

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SİLİSYUM KATKISININ MONOTEKTOİD ÇİNKO-ALÜMİNYUM
ALAŞIMLARININ TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ

Fizikçi Alev AYDINER

727484

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nce
“Yüksek Lisans (Makina Mühendisliği)”
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

127484

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29.04.2002

Tezin Savunma Tarihi : 30.05.2002

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ahmet DURMUŞ

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Asım KADIOĞLU

T. Savaşkan
F. Arslan
A. Durmuş
A. Kadioğlu

Trabzon 2002

ÖNSÖZ

Çinko esaslı alaşımlar döküme elverişli, ekonomik, özgül mukavemetinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek ve üstün aşınma direncine sahip olması nedeniyle günümüzde pek çok alanda Al alaşımları, dökme demir, pirinç ve bronz gibi geleneksel yatak alaşımlarının yerini almaktadır.

Bu çalışmada, ikili Zn-Al ve üçlü Zn-Al-Si alaşımları üretilerek bunların yapı ve tribolojik özellikleri incelendi. Yapılan deneyler sonucunda silisyum katkısının çinko-alüminyum alaşımlarının tribolojik özelliklerini büyük ölçüde iyileştirdiği ve en uygun silisyum oranının da %2 olduğu belirlendi.

Tez danışmanlığımı üstlenerek gerek konu seçimi gerekse çalışmaların yönlendirilmesindeki yardımlarından dolayı hocam Sayın Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca yardımlarından dolayı Dr. Gençğa PÜRÇEK başta olmak üzere, Dr. Murat AYDIN, Dr. Şebnem TURHAL ile Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Talaşlı İmalat Laboratuvarlarında görev yapan teknisyenlere teşekkür ederim. Aynı zamanda, çalışmalarım süresince gösterdiği sabır ve desteğinden dolayı eşim Yrd. Doç. Dr. Kerim AYDINER'e teşekkür ederim.

Alev AYDINER

Nisan 2002

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLolar DİZİNİ	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Faz Diyagramı.....	3
1.3. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri	6
1.3.1. Fiziksel Özellikler	6
1.3.2. Mekanik Özellikler.....	6
1.3.3. Tribolojik Özellikler.....	10
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	11
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	13
2.1. Alaşımların Üretimi ve Isıl İşlemi.....	13
2.2. Yoğunluk ve İç Yapı İncelemeleri	13
2.3. Sertlik ve Çekme Deneyleri	14
2.4. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri	14
3. BULGULAR	20
3.1. Kimyasal Analiz Sonuçları.....	20
3.2. Alaşımların İç Yapısı	20
3.3. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular	26
3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular.....	30
3.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular.....	36
4. İRDELEME.....	44
5. SONUÇLAR	48
6. ÖNERİLER	49
7. KAYNAKLAR.....	50
ÖZGEÇMİŞ	56

ÖZET

Bu çalışmada bir adet ikili Zn-Al ve sekiz adet üçlü Zn-Al-Si alaşımı kokil döküm yöntemiyle üretildi. Söz konusu alaşımların dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki sürtünme ve aşınma özellikleri blok-disk esaslı bir deney düzeneği yardımıyla incelenerek bu özelliklerin iç yapı ve mekanik özelliklerle ilişkileri araştırıldı.

Çinko-alüminyum-silisyum alaşımlarının iç yapısının alüminyumca zengin α , bunları çevreleyen çinkoca zengin η ve silisyum fazlarından oluştuğu gözlemlendi. Silisyum fazının büyüklük ve dağılımının silisyum oranına bağlı olduğu belirlendi. Uygulanan ısıl işlem sonucunda alaşımların dendritik yapısının ortadan kalkarak bunun yerini ince taneli bir yapının aldığı, ancak silisyum parçacıklarında herhangi bir değişimin meydana gelmediği görüldü.

Üçlü Zn-Al-Si alaşımlarının sertlik ve çekme dayanımının yaklaşık %2 oranına kadar artan silisyum oranı ile arttığı, bu oranın üzerinde ise artan silisyum oranı ile azaldığı görüldü. Söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı ve aşınma hızının da yaklaşık %2 silisyum oranına kadar artan silisyum oranı ile azaldığı, bu oranın üzerinde ise artan silisyum oranı ile arttığı belirlendi. Üretilen alaşımlar içerisinde en üstün mekanik ve tribolojik özellikler Zn-40Al-2Si alaşımından elde edildi.

Bu çalışmada elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonucunda, silisyum katkısının çinko esaslı alaşımların hem mekanik hem de tribolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği görüldü. Ayrıca, çinko esaslı alaşımların aşınma davranışının sertlik, çekme dayanımı ve sürtünme katsayısına bağlı olduğu belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Çinko-Alüminyum Alaşımları, Silisyumun Etkisi, Sürtünme ve Aşınma.

SUMMARY

An Investigation of the Effect of Silicon Additions on the Tribological Properties of Monotectoid Zinc-Aluminium Alloys

In this work, one binary zinc-aluminium and eight ternary zinc-aluminium-silicon alloys were produced by permanent mould casting. The friction and wear properties of the alloys were investigated in both as-cast and heat-treated conditions using a block-on-disc machine and related to their microstructure and mechanical properties.

It was observed that the microstructure of the zinc-aluminium-silicon alloys alloy was consisted of aluminum-rich α , zinc-rich η and silicon phases. The size and distribution of silicon phase in these alloys was found to be depend on their silicon content. The heat treatment removed the dendritic microstructure of the alloys and produced a fine-grained microstructure but had no considerable effect on the silicon particles.

The hardness and the tensile strength of the alloys increased with increasing silicon content up to 2%Si, above which it decreased as the silicon content increased. It was also found that the coefficient of friction and the wear rate of the alloys decreased with increasing silicon content up to 2%Si, above which they increased as the silicon content increased. Among the experimental alloys, the best mechanical and wear behaviour was obtained with the Zn-40Al-2Si alloy.

Silicon addition was found to be the very effective in improving mechanical and wear properties of zinc-based alloys. This work also showed that the wear behaviour of zinc based alloys is strongly depend on their hardness, tensile strength and coefficient of friction.

Key Words: Zinc-Aluminium Alloys, Effect of Silicon, Friction and Wear

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı [31].....	4
Şekil 2. Çubuk-disk esaslı aşınma deney düzeneğinin şematik resmi	15
Şekil 3. Çubuk-disk esaslı aşınma deney düzeneğinin genel görünümü	17
Şekil 4. Çubuk-disk esaslı aşınma deney düzeneğinde örnek, disk ve yük hücresinin yakından görünümü	17
Şekil 5. Aşınma ve sürtünme deneylerinde kullanılan örneğin teknik resmi	18
Şekil 6. Sürtünme kuvveti ölçümünde kullanılan yük hücresi için kalibrasyon doğrusu	18
Şekil 7. Zn-40Al alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı	21
Şekil 8. Zn-40Al-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	21
Şekil 9. Zn-40Al-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	22
Şekil 10. Zn-40Al-3Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	22
Şekil 11. Zn-40Al-4Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı.....	23
Şekil 12. Zn-40Al alaşımının ısıtıl işlem görmüş durumdaki iç yapısı.....	24
Şekil 13. Zn-40Al-1Si alaşımının ısıtıl işlem görmüş durumdaki iç yapısı	24
Şekil 14. Zn-40Al-2Si alaşımının ısıtıl işlem görmüş durumdaki iç yapısı	25
Şekil 15. Zn-40Al-3Si alaşımının ısıtıl işlem görmüş durumdaki iç yapısı	25
Şekil 16. Zn-40Al-4Si alaşımının ısıtıl işlem görmüş durumdaki iç yapısı	26
Şekil 17. Dökülmüş durumdaki alaşımların fiziksel ve mekanik özelliklerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler	28
Şekil 18. Isıtıl işlem görmüş durumdaki alaşımların fiziksel ve mekanik özelliklerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	29
Şekil 19. Dökülmüş durumdaki alaşımların sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler	31
Şekil 20. Isıtıl işlem görmüş durumdaki alaşımların sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler	32
Şekil 21. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	33

Şekil 22. Isıl işlem görmüş durumdaki Zn-40Al alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler	33
Şekil 23. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Si alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler	34
Şekil 24. Isıl işlem görmüş durumdaki Zn-40Al-2Si alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler	34
Şekil 25. Dökülmüş durumdaki alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler	37
Şekil 26. Isıl işlem görmüş durumdaki alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler	38
Şekil 27. Dökülmüş durumdaki alaşımların çekme dayanımı, sertlik, kararlı durumdaki sürtünme katsayısı ve bu alaşımlarda aşınma sonucu meydana gelen hacim kaybı değerlerinin silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	39
Şekil 28. Isıl işlem görmüş durumdaki alaşımların çekme dayanımı, sertlik, kararlı durumdaki sürtünme katsayısı ve bu alaşımlarda aşınma sonucu meydana gelen hacim kaybı değerlerinin silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler	40
Şekil 29. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	41
Şekil 30. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	41
Şekil 31. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-4Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	42
Şekil 32. Isıl işlem görmüş durumdaki Zn-40Al alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	42
Şekil 33. Isıl işlem görmüş durumdaki Zn-40Al-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	43
Şekil 34. Isıl işlem görmüş durumdaki Zn-40Al-4Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	43

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Zn-Al alaşımlarının kimyasal bileşimi (% Ağırlık) [5]	1
Tablo 2. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [15, 33]	4
Tablo 3. Çinko esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri [2, 9, 22].....	8
Tablo 4. Çinko esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının mekanik özellikleri [2, 9, 22].....	9
Tablo 5. Alaşımların kimyasal bileşimleri	20
Tablo 6. Alaşımların fiziksel ve mekanik özellikleri	27
Tablo 7. Alaşımların aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar	35

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Çinko esaslı alaşımlar uzun yıllardır beyaz metal (babbit), bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerine kullanılmaktadır [1-4]. Bu alaşımlar iki gruba ayrılmaktadır [5]. Birinci grupta No:2, No:3, No:5 ve No:7 olarak adlandırılan alaşımlar yer almaktadır. Bu alaşımlar ZAMAK alaşımları olarak adlandırılmakta ve %4 alüminyum ile az miktarda magnezyum içermektedirler (Tablo 1). Magnezyum alaşımların mukavemet, sertlik ve korozyon direncini artırır. Ayrıca, No:2 ve No:5 alaşımları da bakır içermektedir. Bakır katkısı bu alaşımların mukavemet ve aşınma direncini artırmakta, ancak %1 oranından daha fazla olması durumunda boyutsal kararsızlığa yol açmaktadır [6-9]. Bu alaşımlar üstün fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması, değişik döküm yöntemleriyle kolayca üretilebilmesi ve ekonomik olması nedenleriyle Kuzey Amerika'da yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Bunlardan bakır içeren ve nispeten pahalı olan No:2 ve No:5 alaşımları ise, daha yüksek mukavemet ve direnç gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir [5].

Tablo 1. Zn-Al alaşımlarının kimyasal bileşimi (% Ağırlık) [5].

Grup no	Alaşım	Bileşim oranı (% Ağırlık)				
		Al	Mg	Cu	Ni	Zn
I	No:2	4	0,035	3	-	Kalan
I	No:3	4	0,035	-	-	"
I	No:5	4	0,055	1	-	"
I	No:7	4	0,013	-	0,013	"
II	ZA-8	8,0-8,8	0,015-0,030	0,80-1,30	-	"
II	ZA-12	10,5-11,5	0,015-0,030	0,50-1,25	-	"
II	ZA-27	25,0-28,0	0,010-0,020	2,00-2,50	-	"

İkinci grup ise ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 alaşımlarından oluşmaktadır. Bu alaşımlar 1960'lı yıllarda ILZRO (International Lead-Zinc Research Organization) tarafından geliştirilmiştir [5, 9-14]. Söz konusu alaşımların gösteriminde kullanılan ZA işareti çinko ve alüminyumun İngilizce adlarının baş harflerini, rakamlar ise içerdikleri ortalama alüminyum oranını göstermektedir. Bu alaşımlar Tablo 1'de de görüldüğü gibi ZAMAK alaşımlarından daha yüksek alüminyum içermektedir. Bakır ve magnezyum katkılarının bu alaşımların hem döküm hem de mekanik özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir [2, 3, 5].

Aynı yıllarda Avusturya'daki Vöest-Alpina firması tarafından ALZEN alaşımları olarak bilinen ve %27-70 Al, %0-5 Cu ve %0-5 Si içeren çinko-alüminyum alaşımları geliştirilmiştir [9, 15]. Geliştirilen bu alaşımlardan ALZEN-305 olarak bilinen ve %32 Al, %5 Cu içeren alaşım halen İngiltere'de yatak malzemesi olarak kullanılmaktadır [16-19].

Geleneksel malzemelerin yerine kullanılmak amacıyla üretilen çinko-alüminyum alaşımlarının geliştirilmesi ve uygulama alanlarının yaygınlaştırılması amacıyla yapılan araştırma çalışmaları günümüzde de yoğun olarak sürdürülmektedir [9, 10, 20, 21]. İlk zamanlarda kokil ve kum kalıp döküm yöntemleri için uygun oldukları düşünülmese de rağmen, daha sonraki çalışmalar sonucunda çinko-alüminyum alaşımlarının hemen hemen bilinen bütün döküm yöntemleri (sıcak ve soğuk hazneli basınçlı döküm, sürekli döküm, santrifüj döküm, kokil döküm vs...) ile başarılı bir şekilde üretilebilecekleri gösterilmiştir [22, 23].

Bu alaşımlara gösterilen ilgi bunların özgül mukavemetinin (mukavemet/ yoğunluk) yüksek olması, döküm ve ısıl işlem özellikleri ile sert parçacıkları yutma özelliğinin iyi olması, aşırı yüklenme, yetersiz yağlama ve yüksek hızlı çalışma şartlarında üstün tribolojik davranış sergilemesinden kaynaklanmaktadır [2, 3, 24, 25].

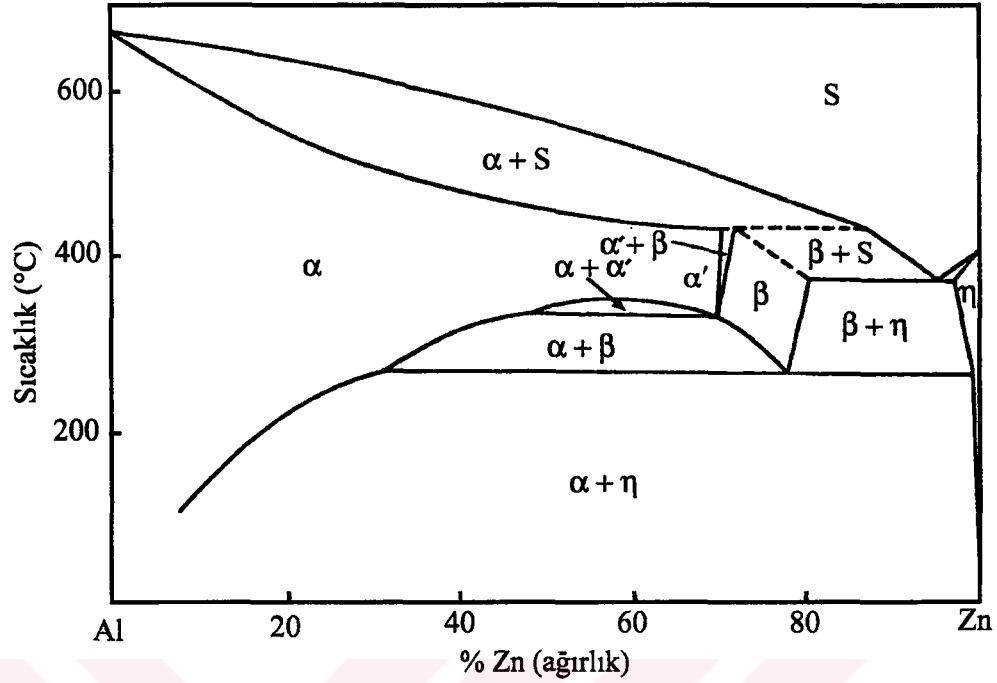
Çinko esaslı yatak alaşımlarının bütün bu üstünlüklerinin yanında, bazı dezavantajlarının da olduğu bilinmektedir. Bu alaşımların kullanımında karşılaşılan en ciddi problem, özellikle bakır içeren alaşımlarda, ortam sıcaklığı ve bunun hemen üzerindeki sıcaklıklarda meydana gelen hacimsel büyüme olayıdır [6, 14, 19]. Yapılan araştırmalar, hacimsel büyüme olayının katılaşma sırasında oluşan kararsız ve yarı kararlı (metastabil) fazların yaşlandırma sırasında kararlı fazlara dönüşmesinden kaynaklandığını göstermiştir [1, 19]. Bu faz dönüşümleri uygun bir ısıl işlemle tamamlanarak alaşımlar yatak üretiminden önce kararlı duruma getirilebilirler [1, 19, 25-27]. Ancak, kararlı bir iç yapı elde etmek için uygulanan yaşlandırma işleminin bu alaşımların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür [6, 19]. Bu nedenle, ısıl işlem sıcaklığının ve

süresinin iyi belirlenmesi gerekir. Diğer taraftan bu problem bakır yerine başka bir element katmak suretiyle de giderilebilir. Bu amaçla geliştirilen üçlü Zn-Al-Si alaşımlarının, aşınma direnci bakımından üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarından daha üstün olduğu görülmüştür [1, 19, 28]. Ancak, silisyum içeren alaşımların mukavemet değerlerinin bakır içeren alaşımlara göre daha düşük olması araştırmacıları yeni kimyasal bileşimler bulmaya yöneltmiştir [2, 5, 6, 19].

Çinko esaslı alaşımlar genellikle düşük hız ve ağır yük altında çalışan kaymalı yatak uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [24, 29]. Bu alaşımlar tek tabakalı kaymalı yatak olarak imal edilebildikleri gibi yatak burcu biçiminde de üretilebilirler. Söz konusu alaşımlar, yatak uygulamaları dışında, özellikle otomotiv yan sanayiinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomobillerde kullanılan karbüratör parçaları, silindir kapağı, dişli kutusu kapakları, motor ayakları, biyel kolu ve jant gibi parçalar bu alaşımlardan üretilmektedir [5, 14]. Bu alaşımlar ayrıca, kablolu kren iş makineleri, vites kutusu, torna tezgahı, taş kırma makinası yataklarında, hidrolik kaldırma silindirlerinde, maden direklerinde piston malzemesi olarak, hidrolik sistemlerde, biyel kollarında, kayıcı pabuçlarda, su pompalarında, matbaa makinelerinde, pnömatik ve tarımsal makinelerde, tekstil ve otomobil sanayii gibi birçok mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır [2, 5, 30].

1.2. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Faz Diyagramları

Çinko-alüminyum faz diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Bu diyagramda alüminyumca zengin faz bölgeleri α , çinkoca zengin faz bölgeleri ise η ile gösterilmiştir [31]. Çinko-alüminyum katı çözültisi %83 Zn oranına kadar uzanarak YMK (yüzey merkezli kübik) yapıya sahip α , α' , β olarak adlandırılan üç değişik faz bölgesi oluşturmaktadır. Bu fazların herbiri, yavaş soğutma işlemi sonunda kararlı çinko ve alüminyum fazlarına dönüşmektedir [13, 32]. α ve α' fazlarının kafes parametreleri birbirine çok yakın olduğundan, bunlar arasındaki faz sınırı tam olarak belirlenememiştir. Bu faz diyagramından görüldüğü gibi, %32-78 Zn oranları arasında ise $\alpha + \alpha'$ olarak adlandırılan bir kararsızlık bölgesi oluşmaktadır [33, 34]. Çinko- alüminyum alaşımlarında görülen faz dönüşümleri ve bunların meydana geldiği bileşim oranları ve sıcaklık değerleri Tablo 2'de görülmektedir.



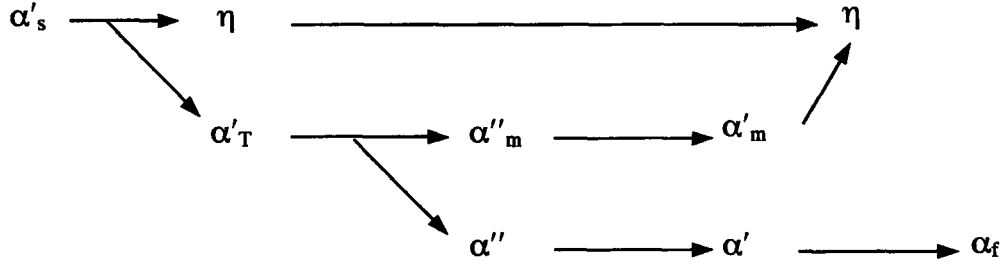
Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı [31].

Tablo 2. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [15, 33].

