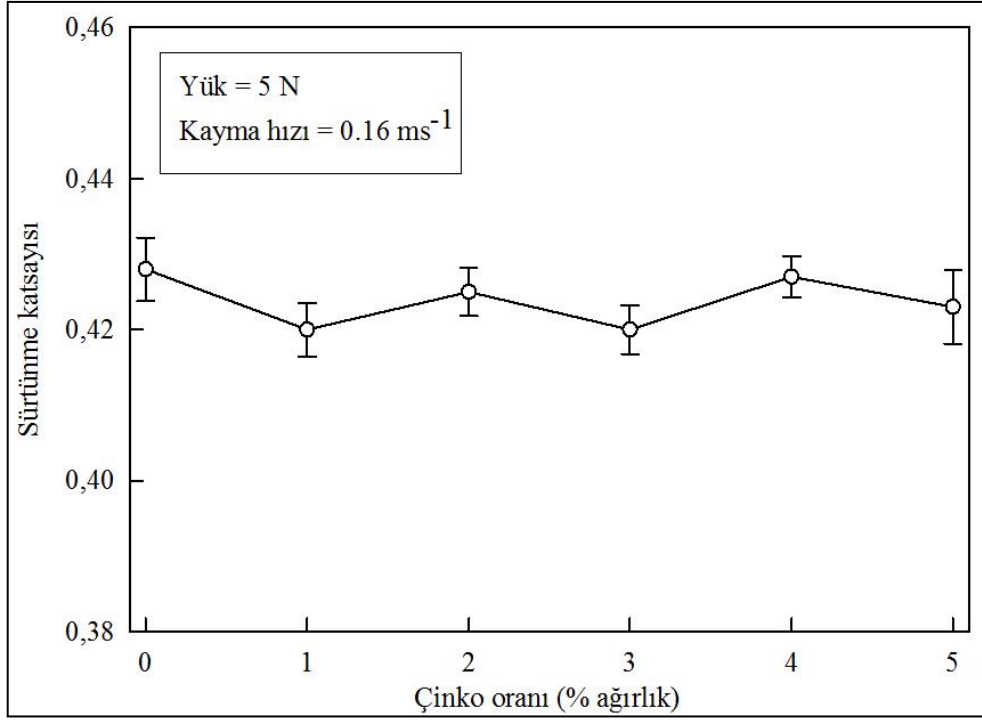
Kuru durumda 5 N'luk yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında 1000 m'lik yol tamamlanincaya kadar sürtünme deneyine tabi tutulan Al-7Si esaslı ve Al-7Si-4Zn esaslı alaşımlar arasından seçilen bazılarının sürtünme katsayısının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 25 ve Şekil 26'da verilmiştir. Bu eğrilere bakıldığında, alaşımların sürtünme katsayısının deneylerin başlangıç aşamasında hızlı bir artış sergiledikten sonra azalarak kararlı durumlarına ulaştığı görülmektedir. Ancak kararlı durumda alaşımların sürtünme katsayısının yaklaşık 0,3 ile 0,5 arasındaki değerlerinde sürekli olarak artıp azaldığı, diğer bir ifadeyle dalgalı bir biçimde değiştiği gözlemlendi. Farklı kayma mesafelerinde deney tabi tutulan tüm alaşımların bu değerinin benzer değişim sergilediği belirlendi. Al-7Si ve Al-7Si-4Zn esaslı alaşımların kararlı durumdaki ortalama sürtünme katsayılarının çinko ve bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 27 ve Şekil 28'de verilmiştir. Bu eğriler Al-7Si esaslı alaşımların sürtünme katsayısının çinko oranı ile pek fazla değişmediğini, Al-7Si-4Zn esaslı alaşımların söz konusu değerinin ise artan bakır oranı ile azalıp %3 bakır oranında en düşük değerine ulaştıktan sonra arttığını göstermektedir. İncelenen alaşımlar içerisinde en yüksek sürtünme katsayısına Al-7Si en düşük sürtünme katsayısını ise Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının sahip olduğu belirlendi.



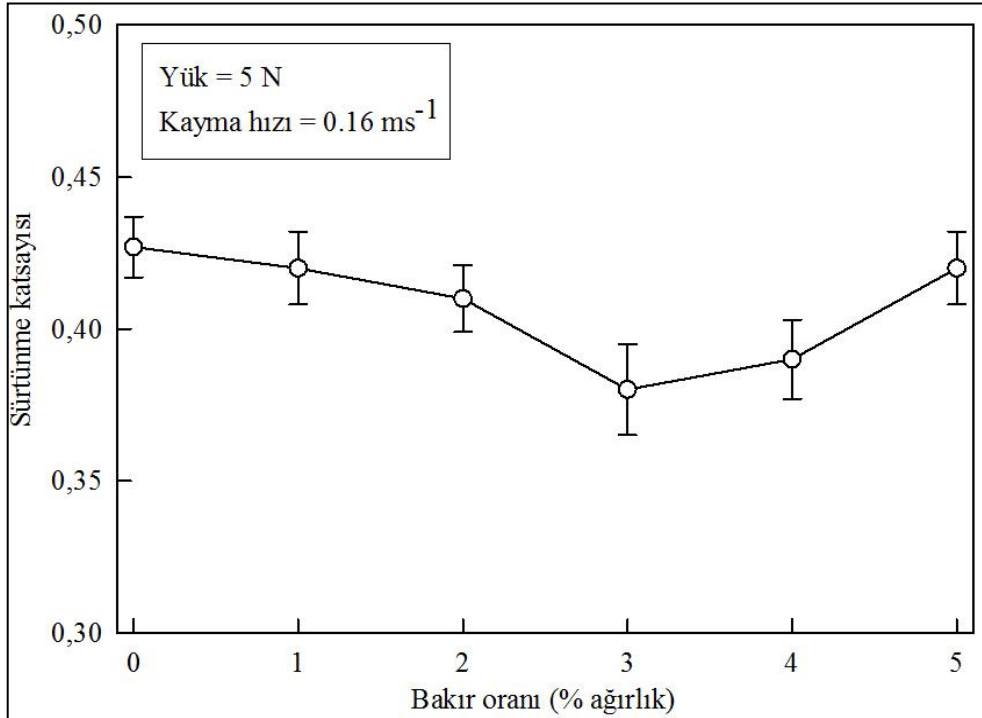
Şekil 25. Al-7Si esaslı alaşımlar arasından seçilen bazılarının sürtünme katsayısının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 26. Al-7Si-4Zn esaslı alaşımlar arasından seçilen bazılarının sürtünme katsayısının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler

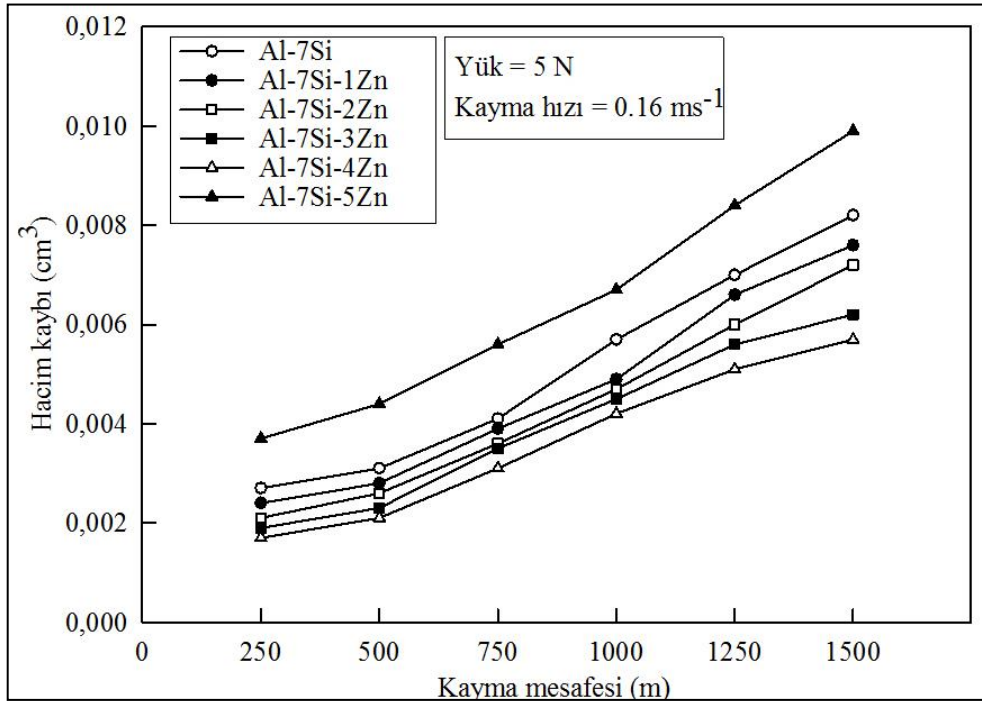


Şekil 27. Al-7Si esaslı alaşımlarının kararlı durumdaki ortalama sürtünme katsayısının çinko oranına göre değişimlerini gösteren eğriler

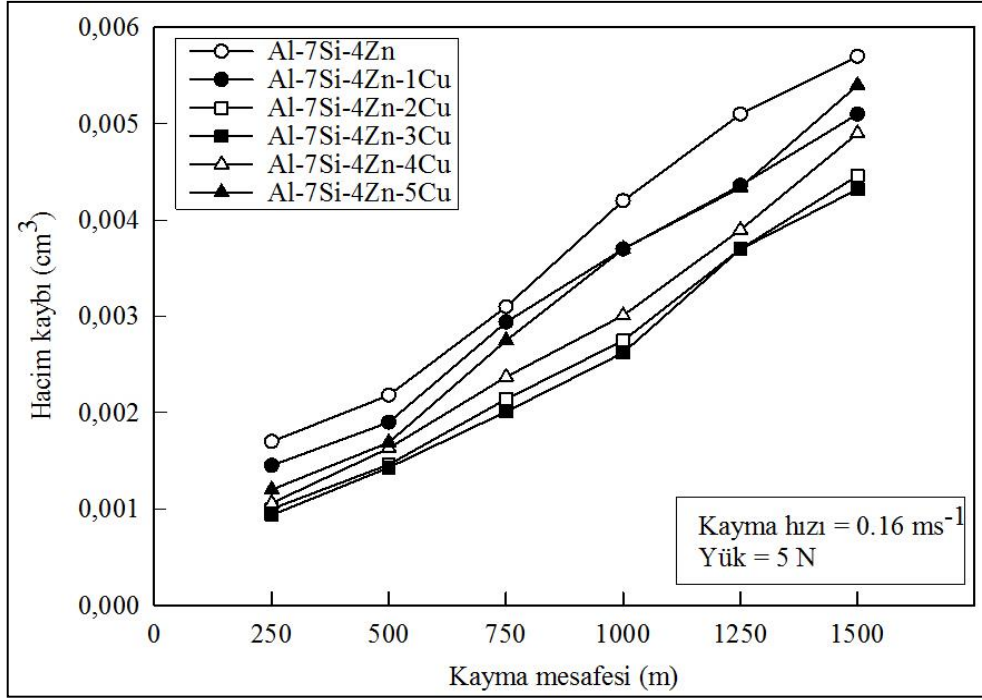


Şekil 28. Al-7Si-4Zn esaslı alaşımlarının kararlı durumdaki ortalama sürtünme katsayısının bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler

Aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-(0-5)Zn ve Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybı (aşınma kaybı) Tablo 7’de, hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler ise sırasıyla Şekil 29 ve Şekil 30’da verilmiştir. Bu eğriler, üretilen alaşımların hacim kaybının alınan yol ile hemen hemen doğrusal olarak arttığını göstermektedir. Farklı yollarda aşınma deneyine tabi tutulan söz konusu alaşımların aşınma kaybının çinko ve bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler ise sırasıyla Şekil 31 ve Şekil 32’de verilmiştir. Bu eğriler çinko oranı arttıkça üçlü alaşımların aşınma kaybının azalıp, %4 çinko oranında en düşük seviyesine düştükten sonra artışa geçtiği göstermektedir, Şekil 31. Nitekim üçlü alaşımlar içerisinde en düşük hacim kaybını Al-7Si-4Zn alaşımının sergilediği, en yüksek hacim kaybına ise Al-7Si-5Zn alaşımının sahip olduğu belirlendi. Diğer taraftan Al-7Si-4Zn esaslı alaşımın hacim kaybının artan bakır oranı azalarak %3 bakır oranında en düşük seviyesine ulaştıktan sonra arttığı belirlendi, Şekil 32. Ancak bakır içeren dördü alaşımların tamamının Al-7Si-4Zn alaşımından daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu görüldü.



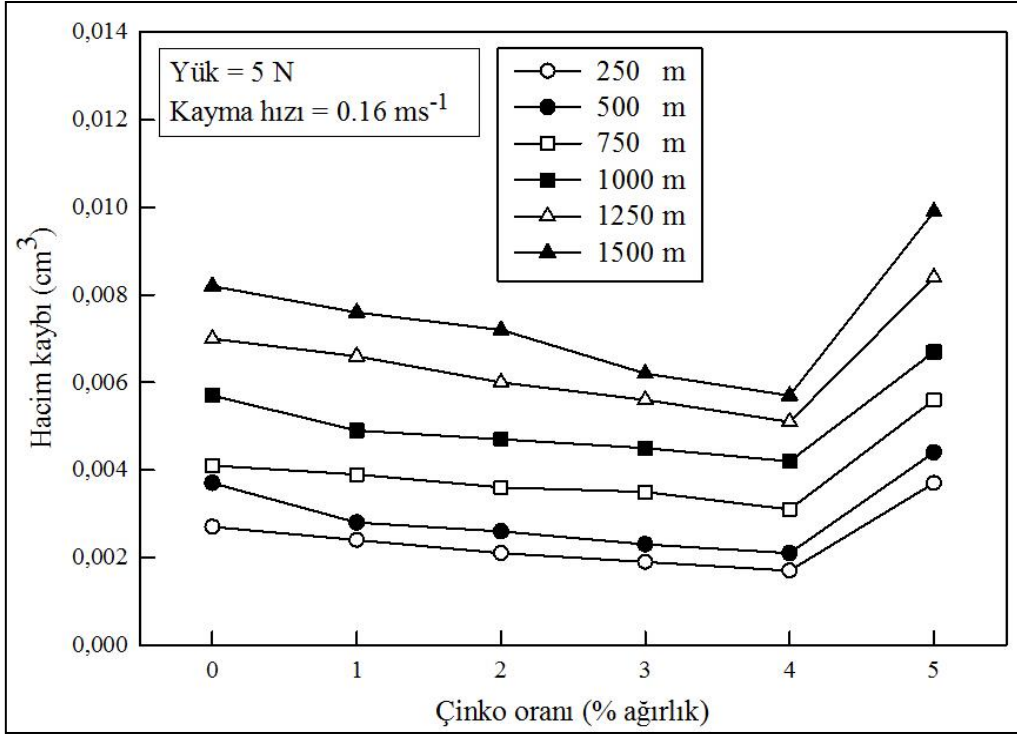
Şekil 29. Aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-(0-5)Zn alaşımlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



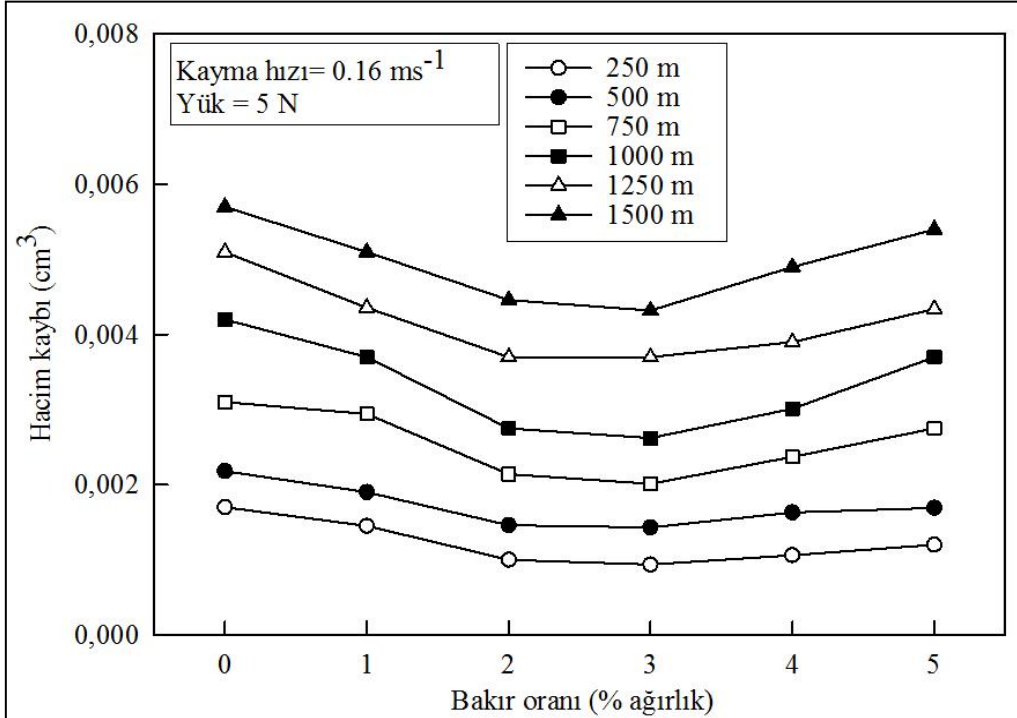
Şekil 30. Aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 7. Aşınma Deneğine Tabi Tutulan Al-7Si-(0-5)Zn ve Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu Alaşımlarında Aşınma ile Meydana Gelen Hacim Kaybı Değerleri

Alaşımlar	Alınan yol (m)							
	250	500	750	1000	1250	1500		
	Hacim kaybı (cm ³)							
Al-7Si-1Zn	0,0024	0,0028	0,0039	0,0049	0,0066	0,0076		
Al-7Si-2Zn	0,0021	0,0026	0,0036	0,0047	0,0060	0,0072		
Al-7Si-3Zn	0,0019	0,0023	0,0035	0,0045	0,0056	0,0062		
Al-7Si-4Zn	0,0017	0,0021	0,0031	0,0042	0,0051	0,0057		
Al-7Si-5Zn	0,0037	0,0044	0,0056	0,0067	0,0084	0,0099		
Al-7Si-4Zn-1Cu	0,00145	0,0019	0,00294	0,0037	0,00436	0,0051		
Al-7Si-4Zn-2Cu	0,001	0,00146	0,00214	0,00275	0,0037	0,00446		
Al-7Si-4Zn-3Cu	0,000935	0,00143	0,00201	0,0026	0,0037	0,00432		
Al-7Si-4Zn-4Cu	0,00106	0,00163	0,00237	0,00301	0,0039	0,0049		
Al-7Si-4Zn-5Cu	0,0012	1,6900e-3	0,00275	0,0037	0,00434	0,0054		



Şekil 31. Al-7Si-(0-5)Zn alaşımların aşınma kaybının çinko oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 32. Farklı yollarda aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımların aşınma kaybının bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler

Farklı yüklerde aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayısı ve 1000 m'lik kayma mesafesi sonundaki hacim kaybı değerleri sırasıyla Tablo 8 ve Tablo 9'da, bu değerlerin yüke göre değişimlerini gösteren eğriler ise sırasıyla Şekil 33 ve Şekil 34'de verilmiştir. Bu eğriler yük arttıkça dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn ve Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımlarının sürtünme katsayı değerlerinin azalıp 5N'luk yük değerinde en düşük seviyelerine ulaştıktan sonra bir artışa geçtiğini, ısıtılmış durumdaki alaşımların bu değerlerinin ise sürekli azaldığını göstermektedir. Diğer taraftan gerek dökülmüş gerekse ısıtılmış durumdaki alaşımlarda aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kaybının artan yük ile sürekli arttığı görüldü, Şekil 33. Farklı yüklerde aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlar içerisinde en düşük aşınma direncini Al-7Si-4Zn alaşımının, en yüksek aşınma direncini ise Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının sahip olduğu belirlendi. Ancak Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış numunelerinden elde edilen hacim kaybının belirli bir yük değerine (7,5 N) kadar hemen hemen aynı olduğu, bu değer üzerindeki yüklerde ise T6 ve T7 ısıtılmış alaşımın dökülmüş durumdaki alaşımdan daha üstün aşınma direnci sergilediği gözlemlendi, Şekil 34.

