



**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI**

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DEĞİŞEN  
DÖKÜM ŞARTLARINDA  
MEKANİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**İbrahim ARSLAN**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği  
Anabilim Dalı  
Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK  
2019  
(Her Hakkı Saklıdır)**

**T.C.  
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DEĞİŞEN DÖKÜM ŞARTLARINDA  
MEKANİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İbrahim ARSLAN**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK**

**BAYBURT  
Mayıs, 2019**

**Her Hakkı Saklıdır**

## KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK danışmanlığında, 142001003 numaralı İbrahim ARSLAN tarafından hazırlanan “*Alüminyum Alaşımlarının Değişen Döküm Şartlarında Mekanik ve Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi*” konulu bu çalışma 29.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Başkan** Prof. Dr. Mehmet GAVGALI

İmza:

**Jüri Üyesi** : Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin ALIM

İmza:

**Jüri Üyesi** : Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK

İmza:

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

29.05.2019

Prof. Dr. Metin UÇURUM

Enstitü Müdürü V.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bu çalışmada şahsıma ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



  
İbrahim ARSLAN

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DEĞİŞEN DÖKÜM ŞARTLARINDA MEKANİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

İbrahim ARSLAN

Bayburt Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK

Bu çalışmada, Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 177 alüminyum döküm alaşımlarının (i) ilavesiz olarak, (ii) Al5Ti1B tane inceltici ilaveli olarak, (iii) Al5Ti1B tane inceltici ve Al10Sr modifiye edici ilaveli olarak, kum ve kokil kalıba dökümünde modifikasyon ve tane inceltme işlemlerinin, mikro yapıya, mekanik özelliklere ve aşınma özelliklerine etkileri incelenmiştir. Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 177 alaşımlarında tane inceltici olarak, alaşım içerisine ağırlıkça %0,2 Ti etki edecek şekilde Al5Ti1B mastır alaşımı ve ağırlıkça %0,2 Sr etki edecek şekilde Al10Sr mastır alaşımı kullanılmıştır. Sözü geçen mastır alaşımlarının ve döküm yönteminin yukarıdaki döküm alaşımlarının mikroyapısına, mekanik özelliklerine ve aşınma özelliklerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Alüminyum alaşımlarının, döküm öncesi sıvı metal temizlik ölçümleri Düşürülmüş Basınç Testi (Reduced Pressure Test-RPT) ile kontrol edilmiştir. Döküm deneylerinden elde edilen numunelere, mikro yapı incelemeleri, Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Electron Microscopy-SEM) incelemeleri, yoğunluk ölçümleri, aşınma ve sertlik testleri uygulanmıştır. Yapılan inceleme ve test sonuçlarına göre, alaşımların her birinde, tane inceltici ilavesi nedeni ile mikro yapılarında ortaya çıkan dentritik ve kaba yapının bozularak daha ince taneli bir yapı ortaya çıkardığı tespit edilmiştir. Modifiye edici ilavesi ise döküm içyapısında oluşan Si kristallerinin biçim ve boyutlarında değişikliğe sebep olduğu için alaşımların lamel şeklindeki yapısını fiberimsi yapıya dönüştürdüğü gözlenmiştir. Hem tane inceltici hem de modifiye edici ilaveleri sertlik artışına olumlu yönde etki etmiştir. Kum ve kokil kalıp kullanılarak üretilen alaşımlara TiB ve TiB-Sr ilavesi ile aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. Son olarak, kum kalıp yöntemi ile üretilen Etial 110 alaşımında en yüksek aşınma oranı elde edilirken, kokil kalıp yöntemi ile üretilen Etial 140-TiB-Sr alaşımında en düşük aşınma oranı elde edilmiştir.

**2019, 95 sayfa**

**Anahtar kelimeler:** Alüminyum, Kum Döküm, Kokil Döküm, Tane İnceltme, Aşınma, Modifikasyon

## ABSTRACT

MS Thesis

### DETERMINATION OF MECHANICAL AND WEAR PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS IN CHANGING CASTING CONDITIONS

İbrahim ARSLAN

Bayburt University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Lecturer PhD. Murat ÇOLAK

This study has examined impact of modification and grain refining processes in sand and die casting of Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 177 aluminum casting alloys - (i) with no additive, (ii) with Al5Ti1B grain refiner, (iii) with both Al5Ti1B grain refiner and Al10Sr modifier - on microstructure, mechanical and wear properties. Al5Ti1B master alloy as a grain refiner to effect by 0.2% Ti in weight and Al10Sr master alloy as a grain refiner to effect by 0.2% Sr in weight has been used in the Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 177 alloys. It is aimed at determining the effects of aforementioned master alloys and casting method on the microstructure, mechanical properties and wear properties of the above casting alloys. Before casting of aluminum alloys, liquid metal cleaning measurements has been controlled by Reduced Pressure Test (RPT). Microstructure investigations, Scanning Electron Microscopy (SEM) investigations, density measurements, wear and hardness tests have been applied to the samples obtained from casting experiments. According to the investigations and test results, in each alloy, it was determined that the dendritic and coarse structure formed in the microstructures due to the addition of grain thinner decays to form a finer grain structure. The addition of the modifier has caused changes in the shape and size of the Si crystals formed in the casting internal structure and it was observed that the lamellar structure of the alloys transformed into a fiber-like structure. Both grain refiner and modifier additions have had a positive effect on hardness increase. It has been determined that the wear rate is reduced by adding TiB and TiB-Sr to the alloys produced using sand and gravity mold. Finally, the highest wear rate was obtained in Etial 110 alloy produced by sand mold method, while the lowest wear rate was obtained in Etial 140-TiB-Sr alloy produced by gravity mold method.

**2019, 95 pages**

**Keywords:** Aluminum, Sand Casting, Die Casting, Grain Refining, Wear, Modification

## TEŞEKKÜR

*Hoş tut özünü, hoşluğa yönel,*

*Bu kubbede yalnız hoş söz kalacak...*

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan, her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve gelecekteki meslek hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli hocam, danışmanım, Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK'a teşekkürü bir borç biliyorum ve şükranlarımı sunuyorum.

Tez çalışmam boyunca ilgi, teşvik ve alakalarını esirgemeyen değerli hocalarım, Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin ALİM ve Dr. Öğr. Üyesi Salih Hakan YETKİN'e ayrı ayrı teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Aynı yollarda yürüdüğümüz, meslektaşlarım ve değerli arkadaşlarım Öğr. Gör. Uğur TURHAL ve Arş. Gör. Nurullah ÖKSÜZER'e maddi ve manevi bütün katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Yaptığımız bu çalışmanın bu aşamaya kadar gelmesinde emeği geçen, "*ne zaman istersen, biz de yardım edelim*" diyen, adını burada yazamadığım bütün arkadaşlarıma sevgilerimi ve teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Beni bu günlere sevgi ve saygı kelimelerinin anlamlarını bilecek şekilde yetiştirerek getiren ve benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen bu hayattaki en büyük şansım olan aileme sonsuz teşekkürler...

İbrahim ARSLAN

Mayıs / 2019

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	<b>10</b>
2.1 Alüminyum.....	10
2.1.1 Alüminyumun mekanik özellikleri.....	10
2.1.2 Alüminyumun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	11
2.2 Alaşım ve Alaşımlama .....	12
2.2.1 Alaşımlama teknikleri .....	12
2.2.2 Alüminyum alaşımları ve özellikleri.....	13
2.2.3 Alaşım elementlerinin alaşıma etkisi .....	14
2.3 Döküm Metodu ve Süreci.....	19
2.3.1 Kum kalıba döküm .....	20
2.3.2 Kokil kalıba döküm .....	21
2.4 Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltme .....	21
2.4.1 Titanyum ile tane inceltme .....	23
2.4.2 Titanyum ve bor ilavesi ile tane inceltme.....	24
2.5 Tane İnceltme Teknikleri .....	25
2.5.1 Karbür/borid teorisi .....	25
2.5.2 Peritektik reaksiyon teorisi .....	26
2.6 ALCAN Tane İnceltme Testi .....	27
2.7 Alüminyum-Silisyum Ötektik Modifikasyonu.....	28
2.8 Aşınma.....	30
2.9 Aşınma Mekanizmaları .....	31
2.9.1 Abrasiv aşınma .....	32
2.9.2 Adhesiv aşınma .....	33
2.9.3 Adhesiv aşınma testi yöntemleri .....	34



2.9.4	Yorulma aşınması.....	36
2.9.5	Korozyon aşınması .....	37
2.9.6	Aşınmayı etkileyen faktörler .....	37
2.10	Alüminyum Alaşımlarında Aşınma.....	39
<b>3.</b>	<b>MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>41</b>
3.1	Döküm Alaşımlarının Seçimi.....	41
3.2	Deney Parametrelerinin Belirlenmesi ve Deney Tasarımı .....	42
3.3	Model Tasarımı ve İmalatı .....	43
3.4	Kalıpların Hazırlanması .....	44
3.5	Ergitme ve Döküm İşlemleri .....	45
3.6	Sıvı Metalde Gaz Giderme ve Gaz Durumu Ölçümleri .....	47
3.7	Tane İnceltme Testlerinin Yapılması .....	48
3.8	Al-Si Alaşımlarında Ötektik Silisyumun Modifikasyonu .....	49
3.9	Dökümlerin İnceleme Yöntemleri.....	50
3.9.1	Metalografi işlemleri .....	50
3.9.2	Taramalı elektron mikroskop (SEM-EDS) analizi .....	51
3.9.3	Yoğunluk ölçümü çalışmaları .....	52
3.9.4	Sertlik incelemeleri.....	53
3.10	Aşınma Çalışmaları .....	53
<b>4.</b>	<b>ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>55</b>
4.1	Kimyasal Bileşim Uygunluğunun Kontrolü.....	55
4.2	Sıvı Metal Temizliğinin Kontrol Çalışması Sonuçları .....	57
4.3	Tane İnceltme Testlerinin Kontrolü .....	59
4.4	Al-Si Alaşımlarında Ötektik Silisyumun Modifikasyonu .....	60
4.5	Yoğunluk Ölçüm ve Gözenek Değerleri .....	61
4.6	Sertlik Deneyi Sonuçları .....	64
4.7	Mikroyapı İnceleme Sonuçları .....	66
4.8	SEM Görüntüleri Sonuçları.....	69
4.9	EDS Analiz Sonuçları .....	75
4.10	Aşınma ve Sürtünme Testi Sonuçları .....	79
<b>5.</b>	<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>88</b>
	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>90</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

$K_o$	: Aşınma oranı
$\Delta m$	: Ortalama kütle kaybı
$L$	: Kayma mesafesi
$F$	: Uygulanan yük
$\rho$	: Malzemelerin yoğunluğu
$H$	: Sertlik
$V$	: Aşınma hacmi

### Kısaltmalar

SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskop)
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Ayırımı Spektroskopi)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
RPT	: Reduced Pressure Test (Düşürülmüş Basınç Testi)
ETİAL	: ETİ Alüminyum
AFS	: American Foundrymen's Society (Amerikan Dökümcüler Topluluğu)
AlTiB	: Alüminyum Titanyum Bor mastır alaşımı
AlSr	: Alüminyum Stronsiyum mastır alaşımı
SiC	: Silisyum Karbür

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Döküm işleminin şematik diyagramı (Khan vd., 2017) .....	20
Şekil 2.2. Kum kalıba döküm süreci (Khan vd., 2017) .....	20
Şekil 2.3. Kokil kalıba döküm yönteminin döküm süreci (Khan vd., 2017) .....	21
Şekil 2.4. Tane incelticinin etkisi a) Tane inceltici ilavesiz b) Tane inceltici ilaveli (Kaufman ve Rooy, 2004).....	22
Şekil 2.5. Al-Ti faz diyagramı (Ibarra, 1999) .....	23
Şekil 2.6. Al-Ti peritektik reaksiyonuyla $\alpha$ -Al'nin çekirdeklenmesi (Ibarra, 1999) .	24
Şekil 2.7. Ölçülebilir peritektik reaksiyon için modifiye faz diyagramı (R.C. Adams, 1998) .....	27
Şekil 2.8. ALCAN testi kalıbı (Murty vd., 2002) .....	28
Şekil 2.9. Sodyum ve Stronsiyum değiştiricilerin zamanın bir fonksiyonu olarak etkinliği (Kaufman ve Rooy, 2004) .....	29
Şekil 2.10. Aşınma sistemi (DIN 50320) (Chattopadhyay, 2001) .....	31
Şekil 2.11. Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi (Yıldız ve Gür, 2006).....	32
Şekil 2.12. Abrasiv aşınma mekanizmaları: (a) mikro kesme, (b) kırılma, (c) yorulma ve (d) tane çıkarma (Stachowiak ve Batchelor, 2005) .....	33
Şekil 2.13. Pin-on-Disk adhesiv aşınma testi (Chattopadhyay, 2001).....	35
Şekil 2.14. Pin-on-Halka adhesiv aşınma testi (Chattopadhyay, 2001).....	35
Şekil 2.15. Pin-on-Plaka adhesiv aşınma testi (Hutchings ve Philip Shipway, 2017)36	
Şekil 2.16. Yorulma aşınma mekanizmasının modeli (Yıldız ve Gür, 2006).....	36
Şekil 2.17. Al-7072 alaşımının 1 MPa'da kuru kaymadan sonra 52100 çeliklere karşı (a) 0,2 m/s'de aşınma kalıntısının ve (b) aşınmış izin morfolojisi (Straffelini, 2015)40	
Şekil 3.1. Döküm deneylerinin yapıldığı model ölçüleri ve katı model görüntüsü ...	43
Şekil 3.2. Kokil kalıp, Kum kalıba döküm için model plakası görüntüsü .....	44
Şekil 3.3. Kalıplama işlem basamaklarından muhtelif görüntüler.....	45
Şekil 3.4. Çan tip elektrik direnç ergitme ocağı.....	46
Şekil 3.5. a) Sıvı metalin azot gazı ile yıkanması, b) Gaz giderme işleminin şematik görünüşü.....	47
Şekil 3.6. RPT sıvı metal gaz durumu ölçüm cihazı.....	48
Şekil 3.7. a) ALCAN tane inceltme test numunesi ölçüleri, b) İnceleme yüzeyi, c) Soğutma düzeneği (Murty vd., 2002) .....	48

<b>Şekil 3.8.</b> Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazı .....	51
<b>Şekil 3.9.</b> Yoğunluk ölçüm düzeneği .....	52
<b>Şekil 3.10.</b> Sertlik ölçümünden örnek görüntü .....	53
<b>Şekil 3.11.</b> Pin-on-Disk aşınma cihazı .....	53
<b>Şekil 4.1.</b> RPT test numunesi görüntü resimleri; a) gaz giderme işlemi öncesi, b) gaz giderme işlemi sonrası.....	57
<b>Şekil 4.2.</b> RPT test numunesi kesit görüntüsü sonuçları; a) gaz giderme işlemi uygulanmamış, b) gaz giderme işlemi uygulanmış temiz numune .....	58
<b>Şekil 4.3.</b> Azotla temizleme sonrası alaşımlardan alınan RPT kesit görüntüleri.....	58
<b>Şekil 4.4.</b> Al <sub>5</sub> Ti <sub>1</sub> B mastır alaşımı mikro yapı resimleri; a) 50x büyütme, b) 500x büyütme.....	59
<b>Şekil 4.5.</b> a) İlavesiz, b) Al <sub>5</sub> Ti <sub>1</sub> B mastır alaşımı ilave edilmiş Alüminyum alaşımının ALCAN testi ile elde edilen makro yapıları .....	60
<b>Şekil 4.6.</b> Al <sub>10</sub> Sr mastır alaşımı mikroyapı resmi .....	61
<b>Şekil 4.7.</b> a) Modifiye edici ilavesiz, b) Al <sub>10</sub> Sr ilave edilmiş Etial 140 alaşımı mikro yapı görüntüleri .....	61
<b>Şekil 4.8.</b> Mastır alaşımı ilavesiz olarak kum kalıba dökülen farklı alaşımlara ait mikroyapı görüntüleri.....	66
<b>Şekil 4.9.</b> Kum kalıba dökülen numunelere ait mikroyapı resimleri .....	67
<b>Şekil 4.10.</b> Etial 160 alaşımında element ilavesi ve döküm yönteminin mikroyapıya etkisi .....	69
<b>Şekil 4.11.</b> Etial 110 alaşımının ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli, kum kalıp ve kokil kalıp SEM görüntüleri.....	70
<b>Şekil 4.12.</b> Etial 140 alaşımının ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli, kum kalıp ve kokil kalıp SEM görüntüleri.....	72
<b>Şekil 4.13.</b> Etial 160 alaşımının ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli, kum kalıp ve kokil kalıp SEM görüntüleri.....	73
<b>Şekil 4.14.</b> Etial 177 alaşımının ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli, kum kalıp ve kokil kalıp SEM görüntüleri.....	74
<b>Şekil 4.15.</b> Etial 110 ilavesiz SEM-EDS analiz sonuçları .....	76
<b>Şekil 4.16.</b> Etial 160 TiB ve Sr ilaveli SEM-EDS analiz sonuçları.....	77
<b>Şekil 4.17.</b> Etial 177 TiB ilaveli SEM-EDS analiz sonuçları .....	78
<b>Şekil 4.18.</b> Etial 110 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği .....	79

<b>Şekil 4.19.</b> Etial 140 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği .....	80
<b>Şekil 4.20.</b> Etial 160 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği .....	81
<b>Şekil 4.21.</b> Etial 177 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği .....	82
<b>Şekil 4.22.</b> Alaşım türüne bağlı olarak sürtünme katsayısı sonuçları .....	83
<b>Şekil 4.23.</b> Kum ve kokil kalıp ile üretilen TiB ve TiB-Sr ilaveli Etial 110 alaşımlarının kayma mesafesi-sürtünme katsayısı grafiği .....	84
<b>Şekil 4.24.</b> Etial 110 alaşımının ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli 1,0 m/s kayma hızı ve 20 N yük altındaki aşınma oranı .....	85
<b>Şekil 4.25.</b> Etial 140 alaşımının ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli 1,0 m/s kayma hızı ve 20 N yük altındaki aşınma oranı .....	85
<b>Şekil 4.26.</b> Etial 160 alaşımının ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli 1,0 m/s kayma hızı ve 20 N yük altındaki aşınma oranı .....	86
<b>Şekil 4.27.</b> Etial 177 alaşımının ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli 1,0 m/s kayma hızı ve 20 N yük altındaki aşınma oranı .....	86

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1.</b> Alüminyumun önemli mekanik özellikleri (Al_Saadi ve Tunay, 2017)	11
<b>Çizelge 2.2.</b> Alüminyumun önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri (Yapıcı, 2012)	11
<b>Çizelge 2.3.</b> Dövme alüminyum alaşımları (Al_Saadi ve Tunay, 2017)	13
<b>Çizelge 2.4.</b> Alüminyum döküm alaşımları (Al_Saadi ve Tunay, 2017)	14
<b>Çizelge 2.5.</b> Tane inceltici mastır alaşımlar (Öksüzoğlu, 2018)	22
<b>Çizelge 2.6.</b> Potansiyel çekirdek bileşiklerinin özellikleri (R.C. Adams, 1998)	25
<b>Çizelge 3.1.</b> Deneylerde kullanılan alaşımların Etinorm standardına göre kimyasal bileşimleri (% Ağ.) (Eti Alüminyum, 2019)	41
<b>Çizelge 3.2.</b> Tez çalışmaları kapsamında belirlenen deney parametreleri	42
<b>Çizelge 3.3.</b> Deney parametrelerine uygun olarak yapılan döküm deneyleri	43
<b>Çizelge 4.1.</b> Döküm deneyleri kimyasal bileşim sonuçları (% Ağ.)	56
<b>Çizelge 4.2.</b> Döküm numunelerin yoğunluk ölçümü ve gözenek değerleri	62
<b>Çizelge 4.3.</b> Döküm deney numunelerine ait sertlik testi sonuçları	64

## 1. GİRİŞ

Alüminyum-Silisyum alaşımları; hafiflik, iyi mekanik özellikleri, yüksek mukavemet, yüksek ısı iletkenliği ve düşük ısıl genleşme özelliklerinden dolayı ve en önemlisi silisyum oranına bağlı olarak sıvı halde yüksek akışkanlıkları nedeniyle genellikle otomotiv parçalarının dökümünde ve havacılık uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Bu nedenle bu alaşımlarla yapılan dökümlerin kalitesinin ve mekanik özelliklerinin sürekli iyileştirilmesi gerekmektedir. Mekanik özellikleri etkileyen parametrelerden bir tanesi de mikroyapıdır. Mikroyapısal olarak Al-Si alaşımlarının, kabaca yumuşak ve sünek alüminyum fazı ile sert ve kırılğan iğnemi yapılı silisyum fazından meydana geldiği bilinmektedir. Ayrıca, alüminyum alaşımlarının özelliklerini geliştirmek için dökümhanelerde tane inceltme ve modifikasyon gibi işlemler yaygınca uygulanmaktadır.

Sıvı metale bir miktar Titanyum ilavesi, tane yapısında önemli ölçüde küçülme sağlamak ve alaşımın dökülebilirliğini artırmaktadır. Tane inceltici olarak kabul gören Titanyum (Ti) ve Bor (B) elementleri birlikte az miktarda alüminyuma ilave edildiğinde, hızlı bir şekilde ve önemli derecede tane inceltme etkisi göstermektedir. Tane inceltme mekanizması; sıvı alüminyum alaşımlarına genellikle ergitme potasında katılan tane incelticiler ergiyik içerisinde  $TiB_2$  ve  $Al_3Ti$  intermetalik bileşikler yolu ile heterojen çekirdeklenme merkezleri oluşturarak yapının daha ince taneli olmasında rol oynamaktadır (Bryant ve Fisher, 1993; Cooper vd., 2000, 2003; Quested, 2004; G. K. Sigworth ve Kuhn, 2007; Spittle, 2006). Tane inceltme yapılmış alüminyum dökümlerinde tane inceltme yapılmamış olanlara göre akıcılığın ve beslenebilirliğin arttığı, daha gözeneksiz ve homojen bir yapı oluştuğu, mukavemet, yorulma direnci, sızdırmazlık direnci ve aşınma direnci değerlerinin yükseldiği bilinmektedir (Yücel Birol, 2007a, 2008; Cooper vd., 2000, 2003; Quested, 2004; G. K. Sigworth ve Kuhn, 2007; Spittle, 2006).

Tane inceltme işlemlerinde, alüminyum dökümhanelerinde en yaygın olarak Al-Ti-B tipi mastır alaşımları, Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B, Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve Al<sub>11</sub>Ti<sub>1</sub>B oranlarındaki tane incelticiler tercih edilmektedir (Bryant ve Fisher, 1993; Cooper vd., 2000; Spittle, 2006).

Ötektik modifikasyonu; alüminyum silisyum temelli alaşımlarda doğası gereği kırılğan olan ötektik silisyum fazının yapısını geliştirerek mekanik özelliklerinin, çekme uzamasını geliştirmek için döküm alüminyum alaşımlarında uygulanan yaygın bir işlemdir (Dahle vd., 2005). Al-Si alaşımlarına Na, Sr, K, Rb, Cs, Li, Ca, Ba, Mg, La, P, Bi, Cd, Mn, Ni, Pb gibi alkali metallerin ilavesi ile yapı içerisindeki ötektik silisyum tanelerinin boyut ve dağılımlarının değişmesine modifikasyon denir. Modifikasyon işlemi element ilavesi ile olabileceği gibi, hızlı katılaştırma, katılma esnasında uygulanan vibrasyon, yüksek basınç etkisiyle ve ısı işlem ile küreleştirme sonucu da olabilmektedir. Döküm yapısının modifiye edilmesi ötektik Si yapısının lamelli yapıdan fiberimsi yapıya dönüşmüş olmasıdır (Kaufman ve Rooy, 2004; Kim vd., 2000; G. Sigworth, 1983). Modifiye işlemi için en pratik ve yaygın uygulama, element ilavesi ile modifikasyon işlemidir ve en etkili modifikasyon Na, Sr ve Sb ile yapılabilmektedir (Kim vd., 2000; G. Sigworth, 1983).

Endüstriyel uygulamalarda Na ve Sr'un düşük yoğunlukta güçlü etkileri vardır (Nogita, 2004; G. Sigworth, 1983). Ayrıca stronsiyumla modifiye edilen alaşımların yüzde uzama değeri ve dökülebilirlikleri sodyum ile modifiye edilen alaşımlardan daha yüksektir (G. Sigworth, 1983). Yapılan bir çalışmada; Sr ilavesinin sadece Si kristallerinin ötektik dönüşüme etkileri dışında  $\alpha$ -Al dentritlerinin yapısını da olumlu yönde değiştirdiği ve artan soğuma hızlarında etkinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Zhongwei ve Ruijie, 2010). Stronsiyum ilavesi genelde ağırlıkça %10 Sr içeren Al<sub>10</sub>Sr mastır alaşımları şeklinde sıvı alüminyuma katılmaktadır.

Bu çalışmada, Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 177 alüminyum döküm alaşımlarının (i) ilavesiz olarak, (ii) Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici ilaveli olarak, (iii) Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici ve Al<sub>10</sub>Sr modifiye edici ilaveli olarak, kum ve kokil kalıba dökümünde modifikasyon ve tane inceltme işlemlerinin, mikro yapıya, mekanik özelliklere ve aşınma özelliklerine etkileri incelenmiştir. Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 177 alaşımlarında tane inceltici olarak, alaşım içerisine ağırlıkça %0,2 Ti etki edecek şekilde Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B mastır alaşımı ve ağırlıkça %0,2 Sr etki edecek şekilde Al<sub>10</sub>Sr mastır



alaşımı kullanılmıştır. Sözü geçen mastır alaşımlarının ve döküm yönteminin yukarıdaki döküm alaşımlarının mikro yapısına, mekanik özelliklerine ve aşınma özelliklerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Alüminyum alaşımlar, döküm öncesi sıvı metal temizlik ölçümleri Düşürülmüş Basınç Testi (Reduced Pressure Test-RPT) ile kontrol edilmiştir. Döküm deneylerinden elde edilen numunelere, mikro yapı incelemeleri, Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Electron Microscopy-SEM) incelemeleri, yoğunluk ölçümleri, aşınma ve sertlik testleri uygulanmıştır. Bu sonuçlarla alaşımlar üzerinde, tane inceltmek ve modifiye etmek için kullanılan mastır alaşımlarının ve döküm yönteminin mikroyapıya, mekanik özelliklere ve aşınma özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Bu araştırmalar yapılırken incelenen bazı çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Mahmudi vd. (2006), ağırlıkça %0,15 Zr ilavesinin A319 alüminyum döküm alaşımının mekanik özellikleri ve aşınma direnci üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Döküm alaşımlarına bir çözelti ile farklı zamanlarda, 175 ila 235 °C sıcaklık aralığında yapay yaşlanma işlemi uygulamışlar ve daha sonra Zr içeren malzemenin mekanik özellikleri ve aşınma davranışını incelemişler ve hem döküm hem de yaşlandırılmış koşullarda ilavesiz A319 alaşımının özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Zr'nin az miktarda eklenmesinin, Al<sub>3</sub>Zr parçacıklarının alüminyum matris içinde çökmesine neden olduğunu göstermişlerdir. Zr ile A319 döküm alaşımı eklendikten sonra malzemenin aşınma direncinde artış gözlemlemişlerdir. Bunun Al<sub>3</sub>Zr fazının çökmesinin doğrudan bir sonucu olduğunu düşünmüşlerdir. Bu durum sadece alaşımın sertliğinde bir artışa neden olmakla kalmadığını, aynı zamanda malzemenin aşınma direncini de önemli ölçüde artırdığını rapor etmişlerdir (Mahmudi vd., 2006).

Elleuch vd. (2006), alüminyum esaslı alaşımların aşındırıcı kum parçacıkları ile temas halinde aşınma davranışını analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada kütle kaybının hareket mesafesine göre doğrusal değişimi tespit edilmiştir. Kum tipi, yük açısı ve hareket mesafesinin aşınma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Aşınma oranının yük açısına bağlı olarak doğrusal biçimde arttığını görmüşlerdir. Ayrıca standart çukur kumu yerine normalleştirilmiş aşındırıcı kum ile testler yapıldığında aşınma oranının hızlandığını fark etmişlerdir. Buna göre, sertlik ve aşınma arasında açık bir ilişki bulamadıklarını not etmişlerdir. Farklı alüminyum alaşımlarının ısıtma işlemlere aynı tepkiyi vermediklerini, 5xxx alüminyum alaşımlarının ısıtma işlem

sonrasında sertleşmeye bağlı aşınma direncini azaltmadığını ancak 7xxx alüminyum alaşımlarının aşınma direncini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, malzemenin aşınma direncinin, sertliğinden ziyade kimyasal bileşim oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Örnek olarak; aynı sertlik için, Al-Zn-Mg alaşımı Al-Mg alaşımından daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir (Elleuch vd., 2006).

Basavakumar vd. (2007), tane inceltme ve modifikasyon gibi çeşitli ilave işlemlerinden sonra Al-7Si ve Al-7Si-2,5Cu döküm alaşımlarının mikroyapıları ve mekanik özelliklerini incelenmişlerdir. Bu alaşımlarda, tane inceltme ve modifikasyon işlemleriyle mekanik özellikleri olumlu yönde değiştiği tespit edilmiştir. Al-7Si-2,5Cu alaşımlarının gelişmiş mekanik özellikleri, büyük alüminyum tanelerinin kırılması ve interdendritik bölgede kombine arıtma ve modifikasyondan kaynaklanan ötektik silisyum ve ince  $CuAl_2$  parçacıklarının düzgün dağılımı ile ilgilidir. Bu makalede, Al-7Si ve Al-7Si-2,5Cu döküm alaşımlarındaki mikro yapısal değişikliklerin, tane inceltme, modifikasyon ve hem mekanik özellikler üzerindeki (etki, çekme ve sertlik) birleşik eylem etkisini araştırmışlardır (Basavakumar vd., 2008).

Buytoz ve Eren (2007), karıştırmalı döküm tekniğiyle bir Al-Si-Mg alaşımına ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında SiC,  $Al_2O_3$  ve FeCrC partikülleri ilave edilerek ürettikleri Al metal matrisli kompozit malzemelerin abrasiv aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarını bir pin-on-disk test cihazında 1,89 m/s kayma hızında ve 10-30 N yük altında gerçekleştirmiş ve üretilen matris alaşımının kompozit malzemelere göre aşınma direncinin oldukça yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca Al metal matrisli kompozit numunelerin yükün artması ile aşınmasının arttığını ve maksimum yükte FeCrC partiküllerinin numune üzerine plastik deformasyon oluşturduğunu belirlemişlerdir (Buytoz ve Eren, 2007).

Chandrashekharaiah ve Kori (2009), bir pin-on-disk test cihazı yardımıyla, ötektik Al-Si alaşımına tane inceltme ve modifiye işlemi uygulayarak, kuru kayma aşınma davranışını incelemişlerdir. Doğal bir şekilde geliştirilen Al-1Ti-3B ve Al-10Sr ana alaşımları sırasıyla  $\alpha$ -Al dendritlerinde ve ötektik Si modifikasyonunda tane inceltici ve modifiye edici olarak kullanmışlardır. Alaşım bileşimini; kayma hızı, kayma mesafesi ve normal basınç gibi çeşitli parametreler yardımıyla incelemişler ve döküm alaşımları, ana alaşımlar ve aşınmış yüzeyleri SEM / EDX mikro analizi ile karakterize

etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlardan, ötektik Al-Si alaşımlarının aşınma direncinin, tane inceltici (Al-1Ti-3B) ve/veya modifiye edici (Al-10Sr) ilavesiyle arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, yapılan yüzey çalışmalarında, tane inceltici ve modifiye edici eklenmediği durumda, Al-12Si alaşımında adhesiv ve abresiv aşınma oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, tane inceltici ve modifiye edici aynı alaşıma eklendiğinde, adhesiv ve oksidatif bir aşınma oluştuğunu belirtmişlerdir (Chandrashekharaiyah ve Kori, 2009).

Koraman (2011) yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, -2000+212 µm ve -150+106 µm boyutlarında toz kullanarak ürettiği Al-Fe-V-Si numunelere 150 °C, 250 °C ve 350 °C sıcaklıklarda pin-on-disk aşınma testi uygulamıştır. Yapılan deney sonucunda, aşınma hızının deney sıcaklığına bağlı olarak arttığı ve deney sıcaklığının 150 °C'nin altındaki aşamalarında aşınma, oksidatif aşınma iken, 250 °C ve 350 °C sıcaklıklarda plastik deformasyon kontrollü aşınma olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca oda sıcaklığında her iki toz boyutundan elde ettiği numunelerde oluşan aşınma yaklaşık olarak aynı iken, -150+106 µm boyutundaki tozlar üretilen numunelerin -2000+212 µm boyutundaki tozlarla üretilen numunelere göre sıcaklık arttıkça aşınma hızının daha fazla gerçekleştiğini saptamıştır (Koraman, 2011).

Mahmoud ve Mohamed (2012), A413 alüminyum alaşımının döküm, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine sürtünme karıştırma işleminin etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmaya göre, sürtünme karıştırma işlemi gözeneklilik ve Si ayrılması gibi yapısal kusurları ortadan kaldırarak A413 Al alaşımının mikro yapısını önemli ölçüde geliştirdiğini ortaya koymuşlardır. Si partiküllerinin yanı sıra α-Al taneciklerinin boyutu, takım dönme hızını arttırmak ve/veya takım hareket hızını azaltmakla arttığını görmüşlerdir. Sürtünme karıştırma işleminin bölgeleri, iyi mekanik özellikler ve kuru kayma aşınma direncinin yanı sıra, döküm özelliklerinde iyi olduğunu gözlemlemişlerdir (Mahmoud ve Mohamed, 2012).

Yılmaz vd. (2012), 7075 alüminyum alaşımlarının yeniden yaşlandırma ısıl işleminde yeniden çözeltilme süresi ve sıcaklıklarını değiştirerek bu parametrelerin alaşımların sertliklerine ve aşınma davranışlarına nasıl etki ettiğini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, yeniden çözeltilme sıcaklığı ve süresi alaşımın sertliğini ve aşınma direncini etkilediğini ve aşınma direnci ile sertlik değerleri arasında sıkı ilişki olduğunu ve sertlik değerlerinin sıcaklığa ve süreye bağlı olarak

değiştiğini gözlemlemişlerdir. Elde edilen verilere göre; en yüksek sertlik ve aşınma direncini 220 °C’de 60 dakika yeniden çözeltiye alınarak yeniden yaşlandırma işlemi uygulanan numunenin gösterdiğini belirtmişlerdir (Yılmaz vd., 2012).

Yapıcı (2012) yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, Etial 160 alüminyum alaşımına %0,2, %0,4 ve %0,6 oranlarında AlTi5B1 mastır alaşımı ilave ederek mastır alaşımın tane yapısına ve mekanik özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Çalışmasını 3 deney seti halinde yapmış ve en yüksek sertlik değeri 79,9 HB ve en küçük tane boyutunu %0,6 oranına mastır alaşımı ilave edilen 21. dakikada alınan numunede 1,8 µm gözlemlemiştir. Ayrıca süreye bağlı olarak tane boyutu ve sertlik değerlerindeki değişimi yaptığı 3 deney setine göre incelemiştir. Bu inceleme sonucunda ağırlıkça %0,4 oranında AlTi5B1 mastır alaşımı ilave edilmiş olan 2. deney setinin 78,5 HB sertlik değeri ve 1,9 µm tane boyutu, tane inceltme performansı ve verimlilik bakımından en iyi sonuçlar olduğunu belirtmiştir (Yapıcı, 2012).

Birol (2012), AlTi5B1, AlTi3B3 ve AlB3 tane incelticilerinin AlSi7Mg ve AlSi11Cu2 döküm alaşımlarının tane yapılarını iyileştirme kapasitelerini araştırmıştır. Araştırmasına göre AlTi5B1’i dövme alüminyum alaşımları için en iyi tane inceltici olarak tanımlarken, AlSi7Mg ve AlSi11Cu2 alaşımlarında tane inceltici olarak beklentilerin altında kalmıştır. AlTi3B3 tane inceltici mastır alaşımı, her iki alaşımda da daha küçük taneler oluşturmuştur. AlB3 mastır alaşımı ancak AlTi5B1 alaşımı kadar tane yapısını iyileştirebilmiştir. Ağırlıkça %0,04-0,1 Ti içeren alaşımlar, AlB3 tarafından sağlanan B kolayca TiB<sub>2</sub> partiküllerine dönüştürüldüğünden, AlB<sub>2</sub> partiküllerinin etkisinden faydalanamamıştır. Ti içermeyen AlSi7Mg ve AlSi11Cu2 alaşımlarının taneleri, AlB3 ile aşılandığında bütün bekletme süreleri için tanelerin çok küçük olduğunu belirlemiş, bu da dikkate değer bir tane inceltme veriminin yanı sıra, tane inceltme etkisinin azalmasına karşı güçlü bir direnç kazandırdığı görülmüştür. Ergimiş alaşımda Ti eksikliği, bütün B’nin, α-Al kristalleşmeye başlamadan kısa bir süre önce AlB<sub>2</sub> partikülleri mükemmel yüzeyler oluşturduğunu gözlemlemiştir (Y Birol, 2012).