Dönüşüm	Dönüşüm formülü	Dönüşüm noktası	
		Kimyasal bileşim (%Zn)	Sıcaklık (°C)
Otektik	$S \rightleftharpoons \beta + \eta$	95	382
Otektoid (I)	$\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	78	276
(II)	$\alpha/\alpha' \rightleftharpoons \alpha + \beta$	52	340
Peritektik	$\alpha + S \rightleftharpoons \beta$	72	443

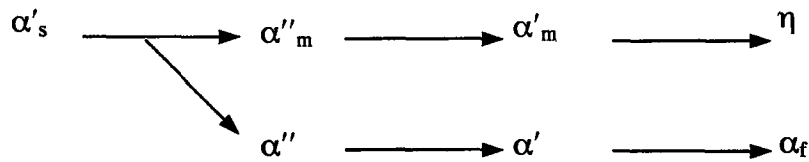
Silisyum içeren üçlü alaşımların iç yapıları ikili alaşımlardan farklılık göstermektedir. Silisyum katılma sırasında sıvı metalden ayrılarak katılan ilk metal olduğundan, daha sonra katılan α dentritleri için çekirdek görevi yapmaktadır. Bu alaşımların iç yapıları, alüminyumca zengin göbekli α dentritleri ve bu dentritler arasında yer alan çinkoca zengin η fazı ile silisyum parçacıklarından oluşmaktadır [28]. Çinko-

alüminyum-silisyum (Zn-Al-Si) alaşım sistemine ait faz diyagramı henüz tam olarak belirlenememiş olmakla birlikte, bu sistemin faz dönüşümleri çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir [6, 33, 35, 36]. Bu araştırmacıardan Zhu ve arkadaşları [33, 36] tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, çözündürme ve su verme işlemleri sonrası yaşlandırılan monotektoid bileşime sahip $ZnAl_{13}Si_5$ ve $ZnAl_{20}Si_5$ alaşımlarında aşağıda verilen faz dönüşümlerinin meydana geldiği belirlenmiştir.



Bu faz dönüşümü sırasında ilk önce G.P. (Guiner-Preston) bölgeleri oluşmakta, bunu çinkoca zengin α''_m (birinci geçiş fazı) ve α'_m (ikinci geçiş fazı) geçiş fazları izledikten sonra dönüşüm alüminyumca zengin kararlı α_f fazının oluşumu ile tamamlanmıştır.

Bu alaşımlara ek olarak, düşük oranda çinko içeren $ZnAl_{16}Si_5$ alaşımının incelenmesi sonucunda da bu alaşımdaki faz dönüşümlerinin $ZnAl_{13}Si_5$ ve $ZnAl_{20}Si_5$ alaşımlarındaki faz dönüşümlerinden daha yavaş olduğu ve dönüşümün ilk aşamasında yalnız çinkoca zengin geçiş fazlarının oluştuğu gözlenmiştir. Su verme işlemi sonucunda elde edilen aşırı doymuş α'_s fazı, yaşlandırma sırasında aşağıda görüldüğü gibi α''_m , α'_m , α'' ve α' geçiş fazlarını oluşturduktan sonra çinkoca zengin η ve alüminyumca zengin α_f kararlı fazına dönüştüğü belirlenmiştir [36].



Yapılan çalışmalar, silisyumun çinko-alüminyum alaşımları içerisindeki katı çözünürlüğünün çok az olduğunu ve bu nedenle faz dönüşümlerini fazla etkilemediğini göstermiştir [33, 35, 36]. Bununla birlikte, silisyum parçacıklarının büyüklüğü ve

dağılımının bileşim oranına bağlı olduğu görülmüştür. Şöyle ki, %2 oranına kadar silisyum içeren alaşımlardaki silisyum parçacıklarının ince olup, homojen bir dağılım gösterdikleri görülmüştür. Silisyum oranının %2'nin üzerine çıkarılması durumunda ise silisyum parçacıklarının hem büyüdükleri hem de düzensiz bir dağılım sergiledikleri görülmüştür [6, 19, 28].

1.3. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri

1.3.1. Fiziksel Özellikler

Çinko-alüminyum alaşımlarının ergime noktası ve katılma aralığı ikili denge diyagramında da görüldüğü gibi alüminyum oranına bağlı olarak değişmektedir. Alüminyum oranı arttıkça, alaşımların ergime noktası yükselmekte, katılma aralığı ise daralmaktadır [4, 37]. Alaşımların, geleneksel döküm alaşımlarının çoğundan daha düşük ergime sıcaklığına sahip olması, daha az enerji sarfiyatına yol açmakta, kalıp, alet ve gereçlerin kullanım ömrünü arttırmaktadır [2, 4, 37]. Tablo 3'te çinko esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çinko esaslı alaşımlar bronz, pirinç, dökme demir gibi geleneksel yatak alaşımlarından daha düşük yoğunluğa sahiptir. Alüminyum oranı arttıkça yoğunlukları azalmakta, azalan yoğunluk da alaşımların birim maliyetini büyük ölçüde düşürmektedir [2, 4]. Ayrıca, çinko esaslı alaşımlar geleneksel yatak alaşımlarından daha yüksek ısı iletkenlik, ısıl genleşme ve elektriksel iletkenlik katsayılarına sahip olup, bu katsayılar artan alüminyum oranı ile artmaktadır [22, 37].

1.3.2. Mekanik Özellikler

Çinko esaslı alaşımlar geleneksel yatak malzemelerinden daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir [22, 37]. Alaşım elementi olarak katılan alüminyum söz konusu alaşımların döküm özelliklerini iyileştirmekte ve mukavemet özelliklerini arttırmaktadır [1, 22]. Ancak, çinko-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin pek çok uygulama için yeterli olmadığı bilinmektedir [1, 37]. Bu nedenle yapılan pek çok araştırmada bakır, magnezyum ve silisyum gibi alaşım elementlerinin bu alaşımların mekanik özelliklerini

iyileştirdiği ve korozyon ve aşınma dirençlerini artırdığı görülmüştür [38, 39]. Tablo 4'te çinko esaslı bazı ticari alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının mekanik özellikleri verilmiştir. Bu tablo çinko esaslı alaşımların geleneksel yatak alaşımlarından daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğunu göstermektedir.

Çinko esaslı alaşımlarda iç yapı-mekanik özellik ilişkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve dökülmüş durumdaki alaşımlarının iç yapısındaki dentrit kol aralığı azaldıkça, çekme mukavemetinin arttığı görülmüştür [4, 40].

Yapılan araştırmalar bor, titanyum, zirkonyum, lantanyum ve seryum gibi katkı elementlerinin çinko esaslı alaşımların tane boyutunu küçülterek mukavemet değerlerini artırdığını göstermiştir [40, 41].

Isıl işlem uygulanarak bu alaşımların mekanik özellikleri büyük ölçüde değiştirilebilir. Ancak ısıl işlemin amaca uygun olarak seçilmesi gerekir. Kararlı yapılar elde etmek için uygulanan stabilizasyon işlemi bu alaşımların sertlik ve mukavemetini azaltırken, su verme işlemi sonrası uygulanan yaşlandırma işlemi ile söz konusu alaşımların bu değerlerinin arttırılabileceği görülmüştür [6, 37, 38, 42].

Çinko esaslı alaşımlarının ergime sıcaklıklarının düşük olması bu alaşımları sıcaklığa karşı duyarlı hale getirmektedir [37]. Nitekim sıcaklık arttıkça söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemet değerleri önemli ölçüde düşerken, süneklik değerleri artmaktadır [43, 44]. Bu nedenle, ZA-27 alaşımının 120°C'nin, ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarının da 90°C'nin altındaki sıcaklıklarda kullanılması önerilmektedir [37, 45]. Çinko esaslı alaşımlarının akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertliği artan sıcaklıkla azalmakta, % uzama miktarı ise artmaktadır [22]. Söz konusu alaşımlar, geleneksel yatak malzemelerinden daha düşük kırılma tokluğuna sahiptir, ancak bu alaşımların kırılma tokluğu artan alüminyum oranı ile artmaktadır [37].

Tablo 3. Çinko esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri [2, 9, 22].

Alaşım	Fiziksel özellikler					
	Yoğunluk (kg/m ³)	Katılma aralığı (°C)	Isıl genleşme katsayısı (µm/m°C)	Isıl geçirgenlik katsayısı (W/m°C)	Elektriksel iletkenlik katsayısı (%IACS)	
No:2	6600	390-379	27,8	105	25	
No:3	6600	387-381	27,4	113	27	
No:5	6700	386-380	27,4	109	26	
No:7	6600	387-381	27,4	113	27	
ZA-8	6300	404-375	23,3	115	28	
ZA-12	6000	432-377	24,2	116	28	
ZA-27	5000	484-376	26,0	126	30	
SAE-40 pirinci	8500	1010-855	18,0	72	15	
SAE-660 bronz	8830	975-855	18,0	59	12	
Kır dökme demir	7300	1260-090	11,9	45	6	

Not: Alaşımların hepsi dökülmüş durumda bulunmaktadır.

Tablo 4. Çinko esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının mekanik özellikleri [2, 9, 22].

Alaşım	Mekanik özellikler									
	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Sertlik (BSD) (500kg)	Darbe dayanımı (J)	Yorulma dayanımı (MPa)	Kayma mukavemeti (MPa)	Poisson oranı			
No:2	359	7	100	48	59	-	-			
No:3	283	10	82	58	48	-	-			
No:5	328	7	91	65	57	-	-			
No:7	283	13	80	58	47	-	-			
ZA-8	221-255	1-2	85-90	13-18	103	241	0,296			
ZA-12	310-345	1,5-2,5	85-95	17-22	103	255	0,302			
ZA-27	414-441	2-3	110-120	25-40	172	270	0,323			
SAE-40 pirinci	255	30	60	15	-	-	-			
SAE-660 bronzu	240	20	65	8	-	-	-			
Kır dökme demir	214	-	210	-	-	-	-			

Not: Alaşımların hepsi dökülmüş durumda bulunmaktadır

1.3.3. Tribolojik Özellikler

Kalayın pahalı ve kısıtlı miktarda bulunan bir metal olması yatak üreticilerini bu metali içeren beyaz metal, bronz ve pirinç gibi geleneksel yatak alaşımlarının yerine yeni yatak alaşımları geliştirmeye zorlamıştır. Bu amaçla yapılan çalışmalar sonucunda üstün tribolojik özelliklere sahip çinko esaslı alaşımlar geliştirilmiştir [1, 19, 20, 25, 28, 46]. Ayrıca, silisyum, nikel ve magnezyum gibi alaşım elementi katkılarının bu alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerini büyük ölçüde iyileştirdiği görülmüştür [6, 28, 41, 44, 47, 48].

Savaşkan ve Murphy tarafından yapılan bir çalışmada, ana yapıları aynı olmasına karşın, Zn-Al-Si alaşımlarının Zn-Al-Cu alaşımlarından çok daha üstün tribolojik özelliklere sahip olduğu gözlenmiştir [6]. Bu durum, yumuşak çinko-alüminyum matrisi içerisinde yer alan sert silisyum parçacıklarının varlığına ve dağılımına dayandırılarak açıklanmıştır. Silisyum fazının yapıdaki dağılımının ise alaşımdaki silisyum oranına bağlı olduğu ve homojen bir dağılım elde edilebilmesi için bu oranın belirli bir değerin (%2) altında tutulması gerektiği belirlenmiştir [6, 19, 28]. Ayrıca, bu alaşımlardaki %0,05 gibi düşük oranlardaki stronsiyum katkısının da, silisyum segregasyonunu önleyerek daha homojen bir dağılım sağladığı gözlenmiştir [8]. Kaymalı yatak üretiminde, Zn-Al-Cu alaşımı yerine Zn-Al-Si alaşımı kullanılmasının hem yüksek aşınma direnci elde etmek hem de bakırın neden olduğu boyutsal kararsızlık problemini önlemek bakımından daha uygun olduğu ileri sürülmüştür [6]. Bu çalışmada, ayrıca ötektoid esaslı üçlü Zn-Al-Cu ve Zn-Al-Si alaşımlarının SAE 73 pirinci ve SAE 660 bronzundan daha üstün aşınma direnci sergiledikleri, ancak bunların aşınma direncinin monotektoid esaslı alaşımların aşınma direncinden daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Çinko esaslı alaşımların üstün tribolojik özellikler sergilemesi bu alaşımların aşınma yüzeylerinde oluşan çinko ve alüminyum oksit tabakalarına dayandırılarak açıklanmaktadır [25, 49-51]. Çinko esaslı alaşımlarda sert alüminyum oksit tabakası uygulanan yükü taşıırken, daha yumuşak olan çinko oksit tabakası özellikle sınır ve karışık yağlama durumlarında yağlayıcı görevi yapmaktadır. Bu nedenle, söz konusu alaşımlar yetersiz yağlama ve aşırı yüklenme gibi ağır çalışma şartlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [52, 53]. Kalay esaslı yatak malzemelerinin yağlanmış durumdaki sürtünme katsayıları 0,1 civarında iken, çinko esaslı alaşımların aynı durumdaki sürtünme katsayılarının 0,03-0,07 değerleri arasında yer aldığı görülmüştür [21, 22].

Çinko esaslı alaşımların aşınma direncinin artan alüminyum oranı ile arttığı belirlenmiştir [54]. Ayrıca, döküm yönteminin de bu alaşımların yapı ve mekanik özelliklerinden başka, sürtünme ve aşınma özelliklerini de önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Şöyle ki, en yüksek aşınma direnci kum döküm yöntemiyle üretilen alaşımlardan elde edilmiş ve bunu sırasıyla savurmalı (santrifüj), basınçlı ve sürekli döküm yöntemleriyle üretilen çinko esaslı alaşımlar izlemiştir. Bu durum, alaşımlarda bulunan gözenek oranına dayandırılarak açıklanmaktadır. [54]. Yapılan çalışmalar gözenek oranı arttıkça bu alaşımların aşınma direncinin azaldığını, gözenek oranı azaldıkça aşınma direncinin arttığını göstermiştir. Başka bir çalışmada da alaşımlardaki gözenek oranının soğuma hızına bağlı olduğu ve soğuma hızı arttıkça çinko esaslı alaşımlarda gözenek oranının azaldığı görülmüştür [55].

Zn-Al-Si alaşımlarının dökülmüş durumda, Zn-Al-Cu alaşımlarının ise ısıl işlem görmüş (stabilize edilmiş) durumda en üstün aşınma direnci sergiledikleri görülmüştür [28]. Bu durum, Zn-Al-Si alaşımlarının ana yapısının ısıl işlem sırasında yumuşamasından, Zn-Al-Cu alaşımlarının ise bakırca zengin fazların çökmesi nedeniyle sertleşmesinden kaynaklanmaktadır [28].

Yapılan araştırmalar sonucunda, silisyum katkısının çinko esaslı alaşımlarının tribolojik özelliklerini iyileştirdiği, ancak silisyum oranının bu alaşımların sürtünme ve aşınma direncine etkilerinin tam olarak ortaya konulamadığı görülmüştür.

1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Çinko esaslı alaşımlar günümüzde pek çok alanda bazı Al alaşımları, dökme demir, pirinç ve bronz gibi geleneksel yatak alaşımlarının yerini almaktadır. Bunun sebebi olarak çinko esaslı alaşımların hem ekonomik hem de döküme elverişli olması, özgül mukavemet (mukavemet/yoğunluk) ve aşınma direncinin yüksek olması gösterilmektedir.

Çinko esaslı yatak alaşımlarının bu üstünlüklerinin yanında, bazı dezavantajları da vardır. Bu alaşımların kullanımında karşılaşılan en ciddi problemin, özellikle bakır içeren alaşımlarda ortam sıcaklığı ve bunun hemen üzerindeki sıcaklıklarda meydana gelen hacimsel büyüme olayı olduğu görülmüştür. Ayrıca, kararlı bir iç yapı elde etmek için uygulanan stabilizasyon işleminin de bu alaşımların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir. Bu nedenlerle, son zamanlarda çinko esaslı alaşımların kullanımını kısıtlayan faktörlerin ortadan kaldırılmasına yönelik çalışmaların arttığı görülmektedir.

Diğer taraftan silisyum, bakır, nikel ve magnezyum gibi alaşım elementi katkılarının ikili çinko-alüminyum alaşımlarının yapı ve özelliklerine etkileri pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda silisyum katkısının bu alaşımların aşınma direncini bakır, nikel ve magnezyum gibi element katkılarından daha fazla arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, silisyum içeren çinko-alüminyum alaşımlarının tribolojik özelliklerinin büyük ölçüde silisyum oranına bağlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle üstün tribolojik özellikler elde edilebilmesi için silisyum oranının iyi seçilmesi gerekmektedir. Ancak, silisyum oranının Zn-Al-Si alaşımlarının sürtünme ve aşınma davranışına etkileri tam olarak ortaya konulamamıştır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı silisyum katkısının monotektoid çinko-alüminyum alaşımlarının sürtünme ve aşınma özelliklerine etkisinin belirlenmesidir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Alaşımın Üretimi ve Isıl İşlemi

Bu çalışmada bir adet çinko-alüminyum (Zn-Al), sekiz adet çinko-alüminyum-silisyum (Zn-Al-Si) alaşımı kokil döküm yöntemi ile üretildi. Alaşımın üretiminde yüksek saflıkta (% 99,99) çinko, ticari saflıkta (% 99,70) alüminyum, silisyum içeren alaşımın üretiminde ise Etial-140 (AlSi12) kullanıldı. Ergitme işlemi, elektrikli bir pota fırında gerçekleştirildi. Ergitilen alaşımlar, 620°C döküm sıcaklığında oda sıcaklığında bulunan bir kokil kalıba dökülerek katılaştırıldı. Üretilen alaşımlara ait külçelerin bir kısmı dökülmüş, bir kısmı da ısıl işlem uygulanmış durumda kullanıldı. Alaşımlar 375°C sıcaklıkta 30 saatlik bir süre homojenleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra havada soğutularak talaşlı yöntemle işlendi. Örnekler daha sonra 375°C sıcaklıkta 2 saat daha çözündürme işlemine tabi tutulduktan sonra suda soğutuldu. Su verilen alaşımlar 100°C sıcaklıkta 2 saat yaşlandırıldı. Alaşımın kimyasal bileşimleri spektral analiz yöntemi ile belirlendi.

2.2. Yoğunluk ve İç Yapı İncelemeleri

Alaşımından talaşlı işleme hazırlanan silindirik şeklindeki örneklerin boyutları $\pm 0,001$ mm hassasiyetindeki bir mikrometre yardımıyla ölçülerek belirlendi. Söz konusu örneklerin kütleleri ise $\pm 0,01$ mg'lık hassasiyete sahip bir terazide ölçüldü. Ölçülen kütle değerleri alaşımın hacimlerine bölünerek yoğunluklar hesaplandı.

Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumdaki alaşımlardan standart metalografi yöntemiyle hazırlanan örnekler, %15'lik Nital (%85 etil alkol + %15 nitrik asit) içerisinde dağlandıktan sonra iç yapıları ışık mikroskobu yardımıyla incelendi. Ayrıca aşınma deneyi sonucunda elde edilen örneklerin yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelendi.