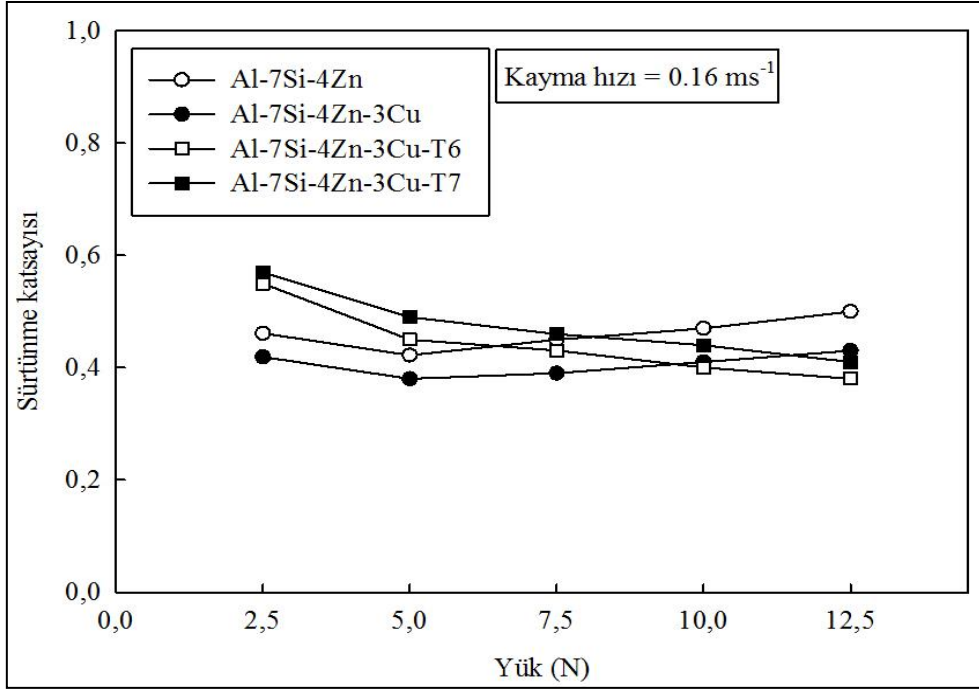
Sabit yük ve farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayısı ve 1000 m'lik kayma mesafesi sonundaki hacim kaybı değerleri sırasıyla Tablo 10 ve Tablo 11'de, bu değerlerin hıza göre değişimlerini gösteren eğriler ise sırasıyla Şekil 35 ve Şekil 36'da verilmiştir. Sürtünme katsayısının hıza göre değişimini gösteren eğrilere bakıldığında kayma hızı arttıkça alaşımların sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir, Şekil 35. Ancak bu değişimin başlangıçta hızlı, belirli bir kayma hızı değerinden sonra yavaş bir biçimde meydana geldiği belirlendi. Diğer taraftan hacim kaybının hıza göre değişimini gösteren eğrilere bakıldığında dökülmüş durumdaki alaşımların hacim kaybının başlangıçta artan hız ile azaldığı belirli bir hız değerinde en düşük seviyelerine ulaştıktan sonra arttığı, ısıtılmış dördü alaşımın bu değerinin ise dökülmüş durumuna göre ters bir değişim sergilediği görülmektedir, Şekil 36. Söz konusu koşullarda aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlar içerisinde en yüksek hacim kaybının dökülmüş durumdaki üçlü Al-7Si-4Zn alaşımında, en düşük hacim kaybının ise T6 ısıtılmış Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımında meydana geldiği belirlendi.

Tablo 8. Farklı Yüklere Aşınma Deneyine Tabi Tutulan Alaşımın Kararlı Durumdaki Sürtünme Katsayısı Değerleri

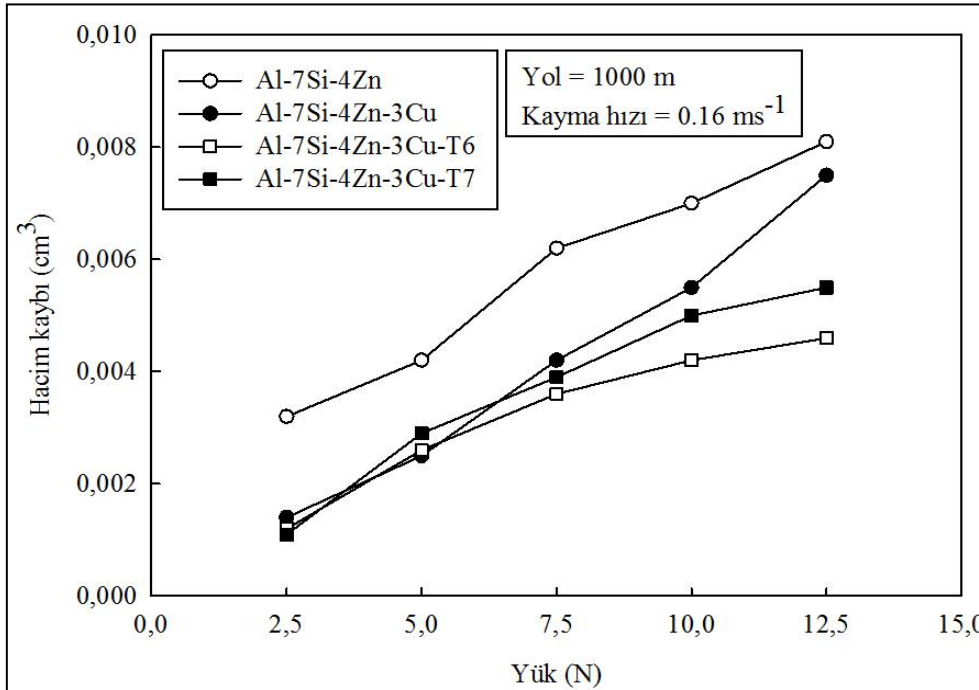
Alaşım	Yük (N)			
	2,5	5	7,5	10
	Sürtünme katsayısı			
Al-7Si-4Zn	0,4613	0,4220	0,4500	0,4700
Al-7Si-4Zn-3Cu	0,4189	0,3800	0,3900	0,4100
Al-7Si-4Zn-3Cu-T6	0,5500	0,4500	0,4305	0,4000
Al-7Si-4Zn-3Cu-T7	0,5700	0,4900	0,4600	0,4400

Tablo 9. Farklı Yüklere Aşınma Deneyine Tabi Tutulan Alaşımın 1000 m Kayma Mesafesi Sonundaki Hacim Kaybı Değerleri

Alaşım	Yük (N)			
	2,5	5	7,5	10
	Hacim kaybı (cm ³)			
Al-7Si-4Zn	0,0032	0,0042	0,0062	0,0070
Al-7Si-4Zn-3Cu	0,0014	0,0025	0,0042	0,0055
Al-7Si-4Zn-3Cu-T6	0,0012	0,0026	0,0036	0,0042
Al-7Si-4Zn-3Cu-T7	0,0011	0,0029	0,0039	0,0050



Şekil 33. Dökülmüş ve ısıl işlemler görmüş durumdaki alaşımların kararlı durumdaki sürtünme katsayılarının yüke göre değişimini gösteren eğriler



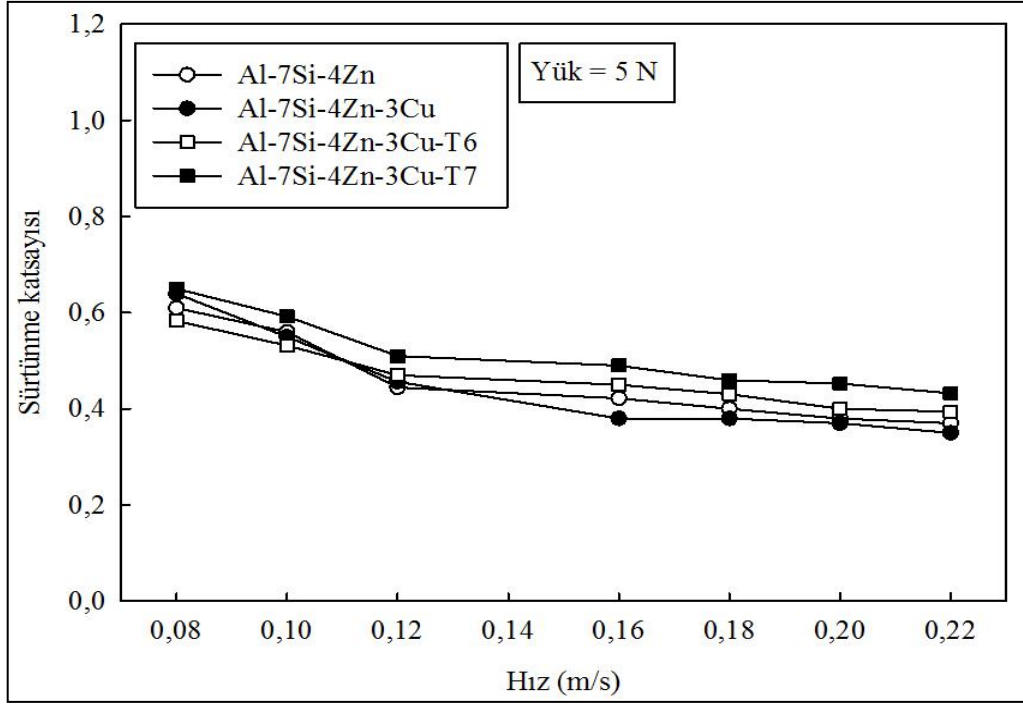
Şekil 34. Dökülmüş ve ısıl işlemler görmüş durumdaki alaşımların hacim kaybının yüke göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 10. Farklı Kayma Hızlarında Aşınma Deneğine Tabi Tutulan Alaşımların Kararlı Durumdaki Sürtünme Katsayısı Değerleri

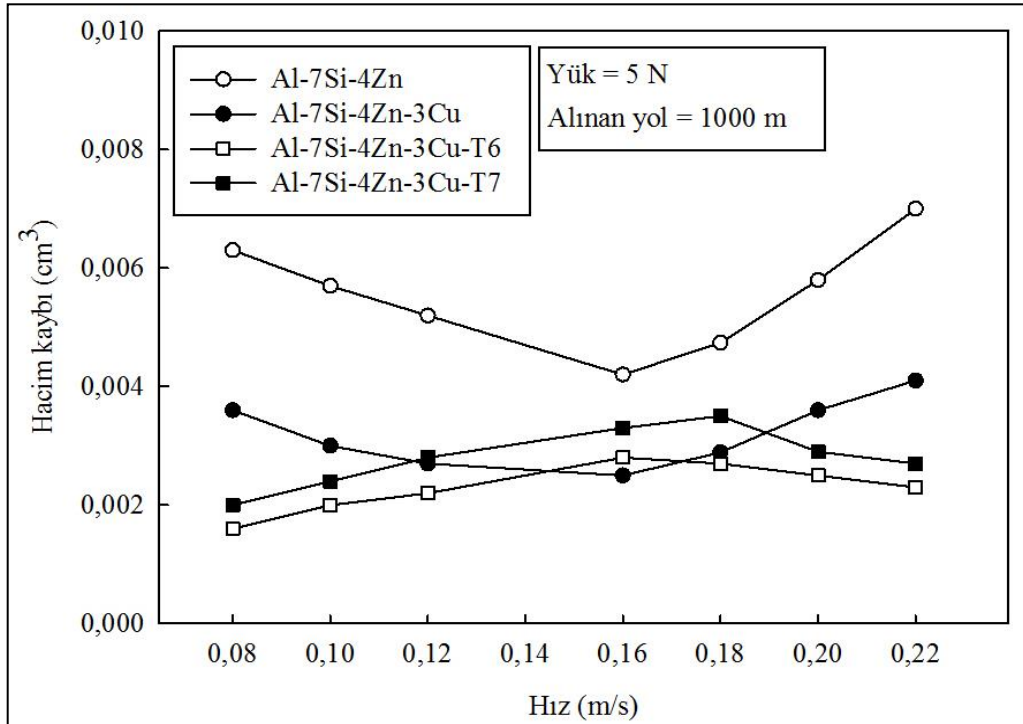
Alaşımlar	Hız (m/s)						
	0,08	0,10	0,12	0,16	0,18	0,20	0,22
Al-7Si-4Zn	0,6100	0,5600	0,4447	0,4220	0,4000	0,3800	0,3700
Al-7Si-4Zn-3Cu	0,6400	0,5500	0,4565	0,3800	0,3797	0,3700	0,3500
Al-7Si-4Zn-3Cu-T6	0,5832	0,5316	0,4700	0,4500	0,4305	0,4002	0,3940
Al-7Si-4Zn-3Cu-T7	0,6500	0,5923	0,5100	0,4900	0,4594	0,4527	0,4325

Tablo 11. Farklı Kayma Hızlarında Aşınma Deneğine Tabi Tutulan Alaşımların, 1000 m Kayma Mesafesi Sonundaki Hacim Kaybı Değerleri

Alaşımlar	Hız (m/s)						
	0,08	0,10	0,12	0,16	0,18	0,20	0,22
Al-7Si-4Zn	0,0063	0,0057	0,0052	0,0042	0,0050	0,0058	0,0070
Al-7Si-4Zn-3Cu	0,0036	0,0030	0,0027	0,0025	0,0031	0,0036	0,0041
Al-7Si-4Zn-3Cu-T6	0,0016	0,0020	0,0022	0,0028	0,0027	0,0025	0,0023
Al-7Si-4Zn-3Cu-T7	0,0020	0,0024	0,0028	0,0031	0,0035	0,0029	0,0027



Şekil 35. Dökülmüş ve ısıl işlemler görmüş durumdaki alaşımların kararlı durumdaki sürtünme katsayılarının hıza göre değişimini gösteren eğriler

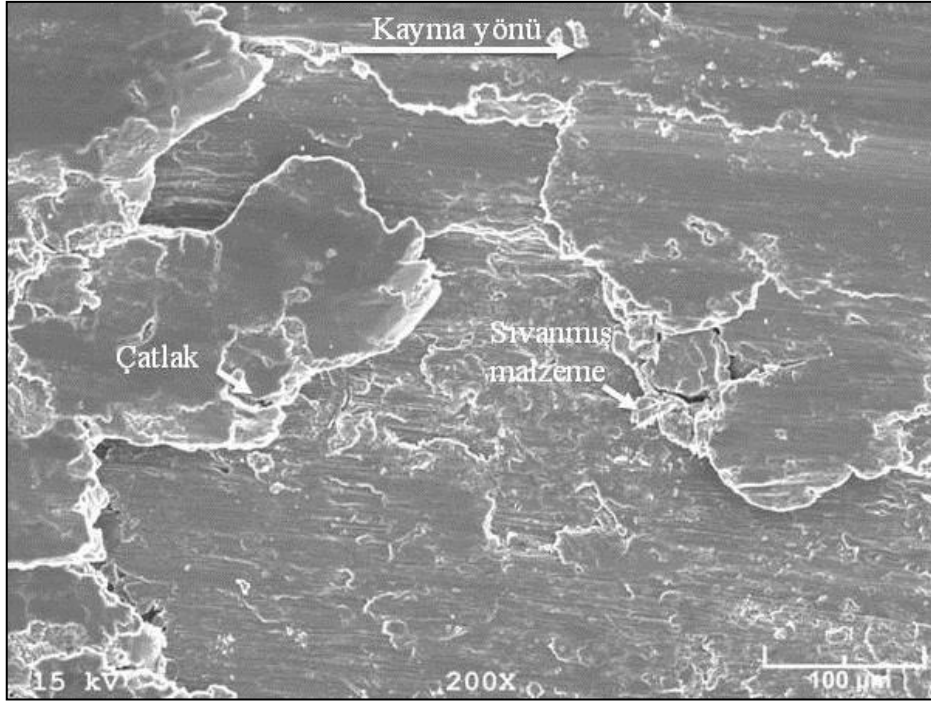


Şekil 36. Dökülmüş ve ısıl işlemler görmüş durumdaki alaşımların hacim kaybının hıza göre değişimini gösteren eğriler