Alipour vd. (2013), Al-12Zn-3Mg-2,5Cu alüminyum alaşımına uygulanan Al-5Ti-1B mastır alaşım ve modifiye gerinmeli ergime aktivasyon işleminin, Al-12Zn-3Mg-2,5Cu alüminyum alaşımının yapısal özellikleri, mekanik özellikleri ve kuru kayma aşınma davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada tüm

numuneler T6 ısıt işlemleri uygulamışlar ve uygulanan T6 ısıt işlemleri ve tane inceltici alaşımların mekanik özelliklerini önemli derecede geliştirdiğini belirtmişlerdir. T6 ısıt işlemleri uygulandıktan sonra elde edilen ortalama gerilme mukavemeti ağırlıkça %2 Al-5Ti-1B ile tane inceltme işlemleri yapılmış örnekler için gerilimle eritilmiş erime aktivasyon işlemlerinden önce ve sonra şeklinde sırasıyla 283 MPa'dan 587 MPa'ya ve 252 MPa'dan 564 MPa'ya yükseldiğini belirtmişlerdir. Alaşımların aşınma performansını normal atmosfer koşullarında incelemişler ve T6 ısıt işleminin Al-12Zn-3Mg-2,5Cu alüminyum alaşımlarının aşınma direncini önemli ölçüde arttırdığını gözlemlemişlerdir (Alipour vd., 2013).

Gül (2014) çalışmasında, AlSi10Mg alaşımlarına ikincil yaşlandırma işlemleri uygulamış ve bu işlemlerin alaşımların sertlik ve abrasif aşınma direncine etkisi araştırmıştır. Çalışması sonucunda, 170 °C'de 30 dakika boyunca yaşlandırma işlemleri uygulanan, ardından 100 °C'de 135 saat yeniden yaşlandırma işlemleri yapılan numunenin, en yüksek abrasif aşınma direncine sahip olduğunu belirlemiştir (Gül, 2014).

Alshmiri vd. (2014), alüminyum yüksek silisyum hiperötektik alaşımlarının kuru kayma aşınması üzerine yaptıkları çalışmada; birçok prosesten geçirilerek ürettikleri numuneyi kuru kaymalı pistonlu çok geçişli aşınma testine tabi tutmuşlardır. Çalışmada, düşük silisyum (ağırlıkça yaklaşık %21 Si) ve yüksek Si (ağırlıkça yaklaşık %30 Si) değerleri içeren alaşımları karşılaştırmışlardır. Aşınma sonuçları, Al-21Si-3,9Cu-1,2Mg-2,4Fe-1,1Ni-0,4Zr bileşimi ile haddelenmiş çubuğun, Al-29,8Si-1,3Cu-1,4Mg-0,3Fe-0,3Ni-0,3Zr bileşimi ile haddelenmiş çubuktan daha yüksek sertliğe ve dolayısıyla aşınma direncine sahip olduğunu belirlemiştirler. Ek olarak, düşük Si alaşımı için daha yüksek miktarlarda intermetalik oluşturuç elemanların aşınma direncine katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir (Alshmiri vd., 2014).

Alhawari vd. (2015), yarı-katı metal şekillendirme tekniği ile şekillendirilmiş A319 alüminyum alaşımlarının mikroyapı ve kuru kayma aşınma özelliklerini araştırmış ve kum kalıba dökülmüş alaşımların mikroyapı ve kuru kayma aşınma özelliklerini karşılaştırmışlardır. Yarı-katı metal şekillendirme tekniği ile şekillendirilmiş alaşımların mikroyapısı, parçalanmış ve tek biçimli bir şekilde dağılmış silisyum ve intermetalik bileşikler şeklinde ince küresel bir birincil faz olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, yarı-katı metal şekillendirme tekniği ile şekillendirilmiş alaşım, özellikle düşük yükte döküm

alaşımına kıyasla daha iyi aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı sergilediğini belirtmişlerdir (Alhawari vd., 2015).

Shaha vd. (2015), Ti, V ve Zr ilave edilmiş Al-7Si-1Cu-0,5Mg (ağ.%) döküm alaşımın 300 °C üzerindeki sıcaklıklarında mikroyapı ve gerilme özelliklerini geleneksel A380 alaşımı ile karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Her iki alaşımın da mikro yapısı içinde üçlü Al-Al<sub>2</sub>Cu-Si fazı içeren Al-Si ötektik ile çevrili Al dendritlerden oluştuğunu gözlemlemişlerdir. A380 alaşımında Al<sub>15</sub>(FeCrMn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> fazları mevcutken, deney alaşımında Ti/Zr/V, Al ve Si fazları ile birlikte, Al (ZrTiV) Si, fazlarını görmüşlerdir. Deney alaşımının A380 alaşıma göre %20 ila %40 daha yüksek mukavemete ve %1,5 ila %5 kat daha yüksek sünekliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir (Shaha vd., 2015).

Ölmez ve Keleşoğlu (2016), farklı alaşım oranlarında Al-Si alaşımının yüksek sıcaklıklardaki aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada, elde edilen Al-Si alaşım numuneleri oda sıcaklığında ve 180 °C sıcaklık da pin-on-disk aşınma deney yöntemi kullanılarak aşınma davranışlarını araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda aşınma hızının, sıcaklık arttıkça aşınma hızının da arttığını belirtmişlerdir (Ölmez ve Keleşoğlu, 2016).

Çolak vd. (2016), çalışmalarında ticari saflıkta (%99,8 Al) alüminyum alaşımına farklı oranlarda (Ağ. %2-4-6-8) Cu alaşımını ilave ederek, kum kalıp döküm yöntemiyle Al-Cu alaşımını hazırlamışlardır. Elde ettikleri alaşımın, spektrometre ile kimyasal bileşim analizi, yoğunluk ve sertlik, aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemişlerdir. Bunların yanı sıra Al-Cu alaşımının mikro yapısını optik mikroskop ile incelemişlerdir. Yaptıkları inceleme sonuçlarına göre, saf Al ve Cu dolgulu Al alaşımının sürtünme katsayısı, yük ve kayma hızı ile artmıştır. Aşınma oranı, kayma hızı arttıkça yük ile birlikte azalmıştır. Cu ile doldurulmuş Al alaşımının aşınma oranlarını yaklaşık  $10^{-13}$  m<sup>2</sup>/N olarak belirlemişlerdir (Çolak vd., 2016).

Tunçay (2016), A356 alaşımına farklı oranlarda (Ağ. %0,1-0,4) Cu ilave ederek döküm yöntemi ile ürettikleri numunelerde Cu'nun A356 alaşımının mikro yapı ve aşınma davranışına etkisini araştırmıştır. Deneylerinde A356 alaşımına yaşlandırma işlemi uygulamış, mikro yapı görüntüleri almış, sertlik testleri yapmış ve pin-on-disk aşınma testi uygulamıştır. Deneyler sonucunda A356 alaşımına eklenen Cu miktarı

arttikça Al-Si ötektiği morfolojisinin incelđini görmüş ve Al-Si ötektiğinin homojen bir yapıda olduğunu belirtmiştir. Ayrıca Cu miktarının artmasıyla alaşımların sertlik değerlerinin de arttığını belirtmiştir. Aşınma testlerine göre en düşük aşınma oranlarının 10 ve 20 N yük altında %0,2 ve %0,4 Cu ilaveli A356 alaşımlarında ve 40 N yük altında %0,4 Cu ilaveli A356 alaşımında olduğunu göstermiştir (Tunçay, 2016).

Mohano ve Rao (2018) alışmalarında, Al 6061 kompozitlerinin abresiv aşınma davranışına odaklanmışlardır. TiB<sub>2</sub> ile sürtünme karıştırma işleminden sonra imal ettikleri Al 6061-T6 numuneyi, pin-on-disk testine tabi tutmuşlar, yüksek sıcaklıklarda, kayma hızı, uygulanan yük gibi parametrelerle test etmişlerdir. TiB<sub>2</sub> dolgu maddesinin ilavesindeki artışın, Al 6061 ile yapışmayan bir özelliğe yol açtığını ve bu durumun kuvvet azalmasına neden olduğunu belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları değerlendirerek, metal yüzdesi daha az olan kompozitlerde aşınma direncinin, metal yüzdesi daha fazla olan kompozitlere oranla daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, TiB<sub>2</sub>'nin metallerdeki aşınma direncinde artışa yol açtığını gözlemlemişlerdir (Mohana ve Rao, 2018).

Shivaramu vd. (2018), döküm ve toz metalurjisi bazlı alüminyum ve alüminyum-silisyum alaşımının (LM6) kuru kayma aşınma davranışını, ASTM G99 standardına göre pin-on-disk aşınma yöntemi ile incelemişlerdir. LM6'da aşınma oranının değişken hızda düştüğünü ancak Al için arttığını tespit etmişlerdir. LM6'da Si parçacıklarının bulunmasının, deformasyona direnç göstermesine ve parçacıklar arasındaki kaynak nedeniyle malzeme kaybının önlenmesine olanak sağladığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte Al'de, eşleşen yüzeyler arasındaki kaymış kaynaklı parçacıkların aşınmayı arttırmada etken olduğunu belirlemişlerdir. Toz metalurjisi bazlı alüminyum-silisyum alaşımının, iyi bir yoğunluğa, düşük termal genleşmeye, daha yüksek aşınma direnci gösteren sertlik özelliklerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir (Shivaramu vd., 2018).

## **2. KURAMSAL TEMELLER**

### **2.1 Alüminyum**

Alüminyum kimyasal olarak aşırı reaktif olduğundan dolayı, saf alüminyum örneklerini görmek çok zordur bu yüzden aşırı indirgeyici ortamlarla sınırlıdır. Bu nedenle 270'in üzerinde farklı şekilde kombinasyonu bulunur (Shakhashiri, 2000). Herhangi bir uygulamada doğru alaşımı seçebilmek için, alaşımın gerilme mukavemeti, yoğunluğu, sünekliği, şekillendirilebilirliği, işlenebilirliği, kaynaklanabilirliği ve korozyona karşı direnci gibi birçok özelliğine dikkat etmek gerekir (Sanders, 2001). Alüminyum yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, kolay işlenebilirlik ve yüksek korozyon direnci gibi mükemmel özelliklere sahiptir. Üstün mekanik özelliklerinden dolayı mühendislik uygulamalarında, otomotiv ve havacılık endüstrisinde oldukça fazla tercih edilen bir metaldir.

#### **2.1.1 Alüminyumun mekanik özellikleri**

Alüminyumun elastisite modülü çelikten 3 kat daha düşüktür. Bu özelliği, mühendislik tasarımı hesaplarında büyük salınımlı yükler karşısında büyük bir avantaj sağlamaktadır. Büyük salınımlı yükler altında çeliğe göre daha iyi bir sönümleme imkânı verir (Al\_Saadi ve Tunay, 2017).

Alüminyumun en önemli özellikleri arasında şekillendirilebilirliği ve işlenebilirliğidir. Saf halde bulunan alüminyum yumuşak ve tel haline kolayca getirilebildiğinden, presleme, bükme, çekme ve kalıplama gibi bilinen yöntemlerle kolayca şekillendirilebilmektedir. Alüminyumun en önemli mekanik özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir (Al\_Saadi ve Tunay, 2017).



**Çizelge 2.1.** Alüminyumun önemli mekanik özellikleri (Al\_Saadi ve Tunay, 2017)

<b>Mekanik Özellikler</b>	<b>Alüminyum</b>
Gerilmede elastikiyet modül, (kg/cm <sup>2</sup> )x10 <sup>3</sup>	703
Çekme dayanımı (kg/cm <sup>2</sup> )	914
Akma dayanımı (kg/cm <sup>2</sup> )	356
Uzama (5 cm de), (%)	40
Alan küçülmesi, (%)	38
Sertlik	23 HBN
Büzülme dayanımı (100 saatte %1 uzama) (kg/cm <sup>2</sup> ) 705 °C	200

Alüminyumun mukavemeti oldukça yüksektir. Dinamik mukavemeti, statik mukavemetinden 0,4-0,45 kat daha fazladır. Soğuk şekillendirilme ile üretilmiş alüminyum parçalara kaynak işlemi uygulandığında geçiş bölgesinde mukavemeti düşer. Ancak alüminyum, tavlama gibi ısı işlemlerle mukavemetini tekrar geri kazanır (Kaufman ve Rooy, 2004).

### 2.1.2 Alüminyumun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Alüminyum korozyona oldukça dayanıklıdır. Oksijen ile temas ettiğinde alüminyumun üzerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kabuğu oluşur. Bu oksit kabuğu alüminyumun korozyon direncini artırır ve alüminyumu korur. Ayrıca alüminyum saflaştıkça korozyon direnci ve iletkenliği artar (Vargel, 2004). Alüminyumun bazı önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Alüminyumun önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri (Yapıcı, 2012)

<b>Fiziksel ve kimyasal özellikleri</b>	<b>Alüminyum</b>
Atom numarası	13
Element serisi	Metaller
Grup, periyot, blok	3A, 3, p
Görünüş	Gümüşümsü
Atom ağırlığı	26,9815386(8) g/mol
Elektron dizilimi	[Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>
Enerji seviyesi başına elektronlar	2, 8, 3
Genel faz hali	Katı
Yoğunluk (katı)	2,70 g/cm <sup>3</sup>
Sıvı haldeki yoğunluğu	2,375 g/cm <sup>3</sup>
Ergime sıcaklığı	660,32 °C
Kaynama noktası	2519 °C
Ergime ısısı	10,71 kJ/mol
Buharlaşma ısısı	294,0 kJ/mol

**Çizelge 2.2.** Alüminyumun önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri (devamı)

<b>Fiziksel ve kimyasal özellikleri</b>	<b>Alüminyum</b>
Isı kapasitesi	24,2 (25 °C) J/(mol·K)
Kafes yapısı	Yüzey merkezli kübik
Yükseltgenme seviyeleri	(3+) (amfoter oksit)
Elektronegatifliği	1,61 Pauling ölçeği
İyonlaşma enerjisi	577,5 kJ/mol
Atom yarıçapı	125 pm
Atom yarıçapı (hes.)	118 pm
Kovalent yarıçapı	118 pm
Elektriksel öz direnci	26,50 $\Omega \cdot m$ (20 °C'de)
Isıl iletkenlik	237 W/(m·K)
Isıl genleşme	23,1 $\mu m/(m \cdot K)$ (25 °C'de)
Ses alüminyumda yayılma hızı	5000 m/s (20 °C'de)

## 2.2 Alaşım ve Alaşımlama

Belirli oranlarda iki veya daha fazla maddenin bir araya getirilerek oluşturulan ve metal özelliği gösteren maddelere alaşım denir. Alaşım bir metale bir veya birden fazla element eklenerek ya da birden fazla elementin bir arada ergitilmesiyle elde edilen saf haldeki maddeye üstün özellikler kazandıran bir üründür. Saf halde bulunan metaller belli özelliklere sahiptir ve bu özellikler sınırlıdır. Bu nedenle metallerin var olan bazı özelliklerini değiştirmek, özelliklerini üstün düzeye taşımak ve yeni özellik kazandırmak için alaşım oluşturulur (Alım, 2017).

### 2.2.1 Alaşımlama teknikleri

Alaşım oluşturabilmek için birçok teknik kullanılır ve en önemlileri şunlardır;

**a) Ergitme tekniği**, bu yöntemde birden fazla metal bir araya getirilerek ergitilir. Metallerin ergime sırasında oksitlenmemesi için kömür tozu ile örtülür ve kil den yapılmış potalarda ergitme işlemi yapılır. Metallerden herhangi birinin ergime noktası düşük ise ergime noktası yüksek olan metallerin ergimesi sırasında ergime noktası düşük olan metaller potaya eklenir. Ergime noktası düşük metaller zamanla buharlaşma eğilimi göstereceğinden bu metallerden daha fazla miktarda karışıma eklenir (Alım, 2017).

**b) Toz karıştırma tekniği**, metallerden elde edilmiş tozların karıştırılarak yüksek basınçlarda preslenmesi ile elde edilir (Alım, 2017).

c) **Sinterleme tekniği**, hazır olan metal veya metal alaşım tozları karıştırılarak hazırlanmış kalıpların içerisinde sıkıştırılarak biçimlendirilir. İstenilen geometriye getirilen malzeme yüksek sıcaklıklarda ısıtılır böylece metaller difzyon yoluyla birbirine nüfuz ederek çözünür, bu işleme sinterleme denir (Alım, 2017).

### 2.2.2 Alüminyum alaşımları ve zellikleri

Alüminyum alaşımları imalat yöntemine göre döküm alaşımları ve dövme alaşımları şeklinde iki farklı gruptan oluşmaktadır. Bu alaşımları bileşimleri bakımından birbirlerine paralellik gösterir. Alüminyum alaşımlarının sertleşmesi ve istenilen özelliklere sahip olması alaşım elementleri veya başka alaşım yapıların eklenmesi ve çeşitli ısıl işlemlerin uygulanması ile sağlanabilmektedir. Deformasyon sertleşmesi döküm özelliklerine önemli derecede etki etmediğinden alaşım elementlerinin eklenmesi döküm ve dövme alaşımlarına göre farklılık gösterir (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### a) Dövme alüminyum alaşımları

Genellikle dövme, haddeleme ve ekstrüzyon yöntemleri gibi plastik şekil verme yöntemleri ile kütük ve külçe şeklinde üretilirler. Alüminyum dövme alaşımları izelge 2.3'te gösterilen numaralama sistemi ile gösterilmiştir (Al\_Saadi ve Tunay, 2017).

**Çizelge 2.3.** Dövme alüminyum alaşımları (Al\_Saadi ve Tunay, 2017)

<b>Alaşım</b>	<b>Ana alaşım elementi</b>
<b>1xxx</b>	Saf alüminyum
<b>2xxx</b>	Ana alaşım elementi bakır olup, magnezyum gibi diğer elementlerde bulunabilir
<b>3xxx</b>	Ana alaşım elementi mangan olan alüminyum alaşımları
<b>4xxx</b>	Ana alaşım elementi silisyum olan alüminyum alaşımları
<b>5xxx</b>	Ana alaşım elementi magnezyum olan alüminyum alaşımları
<b>6xxx</b>	Başlıca alaşım elementleri magnezyum ve silisyum olan alüminyum alaşımları
<b>7xxx</b>	Ana alaşım elementi çinko olan alüminyum alaşımları, ancak bakır, magnezyum, krom ve zirkonyum gibi elementler bulunabilir
<b>8xxx</b>	Kalay ve biraz lityum içeren alüminyum alaşımları
<b>9xxx</b>	Gelecekte kullanılmak üzere belirlenmiştir

## b) Döküm alüminyum alaşımları

Kum veya kokil kalıba döküm gibi döküm yöntemleriyle üretilirler. Bu şekilde üretilen alüminyum alaşımları yüksek fiziksel özelliklere sahip olurlar ve işlenebilirliği artar. Döküm alüminyum alaşımları kaynaklanma özelliğine sahiptir (Sönmez, 2016). Alüminyum döküm alaşımları, Çizelge 2.4'te gösterilen numaralama sistemi ile gösterilmiştir.

**Çizelge 2.4.** Alüminyum döküm alaşımları (Al\_Saadi ve Tunay, 2017)

Alaşım	Ana alaşım elementi
1xx.x	Saf alüminyum, maks. % 99,00
2xx.x	Bakır (Cu)
3xx.x	Bakır (Cu) ve/ya Manganez (Mn) eklenmiş Silisyum (Si)
4xx.x	Silisyum (Si)
5xx.x	Magnezyum (Mg)
7xx.x	Çinko (Zn)
8xx.x	Kalay (Sn)
9xx.x	Diğer elementler
6xx.x	Kullanılmayan Seriler

### 2.2.3 Alaşım elementlerinin alaşıma etkisi

#### a) Antimon (Sb)

Antimon  $\approx$  ağırlıkça %0,10'a eşit veya daha büyük konsantrasyon seviyelerinde, alüminyum-silisyum ötektiğini artırır. Esas etkisi modifikasyondur, fakat ince bir lifli formdan ziyade belirgin bir şekilde lamel ötektiğidir. Antimonun ötektik yapıyı değiştirmedeki etkinliği, fosfor eksikliğine ve yeterince hızlı bir katılma oranına bağlıdır. Antimon ayrıca, dökülebilirlik ve metalurjik yapı üzerinde olumsuz etkileri olan kaba intermetalikleri oluşturmak üzere sodyum veya stronsiyum ile reaksiyona girer (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### b) Berilyum (Be)

Magnezyum ihtiva eden bileşimler içinde oksidasyon kayıplarının ve ilgili inklüzyonların azaltılmasında etkili olabilir. Berilyum, daha yüksek konsantrasyonlarda (>% 0,04), demir içeren intermetaliklerin şeklini ve bileşimini etkiler, belirgin şekilde mukavemet ve sünekliğin gelişimine katkı sağlar. Berilyum

sağladığı faydaların yanı sıra bileşimi değiştirerek Al-Fe-Si bileşiğindeki magnezyumun uzaklaşmasını sağlar ve alaşımlarda sertleştirme yapmak için kullanılabilir (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **c) Bizmut (Bi)**

Ağırlıkça %0,1'den yüksek miktarda alaşıma eklenmesi alaşımın işlenebilirliğine katkı sağlar (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **d) Bor (B)**

Bor,  $AlB_2$  ve  $TiB_2$  gibi boritler oluşturmak için diğer metallerle birleşir. Titanyum borid, tane inceltme için  $TiAl_3$  gibi aktif tane inceltme fazları ile etkileşime giren kararlı çekirdeklenme alanları oluşturur. Metalik boritler işleme işlemlerinde takım ömrünü azaltır ve mekanik özellikler ve süneklik üzerinde zararlı etkileri olan kaba veya aglomere edilmiş inklüzyonlar oluşturur. Boritler ayrıca çamurlaşmaya, intermetaliklerin fırınlarda sıvı çözüldüğü çökmesine ve oluklanmasına da katkıda bulunur (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **e) Kadmiyum (Cd)**

Ağırlıkça %0,1'i aşan konsantrasyonlarda, kadmiyum işlenebilirliği artırır. Kadmiyumun 1413 °F (767 °C) sıcaklıklarında uçuculuğunu onaylayan önlemler esastır (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **f) Kalsiyum (Ca)**

Kalsiyum zayıf bir alüminyum-silisyum ötektik değiştiricisidir. Hidrojen çözünürlüğünü artırır ve iz konsantrasyon seviyelerinde gözenekliliğin dökülmesinden genellikle sorumludur. Yaklaşık ağırlıkça %0,005'ten daha büyük olan kalsiyum, alüminyum magnezyum alaşımlarındaki sünekliği de olumsuz yönde etkiler (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **g) Krom (Cr)**

Krom ilaveleri genellikle düşük konsantrasyonlarda oda sıcaklığında yaşlanma ve tane büyümesinin meydana geldiği bilinen termal olarak dengesiz kompozisyonlara yapılır.

Krom tipik olarak, son derece sınırlı katı hal çözünlüğü sergileyen ve bu nedenle tane büyüme eğilimlerini bastırmakta yararlı olan  $\text{CrAl}_7$  bileşimini oluşturur. Krom, bazı alaşımlarda korozyon direncini artırır ve daha yüksek konsantrasyonlarda su verme hassasiyetini artırır (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **h) Bakır (Cu)**

Bakır, döküm ve ısıtılma işlem görmüş koşullarda dayanımı ve sertliği büyük ölçüde iyileştirir. Ağırlıkça %4 ile %5,5 Cu içeren alaşımlar, ısıtılma işlemine en güçlü şekilde yanıt verir ve nispeten geliştirilmiş döküm özellikleri sergiler. Bakır genel olarak korozyona karşı direnci azaltır ve özel bileşimlerde ve malzeme koşullarında gerilme korozyonuna duyarlılığı artırır. Buna karşılık, alüminyum-çinko alaşımlarındaki düşük bakır konsantrasyonları stres korozyonunu engeller (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **i) Demir (Fe)**

Demir, sıcak yırtılma direncini artırır ve kalıp dökümünde kalıba veya lehimlenme eğilimini azaltır. Demir içeriğinin artışı önemli ölçüde esnekliği de azaltır. Demir, en yaygın  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{FeMnAl}_6$  ve  $\text{AlFeSi}$  olan birkaç intermetalik faz oluşturmak üzere reaksiyona girer. Bu çözünmeyen fazlar, özellikle yüksek sıcaklıkta mikro yapının gevrekleşmesinde, önemli ölçüde katkı sağlar. Çözünmez fazların oranı, artan demir içeriği ile döküm sırasında besleme ve akışkanlık özellikleri gibi durumları olumsuz yönde etkiler (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **j) Kurşun (Pb)**

Kurşun işlenebilirliği arttırmak için ağırlıkça %0,1'den daha büyük konsantrasyonlarda kullanılır (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **k) Magnezyum (Mg)**

Magnezyum, ısıtılma işlem görmüş alüminyum-silisyum alaşımlarında dayanıklılık ve sertlik gelişiminin temelidir ve aynı amaç için bakır, nikel ve diğer elementler içeren daha karmaşık alüminyum-silisyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılır. Yaygın yüksek mukavemetli alüminyum-silisyum bileşimleri ağırlıkça %0,40 ile %0,070 aralığında magnezyum içermektedir.

Alüminyum-magnezyum alaşımları, parlak bir yüzey kaplaması, korozyon direnci ve çekici dayanıklılık ve süneklik kombinasyonları gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın bileşimler ağırlıkça %4 ile %10 Mg arasındadır ve %7'den fazla Mg içeren bileşimler ısıtılma işlem görmektedir (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **l) Manganez (Mn)**

Normal döküm bileşimlerinde bir kirlilik olarak düşünülür ve çoğu döküm bileşimlerinde düşük seviyelerde bulunması istenilir. Dökümde pekleşme istenilen seviyede oluşmazsa manganez döküm alaşımlarına olumlu etki sağlamaz. Buna rağmen bazı bulgular ağırlıkça %0,5'ten fazla Mn içeren alaşımların MnAl'nin yüksek oranda bulunması dökümün içsel mukavemetini artırdığını göstermiştir (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **m) Cıva (Hg)**

Cıva içeren bileşimler katodik koruma yapılan sistemler için geçici anotlar olarak geliştirilmiştir. Deniz suyunda pasifleşmeyen bu optimal elektronegatif alaşımların kullanımını çevresel nedenlerden dolayı yasaklanmıştır (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **n) Nikel (Ni)**

Nikel, yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirmek için bakır ile birlikte yaygın olarak kullanılır. Ayrıca termal genişleme katsayısını azaltır (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **o) Fosfor (P)**

AlP<sub>3</sub> olarak fosfor, hiperötektik alüminyum-silisyum alaşımlarında primer silisyum faz oluşumunu çekirdeklendirir ve rafine eder. Fosfor, hipötektik alüminyum-silisyum alaşımlarında ötektik yapıyı kuvvetlendirir ve ortak ötektik değiştiricilerin, sodyum ve stronsiyumun etkinliğini azaltır (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **p) Silisyum (Si)**

Silisyumun en önemli özelliği alüminyum alaşımlarının döküm özelliklerinin iyileştirilmesidir. Alaşımlara silisyum ilaveleri akışkanlığı, sıcak yırtılma direncini ve besleme özelliklerini önemli ölçüde geliştirir. Tüm alüminyum döküm işlemlerinde en

çok kullanılan bileşimler, silisyumun yer aldığı bileşimlerdir. Silisyum, ısı işlem görebilen alaşımlarda  $Mg_2Si$  oluşturmak için magnezyum ile birleşir. Kompleks çözünmez fazlar oluşturmak için demir ve diğer elementlerle birleşir. Silisyum ayrıca özgül ağırlığı ve ısı genleşme katsayısını azaltır (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **q) Gümüş (Ag)**

Sadece ağırlıkça %0,5 ile %1,0 konsantrasyonlarda alüminyum-bakır birinci sınıf alaşımlarda kullanılır. Gümüş, çökeltme sertleşmesine ve gerilme korozyon direncine katkıda bulunur (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **r) Sodyum (Na)**

Sodyum alüminyum-silisyum ötektiğini modifiye eder. Yüzey gerilimini artırır ve ekleme yöntemlerine bağlı olarak hidrojen içeriğini artırabilir. Sodyum fosfor ile bileşim oluşturarak ötektik modifikasyon etkisini ve fosforun silisyum fazındaki etkisini düşürür (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **s) Stronsiyum (Sr)**

Stronsiyum, alüminyum-silisyum ötektiğini değiştirmek için kullanılır. Etkili modifikasyon işlemi için düşük miktarlarda kullanılması tercih edilir. Genellikle kullanılan geri kazanılmış stronsiyum ağırlıkça %0,008-0,04 arasındadır. Düşük oranlarda ilave edilmesi katılaşma oranını olumlu yönde etkiler. Aynı zamanda yüksek oranda stronsiyum ilavesi gaz giderme verimini düşürür (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **t) Kalay (Sn)**

Kalay, sürtünme özelliklerin geliştirilmesinde önemli rol oynar. Döküm alaşımları ağırlıkça %25'e kadar Sn içerebilir. Kalay ilavesi işlenebilirliği de artırır (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### **u) Titanyum (Ti)**

Titanyum, genellikle daha az miktarda borla birlikte, alüminyum döküm alaşımlarının tane yapısını geliştirmek için yaygın olarak kullanılır. Titanyum, sıcak-kısa



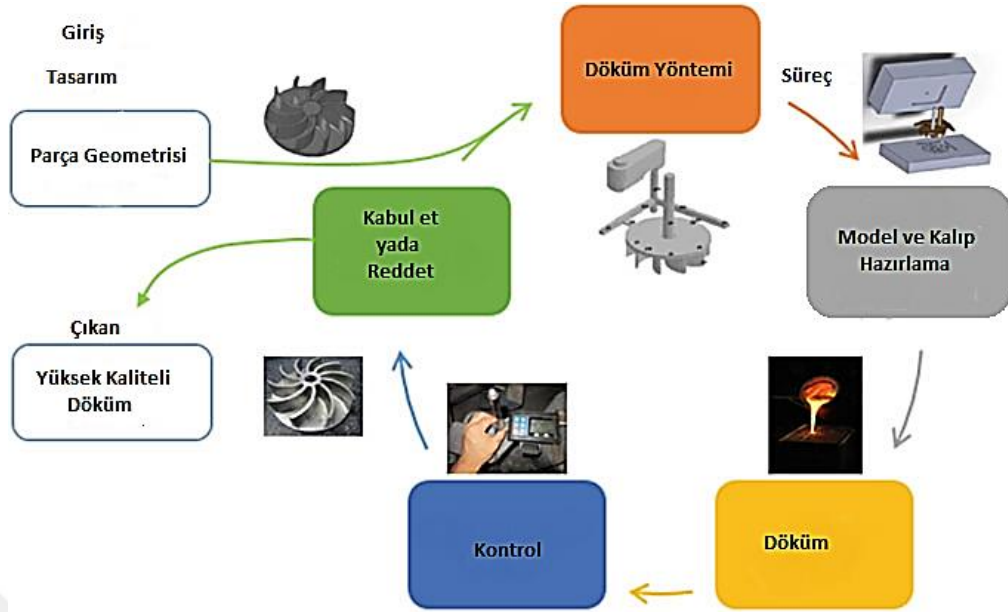
kompozisyonlarda çatlama eğilimlerini azaltmak ve tane inceltme için gerekenden daha yüksek oranlarda kullanılır (Kaufman ve Rooy, 2004).

#### v) Çinko (Zn)

Çinko, alüminyum dökümde önemli bir etki oluşturmaz. Bununla birlikte, bakır ve/veya magnezyum ilavesiyle birlikte, çinko, çekici ısıtım işlemi görebilen ya da doğal olarak yaşanan bileşimlerin oluşmasını sağlar (Kaufman ve Rooy, 2004).

### 2.3 Döküm Metodu ve Süreci

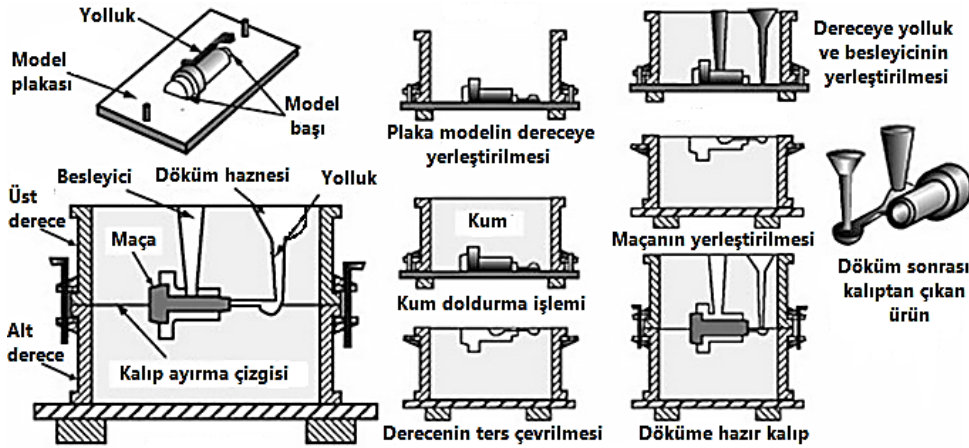
Döküm, ergitilmiş metalin üretilmek istenen parçanın geometrik şekline sahip önceden hazırlanmış kalıp boşluklarına doldurulması işlemine denir. Ergimiş metalin doldurulduğu kalıp kapalı veya açık şekilde olabilir. Metal döküm işlemi net şekilli ürün üretmek için basit ve direkt yöntemlerden biri olduğu kabul edilir. Bu işlem, döküm ürününün elde edilmesi için ergimiş metalin döküleceği, istenen malzemenin geometrik şekline sahip bir kalıp boşluğuna (kum, seramik veya çelikten yapılmış) ihtiyaç duyar. Ergimiş metal hazırlanmış kalıba döküm yollukları ile ulaşır ve kalıbın şeklini alır. Katılma sırasında, çoğu metal büzülme yaşar ve elde edilecek olan parça istenilen ölçülerde üretilmez. Bu yüzden yükselticiler veya besleyiciler yoluyla ilave erimiş metal miktarı sağlanır. Yükselticiler ve besleyiciler asgari kusurlu malzeme dökülebilmek için kullanılır. Şekil 2.1’de tipik bir metal döküm işleminin şematik diyagramı gösterilmektedir (Khan vd., 2017).



Şekil 2.1. Döküm işleminin şematik diyagramı (Khan vd., 2017)

### 2.3.1 Kum kalıba döküm

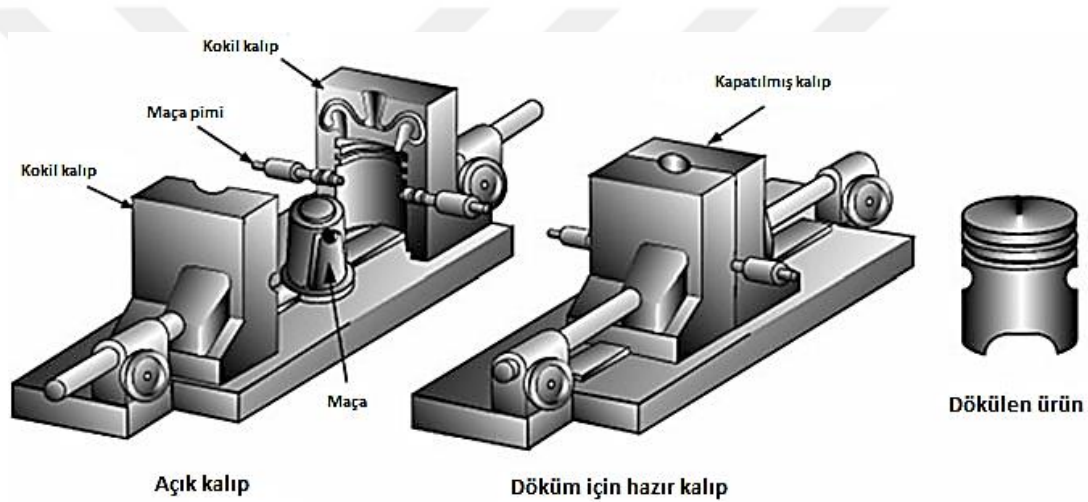
Kum kalıba döküm, oldukça karmaşık parçaların dökümü, büyük parçaların üretimi, küçük seriler halinde üretim ve düşük sermaye yatırımları nedeniyle metal endüstrisinde oldukça yaygın kullanılmaktadır. Kum kalıba döküm işlemi önceden hazırlanmış üretilecek parçanın modeli ile kum bir araya getirilerek kalıp boşluğu oluşturulur. Daha sonra ergitilmiş metal kalıp boşluğuna dökülür. Katılaşma esnasında büzülme olacağından ergimiş metal takviyesi yükselticiler ve besleyiciler tarafından sağlanır. Demir esaslı metallerin ve alüminyum alaşımlarının çoğu kum kalıba döküm yöntemi kullanılarak dökülür. Şekil 2.1’de kum kalıba döküm süreci gösterilmiştir (Khan vd., 2017).