2.3. Sertlik ve Çekme Deneyleri

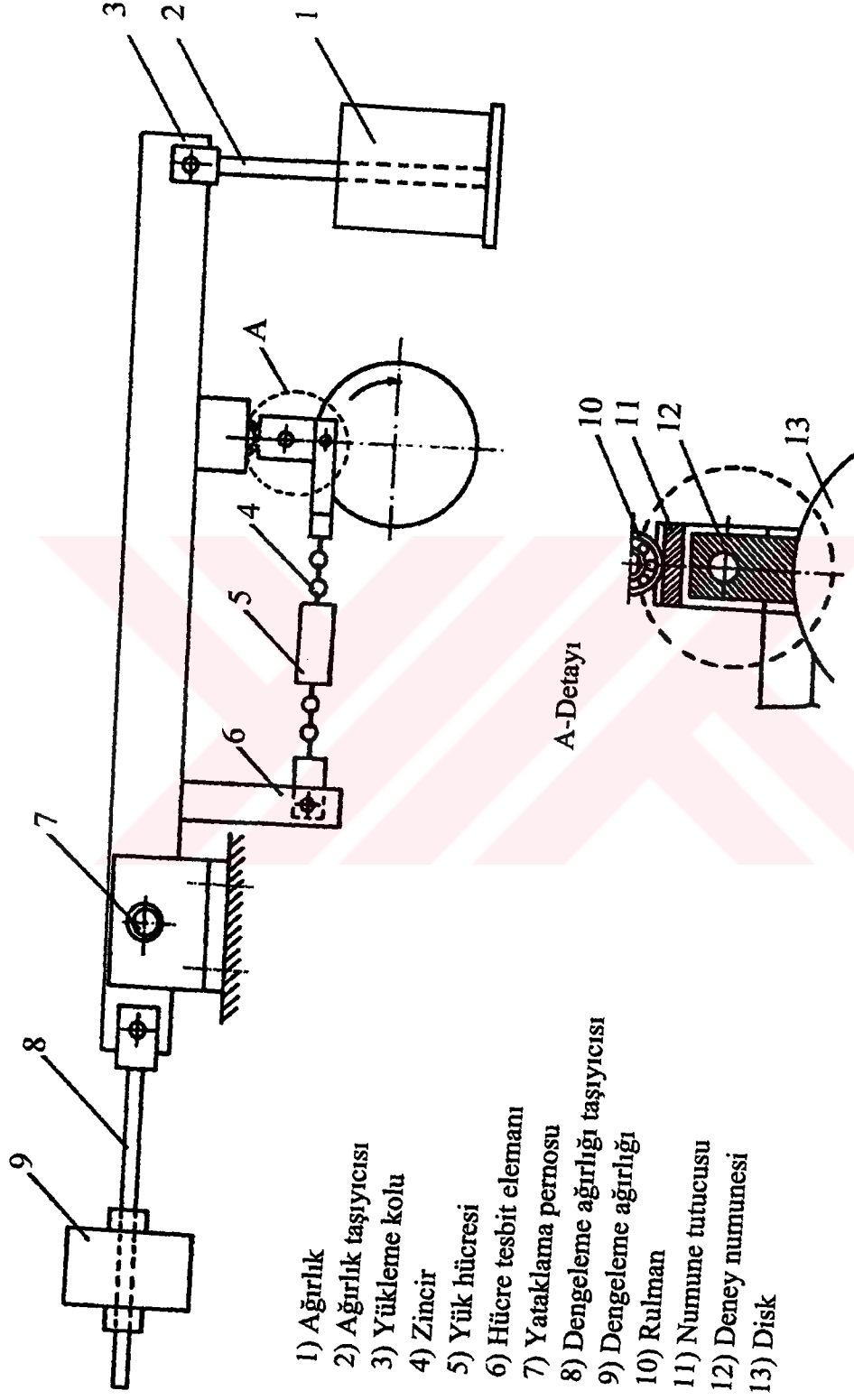
Alaşımların sertliği Brinell sertlik ölçme yöntemi ile 62,5 kg yük altında 2,5 mm çapında uç kullanılarak ölçüldü. Her bir örnek üzerinde beş sertlik ölçümü yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alındı.

Üretilen alaşımlardan 8×40 TS 138A standardına uygun olarak hazırlanan örnekler 0,3 mm/s sabit çekme hızında çekme deneyine tabi tutuldu. Çekme deneyi sonucunda, alaşımların çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri belirlendi.

2.4. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri

Bu çalışma için üretilen alaşımların sürtünme ve aşınma özellikleri blok-disk (block-on-disc) esaslı bir deney düzeneği yardımı ile incelendi. Şematik resmi Şekil 2’de verilen deney düzeneği; 3 kW gücünde bir elektrik motoru, 12 kW gücünde bir hız kontrol ünitesi, mil, disk, örnek tutucusu, yükleme kolu, yağlama sistemi ve sürtünme kuvveti ölçüm devresinden oluşmaktadır. Düzenekte kullanılan disk, bir kaymalı yatak ünitesindeki mili, örnek ise yatağı temsil etmektedir. Yükleme işlemi, örnek tutucusunun bağlı olduğu yükleme kolunun ucuna ağırlık asmak suretiyle gerçekleştirildi. Motorun devir sayısı veya milin dönme hızı elektrik devresine monte edilen bir hız kontrol ünitesi yardımıyla kontrol edildi. Yağlama, yüksek bir yere yerleştirilen depodan ince bir hortum yardımıyla alınan yağın, bir debi ayarlayıcısından geçirildikten sonra disk üzerine damlatılmasıyla gerçekleştirildi.

Sürtünme kuvvetini ölçmek için örnek tutucusu ile sabit mesnet arasında 25 kg kapasiteye sahip R-25 tipi bir yük hücresi yerleştirildi. Sürtünme sırasında yük hücresinden alınan gerilim, bir yükselticide kuvvetlendirildikten sonra bir yazıcıya aktarılarak, sürtünme kuvvetine ait gerilimin çalışma zamanına göre değişimi sürekli olarak kayıt edildi.



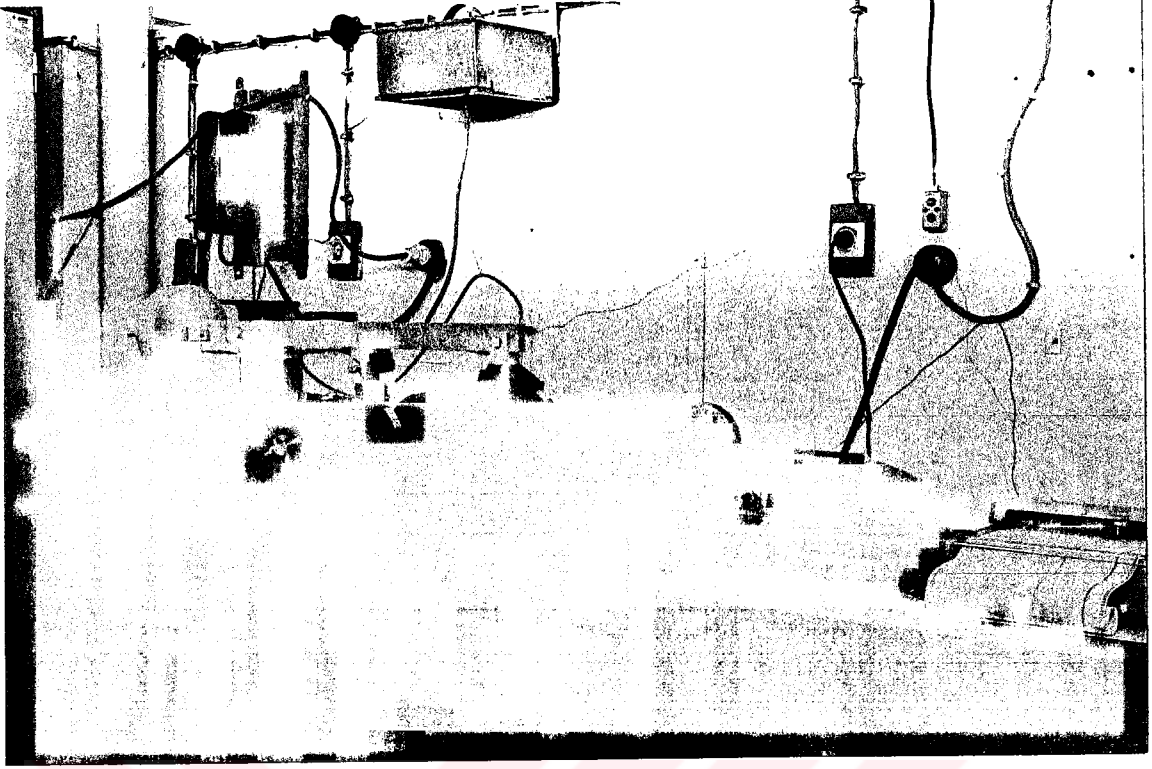
Şekil 2. Blok-disk esaslı aşınma deney düzenineşin şematik resmi

Düzeneğe ait disk 150 mm çapında olup, bu disk SAE 4140 çeliğinden imal edildi ve yüzeyi ısıtma işlemiyle 55 RSD-C değerine kadar sertleştirildi. Sertleştirilen diskin yüzeyi $\pm 3\mu\text{m}$ 'lik bir hassasiyetle taşlandı. Disk-çubuk esaslı deney düzeneği Şekil 3'deki fotoğrafta görülmektedir. Şekil 4'teki fotoğraf ise disk, aşınma örneği ve yük hücresinin yakından görünümünü sergilemektedir.

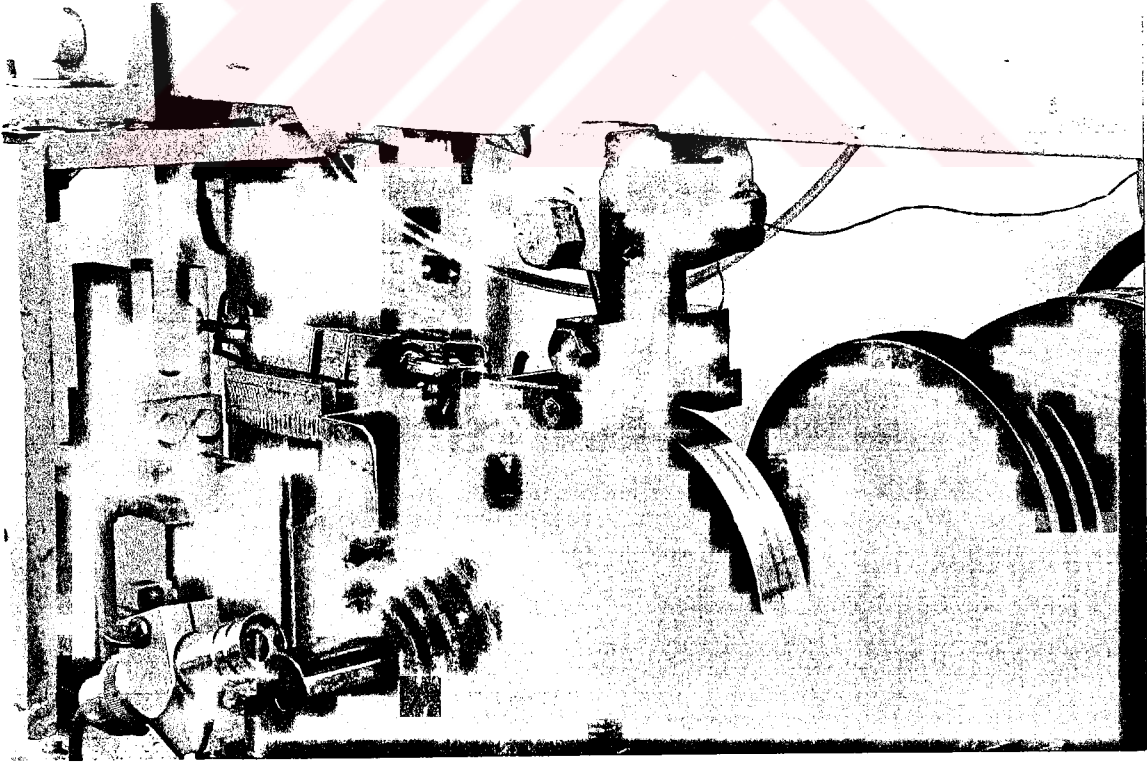
Sürtünme aşınma deneylerinde kullanılmak üzere çinko-alüminyum (Zn-Al) ve çinko-alüminyum-silisyum (Zn-Al-Si) alaşımlarından talaşlı işleme örnekler hazırlandı. Hazırlanan örneklerin uçları, iç çapı $149,6\pm 0,05$ mm olan bir kalıpta işlendi. Söz konusu deney örneklerinin teknik resmi Şekil 5'de verilmiştir.

Sürtünme kuvvetini ölçmek için kullanılan yük hücresi, ucuna belirli ağırlıklar asılarak elde edilen verilerin değerlendirilmesi suretiyle kalibre edildi. Yük hücresinden alınan gerilim bir yükselticide güçlendirildikten sonra yazıcıya aktarıldı. Söz konusu gerilimin uygulanan yüke göre değişimini gösteren kalibrasyon doğrusu Şekil 6'da verilmiştir.

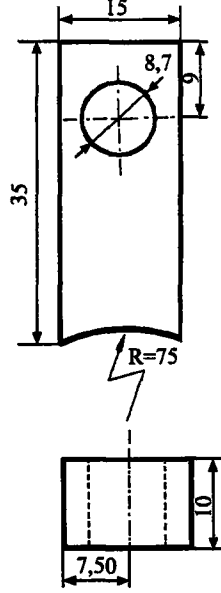
Sürtünme ve aşınma deneylerine başlamadan önce, kimyasal çözücüler içerisinde ultrasonik temizleyici yardımı ile temizlenen örneklerin kütleleri $0,01$ mg'lık hassasiyete sahip bir terazi ile ölçüldü. Söz konusu alaşımların sürtünme katsayılarını belirlemek için hazırlanan örnekler, aşınma deney düzeneğinde 24 saatlik bir sürtünme deneyine tabi tutuldu. Sürtünme kuvvetinin yük hücresinde oluşturduğu gerilim değeri bir yükselticiden geçirildikten sonra bir yazıcı ile sürekli olarak kaydedildi ve söz konusu değer kalibrasyon eğrisi yardımıyla sürtünme kuvvetine çevrildi. Daha sonra bu değer normal yüke bölünerek sürtünme katsayısı bulundu. Deney örneğinin sıcaklığı temas yüzeyinin 1,5 mm yukarısında açılan bir deliğe yerleştirilen bir bakır-nikel termoçift yardımıyla ölçüldü ve bunun zamana göre değişimi bir yazıcı ile çizdirildi. Alaşımların sürtünme deneyleri $1,94$ m/s'lik kayma hızı, $6,5$ MPa'lık yüzey basıncı ve 2 cm³/saat'lik sabit yağ akış debisinde gerçekleştirildi.



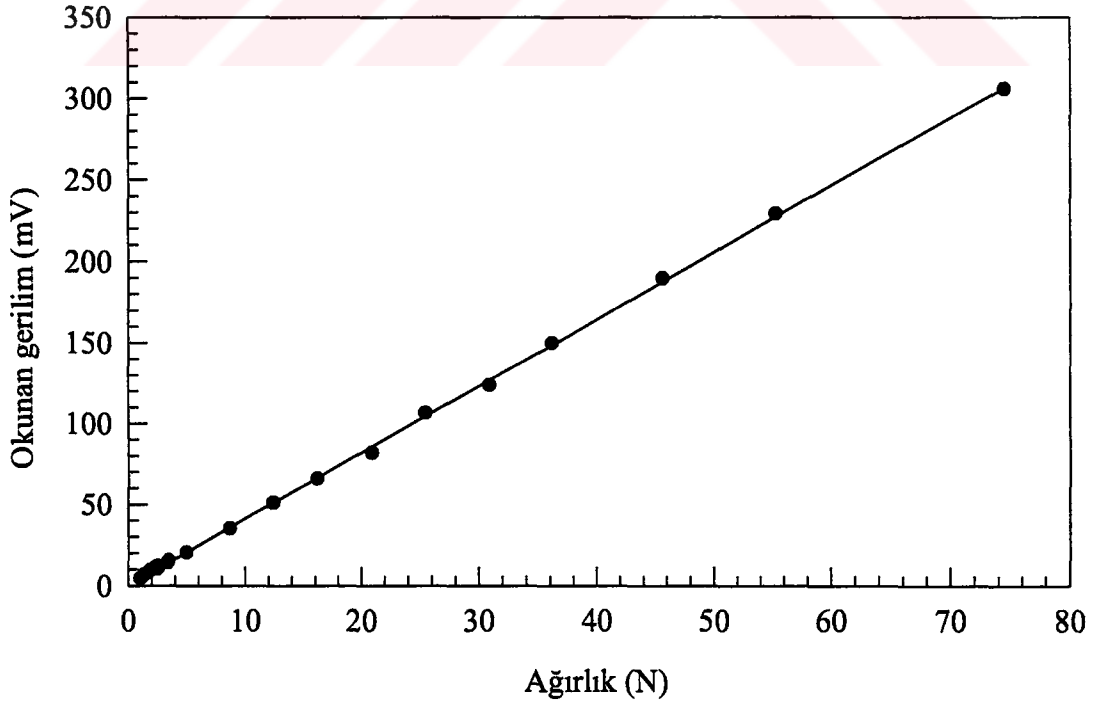
Şekil 3. Blok-disk esaslı aşınma deney düzeneğinin genel görünümü



Şekil 4. Blok-disk esaslı aşınma deney düzeneğinde örnek, disk ve yük hücrelerinin yakından görünümü



Şekil 5. Aşınma ve sürtünme deneylerinde kullanılan örneğin teknik resmi



Şekil 6. Sürtünme kuvveti ölçümünde kullanılan yük hücresi için kalibrasyon doğrusu

Aşınma deneyinde ise, başlangıçta 70 km'lik yola karşılık gelen 10 saatlik çalışma süresi sonunda sökülerek kimyasal çözücüler içerisinde temizlenen deney örnekleri tartılarak, aşınma ile meydana gelen kütle kaybı belirlendi. 20 saat'lik çalışma süresinden sonra da her 20 saat'lik deney sonunda kütle kayıpları belirlendi. Deneyler 1120 km'lik yola karşılık gelen 160 saat süre sonunda tamamlandı. Yataklardaki aşınma miktarı genelde hacim kaybı olarak gösterildiğinden, ölçülen kütle kayıpları alaşımların yoğunluklarına bölünerek hacim kaybı değerleri belirlendi. Aşınma deneyleri de sürtünme deneyleri gibi 1,94 m/s'lik kayma hızı, 6,5 MPa'lık yüzey basıncı ve 2 cm³/saat'lik sabit yağ akış debisinde gerçekleştirildi. Hem sürtünme hem de aşınma deneylerinde SAE 20W/50 normuna uygun motor yağı kullanıldı.



3. BULGULAR

3.1. Kimyasal Analiz Sonuçları

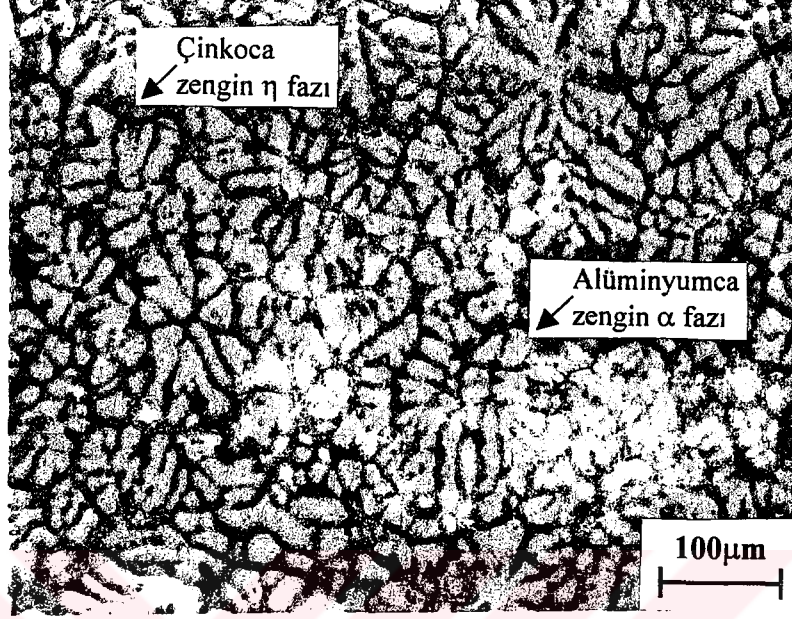
Alaşımın kimyasal bileşimleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Alaşımın kimyasal bileşimleri

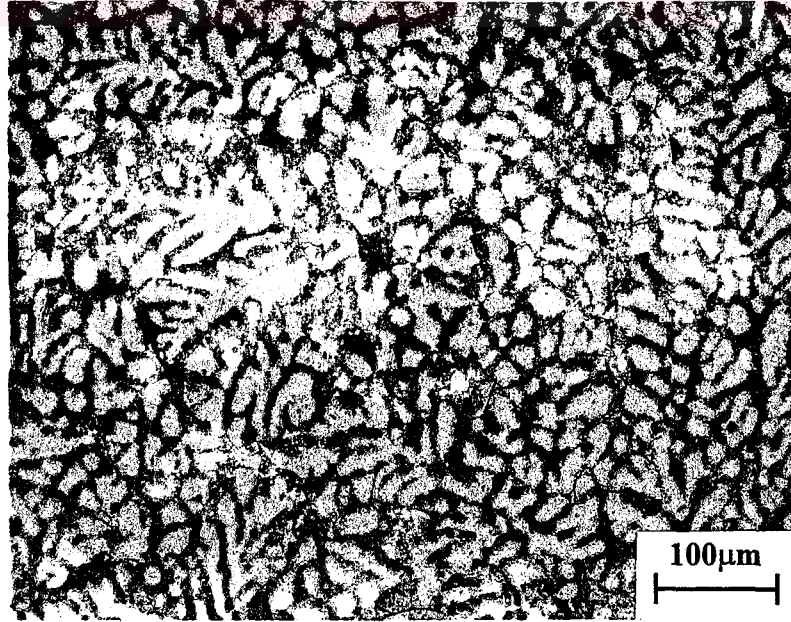
Alaşım	Kimyasal bileşim (%)		
	Zn	Al	Si
Zn-40Al	61,8	38,2	-
Zn-40Al-0,5Si	58,3	41,1	0,6
Zn-40Al-1Si	59,6	39,6	0,8
Zn-40Al-1,5Si	58,3	40,2	1,5
Zn-40Al-2Si	56,7	41,4	1,9
Zn-40Al-2,5Si	58,0	39,5	2,5
Zn-40Al-3Si	57,1	39,7	3,2
Zn-40Al-3,5Si	55,4	40,9	3,7
Zn-40Al-4Si	55,7	40,1	4,2

3.2. Alaşımın İç Yapısı

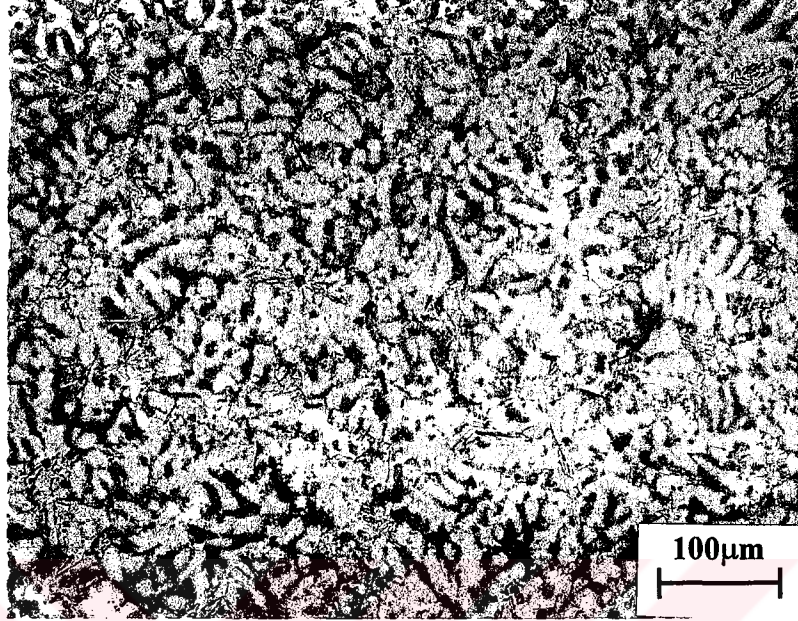
İkili Zn-40Al alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı Şekil 7’de görüldüğü gibi, alüminyumca zengin göbekli α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin η fazlarından oluşmaktadır. Silisyumun ikili alaşımın iç yapısını fazla değiştirmedığı ve parçacıklar halinde yapıda yer aldığı görülmüştür. Bu nedenle, üçlü Zn-Al-Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapıları alüminyumca zengin göbekli α dendritleriyle dendritler arası bölgelerde yer alan çinkoca zengin η fazı ve silisyum parçacıklarından oluşmaktadır. Bu yapıları gösteren fotoğraflar alaşım sırasına göre Şekil 8, 9, 10 ve 11’de verilmiştir.