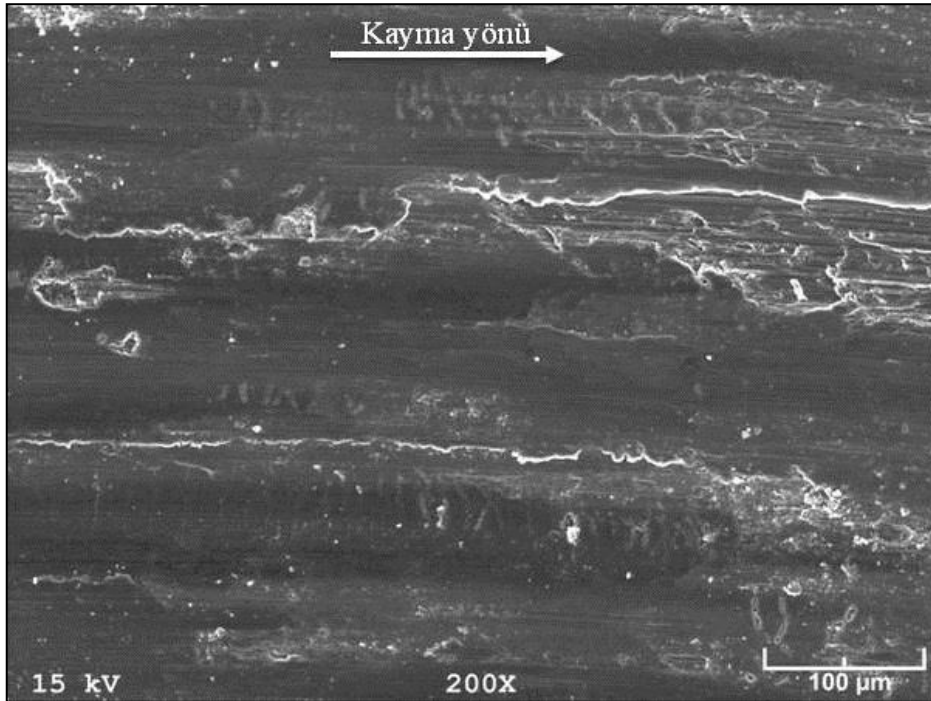
3.6. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

Sabit yük ve kayma hızda farklı mesafelerde aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlara ait numunelerin yüzeylerinde sıvama tabakalarının, ince çiziklerin ve mikro çatlakların oluştuğu ve soyulmaların meydana geldiği görüldü. Diğer taraftan düşük kayma mesafelerinde belirgin olan çiziklerin artan kayma mesafesi ile birlikte nispeten kaybolduğu, sıvama tabakalarının ise genişlediği ve daha belirgin hale geldiği gözlemlendi. Ancak, çinko ve bakır oranlarının alaşımların aşınma yüzeylerinin görünümü üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadıkları belirlendi. Bu nedenle, burada yalnız çalışmada baz alınan ikili Al-7Si, üçlü ve dörtlü alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direnci sergileyen Al-7Si-4Zn ve Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımlarına ait numunelerin 250 ve 1500 m'lik yollara karşılık gelen aşınma deneyleri sonucundaki yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları verilmiştir, Şekil 37-42.

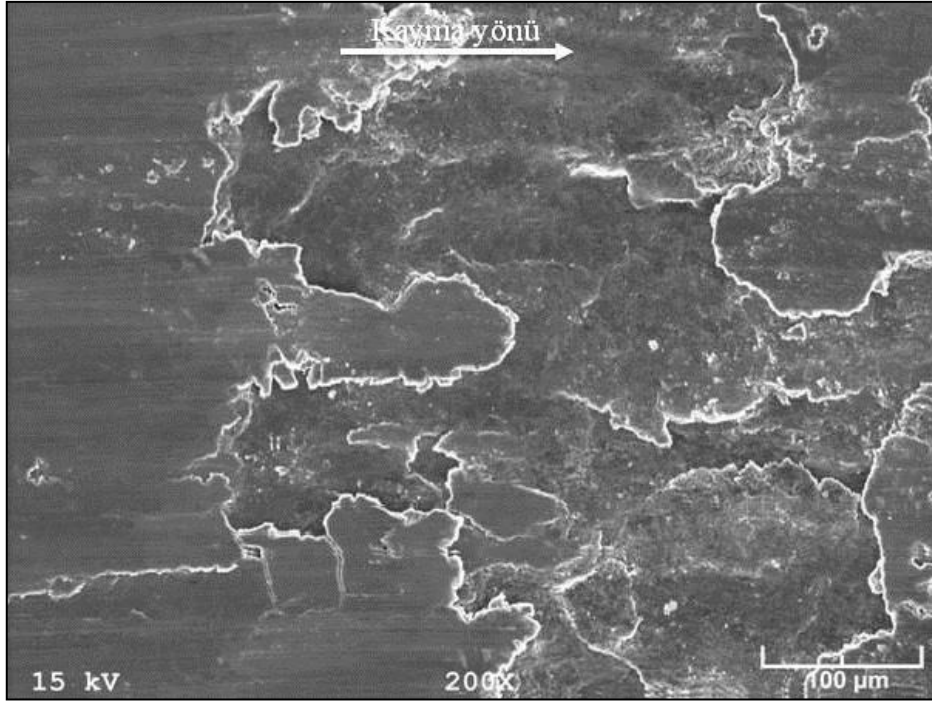
Alaşımların aşınma deneylerinde aşındırıcı olarak kullanılan bilyaların yüzeylerinde de sıvama tabakalarının oluştuğu ve oksitlenmelerin meydana geldiği görüldü. Bu duruma örnek olarak ikili Al-7Si alaşımının 5 N'luk yük, 0,16 m/s'lik hız ve 1500 m'lik kayma mesafesinde yapılan aşınma deneylerinde kullanılan bilyenin yüzeyinde oluşan sıvama tabakasının SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir, Şekil 43. Üretilen alaşımların farklı koşullarda aşınma deneyine tabi tutulan numuneleri için kullanılan aşındırıcı bilyaların yüzeylerinde benzer durum görülmüştür.



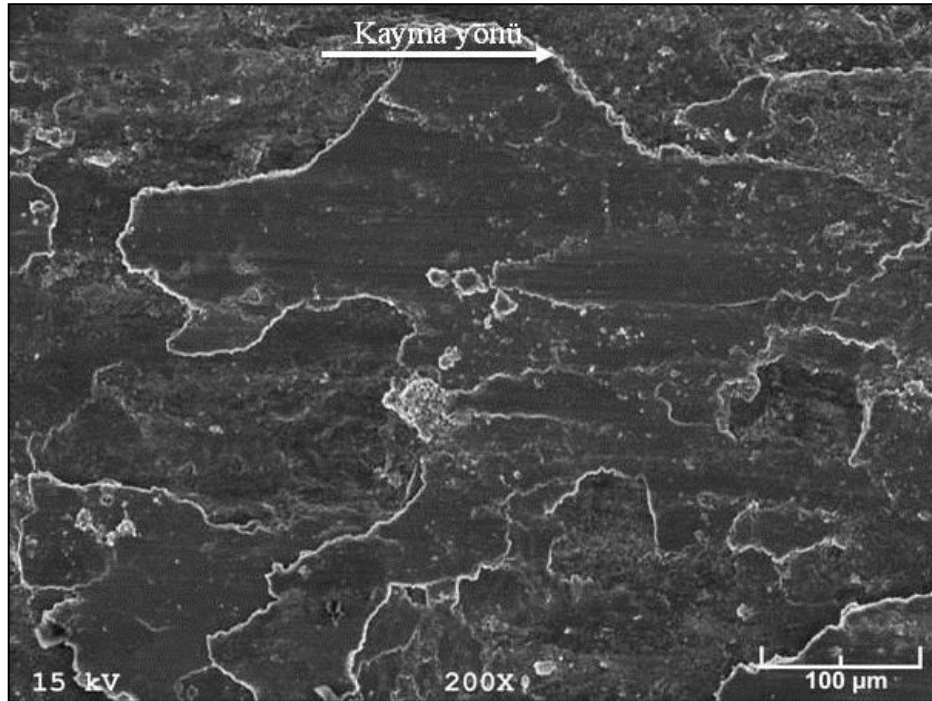
Şekil 37. Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si alaşımının aşınma yüzeyinin 250 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



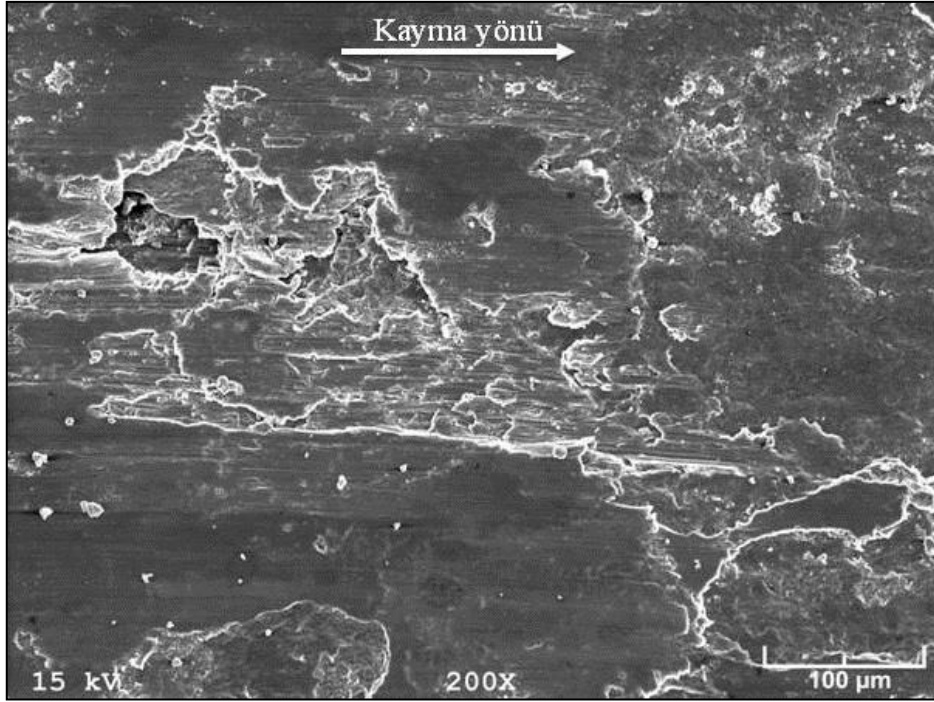
Şekil 38. Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si alaşımının aşınma yüzeyinin 1500 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



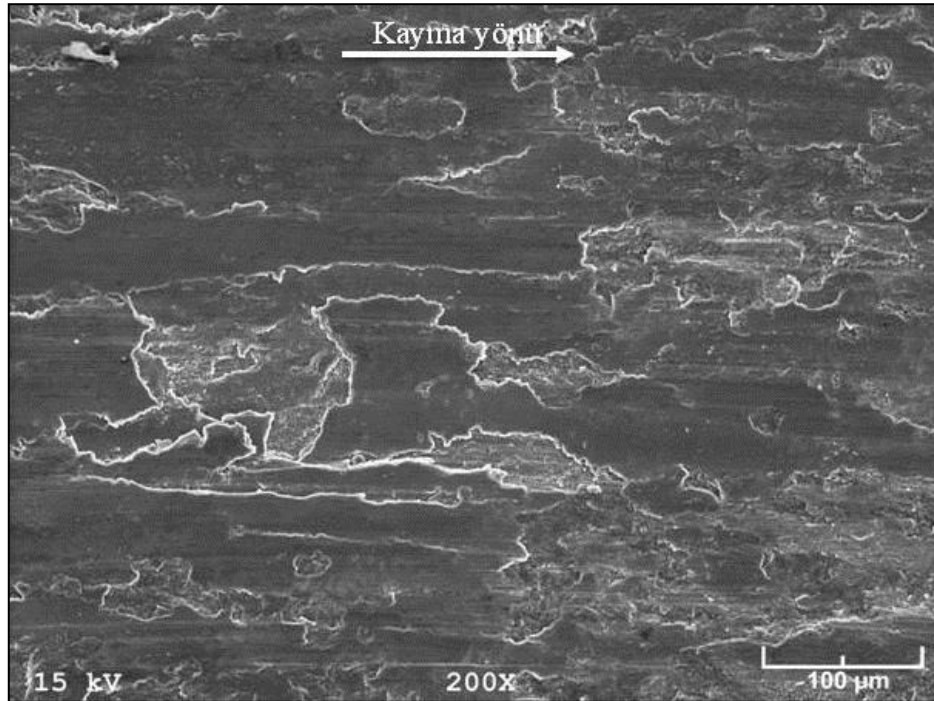
Şekil 39. Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn alaşımının aşınma yüzeyinin 250 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



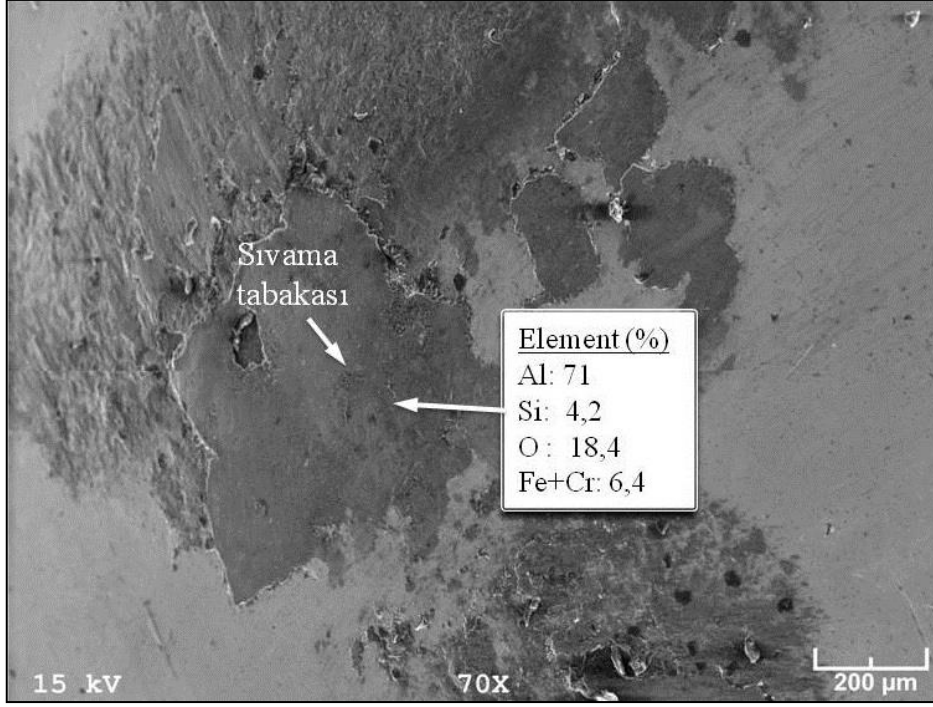
Şekil 40. Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn alaşımının aşınma yüzeyinin 1500 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



Şekil 41. Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 250 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü

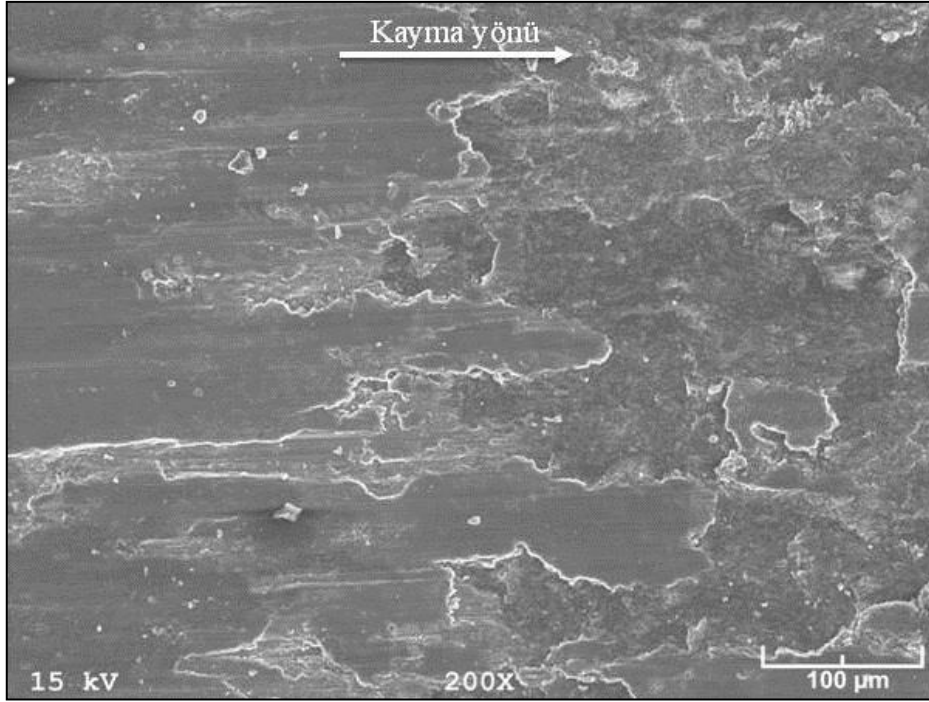


Şekil 42. Sabit yük ve hız değerlerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1500 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü

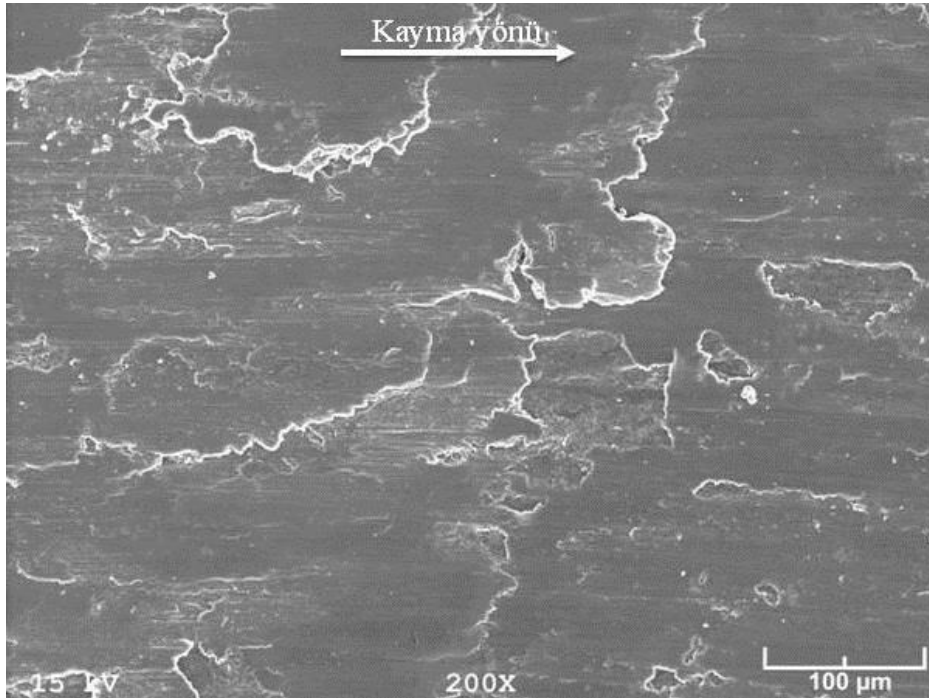


Şekil 43. İkili Al-7Si alaşımının 5 N'luk yük, 0,16 m/s'lik hız ve 1500 m'lik kayma mesafesinde kullanılan bilyenin yüzeyinde oluşan sıvama tabakasının SEM görüntüsü ve EDS analizi

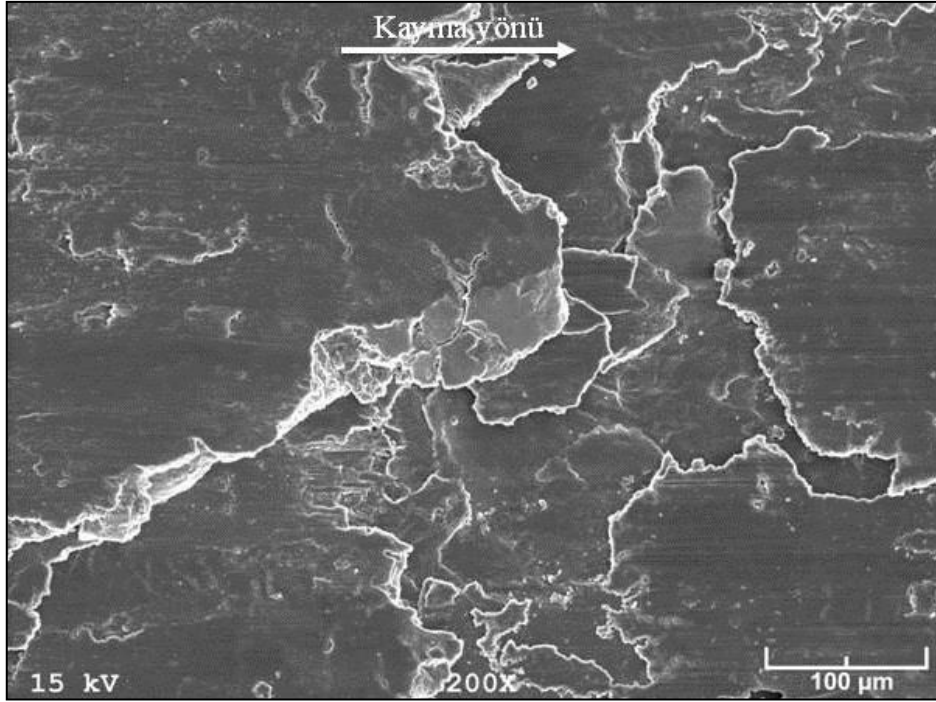
Farklı yük ve kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş, T6 ve T7 ısıt işlemleri görmüş durumdaki alaşımlara ait numunelerin aşınma yüzeylerinin birbirine benzer olduğu gözlemlendi. Bu nedenle burada yalnız Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının 0.16 m/s'lik sabit kayma hızında farklı yük (2,5, 7,5, 12,5 N) değerlerinde ve 5 N'luk sabit yük altında farklı kayma hızlarında (0,08, 0,18, 0,22 m/s) deneye tabi tutulan dökülmüş ve T6 ısıt işlemleri görmüş durumdaki numunelerine ait aşınma yüzeylerini gösteren fotoğraflar verilmiştir, Şekil 44-55. Bu fotoğraflara bakıldığında alaşımların aşınma yüzeylerinde oluşan sıvama tabakalarının artan yük ve kayma hızı ile genişlediği, belirgin soyulmaların meydana geldiği ve çatlakların oluştuğu görüldü. Diğer taraftan düşük yük ve kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlara ait numunelerin yüzeylerinde oluşan ince çiziklerin artan yük ve kayma hızı ile nispeten kaybolduğu gözlemlendi.



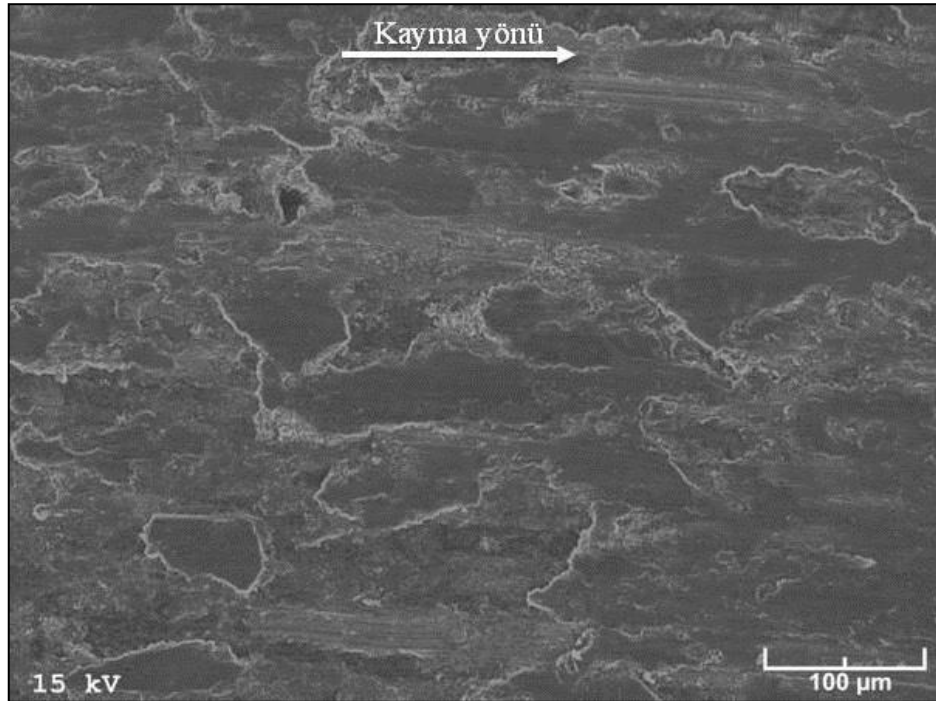
Şekil 44. 2,5 N'luk yük ve 0.16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



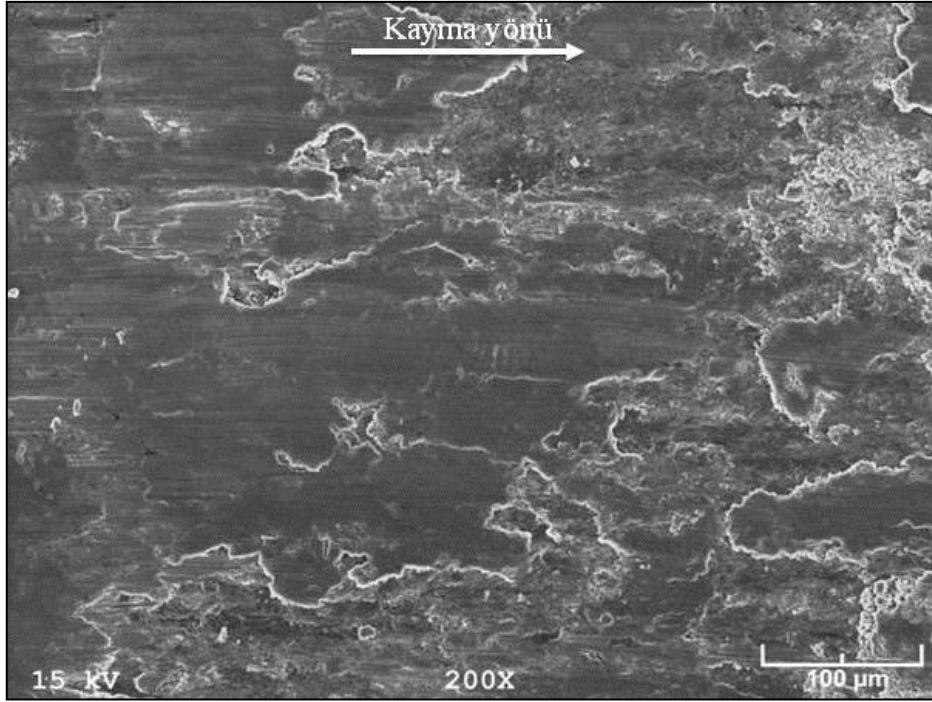
Şekil 45. 7,5 N'luk yük ve 0.16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



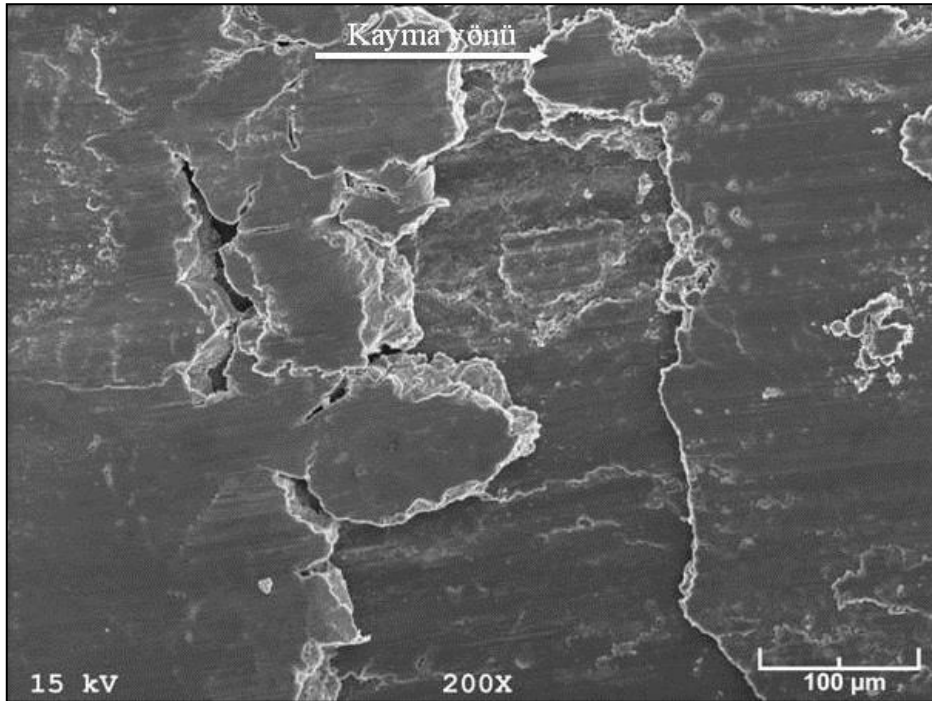
Şekil 46. 12,5 N'luk yük ve 0.16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



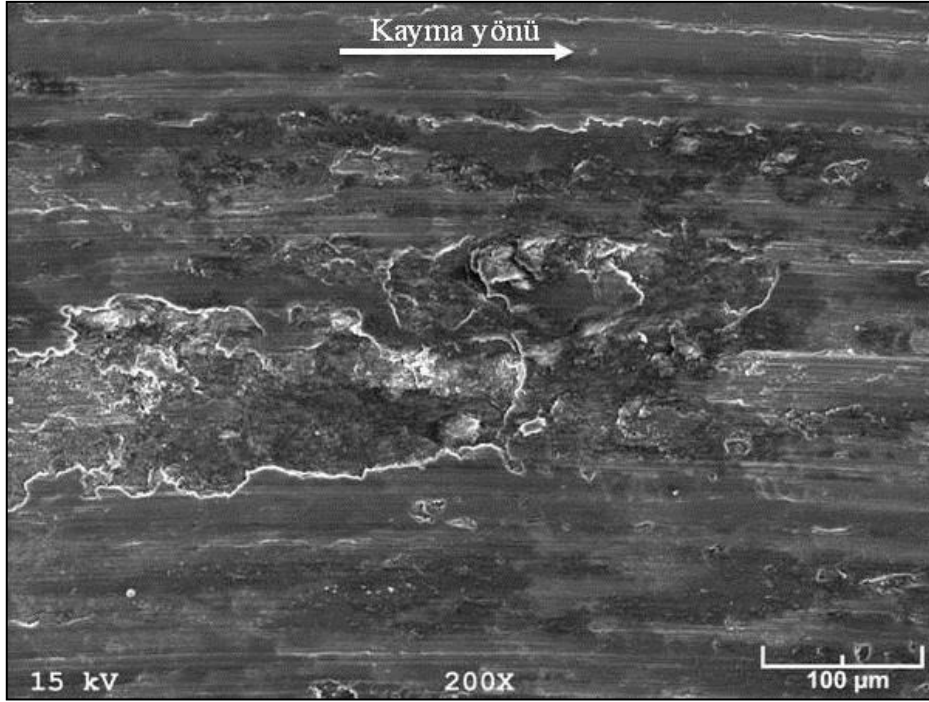
Şekil 47. 2,5 N yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıl işlemi görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



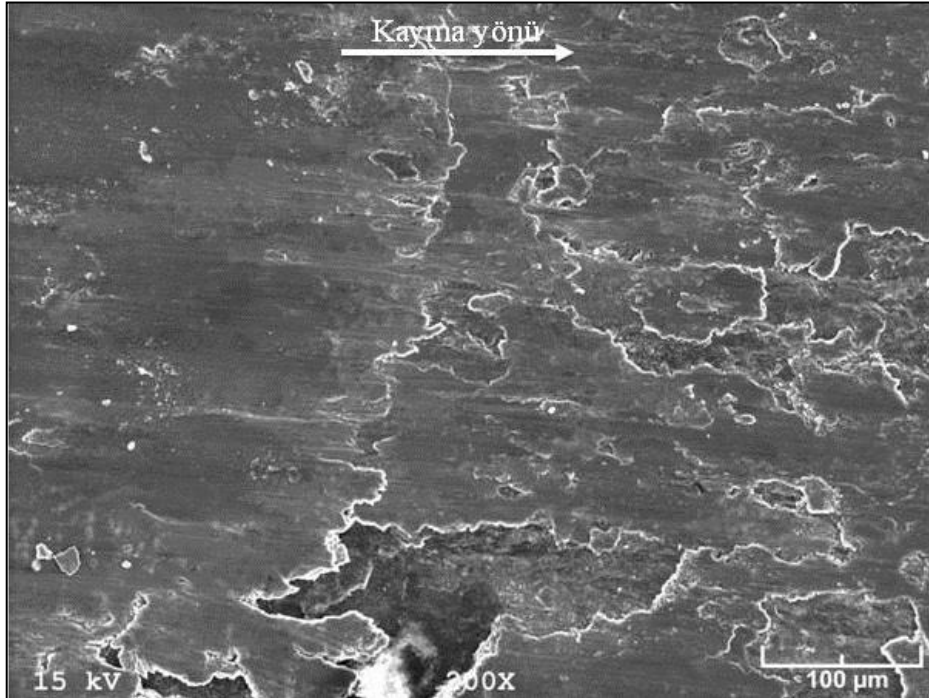
Şekil 48. 7,5 N yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıl işlemi görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