Şekil 2.2. Kum kalıba döküm süreci (Khan vd., 2017)

### 2.3.2 Kokil kalıba döküm

Kalıp malzemesi metalden yapılmıştır bu yüzden kalıcı döküm olarak adlandırılır. Ergimiş metal, dökülecek parçanın geometrik şekline göre hazırlanmış kalıbın içine dökülür. Kokil kalıbın ısıl iletkenliği kum kalıba göre daha yüksek olduğundan, dökülen parça hemen soğur ve kalıba yapışmaz. Ancak metalin kalıba yapışma ihtimali göz önünde bulundurularak döküm işlemi yapılmadan önce kalıp yüzeyine grafit veya kil içeren sıvı püskürtülür. Kalıp yüzeyine püskürtülen sıvı daha sonra gaz halinde dışarı atılır. Bu döküm yöntemi ile genellikle, bakır, alüminyum ve magnezyum gibi metallerin dökümünde kullanılır. Kokil kalıba döküm yönteminin döküm süreci Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Khan vd., 2017).



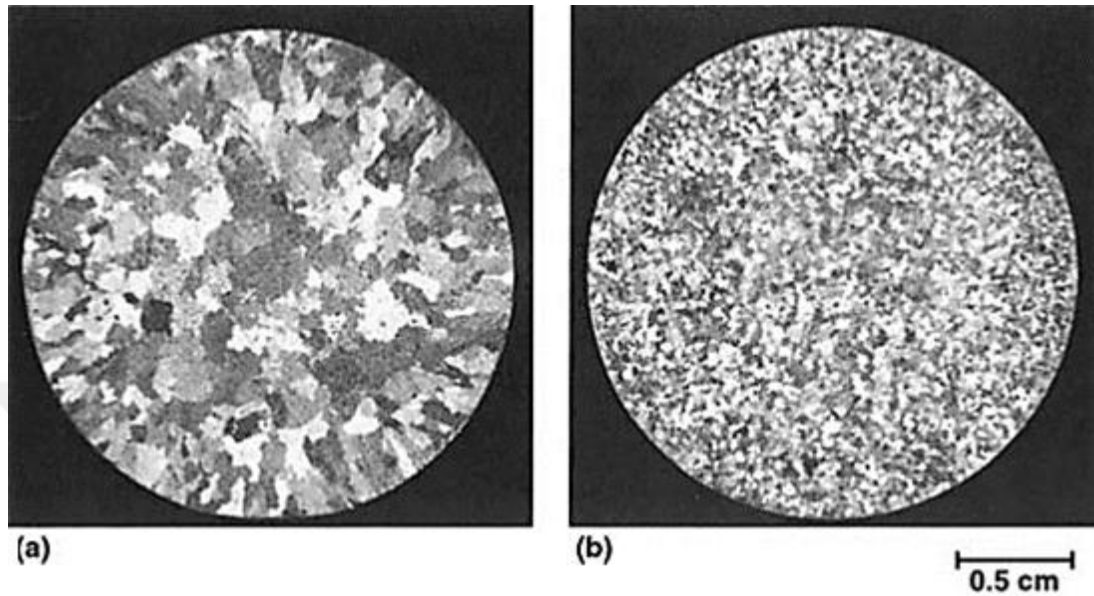
Şekil 2.3. Kokil kalıba döküm yönteminin döküm süreci (Khan vd., 2017)

### 2.4 Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltme

Tane inceltme ile yüzey alanını maksimize ederek tane-sınır bileşenleri daha iyi dağıtır. En iyi mukavemet ve süneklik için ince ve eş eksenli tanelerin oluşması istenir. Düşük alaşım içerikli bileşimlerde yüksek termal gradyanın etkisiyle oluşan iri taneli yapı mekanik özellikleri olumsuz etkiler. Oluşan tanelerin türü ve büyüklüğü; alaşım kompozisyonu, katılaşma oranı ve tane çekirdeklenme alanlarının konsantrasyonuna bağlıdır (Kaufman ve Rooy, 2004).

Katılaşma oranının artması tane yapısını küçültür. Ancak karmaşık döküm yapılarında katılaşma oranı değişkenlik gösterir. Metal kalıba döküm işlerinde pratik olarak elde

edilen ince tane yapısı, tane inceltici ilave edilmiş heterojen çekirdeklenme elde edilmiş dökümden elde edilmiş tane yapısına göre kötüdür. Tane incelticinin etkisi Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Kaufman ve Rooy, 2004).



**Şekil 2.4.** Tane incelticinin etkisi a) Tane inceltici ilavesiz b) Tane inceltici ilaveli (Kaufman ve Rooy, 2004)

Tane sayısını artırmak için ergimiş alüminyum alaşımlarına bazı elementler ilave edilir. Titanyum, titanyum ve bor en yaygın kullanılan tane inceltici alaşımlardır. Titanyum özellikle Bor ile bir araya geldiğinde güçlü bir çekirdeklenme oluşturur bu yüzden en sık kullanılan tane incelticidir. Alüminyum-Titanyum bileşimlerinde genellikle ağırlıkça %3 ila %10 arasında Ti bulunur. Titanyum tek başına alaşıma ağırlıkça %0,02-0,15 arasında ilave edilebilir ve titanyumun etkisi 40 dakika içerisinde ortadan kaybolur. Borun titanyum ile birlikte eklenmesi daha ince tane oluşumunu sağlar. Titanyum ve Bor, alaşım olarak veya ergimiş halde ilave edilebilir (Brown, 1999; Kaufman ve Rooy, 2004).

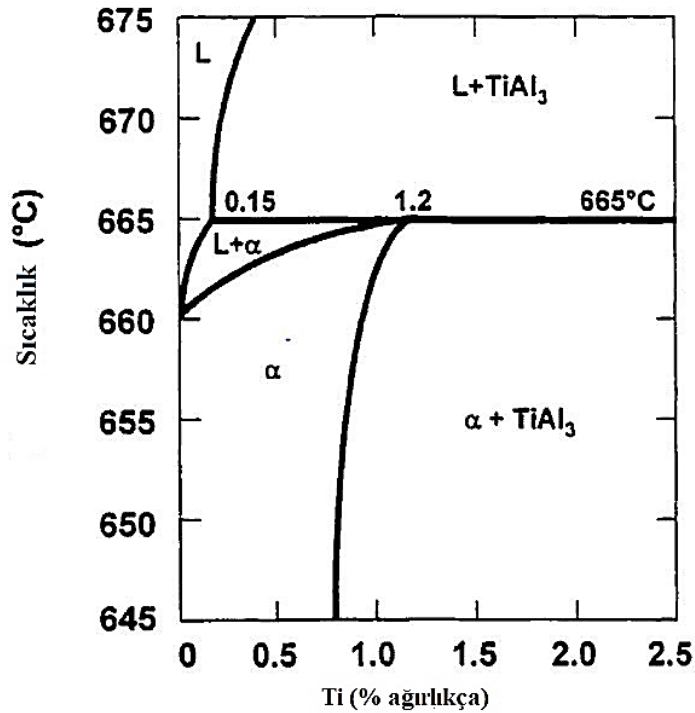
**Çizelge 2.5.** Tane inceltici mastır alaşımlar (Öksüzoğlu, 2018)

Tane İnceltici Master Alaşımlar		
AlTiB 5/1	Al %5 Titanyum	%1 Bor
AlTiB 5/0,6	Al %5 Titanyum	%0,6 Bor
AlTiB 5/0,2	Al %5 Titanyum	%0,2 Bor
AlTiB 3/1	Al %3 Titanyum	%1 Bor
AlTi 6	Al %6 Titanyum	
AlTi 10	Al %10 Titanyum	

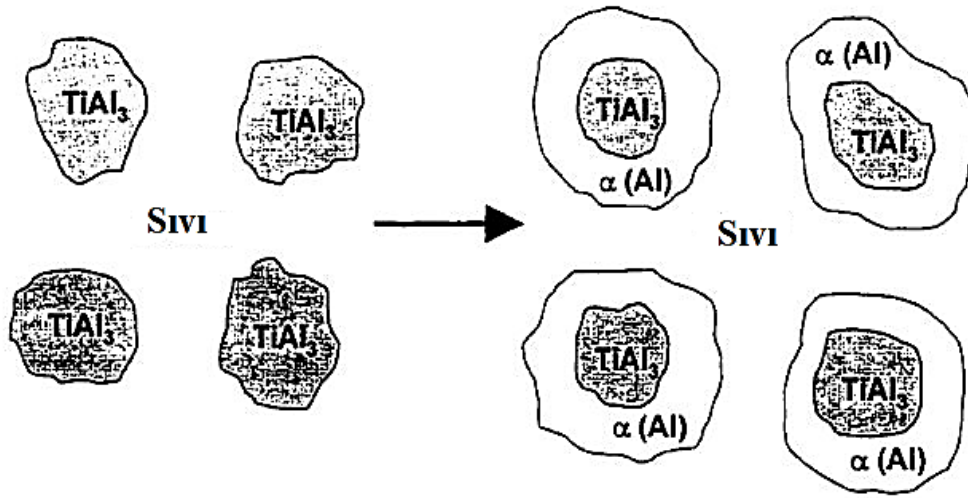
#### 2.4.1 Titanyum ile tane inceltme

Alüminyuma titanyum ilavesi ile ortaya çıkan  $TiAl_3$  çekirdekleyicilerinin  $700\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığında kısa bir süre içerisinde çözünüp yok olması nedeniyle tek başına ilk tercih edilen yöntem değildir. Bu tür alaşımların kullanılması alüminyum içerisinde büyük ve kırılğan tanelerin oluşumunu artırmaktadır (Ramachandran vd., 2008).

Crassley ve Mondolfo'nun Peritektik Teorisi; Titanyum elementinin alüminyum alaşımlarında tane inceltmesini açıklayan en önemli teorilerden biridir. Şekil 2.5'te verilen denge diyagramına göre Al ve ağırlıkça %1,2 oranında Ti bileşimi  $665\text{ }^\circ\text{C}$  de peritektik reaksiyon oluşturmaktadır. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi istenilen kadar ( $>0,15$ ) titanyum varsa  $TiAl_3$  çekirdekleyicisi ergimiş metalde birincil  $\alpha$ -Al'nin ilk kristallerini oluşturur. Reaksiyon genelde peritektik sıcaklığın altında olmaktadır. Crassley ve Mondolf'a göre alüminyum tane inceltmesi kimyasal denklemi Eşitlik 2.1'de gösterilmiştir (Ramachandran vd., 2008).



Şekil 2.5. Al-Ti faz diyagramı (Ibarra, 1999)



Şekil 2.6. Al-Ti peritektik reaksiyonuyla  $\alpha$ -Al'nin çekirdeklenmesi (Ibarra, 1999)

#### 2.4.2 Titanyum ve bor ilavesi ile tane inceltme

Al-Si döküm alaşımlarında Al-Ti-B içerikli tane inceltici ilavesinin en iyi sonuçlar sağladığı tane incelticilerin etkisinin sıvı metal içerisindeki Ti miktarına bağlı olduğu bilinmektedir. Al-Ti bileşim sistemi yüksek oranda silisyum içeren alüminyum döküm alaşımları yüksek oranda silisyum içerikli döküm alaşımlarında Eşitlik 2.2'de gösterilen denkleme göre yeni fazlar oluşturarak peritektik bir sistem olan Al-Ti-Si haline dönüştüğü bilinmektedir (Ramachandran vd., 2008).



Al-Ti-B mastır alaşımlarının en büyük avantajı ergimiş alüminyumda bulunan  $TiAl_3$  çekirdekleyicisinin zamanla çözünmesinin önüne geçmek ve oluşan  $TiB_2$  partiküllerinin topaklaşma yönelimini minimuma indirmektir.  $TiAl_3$  çekirdekleyicisi yüksek çözünürlüklü ve mikro yapılarda 30-40  $\mu m$  büyüklüğünde bulunmaktadır.  $TiB_2$  ise düşük çözünürlüklü ve mikro yapıda 1-2  $\mu m$  büyüklüğünde görülmektedir.  $TiAl_3$  ve  $TiB_2$  çekirdekleyicilerinin farkı boyutta olmaları ve farklı davranış sergilemeleri nedeniyle birçok çekirdeklenme teorisi ortaya çıkmıştır (Ramachandran vd., 2008).

## 2.5 Tane İnceltme Teknikleri

Tane inceltme mekanizmaları günümüzde devam eden bir tartışma konusudur. Birçok tane inceltme mekanizması ortaya atılmasına rağmen bir ortak nokta oluşmamıştır. Tane inceltme teknikleri üzerine yapılan ilk çalışmalar Glasson, Emley ve McCartney tarafından ele alınmıştır (Tanyel, 2014). Genel olarak  $Al_3Ti$  kristallerinin, temel olarak peritektik aralıktaki ağırlıkça %0,15 Ti'nin üzerindeki alaşım bileşimlerinde tane inceltmede önemli rol aldığı görülmektedir.  $Al_3Ti$  fazının denge koşulları altında kararlı olmadığı peritektik aralık dışındaki bileşimler için, temel olarak tane inceltme etkisinin iki yorumu vardır: karbür borid görünümü ve peritektik reaksiyon teorisi (R.C. Adams, 1998). Bu teoriler alüminyum alaşımlarının heterojen olarak çekirdeklenmesini incelemektedir. Çizelge 2.6'da gösterilen çekirdekleyicilerden titanyum ve borun oluşturduğu (Al-5Ti-1B) bileşimi alüminyum alaşımlarında kullanılan en etkili tane incelticidir.

**Çizelge 2.6.** Potansiyel çekirdek bileşiklerinin özellikleri (R.C. Adams, 1998)

Bileşik	Kristalografik ilişkiler	Kafes uyumsuzluğu,%		Düşük soğutma ( $\Delta T$ )	
		a Yönü	b Yönü	°C	°F
$Al_3Ti$	(221)Al   (001) $Al_3Ti$ ; [010]Al   [113] $Al_3Ti$	0	-0,25	.....	.....
	(001)Al   (001) $Al_3Ti$ ; [100]Al   [100] $Al_3Ti$	5,2	5,2	3-5	5-9
$Al_3(Ti,B)$	(011)Al   (001) $Al_3Ti$ ; [01 1]Al   [110] $Al_3Ti$	-0,6	5,2	0	0
	(111)Al   (110) $Al_3Ti$	-5,1	-14,3	.....	.....
$AlB_2$	(111)Al   (001) $AlB_2$	-5,9	-5	0,5-1,0	0,9-1,8
$TiB_2$	Gözlemlenemedi	.....	.....	0-0,3	0-0,5
$TiC$	(001)Al   (001) $TiC$	6,5	6,5	0	0

### 2.5.1 Karbür/borid teorisi

Bu teori ilk olarak Cibula tarafından ortaya konulmuştur (Cibula, 1949). Jones ve Pearson çalışmalarıyla bu teoriyi desteklemişlerdir (Jones ve Pearson, 1976). Bu teoriye göre, Al-Ti alaşımının tane inceltici etkisi karbon ilavesi yapılmaya bile  $TiC$  taneciklerinin olmasından kaynaklanmaktadır. Çok düşük miktarlarda oluşan karbon seviyeleri  $TiC$  taneciklerinin oluşması için yeterli görülmesi bu teoriyi desteklemektedir (Murty vd., 2002).

Karbür/borid teorisi,  $AlB_2$ ,  $TiB_2$  veya  $TiC$  gibi bir bileşiğin, alüminyum kristallerinin çekirdeklenmesini sağladığını düşündürmektedir. Çünkü ana alaşıma eklenen  $Al_3Ti$  partiküllerinin hızla çözünmesi beklenmektedir. Boridler altıgen bir yapıya sahiptirler

ve karbür, alüminyumun kafes yapısı ile nispeten yakın bir uyuşmaya sahip bir kübik yapıya sahiptir. Bir boridin veya karbürün çekirdeklenme oluşmasını etkilediği düşünülse de, tane inceltmeyi sağlayan  $Al_3Ti$  partikülleridir. Örneğin kristal büyümesini hızlandırmak için bolca  $Al_3Ti$  gereklidir. Bu da  $Al_3Ti$  bileşiminin başlangıçtaki çözünmesi sırasında çekirdek yüzey alanıyla optimum sürede temasının sağlanması ile ilgilidir. Daha sonra meydana gelen solma reaksiyonu çekirdeklerde oluşan topaklaşma ve çekilme ile ilgilidir (R.C. Adams, 1998).

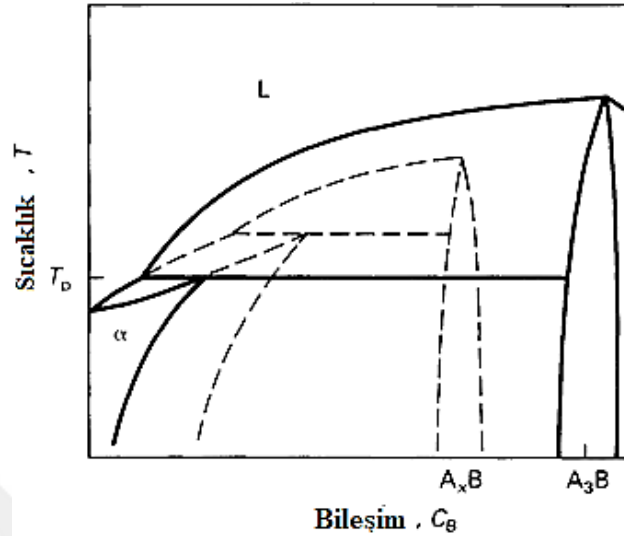
Ergimiş ve külçe halinde bulunan alüminyum alaşımlarında yapılan gözlemlerde karbür ve borid taneciklerin stabil olduğuna dair kanıtlar ortaya atılsa da, yapılan diğer gözlemler oluşan çekirdeklenmelerin karbür ve borid tanelerinden kaynaklandığını söylemek çeşitli problemlere yol açmıştır. Örneğin,  $Al_3Ti$  ve alüminyum arasında tutarlı bir oryantasyon ilişkisi bulunabilir. Ancak,  $AlB_2$  için Çizelge 2.6'de gösterilen durumda  $TiB_2$  için a ve b yönlerinde sırasıyla -%5,9 ve -% 5,8'lik bir kafes bozulması gelişmesi beklense bile,  $TiB_2$  ve alüminyum arasında tutarlı bir ilişki tespit edilmemiştir. Ek olarak, borid partiküllerinin, tane merkezleri içinde değil de tane sınırlarında olduğu görülmüştür. Bu, boridlerin, katılma sırasında çekirdeklenme için çözünmez malzeme ve aktif olmayan partiküller olarak bulunduğunu gösterir (R.C. Adams, 1998).

### 2.5.2 Peritektik reaksiyon teorisi

Tane inceltme sırasındaki çekirdeklenme davranışının alternatif bir bakış açısı olan peritektik bir reaksiyon daha sonra genel kapsamı olan bir modele dönüşmüştür. Her ne kadar birçok partikül tipinin, yaklaşık 5 °C'nin (9 °F) altındaki düşük soğutuculardaki alüminyum kristallerinin çekirdeklenmesinde aktif olduğuna inanılsa da,  $Al_3Ti$ 'nin varlığının, az soğutma gerektiren veya az soğutma gerektirmeyen daha aktif bir katalizör sunduğuna inanılmaktadır. Bu nedenle  $Al_3Ti$  kristallerinin var olması tane inceltme sırasında oluşan çekirdeklenmede baskın rol oynar. Şekil 2.7'de kalın çizgilerle gösterilen peritektik sıcaklıkta ( $T_p$ ) oluşturulan alaşımlar için,  $Al_3Ti$  sıvı alaşım soğuduktan sonra alüminyum kristallerinin oluşumunu destekler. Peritektik aralığın altındaki oluşturulan alaşımlarda ise, alaşıma ilave edilen  $Al_3Ti$  partiküllerinde de kayıp meydana gelir ve bu kayıp  $Al_3Ti$ 'nin tane inceltme etkisinin



azaltılması beklenir. Sıvı alüminyumda bağımsız titanyum ile doymamış olan  $Al_3Ti$  parçacıkları birkaç dakika içinde çözülür (R.C. Adams, 1998).

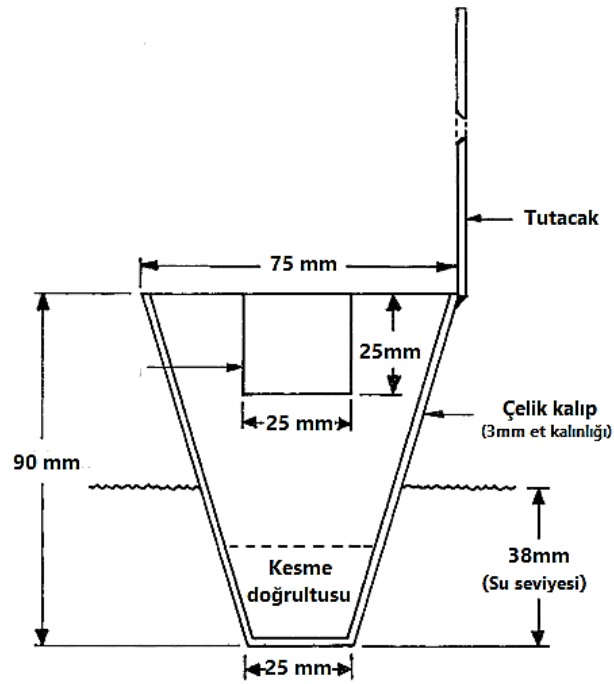


**Şekil 2.7.** Ölçülebilir peritektik reaksiyon için modifiye faz diyagramı (R.C. Adams, 1998)

Stabil bir  $A_3B$  fazı bastırıldığında, A ve  $A_3B$  içeren stabil peritektik reaksiyon, A ve  $A_xB$  arasındaki metastatik bir peritektik reaksiyon ile değiştirilebilir. Metastatik peritektik için peritektik sıcaklık  $T_p$  ve  $\alpha$  faz çözünürlüğü, stabil peritektik durumdan daha yüksektir (R.C. Adams, 1998).

## 2.6 ALCAN Tane İnceltme Testi

Test prosedürü döküm işlemlerinde en çok kullanılan kokil döküm yöntemi sırasındaki katılaşma oranı dikkate alınarak hazırlanmıştır. Bu nedenle en çok kullanılan test prosedürüdür. Bu teste göre, hazırlanmış ergimiş alüminyuma tane incelticiler eklenir ve mekanik olarak 30 saniye karıştırılır. Ergimiş metal yönlü katılaşma sağlamak amacıyla konik şekilde yapılmış çelik kalıplara (Şekil 2.8) dökülür ve bu kalıp tabanı sürekli olarak su ile soğutulur. Soğuyan ergimiş alaşım dipten 25 mm enlemesine kesilerek inceleme numuneleri elde edilir. Makroyapı / mikroyapı kesilen yüzeyden incelenir (Murty vd., 2002).

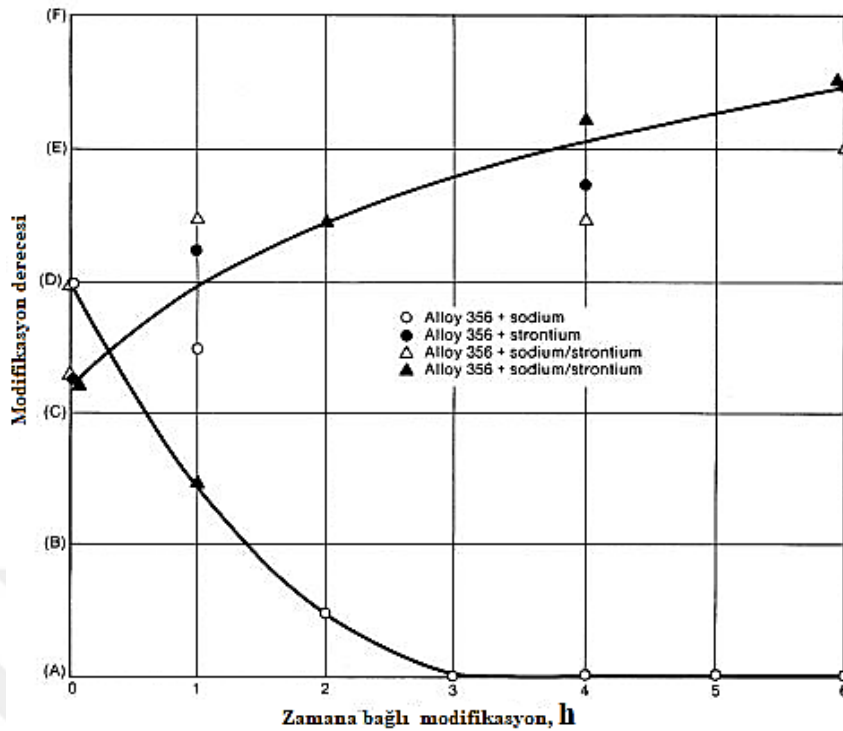


Şekil 2.8. ALCAN testi kalıbı (Murty vd., 2002)

## 2.7 Alüminyum-Silisyum Ötektik Modifikasyonu

Hipoötektik alüminyum-silisyum alaşımlarının özellikleri ötektik şeklini değiştirerek etkilenebilir. Kimyasal değiştiriciler ilavesiyle daha afiner, daha lifli ötektik yapı, arttırılmış katılaşma oranı elde edilebilir. Kalsiyum, sodyum, stronsiyum ve antimonun katılaşma sırasında elde edilebilen ötektik modifikasyon derecesini etkilediği bilinmektedir (Kaufman ve Rooy, 2004).

Şekil 2.9'dan da anlaşılacağı gibi Sodyum muhtemel en güçlü modifiye edicidir, ancak etkileri oksidasyon ve buhar basıncı kayıpları nedeniyle modifikasyona etkisi geçicidir. Stronsiyumun sodyuma göre modifikasyona etkisi daha iyidir, ancak yavaş katılaşma oranları modifikasyon için etkisini azaltmaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004).



**Şekil 2.9.** Sodyum ve Stronsiyum değiştiricilerin zamanın bir fonksiyonu olarak etkinliği (Kaufman ve Rooy, 2004)

Sodyum ve stronsiyum bir arada çok büyük avantaj sağlamaktadır. Kalsiyum ise ticari değeri az olan zayıf bir modifiye edicidir. Antimon sürekli bir etki sağlar, ancak sonuç lifli ötektikten ziyade daha ince bir tabakadır. Sodyum ve stronsiyumun modifikasyon üzerine etkileri Şekil 2.9'da gösterilmiştir (Kaufman ve Rooy, 2004).

Ergimiş alüminyuma sodyum elementinin eklenmesi, hidrojen ve sürüklenen oksit seviyesini artırır bu olay türbülansa sebep olur. NaCl ve NaF içeren higroskopik tuzların kullanımı modifikasyon için ayrıca oksit oluşumu ve çözünmüş hidrojen içeriğinin artması riski oluşturur. Ergime kalitesini geri kazandırmak için eklenen sıvı sodyum kaybı oranını artırır. Sodyumun aşırı kullanımı (ağırlıkça >%0,01), yüzey gerilimi ve azalan akışkanlıktaki artışlarla hatalı çalışma eğilimlerini artırmaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004).

Stronsiyum ilavesi, genellikle değiştiricinin ağırlıkça % 10'u ihtiva eden ana alaşımlar vasıtasıyla yapılır. Stronsiyum ilavesi minimum ergime bozunması ile yapılırken artan çözünürlük oranı ile yüzey alanında oluşan gerilmeler oluşan hidrojen gözenekleriyle ilgilidir (Kaufman ve Rooy, 2004).

Ötektik alüminyum-silisyum modifikasyonunun sağladığı özellikler ötektik konsantrasyonu ağırlıkça %5 Si ihtiva eden alaşımlar içinde elde edilmektedir. Bu alaşımlara modifiye edici elementlerin eklenmesi daha ince bir lamel veya lifli ötektik yapı oluşturur. Değişiklik ilaveleri, ötektik içindeki silisyum kristallerinin büyümesini engeller veya daha ince lameller sağlayan silisyum-matris büyüme hızlarının dengelenmesini sağlar (Kaufman ve Rooy, 2004).

Fosfor modifiye edicilerle birlikte fosfitler oluşturmak isteyerek mekanizmasını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle modifikasyon işleminde fosforun etkisini azaltmak için düşük fosforlu metaller tercih edilir veya daha fazla modifiye edici eklenir (Kaufman ve Rooy, 2004).

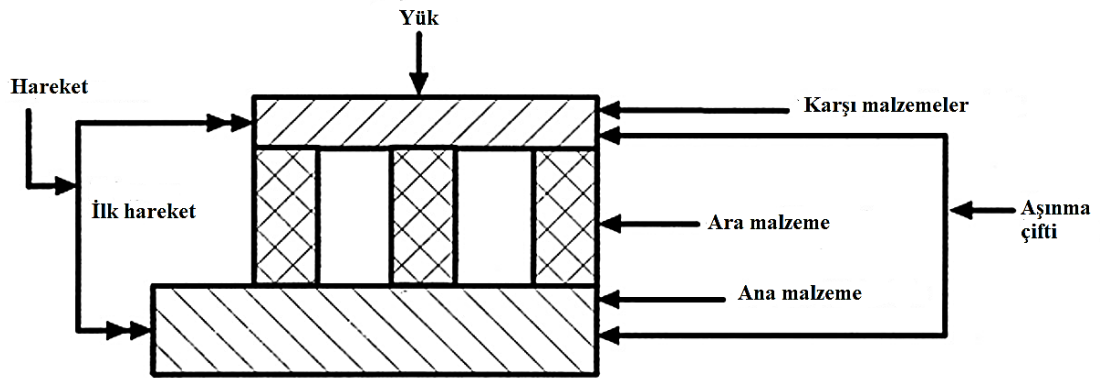
Modifiye edilmiş yapılar, modifiye edilmemiş yapılar ile karşılaştırıldığında daha yüksek çekme özellikleri ve kayda değer ölçüde geliştirilmiş süneklik sergiler. Oluşturulan alaşımın iyileştirilmesi modifiye edici ilavesi sonrası gözeneğin oluşumunun ne kadar önlendiğine bağlıdır. Geliştirilmiş döküm besleme ve yükseltilmiş sıcaklıklarda çatlamaya karşı üstün bir direnç gösterir (Kaufman ve Rooy, 2004).

## 2.8 Aşınma

Aşınma, malzemenin katı yüzeylerinin çevre ile etkileşimi sonucunda malzeme üzerinde deformasyona ve malzeme kaybına sebep olur. Malzemede meydana gelen bu malzeme kaybına rağmen oluşan plastik deformasyonun boyut kaybına sebep olduğu söylenemez. Bu tanımlama aynı zamanda, kayma hareketi ve kavite oluşumunun olmadığı veya çevresel etkenlerden meydana gelen korozyon hasarının mekanik etkenlerden değil de kimyasal etkenlerden de kaynaklanabileceğini açıklamamaktadır (Chattopadhyay, 2001). Metal aşınması, yüzeyin ve yüzeye yakın malzemenin plastik olarak yerinden çıkması ve aşınma kalıntısı oluşturan parçacıkların ayrılması ile gerçekleşir. Parçacık boyutu milimetre ile nanometre arasında değişebilir (Davis, 1998). Aşınma hızları ise kullanım şartlarına göre  $10^{-15}$ - $10^{-1}$  mm<sup>3</sup>/Nm olarak değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenliğin sebebi aşınmanın kontrolünde, malzeme seçimi ve kullanım koşullarını büyük ölçüde etkilemektedir (Bhushan, 2001).

Makine elemanlarındaki yıpranma, yorulma ve sürünme gibi diğer işlemlerle birlikte, işlevsel yüzeylerin bozulmasına neden olarak malzeme arızasına veya işlev kaybına neden olur. Aşınma ortamı veya aşınmaya neden olan sistemler DIN 50320’de tanımlanmıştır. DIN 50320’ye göre aşınma, malzemenin kendi özelliğinden değil sistem özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Şekil 2.10). Bu nedenle malzemenin performansı aşınma sistemine (adhesiv veya abrasif) ve aşınma ortamına (yük, hız vb.) bağlı olacaktır. Sistemin sınır koşulları tarafından belirlenen sistemde aşınma, sadece aşağıda sınıflandırılarak verilen şartlarda meydana gelir (Chattopadhyay, 2001):

- Ana malzeme ile temas halinde olan karşı yüzey/disk veya karşı malzemenin oluşturduğu aşınma veya benzer veya farklı özelliklerdeki ara yüzey malzemenin oluşturduğu durumlarda meydana gelir. Bunların kombinasyonu / her ikisinin meydana gelmesi aşınma çifti olarak adlandırılır (Chattopadhyay, 2001).
- Bağıl hareket, yük altında aşınma çiftini oluşturan bileşenlerin arasında meydana gelir. Bu hareket ve yük birlikte birincil faktörler olarak tanımlanır (Chattopadhyay, 2001).



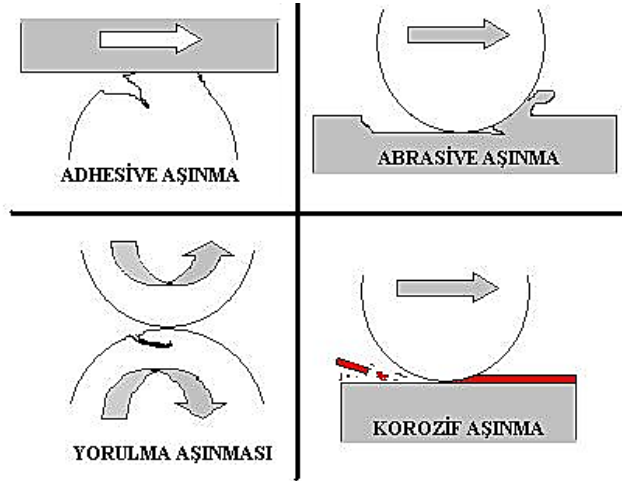
Şekil 2.10. Aşınma sistemi (DIN 50320) (Chattopadhyay, 2001)

## 2.9 Aşınma Mekanizmaları

Aşınma sırasında gerçekleşen temas türleri, aşınma mekanizmaları ile ilişkilidir. Aşınma sırasındaki temas eden noktadaki oluşan koşullar, temas yapılandırmalarıyla bağımsız bir şekilde ortaya çıkmaktadırlar. Temasın şiddeti, elastik temas veya plastik temas şeklinde olmaktadır. Aşağıda aşınma mekanizmalarının, temel ve en önemli olanları verilmiştir (Koraman, 2011; Yıldız ve Gür, 2006). Bunlar;

- Abrasiv Aşınma
- Adhesiv Aşınma
- Yorulma Aşınması
- Koroziif Aşınma

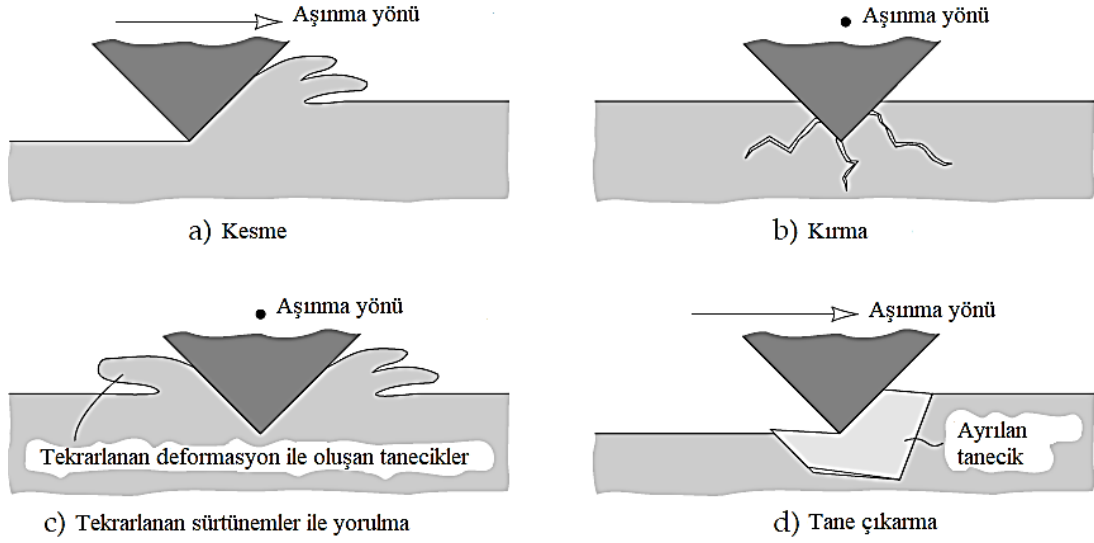
Belirtilen aşınma mekanizmaları şematik olarak, Şekil 2.11’de gösterilmektedir. Bu aşınma mekanizmaları aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.11. Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi (Yıldız ve Gür, 2006)

### 2.9.1 Abrasiv aşınma

Abrasiv aşınma, katı malzemeler üzerine aynı sertlikte veya daha sert katı malzemeler yük oluşturduğunda meydana gelir. Sertliği düşük olan bir malzeme sertliği yüksek bir malzeme karşısında içerisinde bulunan daha sert partiküller sayesinde abrasif aşınmaya neden olabilir. Abrasiv aşınma mekanizmalarının tanımlanmamış olması, abrasif aşınmanın önlenmesi ve kontrolünü zorlaştırmaktadır. Her biri farklı özelliklere sahip ancak birbirleriyle uyum içinde hareket eden abrasif aşınma mekanizmaları vardır. İlk zamanlar abrasif aşınmanın taşlama tezgâhı veya bir eğe ile kesim işleminde oluşan aşınmaya benzediği düşünülmüş ancak mikroskobik incelemeler sonucu birçok aşınma mekanizmasının olduğu görülmüştür. Şekil 2.12’de gösterildiği gibi aşındırıcı tanecikler veya parçacıklar, tekrarlanan deformasyonlar ile mikro-kesme, mikro-kırılma, ayrı ayrı taneciklerin çıkarılması veya tekrarlanan yorulma şeklinde aşınmaya sebep olabilir (Stachowiak ve Batchelor, 2005).