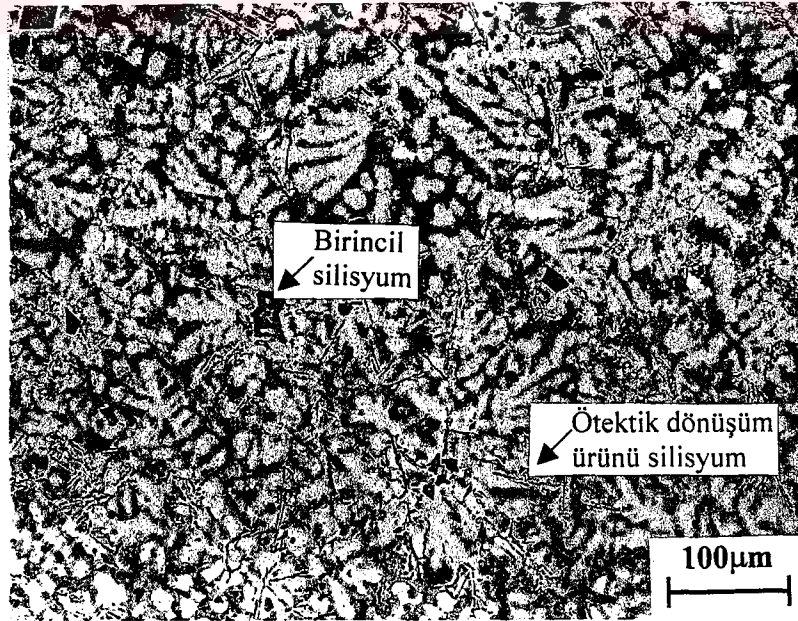
Şekil 7. Zn-40Al alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı



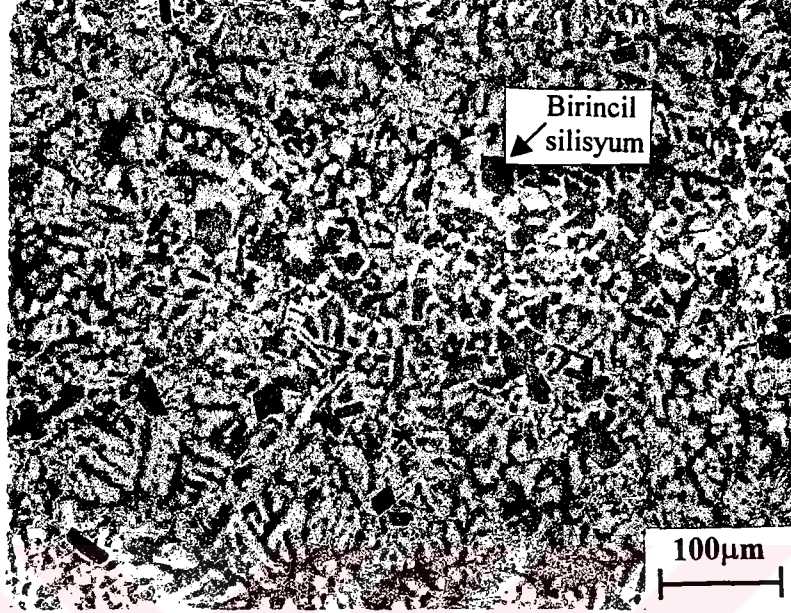
Şekil 8. Zn-40Al-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı



Şekil 9. Zn-40Al-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı



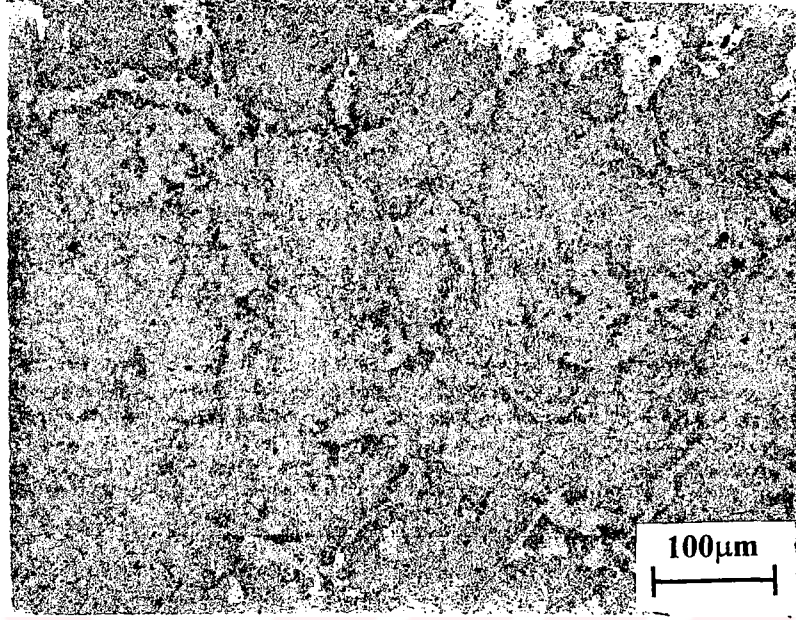
Şekil 10. Zn-40Al-3Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı



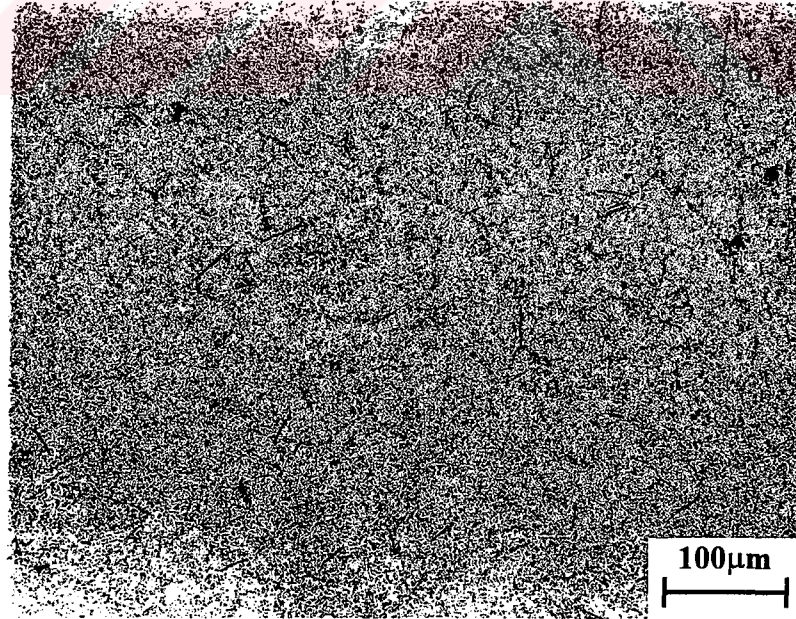
Şekil 11. Zn-40Al-4Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı

Silisyumun bu yapılarda birincil (primer) ve ötektik dönüşüm ürünü olmak üzere iki farklı şekilde bulunduğu gözlenmiştir. Birincil silisyum parçacıkları yapı içerisinde düzensiz bir dağılım sergilerken, ötektik dönüşüm ürünlerinin daha ince ve homojen bir dağılım sergiledikleri görülmektedir. Ayrıca, alaşımların silisyum oranı arttıkça birincil silisyum parçacıklarının büyüdüğü ve daha düzensiz bir dağılım sergiledikleri gözlenmektedir.

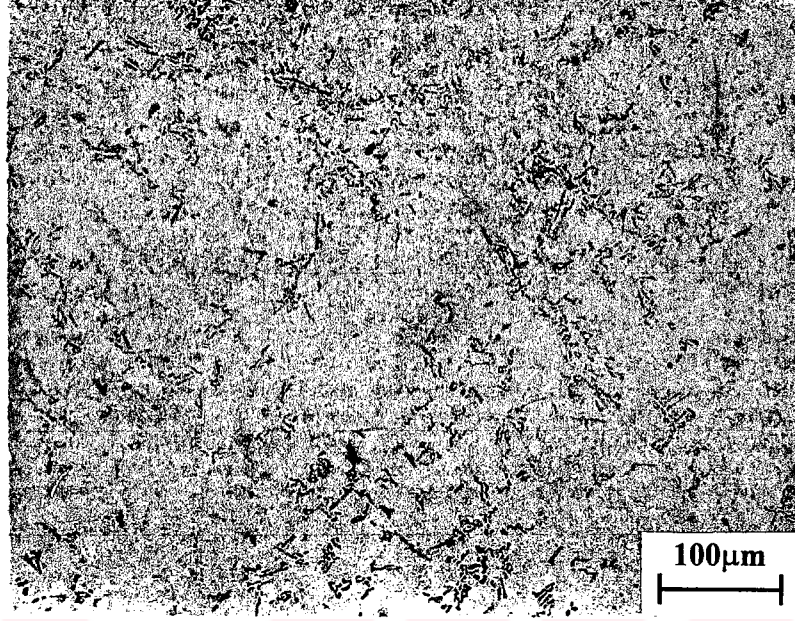
Uygulanan ısı işleminin bu alaşımların dendritik yapısını değiştirerek yerine taneli yapılar oluşturduğu gözlenmiştir. Ayrıca, ısı işlem görmüş yapılarda dendritik yapının ortadan kalkmasından başka α ve η fazları önemli ölçüde incelmış, ancak silisyum parçacıklarında önemli bir değişim meydana gelmemiştir. Isıl işlem görmüş alaşımların iç yapılarını gösteren fotoğraflar alaşım sırasına göre Şekil 12, 13, 14, 15 ve 16'da verilmiştir.



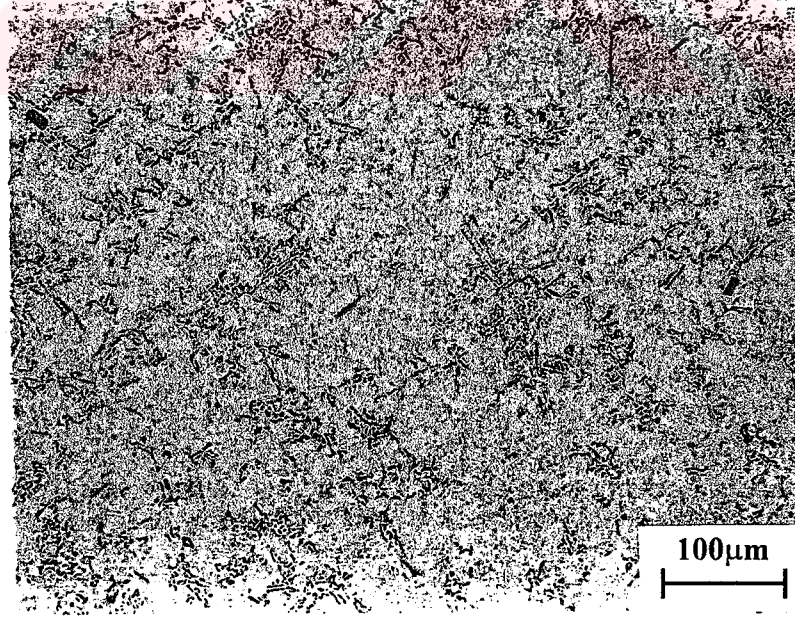
Şekil 12. Zn-40Al alaşımının ısıtım işlem görmüş durumdaki iç yapısı



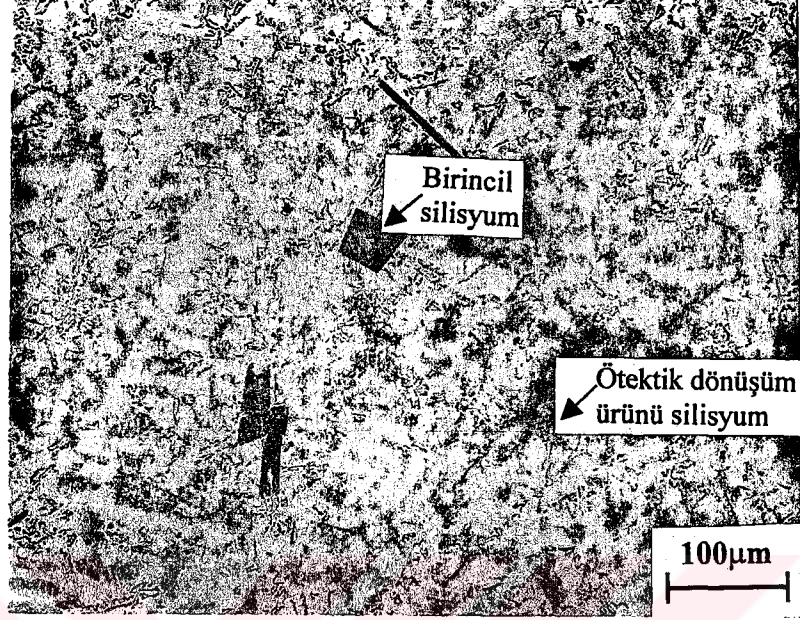
Şekil 13. Zn-40Al-1Si alaşımının ısıtım işlem görmüş durumdaki iç yapısı



Şekil 14. Zn-40Al-2Si alaşımının ısıtım işlem görmüş durumdaki iç yapısı



Şekil 15. Zn-40Al-3Si alaşımının ısıtım işlem görmüş durumdaki iç yapısı



Şekil 16. Zn-40Al-4Si alaşımının ısı işlem görmüş durumdaki iç yapısı

3.3. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

Alaşımın yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri fiziksel ve mekanik deneyler sonucunda belirlenerek ve Tablo 6'da verilmiştir. Silisyum oranının dökülmüş durumdaki alaşımların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini gösteren eğriler ise Şekil 17'de görülmektedir. Bu eğrilerden görüldüğü gibi, alaşımların yoğunluğu silisyum oranı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Diğer taraftan alaşımların sertlik ve çekme dayanımı yaklaşık %2 silisyum oranına kadar artan silisyum oranı ile artmakta, bu orandan sonra da azalmaktadır. Alaşımların kopma uzaması ise artan silisyum oranı ile yaklaşık %3 silisyum oranına kadar azalmakta, bu orandan sonra ise artma eğilimi göstermektedir.

Isıl işlemin söz konusu alaşımların yoğunluk ve kopma uzamasını azaltırken sertlik ve çekme dayanımını arttırdığı gözlenmektedir. Bu durum Şekil 17 ve 18'deki eğrilerde görülmektedir. Silisyum katkısının dökülmüş ve ısı işlem görmüş alaşımların özelliklerine etkisinin benzer olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle, silisyum oranı arttıkça alaşımların sertlik ve çekme dayanımı belirli bir değerlere kadar artıp daha sonra

azalmakta, yoğunluk ve kopma uzaması değerleri ise azalma göstermektedir. Ancak, kopma uzaması belli bir değerden sonra tekrar artmaktadır.

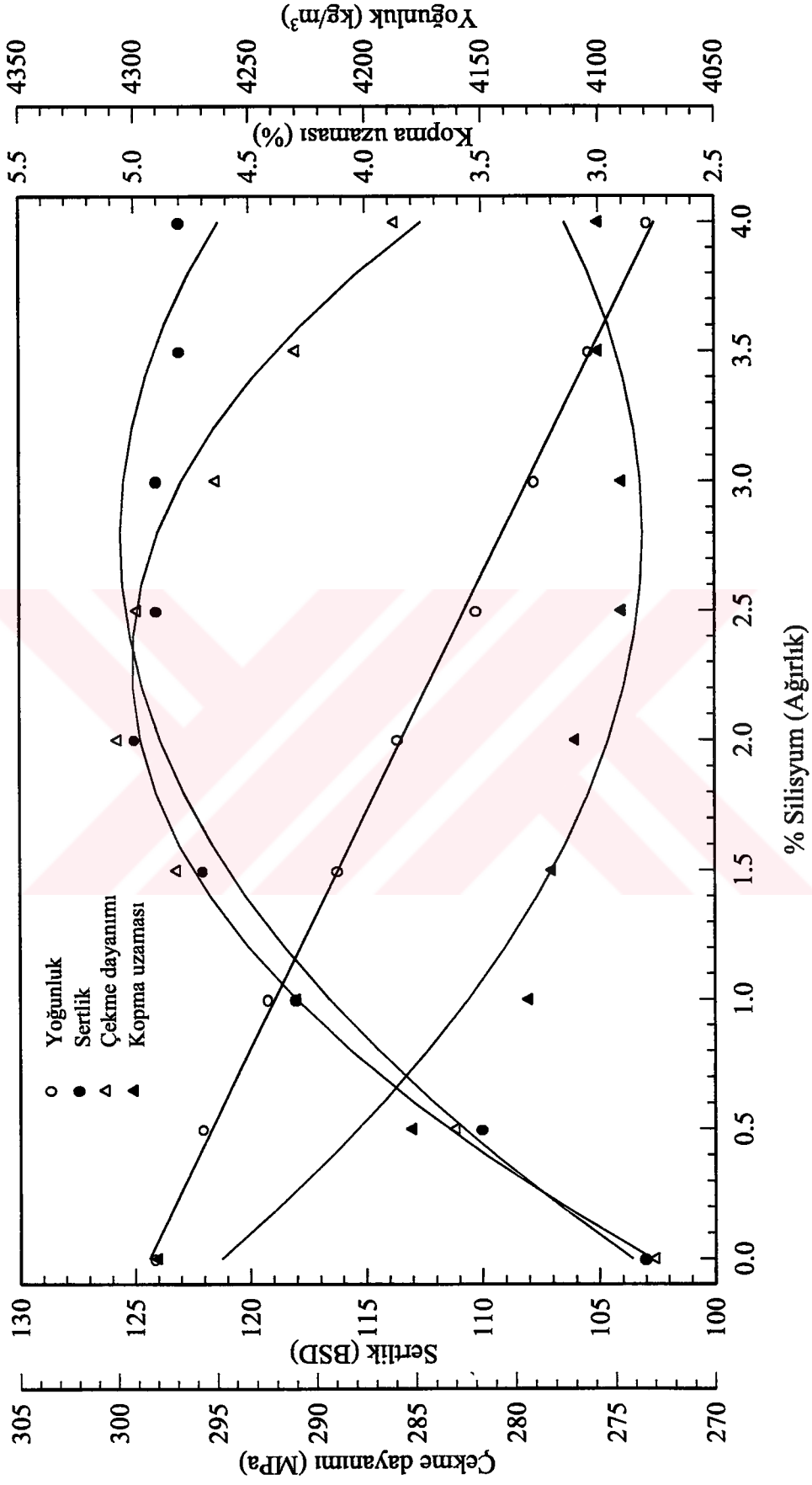
Tablo 6. Alaşımların fiziksel ve mekanik özellikleri