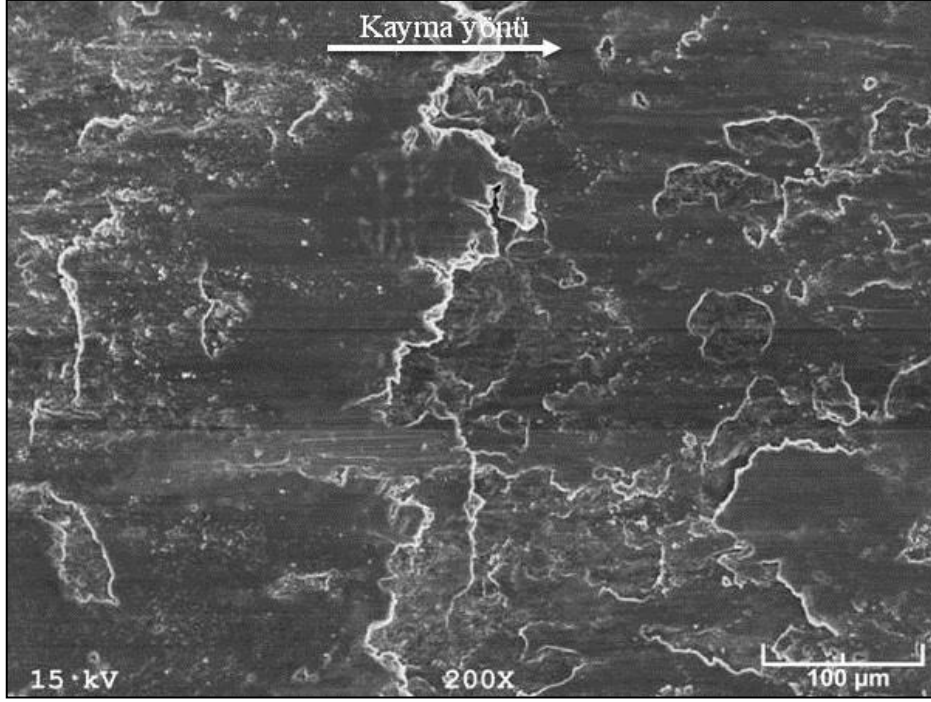
Şekil 49. 12,5 N yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıl işlemi görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



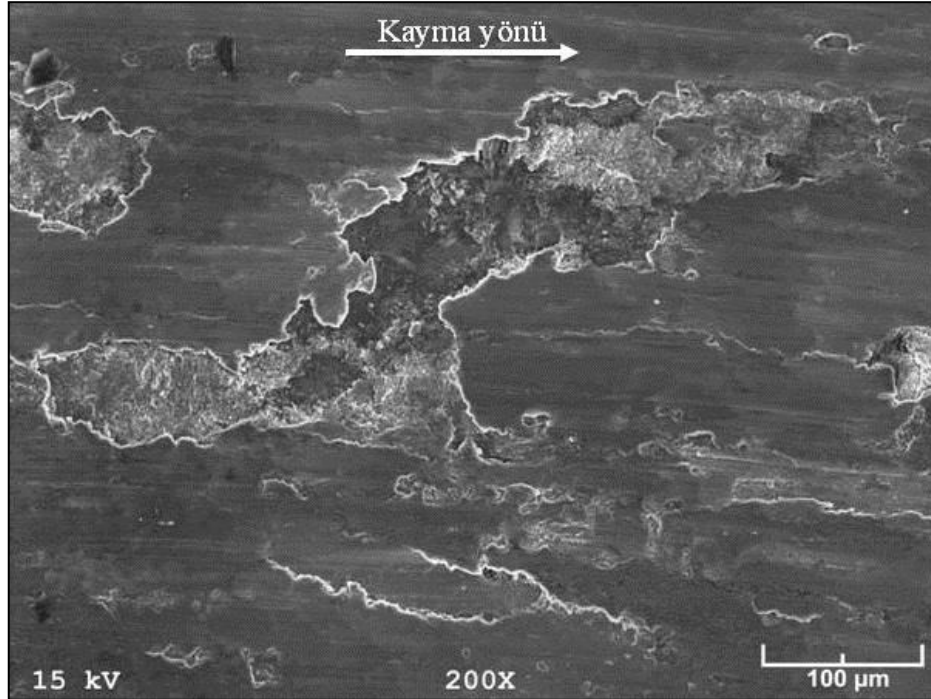
Şekil 50. 5 N'luk yük ve 0,08 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



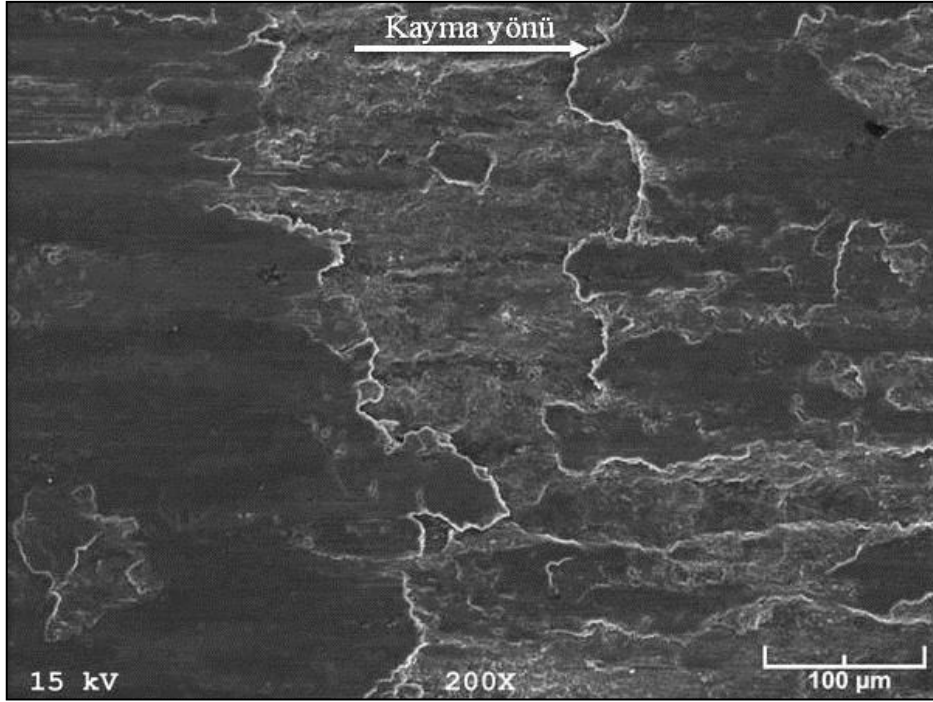
Şekil 51. 5 N'luk yük ve 0,18 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



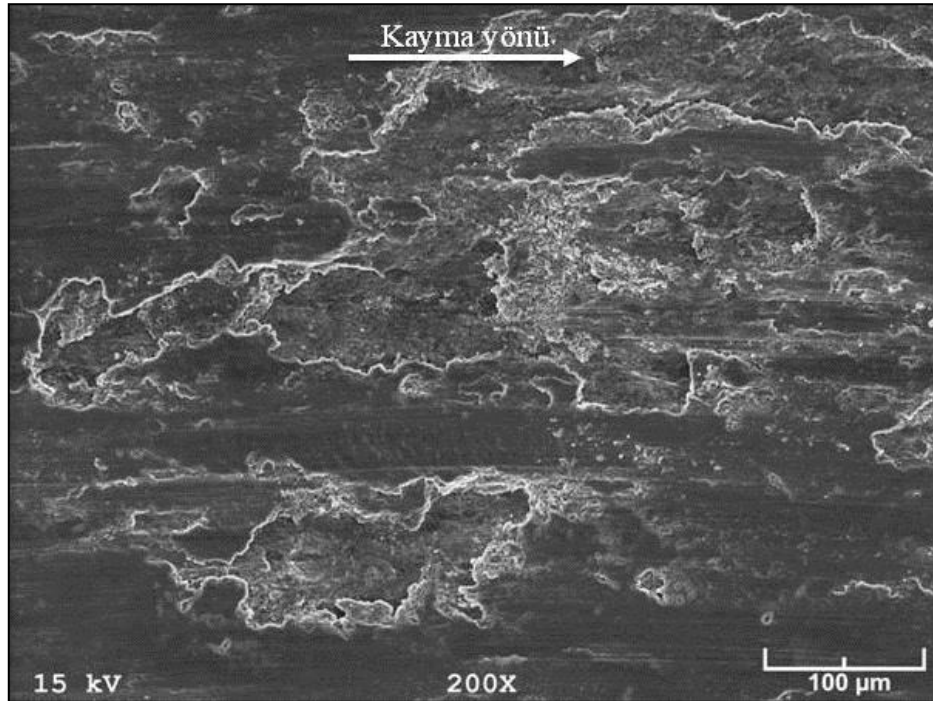
Şekil 52. 5 N'luk yük ve 0,22 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



Şekil 53. 5 N'luk yük ve 0,08 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıt işleme görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



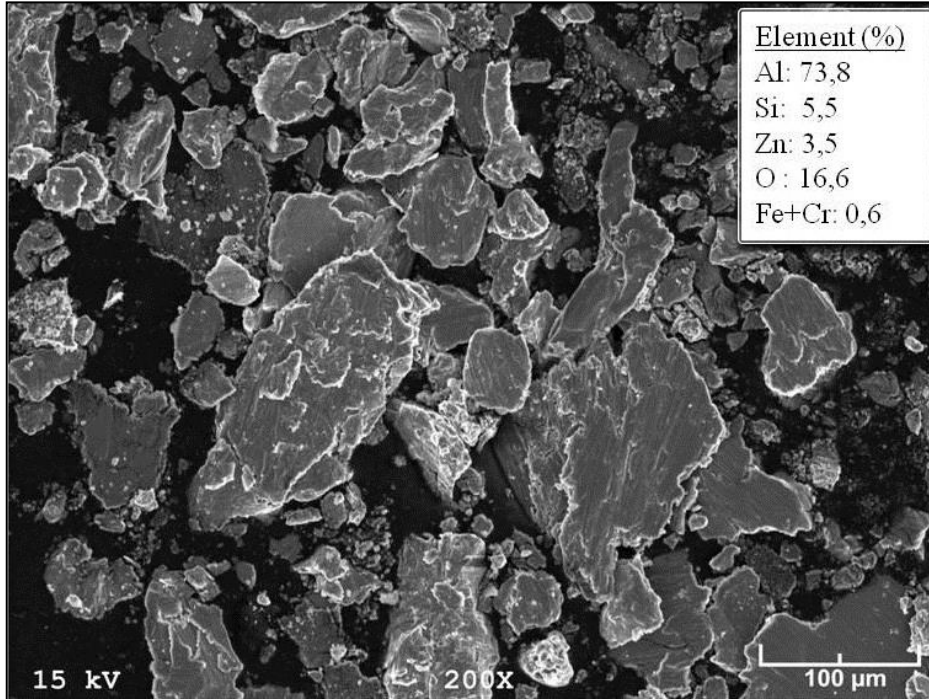
Şekil 54. 5 N'luk yük ve 0,17 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıt işlemleri görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü



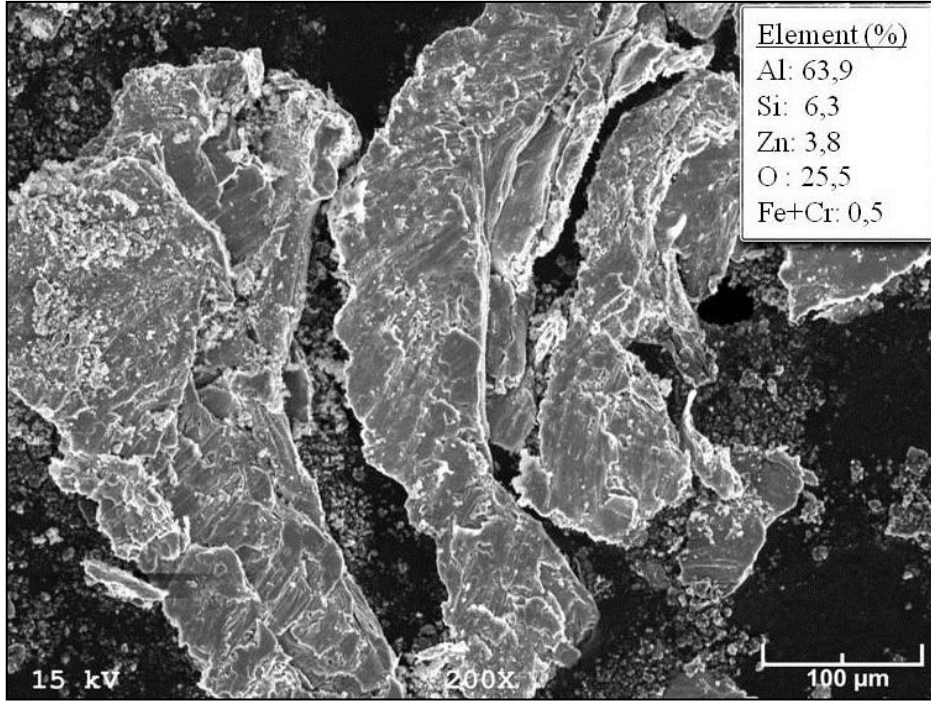
Şekil 55. 5 N'luk yük ve 0,22 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan T6 ısıt işlemleri görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyinin 1000 m'lik kayma yolu sonundaki SEM görüntüsü

3.7. Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

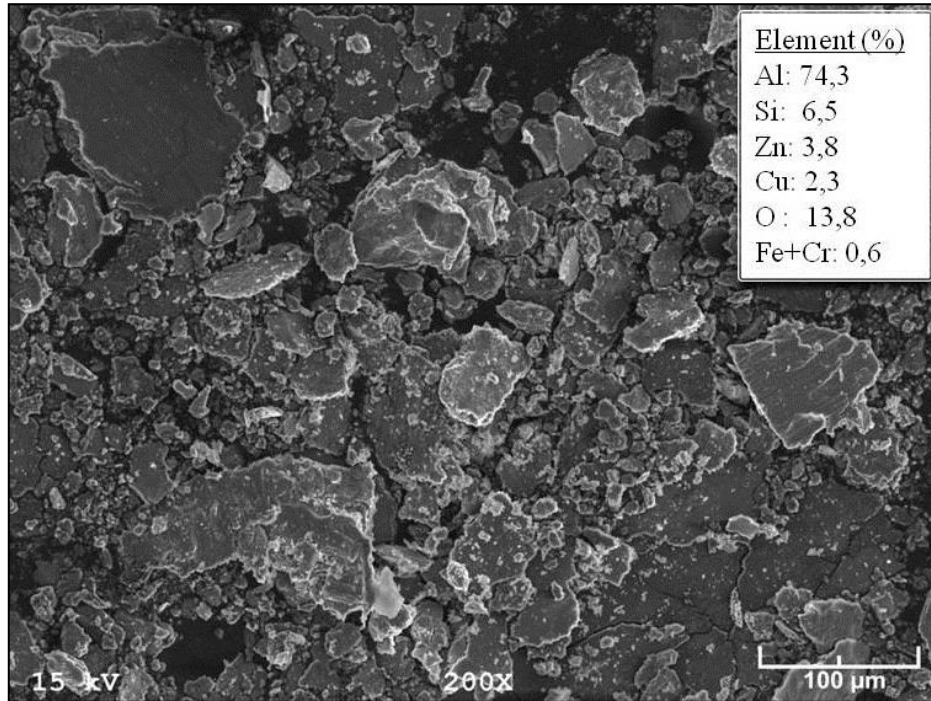
Dökülmüş ve ısıtılmış ve ısıtılmış durumlardaki alaşımlara ait numunelerden aşınma deneyleri sonunda elde edilen aşınma parçacıklarının ince ve iri toz parçacıklarından oluştuğu gözlemlendi. Kayma mesafesi, yük ve kayma hızı arttıkça ince toz biçimindeki parçacıkların oranının arttığı, iri biçimindekilerinin oranının ise azaldığı ancak boyutlarının arttığı görüldü. Kimyasal bileşimin ve uygulanan ısıtılmış işlemlerin bu parçacıkların morfolojisi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadıkları gözlemlendi. Bu nedenle burada 5 N'luk yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulmuş ikili Al-7Si, üçlü Al-7Si-4Zn ve dördü Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımlarına ait numunelerden 250 ve 1500 m'lik kayma yolu sonunda toplanan aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri ve bunların EDS analizi sonuçları verilmiştir, Şekil 56-59. EDS analizleri aşınma parçacıklarının kimyasal bileşimlerinin bu alaşımların aşınma yüzeylerinde oluşan sıvama tabakalarının kimyasal bileşimlerine çok yakın olduğunu, ancak içerdikleri oksijen miktarının artan yol, yük ve kayma hızı ile bir artış sergilediğini göstermiştir.