**Şekil 2.12.** Abrasiv aşınma mekanizmaları: (a) mikro kesme, (b) kırılma, (c) yorulma ve (d) tane çıkarma (Stachowiak ve Batchelor, 2005)

### 2.9.2 Adhesiv aşınma

Adhesiv aşınmada, yük altındaki kayma yüzeyleri katı faz kaynak yoluyla birbirine yapışır ve yüzeylerin birbirinden ayrılması ile malzeme kaybı meydana gelir. Benzer metaller için, kayma işlemi sırasında oluşan sertleşme sebebiyle, pürüzlü formların birleşimi ana metallere daha güçlüdür. Temas yüzeylerinde meydana gelen topaklanma sebebiyle malzeme kaybedilir. Benzer olmayan metallere, kaynaklanmış birleşim noktalarında, zayıf olan metalin bir kısmı kaybolur. Adhesiv, sıcaklık temasında ortak ergimeye sahip malzemeler arasında daha fazla görülmektedir. Benzer olmayan metal çiftleri arasında meydana gelen adhesiv aşınma, benzer olanlara istinaden daha düşük oranda gerçekleşmektedir. Genel adhesiv aşınma denklemi Eşitlik 2.3'te verilmiştir (Chattopadhyay, 2001).

$$\frac{V}{d} = K_{adh} * \frac{F_N}{H} \quad (2.3)$$

Eşitlikte;

$V$  : Aşınma hacmi

$d$  : Kayma mesafesi

$F_N$  : Uygulanan normal kuvvet

$H$  : Sertlik

$K$  : Aşınma katsayısı

$K_{adh} = \frac{K}{3}$  olarak verilmiştir.

Ohmae ve diğerleri çalışmalarında, metal çiftlerinin uyumluluğu ile sürtünme katsayısını ilişkilendirmeye çalışmışlardır. Hume-Rothery kuralına göre uyumluluk, elektronegatiflik, atom yarıçapı, elektron-atom oranı ve elektron yörüngesi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Uyumluluk oranı, üçüncü grupta meydana gelen sürtünme katsayısındaki tekdüze azalma ile açıklanamaz. Bununla birlikte, “d” kuşağının artan grup numarası ile aşamalı olarak doldurulması, üçüncü geçiş metalleri grubunun sürtünme özelliklerini de iyi bir şekilde kabul eder (Sırasıyla; Ti, V, Cr, Mn, Fe, CO, Ni ve Cu) (Ohmae vd., 1979).

### 2.9.3 Adhesiv aşınma testi yöntemleri

Triboloji ve Yağlama Mühendisleri Derneği (STLE), sürtünme aşınması ve yağlama testleri için 12 kategori altında bazı 300 test yöntemi belgelemiştir. Ancak adhesiv aşınma testlerin çoğunluğu aşağıda belirtilen üç yöntemle dayanmaktadır;

- Pin-on-disk (tek yönlü)
- Pin (veya blok)-on-halka (tek yönlü)
- Pin-on-plaka (pistonlu)

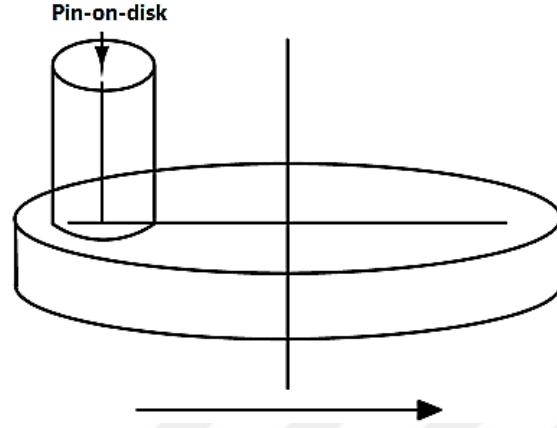
Bu denemeler, kuru ya da yağlayıcının eklenmesi ile gerçekleştirilebilir. Yukarıda belirtilen adhesiv aşınma testi yöntemleri aşağıda açıklanmaktadır (Chattopadhyay, 2001).

#### a) Pin-on-Disk testi

ASTM G 99 (Murray, 2013), disk üzerinde pin aparatı ile adhesiv aşınma testi yapılması için uygulamayı şu şekilde açıklamaktadır: Bir pin numunesi, bir kol veya levye tarafından belirlenen bir yük ile düz dairesel bir diske sıkıca bastırılır (Şekil 2.13). Test sırasında, disk veya pin döner ve disk yüzeyinde dairesel bir form oluşturur. Pin yerine bir top da kullanılabilir. Aşınma miktarı, test öncesi ve sonrasında boyutlar tartılarak veya ölçülerek belirlenir. Doğrusal boyutlardaki değişiklikler, elektronik mesafe ölçer yardımı ile ölçülebilir. Doğrusal ölçümler uygun geometrik ilişkiler kullanılarak aşınma hacmine dönüştürülür. Sürtünme katsayısını belirlemek için, yük



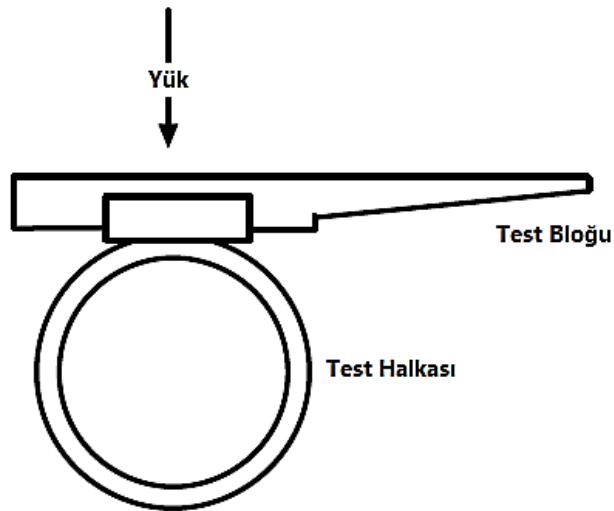
hücresi gibi bir kuvvet ölçme cihazı kullanılır. Test, seçilen kayma mesafeleri, yükleri ve hızları için yapılabilir (Chattopadhyay, 2001).



Şekil 2.13. Pin-on-Disk adhesiv aşınma testi (Chattopadhyay, 2001)

**b) Pin (veya blok)-on-Halka (tek yönlü) testi**

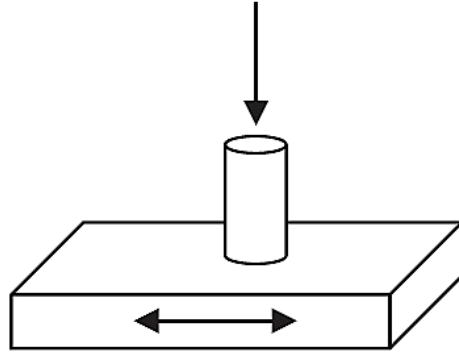
ASTM G 77 (D. Li, 2016), halka üzerinde pin ya da blok aparatı ile adhesiv aşınma testi (Şekil 2.14) yapılması için uygulamayı şu şekilde açıklamaktadır. Pin (veya blok) numunesi dikey olarak monte edilmiş bir diskin (veya halkanın) kenarında kayar. Disk 750 ila 2000 devir/dakikada (2,9–7,9 m/s) döner. Aşınma gerçekleşikçe temas şekli değişir. Geometride yapılan değişiklik dışında, test pin-on-disk testine benzer. Disk üzerindeki pin, dönen pompa ekipmanı gibi uygulamaların oluşturduğu hareket tipini üretir (Chattopadhyay, 2001).



Şekil 2.14. Pin-on-Halka adhesiv aşınma testi (Chattopadhyay, 2001)

### c) Pin-on-Plaka testi

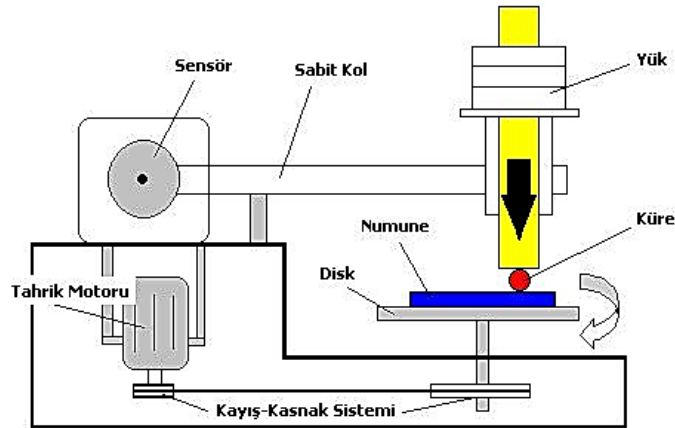
Karşı zemin, dakikada 50 ila 300 döngüde karşılık veren bir plakadır (120×40×3 mm ya da 5×2×0,12 inç) (Şekil 2.15). Strok uzunluğu 10 ila 110 mm (0,4–4 inç) arasında değişebilir. Geometri, içten yanmalı motorlarda pistonun ürettiğine benzer bir hareket üretir (Chattopadhyay, 2001).



Şekil 2.15. Pin-on-Plaka adhesiv aşınma testi (Hutchings ve Philip Shipway, 2017)

### 2.9.4 Yorulma aşınması

Temas yüzeyler arasında oluşan tekrarlı çevrimsel hareketler adhesiv ve abrasiv aşınma için gerekli olmamaktadır. Çünkü adhesiv ve abrasiv aşınma mekanizmalarında yüzeyler arasında sürekli bir temas söz konusudur. Çevrimsel hareketler sonucu adhesiv ve abrasiv aşınma dışında diğer aşınma mekanizmaları oluşmaktadır. Bu aşınma mekanizmalarına yorulma aşınması denilmektedir. Şekil 2.16'da yorulma aşınma mekanizmasının modeli belirtilmiştir (Koraman, 2011; Yıldız ve Gür, 2006).



Şekil 2.16. Yorulma aşınma mekanizmasının modeli (Yıldız ve Gür, 2006)

### 2.9.5 Korozyon aşınması

Metaller yüzeylerinde oluşturdukları oksit tabakası nedeniyle korozyona karşı oldukça dirençlidirler. Aşındırıcı koşulların etkisiyle metal yüzeylerinde oluşan oksit tabakası tekrarlı darbelerin etkisiyle kırılabilir ve daha sonra bu koruyucu tabaka kaybolarak yeniden oluşmaz. Bu şekilde temas yüzeyleri korumasız kalır ve korozyon aşınması meydana gelir (Sarıkaya, 2007; Yalçınkaya, 2018). Korozyon aşınması iki aşamada meydana gelir;

- Temas yüzeyleri ortamda bulunan etkenler ile reaksiyona girer, reaksiyon sonucu temas yüzeyleri üzerinde oksit tabakası oluşturur,
- Temas yüzeylerinde tekrarlı darbelerin etkisiyle çatlaklar ya da abrasiv etkenlerden dolayı reaksiyon sonucu oluşan tabaka hasara uğrar (Yalçınkaya, 2018).

### 2.9.6 Aşınmayı etkileyen faktörler

Aşınmayı etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Aşınmaya en çok etki eden faktörler aşağıda belirtilmiştir.

- Malzeme seçimi
- Yüzey sıcaklığı
- Yüzeye uygulanan yük
- Kayma mesafesi
- Aşındırıcı parçacıklar ve malzemelerin sertlikleri
- Yağlama (Buytoz ve Eren, 2007; Chattopadhyay, 2001; Özmen, 2004; Wen ve Huang, 2012)

#### a) Malzeme seçimi

Gevrek malzemenin adhesiv aşınmaya karşı dayanıklılığı plastik malzemeye göre daha yüksektir. Plastik malzemelerde oluşan hasar plastik malzemesinin akma dayanımından kaynaklanır. Genel olarak yüzeyden belirli bir derinlikte (0,2 mm) aşınma kalıntısı oluşurken bazen derinlik miktarı 3 mm'ye kadar çıkabilir. Yüzey basıncı bir süre sonra kritik değere ulaştığında sürtünme meydana gelecektir. Mukavemet teorisine göre, gevrek malzemelerde oluşan hasar normal gerilmeden kaynaklanır, ancak plastik malzeme hasarı kayma gerilmesi ile belirlenir. Maksimum

normal gerilme temas yüzeyinde olmakla birlikte, maksimum kayma gerilmesi yüzeyin altında gerçekleşir. Malzemede oluşan stres arttıkça, adhesiv aşınması daha şiddetli olur. Aynı metal ya da malzemeler arasında olan yüzey temasında adhesiv aşınma daha büyük olur. Farklı metal ya da malzemeler arasında olan aşınma daha düşük olmaktadır. Metalik ve metalik malzemelerden oluşan sürtünme çifti, iki farklı metalin oluşturduğu sürtünme çiftinden daha büyük aşınma direncine sahiptir. Metal yüzeyde üretilen sülfid, fosfit veya klorür vb. yüzey işleme yöntemleri sayesinde yapışmayı etkin bir şekilde azaltırken, yüzey filmi de hasarın derinliğini sınırlar ve böylece yapılan yüzey işlemi sayesinde aşınma yeteneği artmış olur (Wen ve Huang, 2012).

### **b) Yüzey sıcaklığı**

Yüzey sıcaklığı, sürtünme yüzeylerinin etkileşimi ve hasarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüzey sıcaklığı yağlama arızasına neden olabilirken, sıcaklık değişimi malzeme özellikleri ve malzeme içyapısında değişimlere neden olur. Yüzey basıncı ve kayma hızı yüzey sıcaklığını etkileyen iki ana faktördür. Bu iki faktörü sınırlandırmak aşınma direncinin artmasına sebep olur (Wen ve Huang, 2012).

### **c) Yüzeye uygulanan yük**

Daha yüksek yüklerde, aşındırıcıların kesilmesi veya oyuklanma daha şiddetlidir ve daha fazla aşınmaya neden olur. Düşük yükler altında ise, aşındırıcılar yüzeyde çizikler veya mikro kesikler oluşturarak malzemenin daha az aşınmasına neden olur (Chattopadhyay, 2001).

### **d) Kayma mesafesi**

Kayma mesafesindeki artış miktarı, yüzeyden daha fazla malzeme kaybına neden olarak aşınmayı artırır (Chattopadhyay, 2001).

### **e) Aşındırıcı parçacıklar ve malzemelerin sertlikleri**

Bir yüzeyin sertliği ne kadar yüksek olursa, aşınma hacmi o kadar düşük olur. Bununla birlikte, aşındırıcı sertliğinin metalin sertliğine oranı, aşınma için önemli bir parametredir. Sertlik artırılarak aşınma azaltılabilir veya aşınmadan kaynaklanan

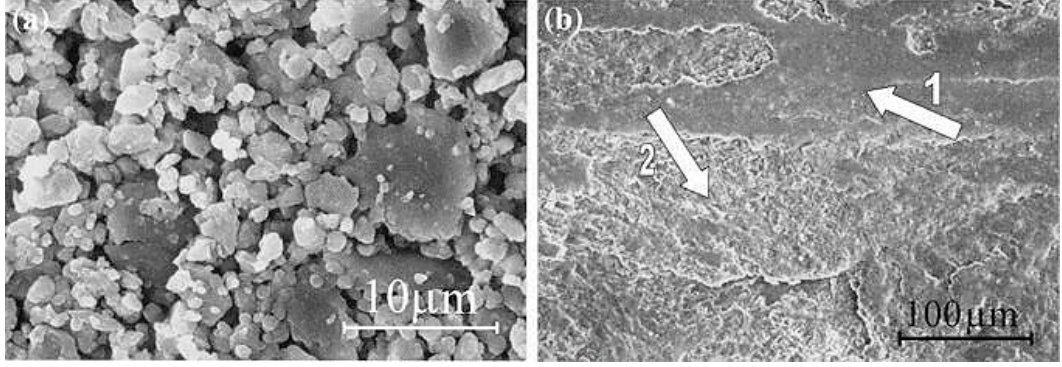
yüzeý deformasyonu sabit tutulabilir. Aşınma dayanımını artırmak için alaşımına ya da ısııl işlem uygulanarak yüzeý sertleştirme yapılabilir (Buytoz ve Eren, 2007; Chattopadhyay, 2001).

#### f) Yağlama

Aşınmaya karşı alınan en önemli önleyici tedbirlerin başında yağlama gelmektedir. Yağ ya da katkılı yağ kullanarak sisteme yapılan ilave yağlama işlemi ile aşınma özellikleri geliştirilebilir. Yağlama işlemi malzemelerin ısııl iletkenliğini kullanarak soğuma kabiliyetini artırılabilir, yüzeý sıcaklığı düşürülebilir ve yüzeýler arasında oluşan temas basıncı düşürülebilir. Bu sayede aşınma direnci artırılmış olur (Wen ve Huang, 2012).

### 2.10 Alüminyum Alaşımında Aşınma

Alüminyum alaşımaları sıcaklığın artmasıyla ciddi bir şekilde azalan nispeten düşük sertlik ile karakterize edilirler (alaşımalar yaklaşık 250 kg/mm<sup>2</sup> sertlik seviyesine erişirler). Alüminyum alaşımaları aslında 100 °C sıcaklık civarında yoğun termal yumuşamaya başlarlar. Sonuç olarak bu sıcaklıklarda alaşımaların sürtünme katsayısı ve aşınma katsayısı gözle görülür bir şekilde artmaya başlar. Tribo-oksidatif aşınmadan şiddetli adhesiv aşınmasına dönüşüm uygulanan basıncın ve kayma hızının düşük değerlerinde meydana gelir. Tribo-oksidatif aşınmanın temeli olan alüminyum koruyucu etkisinin yeterince iyi olmadığı muhakkak göz önüne alınmalıdır. Örneğin, çeliklerdeki demir-oksitler aşınma yüzeýine yayılmak için herhangi bir yumuşaklık ve yetenek göstermezler. Dahası bunların alt yapıya yapışması da düşüktür. Alüminyum alaşımalarında Tribo-oksidatif aşınma altında oluşan koruyucu tabaka tipik olarak karşı yüzeýden kaynaklanan bir oksit karışımıdır. Örnek olarak, Şekil 2.17'de AISI 52100 çeliğine karşı 1 MPa'da ve 0,2 m/s'de kuru kaymadan sonra Alüminyum-7072 alaşımı durumunda aşınma kalıntısının ve aşınmış izin morfolojisini göstermektedir. Tribolayer'in kırılğan parçalanmasından oluşan parçalar ufak ve eşitlenmiş gözükmektedir. Bunlar alüminyum ve demir oksitler tarafından oluşturulur (Straffelini, 2015).



**Şekil 2.17.** Al-7072 alaşımlarının 1 MPa’da kuru kaymadan sonra 52100 çeliklere karşı (a) 0,2 m/s’de aşınma kalıntısının ve (b) aşınmış izin morfolojisi (Straffelini, 2015)

Alüminyum alaşımlarında adhesiv aşınması önemli derecede şiddetlidir çünkü bu durum yoğun transfer olayları ile karakterize olmaktadır. Bu alaşımlar daha sonra yüksek temas sıcaklıklarına artış sağlayacak uygulamaları kaydırmak için uygun değildir. Örneğin, bu alaşımlar tipik olarak yüksek temas basınçları ile karakterize edilen uyumsuz temaslar için uygun değildirler. Alüminyum alaşımlar, bu sebeple çoğunlukla hafif yükleme koşullarında çalışan kaymalı rulmanlar gibi uygun temas koşullarında kullanılırlar. Kaymalı yataklarda kullanılan yaygın bir alaşım Al-20Sn alaşımıdır ve bu alaşım sert bir matristeki yumuşak bir fazdan oluşur. Kalay yerine kurşun da eklenebilir (Straffelini, 2015).

Alüminyum alaşımlarının kayma direnci, seramik parçacıkları ile güçlendirilerek artırılabilir. Alüminyum matris kompozitler genel olarak ağırlıkça %20 alümina veya SiC partikülleri içermektedir. Bu parçacıkların varlığı, hafif tribo-oksidatif aşınma ile yüksek adhesiv aşınma arasındaki sınırı daha yüksek nominal basınçlara ve kayma hızlarına ulaştırır. Alüminyum alaşımlarının kayma aşınma direncini arttırmak için kullanılacak bir başka yöntem, sert anotlama veya alüminyum oksitlerin bir yüzey tabakası üzerinde ince film haline getirilmesiyle yapılır (Straffelini, 2015).

### 3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar anlatılacaktır. Tez çalışmaları kapsamında Etial 110, Etial 140, Etial 160 ve Etial 177 alaşımları kum ve kokil kalıpta hazırlanmış kalıplara dökülmüştür. Dökümlerde ilavesiz, tane inceltici ilaveli ve modifiye edici ilaveli olarak gerçekleştirilmiştir. Döküm sonrası numuneler, sıvı metal temizlik ölçümleri (RPT testleri), mikro yapı incelemeleri, SEM incelemeleri, yoğunluk ölçümleri aşınma ve sertlik testlerine tabi tutulmuştur. Böylece tane inceltici, modifiye edici ilavesi, kalıp malzemesi farkının belirlenen farklı kimyasal bileşimlere sahip alüminyum döküm alaşımlarındaki mikro yapı, sertlik ve aşınma özelliklerindeki etkileri incelenmiştir.

#### 3.1 Döküm Alaşımlarının Seçimi

Deneylerde kullanılacak alaşım seçimi yapılırken kimyasal bileşim esas alınmıştır. Kimyasal bileşimlerdeki farklılıklar katılaşmayı doğrudan etkilediğinden çalışmalarda döküm sektöründe yaygın kullanılan tüm alüminyum döküm alaşımları hakkında bilgi sahibi olunabilmesi için gerekli ve yeterli alaşım seçimi yapılmaya çalışılmıştır. Böylelikle yapılan çalışmalar sonucunda ticari olarak yaygınca uygulama bulan Alüminyum alaşımlarının geneli hakkında fikir edinilmesi amaçlanmıştır. Çizelge 3.1'de, tez kapsamında dökümlerin yapıldığı alaşımlar ve alaşımların Etinorm standardına göre alaşımların kimyasal bileşim aralıkları verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Deneylerde kullanılan alaşımların Etinorm standardına göre kimyasal bileşimleri (% Ağ.) (Eti Alüminyum, 2019)

Alaşım	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sn
<b>Etial 110</b>	0,70	4,00 - 6,00	2,00 - 4,00	0,20- 0,60	0,15	0,20	0,20	0,05
<b>Etial 140</b>	0,60	11,50 - 13,50	0,10	0,40	0,10	0,10	0,15	0,05
<b>Etial 160</b>	1,00	7,50 - 9,00	3,00 - 4,00	0,50	0,30	1,00	0,20	0,10
<b>Etial 177</b>	0,20	6,60 - 7,40	0,02	0,03	0,30 - 0,45	0,04	0,08 - 0,14	0,05

Alaşım lar primer külçe olarak temin edilmiş ve döküm sonrası kimyasal bileşiminin uygunluğunun kontrolü için numuneler alınarak Spectromax M1156235 model optik emisyon spektrometre cihazında analizi yapılmıştır.

### 3.2 Deney Parametrelerinin Belirlenmesi ve Deney Tasarımı

Tez çalışması kapsamında, belirlenen alüminyum alaşımlarında tane inceltici ve modifiye edicinin kum ve kokil kalıba dökümünün mikro yapı, sertlik ve aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla kum ve kokil kalıp imalat yöntemlerine uygun olacak silindirik bir model kullanılmıştır. Deney parametreleri olarak alaşım farkı, kalıp malzemesi, tane inceltici ilavesi, modifiye edici ilavesi olarak belirlenmiştir. Alaşım olarak Etial 110, Etial 140, Etial 160 ve Etial 177 alüminyum döküm alaşımları kullanılmıştır. Kalıp malzemesi olarak aynı geometriye sahip kum ve kokil kalıp kullanılmıştır. Tane inceltici olarak alaşım içerisine ağırlıkça %0,2 Ti etki edecek şekilde Al5Ti1B mastır alaşımı ve ağırlıkça %0,2 Sr etki edecek şekilde Al10Sr mastır alaşımı kullanılmıştır. Döküm deneylerinde sıvı metal temizliği bir parametre olarak kullanılmamış ve bütün döküm deneylerinde sıvı metal temizliği sabit tutulmuştur. Dökümhane uygulamalarında tane inceltici katılmaksızın modifiye edici ilavesinin kullanımı çok yaygın olmadığından deney şartları buna uygun olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.2’de, tez kapsamında belirlenen deney parametreleri verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Tez çalışmaları kapsamında belirlenen deney parametreleri

Alaşım Çeşidi				Mastır Alaşımı İlavesi İşlemleri	Döküm Yöntemi
Etial 110	Etial 140	Etial 160	Etial 177	İlave yok	Kum Kalıba Döküm
				AlTiB ilaveli	
				AlTiB ve AlSr ilaveli	Kokil Kalıba Döküm

Tez kapsamında Çizelge 3.2’de belirtildiği gibi 2 farklı döküm yöntemi ile 4 farklı alaşım için 3 farklı proseste toplam 24 farklı şartlarda döküm deneyleri yapılmıştır. Çizelge 3.3’te belirlenen parametrelere uygun olarak yapılan döküm deneyleri liste halinde verilmiştir.

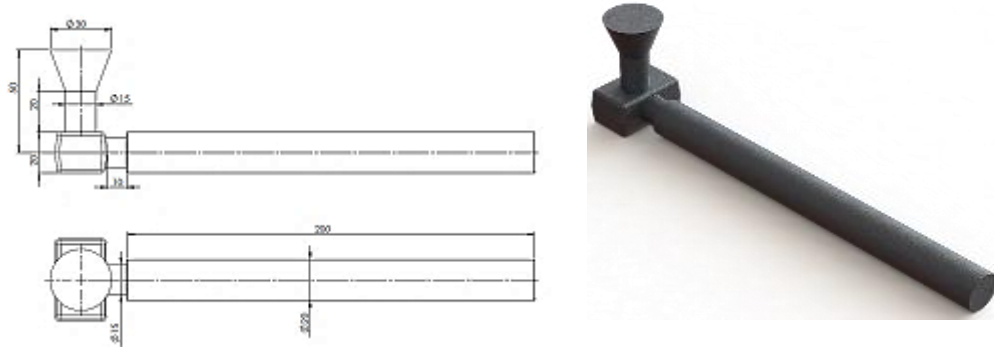


**Çizelge 3.3.** Deney parametrelerine uygun olarak yapılan döküm deneyleri

N.no	Döküm Yöntemi	Alaşım Çeşidi	Tane İnceltici İlavesi	Modifiye Edici İlavesi
1	Kum	Etial 110	İlave yok	İlave yok
2	Kum	Etial 110	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	İlave yok
3	Kum	Etial 110	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)
4	Kum	Etial 140	İlave yok	İlave yok
5	Kum	Etial 140	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	İlave yok
6	Kum	Etial 140	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)
7	Kum	Etial 160	İlave yok	İlave yok
8	Kum	Etial 160	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	İlave yok
9	Kum	Etial 160	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)
10	Kum	Etial 177	İlave yok	İlave yok
11	Kum	Etial 177	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	İlave yok
12	Kum	Etial 177	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)
13	Kokil	Etial 110	İlave yok	İlave yok
14	Kokil	Etial 110	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	İlave yok
15	Kokil	Etial 110	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)
16	Kokil	Etial 140	İlave yok	İlave yok
17	Kokil	Etial 140	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	İlave yok
18	Kokil	Etial 140	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)
19	Kokil	Etial 160	İlave yok	İlave yok
20	Kokil	Etial 160	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	İlave yok
21	Kokil	Etial 160	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)
22	Kokil	Etial 177	İlave yok	İlave yok
23	Kokil	Etial 177	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	İlave yok
24	Kokil	Etial 177	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)

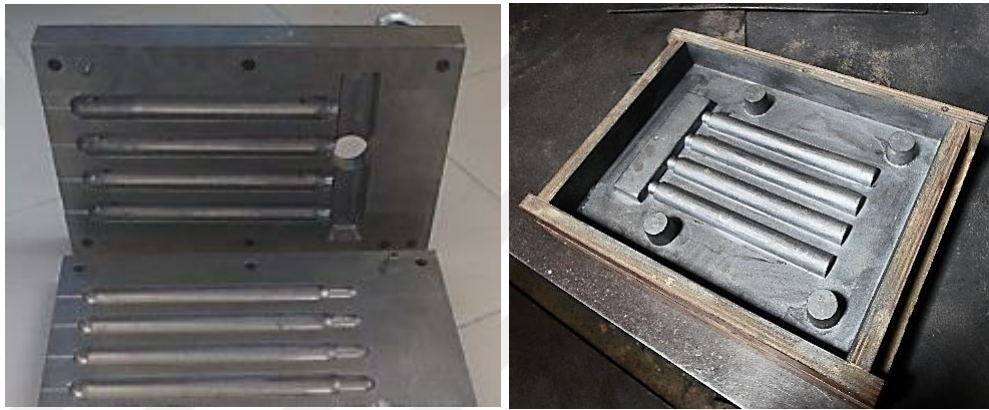
### 3.3 Model Tasarımı ve İmalatı

Döküm deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan modele ait ölçüler ve katı model görüntüsü Şekil 3.1’de verilmiştir. Şekilde görülen model tasarımına uygun olarak kum kalıba döküm için model plakası ve aynı ölçülerde kokil kalıp hazırlanmıştır.



**Şekil 3.1.** Döküm deneylerinin yapıldığı model ölçüleri ve katı model görüntüsü

Model tasarımı Şekil 3.1'deki gibi planlanan test modeli, çift taraflı plak model olarak imal edilmiş ve kum kalıp hazırlama işlemlerinde kolaylık olması açısından sandık tipi çıkma derece içerisinde yapılmıştır. Hazırlanan kum kalıpların kapatılmasını sağlamak açısından alt dereceye dişi, üst dereceye erkek merkezleme pimleri yapılmıştır. Ayrıca kokil kalıbın modifikasyon etkisinin görülebilmesi için, model plakası ile aynı ölçülerde hazırlanan kokil kalıp hazırlanmıştır. Şekil 3.2'de kum kalıba döküm yöntemi için hazırlanan model plakası görüntüsü ve kokil kalıp görüntüsü verilmiştir. Döküm numuneler, soğuma ve katılaşma sonrası kalıptan çıkartılmış ve 20 mm çapta ve 200 mm uzunlukta deney test numuneleri elde edilmiştir.



Şekil 3.2. Kokil kalıp, Kum kalıba döküm için model plakası görüntüsü

### 3.4 Kalıpların Hazırlanması

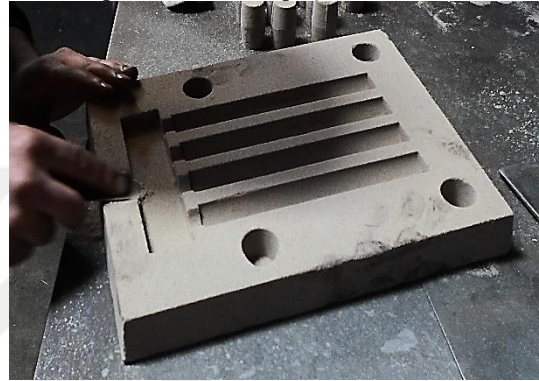
Kum kalıpların hazırlanmasında çift taraflı model plakası kullanılmıştır. Kalıp kumu; 90-110 AFS tane boyutuna sahip kuru silis kumu içerisine ağırlıkça %2,5 oranında sodyum silikat reçine eklenip kum mikserinde karıştırılarak elde edilmiştir. Kalıp hazırlanması için öncelikle kalıp kumunun modele yapışmasını önlemek için kalıp ayırıcı madde olarak grafit serpilmiştir. Sonrasında hazırlanmış kalıp kumu kademeli olarak derece içerisine doldurulmuş ve elle dövülerek sıkıştırılmıştır. Kalıba uygulanan gazın her tarafa ulaşmasını sağlayarak kalıbı daha iyi sertleştirebilmesi ve döküm esnasında gaz çıkışını sağlamak için şiş yardımı ile kanallar açılmıştır. Son olarak 3 dakika süre ile kalıba CO<sub>2</sub> gazı verilerek kalıp hazırlama işlemi tamamlanmıştır. Derece ve modellere verilen koniklik sayesinde kalıplama işlemi sonrası hazırlanan kalıp rahatça modelden ayrılabilir. Şekil 3.3'te kalıp hazırlama işlem basamaklarından örnek görüntüler verilmiştir.



Kalıbın Kalıp Ayırıcı Olarak Grafit Uygulaması



Kalıp Kumunun Kalıp İçine Oturtulması

Kalıp Kumunun CO<sub>2</sub> Verilerek Sertleştirilmesi

Döküm Kalıplarının Hazırlanması

### Şekil 3.3. Kalıplama işlem basamaklarından muhtelif görüntüler

Kalıplar merkezleme maçalarına göre kapatıldıktan sonra döküm esnasında sıvı metal basıncına karşı kalıpların açılmasını önlemek için ve kalıpları bir arada tutabilmek için plakalar arasına konulup işkence ile sıkıştırılarak döküme hazır hale gelmiştir.

Kokil kalıplar döküme hazırlanırken yüzeylerin temizlenmesinin ardından kalıplar yarı izolasyonlu kokil kalıp boyası ile boyanmıştır. Kalıp boyama sonrası deney parametre şartlarına uygun 150 °C ön ısıtma sıcaklığına getirilen kalıp döküme hazır hale getirilmiştir. Kalıp açma süresi 5 dakika olarak belirlenmiş ve dökümden 5 dakika sonra açılan kalıp yüzeyi temizlendikten sonra diğer döküme geçilmiştir.

### 3.5 Ergitme ve Döküm İşlemleri

Ergitme işlemleri 10 kW gücünde, 8 kg alüminyum ergitme kapasitesine sahip çan tipi bir elektrik direnç ocağı ve SiC pota kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4'te gösterilen elektrik direnç ocağı, K tip termokupl ve elektronik kontaktör termostat donanımı ile sıcaklığı kontrol edilebilmektedir. Ocak astarı kalsiyum oksit türü yüksek termal izolasyon özelliğine sahip dökme astar malzemelerle yapılmıştır. Ocak üstünde

azotla sıvı metal temizleme işlemlerinin yapılabilmesi için grafit lansın gireceği genişlikte bir delik mevcuttur.



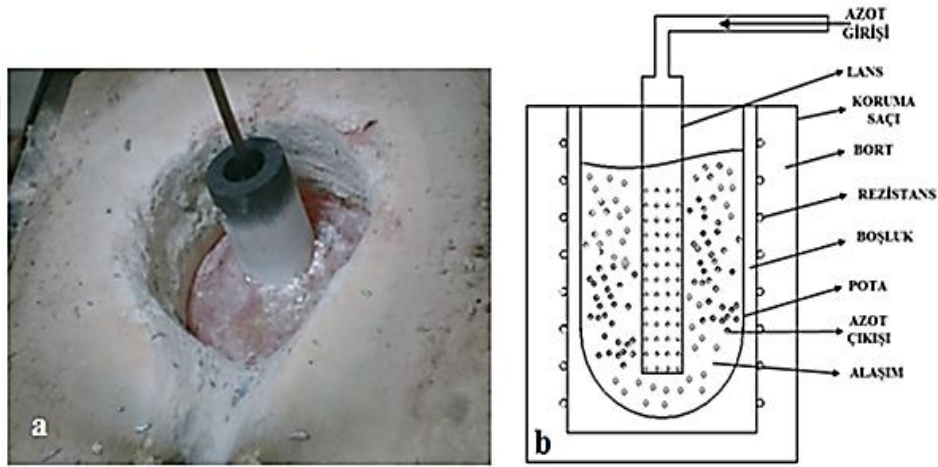
**Şekil 3.4.** Çan tip elektrik direnç ertitme ocağı

Deney parametrelerine uygun olarak pota içinde bulunan alaşımın sıcaklığı 750 °C'ye çıkartılarak ertitme gerçekleştirilmiştir. Gerekli şartlarda mastır alaşımının ilavesi ve sıvı metalin azot gazı ile temizlenmesi sonrası sıvı metal üzerine %0,4 oranında cüruf yapıcı örtü tozu ilave edilmiştir. Kullanılan örtü tozu inorganik alkali ve toprak alkali tuzların karışımı olup içeriğinde  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaF}_2$  ve mineral florür bulunmaktadır (Teknometal, 2019). Bu flaksın alüminyuma ilave edilmesindeki amaç sıvı metal içerisinde bulunması muhtemel bazı katışık maddelerin kolayca curuf haline getirilerek metal içerisinden uzaklaştırılmasıdır. Örtü tozunun ilavesinden sonra sıvı metal üzerinde biriken curuf ve oksitler bir temizleme laması ile sıyrılarak alınmış ve dökümler gerçekleştirilmiştir. Alaşım ilavesi gereken dökümlerde tane inceltici olarak  $\text{Al5Ti1B}$  ve modifiye edici olarak  $\text{Al10Sr}$  alaşımı kullanılmıştır. Alaşım ilaveleri sıvı azotla temizleme işlemi sonrası ağırlıkça %0,2 etki edecek şekilde ocak içerisine ilave edilerek, ilaveden yaklaşık 20 dakika sonra dökümlere başlanmıştır.