Alaşım	Isıl işlem durumu	Yoğunluk (kg/m ³)	Sertlik (BSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
Zn-40Al	A	4291	103	273	4,9
	B	4283	138	461	3,9
Zn-40Al-0,5Si	A	4270	110	283	3,8
	B	4265	146	468	3,0
Zn-40Al-1Si	A	4242	118	291	3,3
	B	4233	153	478	2,3
Zn-40Al-1,5Si	A	4212	122	297	3,2
	B	4205	157	482	2,0
Zn-40Al-2Si	A	4186	125	300	3,1
	B	4179	159	485	1,9
Zn-40Al-2,5Si	A	4152	124	299	2,9
	B	4145	159	482	1,9
Zn-40Al-3Si	A	4127	124	295	2,9
	B	4128	158	479	1,9
Zn-40Al-3,5Si	A	4104	123	291	3,0
	B	4099	158	475	2,0
Zn-40Al-4Si	A	4079	123	286	3,0
	B	4071	157	471	2,0

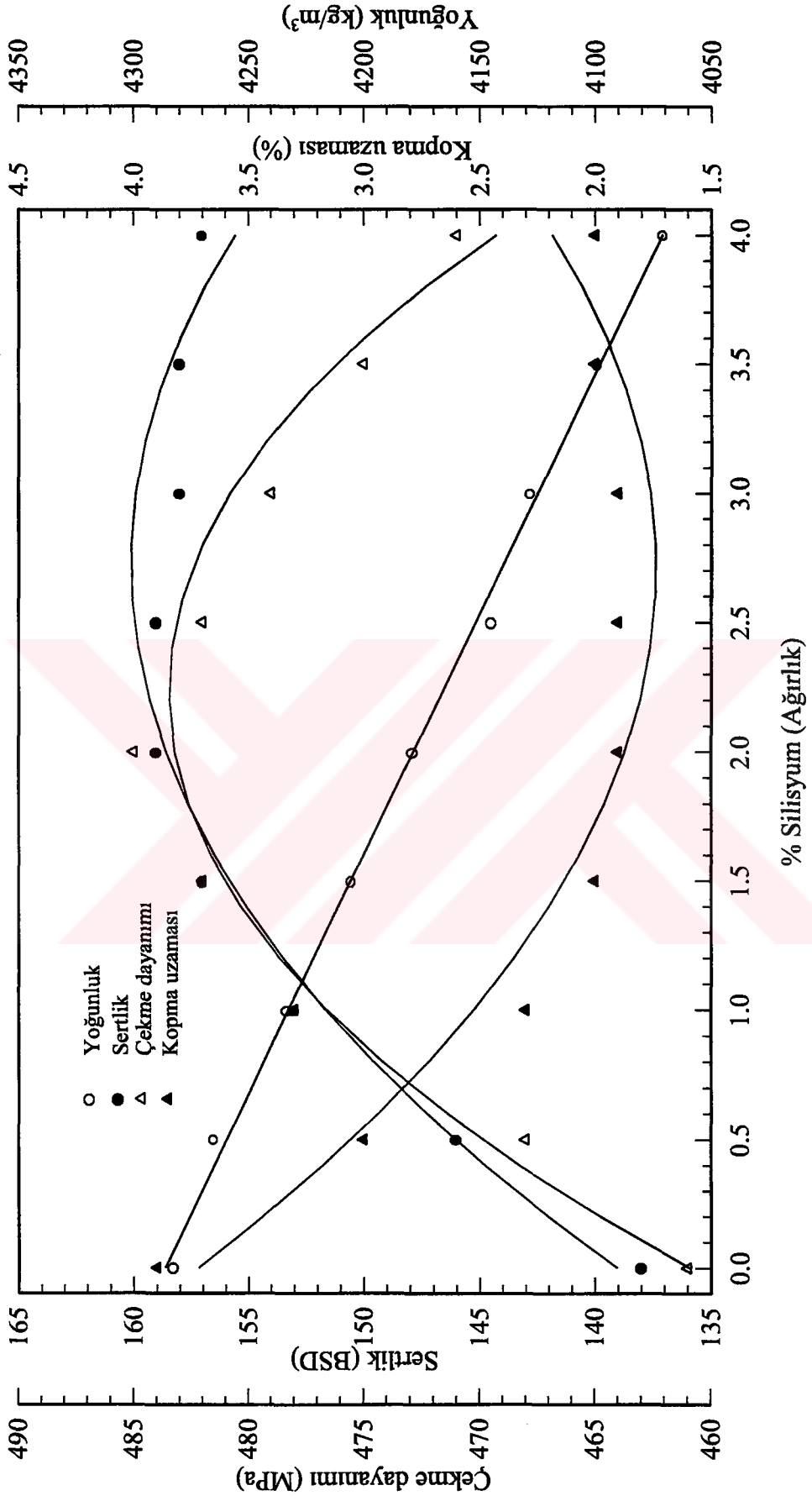
Not: Tablodaki A ve B harfleri alaşımların durumunu göstermektedir.

A: Dökülmüş

B: 375°C sıcaklıkta 32 saat homojenize edilmiş ve 100°C sıcaklıkta 2 saat yaşlandırılmış



Şekil 17. Dökülmüş durumdaki alaşımların fiziksel ve mekanik özelliklerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



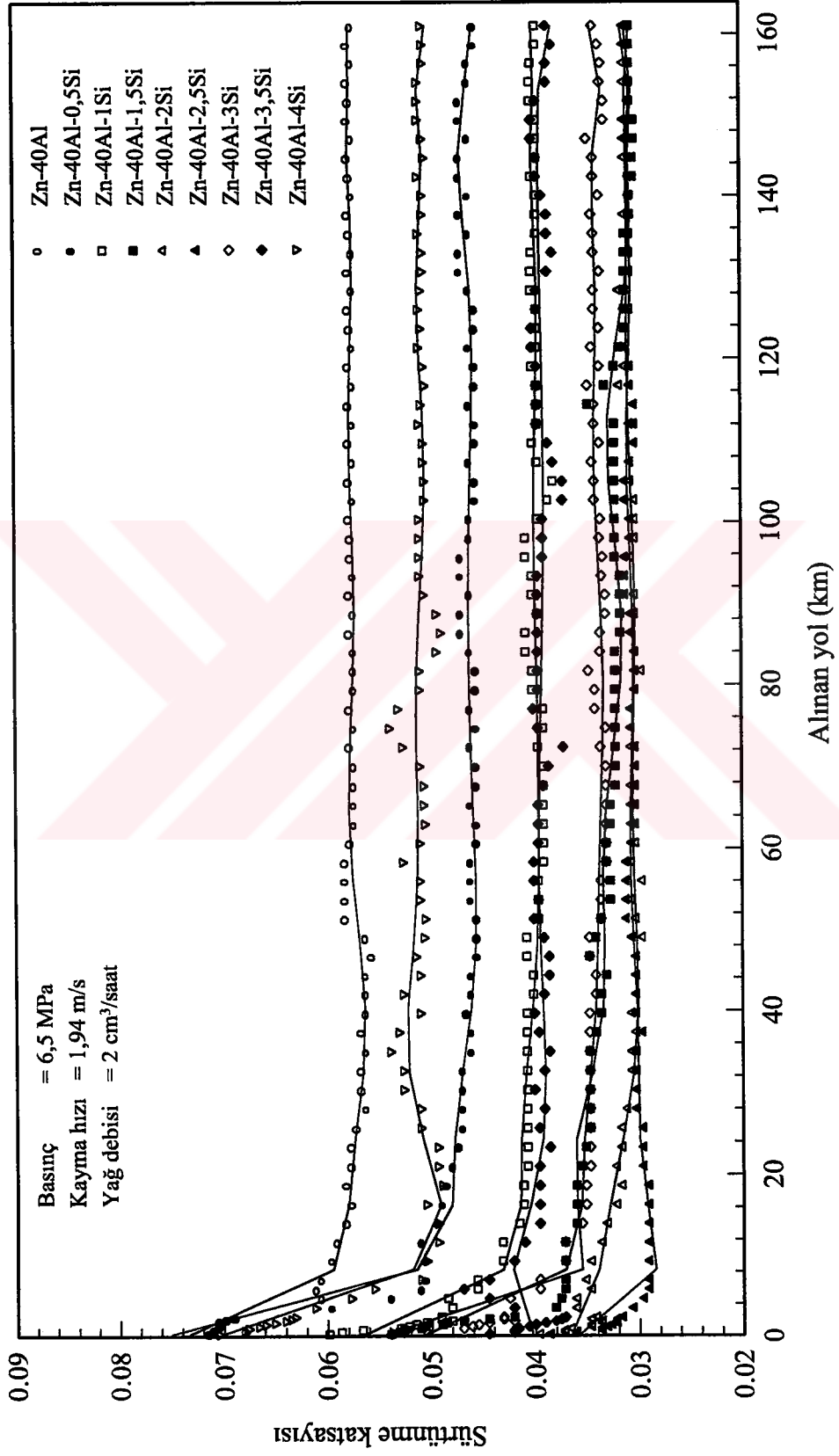
Şekil 18. Isıl işlem görmüş durumdaki alaşımların fiziksel ve mekanik özelliklerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler

3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylelerinden Elde Edilen Bulgular

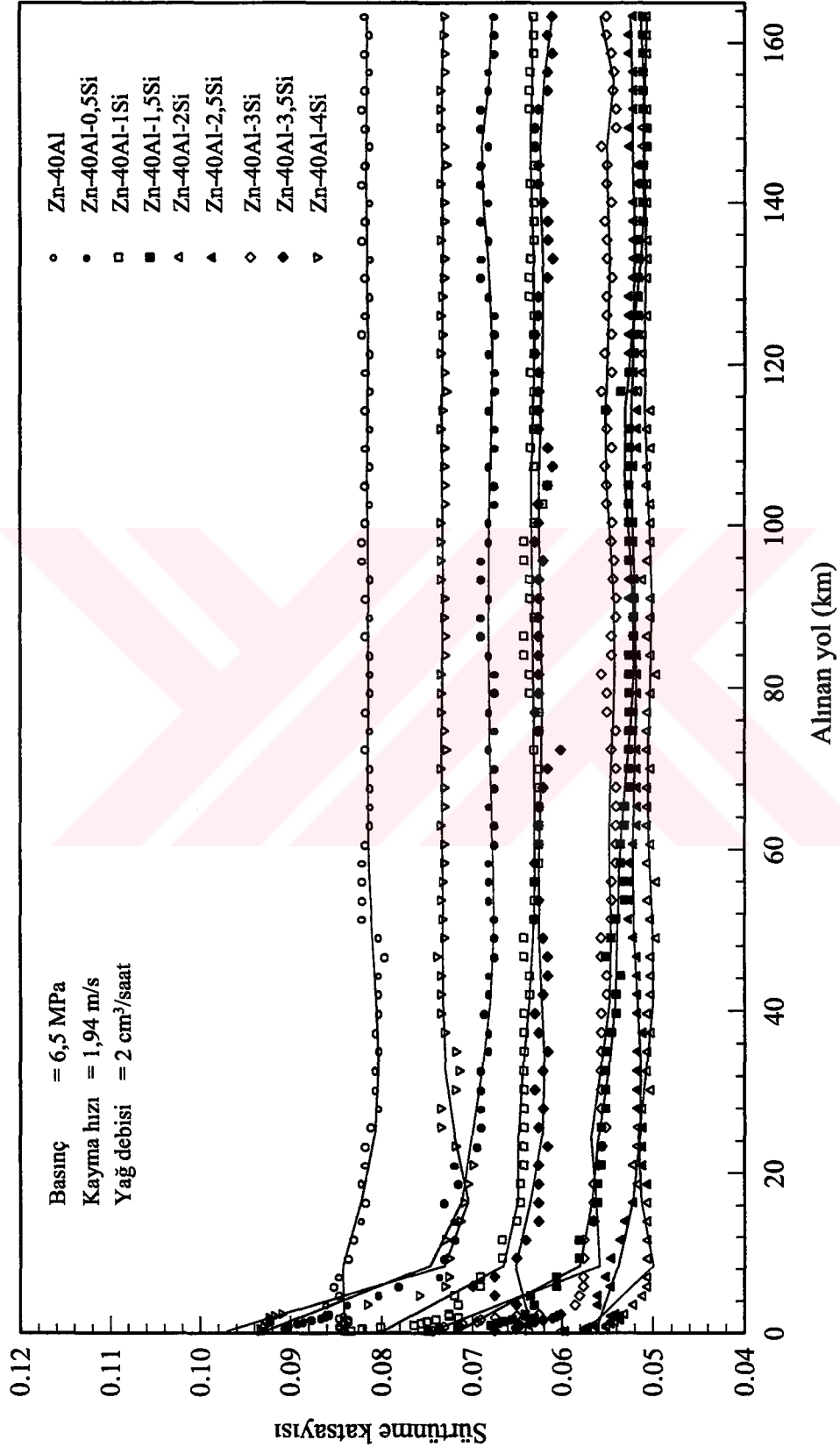
Dökülmüş durumdaki alaşımların sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler Şekil 19'da, ısıtım işlem görmüş alaşımların sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler de Şekil 20'de verilmiştir. Bu şekillerdeki eğrilerden görüldüğü gibi, çalışmanın başlangıç döneminde sürtünme katsayısı aniden yükselerek en yüksek değere ulaşmakta, daha sonra hızlı bir şekilde azalarak kararlı hale gelmektedir. Kararlı çalışma durumunda dökülmüş durumdaki alaşımlar içerisinde en düşük sürtünme katsayısı (0,0305) Zn-40Al-1,5Si, Zn-40Al-2Si ve Zn-40Al-2,5Si alaşımlarından, en yüksek sürtünme katsayısı (0,0575) ise ikili Zn-40Al alaşımından elde edilmiştir. Isıtım işlem uygulanan alaşımlar içerisinde en düşük sürtünme katsayısı (0,0505) Zn-40Al-1,5Si ve Zn-40Al-2Si alaşımlarından, en yüksek sürtünme katsayısı (0,0815) ise Zn-40Al alaşımından elde edilmiştir. Sürtünme katsayılarının değerleri karşılaştırıldığında ısıtım işleminin söz konusu alaşımların sürtünme katsayılarını arttırdığı sonucuna varılmaktadır.

Çalışma sıcaklığının sürtünme katsayısına etkisini göstermek amacıyla bu alaşımlar içerisinde en düşük ve en yüksek sürtünme katsayısına sahip olan Zn-40Al-2Si ve Zn-40Al alaşımlarının sürtünme katsayıları ile çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 21, 22, 23 ve 24'te verilmiştir. Bu şekillerden, sıcaklık ve sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğrilerin birbirine benzedikleri görülmektedir. Bu durum, söz konusu alaşımların sürtünme katsayıları arttıkça çalışma sıcaklıklarının arttığını, sürtünme katsayıları azaldıkça çalışma sıcaklıklarının azaldığını göstermektedir.

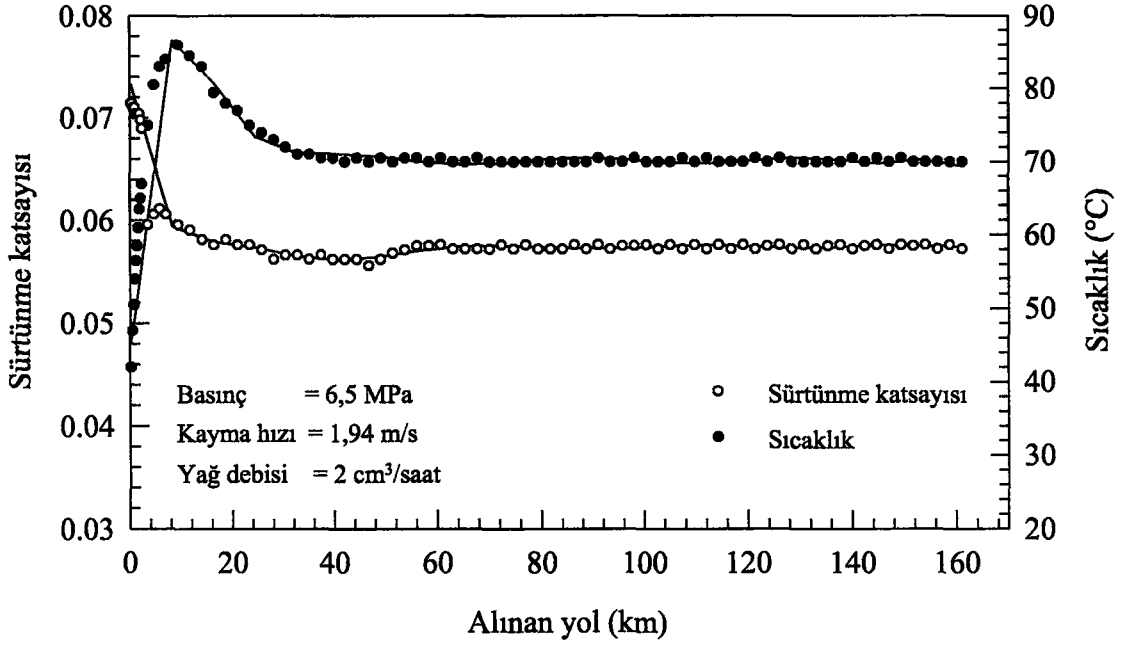
Aşınma nedeniyle alaşımlarda meydana gelen hacim kayıpları Tablo 7'de verilmiştir. Dökülmüş durumdaki alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler Şekil 25'de, ısıtım işlem görmüş durumdaki alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının yola göre değişimini gösteren eğriler ise Şekil 26'da görülmektedir. Bu şekillerde görüldüğü gibi, alaşımların hepsi rodaj olarak adlandırılan ilk aşınma devresinde yüksek bir aşınma hızı sergilemekte, ancak aşınma hızı artan çalışma süresi veya alınan yol ile azalarak sabit değere ulaşmaktadır.



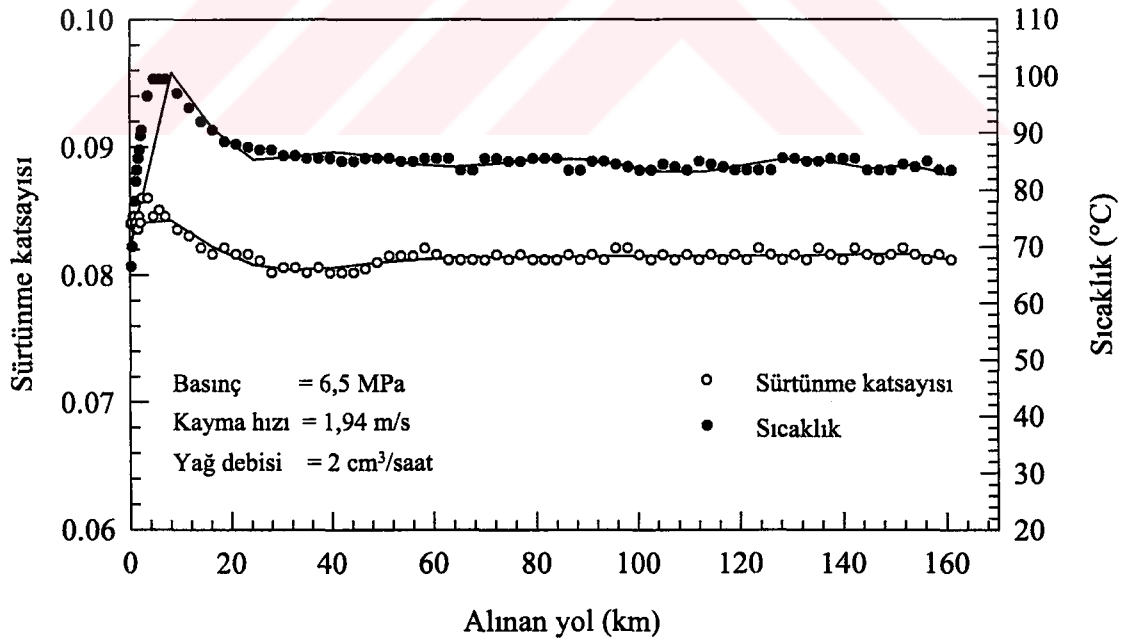
Şekil 19. Dökülmüş durumdaki alaşımların sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