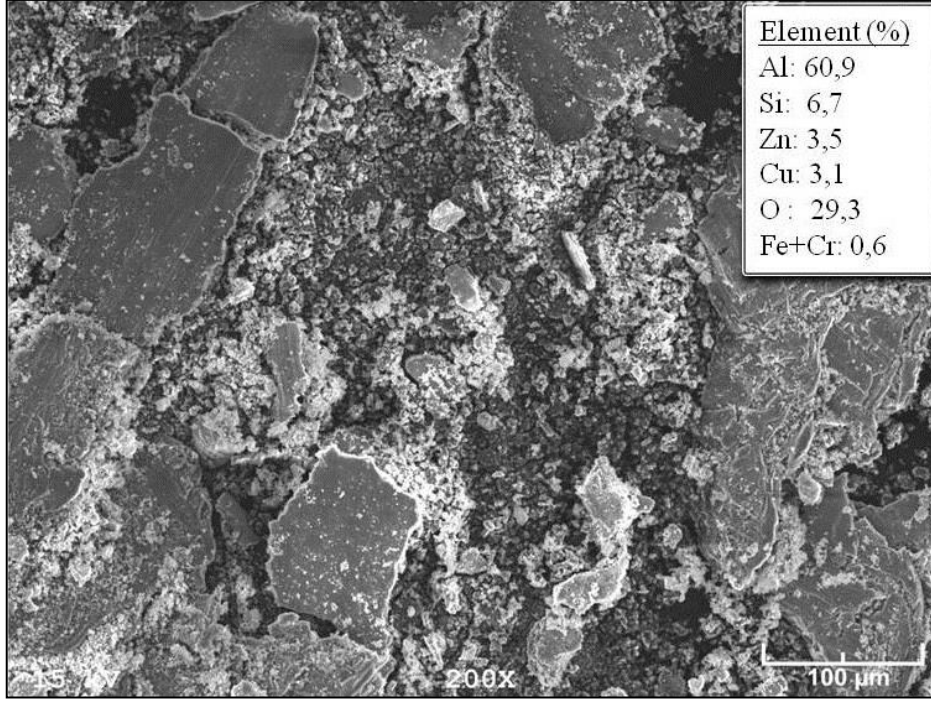
Şekil 56. 5 N'luk yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn alaşımından 250 m'lik kayma yolu sonunda toplanan aşınma parçacıklarının EDS analizi ve SEM görüntüsü



Şekil 57. 5 N'luk yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn alaşımından 1500 m'lik kayma yolu sonunda toplanan aşınma parçacıklarının EDS analizi ve SEM görüntüsü



Şekil 58. 5 N'luk yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımından 250 m'lik kayma yolu sonunda toplanan aşınma parçacıklarının EDS analizi ve SEM görüntüsü



Şekil 59. 5 N'luk yük ve 0,16 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımından 1500 m'lik kayma yolu sonunda toplanan aşınma parçacıklarının EDS analizi ve SEM görüntüsü

4. İRDELEME

4.1. Metalografik İncelemelerinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi

Bu çalışmada baz alınan ikili Al-7Si alaşımının içyapısının α -Al dendritleri ile silisyum parçacıklarından oluştuğu görüldü, Şekil 6. Alaşımın içyapısında bulunan silisyum parçacıklarının ince ve uzun, geniş ve köşeli olmak üzere iki farklı görünüme sahip oldukları gözlemlendi. Bunlardan ince ve uzun olanların ötektik silisyum, geniş ve köşeli olanların ise birincil silisyum parçacıkları oldukları belirlendi. Ötektik silisyum parçacıklarının dendritlerarası bölgelerde, birincil silisyumların ise hem dendritlerin içerisinde hem de dendritlerarası bölgelerde yer aldıkları görüldü. Bu durum söz konusu alaşımın faz diyagramına ve katılaşma mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir [4-6,9-13]. Şöyle ki, ikili Al-Si alaşımlarının faz diyagramına göre Al-7Si alaşımının ötektik altı bir alaşım olduğu göze çarpmaktadır. Ötektik altı Al-Si alaşımlarının katılaşması sırasında ilk önce alüminyum dendritleri oluşur ve sıcaklık azaldıkça dendritlerarası bölgelerde yer alan sıvı içerisindeki alüminyum oranı azalır, silisyum oranı ise artar. Bu durum sıvı fazın kimyasal bileşiminin ötektik alaşımın kimyasal bileşimine erişmesine kadar devam eder. Ötektik bileşime erişildiğinde ötektik dönüşüm meydana gelir ve böylece dendritlerarası bölgelerde ötektik dönüşüm ürünü ince ve uzun silisyum parçacıkları oluşur. Birincil silisyum parçacıkları ise ötektik dışı parçacıklar olup bunlar katılaşma sırasındaki dengesiz soğumadan dolayı kendiliğinden oluşmuş olabilir [4-6,9-13].

Çinko katkısının Al-7Si alaşımının metalografik yapısını pek fazla değiştirmedeği, ancak bu katkının söz konusu alaşımlarda alüminyumca zengin bir katı çözeltilinin oluşumuna yol açtığı belirlendi, Şekil 7-11. Bu durum alaşımların katı çözeltili oluşturma ve katılaşma davranışına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, çinkonun alüminyum içerisindeki katı durumdaki çözünürlüğünün yaklaşık %80 oranında, silisyumunun ise alüminyum-çinko matrisi içerisindeki katı çözünürlüğünün ihmal edilebilir düzeyde olduğu bilinmektedir [6,11,13,31,38]. Bu nedenle alaşımların katılaşma sırasında ilk önce alüminyumca zengin α -dendritleri oluşur ve söz konusu dendritler sıcaklık azaldıkça sıvı çözeltiliden sürekli atom çekerek büyümeye devam ederler. Geriye kalan sıvı çözeltilinin kimyasal bileşimi ötektik alaşımın kimyasal bileşime eriştiğinde ötektik dönüşüm meydana gelir ve katılaşma tamamlanmış olur. Bu katılaşma sonucunda α -dendritleri ile

dendritlerarası bölgelerde ötektik karışımdan oluşan bir yapı meydana gelir. Diğer taraftan birincil silisyum parçacıklarının boyut ve oranının artan çinko oranı ile arttığı ve bu parçacıkların bazı bölgelerde kümeleştikleri görüldü, Şekil 7-11. Silisyum parçacıklarının boyut ve oranında meydana gelen artış ikili alaşımlardaki ötektik noktanın kimyasal bileşiminin (Al-11.7Si) üçlü Al-7Si-Zn alaşımlarda ötektik üstü tarafa doğru kaymış olmasından kaynaklanmış olabilir. Söz konusu parçacıkların yapı içerisinde kümeleşmeleri ise yoğunluk farkına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, yoğunluğu düşük olan bu parçacıklar sıvı metal içerisinde yüzerlerken birbirine temas ederek hareketlerini engellemeleri sonucunda bir arda toplanırlar. Sıvı çözelti içerisinde meydana gelen bu durum silisyum parçacıklarının kümeleşmesine yol açmış olabilir [6,11,13,31].

Dörtlü Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımlarının iç yapılarının bu alaşımlar için baz alınan üçlü Al-7Si-4Zn alaşımın iç yapısına benzediği, ancak %2 oranının üzerinde bakır içeren alaşımların iç yapılarında bakırca zengin θ fazının oluştuğu görüldü, Şekil 12-14. Bakır oranı arttıkça θ fazına ait parçacıkların boyut ve oranının arttığı ve rastgele bir dağılım sergiledikleri belirlendi. Bu durum bakırın söz konusu alaşımların matrisini oluşturan α katı çözeltisi içerisindeki çözünürlüğüne dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, yapılan EDS analizleri bakırın α -matrisi içerisindeki çözünürlüğünün %2'den daha düşük olduğunu göstermiştir. Bu analiz sonucuna göre %2 oranına kadar olan bakır katkılarının α matrisi içerisinde hemen hemen tamamen çözüldüğü, bu değerden yüksek oranlarda bakır içeren alaşımlarda ise fazlalık bakırın alüminyum ile reaksiyona girerek bakırca zengin θ fazı parçacıklarının oluşmasına yol açtığı söylenebilir.

T6 ve T7 ısıtma işlemlerine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının dendritik yapısının ortadan kalktığı, ancak söz konusu ısıtma işlemlerinin silisyum parçacıklarının morfolojisi üzerinde belirgin bir etkiye yol açmadığı görüldü, Şekil 15 ve Şekil 16. Ancak T7 ısıtma işleminden sonra θ fazına ait parçacıkların büyüyerek daha belirgin hale geldikleri gözlemlendi, Şekil 16. Bu durum çözündürme ve su verme işleminden sonra oluşan α katı çözeltisi içerisinde çözülmüş durumda bulunan bakırın yaşlandırma sırasında alüminyumla reaksiyona girerek θ fazına ait parçacıkları oluşturması için gerekli sürenin artmasından kaynaklanmış olabilir.

4.2. Mekanik Deneylelerden Elde edilen Bulguların İrdelenmesi

İkili Al-7Si alaşımasının sertlik, akma, çekme ve basma dayanımları ile matrisi oluşturan α fazının mikrosertliğinin artan çinko oranı ile arttığı, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin ise azaldığı belirlendi, Şekil 17. Alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerindeki artış bu alaşımlarda meydana gelen katı çözeltiler sertleşmesine, süneklik değerlerinde meydana gelen azalma ise birincil silisyum parçacıklarının boyut, oran ve dağılıma dayandırılarak açıklanabilir. Yapılan metalografik incelemeler ve mikrosertlik ölçümleri çinkonun α -Al matrisi içerisinde tamamen çözüldüğünü ve bu fazın mikrosertliğinin artan çinko oranı ile sürekli arttığını göstermiştir. Bu bulgulara göre söz konusu alaşımlarda artan çinko oranı ile meydana gelen sertlik ve mukavemet artışının katı çözeltiler sertleşmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Ancak çinko oranı arttıkça birincil silisyum parçacıklarının boyut ve oranlarının arttığı ve bunların dendritlerarası bölgelerde bir kümelenme sergiledikleri gözlemlendi. Sert ve gevrek olan bu parçacıklar dendritlerarası bölgeleri gevrekleştirerek veya dendritler arasındaki bağı zayıflatarak alaşımların kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin düşmesine yol açmış olabilirler, Şekil 18.

Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerlerinin artan bakır oranı ile arttığı, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin ise azaldığı belirlendi, Şekil 19. Diğer taraftan bakır oranı arttıkça alaşımların matrisini oluşturan α -fazının mikrosertliğinin arttığı görüldü. Bu bulgular katı çözeltiler sertleşmesi mekanizmasına ve θ fazının oluşumuna dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, EDS analizleri ve metalografik incelemeler bakırın alüminyum-çinko matrisi içerisindeki çözünürlüğünün yaklaşık %2 dolayında olduğunu ve bu değer üzerinde bakır katkılarının bu alaşımların içyapılarında sert ve gevrek θ fazının oluşmasına yol açtığını göstermiştir. Bu bulgulara dayanarak alaşımların sertlik ve mukavemetinde meydana gelen artışın hem katı çözeltiler sertleşmesinden, hem de θ fazına ait parçacıkların dislokasyon hareketlerini engellemesinden kaynaklandığı ifade edilebilir. Alaşımların kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinde artan bakır oranı ile meydana gelen azalma ise sert θ fazına ait parçacıkların buldukları bölgeleri gevrekleştirmesinden kaynaklanmış olabilir.

Çözündürme ve su verme işleminden sonra yaşlandırma işlemine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımasının sertliğinin artan yaşlandırma süresi ile artıp bir tepe noktasından geçtikten sonra azalarak yaklaşık sabit değerlere ulaştığı görüldü, Şekil 3. Bu durum çekirdeklenme ve büyüme mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir. Yaşlandırma

aşamasında bakırca zengin θ fazlarının oluşması nedeniyle meydana gelen bağdaşıklık gerilmeleri α -matrisinin kafes yapısının çarpılmasına dolayısıyla deformasyonuna yol açabilir [34,38,47]. Kafes yapısında meydana gelen çarpılma dislokasyon hareketlerini engelleyerek alaşımın sertliğini artırabilir [34,38,47]. Yaşlandırma devresinden sonra söz konusu geçiş fazlarının karalı θ fazına dönüşmesi nedeniyle bağdaşıklık gerilmelerinin azalması alaşımın sertliğinin düşmesine yol açmış olabilir [52,55].

T7 ısıtma işlemi uygulanmış alaşımın T6 ısıtma işlemi uygulanmış durumuna göre daha düşük sertliğe, ancak daha yüksek akma ve çekme dayanımına sahip olduğu görüldü, Tablo 6. Söz konusu ısıtma işlem sonrasında alaşımın akma ve çekme dayanımında meydana gelen artış, θ fazına ait parçacıkların boyut ve oranının artmasından kaynaklanmış olabilir. Bu parçacıklar deformasyon sırasında dislokasyon hareketlerini engelleyerek alaşımın akma ve çekme dayanımının artmasına yol açmış olabilir.

4.3. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi

SEM ile yapılan incelemelerde çekme deneyine tabi tutulan alaşımlara ait numunelerin kırılma yüzeylerinin kopma veya ayrılma sırtları tarafından çevrilmiş düz alanlardan ve çatlaklardan oluştuğu görüldü, Şekil 21 ve Şekil 22. Çinko ve bakır oranı arttıkça düz alanların nispeten genişlediği gözlemlendi. Diğer taraftan çekme yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde söz konusu alaşımlarda çatlakların dendritlerarası bölgeleri takip ederek ilerlediği belirlendi, Şekil 23 ve Şekil 24. Bu bulgular alaşımların metalografik yapılarına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, yapısal incelemeler ikili ve üçlü alaşımlarda silisyum parçacıklarının, dördü alaşımlarda ise hem silisyum hem de θ fazına ait parçacıkların dendritlerarası bölgelerde toplandıkları gösterdi. Söz konusu sert ve gevrek parçacıklar dendritler arasındaki bağın zayıflamasına, başka bir ifadeyle bu bölgelerin gevrekleşmesine yol açmaktadır [6,11,13,21,30,34]. Çatlak bu parçacıkların α matrisinden ayrılması veya kırılması sonucunda oluşmakta ve dendritlerarası bölgeleri takip ederek ilerlemektedir [38,47,52,55,63]. Sert parçacıkların α matrisinden ayrılması geniş ve düz alanların meydana gelmesine, çatlakların geçtiği nispeten sünek α fazının çekme yönünde uzayarak kopması da ayrılma sırtlarının oluşmasına yol açmış olabilir. Çinko ve bakır oranı arttıkça düz alanların genişlemesi söz konusu alaşımların sertliğinin artmasından bir başka ifadeyle gevrekleşmesinden kaynaklanmış olabilir.

4.4. Sürtünme ve Aşınma DeneYlerinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi

Alaşımaların sürtünme katsayılarının deneylerin başlangıç aşamasındaki hızlı bir artıştan sonra azalarak kararlı durumlarına ulaştığı belirlendi, Şekil 25 ve Şekil 26. Ancak kararlı durumda söz konusu alaşımların sürtünme katsayılarının 0,3 ile 0,5 arasındaki değerlerinde dalgalı bir değişim sergilediği görüldü. Bu bulgular temas yüzeylerinin durumuna ve alaşımların aşınma davranışına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, çalışmanın başlangıç aşamasında yüzeyler arasındaki temas alanının düşük olması nedeniyle meydana gelen yüksek basınçlar numune yüzeyinde aşırı bir plastik deformasyona yol açarak aşınma kaybını artırabilir. Aşınma sonucunda oluşan parçacıklardan bir kısmı önce disk yüzeyine daha sonra geri dönerek numune yüzeyine sıvanmaktadır [6,64,65,68,69]. Deneylerin başlangıç aşamasında yüzeyler arasında meydana gelen bu etkileşim sürtünme katsayısının artmasına yol açmış olabilir. Sürtünme katsayısının belirli kayma mesafelerinden sonra kararlı duruma erişmesi ise temas alanının artan yol ile artması sonucunda numune yüzeyindeki basıncın azalarak sabit değerlere ulaşmasından kaynaklanmış olabilir. Diğer taraftan, kararlı çalışma bölgesinde sıvama tabakasının zaman zaman kırılması sonucunda oluşan aşınma parçacıklarının bu bölgede alaşımların sürtünme katsayılarının dalgalı bir değişim sergilemesine yol açtığı söylenebilir.

Çinko katkısının Al-7Si esaslı alaşımlarının ortalama sürtünme katsayısı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı belirlendi, Şekil 27 ve Şekil 28. Bu durum alaşımlarının yapı ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, çinko oranı arttıkça birincil silisyum parçacıklarının boyut ve oranın arttığı ve bu parçacıkların bazı bölgelerde kümelenedikleri gözlemlendi. Diğer taraftan söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinin ise artan çinko oranı ile arttığı belirlendi. Sert silisyum parçacıkları kayma esnasında harekete karşı bir direnç oluşturarak sürtünme katsayısının artmasına, sertlik ve mukavemette meydana gelen artış ise uygulanan yükün taşınmasını kolaylaştırarak alaşımların bu değerlerinin azalmasına neden olabilir. Bu iki zıt etki birbirlerini belirli bir değerde dengeleyerek söz konusu alaşımların sürtünme katsayılarının artan çinko oranı ile sabit kalmasına yol açmış olabilir.

Al-7Si-4Zn-Cu alaşımlarının sürtünme katsayılarının artan bakır oranı ile azalıp %3 bakır oranında en düşük değerine ulaştıktan sonra arttığı belirlendi, Şekil 28. Alaşımların sürtünme katsayılarında artan bakır oranı ile meydana gelen değişim bunların içyapılarına

dayandırılarak açıklanabilir. Yapısal incelemeler ve EDS analizleri bakırın α -matrisi içerisindeki katı durumdaki çözünürlüğünün %2 dolayında olduğunu, bu değer üzerinde ise bakırca zengin sert ve gevrek θ fazının oluştuğunu göstermiştir. Diğer taraftan bu faza ait parçacıkların boyut ve oranının artan bakır oranı ile arttığı ve bunların alaşımın bazı bölgelerinde toplandıkları görülmüştür. Bakırın α matrisi içerisinde belirli oranlardaki çözünmesi nedeniyle bu fazın sertliğinde meydana gelen artışın alaşımların sürtünme katsayısının belirli bir bakır oranına (%3) kadar azalmasına yol açmış olabilir. Bakır oranının bu değeri aşması durumunda alaşımların sürtünme katsayılarında meydana gelen artış ise θ fazına ait sert ve gevrek parçacıkların düzgün bir dağılım sergilememesinden kaynaklanmış olabilir. Bu bulgulara dayanarak alaşımların matrisini oluşturan α fazının sertlik ve mukavemetinde meydana gelen artışın sürtünme katsayılarının düşmesine, θ parçacıklarının rastgele bir dağılım sergilemesi ise söz konusu değerlerin artmasına yol açtığı söylenebilir. Daha önceden bakır içeren Al-Zn ve Zn-Al esaslı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalarda da benzer bulgular elde edilmiştir [13,34,45,49,51].