### 3.6 Sıvı Metalde Gaz Giderme ve Gaz Durumu Ölçümleri

Döküm alaşımının sıvı metal temizliği döküm kalitesinde önemli etkiye sahip faktörlerden biridir. Dökümhanelerde sıvı metal içerisindeki gaz, kalıntı gibi istenmeyen türden maddelerin temizlenmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin içerisinde gaz alma tableti kullanımı ve sıvı azot ile temizleme işlemi dökümhaneler arasında yaygınca kullanım bulmaktadır. Tez kapsamında sıvı metal içerisinde çözülmüş halde bulunan hidrojen gazının temizlenmesi amacıyla sıvı alaşımı azot gazı ile yıkama işlemi gerçekleştirildi. Şekil 3.5a'da gösterilen azotla yıkama işlemi için dış yüzeyleri bor nitrür (BN) kaplı üzerinde çok sayıda ince delikleri bulunan grafit bir lans sıvı alüminyum içerisine yaklaşık 700 °C de daldırıldı. Böylece çok sayıda küçük gaz baloncunun sıvı içerisinden geçirilerek metal içerisinde çözülmüş bulunan hidrojen atomları bu baloncuklar içerisine difüz ederek baloncuklarla beraber atmosfere atılmaktadır. Şekil 3.5b'de azot gazı ile sıvı metalde gaz giderme işlemi şematik olarak gösterilmektedir.



**Şekil 3.5.** a) Sıvı metalin azot gazı ile yıkanması, b) Gaz giderme işleminin şematik görünüşü

Azotla yıkama işleminin ardından sıvı metalin gazlılık durumunu test etmek amacıyla RPT (Düşürülmüş Basınç Testi-Reduced Pressure Test) gaz ölçüm testi uygulandı. Şekil 3.6'da bu çalışmada kullanılan RPT cihazının fotoğrafı verilmiştir. RPT testi prensip olarak yaklaşık 90-100 gram ağırlığında bir sıvı metalin metal bir kroze içinde -1 atmosferlik (yaklaşık  $-760 \text{ Hg/cm}^2$ ) basınç altında katılaştırılmasını ve sıvı metal içerisinde çözülmüş hidrojenin katılma sırasında gaz kabarcıkları haline geçmesini esas almaktadır. Test numunesinde çok gaz boşluğu çıkarsa sıvı alaşımda yüksek

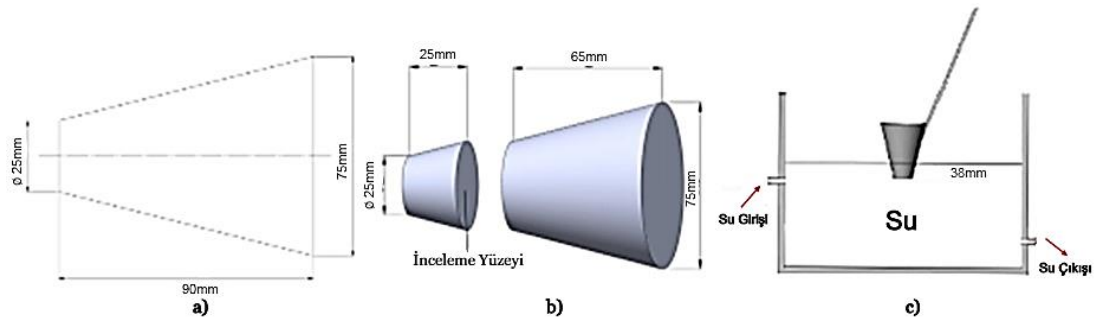
oranda hidrojen çözüldüğü, buna karşılık numunede az sayıda gaz boşluğu var ise sıvı metalde o derece az çözülmüş hidrojen bulunduğu kabul edilmektedir. Çalışma kapsamında yapılan dökümlerde gazlılık oranının yüksek çıktığı durumlarda azotla yıkama işleminin süresini arttırılarak gaz seviyesinin kabul edilebilir seviyelere kadar düşmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.6. RPT sıvı metal gaz durumu ölçüm cihazı

### 3.7 Tane İnceltme Testlerinin Yapılması

Dökümlerde tane inceltme işleminin kontrolü ve prosesin uygunluğunun tespit edilebilmesi için ALCAN (Aluminium Association, 2012) standart tane inceltme testleri yapılmıştır. Böylece kullanılan tane inceltici mastır alaşımı, ilave miktarı ve bekletme süresinin uygunluğu test edilmiştir. Bunun için ilk olarak tane inceltici ilavesiz alaşımda tane boyutunu belirlemek için Şekil 3.7’de ölçüleri verilen konik çelik pota içerisine 700 °C’de döküm yapılmıştır. Döküm yapılan kalıp Şekil 3.7b’de şematik görünümü verilen sabit su yüksekliğinde soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Bu şekilde tane inceltici ilavesiz döküm numunesi elde edilmiştir.



Şekil 3.7. a) ALCAN tane inceltme test numunesi ölçüleri, b) İnceleme yüzeyi, c) Soğutma düzeneği (Murty vd., 2002)

Tane inceltici olarak %5 Ti ve %1 B içeren Al5Ti1B mastır alaşımı kullanılmıştır. Tane inceltici olarak kullanılan Al5Ti1B mastır alaşımı içerisinde Ti ve B esaslı partikülleri içermekte ve bunların mikro yapıdaki boyut ve dağılımları tane inceltme etkisi açısından önem taşımaktadır. Bu sebeple mastır alaşımının mikro yapısı incelenmiştir.

Tane inceltme deneyleri; ergiyik alaşıma ağırlıkça %0,2 Ti etki edecek şekilde Al5Ti1B tane inceltici mastır alaşımı ilave edilerek sıcaklığı 720 °C olan sıvı metalin içerisine sıvı metal miktarına uygun tartılan Al5Ti1B mastır alaşımının daldırılması şeklinde yapılmıştır. Tane inceltici ilavesini takiben literatürde en etkili süre olduğu tespit edilen 15-25 dakika sonrasında koni kalıba döküm yapılmıştır (Çolak ve Kayıkcı, 2009). Tane inceltme deney kalıbı Şekil 3.7c’de görüldüğü gibi soğutularak numune elde edilmiştir. İncelenmek üzere kesilen numuneler metalografik olarak zımparalama ve parlatma işlemleri sonrası dağlama Paulton çözeltisi (%60 HCl, %30 HNO<sub>3</sub>, %5HF, %5H<sub>2</sub>O) ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerden elde edilen makro yapı resimleri ile tane inceltme işleminin performansı değerlendirilmiştir.

Titanyum metali 3d geçiş metalleri grubunda olup erime noktası yüksek olan ve oksidasyon seviyesi 4, 3, 2, 1 olmak üzere farklı değerler alan ve alaşımsal yapının korozyona karşı yüksek direnç kazanmasına sebep olan bir metaldir. Bu element Al alaşımlarında alüminyum ile bağ kurarak TiAl<sub>3</sub> yapısını oluşturarak tane inceltici olarak görev yapmaktadır. Bu bağlanma genellikle borlu bileşiklerde görülür ve temel olarak Ti’nin yükseltgenme seviyelerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. Bu farklılık birçok bağlanma şekli oluşturduğundan alaşım yapısı oluşurken daha ince taneli yapı meydana geleceği beklenmektedir.

### **3.8 Al-Si Alaşımlarında Ötektik Silisyumun Modifikasyonu**

Döküm deneylerinde modifiye işleminin uygunluğunun tespit edilebilmesi için test dökümleri yapılmıştır. Modifiye edici olarak ağırlıkça %10 Sr içeren Al10Sr mastır alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan alaşımın içyapısı ve yapı içerisindeki partiküllerin boyutları proses kontrolü açısından önemli olduğundan, alınan numune üzerinden incelemeler yapılmıştır.

Modifiye işleminin etkinliğinin kontrolü için ilk olarak modifiye edici ilavesiz olarak sonrasında ağırlıkça %0,2 Sr etki edecek şekilde Al10Sr mastır alaşımı ilave edilmiştir. İlaveden sonra alaşımın tam olarak ergimesi için yaklaşık 20 dakika beklendikten sonra dökümler yapılmıştır. İlavesiz ve Al10Sr ilaveli olarak yapılan döküm numuneler metalografik hazırlık ve dağlama işlemi sonrası mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

Stronsiyum toprak alkali bir metal olup erime noktası yüksek olan ve yükseltgenme değerlik elektron sayısı 2 olan bir metaldir. Bu sebeple yaptığı bağlar daha çok metalik ve iyonik karakterlidir. Stronsiyum temel olarak yapı içerisinde intermetalikleri oluşturmak için bağ yapar. Yapı içerisinde kurulan bu bağların bağ uzunluğu ve kuvvet dereceleri yapının ötektik modifikasyon derecesini etkilemektedir. Bu bağlar genellikle Sr-Al arasında meydana gelir. Bundan dolayı Sr ilavesinin alaşım yapısını modifiye etmesi beklenmektedir.

### **3.9 Dökümlerin İnceleme Yöntemleri**

Döküm sonrası kalıplar açılarak deney numuneleri çıkartılmıştır. Döküm numuneleri kumları temizlendikten sonra ilk etapta gözle kontrol edilmiştir. Döküm numunelerin yollukları ve çapakları kesildikten sonra kimyasal analiz, mikro yapı incelemeleri, sertlik incelemeleri, yoğunluk ölçümleri ve aşınma testleri için numuneler alınmıştır.

#### **3.9.1 Metalografi işlemleri**

Deneyleerde kullanılan alaşım farklarının, döküm yöntemlerinin, alaşım ilavelerinin dökümlerin mikroyapı üzerinde etkilerinin incelenmesi için dökümlerden numuneler alınmıştır. Numuneler hassas kesme cihazında SiC diskler kullanılarak elde edilmiştir. Mikro yapı inceleme numuneleri sıcak preste bakalit toz kullanılarak kalıplanmıştır. Bakalite alma sıcaklığı 170 °C ve bakalite alma süresi 5 dakika olarak uygulanmıştır. Bakalite alınan numuneler 180-400-800-1200-2500 gritlik zımpara ile kaba ve ince zımparalamanın ardından sırasıyla 3µm, 1µm alümina süspansiyonu ile parlatılmış ve nihai olarak 0,05 µm'lik kolodial silika ile parlatılmıştır. Parlatma sonrası numuneler Keller çözeltisi (R. . Li vd., 2004) (95 ml saf su, 2,5 ml HNO<sub>3</sub>, 1,5 ml HCl, 1,0 ml HF) ile dağlanarak mikroyapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Dağlama sonrası numuneler optik mikroskop incelemelerinde kullanılmıştır. Metalografik olarak hazırlanan



yüzeylerin optik mikroskop incelemeleri, 1000 kez büyütme yeteneğine sahip, 22 mm geniş görüş alanı, ince odaklamada, 0,1 mm ile 1 µm hassasiyet özelliklerine sahip Nikon Eclipse L 150 A tip mikroskobunda yapılmıştır. Fotoğraf çekimleri bu mikroskoba bağlı çalışan bir Clemex dijital kamera ile alınan görüntüler üzerinden Clemex Vision Lite görüntü analiz yazılımını kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 3.9.2 Taramalı elektron mikroskop (SEM-EDS) analizi

Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 177 alüminyum döküm alaşımlarının ilavesiz, tane inceltici (Al5Ti1B) ilaveli ve tane inceltici (Al5Ti1B) ile modifiye edici ilaveli (Al10Sr) yapılarını incelemek amacıyla mikro yapı için hazırlanmış numune yüzeyleri kullanılmıştır. Alaşımların yüzey görüntüleri incelenmiş ve çizgisel elementel analizi yapılmıştır. Numuneler Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında bulunan Şekil 3.8'de görülen FEI Nova Nano SEM 450 markalı Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazında incelenmiştir



Şekil 3.8. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazı

### 3.9.3 Yoğunluk ölçümü çalışmaları

Deneylemlerden elde edilen döküm numuneleri için yoğunluk ölçümleri Archimede (Arşimet) prensibine göre yapılmıştır. Arşimet prensibine göre her bir numunenin önce havada daha sonra su içerisinde ağırlıkları tartılmıştır. Belirlenen ağırlıklardan numunenin havadaki ağırlığı ( $m_h$ ), sudaki ağırlığı ( $m_s$ ), oda sıcaklığında suyun yoğunluğu ( $d_s$ ) ise döküm numunenin yoğunluğu ( $d_n$ ) olarak Eşitlik 3.1'deki formüle göre hesaplanmıştır (Shafyei vd., 2006). Hesaplamalarda su sıcaklığı 20 °C olarak ölçülmüş ve özgül ağırlığı 0,99821 g/cm<sup>3</sup> olarak alınmıştır.

$$d_n = \frac{m_h}{m_h - m_s} \times d_s \quad (3.1)$$

Numunelerin yoğunluk ölçümleri 0,02 g hassasiyetli elektronik teraziye bağlanan bir Archimede (Arşimet) kiti vasıtasıyla ASTM B595-11 standardına uygun olarak yapılmıştır. Hassas terazi ve yoğunluk ölçümü düzeneğinin şematik görüntüsü Şekil 3.9'da verilmiştir.



**Şekil 3.9.** Yoğunluk ölçüm düzeneği

Dökümlerin yüzdelik boşluk-gözenek değerlerinin bulunması için numunelerin yoğunluklarının alaşıma ait olması gereken tam dolu malzemenin yoğunluk değerine orantılanması gerekmektedir. Döküm numuneye ait gözenek değerleri Eşitlik 3.2'de verilen formülle tespit edilmiştir (Çolak, 2015; Dash ve Makhlof, 2001).

$$\% \text{ Gözenek} = [(Teorik \text{ yoğ.} - Deneysel \text{ yoğ.}) / Teorik \text{ yoğ.}] * 100 \quad (3.2)$$

### 3.9.4 Sertlik incelemeleri

Dökülen dökümlerinin değerlerinin belirlenmesi amacı ile üretilen numunelerin Brinell sertlik ölçümleri şekilde görülen Struers Duramin-500 marka cihazında oda sıcaklığında yapılmıştır. Sertlik Deneylelerinde 2,5 mm çaplı bilya ve 62,5 kg yük altında her numuneden en az 5'er adet alınan sertlik sonuçlarının ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.10. Sertlik ölçümünden örnek görüntü

### 3.10 Aşınma Çalışmaları

Aşınma-sürtünme deneyleri, Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi bünyesinde bulunan pin-on-disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11. Pin-on-Disk aşınma cihazı

Kuru kayma şartları altında, oda sıcaklığında, disk üzerinde bir pin ile aşınma testleri yapılmıştır. 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğundaki numuneler, çelik (Ç1040) diske karşı test edilmiştir. Şekil 3.11'de, kullanılan pin-on-disk aşınma testi cihazına ait görseller paylaşılmıştır.

Deneyleerde; 10 N yük ile 1,0 m/s kayma hızı kullanılmıştır. Kayma mesafesi 1000 m olarak belirlenmiştir. Ortalama kütle kaybı, aşınma oranını ( $K_0$ ) hesaplamak için kullanılmıştır. Aşınma oranı Eşitlik 3.3 ile sürtünme katsayısı ise Eşitlik 3.4 ile hesaplanmıştır (Çolak vd., 2016).

$$K_0 = \Delta m \div (L \times F \times \rho) \text{ (m}^2\text{/N)} \quad (3.3)$$

$K_0$ ; aşınma oranı,  $\Delta m$ ; ortalama kütle kaybı (g), L; kayma mesafesi (m), F; uygulanan yük (N),  $\rho$ ; malzemelerin yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>)

$$\mu = F_S / F_N \quad (3.4)$$

$\mu$ ; sürtünme katsayısı,  $F_S$ ; yanal sürtünme kuvveti (N),  $F_N$ ; Normal kuvvet (N)

#### **4. ARAŞTIRMA BULGULARI**

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarından elde edilen sonuçlar ve sonuçların değerlendirilmesi verilmiştir. Deneysel sonuç olarak; Etial 110, Etial 140, Etial 160 ve Etial 177 alaşımlarının kum ve kokil kalıba dökümünde tane inceltici ve modifiye edicinin etkisi ile değişen kimyasal bileşim, yoğunluk ölçümü, sertlik ölçümleri, aşınma testleri, mikro yapı ve SEM resimleri verilmiştir. Döküm öncesi sıvı metal temizliği uygulamaları için yapılan testlere ait sonuçlar ve hangi yöntemle temizleme işlemine devam edildiği açıklanmıştır. Ayrıca tane inceltme ve modifikasyon işlemlerinin uygunluğu için yapılan ön değerlendirmeye yönelik sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuçlardan farklı kimyasal bileşime sahip Alüminyum döküm alaşımlarının değişen döküm şartlarında ortaya çıkardıkları aşınma, sertlik ve mikro yapı değişimi tartışılmıştır.

##### **4.1 Kimyasal Bileşim Uygunluğunun Kontrolü**

Döküm işlemlerinde kullanılan alaşımlar ve alaşımlara katılan ilave mastır alaşım seviyelerinin uygunluğunun kontrolü için alınan numunelere ait kimyasal bileşim analiz sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1 incelendiğinde alaşımların standart bileşim aralığında olduğu anlaşılmaktadır. Tane inceltici ve modifiye edici ilaveli deneylerde Ti ve Sr hedef oranlarının külçe alaşımdaki değerlere göre yükseldiği ve uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.1. Döküm deneyleri kimyasal bileşim sonuçları (% Ağı.)

Döküm yöntemi	D.No	Alaşım	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	B	Sr	Al
Kum Kalıp	1	E110	5,030	0,363	2,790	0,374	0,012	0,014	0,009	0,001	0,001	91,406
	2	E110-TiB	4,980	0,328	2,710	0,346	0,009	0,015	0,178	0,007	0,001	91,426
	3	E110-TiB-Sr	4,820	0,309	2,640	0,339	0,009	0,015	0,179	0,008	0,181	91,500
	4	E140	11,859	0,371	0,024	0,002	0,004	0,009	0,008	0,001	0,002	87,720
	5	E140-TiB	12,362	0,415	0,009	0,001	0,003	0,009	0,182	0,006	0,001	87,012
	6	E140-TiB-Sr	11,944	0,461	0,008	0,002	0,004	0,011	0,194	0,005	0,166	87,205
	7	E160	8,480	0,248	3,370	0,112	0,198	0,013	0,011	0,001	0,004	87,563
	8	E160-TiB	8,600	0,221	3,130	0,105	0,188	0,015	0,194	0,009	0,003	87,535
	9	E160-TiB-Sr	8,370	0,249	3,460	0,113	0,206	0,016	0,175	0,002	0,192	87,217
	10	E177	7,020	0,171	0,004	0,003	0,377	0,014	0,010	0,002	0,003	92,396
	11	E177-TiB	6,730	0,172	0,003	0,003	0,370	0,016	0,182	0,010	0,004	92,510
	12	E177-TiB-Sr	6,840	0,160	0,004	0,003	0,360	0,016	0,208	0,009	0,205	92,195
Kokil Kalıp	13	E110	5,563	0,583	3,020	0,274	0,011	0,015	0,011	0,001	0,004	90,518
	14	E110-TiB	5,542	0,586	2,943	0,365	0,006	0,018	0,196	0,011	0,003	90,330
	15	E110-TiB-Sr	5,338	0,589	2,838	0,345	0,008	0,016	0,187	0,009	0,196	90,474
	16	E140	11,859	0,456	0,038	0,003	0,002	0,003	0,009	0,002	0,001	87,627
	17	E140-TiB	11,932	0,514	0,007	0,001	0,002	0,010	0,173	0,006	0,001	87,354
	18	E140-TiB-Sr	12,034	0,521	0,009	0,003	0,004	0,013	0,201	0,007	0,182	87,026
	19	E160	8,521	0,259	3,427	0,112	0,186	0,012	0,010	0,001	0,005	87,467
	20	E160-TiB	8,616	0,221	3,432	0,105	0,188	0,016	0,189	0,008	0,004	87,221
	21	E160-TiB-Sr	8,476	0,281	3,513	0,123	0,213	0,017	0,175	0,002	0,192	87,008
	22	E177	7,129	0,169	0,005	0,001	0,387	0,013	0,011	0,001	0,002	92,282
	23	E177-TiB	6,830	0,172	0,003	0,003	0,373	0,015	0,192	0,012	0,003	92,397
	24	E177-TiB-Sr	6,940	0,168	0,005	0,003	0,365	0,016	0,184	0,009	0,205	92,105

Tane inceltme amacıyla Ti ilavesi ağırlıkça %0,2 oranında katılmış, yapılan incelemelerde Ti ilavesinde kritik eşik değeri ağırlıkça %0,15 Ti miktarı olduğundan bu oranın bütün deneylerde sağlanmış olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde ötektik silisyumun modifiye edilmesi amacıyla ilave edilen Al10Sr alaşımı ile alaşımlarda minimum ağırlıkça %0,2 Sr ilavesi gerçekleştirilmiştir, deneylerde Sr miktarının beklenen değere yakın çıktığı gözlenmiştir. Kum ve kokil kalıp döküm yöntemleri için yapılan kimyasal bileşimlerde belirlenen standartlara uygun sonuçlar elde edilmiştir.

#### 4.2 Sıvı Metal Temizliğinin Kontrol Çalışması Sonuçları

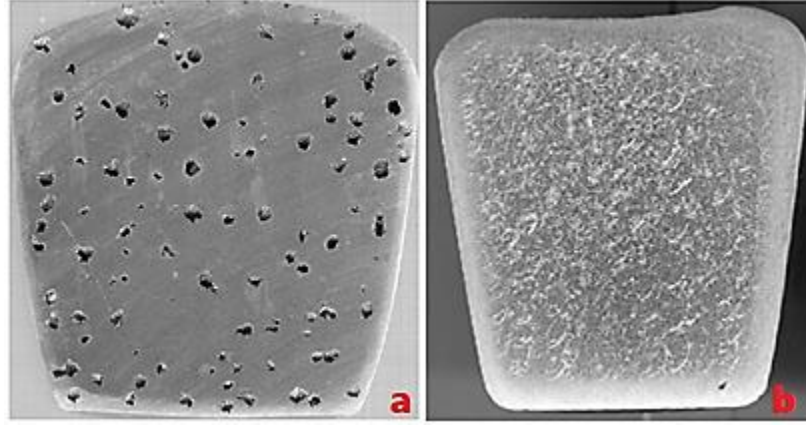
Alüminyum dökümlerinde gözenek oluşumu; katılaşma sırasında yetersiz beslemeye dayalı çekinti nedeniyle, sıvı metal içerisinde çözünmüş olan gazlar sebebiyle ve hem çekinti, hem gaz etkisiyle oluşabilmektedir. Tez çalışmasında yapılacak incelemelerde numunelerde gözenek oluşması sonuçları olumsuz etkileyecektir. Bu sebeple yetersiz besleme kaynaklı çekintiler besleyici tasarımı ile giderilmiş ve çözünmüş gazlar sebebiyle oluşacak gözeneklerin önlenmesi için sıvı metal döküm öncesi azotla temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Temizleme işlemi sonrası sıvı metal temizliğinin kontrolü amacıyla RPT (Reduced Pressure Test - Düşürülmüş Basınç Testi) numuneleri alınarak sıvı metal temizliğinin uygunluğu kontrol edilmiştir. Şekil 4.1’de katılaşma sonrası RPT numunelerine ait örnek görüntüler verilmiştir.



**Şekil 4.1.** RPT test numunesi görüntü resimleri; a) gaz giderme işlemi öncesi, b) gaz giderme işlemi sonrası

Şekil 4.1a’da verilen örnek numune görüntülerinde kesit incelemesine gerek kalmadan üst kısmının vakum altında katılaşma sonucu döküm numunenin gaz gözenekleri nedeni ile hacimsel genişlemesinden kaynaklanan bir görünüm elde edilmiştir. Şekil 4.1b’deki görüntüler ise gaz giderme işlemi uygulanmış temiz RPT numunesi örnek görüntüleridir. Vakum altında katılaşma sonucu numune üstünde çöküntü olduğundan sıvı metalin temiz ya da az miktarda gaz içerdiği anlaşılmaktadır. Ancak RPT numuneleri üzerinden sıvı metalin içerdiği gaz oranı, numunelerin dikey olarak ortadan kesilmesi ve kesit yüzeylerinin incelenmesi ile daha net bir şekilde değerlendirilebilmektedir. Şekil 4.2’de farklı RPT numunelerine ait kesit görüntüleri örnek olarak verilmiştir.

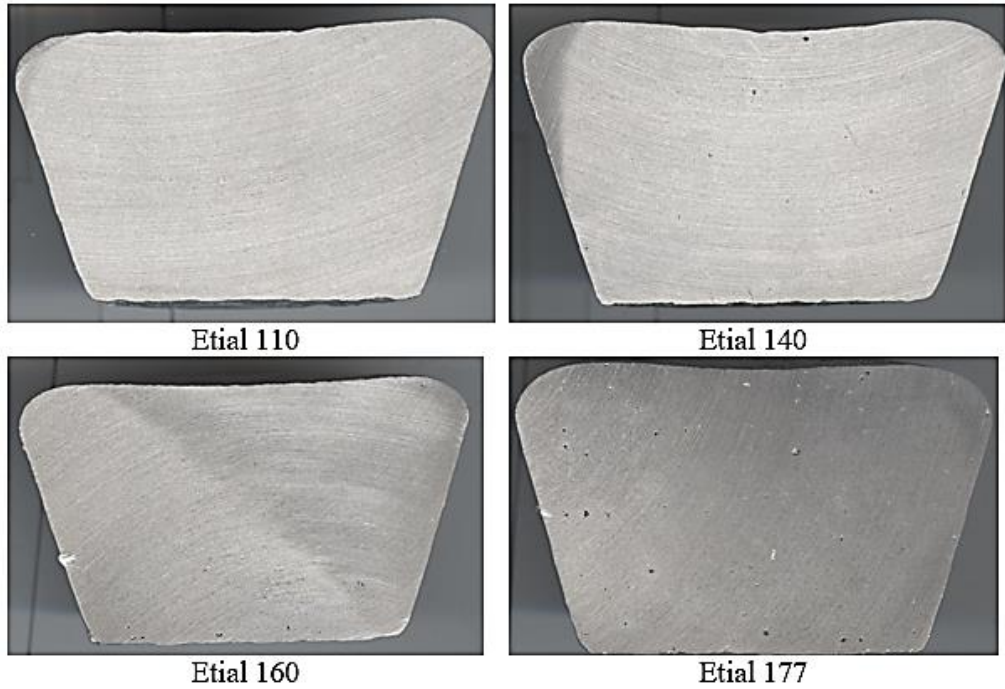




**Şekil 4.2.** RPT test numunesi kesit görüntüsü sonuçları; a) gaz giderme işlemi uygulanmamış, b) gaz giderme işlemi uygulanmış temiz numune

Şekil 4.2’de verilen RPT numune kesitlerinden görüldüğü gibi, gaz giderme işlemi yapılmadan dökülen alaşımın katılaşma sonrası içerisinde gaza dayalı gözenek oluşabilmektedir. Ancak azot gazı ile temizleme işlemi sonucu sıvı metal gaz içeriği ciddi oranda azaltılarak gözenek azalttığı tespit edilmiştir.

Alaşımın hazırlanması sonrası her bir dökümden önce sıvı metal azot gazı ile temizlenmiş ve sıvı metal temizliğinin kontrol edilmesi için RPT numuneleri alınmıştır. Şekil 4.3’te her bir alaşım için alınan RPT numunelerine ait kesit görüntü resimleri mevcuttur.



**Şekil 4.3.** Azotla temizleme sonrası alaşımlardan alınan RPT kesit görüntüleri

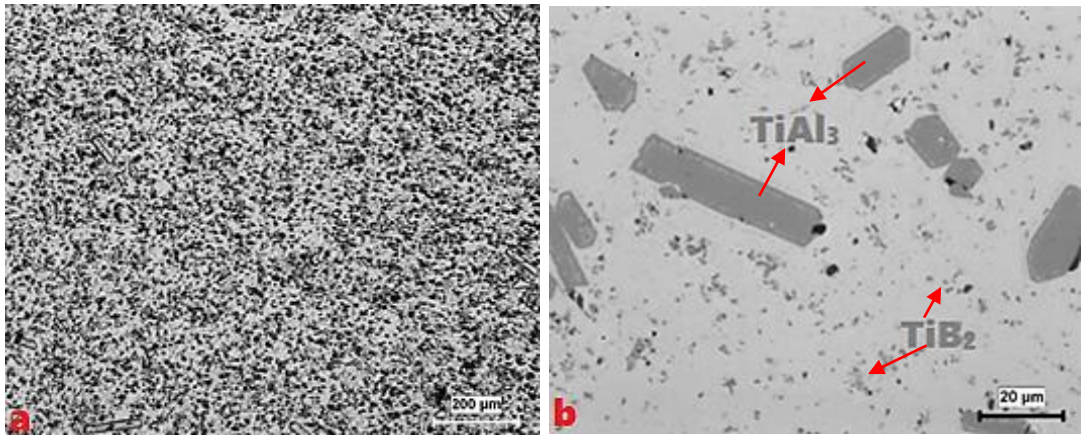


Bütün dökümlerde alınan RPT sonuçları incelendiğinde döküm içerisinde gaz kaynaklı gözenek oluşumunu engellemek adına sıvı metal temizleme işleminin optimum şartlarda sağlandığı anlaşılmaktadır. Kokil kalıba dökümlerde sıvı metal azotla temizlendikten sonra döküm öncesi RPT numunesi alınarak döküm işlemleri yapılmıştır. Her bir pota içerisindeki sıvı metal ile 3 adet kokil kalıp dökümü yapılmıştır. Kokil kalıba döküm başlangıcında ve döküm sonunda RPT numuneleri alınmıştır. Bütün dökümlerde alınan RPT sonuçları incelendiğinde döküm içerisinde gaz kaynaklı gözenek oluşumunu engellemek adına sıvı metal temizleme işleminin yeterli oranda sağlandığı anlaşılmaktadır. Böylece dökümlerde oluşması muhtemel gözeneklerin gaz kaynaklı olmayacağı ve olması halinde yetersiz beslemeye dayalı çekinti gözenekleşmesi nedeni ile oluşacağı kabul edilmiştir.

Haberl vd, gaz alma işleminden sonra RPT numunelerinde gözenek sayısının yoğunluğunda neredeyse %50 azalma olduğunu bildirmişlerdir (Haberl vd., 2009).

### 4.3 Tane İnceltme Testlerinin Kontrolü

Tane inceltici olarak kullanılan ağırlıkça %5 Ti ve ağırlıkça %1 B içeren Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B mastır alaşımı içerisinde Ti ve B esaslı partikülleri içermekte ve bunların mikro yapıdaki boyut ve dağılımları tane inceltme etkisi açısından önem taşımaktadır. Şekil 4.4'te mastır alaşımının mikro yapı resimleri verilmiştir.

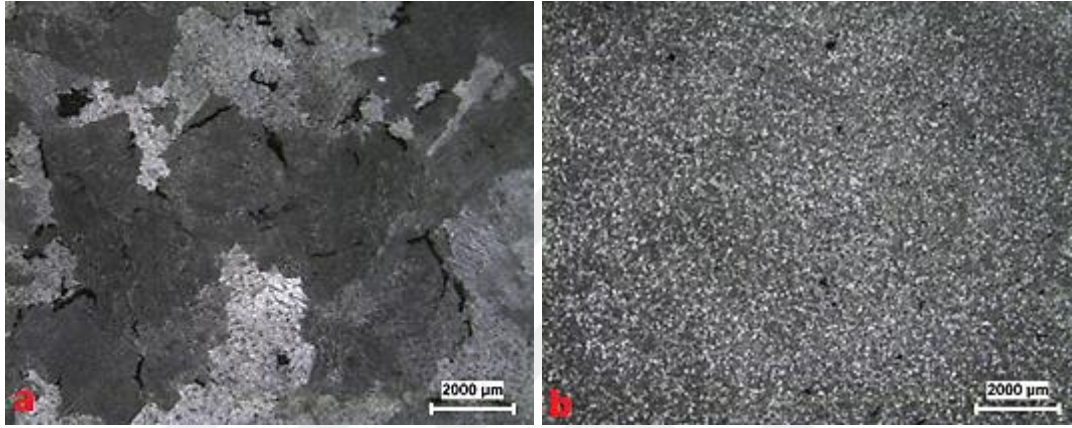


**Şekil 4.4.** Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B mastır alaşımı mikro yapı resimleri; a) 50x büyütme, b) 500x büyütme

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, yapı içerisinde TiB<sub>2</sub> ve TiAl<sub>3</sub> partiküllerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar literatürdeki bazı çalışmalarda da elde edilmiştir

(Yücel Birol, 2007b; Fan vd., 2015).  $TiB_2$  partiküllerinin boyutu  $1 \mu m$  civarında iken,  $TiAl_3$  partiküllerinin ortalama boyları  $20 \mu m$  seviyelerindedir. Bu partiküllerin yapı içerisinde homojen bir şekilde dağılım sergilemesi, boyutları etkili bir tane inceltme ve döküm yüzey kalitesini geliştirmek için önemlidir.

Şekil 4.5'te tane inceltici ilavesiz ve tane inceltici ilavesinden 20 dakika sonra dökülen alüminyum alaşımı makro yapı görüntüleri mevcuttur.

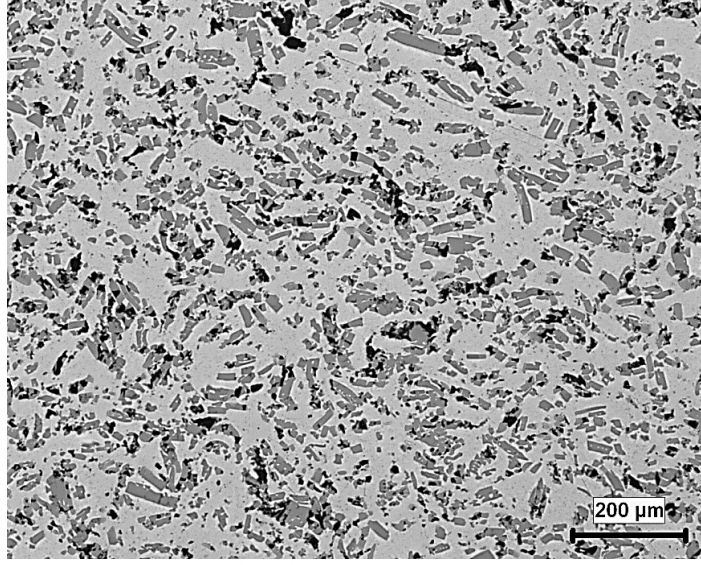


**Şekil 4.5.** a) İlavesiz, b)  $Al_5Ti_1B$  mastır alaşımı ilave edilmiş Alüminyum alaşımının ALCAN testi ile elde edilen makro yapıları

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi tane inceltici ilave etmeden yapılan koni dökümünde oluşan taneler iri ve uzunlamasına büyüme gösterirken, tane inceltici ilavesi ile yapılan dökümlerde  $Al_5Ti_1B$  alaşımı etkisini göstererek tane boyutlarının küçüldüğü ve tanelerin eş eksenli biçimde ortaya çıktığı belirlenmiştir.

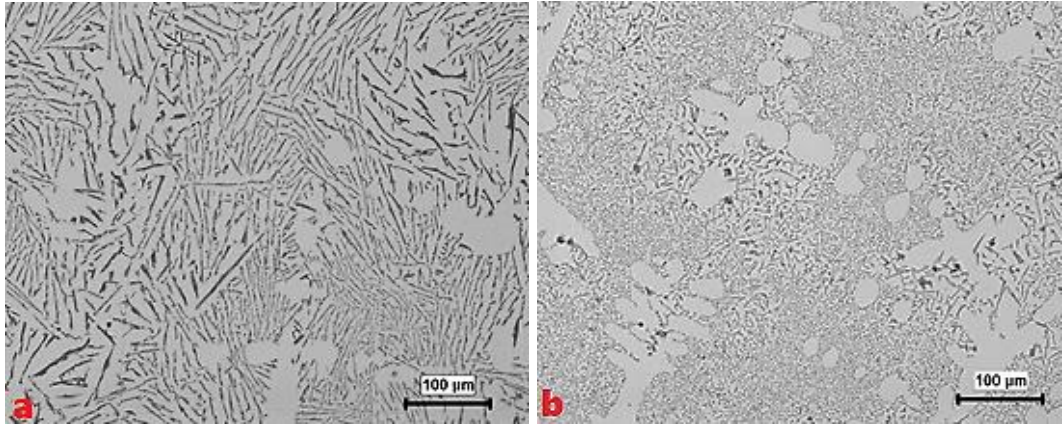
#### 4.4 Al-Si Alaşımlarında Ötektik Silisyumun Modifikasyonu

Döküm deneylerinde modifiye işleminin uygunluğunun tespit edilebilmesi için ağırlıkça %10 Sr içeren  $Al_{10}Sr$  mastır alaşımı kullanılmıştır. Şekil 4.6'da  $Al_{10}Sr$  mastır alaşımının mikroyapı resimleri verilmiştir.  $Al_{10}Sr$  mikroyapısı içerisindeki partiküllerin kümelenme olmadan homojen bir şekilde dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır.