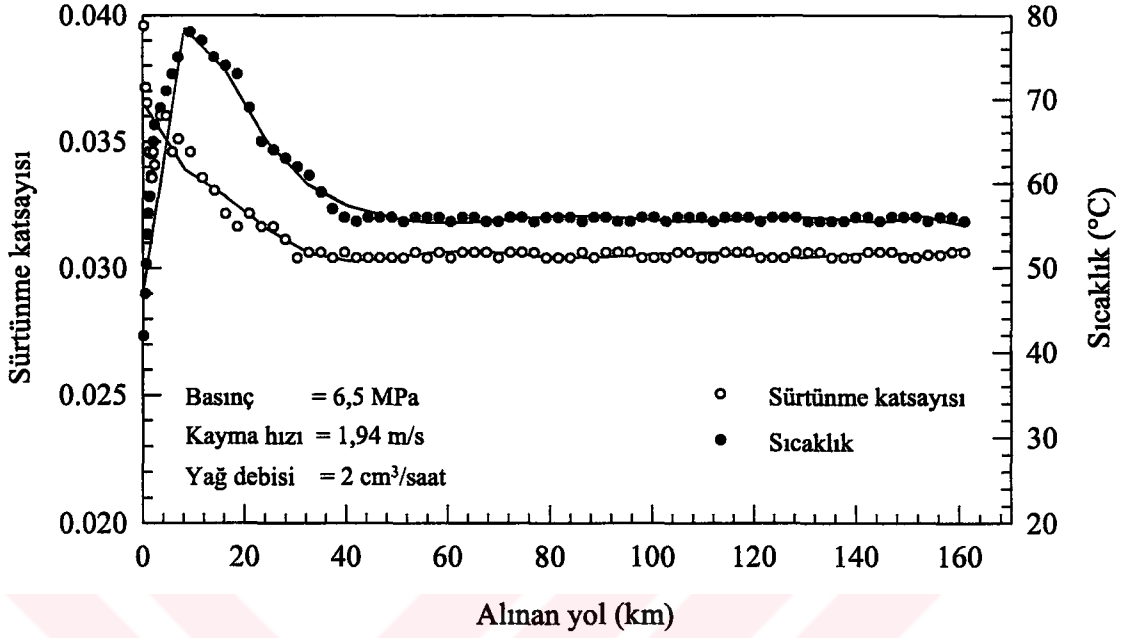
Şekil 20. Isıl işlem görmüş durumdaki alaşımların sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



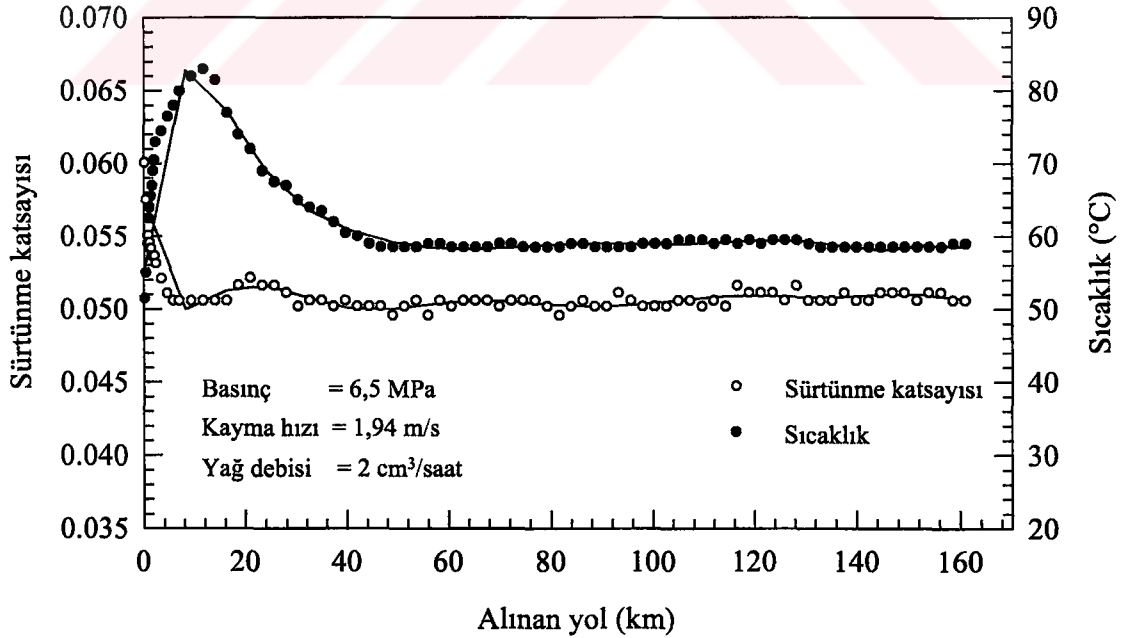
Şekil 21. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 22. Isıl işlem görmüş durumdaki Zn-40Al alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 23. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Si alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 24. Isıl işlem görmüş durumdaki Zn-40Al-2Si alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 7. Alaşımların aşınma deneyinden elde edilen sonuçlar

Alaşım	Isıl İşlem durumu	Alınan yol (km)								
		70	140	280	420	560	700	840	980	1120
		Hacim kaybı (mm ³)								
Zn-40Al	A	0,11	0,21	0,34	0,41	0,44	0,47	0,47	0,48	0,48
	B	0,41	0,71	0,84	0,91	0,94	0,97	0,97	0,98	0,98
Zn-40Al-0,5Si	A	0,09	0,13	0,24	0,29	0,34	0,35	0,36	0,36	0,36
	B	0,39	0,43	0,54	0,59	0,64	0,65	0,66	0,66	0,66
Zn-40Al-1Si	A	0,08	0,11	0,19	0,25	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29
	B	0,28	0,31	0,39	0,45	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49
Zn-40Al-1,5Si	A	0,07	0,10	0,16	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23
	B	0,22	0,25	0,31	0,36	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38
Zn-40Al-2Si	A	0,05	0,09	0,12	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18
	B	0,15	0,19	0,22	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28
Zn-40Al-2,5Si	A	0,06	0,10	0,14	0,17	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19
	B	0,18	0,22	0,26	0,29	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31
Zn-40Al-3Si	A	0,06	0,11	0,17	0,20	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24
	B	0,19	0,24	0,30	0,33	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37
Zn-40Al-3,5Si	A	0,07	0,11	0,18	0,21	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25
	B	0,21	0,25	0,32	0,35	0,38	0,38	0,39	0,39	0,39
Zn-40Al-4Si	A	0,07	0,11	0,18	0,22	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26
	B	0,24	0,28	0,35	0,39	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43

Not: Tablodaki A ve B harfleri alaşımların durumunu göstermektedir.

A: Dökülmüş

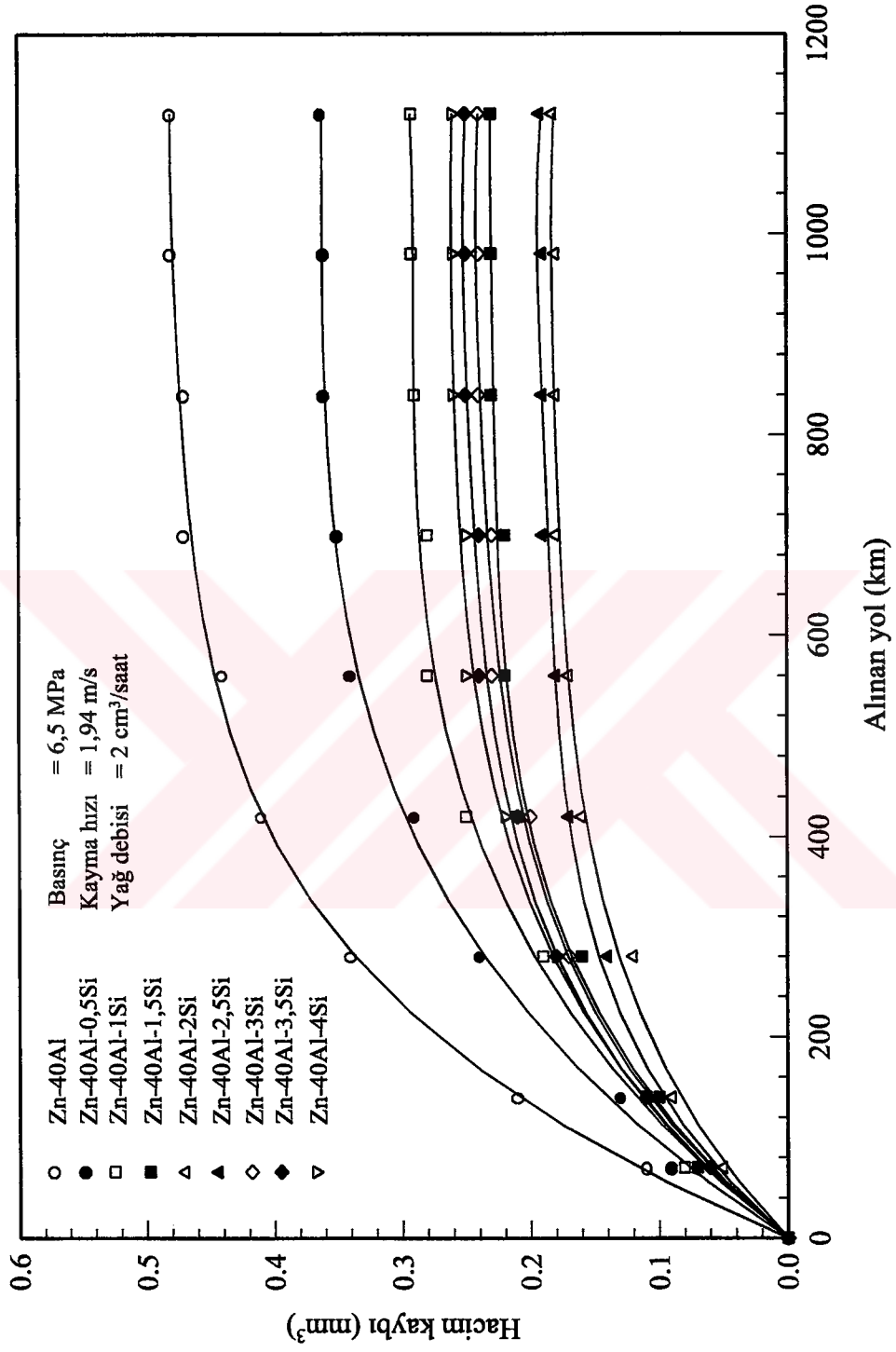
B: 375°C sıcaklıkta 32 saat homojenize edilmiş ve 100°C sıcaklıkta 2 saat yaşlandırılmış

İncelenen alaşımlar içerisinde en az aşınmanın Zn-40Al-2Si alaşımında en fazla aşınmanın da Zn-40Al alaşımında meydana geldiği görülmüştür. Silisyum katkısının ikili alaşımın aşınma direncini artırdığı ve dolayısıyla bu alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kayıplarının azaldığı görülmektedir. Silisyum katkısı yaklaşık %2 oranına kadar aşınma ile meydana gelen hacim kaybını büyük ölçüde azaltmakta, bu orandan sonra ise az da olsa artırmaktadır. Ayrıca, dökülmüş durumdaki alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının ısıtılmış işlem görmüş alaşımlarda meydana gelen hacim kaybından daha az olduğu görülmektedir. Silisyum oranının dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş alaşımların çekme dayanımı, sertlik, kararlı durumdaki sürtünme katsayısı ve 1000 km sonunda aşınma ile

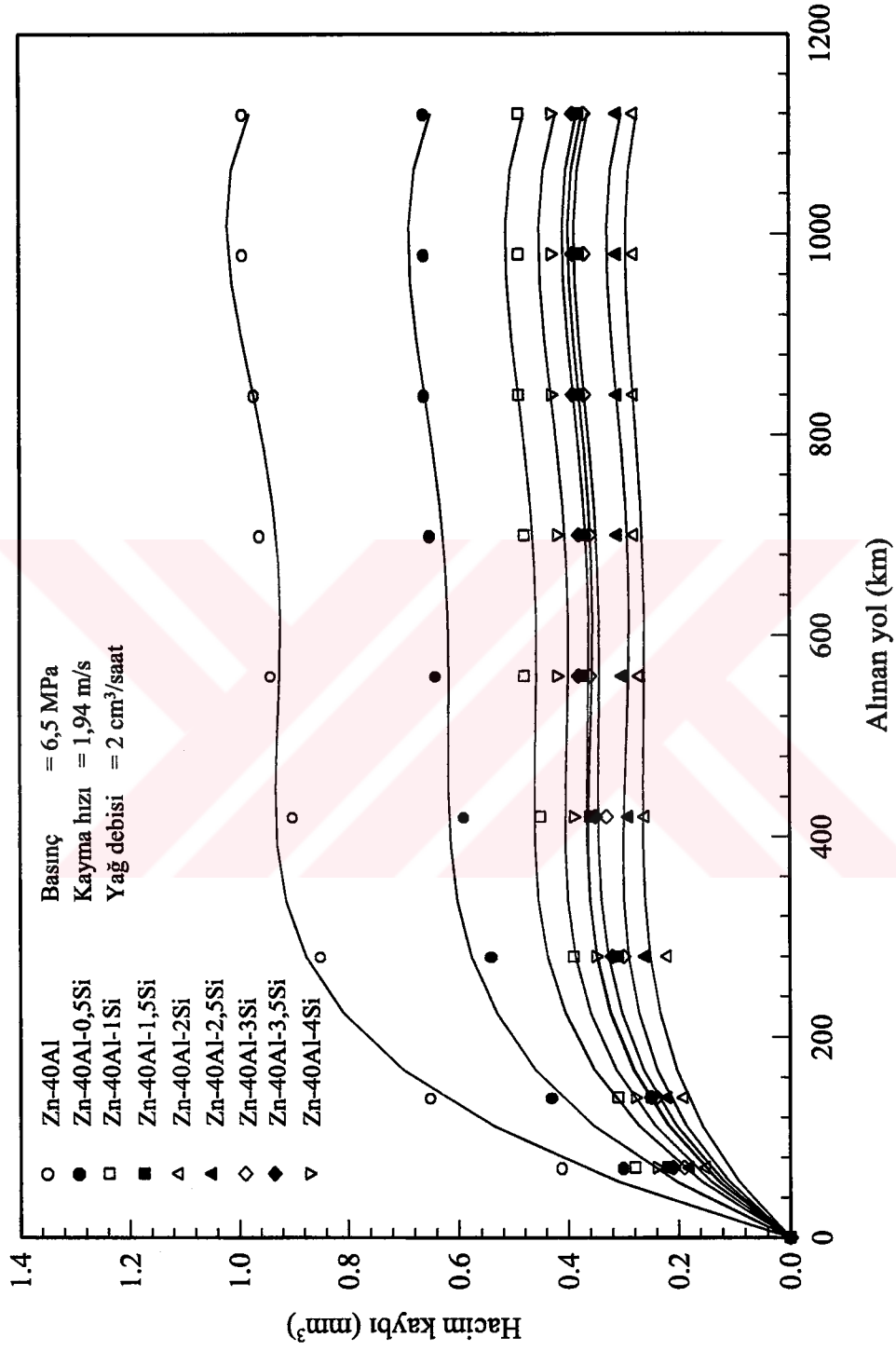
meydana gelen hacim kaybına etkilerini sergileyen eğriler sırasıyla Şekil 27 ve 28’de verilmiştir. Bu eğriler yaklaşık %2 silisyum oranında alaşımların çekme dayanımı ve sertliğin en yüksek sürtünme katsayısı ve hacim kaybının ise en düşük seviyeye düştüğünü göstermektedir.

3.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

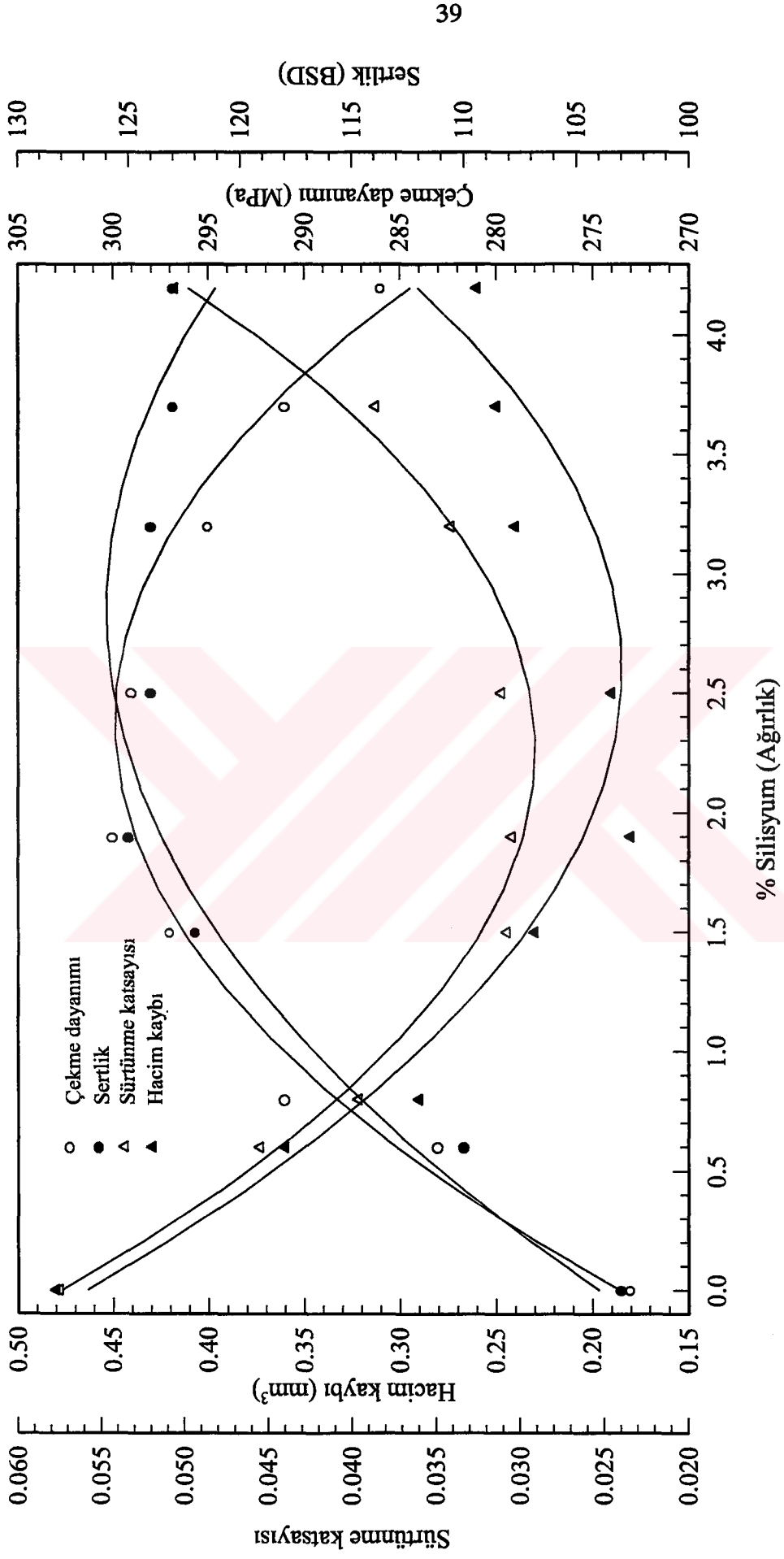
Aşınma deneyine tabi tutulan örneklerin yüzeylerinin birbirine benzedikleri görüldü. Bu nedenle, burada yalnız ikili Zn-40Al alaşımı ve yaklaşık %2 ve 4 oranında silisyum içeren üçlü alaşımların aşınma yüzeyinden elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Bu alaşımlardan dökülmüş durumdaki alaşımların aşınma yüzeylerini gösteren fotoğraflar alaşım sırasına göre Şekil 29, 30 ve 31’de, ısıl işlem görmüş durumdaki alaşımların aşınma yüzeylerini gösteren fotoğraflar ise alaşım sırasına göre Şekil 32, 33 ve 34’te verilmiştir. İkili Zn-40Al alaşımının aşınma yüzeyinde ince çizikler ve yüzeye sıvanmış durumda bulunan sürtünme tabakası görülmektedir, Şekil 29. Silisyum içeren alaşımların aşınma yüzeylerinde ise çiziklerden başka silisyum parçacıklarının ayrılması nedeniyle çukurların oluştuğu gözlenmiştir. Silisyum oranı arttıkça yüzeydeki çiziklerin ve çukurların hem derinleştiği hem de büyüdüğü görülmektedir, Şekil 29, 30 ve 31. Isıl işlem görmüş alaşımların aşınma yüzeyinde oluşan çiziklerin ise hem enine hem de derinlemesine büyüyerek daha belirgin hale geldikleri görülmektedir.