Üçlü Al-7Si-(0-5)Zn ve dördü Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alaşımlarının hacim kaybı değerlerinin artan yol ile hemen hemen doğrusal olarak bir artış sergilediği belirlendi, Şekil 29 ve Şekil 30. Aşınma deneyine tabi tutulan üçlü ve dördü alaşımlar içerisinde en düşük hacim kaybı sırasıyla Al-7Si-4Zn ve Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımlarından elde edildi. Bu bulgular alaşımların yapı ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, kuru çalışma durumlarında metallerde meydana gelen hacim kaybı Archard aşınma kanunu olarak bilinen $V = \frac{kWL}{H}$ eşitliği ile belirlenir [16,19]. Bu eşitlikte yer alan V hacim kaybını, W uygulanan yükü, L kayma yolunu, H malzemenin sertliğini ve k aşınma sabitini göstermektedir. Bu eşitliğe göre malzemelerde meydana gelen aşınma kaybı kayma yolu ile doğru, malzemenin sertliği ile ters orantılıdır. Bu çalışmada söz konusu alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının artan kayma yolu ile hemen hemen doğrusal olarak arttığı artan sertlik değerleri ile azaldığı görülmüştür. Ancak çinko ve bakır oranı arttıkça alaşımların sertlik değerlerinin sürekli artmasına rağmen üçlü alaşımlarda %4 Zn, dördü alaşımlarda ise %3 Cu oranlarından sonra hacim kaybının arttığı görüldü. Bu durum söz konusu değerlerden sonra üçlü alaşımlarda birincil silisyum, dördü alaşımlarda ise θ fazına ait parçacıkların boyut ve oranlarının artan çinko ve bakır miktarı ile artmasından ve bunların düzgün bir dağılım sergilememesinden kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki, aşınma numunesi yüzeyinden kopan sert ve gevrek birincil silisyum ve θ fazına ait parçacıklar abrazyon etkisi yaparak alaşımların hacim kaybının artmasına yol açabilir [66,67,70,72].

Bu bulgulara göre %4 ve %3 oranlarına kadar çinko ve bakır içeren sırasıyla üçlü Al-7Si-Zn ve dördümlü Al-7Si-4Zn-Cu alaşımlarının Archard aşınma eşitliğine uygun bir aşınma davranışı sergilediği, bu oranların üzerinde çinko ve bakır içeren alaşımların ise bu değerinin söz konusu eşitlik ile uyumlu olmadığı söylenebilir.

Dökülmüş durumdaki üçlü Al-7Si-4Zn ve dördümlü Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımlarının sürtünme katsayılarının artan yük ile azalarak 5 N'luk yük değerinde en düşük seviyelerine ulaştıktan sonra yavaş bir biçimde arttığı, T6 ve T7 ısıl işlemlerine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının bu değerlerinin ise azaldığı belirlendi, Şekil 33. Bu bulgular söz konusu alaşımların aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının oluşumuna dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, sürtünme deneyine tabi tutulan alaşımların sürtünme yüzeylerinde oluşan sıvama tabakalarının kalınlığının ve bu tabakalarda meydana gelen oksitlenme hızının artan yük ile arttığı gözlemlendi. Bu durumun söz konusu tabakanın gevrekleşmesine ve kritik bir kalınlığa ulaştıktan sonra ise kırılmasına yol açtığı bilinmektedir [23,35,37,63]. Bu gözlemlere göre yük arttıkça alaşımların sürtünme katsayılarında meydana gelen azalmaya bunların yüzeylerinde oluşan kararlı sıvama tabakalarının, belirli bir yük değerinden sonraki artışa ise söz konusu tabakanın kırılması sonucu oluşan aşınma parçacıklarının yol açtığı söylenebilir. Ancak ısıl işlem görmüş durumdaki alaşımların sürtünme katsayılarının artan yük ile sürekli bir azalma sergilemesi bunların sertlik ve mukavemet değerlerinin bu işlemler sonucunda artmasından ve/veya numune yüzeylerinde oluşan sıvama tabakalarının kararlı bir davranış sergilemesinden kaynaklanmış olabilir.

Aşınma deneyine tabi tutulan tüm alaşımların hacim kaybının artan yük ile arttığı belirlendi, Şekil 34. Ancak, T6 ve T7 ısıl işlemleri görmüş durumdaki alaşımlara ait numunelerin belirli bir yük (7,5 N) değerinden sonra dökülmüş durumdaki numunelerinden daha düşük bir hacim kaybına sahip oldukları görüldü. Bu bulgular temas eden yüzeylerinin durumuna ve alaşımların akma ve çekme dayanımlarına dayandırılarak açıklanabilir. Kuru çalışma durumunda alaşımların temas yüzeyleri arasındaki gerçek temas alanı $A = \frac{W}{H}$ eşitliği ile belirlenebilmektedir. Bu eşitlikte yer alan A gerçek temas alanını, W uygulana yükü ve H ise malzemenin sertliğini göstermektedir. Bu eşitliğe göre yük arttıkça temas yüzeyleri arasındaki alan artmaktadır. Bu durum söz konusu alaşımlarda metal-metal temasını artırarak aşınma kaybının artmasına yol açmış olabilir. Isıl işlem görmüş durumdaki alaşımların dökülmüş durumdaki alaşımlara göre daha üstün aşınma direnci sergilemesi bunların sertlik ve mukavemet değerlerinin dökülmüş durumlarındaki değerlerinden daha yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir. Söz konusu değerlerin

artması bu alaşımların plastik deformasyona karşı dirençlerini artırarak gerçek temas alanının azalmasına dolayısıyla aşınma dirençlerinin artmasına neden olabilir. Nitekim bu çalışmada en düşük aşınma direncini sertlik ve mukavemet değerleri en düşük olan dökülmüş durumdaki üçlü Al-7Si-4Zn alaşımının, en yüksek aşınma direncini ise söz konusu değerleri en yüksek olan T6 ısıl işlemi görmüş durumdaki alaşımların sergilediği görülmüştür. Bu bulgular ve yukarıdaki ifadelerle dayanarak alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinin aşınma dirençleri üzerinde etkin rol oynadığı söylenebilir.

Kayma hızı arttıkça dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumdaki alaşımların sürtünme katsayılarının azaldığı görüldü, Şekil 35. Alaşımların sürtünme katsayılarında kayma hızı arttıkça meydana gelen azalma merkez kaç kuvvetlerinin ve sıcaklığın artan kayma hızı ile artmasından kaynaklanmış olabilir [58,73-78]. Merkez kaç kuvvetlerin artması aşınma parçacıklarının yüzeyden savrulmasını, yüzey sıcaklığının artması ise matrisin yumuşamasına yol açarak geriye kalan parçacıkların yüzeye sıvanmasını kolaylaştırabilir. Bu nedenle söz konusu alaşımların sürtünme katsayılarının artan kayma hızı ile azalmasına bu iki etkinin yol açtığı söylenebilir.

Dökülmüş durumdaki üçlü ve dörtlü alaşımların hacim kaybının artan kayma hızı ile azaldığı belirli bir kayma hızı değerinden sonra arttığı belirlendi, Şekil 36. Isıl işlem görmüş durumdaki numunelerin bu değerinin ise artan kayma hızı ile artarak belirli bir kayma hızından sonra azaldığı görüldü. Bu durum söz konusu alaşımların yüzeylerinde oluşan sıvama tabakasına ve oksit filmlerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, hız arttıkça alaşımların temas yüzeylerinde meydana gelen sıcaklık artışı bunların matrisini oluşturan α fazının sertliğinin azalmasına yol açabilir. Matriste meydana gelen yumuşama aşınma parçacıklarının yüzeye sıvanmasını kolaylaştırabilir. Alaşımların yüzeylerinde oluşan kararlı sıvama tabakalarının kaymayı kolaylaştırdığı bilinmektedir [23,35,37,63]. Ancak sıvama tabakasının hem kalınlığının hem de oksitlenme hızının artan sıcaklık ile artması bu tabakanın sertleşmesine bir başka ifadeyle gevrekleşmesine yol açabilir. Bu durum söz konusu tabakanın kolay parçalanmasına yol açarak hacim kaybının artmasına neden olabilir. Bu nedenlerle dökülmüş durumdaki alaşımların hacim kaybının hız arttıkça azalması bunların yüzeylerinde kararlı sıvama tabakalarının oluşmasından, belirli bir hız değerinden sonra artması ise bu tabakanın hem kalınlığının hem de gevrekliğinin artması sonucu parçalanmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ancak ısıl işlem görmüş durumdaki alaşımların hacim kaybının artan kayma hızı ile sürekli bir artış sergilediği belirli bir kayma hızından sonra ise azaldığı görüldü, Şekil 36. Bu durum ısıl işlem sonrasında söz

konusu alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerin artmasından kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki, alaşımların sertlik ve mukavemetinde meydana gelen artışın aşınma kaybını düşürdüğü ancak aşınma sonucu oluşan parçacıkların numune yüzeyine sıvanmasını zorlaştırdığı bilinmektedir [64,65,68,69]. Bu durum söz konusu alaşımlarda aşınma nedeniyle oluşan parçacıkların büyük bir bölümünün merkez kaç kuvvetlerinin etkisiyle numune yüzeyinden uzaklaşması anlamına gelir. Ancak belirli bir hız değerinden sonra numune sıcaklığında meydana gelen artış matrisin yumuşamasına yol açabilir. Bu durum ise aşınma parçacıklarının yüzeye sıvanmasını kolaylaştırarak hacim kaybının azalmasına neden olabilir.

4.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi

SEM ile yapılan incelemeler sonucunda Al-7Si ve Al-7Si-4Zn esaslı alaşımlarına ait numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının, çiziklerin, mikro çatlakların oluştuğu ve soyulmaların meydana geldiği görüldü, Şekil 37-42. Ancak çinko ve bakır katkısının aşınma yüzeylerinin morfolojisi üzerindeki etkisi tam olarak belirlenmedi. Alaşımların yüzeylerinde oluşan sıvama tabakalarının aşınma sonucu oluşan parçacıkların bir bölümünün numune yüzeyine gömülmesi sonucunda oluştuğu, çiziklerin ise silisyum ve θ fazına ait sert ve gevrek parçacıkların abrazyon etkisinden kaynaklandığı bilinmektedir [55,69]. Diğer taraftan sıvama tabakasında meydana gelen mikro çatlakların bu tabakanın kalınlığının artması nedeniyle gevrekleşmesinden, soyulmaların ise çatlakların birleşmesi sonucu söz konusu tabakanın parçalanması ve geniş parçacıklar şeklinde koparak numune yüzeyinden uzaklaşmasından kaynaklandığı söylenebilir [58,73-78].

Yük ve kayma hızı arttıkça alaşımlara ait aşınma numunelerinin yüzeylerinde oluşan sıvama tabakalarının genişlediği, soyulmaların daha belirgin hale geldiği ve çiziklerin nispeten kaybolduğu gözlemlendi. Diğer taraftan yük arttıkça sıvama tabakalarında belirgin parçalanmaların veya kırılmaların meydana geldiği görüldü, Şekil 44-55. Bu bulgular sürtünme nedeniyle numune yüzeyinde oluşan ısıya dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, hız ve yük arttıkça temas yüzeyleri arasındaki sürtünme ısı artmakta ve buna bağlı olarak numune sıcaklığı yükselmektedir [64,66,69,70,72]. Sıcaklıkta meydana gelen artış numunenin yumuşamasına diğer bir ifadeye sertliğinin düşmesine neden olabilir. Bu durum aşınma parçacıkların yüzeye sıvanmasını kolaylaştırarak geniş bir tabakanın

oluşmasına yol açabilir. Ancak sıvama tabakasında meydana gelen oksitlenme hızının artan sıcaklık ile arttığı bilinmektedir [64,66,69,70,72]. Nitekim yapılan EDS analizleri sıvama tabakalarındaki oksijen miktarının artan yük ve kayma hızı ile arttığını göstermiştir. Bu durum sıvama tabakasının sertliğinin artmasına bir başka ifadeyle gevrekleşmesi yol açarak çatlmasına neden olabilir. Çatlakların birleşmesi sonucu sıvama tabakasından kopan parçacıkların numune yüzeyinden uzaklaşması soyulmaların meydana gelmesine yol açmış olabilir. Aşınma yüzeylerinde oluşan çiziklerin artan yük ve kayma hızı ile azalması veya kaybolması ise geniş sıvama tabakalarının bu çizikleri örtmesinden kaynaklanmış olabilir.

4.6. Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi

Aşınma deneyleri sonucunda numune yüzeyinden toplanan aşınma parçacıklarının irili ufaklı parçacıklardan oluştuğu gözlemlendi, Şekil 56-59. Kimyasal bileşimin ve uygulanan ısı işlemlerin bu parçacıkların morfolojisi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı görüldü. Ancak, kayma mesafesi, yük ve kayma hızı arttıkça toz biçimindeki parçacıkların oranının arttığı, iri biçimdeki parçacıkların oranının ise azaldığı ve boyutlarının arttığı gözlemlendi. Bu bulgular alaşımların aşınma davranışlarına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, çalışmanın başlangıç aşamasında temas yüzeylerinin geometrisi nedeniyle numune yüzeyinde oluşan yüksek basınçlar yüzeylerin birbirine yapışmasına yol açmaktadır [69,70,76-80]. Harekete başladıktan sonra kesme kuvveti etkisiyle yapışan yüzeylerde kırılmalar meydana gelmekte ve bunun sonucunda aşınma parçacıkları oluşmaktadır. Bu parçacıklar kayma sırasında önce bilye yüzeyine daha sonra geri dönerek numune yüzeyine sıvanmaktadır. Bu durum söz konusu numunelerin yüzeyinde bir sıvama tabakasının oluşumuna yol açmaktadır [68,74-76]. Diğer taraftan yol, yük ve kayma hızı arttıkça temas yüzeyleri arasındaki sürtünme ısısında meydana gelen artış, sıvama tabakasının oksitlenme hızını artırarak gevrekleşmesine neden olmaktadır [64,66,69,70,72]. Gevrekliği artan sıvama tabakası kritik bir kalınlığa ulaştığında kırılarak iri biçimdeki aşınma parçacıklarının oluşumuna yol açmaktadır. Söz konusu parçacıkların bir kısmı merkezkaç kuvvetinin etkisiyle aşınma yolu üzerinden uzaklaşmakta, bir kısmı ise temas yüzeyleri arasında yuvarlanırken kırılarak daha ince parçalara ayrılmaktadır [64-66,69,70,72]. Nitekim EDS analizleri aşınma parçacıklarının kimyasal bileşimlerinin sıvama tabakasının

bu değerine çok yakın olduğunu, ancak içerdikleri oksijen miktarının artan yol, yk ve kayma hızı ile bir artış sergilediğini göstermiştir. Bu bulgulardan yola çıkarak iri biçimdeki parçacıkların sıvama tabakasının parçalanması sonucu yüzeyden uzaklaşan parçacıklar olduğu, ince toz biçimindeki parçacıkların ise yüzeyler arasında kalanların parçalanması sonucunda oluştuğu söylenbilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada çinko oranının ikili Al-7Si esaslı, bakır oranının ise üçlü Al-7Si-4Zn esaslı alaşımlarının yapı, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisi sistematik bir biçimde incelenerek değerlendirildi. Bu inceleme ve değerlendirmelerden elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. İkili Al-7Si alaşımının içyapısı α -Al dendritleri ile ötektik ve az sayıda birincil silisyum parçacıklarından oluşmaktadır. Çinko katkısı bu alaşımlarda alüminyumca zengin α katı çözeltisi oluşturmakta ve birincil silisyum parçacıklarının boyut ve oranını artmaktadır.
2. %2'den daha yüksek oranda bakır içeren dördü Al-7Si-4Zn-Cu alaşımlarının içyapısında bunlar için baz alınan üçlü Al-7Si-4Zn alaşımının içyapısını oluşturan fazlardan farklı olarak θ fazı yer almaktadır.
3. T6 ve T7 ısıl işlemleri Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının dendritik yapısını ortadan kaldırmakta ancak bu ısıl işlemler silisyum parçacıkları üzerinde etkili olmamaktadır.
4. Al-7Si ve Al-7Si-4Zn esaslı alaşımların sertlik, akma, çekme ve basma dayanımları artan çinko ve bakır oranlarıyla artırmakta, ancak darbe direnci ve kopma uzaması değerleri düşmektedir. Diğer taraftan alaşımların matrisini oluşturan α fazının mikrosertliği artan çinko ve bakır oranları ile sürekli bir artış sergilemektedir.
5. T6 ve T7 ısıl işlemleri Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının akma ve çekme dayanımını artırıp, kopma uzaması değerlerini az da olsa düşürmektedir.
6. Üretilen tüm alaşımlar gevrek bir kırılma davranışı sergilemektedir. Söz konusu alaşımlarda kırılma silisyum ve θ fazına ait sert ve gevrek parçacıkların yoğun olarak yer aldığı dendritlerarası bölgelerde meydana gelmektedir.
7. Alaşımların sürtünme katsayıları çalışmanın başlangıç aşmasında hızlı bir biçimde artıktan sonra azalarak karalı durumlarına ulaşmaktadır.
8. Alaşımlarda aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kaybı artan kayma yolu ile hemen hemen doğrusal olarak artmaktadır. Bu bulgulara dayanarak alaşımların Archard aşınma kanuna uygun bir aşınma davranışı sergilediği söylenebilir.