**Şekil 4.6.** Al10Sr mastır alaşıımı mikroyapı resmi

Şekil 4.7’de modifiye edici ilavesiz ve Al10Sr ilaveli ötektik Etial 140 alaşıımı dökümlerinden elde edilen numunelerin mikro yapısı görülmektedir. Modifiye işlemi öncesi yapı içerisindeki ötektik silisyum kristallerinin Sr etkisiyle lamelli yapıdan fiberimsi yapıya dönüştükleri tespit edilmiştir. Dolayısıyla deneylerde kullanılan mastır alaşıımının etkin bir modifikasyon sağladığı düşünülmektedir.



**Şekil 4.7.** a) Modifiye edici ilavesiz, b) Al10Sr ilave edilmiş Etial 140 alaşıımı mikro yapı görüntüleri

#### 4.5 Yoğunluk Ölçüm ve Gözenek Değerleri

Yoğunluk ölçümleri deneysel çalışmalar bölümünde anlatıldığı gibi Archimede (Arşimet) prensibine göre yapılmıştır. Çizelge 4.2’de döküm deneylerinden elde edilen numunelerin hesaplanan yoğunluk ve gözenek sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Döküm numunelerin yoğunluk ölçümü ve gözenek değerleri

Döküm Yöntemi	Numune Adı	Havada Ağırlık (Gram)	Suda Ağırlık (Gram)	Deneysel Yoğunluk (g / cm <sup>3</sup> )	Teorik yoğunluk <sup>1</sup> (g / cm <sup>3</sup> )	Hesaplanan Gözenek %
Kum Kalıp	E110	38,76	24,42	2,6981	2,76	2,24
Kum Kalıp	E110-Al5Ti1B	39,72	25,12	2,7157	2,77	1,96
Kum Kalıp	E110-Al5Ti1B-Al10Sr	40,22	25,5	2,7274	2,77	1,54
Kum Kalıp	E140	39,72	24,28	2,5679	2,66	3,46
Kum Kalıp	E140-Al5Ti1B	38,48	23,8	2,6166	2,68	2,37
Kum Kalıp	E140-Al5Ti1B-Al10Sr	38,58	23,96	2,6341	2,67	1,34
Kum Kalıp	E160	41,56	26,02	2,6696	2,76	3,28
Kum Kalıp	E160-Al5Ti1B	40,08	25,26	2,6996	2,77	2,54
Kum Kalıp	E160-Al5Ti1B-Al10Sr	41,94	26,54	2,7185	2,77	1,86
Kum Kalıp	E177	39,72	24,48	2,6016	2,68	2,92
Kum Kalıp	E177-Al5Ti1B	40,22	25,04	2,6448	2,69	1,68
Kum Kalıp	E177-Al5Ti1B-Al10Sr	39,6	24,72	2,6565	2,69	1,24
Kokil Kalıp	E110	38,46	24,26	2,7036	2,76	2,04
Kokil Kalıp	E110-Al5Ti1B	39,56	25,06	2,7234	2,77	1,68
Kokil Kalıp	E110-Al5Ti1B-Al10Sr	39,04	24,82	2,7405	2,77	1,06
Kokil Kalıp	E140	42,2	25,86	2,5780	2,66	3,08
Kokil Kalıp	E140-Al5Ti1B	41,12	25,46	2,6211	2,68	2,20
Kokil Kalıp	E140-Al5Ti1B-Al10Sr	41,36	25,7	2,6364	2,67	1,26
Kokil Kalıp	E160	38,66	24,34	2,6949	2,76	2,36
Kokil Kalıp	E160-Al5Ti1B	39,26	24,82	2,7140	2,77	2,02
Kokil Kalıp	E160-Al5Ti1B-Al10Sr	39,36	24,94	2,7247	2,77	1,64
Kokil Kalıp	E177	42,32	26,14	2,6109	2,68	2,58
Kokil Kalıp	E177-Al5Ti1B	41,56	25,88	2,6458	2,69	1,64
Kokil Kalıp	E177-Al5Ti1B-Al10Sr	41,74	26,04	2,6538	2,69	1,34

Çizelge 4.2’de verilen gözenek oranlarına göre, mastır alaşım ilavesiz alüminyum alaşımlarında gözenek oranlarının %2,04 ile %3,46 arasında değiştiği gözlenmiştir. Alaşımlara ilave edilen Al5Ti1B mastır alaşımı gözenek miktarını azaltmıştır. Bu azalma kum kalıba dökümde Etial 110, Etial 140, Etial 160 ve Etial 177 için sırasıyla

<sup>1</sup> Alaşımlara ait teorik yoğunluk değerleri Seydişehir Eti Alüminyum fabrikasının Etinorm standarttı kimyasal bileşimine göre resmi web sayfasından alınmıştır (Eti Alüminyum, 2019).



%1,96, %2,37, %2,54 ve %1,68 oranlarında elde edilmiştir. Kokil kalıba dökümde ise bu azalma %1,64 ile %2,20 arasında değişmektedir. Al5Ti1B ve Al10Sr mastır alaşımları birlikte ilave edildiğinde hem kum kalıba dökümde hem de kokil kalıba dökümde gözenek miktarları daha da azalarak %1,06 ile %1,86 aralığında elde edilmiştir. Ancak verilen yoğunluk ölçümü sonuçlarının tez kapsamında yapılan çalışmalar açısından 3 boyutta ele alınması gerektiği düşünülmüştür. İlk olarak sonuçları döküm yöntemi farkına bağlı olarak ele alacak olursak; kokil kalıba döküm yönteminde her bir alaşım ve ilave element durumlarında daha yüksek yoğunluk ve daha düşük gözenek miktarı karşımıza çıktığı anlaşılmaktadır. Aynı geometrideki modelin kum ve kokil kalıp ile dökümündeki tek değişken kalıp malzemesidir. Kalıp malzemesi değişimi ısı iletim katsayısı farkından dolayı kokil kalıpta sıvı metalin kalıba dolumundan sonra çok daha kısa sürede sıvı metalin sıcaklığını absorbe edip atmosfere yayacağından dolayı daha hızlı katılaşmasına sebep olacaktır (Uludağ, 2018). Kokil kalıp ile yapılan dökümler kum kalıba nazaran daha hızlı katılaşma ve dolayısıyla daha ince tane boyutundan dolayı gözenek oluşumunun kokil kalıpta azaldığı düşünülmektedir. İnce taneli yapılarda döküm nihai yapısında daha az gözenek olduğu gözlemlenmiştir ve konu ile ilgili sayısal değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2’de verilen sonuçları alaşım elementi ilavesi açısından değerlendirdiğimizde her bir alaşımın kum ve kokil kalıba dökümünde yüzde değişim oranları farklılık gösterse de tane inceltici ilavesi ile yoğunluk değerleri artmış ve gözenek miktarı azalmıştır. Benzer şekilde tane incelticiye ilaveten modifiye edici katıldığında gözenek miktarının azalması olumlu etkinin arttığı anlaşılmaktadır (Dıspınar vd., 2009). Tane inceltici ve modifiye edici ilaveleri ile döküm içyapısındaki tane boyutundaki küçülme ve ötektik Si kristallerinin lamel yapıdan fiberimsi yapıya doğru değişiminin gözenek miktarının azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca dikkat çeken bir diğer hususta modifiye edicinin etkisinin Si oranı yüksek alaşımlarda daha fazla ortaya çıktığı gerçeğidir.

Alaşımlar arasındaki gözenek miktarları değişimi değerlendirilecek olursa, sonuçların alaşım kimyasal bileşimine bağlı olarak farklılaştığı göze çarpmaktadır. Alaşım karakteristikleri değerlendirildiğinde burada alaşımların kimyasal bileşimine bağlı olarak beslenme açısından ve gözenek oluşumu açısından en önemli etkenin katılaşma

aralığı olduğu düşünülmektedir. Sonuçlar değerlendirilecek olursa katılaşma aralığı geniş olan alaşımlarda gözenek miktarları, katılaşma aralığı dar olan alaşımlara nazaran daha az çıkmıştır. En fazla gözenek oluşumunun katılaşma aralığı en dar olan alaşım Etial 140 alaşımında ortaya çıktığı gözlenmektedir. İncelenen alaşımlar içerisinde en düşük gözenek miktarı katılaşma aralığı en geniş olan alaşım Etial 110 olarak belirlenmiştir.

Dinnis vd., (2004) ve Lu vd. (2004), Sr modifikasyonunda ötektik çekirdeklerin bağımsız olarak çekirdeklendiğini ve nihayetinde döküm boyunca dağınık gözeneklerle sonuçlanan besleme kanallarını engellemek için büyüdüğünü belirtmişler (Dinnis vd., 2004; Lu vd., 2004).

#### 4.6 Sertlik Deneyi Sonuçları

Değişen döküm şartlarında yapılan dökümlerden elde edilen numunelere ait sertlik ölçümleri 2,5 mm çaplı bilya uçla 62,5 kg yük kuvvet altında yapılmıştır.

Çizelge 4.3'te verilen sertlik değerleri kalıp içerisinde dökülen alaşımların aynı bölgelerinden karşılaştırma amaçlı alınan numunelerine ait ortalama değerlerdir. İlgili numuneler için en az 5 ölçüm gerçekleştirilerek ortalama değerler elde edilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Döküm deney numunelerine ait sertlik testi sonuçları

Döküm Yöntemi	Alaşım	Sertlik Değeri (HBN)		
		İlavesiz	AlTiB ilaveli	AlTiB ve AlSr ilaveli
<b>Kum Kalıba Döküm</b>	Etial 110	52	58	61
	Etial 140	49	52	58
	Etial 160	52	56	63
	Etial 177	50	54	60
<b>Kokil Kalıba Döküm</b>	Etial 110	55	59	62
	Etial 140	51	53	59
	Etial 160	54	59	64
	Etial 177	51	56	60

Çizelge 4.3'te verilen sertlik değerlerinden de görüldüğü gibi Al alaşımlarının sertlik değerleri 49 HBN ile 64 HBN arasında değişmektedir. Alaşımlar arasında kimyasal

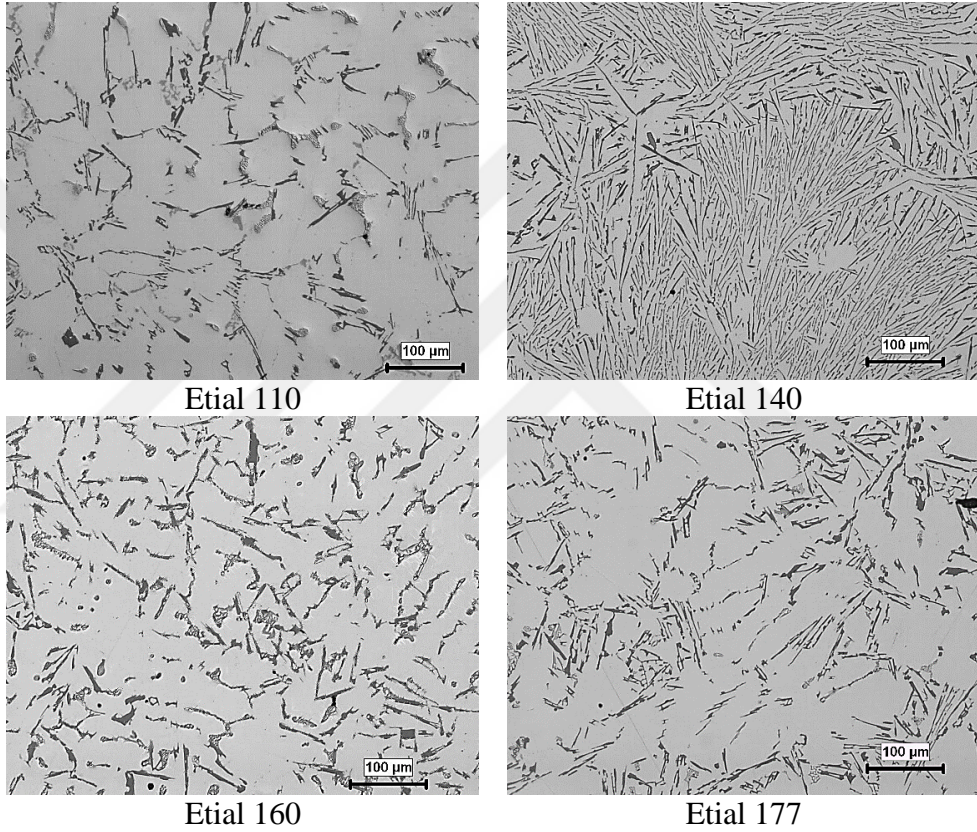
bileşime bağlı olarak içerdikleri elementlerden dolayı sertlik farklılıkları gözlenmiştir. Burada dikkat çeken Cu elementi içeriği diğer alaşımlardan farklı olan Etial 110 ve Etial 160 alaşımlarının ilavesiz dökümlerinde diğer alaşımlara nazaran daha fazla sertlik değerlerine sahip olmasıdır. Alaşımların döküm yöntemi açısından sertlik değerleri farkı değerlendirildiğinde her bir alaşım için kokil kalıba döküm yönteminde kum kalıba döküme kıyasla %5'e varan oranda sertlik artışı gözlenmiştir. İlgili artış seviyesi tane inceltici ve modifiye edici ilavelerinde karşılaşılmıştır.

Döküm deney numuneleri arasında sertlik artışının en bariz olduğu durum ise Çizelge 4.3'teki değerlerden de görüleceği gibi alaşımlara tane inceltici ilavesinin olduğu deneylerde tespit edilmiştir. Alaşımlarda hem kum hem de kokil kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesi ile %10'a varan oranlarda sertlik değerlerinde artış olmuştur. Tane incelticiye ek olarak modifiye edici ilavesi de yine sertlik artışına olumlu yönde etki etmektedir. Ancak Çizelge 4.3'teki değerler detaylı bir şekilde incelendiğinde modifiye edici ilavesinin sertlik değerlerine olan etkisi ilgili alaşımların içeriğindeki Si elementine bağlı olarak değişkenlik göstermekte ve en fazla etki ötektik olarak da adlandırılan yaklaşık ağırlıkça %12 Si içeren Etial 140 alaşımında gerçekleşmiştir. Ölmez ve Keleşoğlu (2016), Si oranı arttıkça sertlik değerinin arttığını bildirmiştir (Ölmez ve Keleşoğlu, 2016). Tane inceltici ve modifiye edicinin etkilerinin kokil kalıpta kum kalıba göre daha az olması ise kokil kalıbın ısı iletim katsayısı dolayısıyla zaten ilavesiz dökümlerde de tane inceltme ve modifikasyon etkisi göstermesi ile açıklanabilir.

Öksüzoğlu yaptığı tez çalışmasında, A356 alaşımı ve bu alaşıma Al5TiB ve Sr ilave ederek, kum ve kokil kalıp döküm yöntemleri ile alaşımlar üretmiştir. Öksüzoğlu; A356 alaşımına katılan Sr ve Al5TiB ilavelerinin, hem kum kalıpta hem de kokil kalıpta alaşımın sertlik değerini arttırdığını belirtmiştir. Kokil kalıba dökülen alaşımın, kum kalıba dökülen alaşıma göre daha sert bir yapıya sahip olduğunu belirlemiştir. Bu durumun, kalıp malzemesinin ısı iletkenliğine bağlı olarak, metal kalıpta katılan alaşımların tane yapısının, homojen ve küçük taneli olması ile ilişkili olduğunu bildirmiştir (Öksüzoğlu, 2018). Bu sonuç bu tez çalışmasında elde edilen sonuçları desteklemektedir.

#### 4.7 Mikroyapı İnceleme Sonuçları

Döküm numunelerden, değişen döküm şartları ve alaşım çeşitlerinde oluşan içyapının incelenmesi için numuneler alınmıştır. Numuneler metalografik olarak hazırlandıktan sonra mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Şekil 4.8’de alaşım farkına bağlı mikro yapı değişimlerinin görülmesi amacıyla kum kalıba ilavesiz olarak yapılan dökümlerden alınan numunelerin mikro yapı resimleri verilmiştir. Mikroyapı resimleri 100X büyütmede çekilmiştir.

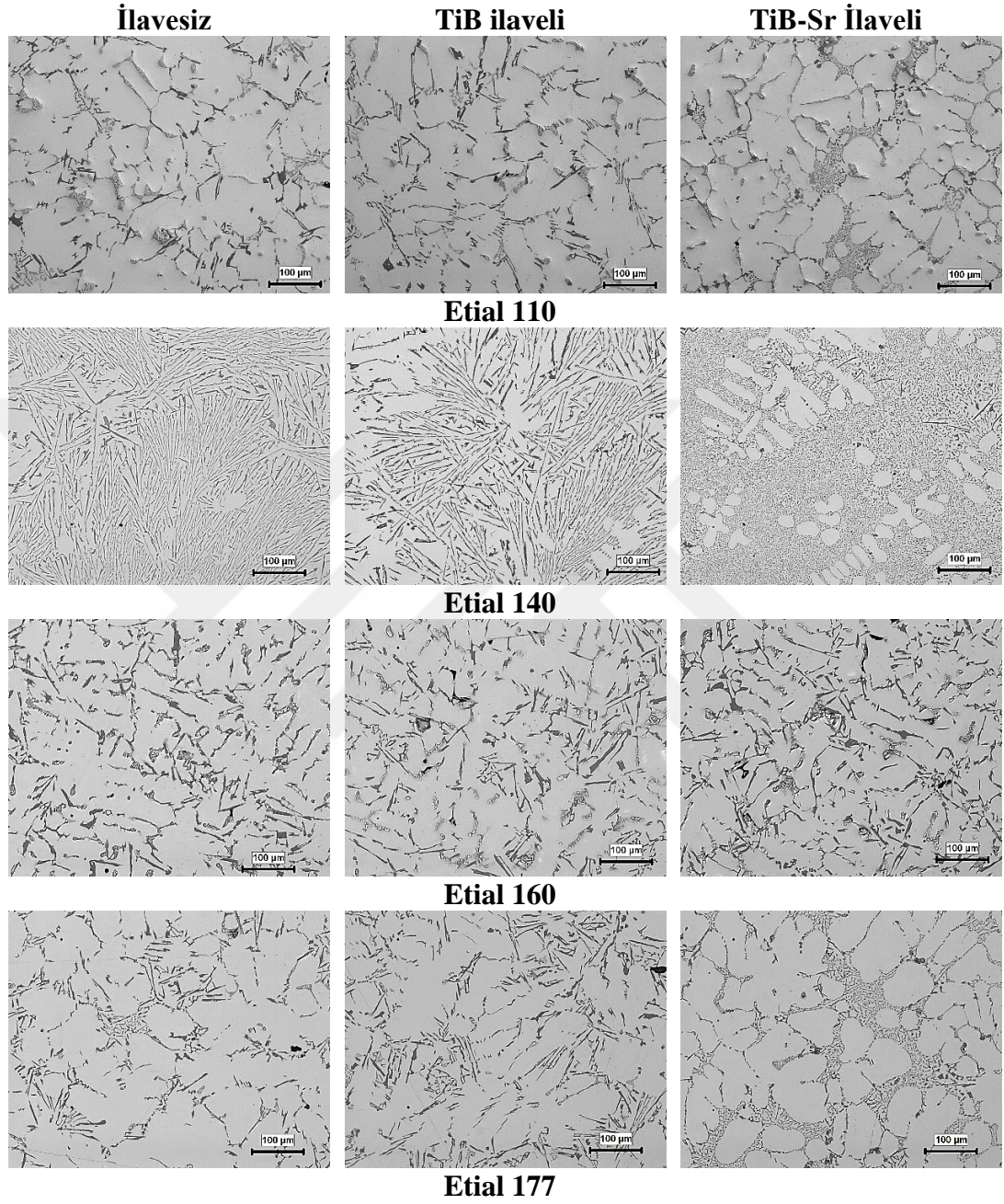


**Şekil 4.8.** Mastır alaşımı ilavesiz olarak kum kalıba dökülen farklı alaşımlara ait mikroyapı görüntüleri

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi farklı alaşımlara ait döküm numunelerin mikro yapıları kimyasal bileşime bağlı olarak çeşitli şekilde katılaşma sergilemiştir. Bileşiminde Si içeren alaşımlar ötektik öncesi  $\alpha$  ve ötektik  $\alpha$ +Si yapısı içermektedir. Ağırlıkça %12 Si içeriğine sahip olan Etial 140 alaşımında ise ötektik yapı  $\alpha$ +Si şeklindedir. Döküm deneylerinde alaşımlara ilave edilen tane inceltici ve modifiye edici elementlerin mikro yapı değişimlerinin görülmesi amacıyla kum kalıba yapılan dökümlerden numuneler alınmıştır. Şekil 4.9’da her bir alaşım için kum kalıba dökümünde tane



inceltici ve modifiye edici ilavesinin etkisine ait 100x büyütmede çekilen mikro yapı resimleri verilmiştir.



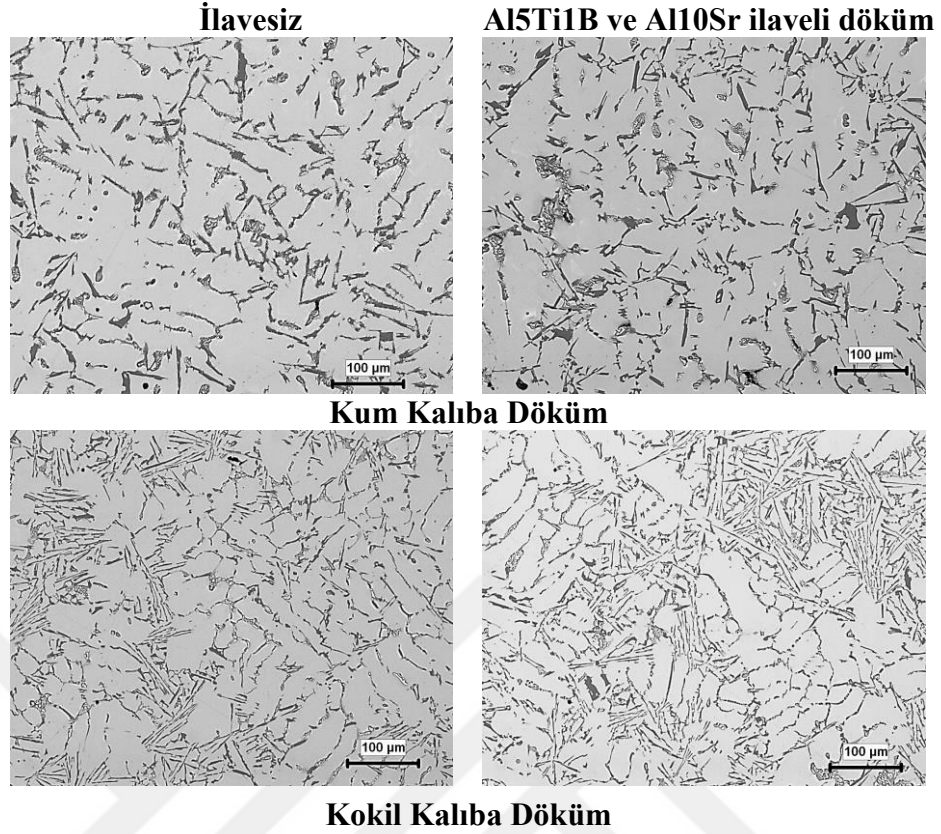
**Şekil 4.9.** Kum kalıba dökülen numunelere ait mikroyapı resimleri

Şekil 4.9’da farklı alaşımlara ait ilavesiz, tane inceltici ve modifiye edici ilaveli döküm numune mikroyapı resimlerinden de görüldüğü gibi tane inceltici ilavesi ile döküm yapısında ortaya çıkan dentritik ve kaba yapı kısmen incelmıştır. Numunenin alındığı yer bakımından katılaşma zamanı çok kısa olduğundan yapı arasındaki fark çok bariz bir şekilde ortaya çıkmamıştır. Ancak tane boyunun küçülmesi resimlerde belli

olmaktadır. Ayrıca modifiye edici ilavesi ise döküm içyapısında oluşan Si kristallerinin biçim ve boyutlarında değişikliğe sebep olmuştur. Bu durum özellikle ötektik Etial 140 alaşımının mikro yapı resminde bariz bir şekilde belli olmaktadır. Uzun ve keskin köşeli Si kristalleri Al10Sr alaşım elementi ilavesi ile modifiye olmuş ve yapıda ince ve homojen bir şekilde dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum Si içeriği ötektik bileşime yakın olan Etial 177 alaşımlarında da fark edilmektedir. Ancak kimyasal bileşiminde Si içeriği az olan alaşımların mikro yapısı üzerine Al10Sr alaşımının etkisi daha az göze çarpmaktadır. Uludağ vd. (2016)'nin elde ettiği sonuçlar bu durumu desteklemektedir (Uludağ vd., 2016).

Gürsoy vd. (2015) yaptıkları çalışmada, A356 alüminyum alaşımına farklı oranlarda Al5Ti1B mastır alaşımı ilave etmişler ve farklı sıcaklıklarda kum ve kokil kalıba döküm gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre her iki döküm yönteminde de en verimli tane küçülmesini 750 °C'de ağırlıkça %1 mastır alaşımı ilave edilen dökümlerde elde etmişlerdir. İki döküm yöntemini kıyasladıklarında en iyi tane inceltmenin kokil döküm yöntemi ile elde edildiğini belirtmişlerdir (Gürsoy vd., 2015). Bu sonuçlar bu çalışmada elde edilen sonuçları desteklemektedir.

Şekil 4.10'da döküm yöntem farkının döküm içyapısı üzerinde incelenmesi için Etial 160 alaşımına tane inceltici ve modifiye edici ilave edilerek dökümü yapılan numunelere ait mikro yapı resimleri verilmiştir. Mikro yapı resimleri 100x büyütmede çekilmiştir.



**Şekil 4.10.** Etial 160 alaşımında element ilavesi ve döküm yönteminin mikroyapıya etkisi

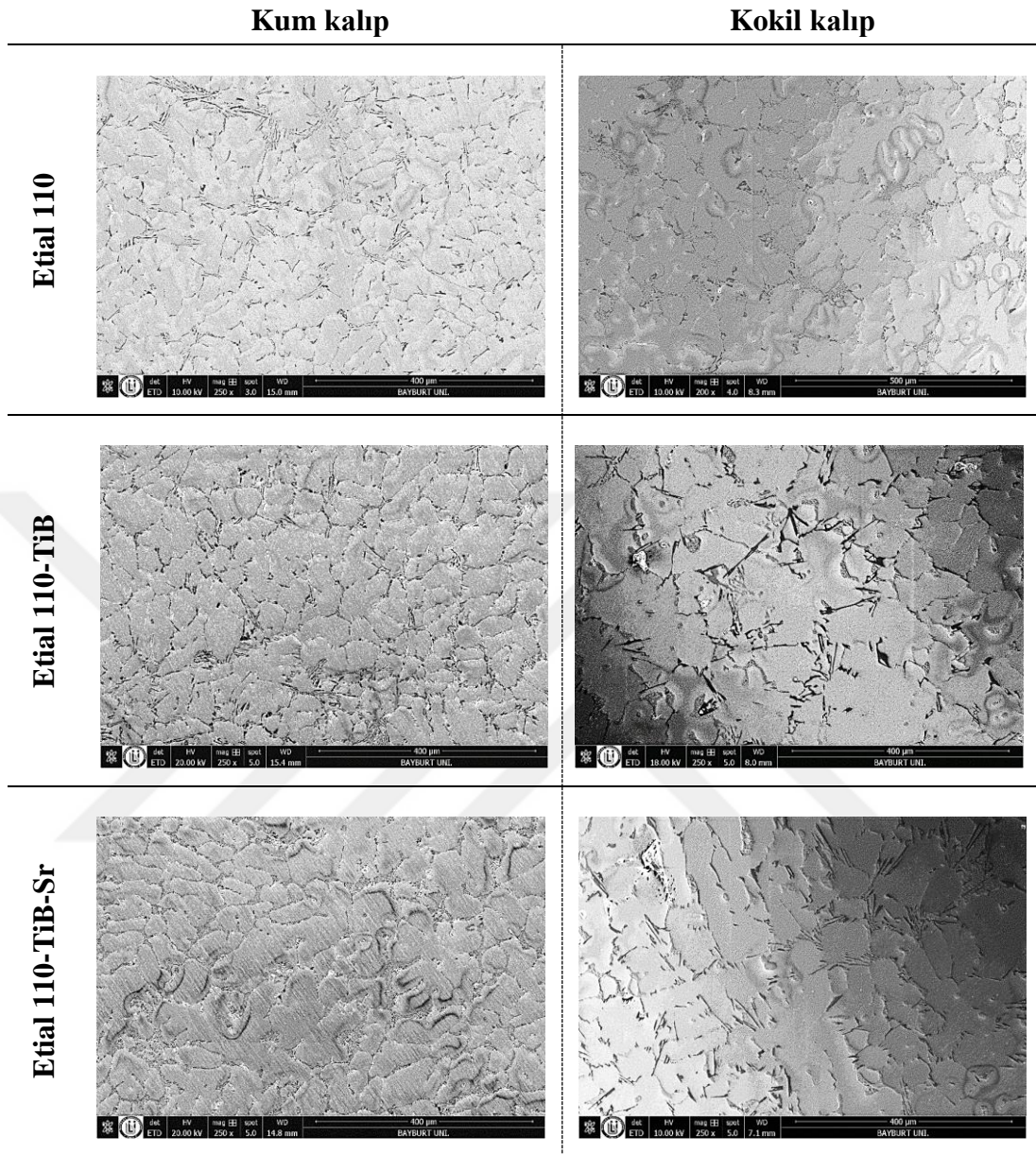
Şekil 4.10'da verilen resimler incelendiğinde kokil kalıp döküm yönteminde de kum kalıba döküm yönteminde olduğu gibi tane inceltici ve modifiye edici döküm mikro yapısını olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Kokil kalıp döküm yönteminde numunenin katılaşması için geçen süre kum kalıba döküm yöntemine göre daha kısa olduğundan döküm içyapıları daha ince taneli oluşmuştur.

#### 4.8 SEM Görüntüleri Sonuçları

Bu bölümde, kum ve kokil kalıp döküm yöntemi ile elde edilen ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 177 alaşımlarından alınan sıcak preste bakalit toz kullanılarak kalıplanmış numunelerin Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında çekilen SEM görüntüleri verilmiştir.

SEM görüntüleri, her biri alaşım kendi içinde ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli olarak, alaşımların birbirleri ile ve her bir alaşım kum döküm ve kokil döküm açısından değerlendirilmiştir.



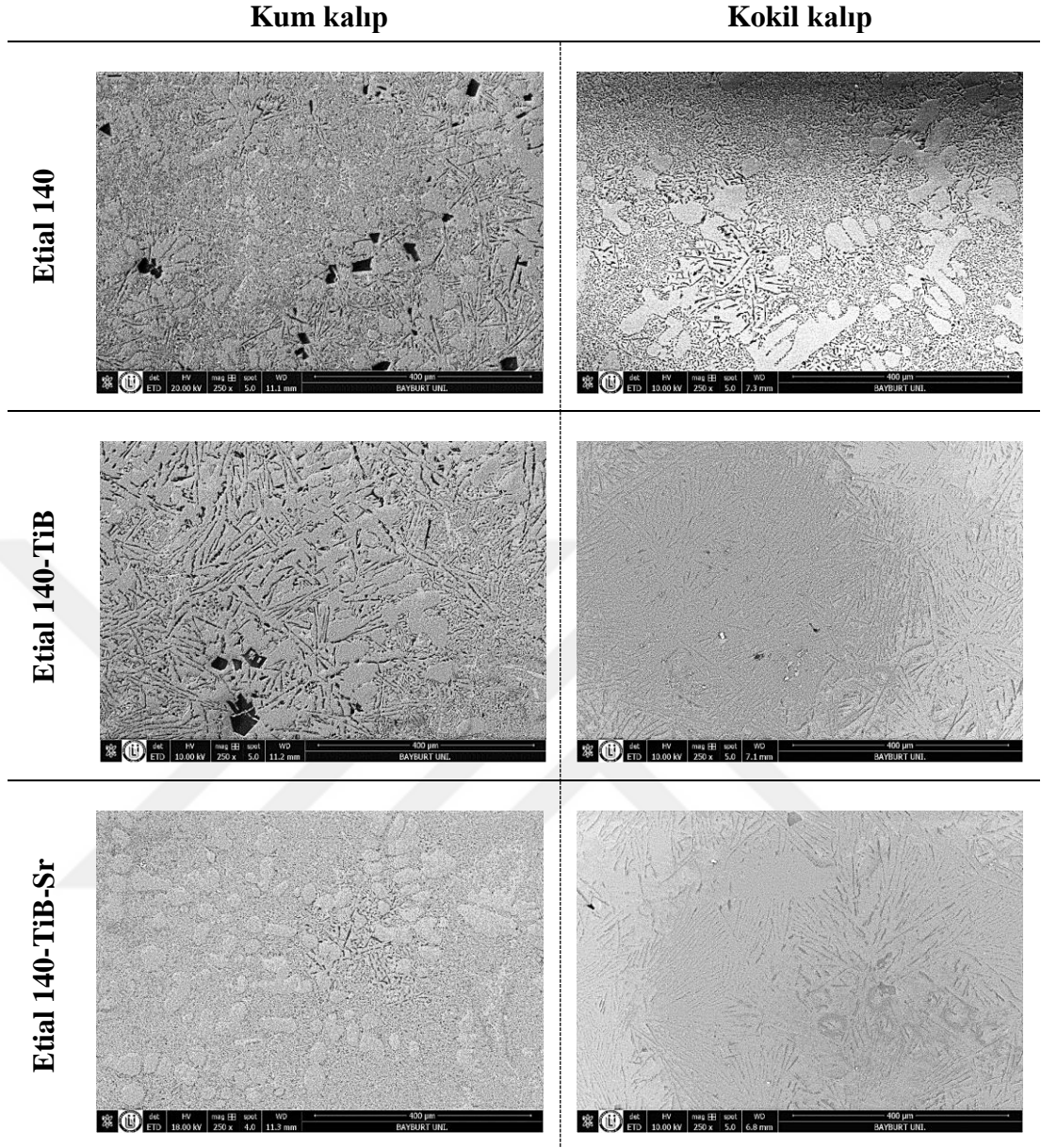


**Şekil 4.11.** Etial 110 alaşımasının ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli, kum kalıp ve kokil kalıp SEM görüntüleri

Şekil 4.11’de gösterilen kum kalıba dökülerek elde edilen Etial 110 alaşımasının ilavesiz, tane inceltici ve modifiye edici ilaveli SEM görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde, ilavesiz alaşım incelendiğinde alaşımsal tane sınırları denilen taneler net olarak gözükmemekte ve döküm işlemi sırasında ergimiş yapının içerisinde boşluk kusurlarının olduğu gözlemlenmiştir. TiB ilaveli yapı incelendiğinde, tanelerin daha net olduğu ilavesiz yapıya göre açıkça gözükmemektedir. Boşluk kusurlarının azaldığı ve alaşımsal yapının ilavesiz yapıya göre daha net olduğu

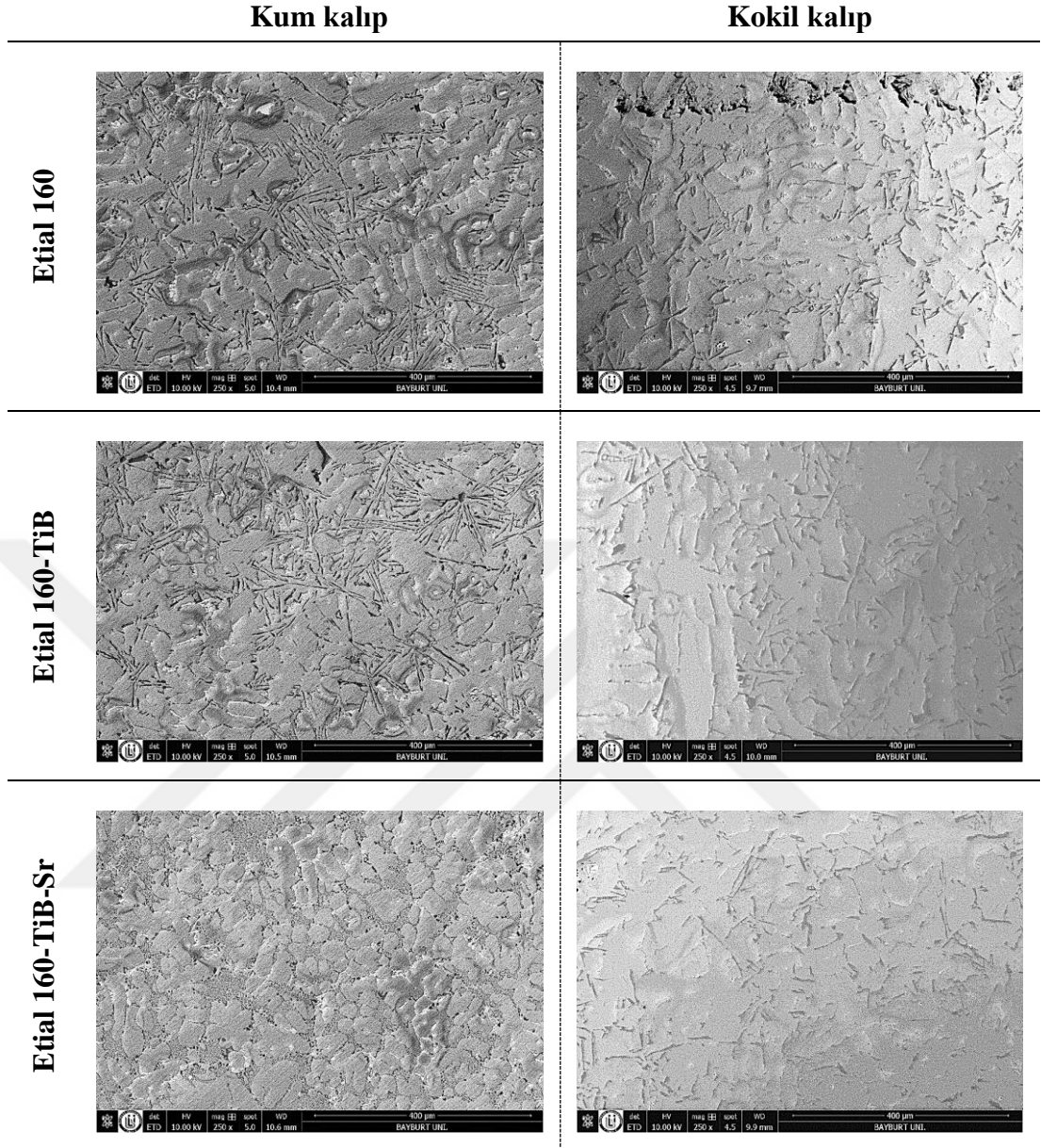
gözlemlenmiştir. TiB-Sr ilaveli yapıları incelendiğinde ise, ilavesiz ve TiB ilaveli yapılara göre taneler daha net ve daha sık olarak oluşmuş ve tane sınırları arasındaki boşluklar TiB-Sr ilavesinin etkisiyle doldurulduğu ve bu ilave taneler arasında yapıyı bağlayıcı olarak görev yapıp daha net gözükken alaşımsal duruma getirmiştir. Ancak bütün kum kalıba dökülerek elde edilmiş ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli yapılarda oluşan taneler farklı farklı büyüklükte gözlemlenmiştir. İlavesiz yapıda dentritler daha çok gözlemlenmekte, TiB ilaveli yapıda dentritler gözükmemekte ancak ilavesiz yapıya göre daha az bulunmaktadır. TiB-Sr ilaveli yapıda ise dentritler diğerlerine göre iyice kaybolmuş ve tanelere dönüşmüştür.