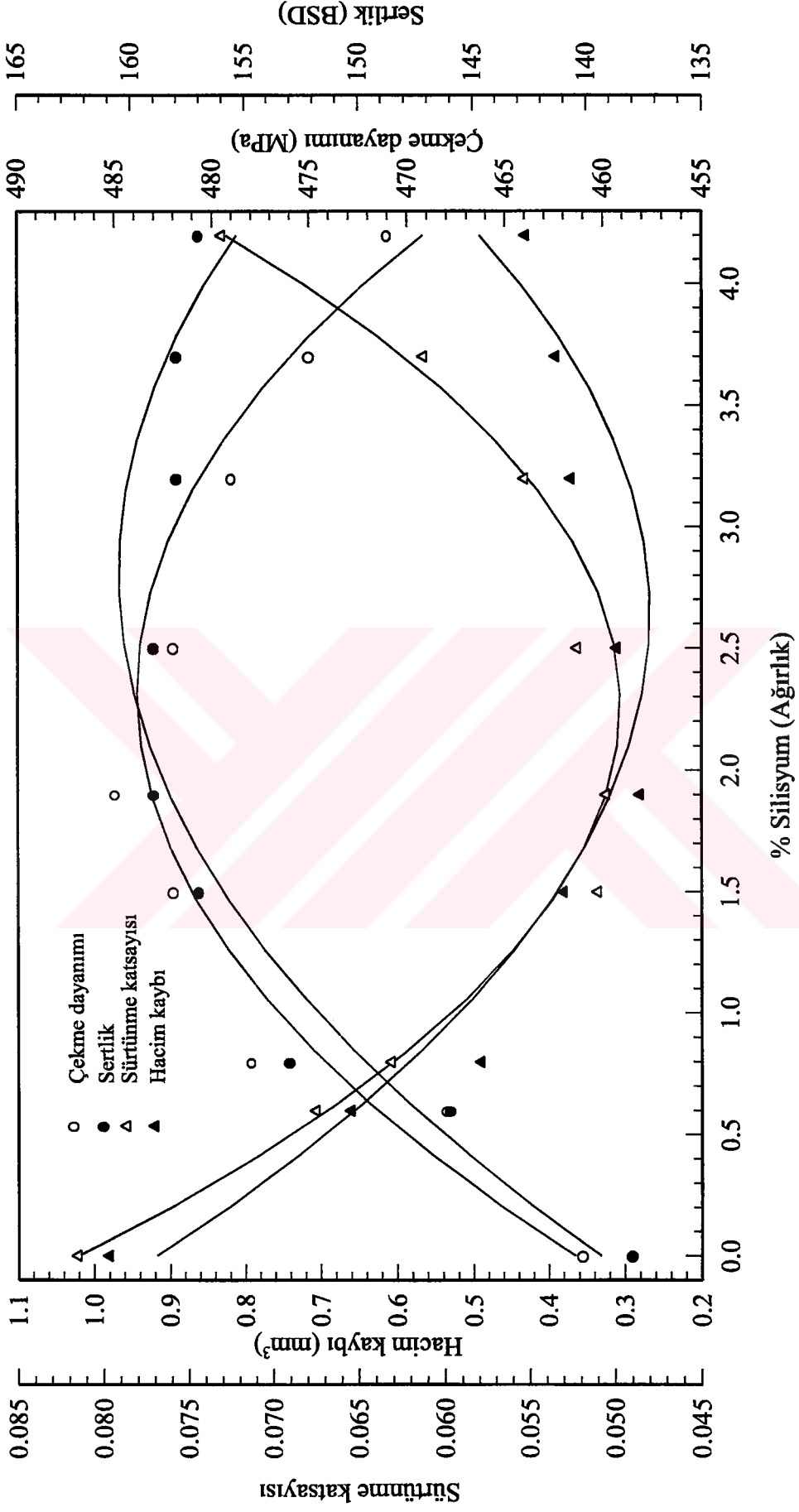
Şekil 25. Dökülmüş durumdaki alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



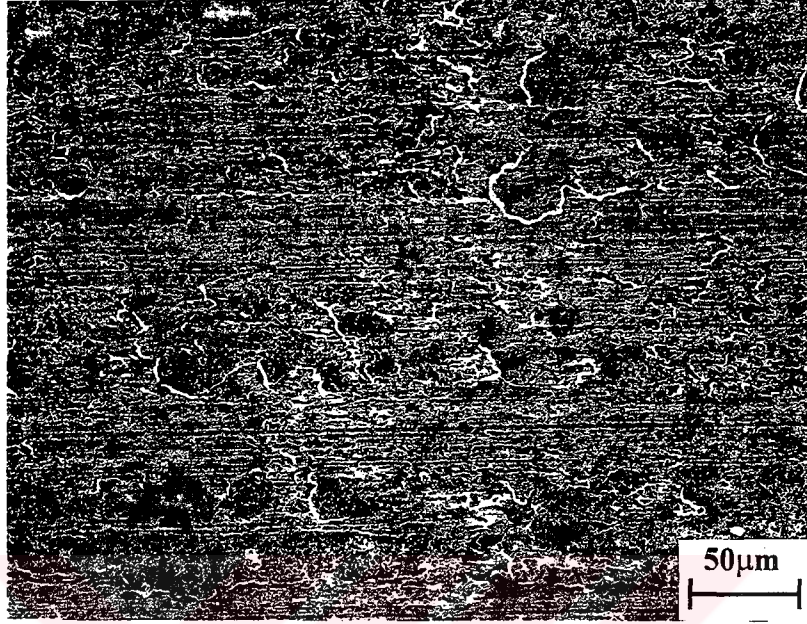
Şekil 26. Isıl işlem görmüş durumdaki alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler



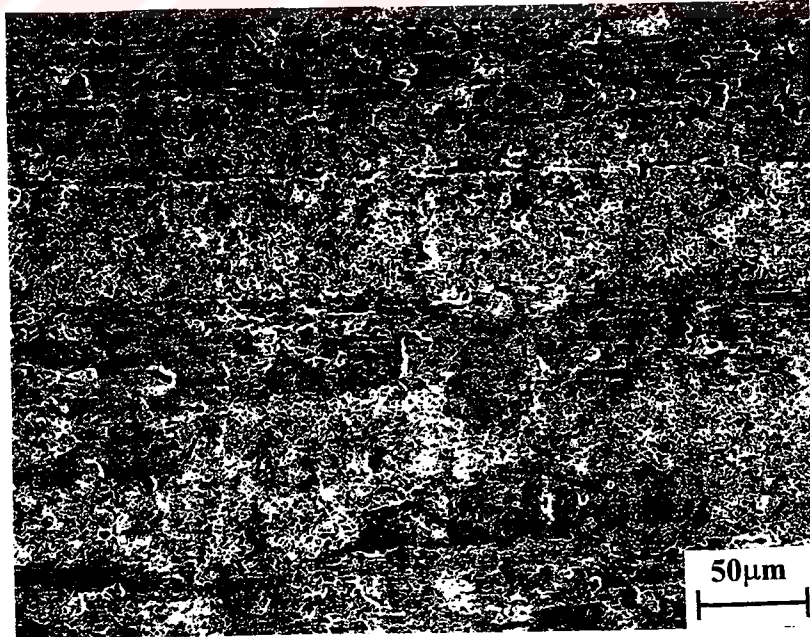
Şekil 27. Dökülmüş durumdaki alaşımların çekme dayanımı, sertlik, kararlı durumdaki sürtünme katsayısı ve bu alaşımlarda aşınma sonucu meydana gelen hacim kaybının silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler



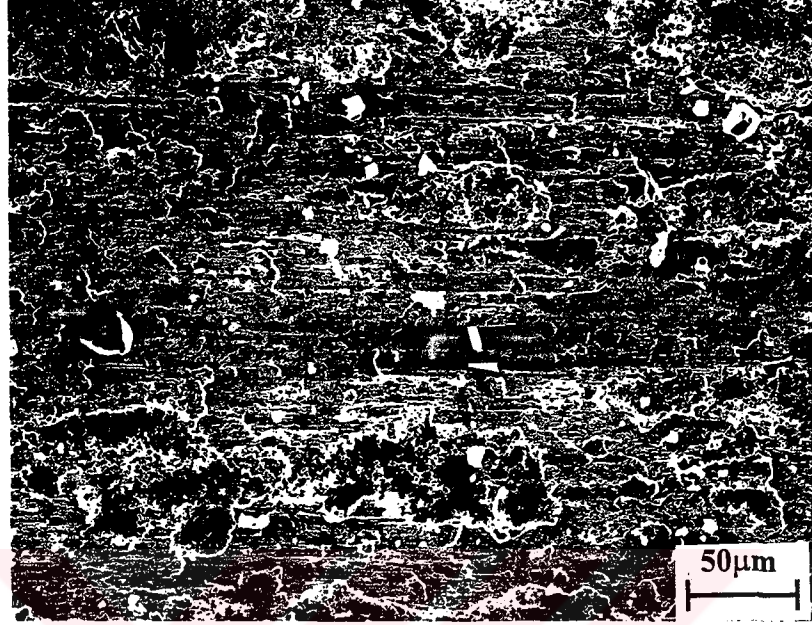
Şekil 28. Isıl işlem görmüş durumdaki alaşımların çekme dayanımı, sertlik, kararlı durumdaki sürtünme katsayısı ve bu alaşımlarda aşınma sonucu meydana gelen hacim kaybının silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler



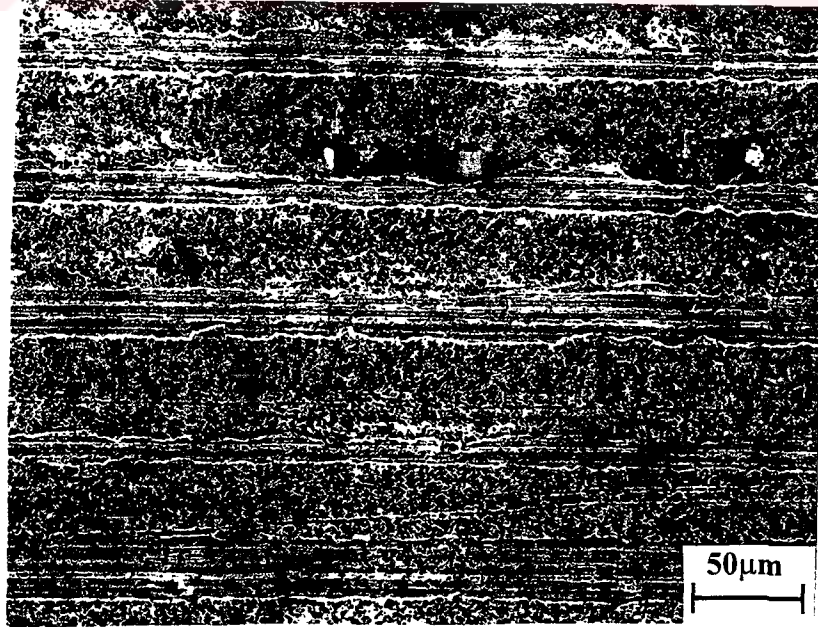
Şekil 29. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



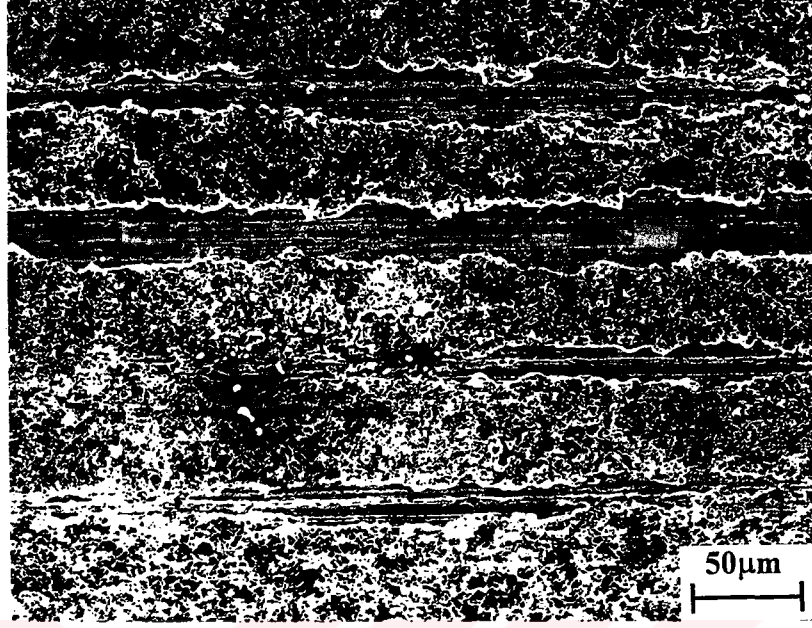
Şekil 30. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



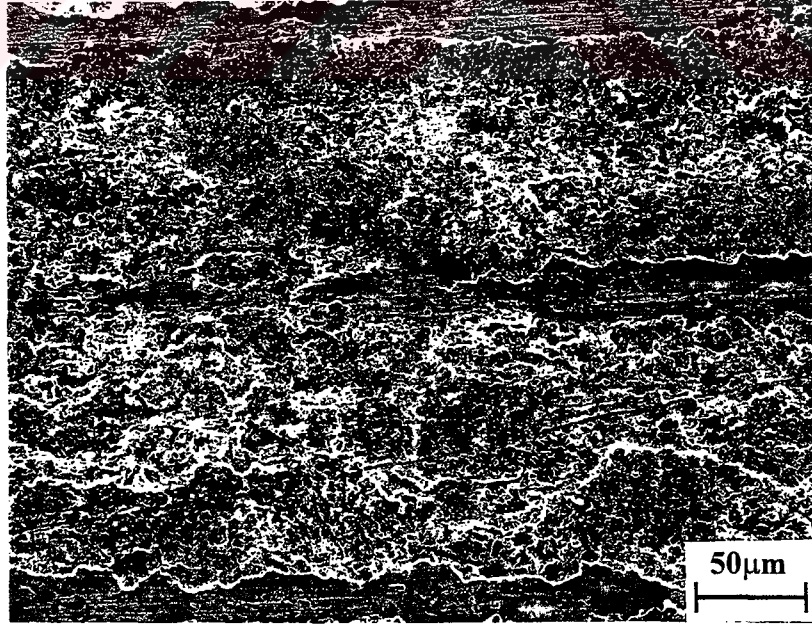
Şekil 31. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-4Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 32. Isıl işlem görmüş durumdaki Zn-40Al alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 33. Isıl işlem görmüş durumdaki Zn-40Al-2Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 34. Isıl işlem görmüş durumdaki Zn-40Al-4Si alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

4. İRDELEME

Dökülmüş durumdaki ikili Zn-Al alaşımının iç yapısının, alüminyumca zengin göbekli α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin η fazlarından, üçlü Zn-Al-Si alaşımlarının iç yapısının ise α dendritleri ve dendritler arası bölgede yer alan çinkoca zengin η fazı ile silisyum parçacıklarından oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca üçlü Zn-Al-Si alaşımlarındaki silisyum parçacıklarının büyüklük ve dağılımının silisyum oranına bağlı olduğu görülmüştür, Şekil 7-16. Şöyle ki, %2 oranına kadar silisyum içeren alaşımlardaki silisyum parçacıkları ince olup, homojen bir dağılım sergiledikleri ve bu oranının üzerine çıkılması durumunda ise hem büyüdükleri hem de düzensiz bir dağılım sergiledikleri gözlenmiştir. Önceki araştırmacılar tarafından da gözlenen bu durumun yapıdaki silisyum parçacıklarının bazılarının ötektik dönüşüm sonucunda, bazılarının da katılaşma sırasında oluşmasından kaynaklanmaktadır [6, 19, 28, 56]. Şöyle ki, ötektik dönüşüm sonucunda oluşan silisyum fazı homojen bir dağılım sergilerken, katılaşma sırasında oluşan birincil silisyum parçacıkları düzensiz bir dağılım sergilemektedir [44, 50, 57]. Ötektik dönüşüm ürünü olan ince silisyum parçacıklarının yapı içerisindeki homojen dağılımı ötektik dönüşümün katılaştıran alaşım içerisinde hemen hemen her bölgede meydana gelmesinden, ötektik dışı iri silisyum parçacıklarının düzensiz dağılımı ise bunların yoğunluğunun düşük olması nedeniyle sıvı faz içerisinde yüzerek yüzeye çıkmasından veya yüzeye yakın bölgelerde toplanmasından kaynaklanmış olabilir.

Uygulanan çözündürme ve yaşlandırma işlemi sonunda alaşımların dendritik yapısının ortadan kalkarak bunların yerini taneli yapıların aldığı gözlenmiştir, Şekil 12-16. Ayrıca ısı işlem sonunda α ve η fazlarının büyük ölçüde incelendiği, ancak silisyum parçacıklarında önemli bir değişimin meydana gelmediği görülmüştür. Bu durum difüzyonun kontrol ettiği faz dönüşümlerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, çözündürme ve su verme işlemi sonucunda aşırı doymuş katı çözelti oluşmakta, aşırı doymuş katı çözeltinin yaşlandırılması sırasında da çökeltmeler meydana gelmektedir. Bu çökeltmeler veya dönüşümler sonucunda da daha düzenli yapılar oluşmaktadır. Söz konusu durum, önceki araştırmacılar tarafından da gözlenmiştir [19, 28, 52, 53, 58, 59].

Diğer taraftan alaşımların yoğunluğunun artan silisyum oranı ile azaldığı gözlenmiştir. Bu durumun silisyumun yoğunluğunun ikili Zn-Al alaşımının yoğunluğundan düşük olmasından kaynaklandığı bilinmektedir [44, 50, 57].

Bu çalışmada, ayrıca silisyum katkısının ikili Zn-Al alaşımlarının sertlik ve çekme dayanımını arttırırken, kopma uzamasını az da olsa azalttığı gözlenmiştir. Bu durum ilgili literatürde [6, 19, 28, 32] de belirtildiği gibi, silisyum parçacıklarının alaşımın matrisinden daha sert olmasından başka dislokasyon hareketini zorlaştırmasından kaynaklanmaktadır. Ancak silisyum oranının %2'yi geçmesi durumunda alaşımın sertlik ve çekme dayanımı artan silisyum oranı ile azalırken, kopma uzaması artma eğilimi göstermektedir, Şekil 17 ve 18. Bu durum alaşımların iç yapılarına ve özellikle silisyumun dağılım biçimine dayandırılarak açıklanabilir. Bilindiği gibi, silisyum içeren alaşımlarda silisyum fazı yaklaşık %2 oranına kadar yapıda sık ve homojen, bu oranın üzerinde ise düzensiz bir dağılım sergilemektedir [6, 28, 50, 57]. Yapı içerisindeki silisyum parçacıklarının sık olması ve homojen dağılması dislokasyon hareketinin zorlaşmasına yol açmaktadır. Bu nedenle %2'nin altında silisyum içeren alaşımlarda sertlik ve çekme dayanımı artan silisyum oranı ile artmaktadır. Silisyum oranının %2'yi geçmesi durumunda ise oluşan büyük boyutlu silisyum parçacıkları alaşım içerisinde belli konumlarda toplanmaktadır. Bu durum hem dislokasyon hareketi için engelsiz bölgeler oluşturmakta hem de dislokasyon hareketine karşı olan engel sayısının azalmasına yol açmaktadır

Diğer taraftan uygulanan ısı işlemin alaşımların çekme dayanımı ile sertliğini önemli ölçüde arttırırken, kopma uzamasını azalttığı görülmüştür. Bu durum da yaşlandırma sırasında aşırı doymuş α/α' katı çözültisi içerisinde küçük boyutlu çinkoca zengin fazların çökmesinden kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki, yaşlandırma sırasında oluşan bu çökeltiler alaşım içerisinde bağdaşıklık gerilmeleri oluşturarak çarpılmalara neden olduğundan dislokasyon hareketini engellemektedir [1, 38]. Dislokasyon hareketinin engellenmesi de alaşımların sertlik ve çekme dayanımının artmasına yol açmaktadır.

Blok-disk esaslı aşınma düzeneğinde yapılan sürtünme deneylerinden elde edilen bulgular, hem dökülmüş hem de ısı işlem görmüş durumdaki alaşımların sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklığının çalışmanın başlangıcında hızlı bir şekilde artarak belirli tepe değerlerine eriştiklerini ve daha sonra düşmeye başlayarak kararlı değerlere ulaştıklarını göstermiştir, Şekil 21-24. Ayrıca, alaşımlardan elde edilen aşınma eğrilerinde de (Şekil 25, 26) alıştırma devresinde yüksek olan aşınma hızlarının zamanla azalarak genelde sabit değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu durum alıştırma veya rodaj devresi olarak

adlandırılan başlangıç aşamasında alaşımların yüzeylerinde yeterli kalınlıkta yağ filmi oluşmaması nedeniyle meydana gelen metal-metal temasından kaynaklanmış olabilir [60]. Nitekim sıcaklık ve sürtünme katsayısının bu devrede birbirine paralel olarak değişerek aynı anda tepe noktalarına ulaşmaları, bu devrede metal-metal temasının meydana geldiğini göstermektedir. Sıcaklık, sürtünme katsayısı ve aşınma hızlarının kararlı değerlere ulaşması ise alıştırma devresi sonucunda örneklerin yüzeyinde yeterli kalınlıkta yağ filminin oluşmasından kaynaklanmaktadır [60].

Diğer taraftan aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar, üçlü Zn-Al-Si alaşımlarının ikili Zn-40Al alaşımından daha üstün aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonuç söz konusu alaşımların iç yapısında bulunan yük taşıyıcı sert silisyum parçacıklarına ve bu parçacıkların dağılım biçimine dayandırılarak açıklanmaktadır [6, 19, 61-63]. Şöyle ki, yapıdaki sert silisyum parçacıkları yatağa gelen yükü taşıırken yumuşak Zn-Al matrisi kaymayı kolaylaştırmaktadır.