9. Çinko oranı ikili Al-7Si esaslı alaşımların sürtünme katsayısını pek fazla değiştirmemektedir. Ancak bu alaşımların hacim kaybı artan çinko oranı ile azalmakta, %4 Zn oranından sonra artan çinko oranı ile bir artış sergilemektedir. Diğer taraftan bakır oranı arttıkça Al-7Si-4Zn esaslı alaşımların sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerleri azalarak %3 bakır oranında en düşük değerlerine ulaşıldıktan sonra artmaktadır.
10. Alaşımlarda aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kaybının belirli çinko (%4) ve bakır (%3) oranlarına kadar artan sertlik ve mukavemet değerleriyle azalmaktadır. Ancak bu oranların üzerinde çinko ve bakır içeren alaşımların içyapısında bulunan sert ve gevrek silisyum parçacıkları bu değerlerin artmasına yol açmaktadır.
11. Dökülmüş durumdaki üçlü Al-7Si-4Zn ve dördümlü Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımlarının sürtünme katsayılarının artan yük ile azalıp belirli bir yük (5 N) değerinden sonra artmaktadır. T6 ve T7 ısıl işlemleri görmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-Cu alaşımlarının bu değerinin ise artan yük ile azalmaktadır. Diğer taraftan yük arttıkça gerek dökülmüş gerekse ısıl işlem görmüş durumdaki alaşımların hacim kaybı artmaktadır.
12. Kayma hızı arttıkça dökülmüş, T6 ve T7 ısıl işlemleri görmüş durumdaki alaşımlarının sürtünme katsayısı azalmaktadır. Diğer taraftan alaşımların dökülmüş durumdaki hacim kaybı belirli bir hız değerine kadar artan kayma hızı ile azaldıktan sonra artmaktadır. Ancak T6 ve T7 ısıl işlemleri görmüş alaşımın bu değeri dökülmüş durumuna göre ters bir değişim sergilemektedir.
13. Aşınma deneyleri sonucunda alaşımların aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının yanı sıra mikroçatlaklar, ince çizikler ve oksitlenmeler oluşmakta, soyulmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle adezyonun yanı sıra, abrazyon, oksitlenme ve soyulmanında alaşımlar için etkin aşınma mekanizması olduğu söylenebilir.
14. Aşınma deneyleri sonunda irili ufaklı toz ile talaş biçiminde aşınma parçacıkları oluşmaktadır. İnce toz biçimindeki aşınma parçacıklarının oranı artan yol, yük ve kayma hızı ile artmakta, talaş biçimindekilerin bu değeri azalmakta ancak boyutları artmaktadır.

6. ÖNERİLER

1. Üretilen alaşımların yağlı durumdaki sürtünme ve aşınma davranışları incelenebilir.
2. Aşınma numunelerine ait yüzeyaltı incelemeleri yapılarak aşınma mekanizmaları ayrıntılı bir şekilde incelenebilir.
3. Üretilen alaşımlara farklı ısıl işlemler uygulanarak alaşımların yapı ve mekanik özellikleri ayrıntılı bir şekilde belirlenebilir.
4. Alaşımların yorulma davranışları incelenerek farklı uygulamalara yönelik tasarım bilgileri elde edilebilir.
5. X ışınları difraksiyonu yöntemiyle ısıl işlem görmüş olan alaşımların iç yapıları ayrıntılı bir biçimde incelenebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Yavuz, N., investigation into The Effects Of Silisium in Aluminium Alloys Onto The Mechanical Properties Of Welding Joint, Journal of Engineering Sciences, 3 (1997) 441-445.
2. Ye, H., An Overview of the Development of Al-Si Alloy Based Material for Engine Application, Journal of Materials Engineering and Performance, 12 (2003) 288-297.
3. Hegde, S. ve Prabhu, K.N., Modification of Eutectic Silicon in Al-Si Alloys, Journal of Material Science, 43 (2008) 3009-3027.
4. Nikanorov, S.P., Volkov, M.P., Gurin, V.N., Burenkov, Y.A., Derkachenko, L.I., KARDASHEV, B.K., Regel, L.L. ve Wilcox, W.R., Structural and Mechanical Properties of Al-Si Alloys Obtained by Fast Cooling of a Levitated Melt, Materials Science And Engineering A, 390 (2005) 63-69.
5. El-Salam, F.A., El-Khalek, A.M.A., Nada, R.H., Wahap, L.A. ve Zahran, H.Y., Effect of Sn Content on the Structural and Mechanical Properties of Al-Si Alloy, Material Science and Engineering A, 527 (2010) 1223-1299.
6. Alemdağ Y. ve Beder M., Microstructural, mechanical and tribological properties of Al-7Si-(0-5)Zn. Mater Design, 63 (2014) 159-167.
7. Gupta M. ve Ling S., Microstructure and mechanical properties of hypo/hyper-eutectic Al-Si alloys synthesized using a near-net shape forming technique, J. Alloys Comp, 287 (1999) 284-294.
8. Birol, Y., Semisolid Processing of Near-Eutectic and Hypereutectic Al-Si-Cu Alloys, Journal of Material Science, 43 (2008) 3577-3581.
9. Cui, C., Schulz, A., Schulz, E.M. ve Zoch, H.W., Characterization of Silicon in Sprey-Formed and Extruded Hypereutectic Al-Si Alloys by Image Analysis, Journal of Material Science, 44 (2009) 4814-4826.
10. Prasad, B.K., Effects of Silicon Addition and Test Parameters on Sliding Wear Characteristics of Zinc-Based Alloy Containing 37.5% Aluminium, Materials Transaction, JIM 38 (1997) 701-706.
11. 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.

12. Savaşkan, T. ve Aydınler, A., Effect of Silicon Content on the Mechanical and Tribological Properties Monotectoid-Based Zinc Aluminium-Silicon Alloys, Wear, 257 (2004) 377-388.
13. 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.
14. Torabian, H., Pathak, J.P. ve Tiwari, S.N., Wear Characteristics of Al-Si Alloys, Wear 172 (1994) 49-58.
15. Prasad, S.V. ve Rohatgi, P.K., Tribological Properties of Al Alloy Particle Composites, Journal of Metals, 39 (1987) 22-26.
16. Dwivedi D.K., Adhesive wear behaviour of cast aluminium-silicon alloys: Overview, Materials and Design, 31 (2010) 2517-2531.
17. Yasmin, T., Khalid, A.A., Haque, M.M., Tribological (wear) Properties of Aluminium-Silicon Eutectic Base Alloy Under Dry Sliding Condition, Journal of Materials Processing Technology, 153-154 (2004) 833-838.
18. Prasad, B.K., Venkateswarlu, K., Modi, O.P., Jha, A.K., Das, S., Dasgupta, R. ve Yegneswaran, A.H., Sliding Wear Behavior of Some Al-Si Alloys: Role of Shape and Size of Si Particles and Test Conditions, Metallurgical and Materials Transactions A, 29A (1998) 2747-2752.
19. Sarkar A.D. ve Clarke J., Friction and wear of aluminium-silicon alloys, Wear, 61 (1980) 157-167.
20. Sarkar, A.D., Wear of aluminium-silicon alloys, Wear, 31 (1975) 331-343.
21. Basavakumar, K.G., Mukunda, P.G. ve Chakraborty, M., Influence of Melt Treatments on Sliding Wear Behavior of Al-7Si and Al-7Si-2.5 Cu cast Alloys, Journal of Material Science, 42 (2008) 7882-7893.
22. Anasyida, A.S., Daud, A.R. ve Ghazali, M.J., Dry Sliding Wear Behaviour of Al-4Si-4Mg Alloys by Addition of Cerium, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 4 (2009) 127-130.
23. Xu, C.L., Yang, Y.F., Wang, H.Y. ve Jiang, Q.C., Effects of Modification and Heat-Treatment on the Abrasive Wear Behavior of Hypereutectic Al-Si Alloys, Journal of Material Science, 42 (2007) 6331-6338.
24. Mohamed, A.M.A., Samuel A.M., Samuel, F.H. ve Doty, H.W., Influence of Additives on the Microstructure and Tensile Properties of Near -Eutectic Al-10.8%Si Alloy, Materials and Design, 30 (2009) 3943-3957.

25. Nogita, K., Yasuda, H., Yoshiya, M., McDonald, S.D., Uesugi, K., Takeuchi, A. ve Suzuki, Y., The role of Trace Element Segregation in The Eutectic Modification of Hypoeutectic Al-Si Alloys, Journal of Alloys and Compounds, 489 (2010) 415-420.
26. Kori S., Murty B. ve Chakraborty M., Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium. Mater Sci Eng A, 283 (2000) 94-104.
27. N.R.Rathod ve J.V. Manghani, Effect of Modifier and Grain Refiner on Cast Al-7Si Aluminum Alloy, journal of emerging trends in engineering, 5 (2012) 574-582.
28. Cho, S.J., Hockey, B.J. ve Lawn, B.R., S. J. Bennison, Grain-size and R-curve Effects in the Abrasive Wear of Alumina, Communication of The American Ceramic Society, 72 (1989) 1249-1252.
29. Fatahalla, N. ve Hafız, M., Effect of microstructure on the mechanical properties and fracture of commercial hypoeutectic Al-Si alloy modified with Na, Sb and Sr, Journal of Materials Science, 34 (1999) 3555-3564.
30. Mohamed, A.M.A., Samuel, F.H., Samuel, A.M., Doty, H.W. ve Valtierra, S., Influence of Tin Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Cu-Mg and Al-Si-Mg Casting Alloys, Metallurgical and Materials Transactions, 39 (2008) 490-501.
31. Raghavan, V., Al-Si-Zn (Aluminium-Silicon-Zinc), Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 28 (2007) 197.
32. Tiryakioğlu M., Si particle size and aspect ratio distribution in an Al-7%Si-0.6%Mg alloy during solution treatment, Mater Sci Eng A, 473 (2008) 1-6.
33. 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.
34. Tanski, T., Dobrzanski, L.A. ve Maniara, R., Microstructures of Mg-Al-Zn and Al-Si-Cu Cast Alloys, Journal of Achievements in Materials And Manufacturing Engineering, 38 (2010) 64-71.
35. Zedan, Y., Samuel, F.H., Samuel, A.M. ve Doty H.W., Effect of Fe Intermetallics on the Machinability of Heat-Treated Al-(7-11)%Si Alloys, Journal of Materials Processing Technology, 210 (2010) 245-257.
36. Chen, C.L. ve Thomson, R.C., The Combined Use EBSD and EDX Analyses for the Identification of Complex Intermetallic Phases in Multicomponent Al-Si Piston Alloys, Journal of Alloys and Compounds, 490 (2010) 293-300.
37. Eshaghi, A., Ghasemi, H.M. ve Rassizadehghani, J., Effect of heat treatment on microstructure and wear behavior of Al-Si alloys with various iron contents, Materials and Design, 32 (2011) 1520-1525.

38. 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.
39. Bruni, L. ve Iguera, P., Silgraf-A New Silicon-Graphite-Aluminium Alloy For Cylinder Liners, Automotive Engineering, 31 (1987) 29-36.
40. Hatch, J.E., Properties ve Physical Metallurgy, ASM International, 1st Ed.(1984) 25-57.
41. Savaşkan, T., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Altıncı Baskı, Trabzon, 2012
42. Haaling, j., Principles of Tribology, Macmillan, Birinci Baskı, 1975.
43. cumalifaydali.blogspot.com.tr/Alüminyum ve Alaşımları. 3 Aralık 2008.
44. Massalski, T.B, Okamoto, H., Subramanian ve P.R., Kacprzak, L., Binary Alloy Phase Diagram, ASM International, Materials Park, Oh, 1990.
45. Savaşkan, T. ve Murphy S., Zn-Al Esaslı Yatak Alaşımlarındaki Faz Dönüşümleri, 4. Ulusal Metalurji Kongresi, Ankara, Ekim 1986, Bildiriler Kitabı, 532-555.
46. Pürçek G., Savaşkan T., Küçükömeroğlu T. ve Murphy S., Dry sliding friction and wear properties of zinc-based alloys, Wear, 252 (2002) 894-901.
47. Alemdağ, Y. ve Savaşkan, T., Mechanical and Tribological Properties of Al-40Zn-Cu Alloys, Tribology International, 41 (2009) 176-182.
48. 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.
49. Zhu, Y.H., Savaşkan, T. ve Murphy, S., Phase Transformations in Quench-Aged Zn-Al-Si Alloys, Mat. Res. Soc. Proc., 21 (1984) 835-840.
50. 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.
51. Zhu, Y.H. ve Goodwin, F.E., Microstructures of Thermomechanically Treated Eutectoid Zn-Al Alloy, J. Material. Sci. Technol., 10 (1994).
52. Bican. O., Silisyum Oranının Monotektoid Esaslı Zn-Al-Cu-Si Alaşımlarının Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004.

53. Pürçek, G., Küçükömeroğlu, T. ve Savaşkan, T., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan İmal Edilen Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Mühendis ve Makina, 37 (1996) 35-41.
54. Torabian, H., Patak J.P. ve Tiwari S.N., Wear characteristics of Al-Si alloys, Wear, 172 (1994) 49-58.
55. Tavitias-Medrano, F.J., Mohamed, A.M.A., Gruzleski, J.E., Samuel, J.E. ve Doty, H.W., Precipitation-Hardening in Cast Al-Si-Cu-Mg Alloys, Journal of Material Science, 45 (2010) 641-651.
56. Zhang LY., Jiang YH., Ma Z., Shan SF., Jia YZ., Fan CZ. ve Wang WK., Effect of cooling rate on solidification microstructure and mechanical properties of aluminium-A356 alloy, J. Mater Process Technol., 207 (2008) 107-111.
57. Jimenez, A.E., Morina, A., Neville, A. ve Bermudez, M.D., Surface Interaction and Thribochemistry in Boundry Lubrication of Hypereutectic Aluminium-Silicon Alloys, Journal of Engineering Tribology, (2009) 593-601.
58. Baker, I, Sun, Y., Kennedy, F.E. ve Munroe, P.R., Dry Sliding Wear of Eutectic Al-Si, journal of material Science, 45 (2010) 969-978.
59. Dwivedi, D.K., Arjun, T.S., Thakur. P., Vaidya, H. ve Singh, K., Sliding Wear and Friction Behaviour of Al-18%Si-0.5%Mg Alloy, Journal Materials Processing Technology, (2004) 1-6.
60. Wang, Q.,G., Apelian, D. ve Lados, D.A., Fatigue behavior of A356-T6 aluminum cast alloys part I effect of casting defect, Journal of light metals, 1 (2001) 73-84.
61. Wang, Q.,G., Apelian, D. ve Lados, D.A., Fatigue behavior of A356/357 aluminum cast alloys part II effect of microstructural constituents, Journal of light metals, 1 (2001) 85-97.
62. Nicoletto, G., Riva, E. ve Di Filippo, A., High temperature fatigue behavior of eutectic Al-Si alloys used for piston production, Procedia Engineering, 74 (2014) 157-160.
63. Sjölander, E. Ve Seifeddine, S., The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys, Journal of Materials Processing Tech., 210 (2010) 1249-1259.
64. 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.
65. Clarke, J. ve Sarkar, A.D., Wear Characteristics of As-cast Binary Aluminium-Silicon Alloys, Wear, 54 (1979) 7-16.
66. Pramila Bai, B.N. ve Biswas, S.K., Mechanism Of Wear in Dry Sliding Of a Hypoeutectic Aluminium Alloy, Lubrication Engineering, 43 (1987) 57-61.

67. B.K. Prasad, K. Venkateswarlu, O.P. Modi, A.K Jha, S. Das, R.Dasgupta ve A.H. Yegneswaran, Sliding Wear Behavior of Some Al-Si Alloys, Metallurgical and Materials Transactions A, 29 (1998) 2747-2752.
68. S.K. Dey, Perry, T.A. ve Alpas A.T., Micromechanisms of low load wear in an Al-18.5% Si alloy, Wear, 267 (2009) 515-524.
69. Farkašová, M., Tillová, E. ve Chalupová, M., Modification of Al-Si-Cu cast alloy, FME Transactions, 41 (2013) 210-215.
70. Torabian H, Patak J.P. ve Tiwari S.N., Effect of hardness on wear rates of Al-Si alloys, Journal of Materials Science Letters, 14 (1995) 1631-1632.
71. Chiou, Y.C., Kato, K. ve Kayaba, T., Effect of Normal Stiffness in Loading System on Wear of Carbon Steel, Journal of Tribology, 107 (1985) 491-495.
72. Li XY., Tandon KN., Mechanical mixing induced by sliding wear of an Al-Si alloy against M2 steel, Wear, 225-229 (1999) 640-648.
73. Li XY., Tandon KN., Microstructural characterization of mechanically mixed layer and wear debris in sliding wear of an Al alloy and an Al based composite, Wear, 245 (2000) 148-161.
74. Biswas SK., Some mechanisms of tribofilm formation in metal/metal and ceramic/metal sliding interactions, Wear, 245 (2000) 178-189.
75. Mahato A., Perry, T.A., Jayaram V. ve Biswas S.K., Pressure and thermally induced stages of wear in dry sliding of a steel ball against an aluminium-silicon alloy flat, Wear, 268 (2010) 1080-1090.
76. Wilson, S. ve Alpas, A. T., Thermal effect on mild wear transitions in dry sliding of an aluminum alloy, Wear, 225-229 (1999) 440-449.
77. Chen, M., Perry, T. ve Alpas, A. T., Ultra-mild wear in eutectic Al-Si alloys, Wear, 263 (2007) 552-561.
78. Chen, M. ve Alpas, A. T., Ultra-mild wear of a hypereutectic Al-18.5Si alloy, Wear, 265 (2008) 186-195.
79. Bhattacharya, S., Riahi, A. R. ve Alpas, A. T., Indentation-induced subsurface damage in silicon particles of Al-Si alloys, Mater Sci Eng A, 527 (2009) 387-396.
80. Gahr, K.H.Z., Microstructure and wear of materials, Elsevier Science Publishers, New York, 1987.

ÖZGEÇMİŞ

Murat BEDER 1986 yılında Trabzon'da doğdu. 2004 yılında Trabzon Lisesi'ni bitirdi. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Makine Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve özel sektörde çeşitli kurumlarda çalışmalarına devam etti. Nisan 2013'de Gümüşhane Üniversitesi tarafından Makine Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atanmış olup, orta derecede İngilizce bilmektedir.