Şekil 4.11’de gösterilen Kokil kalıp ile elde edilen Etial 110 alaşımının ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli yapıları da incelendiğinde kum kalıpta meydana gelen oluşumlar gözlemlenmiştir. Ancak kokil kalıba dökümde yapı daha erken soğuduğu için tanelerden ziyade dentritik yapı daha fazla gözükmemektedir. Bu durum kum kalıpta daha az gözükmemektedir.



**Şekil 4.12.** Etial 140 alaşımlarının ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli, kum kalıp ve kokil kalıp SEM görüntüleri

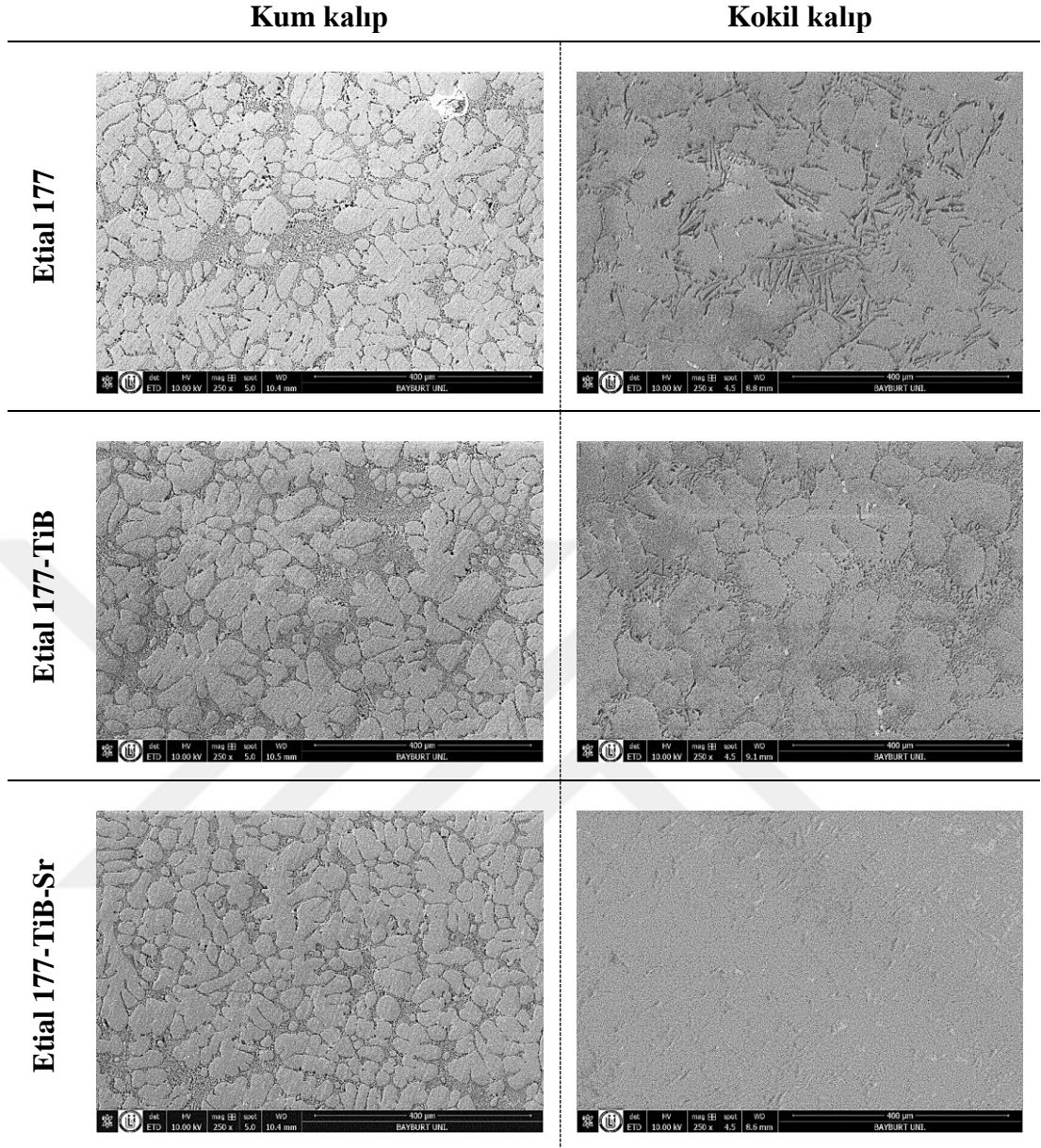
Şekil 4.12’de verilen kum ve kokil kalıba dökülerek elde edilmiş Etial 140 alaşımları incelendiğinde Etial 110 alaşımlarında medyada gelen değişimler ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli Etial 140 alaşımlarında da gözlemlenmiştir. Ancak diğer alaşımlara göre Etial 140 alaşımında ötektik yapı daha belirgin olarak gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.13.** Etial 160 alaşımlarının ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli, kum kalıp ve kokil kalıp SEM görüntüleri

Şekil 4.13'te verilen kum ve kokil kalıba dökülerek elde edilmiş Etial 160 alaşımları incelendiğinde Etial 110 alaşımlarında medyada gelen değişimler ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli Etial 160 alaşımlarında da gözlemlenmiştir.





**Şekil 4.14.** Etial 177 alaşımının ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli, kum kalıp ve kokil kalıp SEM görüntüleri

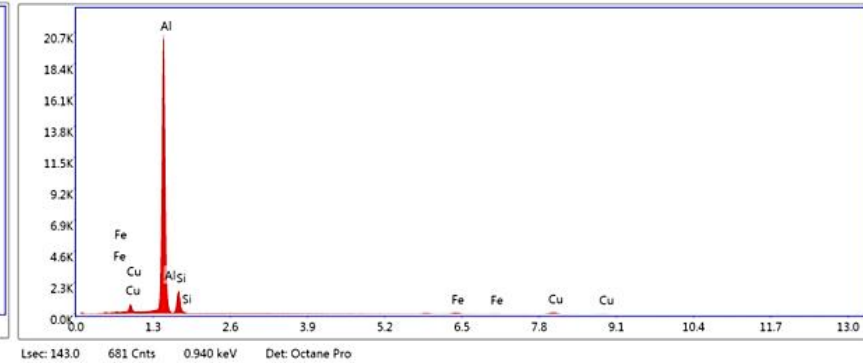
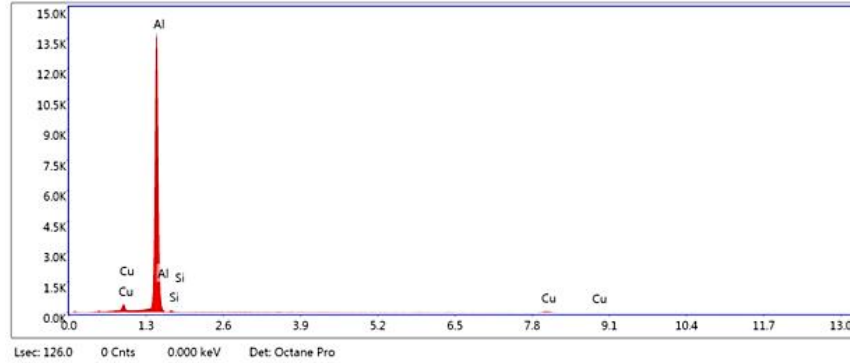
Şekil 4.14’te verilen kum ve kokil kalıba dökülerek elde edilmiş Etial 140 alaşımları incelendiğinde Etial 177 alaşımlarında medyada gelen değişimler ilavesiz, TiB ilaveli ve TiB-Sr ilaveli Etial 177 alaşımlarında da gözlemlenmiştir. Ancak diğer alaşımlara göre Etial 177 alaşımında dentritik yapı yerine daha net belirgin tane yapıları gözlemlenmiştir.



İlavesiz alaşımlar, TiB ilaveli alaşımlar ve TiB-Sr ilaveli alaşımlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde oluşan yapıların birbirlerinden oldukça farklı olduğu, Etial 140'da ötektik yapı daha belirgin ve Etial 177'de dentritik yapı yerine daha net belirgin olan tane yapıları gözlemlenmiştir. Bu seriler arasındaki fark Al-Si alaşımlarındaki silisyum konsantrasyonunun değişmesi ile birlikte diğer alaşım elamanlarının (bkz. Çizelge 4.1) hem elementel hem de ağırlıkça konsantrasyon olarak farklı olmasından ileri gelmektedir. Çizelge 4.1 ve SEM görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde, Etial 110 ve Etial 177 serisi alaşımlarının yapısındaki ağırlıkça alüminyum yüzdesi Etial 140 ve Etial 160'dan oldukça fazla olduğu gözükmektedir. Alınan SEM görüntülerine göre Etial 110 ve Etial 177 yapılarında tane sınırlarının daha net ve belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Bu duruma yapıdaki alüminyumun ağırlıkça yüzdesinin sebep olduğu düşünülmektedir. Yani yapıdaki alüminyumun ağırlıkça yüzdesi arttıkça tane sınırlarının daha net ve belirgin olacağı açıktır. Bütün yapılar birlikte değerlendirildiğinde SEM görüntülerinde kısmi olarak taneler arasında renk tonu farklılığı olduğu belirlenmiştir. Bu durum döküm anında soğuma sırasındaki işlemsel koşul farklılığından dolayı kristal yapıda oluşan farklılıklara atfedilebilir.

#### **4.9 EDS Analiz Sonuçları**

Bu tez çalışmasında incelenen Etial alüminyum alaşımlarının sahip oldukları elementel içeriklerin ağırlıkça yüzde bileşenleri Çizelge 4.1'de kimyasal bileşimlerinin uygunluğunun kontrolü bölümünde sunulmuştur. Bu çizelgede verilen ağırlıkça yüzde bileşenlerin doğruluğunun araştırılması ve teyit edilmesi için her bir numune ayrı ayrı, aynı koşullarda SEM-EDS cihazı (FEI Nova Nano SEM 450 markalı) ile Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda analiz edilmiştir. Bu analiz sonuçlarından bazıları örnek teşkil etmesi açısından Şekil 4.15-17'de sunulmuştur. Bu şekillerden Şekil 4.15, ilavesiz Etial 110 numunesinin kum ve kokil kalıp döküm hallerinin SEM-EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.16, Etial 160'ın TiB-Sr ilaveli kum ve kokil kalıp döküm örneklerinin SEM-EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.17, Etial 177'nin TiB ilaveli kum ve kokil kalıp döküm örneklerinin SEM-EDS analiz sonuçlarını göstermektedir.

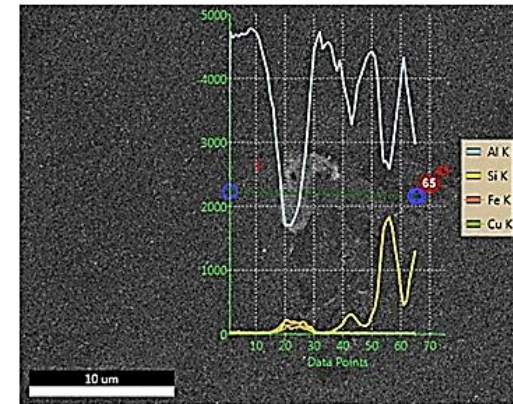
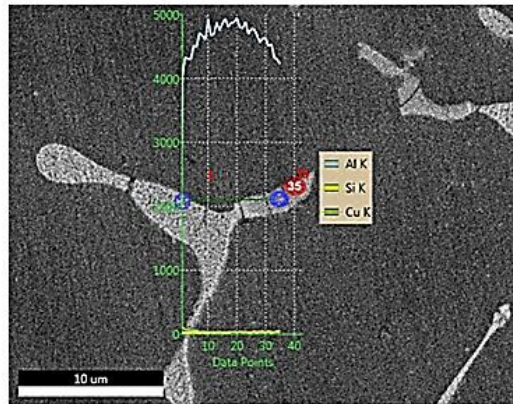


**eZAF Smart Quant Results**

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
AlK	94.96	97.16	1544.51	1.85	0.8922	1.0057	0.9341	1.0002
SiK	1.19	1.17	7.94	17.73	0.0047	1.0281	0.3860	1.0004
CuK	3.85	1.67	9.80	14.39	0.0353	0.8309	1.0018	1.1020

**eZAF Smart Quant Results**

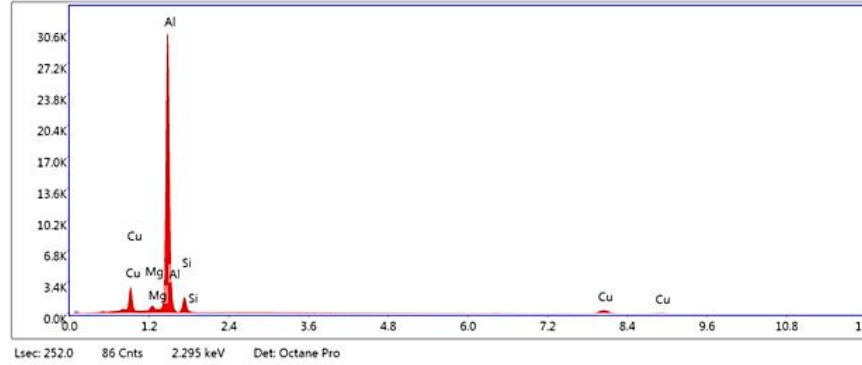
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
AlK	78.62	81.71	2030.48	2.22	0.7070	1.0047	0.8937	1.0016
SiK	15.70	15.68	178.51	7.86	0.0638	1.0271	0.3954	1.0005
FeK	1.87	0.94	12.79	14.86	0.0173	0.8670	0.9889	1.0761
CuK	3.80	1.68	16.28	13.02	0.0344	0.8306	0.9995	1.0909



**Şekil 4.15.** Etial 110 ilavesiz SEM-EDS analiz sonuçları



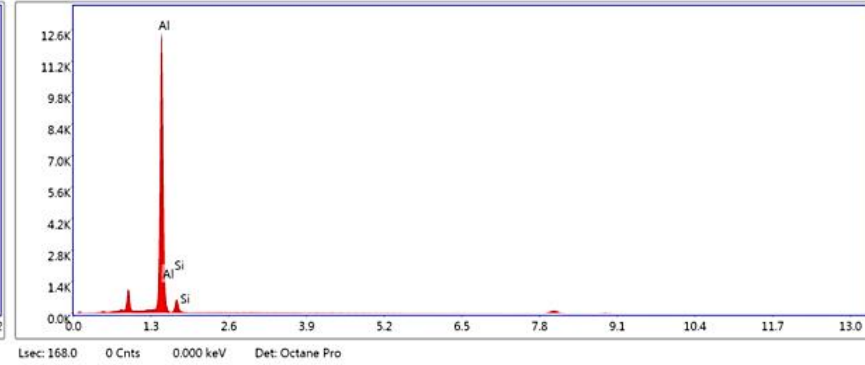
ETIAL160+TiB+Sr (Kum Kalıp)



eZAF Smart Quant Results

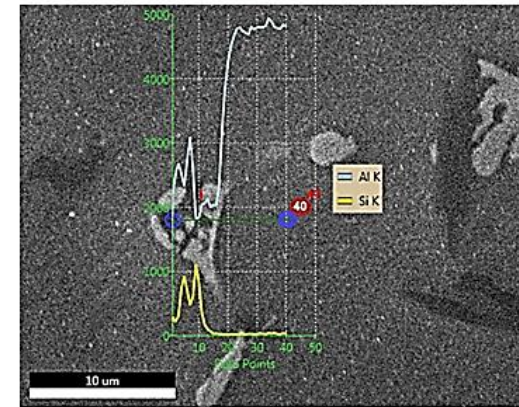
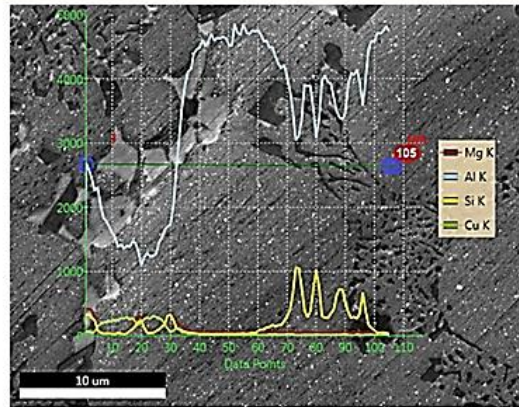
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
MgK	2.62	3.10	54.95	5.33	0.0204	1.0534	0.7359	1.0052
AlK	78.01	83.21	1712.38	3.10	0.6438	1.0144	0.8129	1.0008
SiK	8.59	8.80	100.34	7.66	0.0392	1.0366	0.4404	1.0006
CuK	10.78	4.88	33.34	5.30	0.0954	0.8316	1.0015	1.0627

ETIAL160+TiB+Sr (Kökül Kalıp)



eZAF Smart Quant Results

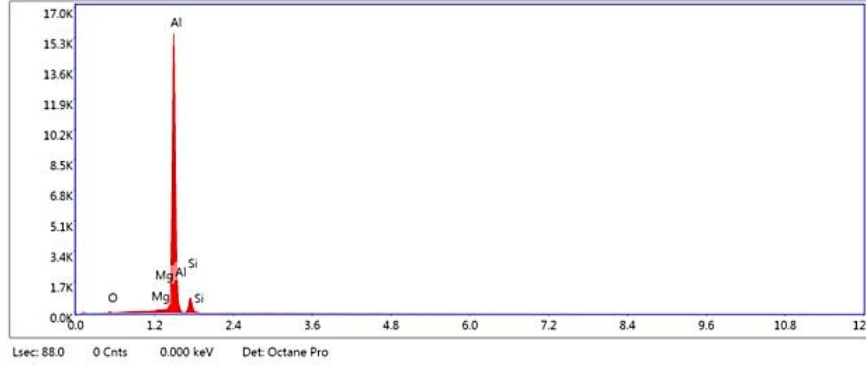
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
AlK	88.39	88.80	1044.82	1.29	0.8771	0.9974	0.9934	1.0015
SiK	11.61	11.20	53.33	8.82	0.0460	1.0196	0.3888	1.0002



Şekil 4.16. Etial 160 TiB ve Sr ilaveli SEM-EDS analiz sonuçları



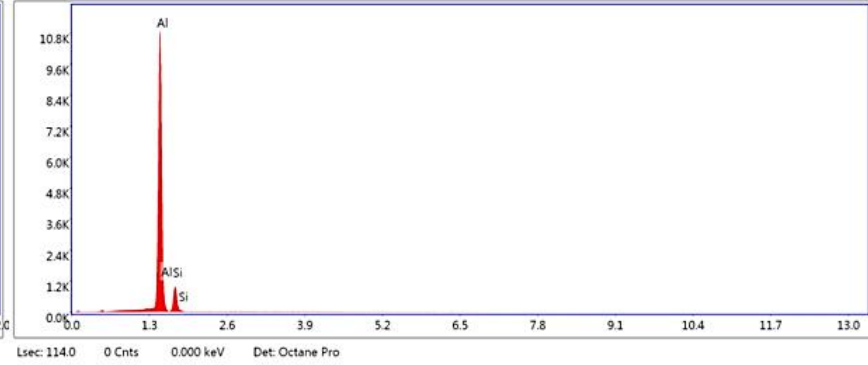
ETIAL177+TiB (Kum Kalıp)



eZAF Smart Quant Results

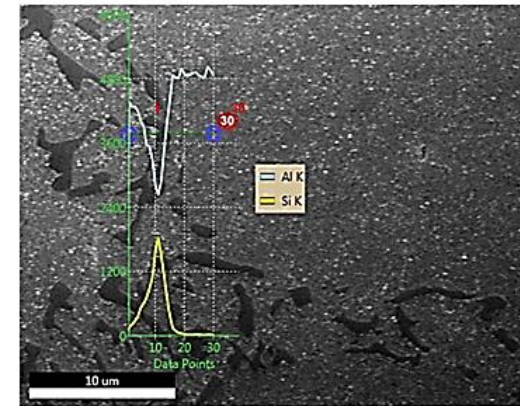
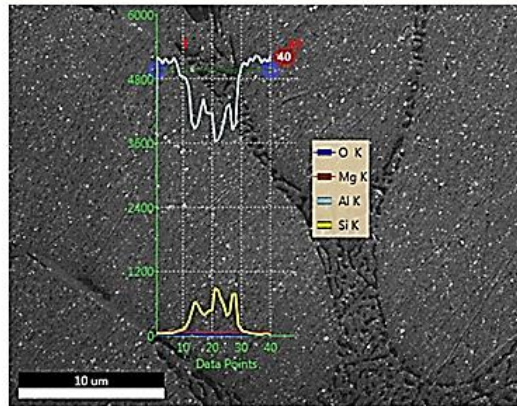
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	0.71	1.19	4.27	33.66	0.0023	1.1205	0.2863	1.0000
MgK	1.62	1.80	48.30	4.99	0.0158	1.0346	0.9291	1.0114
AlK	86.57	86.37	2532.63	1.61	0.8361	0.9961	0.9683	1.0015
SiK	11.10	10.64	146.79	7.91	0.0504	1.0177	0.4458	1.0002

ETIAL177+TiB (Kökü Kalıp)



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
AlK	81.20	81.81	1364.74	1.35	0.8018	0.9959	0.9892	1.0024
SiK	18.80	18.19	129.87	7.97	0.0784	1.0180	0.4095	1.0002



Şekil 4.17. Etial 177 TiB ilaveli SEM-EDS analiz sonuçları

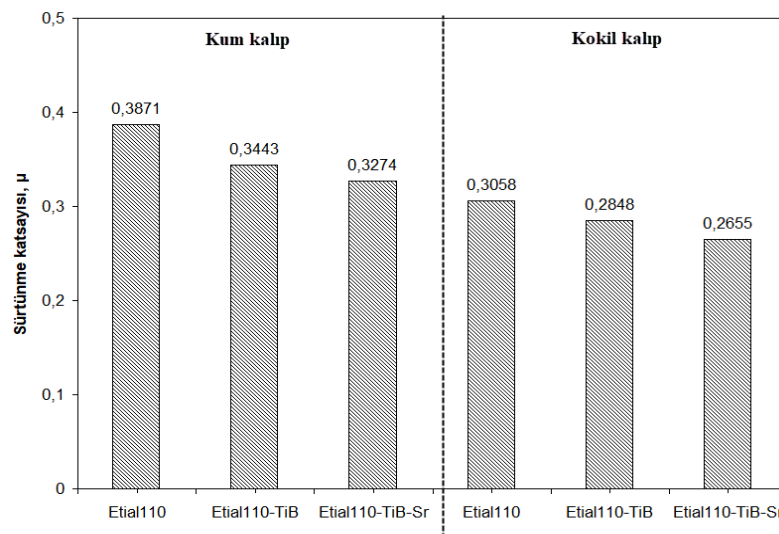


Bu analiz sonuçları incelenen numunelerin sadece lineer bir kesitinden alınmış olmasına rağmen elde edilen sonuçların Çizelge 4.1’de verilen sonuçlar ile çok küçük varyasyon göstererek hemen hemen eşit değerde olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin Çizelge 4.1’de kum kalıp için ilavesiz Etial 110 numunesinin sahip olduğu ağırlıkça alüminyum konsantrasyon yüzdesi 91,406 olarak verilmiş iken Şekil 4.15’te verilen analiz sonucuna göre bu değer 94,96 olarak bulunmuştur. Bu iki değer arasındaki yüzde varyasyon  $\% \eta = (|94,96 - 91,406| \div 94,96) \times 100 \cong \%3,74$  olarak hesaplanmıştır. Bu değer göz önüne alındığında SEM-EDS analiz sonuçları ile Çizelge 4.1’de verilen sonuçların uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzde varyansın sebebi ise SEM-EDS ölçümlerinin numunenin bütünü taramamasından yani lineer bir kesitten alınmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak kum ve kokil kalıpta yapılan numunelerin homojenite değerinin oldukça yüksek olduğu söylenebilir.

#### 4.10 Aşınma ve Sürtünme Testi Sonuçları

Bu bölümde, pin-on-disk cihazı ile kuru kayma şartlarında ve oda sıcaklığında, testleri yapılan numunelerin sürtünme ve aşınma sonuçları değerlendirilmiştir.

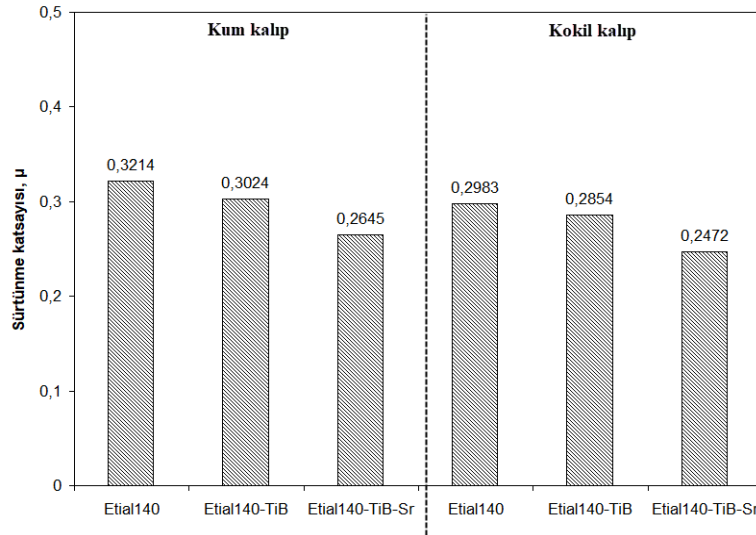
Şekil 4.18’de kum ve kokil kalıp ile üretilen ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli Etial 110 alaşımının 1,0 m/s kayma hızı, 1000 m kayma mesafesi ve 20 N yük altındaki sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.18. Etial 110 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi, kum kalıp yöntemi ile üretilen Etial 110 alaşımının 0,38 olan sürtünme katsayısı TiB ve Sr ilavesi ile azalmıştır. Bu azalma TiB ilave edildiğinde %12,4 oranında elde edilirken TiB-Sr ilave edildiğinde %18,2 oranında elde edilmiştir. Kokil kalıp ile üretilen Etial 110 alaşımının 0,30 olan sürtünme katsayısı ise TiB ilavesi ile 0,28, TiB-Sr ilavesi ile 0,26 olarak elde edilmiştir. Döküm yöntemleri karşılaştırıldığında ise kokil kalıp kullanılarak üretilen numunelerde daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Kum ve kokil kalıp ile üretilen Etial 110 alaşımının sürtünme katsayıları incelendiğinde 0,38 olan sürtünme katsayısı %26,5 oranında azalarak 0,30 elde edilmiştir.

Şekil 4.19’da kum ve kokil kalıp ile üretilen ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli Etial 140 alaşımının 1,0 m/s kayma hızı, 1000 m kayma mesafesi ve 20 N yük altındaki sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir.

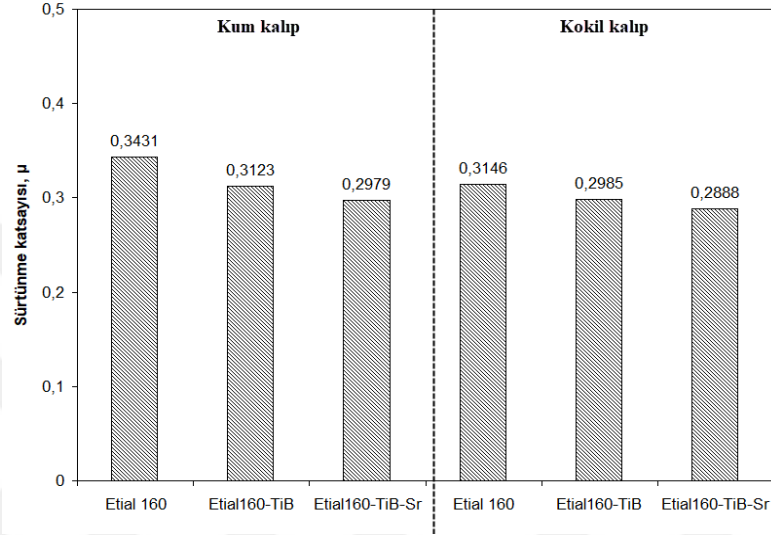


**Şekil 4.19.** Etial 140 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi, kum kalıp yöntemi ile üretilen Etial 140 alaşımının 0,32 olan sürtünme katsayısı TiB ilavesi ile 0,30 değerine, TiB-Sr ilavesi ile 0,26 değerine azalmıştır. Bu azalma sırası ile %6,2 ve %21,5 oranlarında elde edilmiştir. Kokil kalıp ile üretilen Etial 140 alaşımının 0,29 olan sürtünme katsayısı ise TiB ilavesi ile 0,28, TiB-Sr ilavesi ile 0,24 olarak elde edilmiştir. Döküm yöntemleri karşılaştırıldığında ise kokil kalıp kullanılarak üretilen numunelerde sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Etial 140-TiB-Sr alaşımları karşılaştırıldığında, kokil kalıp

numunelerinin kum kalıp ile üretilenlere göre sürtünme katsayısının %6,9 oranında daha düşük olduğu belirlenmiştir.

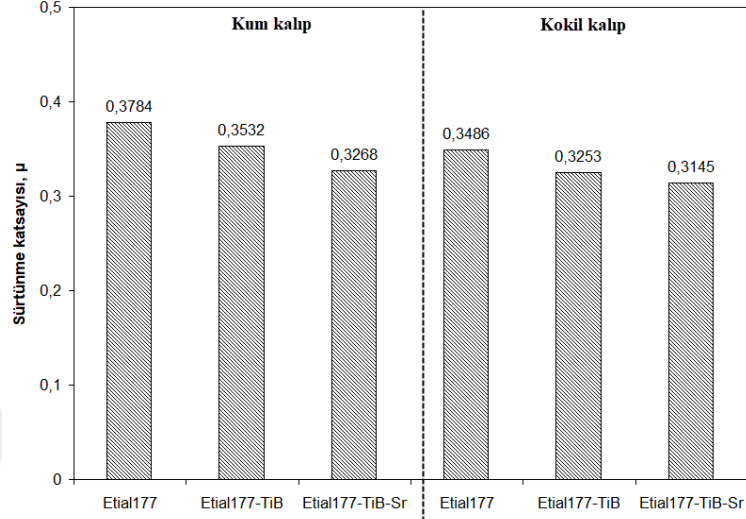
Şekil 4.20’de kum ve kokil kalıp ile üretilen ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli Etial 160 alaşımının 1,0 m/s kayma hızı, 1000 m kayma mesafesi ve 20 N yük altındaki sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.20. Etial 160 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi, kum kalıp yöntemi ile üretilen Etial 160 alaşımının 0,34 olan sürtünme katsayısı TiB ilavesi ile 0,31 değerine, TiB-Sr ilavesi ile 0,29 değerine azalmıştır. Bu azalma sırası ile %9,8 ve %15,1 oranlarında elde edilmiştir. Kokil kalıp ile üretilen Etial 160 alaşımının 0,31 olan sürtünme katsayısı ise TiB ilavesi ile 0,29, TiB-Sr ilavesi ile 0,28 olarak elde edilmiştir. Döküm yöntemleri karşılaştırıldığında ise kokil kalıp kullanılarak üretilen numunelerde sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Etial 160-TiB alaşımları karşılaştırıldığında, kokil kalıp numunelerinin kum kalıp ile üretilenlere göre sürtünme katsayısının %4,6 oranında daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.21’de kum ve kokil kalıp ile üretilen ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli Etial 177 alaşımının 1,0 m/s kayma hızı, 1000 m kayma mesafesi ve 20 N yük altındaki sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir.



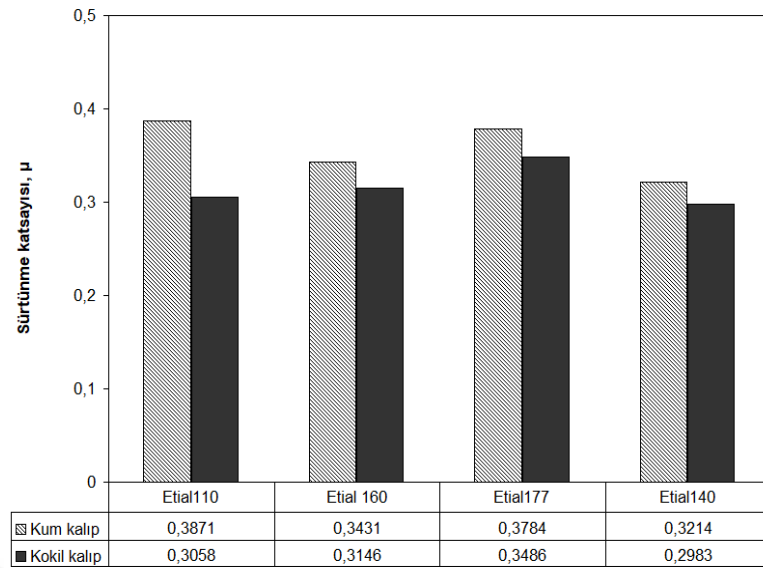
**Şekil 4.21.** Etial 177 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi, kum kalıp yöntemi ile üretilen Etial 177 alaşımının 0,37 olan sürtünme katsayısı TiB ve Sr ilavesi ile azalmıştır. Bu azalma TiB ilave edildiğinde %7,1 oranında elde edilirken TiB-Sr ilave edildiğinde %15,7 oranında elde edilmiştir. Kokil kalıp ile üretilen Etial 177 alaşımının 0,34 olan sürtünme katsayısı ise TiB ilavesi ile 0,32, TiB-Sr ilavesi ile 0,31 olarak elde edilmiştir. Döküm yöntemleri karşılaştırıldığında ise kokil kalıp kullanılarak üretilen numunelerde daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Kum ve kokil kalıp ile üretilen Etial 177 alaşımının sürtünme katsayıları incelendiğinde 0,37 olan sürtünme katsayısı %8,5 oranında azalarak 0,34 elde edilmiştir.