Şekil 27 ve 28'de dökülmüş ve ısı işlem görmüş durumdaki alaşımların çekme dayanımı, sertlik, kararlı durumdaki sürtünme katsayısı ve bu alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının silisyum oranına göre değişimini gösteren eğrilerde, alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının %2 silisyum oranına kadar artan silisyum oranı ile azaldığı, bu oranın üzerinde ise artan silisyum oranı ile arttığı görülmektedir. Bu durum silisyumun alaşımların aşınma davranışı üzerindeki etkisinin sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklere olan etkisinin tamamen tersi olduğunu göstermektedir. Alaşımların aşınma davranışı özellikle yetersiz yağlama durumunda iç yapılarına bağlıdır. Başka bir deyişle yetersiz yağlama durumunda malzemelerin aşınma davranışının yapı, sertlik ve çekme dayanımına bağlı olduğu söylenebilir [6, 15]. Nitekim dökülmüş ve ısı işlem görmüş durumda en yüksek sertlik ve çekme dayanımına sahip olan Zn-40Al-2Si alaşımında meydana gelen toplam aşınma miktarının, sertlik ve çekme dayanımı en düşük olan Zn-40Al alaşımında meydana gelen aşınma miktarından daha az olması bu görüşü doğrulamaktadır. Söz konusu durum ilgili literatürde [6, 64, 65] belirtilen gözlemlerle de uyum içerisindedir.

İkili Zn-40Al alaşımı ile üçlü Zn-Al-Si alaşımlarının kararlı çalışma durumundaki sürtünme katsayılarının 0,0305-0,0815 değerleri arasında değiştiği ve söz konusu alaşımların bu devredeki sürtünme katsayıları arttıkça aşınma miktarlarının da arttığı gözlenmiştir, Şekil 27,28. Bu devrede, dökülmüş durumdaki alaşımlarda en düşük aşınma miktarı sürtünme katsayısı en düşük (0,0305) olan Zn-40Al-2Si alaşımından, en yüksek

aşınma miktarı ise sürtünme katsayısı 0,0575 olan Zn-40Al alaşımından elde edilmiştir. Isıl işlem görmüş durumdaki alaşımlarda ise en düşük aşınma miktarını, sürtünme katsayısı en düşük (0,0505) olan Zn-40Al-2Si alaşımı, en yüksek aşınma miktarını da sürtünme katsayısı 0,0815 olan Zn-40Al alaşımı sergilemiştir. Bu sonuçlar, malzemelerin sürtünme katsayısı azaldıkça aşınma direncinin arttığını göstermektedir. Bu durum, önceki araştırmacılar [64-66] tarafından da gözlenmiştir.

Isıl işlem görmüş alaşımların sertlik ve çekme dayanımı dökülmüş durumdaki alaşımların söz konusu değerlerinden daha yüksek olmasına karşın, bu alaşımlarda dökülmüş durumdaki alaşımlara göre daha fazla aşınma meydana geldiği görülmüştür. Bu durum sertlik ve çekme dayanımının alaşımların aşınma davranışlarını belirlemede yeterli bir ölçü olmadığını göstermektedir. Nitekim metalik malzemelerin aşınma davranışının mekanik özelliklerinden başka iç yapı ve aşınma yüzeylerinde oluşan oksit tabakası ile yağ filmine de bağlı olduğu ileri sürülmektedir [67-69]. Çinko esaslı yatak alaşımları genelde biri sert, diğeri yumuşak olmak üzere iki fazlı yapıya sahiptir. Sert olan alüminyum oksit tabakası ile silisyum parçacıkları yük taşıma görevi yaparken, yumuşak olan çinko oksit tabakası hem kaymayı kolaylaştırmakta hem de aşınma sonucunda yüzeylerden kopan parçacıkların malzemeye gömülmesini sağlamaktadır [2, 19, 57, 70].

Aşınma örnekleri üzerinde SEM ile yapılan incelemeler sonucunda hem ikili Zn-Al hem de üçlü Zn-Al-Si alaşımlarının aşınma yüzeylerinde sıvama ve yapışma sonucunda sürtünme tabakalarının meydana geldiği görülmüştür, Şekil 29-34. Bu durum söz konusu alaşımlardaki etkin aşınma mekanizmasının adhezyon ve sıvama olduğunu göstermektedir.

Yapılan inceleme ve değerlendirmeler sonucunda, dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumdaki üçlü Zn-Al-Si alaşımlarının ikili Zn-Al alaşımlarından çok daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

5. SONUÇLAR

1. Üçlü Zn-Al-Si alaşımlarının iç yapısı çinko esaslı ikili alaşımların iç yapısını oluşturan α ve η fazlarından başka, silisyum parçacıkları da içermektedir. Yaklaşık %2 oranına kadar silisyum içeren üçlü alaşımlarda silisyum parçacıkları sık ve homojen bir dağılım sergilerken, bu oranın üzerindeki alaşımlarda irileşerek düzensiz bir dağılım göstermektedir.
2. Çözündürme ve yaşlandırma işlemi çinko esaslı alaşımların dendritik yapısını ortadan kaldırıp, bunların yerine taneli yapı oluşturmaktadır. Ancak bu ısıl işlem silisyum parçacıkları üzerinde etkili değildir.
3. Silisyum katkısı çinko esaslı alaşımların hem mekanik hem de tribolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir.
4. Üçlü Zn-Al-Si alaşımlarının sertlik ve çekme dayanımı yaklaşık %2 silisyum oranına kadar artan silisyum oranı ile artmakta, bu oranın üzerinde ise artan silisyum oranı ile azalmaktadır. Bu alaşımların sürtünme katsayısı ve aşınma hızı ise yaklaşık %2 silisyum oranına kadar artan silisyum oranı ile azalmakta, bu oranın üzerinde ise artan silisyum oranı ile artmaktadır.
5. Ortalama sürtünme katsayısı azaldıkça çinko esaslı alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı azalmaktadır.
6. Uygulanan çözündürme ve yaşlandırma işlemi söz konusu alaşımların sertlik ve çekme dayanımını artırmasına karşın, sürtünme katsayısı ve aşınma ile meydana gelen hacim kaybını da arttırmaktadır.
7. Çinko esaslı alaşımların aşınma davranışı bunların kimyasal bileşim, iç yapı ve mekanik özelliklerinden başka yüzeylerinde oluşan sürtünme tabakalarına da bağlıdır. Bu alaşımlardaki etkin aşınma mekanizmasının adhezyon ve sıvanma olduğu görülmüştür.
8. İncelenen alaşımlar içerisinde Zn-40Al-2Si alaşımının en üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.

6. ÖNERİLER

1. Üretilen üçlü Zn-Al-Si alaşımlarından kaymalı yatak imal edilerek bunların statik ve dinamik yük altındaki tribolojik davranışlarının incelenmesi sonucunda yatak teknolojisi için yararlı bilgiler edinilebilir.
2. Monotektoid esaslı üçlü Zn-Al-Si alaşımlarından başka ötektoid esaslı üçlü Zn-Al-Si alaşımları da üretilip, özellikleri incelenerek tribolojik uygulamalar için uygun kimyasal bileşimler belirlenebilir.
3. Isıl işlemin çinko esaslı alaşımların yapı ve özelliklerine etkileri incelenerek üstün özellikler elde edebilmek için en uygun ısıl işlem yöntemi belirlenebilir.
4. Değişik bileşimlerde bir dizi dördü Zn-Al-Cu-Si alaşımı üretilip bunların yapı ve özellikleri incelenerek çeşitli mühendislik uygulamaları için en uygun kimyasal bileşim ve ısıl işlem belirlenebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Savaşkan, T., The Structure and Properties of Zinc-Aluminum Based Bearing Alloys, Ph. D. Thesis, University of Aston in Birmingham, 1980.
2. Calayag, T., Ferres, D., High-Performance, High-Aluminum Zinc Alloys for Low-Speed Bearings and Bushings, SAE Annual Conference, Paper no 820643, 1983, 2241-2251.
3. Gervais, E., Levert, H., Bess, M., The Development of a Family of Zinc-Based Foundry Alloys, Trans. Am. Foundrym. Soc., 88 (1980) 183-194.
4. Barnhurst, R.J., Zinc and Zinc Alloys, Metals Handbook, 10th Edition, vol.2, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1991, 527-542.
5. Gross, D.K., Zinc Alloys: Specifications and Processing, Society of Automotive Engineers, Paper no 87952, 1988, 1069-1075.
6. Savaşkan, T., Murphy, S., Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25Al-Based Alloys, Wear, 116 (1987) 211-224.
7. Prasad, B. K., Patwardhan, A. K., Yegneswaran, A. H., Dry Sliding Wear Characteristics of Some Zinc-Aluminum Alloys: a Comparative Study with a Conventional Bearing Bronze at a Slow Speed, Wear, 199 (1996) 142-151.
8. Jian, L., Laufer, E. E., Masounave, J., Wear in Zn-Al-Si Alloys, Wear, 165 (1993) 51-56.
9. Lyon, R., Engineering Applications of ZA Alloys, Proc. Second Conference on Material Engineering, 1985, London, 221-227.
10. Lyon, R., The Properties and Applications of ZA Alloys, The British Foundryman, (1986) 344-349.
11. Barnhurst, R. J., Zinc-Aluminum Alloy Design Manual for Continuous Rotation Bearings, Noranda Sales Corporation Ltd., Toronto, January 1998.
12. Gervais, E., Loong, C. A., New ZA in Die Casting, 11th International Pressure Die-Casting Conference, 19-22 June 1984, Lyon-France, 1-25.

13. Murphy, S., Solid-Phase Reactions in the Low-Copper Part of the Al-Cu-Zn System, Zeitschrift Metallkunde, 71 (1980) 96-102.
14. Zhu, Y., Yan, B., Huang, W., Bearing Wear Resistance of Monotectoid Zn-Al Based Alloy (ZA-35), J. Mater. Sci. Technol., 11 (1995) 109-113.
15. Wakefield, E.C., Copper-Aluminium-Zinc Alloy Excels in Tough Conditions, Design Engineering, (1973) 1-4.
16. Mihaichuk, W., Zinc-Alloy Bearings Challenge the Bronzes, Machine Design, 53, 28 (1981) 133-137.
17. Radden, T., Zinc Alloy Bearing Down on Bronze Territory, Canadian Mining Journal, (1986) 58-59.
18. Lamberigts, M., Walmag, G., Coutsouradis, D., Delneville, P., Meeus, M., Friction and Ductility Behaviours of a High Strength Zinc Foundry Alloys, AFS Transactions, (1985) 569-578.
19. Murphy, S., Savaşkan, T., Comparative Wear Behaviour of Zn-Al-Based Alloys in an Automotive Engine Application, Wear, 98 (1984) 151-161.
20. Givertz, A. C., Zinc Casting Alloys-A Comparative Properties Analysis, Society of Automotive Engineers, Paper no 871953, 1988, 104-106.
21. Barnhurst, R.J., Bearing Design Manual, Noronda Sales Corporation Ltd., Toronto, January, 1988.
22. Goodwin, F.E., Ponikvar, A.L., Engineering Properties of Zinc Alloys, International Lead Zinc Research Organization Inc., 3rd Edition-Revised, U.S.A., January, 1989.
23. Kara, Ö., Küçükömeroğlu, T., Savaşkan, T., Döküm Parametrelerinin ZnAl40 Alaşımlarının Yapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Metal Makina, 88 (1997) 66-72.
24. Calayag, T., Zinc Alloys Replace Bronze in Mining Equipment Bushings and Bearings, Mining Engineering, (1983) 727-728.
25. Geng, H., Ma, J., Friction and Wear of Al-Zn-Pb Bearing Alloy, Wear, 169 (1993) 201-207.
26. Durman, M., Murphy, S., Precipitation of Metastable ϵ -Phase in a Hypereutectic Zinc-Aluminium Alloy Containing Copper, Acta Metall. Mater., 39, 10 (1991) 2235-2242.

27. Ma, T., Chen Q.D., Li, S.C., Wang, H.M., Effect of Mn on Lubricated Friction and Wear properties of Zn-Al Alloy, Louyang Institute of Technology, Louyang, People's Republic of China, 1990.
28. Lee, P.P., Savaşkan T., Laufer, E., Wear Resistance and Microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu Alloys, Wear, 117 (1987) 79-89.
29. Murphy, S., Savaşkan, T., Wheeldon, J. K., Rhecast Zinc-Aluminium Based Alloys, International Congress on Metals Engineering, 15-16 September 1981, University of Aston, Birmingham, Casting and Foundry Technology, Preprint Volume 7.
30. Mihaichuk, W., Bess, M. L., The ZA Die Casting Alloys, Society of Automotive Engineers, Paper no 860556, 1986, 560-568.
31. Prensikov, A. A., Gorbon, Y. A., Chervyakova, V. V., The Aluminum-Zinc Phase Diagram, Russian Journal of Physical Chemistry, 35, 6 (1961) 632-633.
32. Savaşkan, T., Murphy, S., Decomposition of Zn-Al Alloys on Quench-Aging, Material Science and Technology, 6 (1990) 695-703.
33. Zhu, Y., Murphy, S., A General Rule of Decomposition Reaction in Supersaturated Zn-Al Based Alloys, Chin. J. Met. Sci. Technol., 2 (1986) 105-116.
34. Zhu, Y.H., Torres, G.V., Pina, C., Complex Microstructural Changes in As-Cast Eutectoid Zn-Al Alloy, Journal of Material Science, 29 (1994) 1549-1552.
35. Zhu, Y.H., Phase Transformations of Eutectoid Zn-Al Alloys, Institute de Investigaciones en Materiales, UNAM Tongji University, China, 1994.
36. Zhu, Y.H., Savaşkan, T., Murphy, S., Phase Transformations in Quench-Aged Zn-Al-Si Alloys, Mat. Res. Soc. Proc., 21 (1984) 835-840.
37. Lyon. R., New Zinc Alloys with Wide Engineering Applications, Proc. Conference on Materials Engineering, University of Leeds, July 1984, 87-96.
38. Savaşkan, T., Torul, O., Çuvalcı, H., Çinko-Alüminyum Alaşımlarının İyçyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, 5. Ulusal Metalurji Kongresi, Ankara, Kasım 1988, Bildiriler Kitabı, Cilt II, 794-798.
39. Durman, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Basınçlı Döküm Alaşımlarının %0-%30 Al Bileşim Aralığında Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi, 5. Malzeme Sempozyumu, Nisan 1993, Denizli, 177-191.

40. Skenazi, A.F., Pelerin, J., Coutsouradis, D., Magnus, B., Meeus, M., Some Recent Developments in the Improvement of the Mechanical Properties of Zinc Foundry Alloys, Metall., 137, 9 (1983) 898-902.
41. Belkıs, H., Alaşım Elementlerinin ınko-Alüminyum Esaslı ZA8 Alaşımlarının Sertlik ve Darbe Direncine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996.
42. Kubel, E. J., Expanding Horizons for ZA Alloys, Metal Progress, 7 (1987) 51-57.
43. Barnhurst, R.J., Evaluation of the Riser Requirements for the ZA-27 Zinc-Base Alloy, Canadian Metallurgical Quarterly, 23, 3 (1988) 205-211.
44. Prasad, B. K., Microstructure, Mechanical Properties and Sliding Wear Characteristics of Zn-Based Alloys: Effects of Partially Substituting Cu by Si, Zeitschrift Metallkunde, 88 (1997) 929-933.
45. Prasad, B. K., Tensile Properties of Some Zinc-Based Alloys Comprising 27,5% Al: Effects of Alloy Microstructure, Composition and Test Conditions, Materials Science and Engineering, A245 (1998) 257-266.
46. Marczak, R. J., Ciach, R., Tribological Properties of the Concentrated Al-Zn Alloys, Proc. 1st Europe Tribology Congress, 1973, London, 223-227.
47. Prasad, B. K., Effect of Microstructure on the Sliding Wear Performance of a Zn-Al-Ni Alloy, Wear, 240 (2000) 100-112.
48. Prasad, B. K., Microstructure and Tensile Property Characterization of a Nickel-Containing Zinc-Based Alloy: Effects of Heat Treatment and Test Conditions, Materials Science and Engineering, A277 (2000) 95-101.
49. Savaşkan, T., Pürçek, G., ınko-Alüminyum Esaslı Alaşımların ve Bu Alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Aşınma Özellikleri, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences (Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi) TÜBİTAK, Cilt 24, Sayı 1 (2000) 25-34.
50. Prasad, B. K., Effects of Partially Substituting Copper by Silicon on the Physical, Mechanical, and Wear Properties of a Zn-37,5% Al-Based Alloy, Materials Characterization, 44 (2000) 301-308.
51. Pürçek, G., ınko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.

52. Prasad, B. K., Effects of Heat Treatment on the Partially Lubricated Sliding Wear Behaviour of a Zinc-Based Alloy, Materials Transactions, JIM, 40, 7 (1999) 578-585.
53. Prasad, B. K., Influence of Heat Treatment on the Physical, Mechanical and Tribological Properties of a Zinc-based Alloy, Zeitschrift Metallkunde, 87 (1996) 226-232.
54. Barnhurst, R.J., Farge, J.C., A Study of the Bearing Characteristics of Zinc-Aluminum (ZA) Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 27, 3 (1988) 225-233.
55. Turhal, Ş., Soğuma Hızının Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Yapı ve Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.
56. Zhu, Y., Phase Equilibria in Zn-Al-Cu-Si System at 285°C, Chin. J. Met. Sci. Technol., 5 (1989) 113-118.
57. Prasad, B. K., Effects of Silicon Addition and Parameters on Sliding Wear Characteristics of Zinc-Based Alloys Containing 37.5% Aluminium, Materials Transactions, JIM, 38, 8 (1997) 701-706.
58. Prasad, B. K., Patwardhan, A. K., Yegneswaran, A. H., Influence of Heat Treatment Parameters on the Microstructure and Properties of Some Zinc-Based Alloys, Journal of Materials Science, 31 (1996) 6317-6324.
59. Xu, X., L., Yu, Z. W., Huang, Y., Shi, Y. Q., Ji, Y. J., Ma, Y. Q., Hei, Z. K., Microstructural Development of Zn-40Al Alloy During Aging, Materials Science and Technology, 16 (2000) 270-274.
60. Halling, J., Principles of Tribology, 6th Edition, Macmillan Education Ltd., London, 1989.
61. Prasad, B. K., Venkateswarlu, K., Modi, O. P., Jha, A. K., Das, S., Dasgupta, R., 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.
62. Pürçek, G., Küçükömeroğlu, T., Savaşkan, T., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan İmal Edilen Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Mühendis ve Makina, 37 (1996) 35-41.
63. Savaşkan, T., Murphy, S., Zn-Al Esaslı Yatak Alaşımlarındaki Faz Dönüşümleri, 4. Ulusal Metalurji Kongresi, Ankara, Ekim 1986, Bildiriler Kitabı, Cilt I, 532-555.

64. Prasad, B. K., Patwardhan, A. K., Yegneswaran, A. H., Influence of Aluminium Content on the Physical, Mechanical and Sliding Wear Properties of Zinc-Based Alloys, Zeitschrift Metallkunde, 88 (1997) 333-338.
65. Modi, O. P., Yadav, R. P., Prasad, B. K., Jha, A. K., Dasgupta, R., Dixit, G., Effects of Swaging and Aluminium Content on the Microstructure and Mechanical and Sliding Wear properties of Zinc-Based Alloys, Materials Transactions, JIM, 39, 5 (1998) 582-586.
66. Pürçek, G., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Statik ve Dinamik Yük Altındaki Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
67. Prasad, B. K., Patwardhan, A. K., Dry Sliding Wear Response of a Modified Zinc-Based Alloy, Materials Transactions, JIM, 38, 3 (1997) 197-204.
68. Bowden, F. P., Tabor, D., Friction and Lubrication, Second Edition, Methuen & Co. Ltd., USA, 1967.
69. Iwai, Y., Hou, W., Honda, T., Yoneda, H., Wear Behaviour of High Tensile Strength Aluminium Alloys Under Dry and Lubricated Conditions, Wear, 196 (1996) 46-53.
70. Torabian, H., Pathak, J. P., Tiwari, S. N., Wear Characteristics of Al-Si Alloys, Wear, 172 (1994) 49-58.

ÖZGEÇMİŞ

14 Temmuz 1972 tarihinde Çanakkale'nin Bayramiç ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bayramiç'te tamamladı. Haziran 1994 tarihinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden mezun oldu. Yüksek lisansını Şubat 1998 tarihinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda tamamladı. 11 Ocak 1995-11 Ocak 1998 tarihleri arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü kadrosunda araştırma görevlisi olarak, 24 Mart-9 Eylül 1998 tarihleri arasında Erzurum İli Ilıca İlçesi Söğütlü Köyü Birleştirilmiş Sınıflı İlköğretim Okulu'nda sınıf öğretmeni olarak görev yaptı. 11 Eylül 1998 tarihinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'ne öğretim görevlisi olarak atandı ve halen bu görevini sürdürmektedir. Ayrıca, 1999-2000 Eğitim-Öğretim Yılı Bahar Yarıyılı'ndan itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda ikinci bir yüksek lisans yapmaktadır.

**TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANIZASYON MERKEZİ**