Qiu vd. (2015), yaptıkları çalışmada, tane inceltici, Mn ve Sn ilavelerinin A356 (Al-Si alaşımı) alüminyum alaşımlarının kayma aşınma davranışı üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Elde ettikleri deneysel sonuçlara göre Al-5Ti-B mastır alaşımı ilave edilmiş alaşımın eş eksenli  $\alpha$  (Al) dentritler sergilediğini ve Al-5Ti-B mastır alaşımı ilavesi olmayan alaşıma göre daha iyi aşınma direnci sergilediğini göstermişlerdir (Qiu vd., 2015).

Şekil 4.22’de Etial 110, Etial 160, Etial 177 ve Etial 140 alaşımlarının kalıplama yöntemine göre sürtünme katsayısı grafiği verilmiştir.



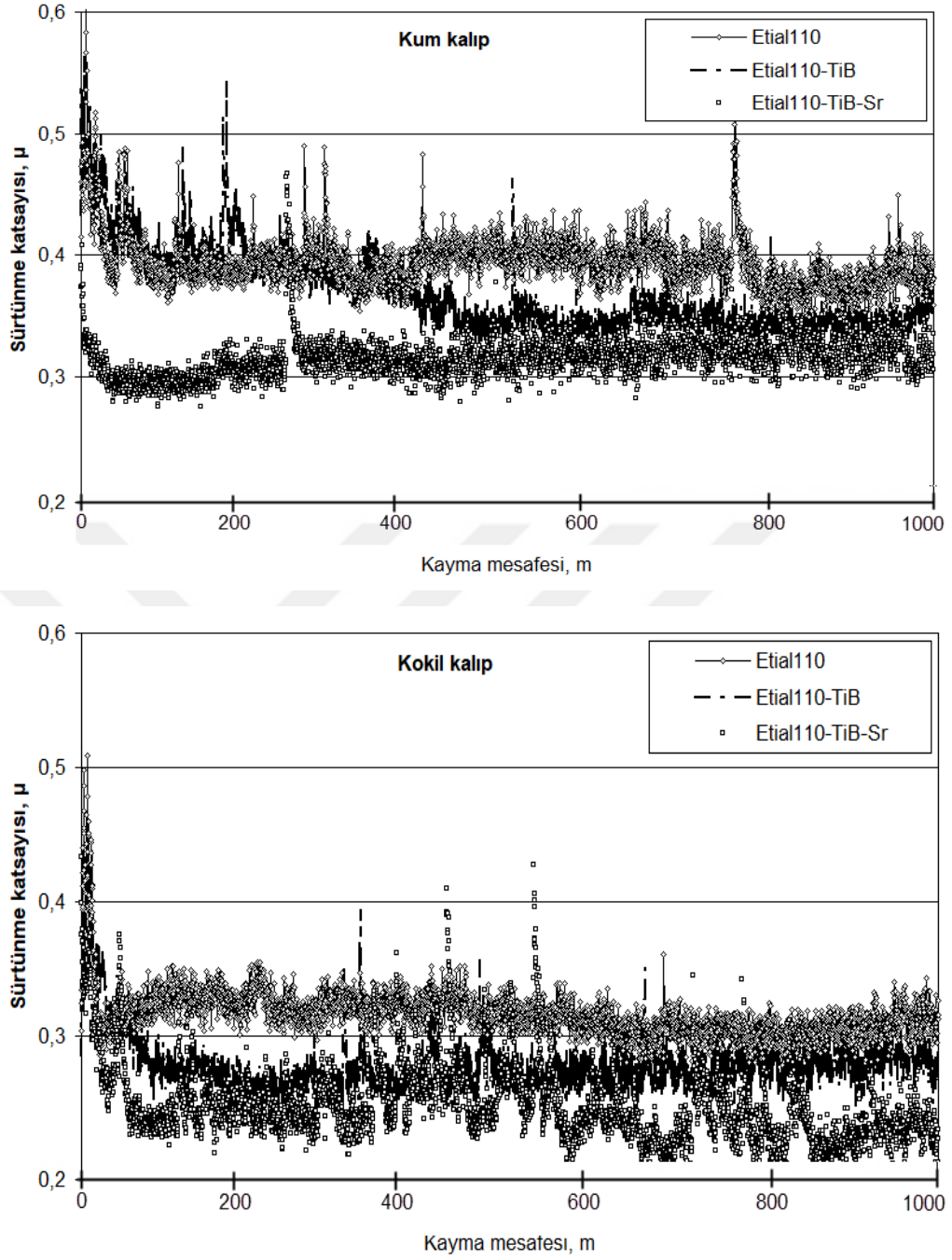


**Şekil 4.22.** Alaşım türüne bağlı olarak sürtünme katsayısı sonuçları

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi en yüksek sürtünme katsayısı kum kalıp yöntemi ile üretilen Etial 110 alaşımında 0,38 değeri ile elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı kokil kalıplama yöntemi ile üretilen Etial 140 alaşımında 0,29 değeri ile elde edilmiştir.

Vencl vd. (2014), yaptıkları çalışmada, Zn25Al alaşımlarının Si ve Sr ilaveli yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri araştırmış ve ticari ZA-27 alüminyum çinko alaşımı ile karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, stronsiyumun eklenmesi, birincil silisyum parçacıklarının boyutunu ve dağılımını etkilediğini belirlemişlerdir. İğne benzeri ötektik silisyum parçacıkları lifli olanlara dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Silisyum ve stronsiyum varlığı, ticari ZA-27 alaşımının mekanik özelliklerine kıyasla elde edilen Zn25Al alaşımlarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemediğini göstermişlerdir. Silisyum içeren alaşımların aşınma oranı, ZA-27 alaşımından düşük olduğunu göstermişlerdir. Stronsiyumun eklenmesi aşınma oranını daha da düşürdüğünü ve sürtünme katsayısını hafifçe artırdığını belirtmişlerdir (Vencl vd., 2014).

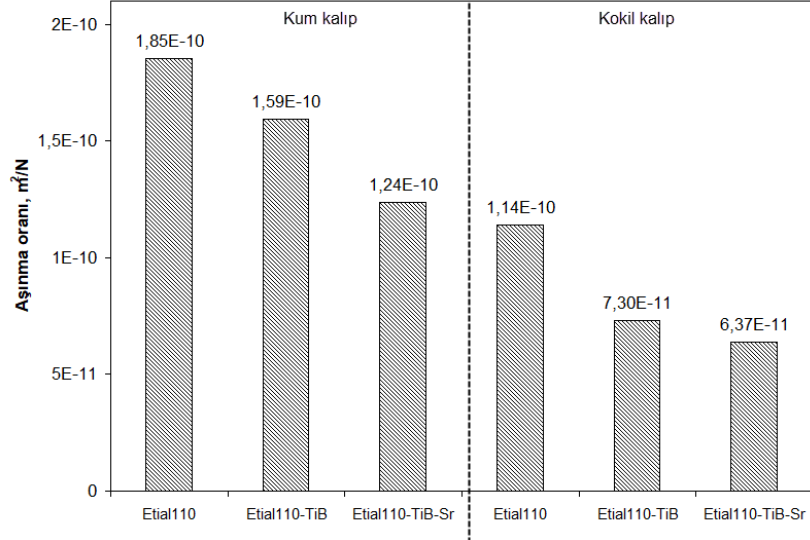
Şekil 4.23’te kum ve kokil kalıp ile üretilen ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli Etial 110 alaşımının 1,0 m/s kayma hızı, 1000 m kayma mesafesi ve 20 N yük altındaki kayma mesafesi-sürtünme katsayısı grafiği verilmiştir.



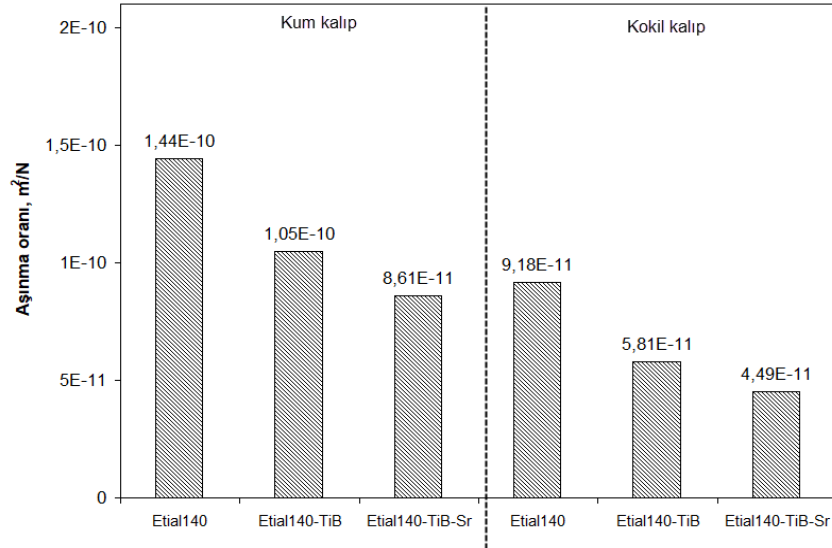
**Şekil 4.23.** Kum ve kokil kalıp ile üretilen TiB ve TiB-Sr ilaveli Etial 110 alaşımlarının kayma mesafesi-sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.23'te görüldüğü gibi her iki üretim yöntemi ile üretilen numunelerde sürtünme katsayısı başlangıç aşaması ve kararlı hal aşaması olmak üzere iki aşamada gerçekleşmiştir. Yaklaşık 200 m kayma mesafesinde numuneler kararlı hal aşamasına geçmiştir.

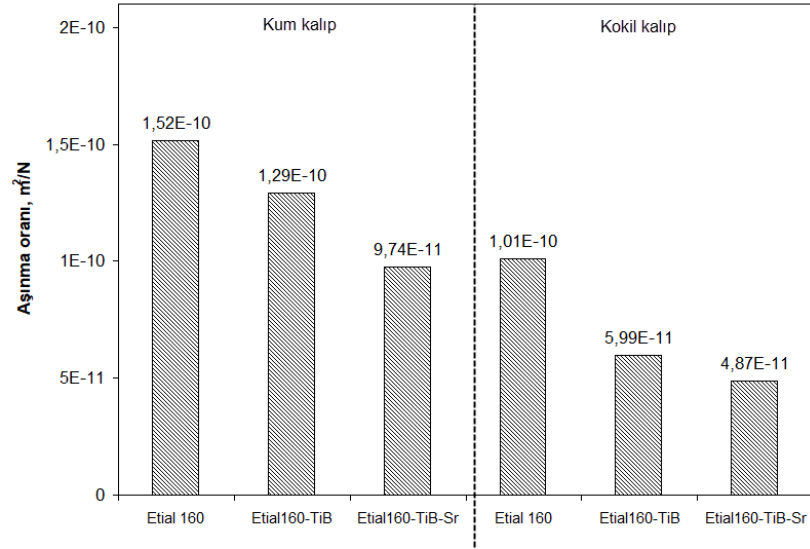
Şekil 4.24-27’de ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli Etial 110, Etial 160, Etial 177 ve Etial 140 alaşımlarının 1,0 m/s kayma hızı 1000 m kayma mesafesi ve 20 N yük altındaki aşınma oranı sonuçları verilmiştir.



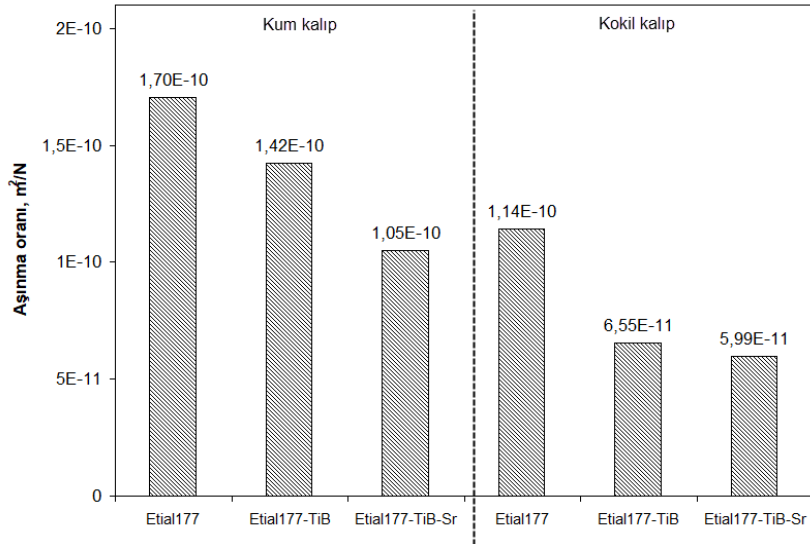
Şekil 4.24. Etial 110 alaşımının ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli 1,0 m/s kayma hızı ve 20 N yük altındaki aşınma oranı



Şekil 4.25. Etial 140 alaşımının ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli 1,0 m/s kayma hızı ve 20 N yük altındaki aşınma oranı



**Şekil 4.26.** Etial 160 alaşımının ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli 1,0 m/s kayma hızı ve 20 N yük altındaki aşınma oranı



**Şekil 4.27.** Etial 177 alaşımının ilavesiz, TiB ve TiB-Sr ilaveli 1,0 m/s kayma hızı ve 20 N yük altındaki aşınma oranı

Genel olarak alüminyum alaşımlarının aşınma oranı  $10^{-10}$  ve  $10^{-11}$  civarında elde edilmiştir. Kum ve kokil kalıp kullanılarak üretilen alaşımlara TiB ve TiB-Sr ilavesi ile aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. Bu azalma kum kalıp ile üretilen Etial 110 alaşımı için %16,4 ve %50 oranlarında elde edilmiştir. Kokil kalıp ile üretilen Etial 110 alaşımı için ise azalma %56,4 ve %79,4 oranlarında elde edilmiştir. Şekil 4.27’de verilen Etial 140 alaşımının aşınma oranı değerleri incelendiğinde ise benzer şekilde kokil kalıp ile üretilen numunelerin kum kalıp ile üretilen numunelere göre aşınma oranının daha düşük olduğu belirlenmiştir. TiB ilaveli Etial 140 alaşımları

karşılaştırıldığında aşınma oranının %80 oranında daha düşük olduğu belirlenmiştir. Kum kalıp yöntemi ile üretilen Etial 110 alaşımında  $1,85 \times 10^{-10}$  değeri ile en yüksek aşınma oranı elde edilirken kokil kalıp yöntemi ile üretilen Etial 140-TiB-Sr alaşımında  $4,49 \times 10^{-11}$  değeri ile en düşük aşınma oranı elde edilmiştir. Bu durumun alaşımlardaki Si oranına bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir. Ölmez ve Keleşoğlu çalışmalarında Al-Si alaşımli malzemelerin Si oranı arttıkça malzeme aşınma direncinde bir iyileşme olduğunu belirtmişlerdir (Ölmez ve Keleşoğlu, 2016).

Patil vd. (2019) yaptıkları çalışmada, TiB<sub>2</sub> ilavesinin, doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapı ve aşınma direncine etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre üretilen alaşımın, sertlik ve aşınma performansında çarpıcı bir gelişme gözlemlemişlerdir. Tane inceltme ve Ti-6Al-4V alaşımının sertleşmesi ile birlikte mikro yapıdaki değişiklik, sertlik ve aşınma performansında kademeli bir iyileşmeye sebep olduğunu belirtmişlerdir (Patil vd., 2019).

Patil vd. (2019), Qiu vd. (2015) ve Vencl vd. (2014) yaptıkları çalışmalarda tane inceltici ve modifiye edici ilavelerinin alaşımların aşınma direncini önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir (Patil vd., 2019; Qiu vd., 2015; Vencl vd., 2014). Bu durumlar bu tez çalışmasında elde edilen bulguları desteklemektedir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Etial 110, Etial 140, Etial 160 ve Etial 177 standardı alüminyum döküm alaşımlarının ilavesiz, tane inceltici ve modifiye edici ilaveli kum ve kokil kalıba döküm koşullarında mikroyapı üzerinde değişiklikler incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen genel sonuçları aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralamak mümkündür;

1. Alüminyum alaşımları kimyasal bileşimlerine bağlı olarak çeşitli şekilde katılaşma sergilemiştir. Bileşiminde Si içeren alaşımlar ötektik öncesi  $\alpha$  ve ötektik  $\alpha$ +Si yapısı içerdiği anlaşılmıştır.
2. Ötektik Etial 140 alaşımının katılaşması sonucu içyapıda ötektik yapı  $\alpha$ +Si şeklinde olduğu gözlenmiştir.
3. Alaşımların her birinde tane inceltici ilavesi ile döküm yapısında ortaya çıkan dentritik ve kaba yapının bozularak daha ince taneli bir yapı ortaya çıktığı tespit edilmiştir.
4. Al10Sr modifiye edici ilavesi ise döküm içyapısında oluşan Si kristallerinin biçim ve boyutlarında değişikliğe sebep olduğu lamel şeklinde yapısının fiberimsi yapıya dönüştüğü gözlenmiştir.
5. Elde edilen verilere göre gözenek oranları, mastır alaşım ilavesiz alüminyum alaşımlarında gözenek oranlarının %2,04 ile %3,46 arasında değiştiği gözlenmiştir. Alaşımlara ilave edilen Al5Ti1B mastır alaşımı gözenek miktarını azaltmıştır. Bu azalma kum kalıba dökümde Etial 110, Etial 140, Etial 160 ve Etial 177 için sırasıyla %1,96, %2,37, %2,54 ve %1,68 oranlarında elde edilmiştir. Kokil kalıba dökümde ise bu azalma %1,64 ile %2,20 arasında değişmektedir. Al5Ti1B ve Al10Sr mastır alaşımları birlikte ilave edildiğinde hem kum kalıba dökümde hem de kokil kalıba dökümde gözenek miktarları daha da azalarak %1,06 ile %1,86 aralığında elde edilmiştir.
6. Alaşımlarda hem kum hem de kokil kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesi ile %10'a varan oranlarda sertlik değerlerinde artış olmuştur. Tane incelticiye ek olarak modifiye edici ilavesi de yine sertlik artışına olumlu yönde etki etmiştir. Modifiye edici ilavesini sertlik değerlerine olan etkisi ilgili

alaşımların içeriğindeki Si elementine bağlı olarak değişkenlik göstermekte ve en fazla etki ötektik olarak da adlandırılan yaklaşık %12 Si içeren Etial 140 alaşımında gerçekleşmiştir.

7. Alaşımların tane inceltici ve modifiye edici ilavelerinde, döküm yöntemi açısından sertlik değerleri farkı değerlendirildiğinde her bir alaşım için kokil kalıba döküm yönteminde kum kalıba döküme kıyasla % 5'e varan oranda sertlik artışı gözlenmiştir.
8. Etial 110, Etial 140, Etial 160 ve Etial 177 alaşımlarının kalıplama yöntemine göre en yüksek sürtünme katsayısı kum kalıp yöntemi ile üretilen Etial 110 alaşımında 0,38 değeri ile elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı kokil kalıplama yöntemi ile üretilen Etial 140 alaşımında 0,29 değeri ile elde edilmiştir.
9. Kum ve kokil kalıp kullanılarak üretilen alaşımlara TiB ve TiB-Sr ilavesi ile aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir.
10. Kum kalıp yöntemi ile üretilen Etial 110 alaşımında  $1,85 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/N değeri ile en yüksek aşınma oranı elde edilirken kokil kalıp yöntemi ile üretilen Etial 140-TiB-Sr alaşımında  $4,49 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/N değeri ile en düşük aşınma oranı elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Al\_Saadi, H. I. A., ve Tunay, R. F. (2017). *Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi*. **Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**, 5/3, 525–532.
- Alhawari, K. S., Omar, M. Z., Ghazali, M. J., Salleh, M. S., ve Mohammed, M. N. (2015). *Evaluation of the microstructure and dry sliding wear behaviour of thixoformed A319 aluminium alloy*. **Materials and Design**, 76, 169–180.
- Alipour, M., Aghdam, B. G., Rahnoma, H. E., ve Emany, M. (2013). *Investigation of the effect of Al-5Ti-1B grain refiner on dry sliding wear behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy formed by strain-induced melt activation process*. **Materials and Design**, 46, 766–775.
- Alım, B. (2017). **Tavlama Sıcaklığı, Basınç ve Dış Manyetik Alanın Şekil Hafızalı Nanoalaşımın X-Işını Şiddet Oranları ve Valens Elektron Yapıları Üzerine Etkilerinin İncelenmesi**. Atatürk Üniversitesi (Doktora Tezi).
- Alshmri, F., Atkinson, H. V., Hainsworth, S. V., Haidon, C., ve Lawes, S. D. A. (2014). *Dry sliding wear of aluminium-high silicon hypereutectic alloys*. **Wear**, 313/1–2, 106–116.
- Aluminium Association. (2012). *Standard Test Procedure for Aluminum Alloy Grain Refiners: TP-1*. The Aluminium Association, Washington DC.
- Basavakumar, K. G., Mukunda, P. G., ve Chakraborty, M. (2008). *Influence of grain refinement and modification on microstructure and mechanical properties of Al-7Si and Al-7Si-2.5Cu cast alloys*. **Materials Characterization**, 59/3, 283–289.
- Bhushan, B. (2001). *1. Modern Tribology Handbook Volume One Principles of Tribology*. **CRC press LLC**.
- Birol, Y. (2012). *Performance of AlTi5B1, AlTi3B3 and AlB3 master alloys in refining grain structure of aluminium foundry alloys*. **Materials Science and Technology**, 28/4, 481–486.
- Birol, Yücel. (2007a). *Production of Al-Ti-B grain refining master alloys from B2O3 and K2TiF6*. **Journal of Alloys and Compounds**, 443/1–2, 94–98.
- Birol, Yücel. (2007b). *The effect of holding conditions in the conventional halide salt process on the performance of Al-Ti-B grain refiner alloys*. **Journal of Alloys and Compounds**, 427, 142–147.
- Birol, Yücel. (2008). *Production of Al-Ti-B grain refining master alloys from Na2B4O7 and K2TiF6*. **Journal of Alloys and Compounds**, 458/1–2, 271–276.



- Brown, J. R. (1999). *Foseco Non-Ferrous Foundryman's. Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*, /11, 28–38.
- Bryant, M., ve Fisher, P. (1993). *Grain Refining and the Aluminium Industry (Past, Present and Future)*. **Aluminium Casthouse Technology**.
- Buytoz, S., ve Eren, H. (2007). *Al Metal Matris Kompozitlerin Abrasiv Aşınma Performansına Takviye Elemanlarının Etkisi*. **Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 19/2, 209–216.
- Chandrashekharaiah, T. M., ve Kori, S. A. (2009). *Effect of grain refinement and modification on the dry sliding wear behaviour of eutectic Al–Si alloys*. **Tribology International**, 42/1, 59–65.
- Chattopadhyay, R. (2001). **Surface wear: analysis, treatment and prevention**. ASM International.
- Cibula, A. (1949). *The mechanism of grain refinement of sand castings in aluminium alloys*. **Journal of the Institute of Metals**, 76/4, 321–360.
- Çolak, M. (2015). **Alüminyum Döküm Alaşımlarının Katılaşması Sırasında Yarı-Katı Bölge Sıvı Geçirgenliğinin Modellenmesi**. Sakarya Üniversitesi (Doktora Tezi).
- Çolak, M., Deniz, G., Findik, F., ve Yetgin, S. H. (2016). *Investigation Of The Effect Of Adding Cu On Al Alloys For Wear And Friction Properties*. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, 05/07, 448–453.
- Çolak, M., ve Kayıkcı, R. (2009). **AlTiB Mastır Alaşımı İlavesinin Etial160 Döküm Alaşımı Üzerinde Tane İnceltme Etkisinin İncelenmesi**. Karabük.
- Cooper, P., Hardman, A., Boot, B., ve Burhop, E. (2003). *Characterisation of New Generation of Grain Refiners for the Foundry Industry*, 132. **Annual Meeting & Exhibition**.
- Cooper, P., Jacop, A., ve Detomi, A. (2000). *Additive developments in the aluminium industry*. **International Congress of the Aluminium industry**.
- Dahle, A. K., Nogita, K., McDonald, S. D., Dinnis, C., ve Lu, L. (2005). *Eutectic modification and microstructure development in Al–Si Alloys*. **Materials Science and Engineering: A**, 413–414, 243–248.
- Dash, M., ve Makhlof, M. (2001). *Effect of key alloying elements on the feeding characteristics of aluminum–silicon casting alloys*. **Journal of Light Metals**, 1/4, 251–265.
- Davis, J. R. (1998). **Metals Handbook**. ASM International.
- Dinnis, C. M., Dahle, A. K., Taylor, J. A., ve Otte, M. O. (2004). *The influence of strontium on porosity formation in Al-Si alloys*. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 35/11, 3531–3541.

- Dıspınar, D., Nordmark, A., Voje, J., ve Arnberg, L. (2009). *Influence of hydrogen content and bifilm index on feeding behaviour of Al-7Si*. **Shape Casting: 3rd International Symposium 2009**.
- Elleuch, K., Mezlini, S., Guermazi, N., ve Kapsa, P. (2006). *Abrasive wear of aluminium alloys rubbed against sand*. **Wear**, 261/11–12, 1316–1321.
- Eti Alüminyum. (2019). *Dökümhane Ürünleri – Eti Alüminyum*. Tarihinde 06 Şubat 2019, adresinden erişildi <http://www.etialuminyum.com/urunler/ham-aluminyum-urunler/dokumhane-urunleri/>
- Fan, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Qin, T., Zhou, X. R., Thompson, G. E., Pennycook, T., ve Hashimoto, T. (2015). *Grain refining mechanism in the Al/Al–Ti–B system*. **Acta Materialia**, 84, 292–304.
- Gül, F. (2014). *AlSi10Mg D ökümlerinin Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine İkincil Yaşlandırma İşleminin Etkisi*. **Suleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Science**, 18/1, 30–37.
- Gürsoy, Ö., Erzi, E., Dıspınar, D., ve Yüksel, Ç. (2015). *A356 Alüminyum Döküm Alaşımına Al-5Ti-1B Tane İnceltici İlavesinin Süreye Bağlı Etkisi*. **7th Aluminium Symposium** (ss. 318–324). İstanbul.
- Haberl, K., Schumacher, P., Geier, G., ve Stauder, B. (2009). *Characterization of the Melt Quality and Impurity Content of an Lm25 Alloy*. **Metallurgical and Materials Transactions B**, 40/6, 812–821.
- Hutchings, I., ve Philip Shipway. (2017). **Tribology**. Matthew Deans.
- Ibarra, G. (1999). **Control of Grain Refinement of Al-Si Alloys by Thermal Analysis**. **Doktora tezi**. McGill University (Doktora Tezi).
- Jones, G. P., ve Pearson, J. (1976). *Factors affecting the grain-refinement of aluminum using titanium and boron additives*. **Metallurgical Transactions B**, 7/2, 223–234.
- Kaufman, J. G., ve Rooy, E. L. (2004). *Aluminum Alloy Properties, Processes, and Applications*. **Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications** (ss. 1–65).
- Khan, M. A. A., Sheikh, A. K., ve Al-Shaer, B. S. (2017). **Evolution of Metal Casting Technologies**.
- Kim, J. H., Choi, J. W., Choi, J. P., Lee, C. H., ve Yoon, E. P. (2000). *Study on the variation of solidification contraction of A356 aluminum alloy with Sr addition*. **Journal of Materials Science Letters**.
- Koraman, E. (2011). **Al-Fe-V-Si Alaşımlarının Yüksek Sıcaklık Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi**. İstanbul Teknik Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).
- Li, D. (2016). *Block-On-Ring Sliding Wear Evaluation*. Tarihinde 08 Şubat 2019,

adresinden erişildi <https://nanovea.com/App-Notes/block-on-ring.pdf>

- Li, R. ., Li, R. ., Zhao, Y. ., He, L. ., Li, C. ., Guan, H. ., ve Hu, Z. . (2004). *Age-hardening behavior of cast Al–Si base alloy*. **Materials Letters**, 58/15, 2096–2101.
- Lu, L., Nogita, K., McDonald, S. D., Dahle, A. K., Lu, L., ve Dahle, A. K. (2004). *Eutectic solidification and its role in casting porosity formation*. **JOM**, 56/11, 52–58.
- Mahmoud, T. S., ve Mohamed, S. S. (2012). *Improvement of microstructural, mechanical and tribological characteristics of A413 cast Al alloys using friction stir processing*. **Materials Science and Engineering A**, 558, 502–509.
- Mahmudi, R., Sepehrband, P., ve Ghasemi, H. M. (2006). *Improved properties of A319 aluminum casting alloy modified with Zr*. **Materials Letters**, 60/21–22, 2606–2610.
- Mohana, C., ve Rao, K. M. (2018). *ScienceDirect Abrasive wear Behaviour of TiB<sub>2</sub> Fabricated Aluminum 6061*. **Materials Today: Proceedings**, 5/1, 268–275.
- Murray, C. (2013). *ASTM G99 Tip's Perspective Continuous Wear Contact*. Tarihinde 08 Şubat 2019, adresinden erişildi <http://nanovea.com/App-Notes/astm-g99-wear-test.pdf>
- Murty, B. S., Kori, S. A., ve Chakraborty, M. (2002). *Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying*. **International Materials Reviews**, 47/1, 3–29.
- Nogita, K. (2004). *Aluminium phosphide as a eutectic grain nucleus in hypoeutectic Al–Si alloys*. **Journal of Electron Microscopy**, 53/4, 361–369.
- Ohmae, N., Tsukizoe, T., ve Akiyama, F. (1979). *On the microscopic processes involved in metallic friction*. **Philosophical Magazine A: Physics of Condensed Matter, Structure, Defects and Mechanical Properties**, 40/6, 803–810.
- Öksüzöğlü, S. (2018). **Al-Si-Mg Alaşımlarında Tane İnceltme İşleminin Mekanik Özellik ve Mikro Yapı Üzerine Etkisi**. Karabük Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi ).
- Ölmez, S., ve Keleşoğlu, E. (2016). *Alüminyum Silisyum Alaşımların Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. **Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**, 4/1, 31–39.
- Özmen, Y. (2004). *Makine elemanlarının tribolojik hasarları ve uygun malzeme seçimi*. **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 1, 31–37.
- Patil, A. S., Hiwarkar, V. D., Verma, P. K., ve Khatirkar, R. K. (2019). *Effect of TiB<sub>2</sub> addition on the microstructure and wear resistance of Ti-6Al-4V alloy fabricated through direct metal laser sintering (DMLS)*. **Journal of Alloys and Compounds**, 777, 165–173.

- Qiu, K., Wang, R. C., Peng, C. Q., Wang, N. G., Cai, Z. Y., ve Zhang, C. (2015). *Effect of individual and combined additions of Al-5Ti-B, Mn and Sn on sliding wear behavior of A356 alloy*. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, 25/12, 3886–3892.
- Quested, T. E. (2004). *Understanding mechanisms of grain refinement of aluminium alloys by inoculation*. **Materials Science and Technology**, 20/11, 1357–1369.
- R.C. Adams. (1998). **ASM volume (15) Casting. Technology (C. 15)**.
- Ramachandran, T. R., Sharma, P. K., ve Balasubramanian, K. (2008). *Grain Refinement of Light Alloys*. **68th World Foundry Congress**, 189–193.
- Sanders, R. E. (2001). *Technology innovation in aluminum products*. **JOM**, 53/2, 21–25.
- Sarikaya, Ö. (2007). **Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri**.
- Shafyei, A., Anijdan, S. H. M., ve Bahrami, A. (2006). *Prediction of porosity percent in Al-Si casting alloys using ANN*. **Materials Science and Engineering A**, 431, 206–210.
- Shaha, S. K., Czerwinski, F., Kasprzak, W., Friedman, J., ve Chen, D. L. (2015). *Microstructure and mechanical properties of Al-Si cast alloy with additions of Zr-V-Ti*. **Materials and Design**, 83, 801–812.
- Shakhashiri. (2000). *Chemical of the week Aluminium*. **General Chemistry**, 2/1, 2–3.
- Shivaramu, H. T., Umashankar, K. S., ve Prashantha, D. A. (2018). *ScienceDirect Wear Characteristics Comparison of Cast and Powder Metallurgy Based Al and Al-Si Alloy [ LM6 ]*. **Materials Today: Proceedings**, 5/2, 8138–8146.
- Sigworth, G. (1983). *Theoretical and practical aspects of the modification of Al-Si alloys*. **AFS Transactions**.
- Sigworth, G. K., ve Kuhn, T. A. (2007). *Grain Refinement of Aluminum Casting Alloys*. **International Journal of Metalcasting**, 1/1, 31–40.
- Sönmez, S. (2016). **Alüminyum Esaslı Alaşımların Yüksek Sıcaklıkta Aşınma Davranışlarının İncelenmesi**. Yıldız Teknik Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).
- Spittle, J. A. (2006). *Grain refinement in shape casting of aluminium alloys*. **International Journal of Cast Metals Research**, 1.
- Stachowiak, G. W., ve Batchelor, A. W. (2005). **Engineering Tribology**. **Elsiever Butterworth-Heinemann**. Elsiever Butterworth-Heinemann.
- Straffelini, G. (2015). **Friction and Wear**. Cham: Springer International Publishing.
- Tanyel, Z. (2014). **Al-4,5Cu Döküm Alaşımında Tane İnceltme İşleminin Etkisinin Zamanla Değişiminin İncelenmesi**. Gazi Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).

- Teknometal. (2019). *Teknometal | Metal Endüstrisindeki Sağ Kolunuz*. Tarihinde 06 Şubat 2019, adresinden erişildi <http://www.teknometal.com.tr/>
- Tunçay, T. (2016). *A356 Alaşımında Cu Miktarının Mikroyapı ve Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi*. **Politeknik Dergisi**, 19/4, 585–592.
- Uludağ, M. (2018). *Investigation of the Relationship Between Casting Quality, Microstructure and Mechanical Properties in Al-18Si Alloy*. **Uluslararası Muhendislik Arastırma ve Gelistirme Dergisi**, 10/1, 30–41.
- Uludağ, M., Yazman, Ş., Bakırcıoğlu, B., ve Dışpınar, D. (2016). *The Effect of Si Morphology on Machinability of Al-Si Alloys*. **Pamukkale University Journal of Engineering Sciences**, 21/8, 381–385.
- Vargel, C. (2004). *Corrosion of Aluminium*. **Corrosion of Aluminium** (ss. 85–81). Elsevier.
- Vencl, A., Bobić, I., Vučetić, F., Bobić, B., ve Ružić, J. (2014). *Structural, mechanical and tribological characterization of Zn25Al alloys with Si and Sr addition*. **Materials and Design**, 64, 381–392.
- Wen, S., ve Huang, P. (2012). **Principles of Tribology** (2. Baskı).
- Yalçınkaya, F. (2018). **Toz Metalurji Metodu İle Üretilen Alüminyum Matrisli Ve Alümina Takviyeli Kompozit Malzemenin Abrasiv Aşınma Davranışının İncelenmesi**. Gazi Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).
- Yapıcı, C. (2012). **AlTi5B1 Master Alaşımının Alüminyum Basınçlı Döküm Yönteminde Tane İnceltici Olarak Kullanımının İncelenmesi**. İstanbul Teknik Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).
- Yıldız, T., ve Gür, A. K. (2006). *Aşınma Sistemleri*. **Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları**, 4/2, 86–91.
- Yılmaz, R., Özyürek, D., ve Kibar, E. (2012). *Yeniden Çözeltiye Alma Parametrelerinin 7075 Alüminyum Alaşımının Sertlik Ve Aşınma Davranışlarına Etkisi*. **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 27/2, 429–438.
- Zhongwei, C., ve Ruijie, Z. (2010). *Effect of strontium on primary dendrite and eutectic temperature of A357 aluminum alloy*. **Research & Development**, 7/2, 149–152.

## ÖZGEÇMİŞ



**İbrahim ARSLAN**

1991 yılında Bayburt'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini 21 Şubat Kurtuluş İlköğretim okulunda tamamladı ve 2005 yılında mezun oldu. Lise öğrenimini Bayburt lisesinde tamamladı.

2009 yılında Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans eğitimini 2013 yılında tamamladı. 2014 yılında Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tezli yüksek lisans ve Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İş Güvenliği Anabilim Dalı'nda tezsiz yüksek lisans eğitime başladı. Yüksek Lisans eğitimi yaptığı sırada 2013-2016 yılları arasında özel sektörde Makine Mühendisi olarak çalıştı. 2015 yılında İş Güvenliği Anabilim Dalı'ndaki tezsiz yüksek lisansını tamamladı ve aynı yıl B sınıfı İş Güvenliği uzmanı oldu. 2016 yılında Bayburt Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu İş Güvenliği programında Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı ve halen bu görevinde devam etmektedir.

### TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR

Çolak, M. & Arslan, İ., (2018) *Investigation of Wear Properties of Grain Refined and Modified A319 Aluminum Alloy Produced with Sand and Permanent Mold*, International Journal of Science And Engineering Investigations, 7(83), 134-137.

Arslan, İ., Gavgalı, E., & Çolak, M., (2019) *Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Al5Ti1B Ve Al10Sr İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi*. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 7(2), 237-244.